

## II-163 - COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE REATORES ANAERÓBIOS DE MANTA DE LODO E FLUXO ASCENDENTE (UASB) EM DIFERENTES ESCALAS

**Vinícius Ferreira Martins**

Engenheiro Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

**Cristiane Kreutz**

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 (DAAMB/UTFPR).

**Eudes José Arantes**

Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Mestre e Doutor em Engenharia pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Docente do Departamento Acadêmico de Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Campo Mourão (DAAMB/UTFPR).

**Fernando Hermes Passig**

Engenheiro Sanitarista pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre e Doutor em Engenharia 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 (DAQBI/UTFPR).

**Karina Querne de Carvalho<sup>(1)</sup>**

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

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 4900 - Ecoville - Curitiba - PR - CEP: 81280-340 - Brasil  
- Tel: (41) 3279-4500 - e-mail: kaquerne@utfpr.edu.br

### RESUMO

O objetivo deste artigo foi avaliar o comportamento hidrodinâmico e as características hidráulicas de reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB) em escala de bancada, piloto e real. Os reatores R1 (1 L), R2 (160 L) e R3 (18.800 L) foram operados com TDH de 6 h, 10 h e 6 h, respectivamente, tratando esgotos sanitários. Ensaços de estímulo-resposta tipo pulso com Eosina Y como traçador foram realizados por Passig (2005), Hattori et al. (2011) e Martins (2012) para determinar o comportamento hidrodinâmico dos reatores R3, R1 e R2, respectivamente. Para os reatores foram calculadas as características hidráulicas. Os resultados indicaram o efeito de cauda nas curvas de concentração pelo tempo, e nas curvas DTR (exceto para R3) foi notado adiantamento do pico na resposta do traçador. Os três reatores estudados apresentaram N igual a 3, 2 e 5 para R1, R2 e R3, respectivamente, para o modelo N-CSTR em série. Os coeficientes médios de dispersão de PD e GD foram 0,236 e 0,146 para R1, 0,258 e 0,158 para R2 e 0,105 e 0,079 para R3, respectivamente. O número de Reynolds verificado para R1, R2 e R3 foi de 0,67, 10,29 e 100,9, respectivamente, o que indica regime de escoamento laminar nos reatores. O volume de zonas mortas médio para R1, R2 e R3 foi de 0,3%, 17,2% e -50%, respectivamente. Foi notada presença de curtos-circuitos em R1 (ensaio 2) e R2 (ensaios 1 e 2). Dentre os 3 reatores estudados, aferiu-se que R3 apresentou boa eficiência hidráulica ( $\lambda = 8,1$ ). No restante dos ensaios, o comportamento oscilou entre satisfatório ( $0,5 > \lambda < 0,75$ ) para os ensaios 1 e 3 de R1 e insatisfatório ( $\lambda \leq 0,5$ ) para os demais ensaios.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fenômeno de cauda, Número de Reynolds, Eficiência Hidráulica, Zonas Mortas.

### INTRODUÇÃO

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

esgotamento sanitário e que somente 2.109 (37,9%) municípios possuíam algum serviço de tratamento dos esgotos gerados.

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

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

De acordo com Chernicharo (1997), sua aceitação frente aos sistemas biológicos aeróbios convencionais deve-se principalmente a vantagens econômicas associadas à facilidade operacional. Além disso, fatores como menor demanda de área e menor produção de lodo também contribuíram para sua utilização. Dentre os aspectos negativos atribuídos a esse tipo de reator pode-se citar a possibilidade de emanação de maus odores, baixa capacidade do sistema em tolerar cargas tóxicas e a necessidade de etapa de pós-tratamento para atender a legislação vigente. Esse tipo de reator é caracterizado por reter grandes quantidades de biomassa ativa, ser operado em menor tempo de detenção hidráulica, com elevada estabilidade para as flutuações de composição e concentração do afluente (FORESTI, 2002).

Com o uso crescente de reatores UASB, tornou-se necessário também melhor entendimento dos aspectos hidrodinâmicos dos reatores utilizados, pois a maioria dos trabalhos aborda a eficiência de remoção de matéria orgânica, sólidos e de outros parâmetros. Porém, pouco se conhece sobre as características hidrodinâmicas do sistema (PIRES e RIBEIRO, 1992). Autores como Lettinga et al. (1980), Persson et al. (1999), Passig (2005), Peña et al. (2006), Carvalho (2006), Uldal (2008), Lourenço e Campos (2009), Sarathai et al. (2010), Romero et al. (2011), Ji et al. (2012) e Kreutz (2012), dentre outros, têm demonstrado a importância do estudo do comportamento hidrodinâmico de reatores anaeróbios.

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

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

Os regimes do fluxo de escoamento (fluxo pistão, fluxo mistura completa ou ambos) podem ser estabelecidos através das curvas de distribuição do tempo de residência (DTR) que por sua vez podem auxiliar na determinação de parâmetros hidrodinâmicos (TDH real, número de reatores em série, número de dispersão, recuperação do traçador, eficiência hidráulica) e na detecção de anomalias do interior do reator (volume de zonas mortas e presença de curtos-circuitos). Essas anomalias podem prejudicar a eficiência dos reatores no tratamento de efluentes devido à diminuição do volume útil e do tempo de detenção hidráulica necessário ao desempenho da atividade microbiana (PERSSON et al., 1999; LEVENSPIEL, 2000; PASSIG, 2005; CARVALHO et al., 2008).

## MATERIAIS E MÉTODOS

Foi avaliado o comportamento hidrodinâmico de três reatores UASB em escala de bancada, piloto e real, denominados R1, R2 e R3, respectivamente, por meio de ensaios de estímulo-resposta tipo pulso. Uma síntese das condições operacionais nos ensaios hidrodinâmicos de cada reator pode ser observada na Tabela 1.

Para realização dos ensaios de estímulo-resposta tipo pulso foi utilizado o corante Eosina Y, após os reatores R1, R2 e R3 terem alcançado o estado do equilíbrio dinâmico aparente. O método colorimétrico de leitura de absorbância foi aplicado para determinação da concentração do traçador nas amostras dos efluentes dos reatores, com comprimento de onda ( $\lambda$ ) de 516 nm em espectrofotômetro Hach uv-vis, modelo DR/5000. As amostras coletadas do efluente dos reatores foram centrifugadas na centrifuga (Twister 12 T) por cerca de 2 min a 3500 rpm, para evitar a interferência da presença de sólidos na leitura das absorbâncias pelo método colorimétrico.

**Tabela 1 – Condições operacionais dos reatores R1, R2 e R3.**

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

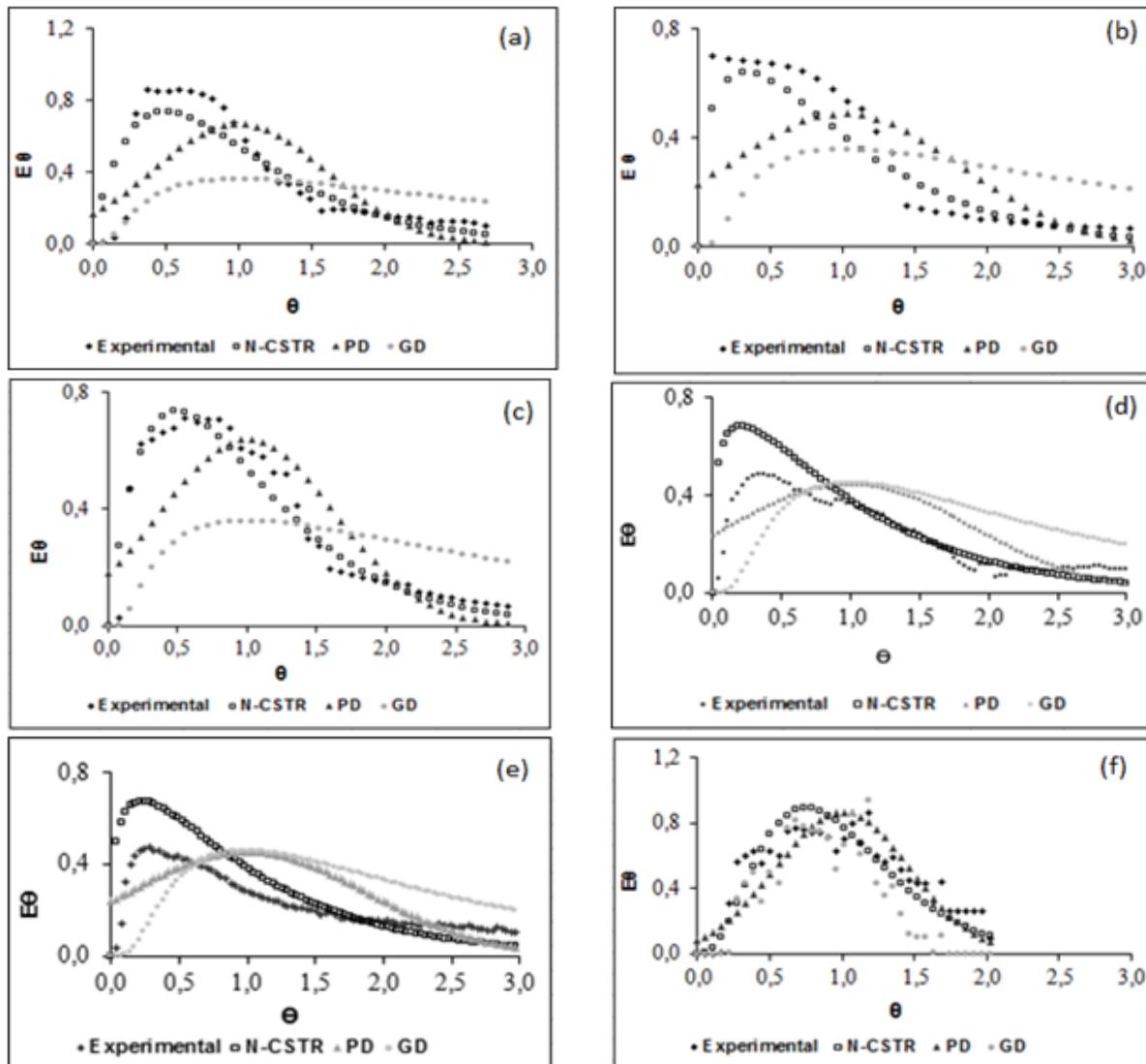
As curvas experimentais da variação de concentração de eosina Y ao longo do tempo, C(t), foram normalizadas de acordo com Levenspiel (2000), através de planilhas no *software* Excel, resultando em curvas de distribuição do tempo de residência hidráulica ( $E_0$ ) em função do tempo adimensional ( $\theta$ ). O ajuste das curvas experimentais do foram estimados com base nos modelos teóricos uniparamétricos de dispersão de pequena (PD) e de grande intensidade (GD) e de tanques de mistura completa em série (N-CSTR) de acordo com Levenspiel (2000).

Para verificar a existência de anomalias nos reatores UASB, foram calculadas as características hidráulicas: tipo do escoamento através do número de Reynolds (Roma, 2006); volume de zonas mortas segundo metodologia proposta por Peña et al. (2006); presença de curtos-circuitos hidráulicos segundo os preceitos de Thackston et al. (1987) e Sarathai et al. (2010); eficiência hidráulica segundo metodologia proposta por Persson et al. (1999) e Sarathai et al (2010).

## RESULTADOS

As curvas de distribuição do tempo de residência (DTR), obtidas a partir dos modelos de tanques de mistura completa em série (N-CSTR) e nos modelos de dispersão de pequena (PD) e grande (GD) intensidade podem ser observadas na Figura 1.

Na Figura 1 é possível observar o fenômeno de cauda nas curvas de DTR em todos os ensaios (com exceção do ensaio 1 de R3) que reflete o decaimento da concentração de eosina Y no efluente dos reatores. Nota-se ainda, pico de concentração do traçador no início das curvas, indicando caminhos preferenciais. No R3 foi possível observar (Figura 1.f) que os modelos de dispersão apresentaram melhor ajuste dos dados experimentais, porém não significa que o ajuste tenha sido satisfatório, porque, mesmo neste modelo, foi grande a dispersão em relação aos valores experimentais.



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

Os resultados dos parâmetros obtidos com o ajuste das curvas de DTR pelos modelos matemáticos teóricos propostos por Levenspiel (2000) estão dispostos na Tabela 2.

**Tabela 2 - Parâmetros obtidos com o ajuste dos dados experimentais para os reatores UASB R1, R2 e R3.**

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

Pela Tabela 2 é possível notar que houve adiantamento do traçador pelo THD real inferior ao TDH teórico, indicando provável presença de curtos circuitos hidráulicos nos reatores R1 e R2. Atraso na resposta do traçador foi observado no ensaio 1 de R3, sendo indicativo da existência de zonas mortas e difusão do traçador na biomassa. Devido à elevada dispersão longitudinal encontrada no parâmetro D/uL nos modelos PD e GD e ao melhor ajuste dos dados experimentais pelo modelo N-CSTR em relação aos demais modelos, pode-se afirmar que o regime de fluxo predominante nos reatores é o regime de mistura completa. As características hidráulicas dos reatores UASB podem ser observadas na Tabela 3.

**Tabela 3 - Características hidráulicas para R1, R2 e R3.**

Reator	Ensaio	Número de Reynolds	Volume de Zonas Mortas (%)	Presença de Curtos-Circuitos ( $\Psi$ )	Eficiência Hidráulica ( $\lambda$ )
<b>R1</b>	1	0,67	-12	0,6	0,6
	2	0,67	18	0,1	0,3
	3	0,67	-5	0,6	0,6
<b>R2</b>	1	10,29	22,5	0,3	0,47
	2	10,29	11,9	0,2	0,47
<b>R3</b>	1	100,9	-50	1,2	8,1

O comportamento observado no número de Reynolds para os 3 reatores pode ser explicado pelo padrão de escoamento laminar, já que o número de Reynolds foi inferior a 2000 (Streeter e Wylie, 1982). Na Tabela 3 é possível observar os valores calculados para o volume de zonas mortas na qual nota-se valores negativos nos ensaios 1 e 3 (-12% e -5%, respectivamente) de R1 e no ensaio 1 de R3 (-50 %). Thackston et al. (1987) e Sarathai et al. (2010) afirmaram que o fluxo com forte efeito de curto-circuito pode ser atribuído quando  $\Psi$  é menor ou igual a 0,3. A partir dessa premissa, os ensaios hidrodinâmicos indicaram a presença de curto-circuito em R1 no segundo ensaio ( $\Psi = 0,1$ ) e nos ensaios 1 e 2 de R2 ( $\Psi = 0,2$ , e  $\Psi = 0,3$ , respectivamente). Verificou-se boa eficiência hidráulica ( $\lambda \geq 0,75$ ) para o ensaio 1 de R3 ( $\lambda = 8,1$ ). Nos demais ensaios, o comportamento oscilou de satisfatório ( $0,5 > \lambda < 0,75$ ) para os ensaios 1 e 3 de R1 e insatisfatório ( $\lambda \leq 0,5$ ) para os demais ensaios, de acordo com Persson et al. (1999).

## CONCLUSÕES

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

Houve presença de caminhos preferenciais pelo pico nas concentrações do traçador no início das curvas de DTR (com exceção da curva relativa a R3). O regime de escoamento predominante nos reatores UASB foi o regime de mistura completa.

Os coeficientes de dispersão calculados para o reator em escala real (R3) foram 0,105 e 0,079 para PD e GD, respectivamente e N igual a 5 para N- CSTR. Através do número de Reynolds concluiu-se que os três reatores estudados apresentaram regime de escoamento laminar.

O volume médio de zonas mortas para R1, R2 e R3 foi de 0,3%, 17,2% e -50% (igual a zero, porém com indicativo de caminhos preferenciais), respectivamente. Foi verificada presença de curtos-circuitos no ensaio 2 de R1 ( $\Psi = 0,1$ ) e nos ensaios 1 e 2 de R2 ( $\Psi = 0,2$  e  $\Psi = 0,3$ , respectivamente).

A eficiência hidráulica foi obtida como boa para R3 ( $\lambda = 8,1$ ), insatisfatória para R2 ( $\lambda = 0,47$ ) e satisfatória para os ensaios 1 e 3 de R1 ( $\lambda = 0,6$ ).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CARVALHO, K.Q. Resposta dinâmica de reator UASB em escala piloto submetido a cargas orgânicas e hidráulicas cíclicas: modelos matemáticos e resultados experimentais. São Carlos, 2006. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.
1. CARVALHO, K.Q., SALGADO, M.T., PASSIG, F.H.; PIRES, E.C. Avaliação hidrodinâmica de reator UASB submetido à variação cíclica de vazão. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.13, n.2, p. 226-235, abr/jun. 2008.
2. CHERNICHARO, C.A.L. Reatores anaeróbios. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, 5. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1997.
3. FORESTI, E. Anaerobic treatment of domestic sewage: established technologies and perspectives. Water Science and Technology. v.45, n.10, p. 181–186, 2002.
4. HATTORI, A.Y., CARVALHO, K.Q., PASSIG, F.H., FREIRE, F.B., JESÚS, M.N. Análise do comportamento hidrodinâmico de um reator UASB em escala de bancada tratando esgoto sanitário sintético. IN: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 16, 2011, Ponta Grossa, PR. Anais.... Ponta Grossa, PR. 2011.
5. JI, J., ZHENG, K; XING, Y; ZHENG, P. Hydraulic characteristics and their effects on working performance of compartmentalized anaerobic reactor. Bioresource Technology, v.116, p.47-52, jul. 2012.
6. KREUTZ, C. Comportamento de reator anaeróbio-aeróbio no tratamento de efluente bovino. Cascavel, 2012. Tese de Doutorado - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2012.
7. LETTINGA, G.A; VEISEN, V.A. F.M; HOBMA, S.W; ZEEUW, W.J; KLAPWIJK, A. Use of the Upflow Sludge Blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. Biotechnology and Bioengineering. v.22, p.699–734. 1980.
8. LEVENSPIEL, O. Engenharia das Reações Químicas. 3 ed. São Paulo. Ed. Edgard Blücher Ltda. 2000.
9. MARTINS, J.E.M. Avaliação hidrodinâmica de um reator UASB tratando esgotos sanitários da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Campo Mourão. Campo Mourão, 2012. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.
10. LOURENÇO, A.M.P; CAMPOS, C.M.M. Hydrodynamic behavior of a lab-scale upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB) operated with an adopted hydraulic retention time (HRT) of 12 hours. Ciência e Agrotecnologia – UFLA, Lavras, v.33, n.4, p.1139-1144, jul./ago. 2009.
11. PASSIG, F.H. Reator anaeróbio híbrido para o tratamento de esgoto sanitário. São Carlos, 2005. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.
12. PEÑA, M.R.; MARA, D.D; AVELLA.G.P. Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates. Water Research, v.50, n.3, p. 445-452, fev. 2006.

13. PERSSON, J; SOMES, N.L.G; WONG, T.H.F. Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. *Water Science and Technology*, v.40, n.3, p.291–300, 1999.
14. PIRES, E.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.
15. ROMA, W.N. L. Fenômenos de Transporte para Engenharia. 2. ed. São Carlos: RIMA. 2006.
16. SARATHAI, Y; KOOTTATEP, T; MOREL, A. Hydraulic characteristics of an anaerobic baffled reactor as onside wastewater treatment system. *Journal of Environmental Sciences*, v.22, p.1319-1326, 2010.
17. ROMA, Woodrow N. L. Fenômenos de Transporte para Engenharia. 2. ed. São Carlos: RIMA. 2006.
18. ROMERO, Dulce. C. M.; LÓPEZ, Alberto.; RODRÍGUEZ, Ramiro. V.; BECERRIL, Elizabeth. L. Hydrodynamic and kinetic assessment of an anaerobic fixed-bed reactor for slaughterhouse wastewater treatment. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v.50, n.3, p. 273-280, mar. 2011.
19. STREETER, V.L; WYLIE, B.E. Mecânica dos fluidos. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1982
20. 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.
21. ULDAL, M. Effect of hydraulic loading variation on a pilot scale UASB reactor treating domestic wastewater at Vapi CETP, India. 2008. Thesis (Master) -Water and Environmental Engineering Department of Chemical Engineering, Lund University, Sweden, 2008.