

II-041 - AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA DE DOIS REATORES UASB E UM FILTRO BIOLÓGICO AERADO SUBMERSO

Juliano Rezende Mudadu Silva⁽¹⁾

Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Fátima Resende Luiz Fia⁽²⁾

Engenheira Agrícola pela Universidade Federal de Lavras. Mestre e Doutora em Engenharia Agrícola (Recursos Hídricos e Ambientais) pela Universidade Federal de Viçosa. Professora do Departamento de Engenharia da UFLA.

Cláudio Milton Montenegro Campos⁽³⁾

Engenheiro Civil pela UFMG. Doutor em Engenharia Ambiental pela University of Newcastle upon Tyne. Professor do Departamento de Engenharia da UFLA.

Ronaldo Fia⁽⁴⁾

Engenheiro Agrícola e Ambiental pela UFV. Doutor em Engenharia Agrícola pela UFV. Professor do Departamento de Engenharia da UFLA.

Luiz Fernando Coutinho de Oliveira⁽⁵⁾

Engenheiro Agrícola UFLA. Doutor em Engenharia Agrícola pela UFV. Professor do Departamento de Engenharia da UFLA.

Endereço: Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG - CEP: 37.200-000 - Brasil - Tel: (35) 3829-1481 - e-mail: julianomudadu@gmail.com; fatimarlf@deg.ufla.br; cmmcampos@deg.ufla.br; ronadofia@deg.ufla.br; coutinho@deg.ufla.br.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar o comportamento hidrodinâmico de um sistema combinado anaeróbio-aeróbio em escala laboratorial no tratamento da vinhaça. O experimento foi composto por dois reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB) em série seguidos por um filtro biológico aerado submerso (FBAS). Os dois reatores UASB foram construídos em acrílico com volume útil de 16 L e o FBAS também montado em acrílico, com volume útil de 13.5 L. A vinhaça, proveniente da cachaçaria Bocaina localizada em Lavras, MG, foi aplicada no sistema em diferentes vazões resultando em duas fases de monitoramento. As vazões aplicadas no sistema e os correspondentes TRHs teóricos aplicados nos reatores UASB1, UASB2 e FBAS foram 14,6 L d⁻¹ e 1,1 d; 1,1 d e 1,0 d (Fase I); 29,5 L d⁻¹ e 0,6 d; 0,6 d e 0,5 d (Fase II), respectivamente. Os perfis hidrodinâmicos constituíram-se de testes estímulo-resposta tipo pulso, utilizando como traçador cloreto de lítio. Foi observado um longo decaimento da concentração de traçador demonstrado por TRHs reais maiores que os teóricos, fenômeno que pode ser atribuído à adsorção do traçador pela biomassa. Observou-se um adiantamento dos picos de concentração em todos os ensaios, o que pode ser explicado pela eventual presença de caminhos preferenciais. Os coeficientes de determinação dos modelos de dispersão indicaram uma maior aproximação do modelo de tanques de mistura completa em série (N-CSTR), com uma média de 1,1; 1,4 e 0,9 reatores de mistura completa (N-CSTR) em série para UASB1, UASB2 e FBAS, respectivamente. Os resultados dos testes hidrodinâmicos realizados nos reatores UASB1, UASB2 e FBAS indicaram forte tendência do escoamento ao regime hidráulico de mistura completa, sendo detectada grande dispersão nas unidades, além da presença de curtos-circuitos e zonas mortas.

PALAVRAS-CHAVE: Dispersão, hidrodinâmica, reatores, vinhaça.

INTRODUÇÃO

O uso combinado dos processos anaeróbio e aeróbio apresenta grande potencial para tratamento dessas águas residuárias. A combinação desses processos possibilita a construção de modelos mais compactos (menor área de implantação da estação), com menor consumo de energia com aeradores, devido a menor demanda de oxigênio dissolvido e menor produção de biomassa (lodo).

Para se garantir um maior êxito no tratamento de águas residuárias torna-se importante o conhecimento das características hidrodinâmicas desses reatores. A hidrodinâmica e o grau de mistura que ocorrem num reator

biológico podem influenciar fortemente o grau de contato entre o substrato e as bactérias, controlando, assim, a transferência de massa e o potencial desempenho dos reatores (LIU et al., 2007 e LIU et al., 2010). Com base no conhecimento da hidrodinâmica, podem ser previstos os tipos de regimes de escoamento (pistão, mistura completa ou ambos), além de detectar a presença de anomalias nos processos que ocorrem no interior dos reatores, tais como caminhos preferenciais, zonas mortas e curto circuitos, que podem reduzir a eficiência destas unidades. Essas anomalias podem prejudicar o desempenho dos reatores no tratamento de efluentes devido à diminuição do volume útil e do tempo de residência hidráulica necessário ao desempenho da atividade microbiana (CARVALHO et al., 2008).

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento hidrodinâmico do sistema combinado anaeróbio/aeróbio empregado no tratamento da vinhaça, por meio de ensaios utilizando o cloreto de lítio como traçador (LiCl).

MATERIAL E MÉTODOS

Os dois reatores anaeróbios de manta de lodo e escoamento ascendente (UASB) foram construídos idênticos, em acrílico com diâmetro interno de 0.18 m, altura total de 0.8 m e volume útil de 16 L, possuindo no topo um separador de fases (separador trifásico). Em sequência, foi instalado um filtro biológico aerado submerso (FBAS) também construído em acrílico com diâmetro de 0.18 m, altura total de 0.5 m e volume útil de 13.5 L. O material suporte utilizado foi conduíte corrugado com 13 mm de diâmetro interno, cortado em gomos de 2 cm, perfazendo 28 cm de altura no FBAS. O afluente do FBAS correspondeu ao efluente proveniente do sistema bifásico, sendo que este entrava pelo fundo do filtro em escoamento ascendente passando pelo material suporte onde ocorria o tratamento.

A vinhaça, proveniente do alambique da Cachaça Bocaina, localizado no município de Lavras-MG, depois de diluída foi aplicada por meio de uma bomba dosadora a solenóide da marca ProMinet®, modelo: CONCEPT Plus, na base do reator UASB 1, em escoamento ascendente, e em seguida, este efluente escoava por gravidade para o segundo UASB, que depois era introduzido, também por gravidade no FBAS. O sistema de tratamento foi monitorado de julho de 2013 a janeiro de 2014. Durante este período o sistema foi submetido a dois diferentes tempos de residência hidráulica (TRH) o que resultou em duas fases de monitoramento. A Fase I teve início no dia 01 de julho e foi mantida até 29 de novembro de 2013. Em seguida, reduziu-se o TRH aplicado nas unidades e o monitoramento do sistema se estendeu até 13 de janeiro de 2014. As vazões aplicadas no sistema e os correspondentes TRHs teóricos aplicados nos reatores UASB1, UASB2 e FBAS foram 14.6 L d⁻¹ e 1.1 d; 1.1 d e 1.0 d (Fase I); 29.5 L d⁻¹ e 0.6 d; 0.6 d e 0.5 d (Fase II), respectivamente.

No final da Fase II foram realizados ensaios hidrodinâmicos para caracterizar os padrões de escoamento das unidades avaliadas, empregando o cloreto de lítio (LiCl) como traçador. A quantidade de traçador utilizada foi calculada com base no volume útil dos reatores UASB e FBAS, além disso, observou-se a faixa de detecção do aparelho. O traçador foi injetado nos três reatores utilizando a metodologia por pulso. Após a introdução do traçador nos reatores UASB 1, UASB 2 e FBAS, respectivamente, as amostras foram coletadas a intervalos de tempos iguais a 15 minutos, armazenadas e, posteriormente, feitas as leituras das concentrações no fotômetro de chama. Durante o ensaio hidrodinâmico foi utilizada uma bomba dosadora especificada anteriormente para cada reator. As condições operacionais dos reatores, a massa de cloreto de lítio injetada e a massa recuperada encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1: Características dos ensaios hidrodinâmico

Características	Unidades		
	UASB 1	UASB 2	FBAS
Vazão (L h ⁻¹)	3,07	3,67	3,29
TRH teórico (d)	0,22	0,18	0,17
Massa LiCl injetada (g)	4,94	4,99	4,15
Massa LiCl recuperada (g)	1,34	1,32	1,20

As curvas experimentais da variação de concentração de cloreto de lítio ao longo do tempo, C(t), foram normalizadas (área sobre a curva igual a 1) de acordo com LEVENSPIEL (2000), resultando em curvas de

distribuição do tempo de residência hidráulica (C_0) em função do tempo adimensional (θ). Após a normalização, foi possível calcular a variância para cada ensaio (σ^2). Um resumo das definições das variáveis empregadas para obtenção da curva de distribuição do tempo de residência hidráulica (C_0) em função do tempo adimensional (θ) pode ser observado na Tabela 2. O ajuste das curvas experimentais de distribuição do tempo de residência hidráulica em função do tempo adimensional foi realizado com base nos modelos teóricos uniparamétricos de dispersão de pequena (PD) e de grande intensidade (GD) e de tanques em série (N-CSTR) de acordo com LEVENSPIEL (2000) (Tabela 3). Essas características podem ser verificadas pelo número de dispersão (d) para os modelos de pequena e grande dispersão ou pelo número (N) de reatores de mistura completa em série para o modelo N-CSTR. A estimativa desses parâmetros foi realizada pela variância dos dados de resposta apresentados na Tabela 3.

Tabela 2: Equações utilizadas para a obtenção da curva de distribuição do tempo de residência hidráulica ($E(t)$) em função do tempo adimensional.

Equação	$E(t) = \frac{C}{\sum_i C_i \Delta t_i} \quad \bar{t} = \text{TRH}_{\text{real}} = \frac{\sum_i t_i C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} \quad \sigma^2 = \frac{\sum_i t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} - \bar{t}^2 \quad \sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2}$			
Variáveis	$E(t)$: distribuição do tempo de residência do fluido; \bar{t} : tempo de residência hidráulica médio (h); t : tempo decorrido durante a análise com traçador (h); $C(t)$: concentração de saída do traçador no tempo (t) (mg L^{-1}); σ^2 : variância da distribuição do tempo de residência do fluido (h^2). σ_θ^2 : variância normalizada da distribuição do tempo médio de residência;			

Tabela 3: Variáveis usadas para obtenção da curva de distribuição do tempo de residência hidráulica (C_0) em função do tempo adimensional (θ)

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

$C_{(\theta)}$: distribuição normalizada do tempo de residência do fluido no interior da unidade; θ : tempo de residência hidráulica médio normalizado (adimensional); D : coeficiente de dispersão ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$); u : velocidade média de escoamento do fluido na unidade (m h^{-1}); L :

comprimento do percurso na unidade (m); D/uL : número de dispersão (d) (adimensional); \bar{t} : tempo residência hidráulica médio (h); σ_θ^2 : variância normalizada da distribuição do tempo médio de residência; σ^2 : variância da distribuição do tempo médio de residência.

RESULTADO E DISCUSSÃO

As curvas de variação das concentrações de cloreto de lítio ao longo do tempo nas amostras dos efluentes dos reatores UASB1, UASB2 e FBAS, para os ensaios hidrodinâmicos realizados são apresentadas na Figura 1.

Durante os ensaios, observou-se a saída de Li^+ durante todo o período de coleta no UASB 1, UASB 2 e no FBAS e seus valores foram decaindo conforme o tempo foi passando. Os testes foram encerrados com, aproximadamente, 47,5 horas, mesmo sem ter atingido, como resposta da última leitura, o valor da concentração igual a zero. Nota-se também, a saída de Li^+ no efluente dos reatores UASB1, UASB2 e FBAS durante as primeiras horas de avaliação dos ensaios, o que demonstra a ocorrência de curtos circuitos. Pode ser observada uma “cauda” acentuada na curva resposta experimental que pode representar uma difusão do traçador em zonas mortas dentro do reator ou uma retenção devido às interações entre o Li^+ , a biomassa e ou o material suporte do FBAS. Além do adiantamento dos picos observados em todos os ensaios, nota-se, também,

a ocorrência de pequenos picos intermediários, que podem representar a existência de recirculação interna em todas as unidades avaliadas (LEVENSPIEL, 2000).

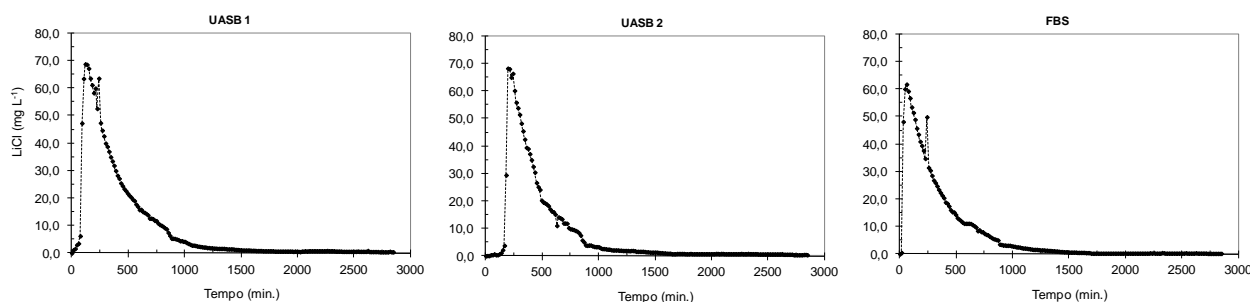


Figura 1: Variação das concentrações de cloreto de lítio ao longo do tempo nas amostras do efluente dos reatores UASB1, UASB2 e FBAS

PEÑA et al. (2006) estudaram o comportamento hidrodinâmico de um reator UASB com volume de 296 m³, por meio de ensaios de estímulo-resposta tipo pulso, com o traçador cloreto de lítio. Os autores observaram a ocorrência do fenômeno de cauda, atribuindo o efeito a estagnação de algumas áreas no interior do reator. LIMA et al. (2004), LOURENÇO e CAMPOS (2009), SARATHAI et al. (2010) também observaram o mesmo fenômeno.

Os valores obtidos para recuperação da massa do traçador injetada nos reatores UASB1, UASB2 e FBAS foram de 27%, 26% e 29%, respectivamente. A massa do traçador recuperada por SARATHAI et al. (2010) variou entre 50% e 97% da massa injetada no ensaio, em todas as condições experimentais. Os autores consideram os valores baixos quando comparado aos valores observados na literatura (> 95%). No entanto, cita que atenção deve ser dada a tendência da curva de DTR, visto que a forma da curva permite retirar informações importantes sobre os mecanismos predominantes, tais como zonas estagnadas, curtos circuitos, entre outros.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos com o ajuste das curvas de distribuição do tempo de residência aos modelos uniparamétricos de dispersão de pequena (PD), de grande intensidade (GD) e de tanques em série (N-CSTR), para os reatores UASB 1, UASB 2 e FBAS (LEVENSPIEL, 2000).

Tabela 4: Resultados obtidos com o ajuste das curvas de distribuição do tempo de residência aos modelos uniparamétricos de dispersão de pequena (PD), de grande intensidade (GD) e de tanques em série (N-CSTR), para os reatores UASB 1, UASB 2 e FBAS

Reator	TRH teórico (h)	TRH real (h)	N-CSTR	PD (D/uL)	GD (D/uL)	Coeficiente de determinação		
						N-CSTR	PD	GD
UASB1	0.22	0.30	1.1	0.4425	0.2303	0.8346	0.5295	0.4495
UASB2	0.18	0.36	1.4	0.3452	0.1942	0.7228	0.4344	0.4998
FBAS	0.17	0.24	0.9	0.5277	0.2591	0.8540	0.5622	0.3703

Observa-se na Tabela 4 que o TRH real foi superior ao TRH teórico em 36, 100 e 41% para UASB1, UASB2 e FBAS, respectivamente. Esses resultados demonstraram atraso na resposta do traçador, o que pode estar vinculado à adsorção do traçador na biomassa ou à existência de zonas com recirculação interna ou de zonas mortas no interior dos reatores UASB e FBAS, caracterizadas por regiões isoladas ou inacessíveis, onde o fluido nelas aprisionado não interage com as regiões ativas. O traçador possivelmente se difundiu nestas zonas mortas, sendo liberado aos poucos, o que provocou atraso em sua resposta na saída das unidades experimentais e gerou o fenômeno de cauda longa, como foi observado nas curvas experimentais (Figuras 1).

LOURENÇO e CAMPOS (2009) estudando o comportamento hidrodinâmico de um reator UASB em escala de bancada (12,1 L), operado com vazão de 1,03 L h⁻¹ e TRH de 12 h por meio de ensaios de estímulo-resposta tipo pulso com cloreto de lítio, também observaram atraso na resposta do traçador, sendo que o TRH real (38 h) foi maior que o TRH teórico (12 h) e também atribuíram o ocorrido à adsorção do traçador na biomassa.

Observando os dados da Tabela 4, nota-se que o modelo teórico de N-CSTR em série forneceu resultados para UASB1, UASB2 e FBAS iguais a 1,1; 1,4 e 0,9 reatores de mistura completa (N-CSTR) em série, respectivamente. Com isso, constata-se que para uma vazão média de aproximadamente, 3 L h^{-1} e levando em consideração a baixa relação altura/diâmetro, o comportamento hidrodinâmico dos reatores UASB e FBAS se aproximaram do reator de mistura completa. De acordo com ARCEIVALA (1981), LEVENSPIEL (2000) e DI IACONI et al. (2005), a taxa de produção de biogás, a velocidade ascensional do líquido, a geometria do reator, a profundidade do leito e da manta de lodo entre outros fatores podem influenciar no padrão de mistura de reatores UASB e consequentemente no seu comportamento hidrodinâmico.

Os valores do número de dispersão (D/uL) verificados nos modelos de pequena e grande intensidade de dispersão foram elevados, indicando grande dispersão longitudinal do fluido e grau de mistura elevado no interior das unidades experimentais. O número de dispersão do modelo de PD obtido para as unidades experimentais foi maior que 0,25, o que demonstra um escoamento com grande intensidade de dispersão (METCALF e EDDY, 2003). O número de células em série (N) reforça esse conceito, uma vez que quanto menor, maior o grau de mistura. LOURENÇO e CAMPOS (2009) também observaram um comportamento hidrodinâmico tendendo ao escoamento disperso de grande intensidade para um reator UASB, com coeficiente de dispersão de 0,2675. PEÑA et al. (2006) constataram comportamento hidrodinâmico tendendo a fluxo de mistura completa para um reator UASB, com coeficientes de dispersão variando de 0,15 a 0,66.

CARVALHO et al. (2008) observaram para um reator UASB, o comportamento próximo ao mistura completa com 4 e 5 reatores de mistura completa (N-CSTR) em série. Os coeficientes de dispersão de pequena intensidade foram de 0,112 e 0,121, e 0,075 e 0,079 para grande intensidade. RINCÓN et al. (2011) obtiveram número de dispersão variando de 0,140 a 0,270 para o modelo de PD e de 0,102 a 0,163 para o de GD. Assim, nota-se que os valores encontrados no presente trabalho estão dentro da faixa de valores observados na literatura.

Pela análise das curvas DTR (Figura 2) e dos coeficientes de determinação (Tabela 4), pode-se observar que o modelo uniparamétrico N-CSTR em série apresentou melhor ajuste aos dados experimentais. Os modelos uniparamétricos de dispersão de PD e GD não se ajustaram bem aos dados experimentais, devido aos baixos valores de R^2 . E apesar do ajuste destes modelos não ter sido satisfatório devido a grande dispersão em relação aos valores experimentais, os ensaios não atenderam uma das premissas para aplicação dos modelos de dispersão ($D/uL < 0.01$ e dispersão idêntica dentro e fora do volume de controle) (LEVENSPIEL, 2000).

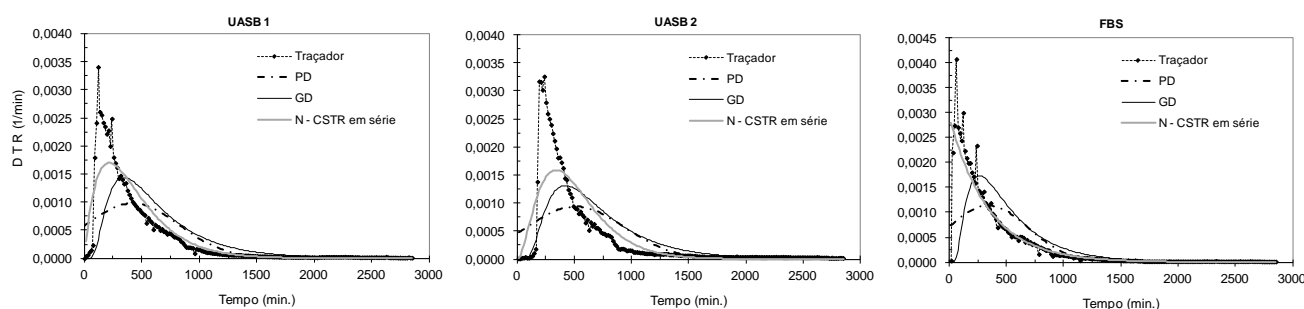


Figura 2: Resultados dos ajustes estatísticos dos dados do traçador aos modelos uniparamétricos de dispersão de pequena (PD), de grande intensidade (GD) e de tanques em série (N-CSTR), para os reatores UASB1, UASB2 e FBAS.

A elevada dispersão longitudinal (D/uL) observada nas unidades avaliadas pela aplicação dos modelos de PD e GD e o melhor ajuste dos dados experimentais pelo modelo N-CSTR em relação aos demais modelos, além da reduzida relação altura/diâmetro, reforça que o regime de escoamento predominante nos reatores UASB1, UASB2 e FBAS foi o de mistura completa.

Diante da avaliação dos dados, constata-se a ocorrência de escoamento tendendo a mistura completa para todas as unidades avaliadas e que o modelo CSTR com algum grau de curto-circuito, zonas mortas e desvios de fluxo melhor descreveu a hidrodinâmica das unidades avaliadas. Estudos sobre a hidrodinâmica de reatores tipo UASB têm mostrado que estes são mais bem descritos pelo modelo CSTR (REN et al., 2009; ZHENG et

al., 2012), com alguns curtos-circuitos, zonas mortas e desvios de escoamento (bypass). Já para o FBAS há poucos relatos na literatura, necessitando de mais estudos para consolidar o modelo que melhor se adéqua a hidrodinâmica deste tipo reator.

CONCLUSÃO

As curvas de DTR evidenciam pico nas concentrações do traçador no início das curvas, indicativo da presença de caminhos preferenciais.

Com os ensaios hidrodinâmicos foi possível concluir que o regime de escoamento predominante nos reatores UASB1, UASB2 e FBAS foi o regime de mistura completa. Os coeficientes de dispersão para os modelos de PD e GD e o número de tanques em série (N-CSTR) obtidos para os reatores UASB 1, UASB2 e FBAS foram de 0,44; 0,23 e 1,1; 0,34; 0,19 e 1,4; 0,53; 0,26 e 0,9, respectivamente.

Os valores do número de dispersão (D/uL) verificados nos modelos de dispersão de pequena e grande dispersão foram elevados, indicando grande dispersão longitudinal do fluido e grau de mistura elevado no interior das unidades. E que o modelo N-CSTR em série foi o que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à Fapemig pelo apoio financeiro concedido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS

1. ARCEIVALA, S. J. **Wastewater Treatment and Disposal**. New York and Basel: Marcel Dekker Inc. 1981. 892 p.
2. CARVALHO, K. Q.; SALGADO, M. T.; PASSIG, F. H.; PIRES, E. C. Avaliação hidrodinâmica de reator UASB submetido à variação cíclica de vazão. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.13, n. 2, p.226-235, 2008.
3. DI IACONI, C.; RAMADORI, R.; LOPEZ, A.; PASSINO, R. Hydraulic shear stress calculation in a sequencing batch biofilm reactor with granular biomass. **Environmental Science and Technology**, v.39, p.889–894, 2005.
4. LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas**. 3 ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 2000, 563 p.
5. LIMA, C. A. A. L.; SILVEIRA, A.; ZAIAT, M. Considerações sobre ensaios hidrodinâmicos em reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF) tratando esgoto sanitário. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 3., 2004, Brasília. **Anais...** Brasília: UCB, 2004. 1 CD-ROM.
6. LIU, R.; TIAN, Q.; CHEN, J. The developments of anaerobic baffled reactor for wastewater treatment: A review. **African Journal of Biotechnology**, v.9, n.11, p.1535-1542, 2010.
7. LIU, XIAO-LEI; REN, NAN-QI; WAN, CHUN-LI. Hydrodynamic characteristics of a four-compartment periodic anaerobic baffled reactor. **Journal of Environmental Sciences**, v.19, p.1159-1165, 2007.
8. 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**, v.33, n.4, p.1139-1144, 2009.
9. METCALF e EDDY, Inc. **Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse**. 4. ed. New York: Mc Graw Hill, 2003,1848p.
10. 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.40, n.85, p.445-452, 2006.
11. REN, TING-TING; MU, YANG; NI, BING-JIE; YU, HAN-QING. Hydrodynamics of Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors. **AIChE Journal**, v.55, n.2, p.516-528, 2009.
12. RINCÓN, N.; GALINDO, A.; PÉREZ, J. Evaluación del comportamiento hidráulico en un reactor anaeróbio de doble cámara (RADCA). **Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia**, v.61, p.53-63. 2011.

13. SARATHAI, Y.; KOOTTATEP, T.; MOREL, A. Hydraulic characteristics of an anaerobic baffled reactor as onsite wastewater treatment system. **Journal of Environmental Sciences**, v.22, n.9, p. 1319-1326, 2010.
14. ZHENG, M. X.; WANG, K. J.; ZUO, J. E.; YAN, Z.; FANG, H.; YU, J. W. Flow pattern analysis of a full-scale expanded granular sludge bed-type reactor under different organic loading rates. **Bioresource Technology**, v.107, p.33-40, 2012.