



XI SILUBESA

Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

28/03 a 02/04/2004 - Natal - Rio Grande do Norte - Brasil

II-055 - MODELO MATEMÁTICO SIMPLIFICADO PARA RESPOSTA DINÂMICA DE REATORES UASB SUBMETIDOS A VAZÃO CÍCLICA DIÁRIA

Carvalho, Karina Querne⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade Estadual de Maringá. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutoranda em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

Pires, Eduardo Cleto⁽²⁾

Engenheiro Mecânico formado pela Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP. Mestre em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Presidente da Comissão do Programa de Aperfeiçoamento do Ensino da EESC/USP. Membro do Conselho do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Trabalhador São Carlense, 400 - Centro – São Carlos - SP - CEP: 13566-590 - Brasil - Tel: (16) 273-9560

 kaquerne@sc.usp.br

RESUMO

Poucos estudos são reportados na literatura quando o reator UASB é submetido a variações cíclicas diárias, de cargas orgânicas e hidráulicas, em períodos curtos de duração iguais ou menores que 24 h, com os quais verifica-se queda na eficiência do sistema causada pela provável ocorrência de flotação dos grânulos, problemas com geração de odor e alta concentração de sólidos suspensos no efluente. Para compreender os eventuais amortecimentos e atrasos nas respostas desses reatores quando submetidos a essas variações, desenvolveu-se um modelo matemático simplificado baseado no modelo hidrodinâmico de mistura completa em reatores em série com cinética de reação de primeira ordem para consumo de substrato (DQO) e cinética de *Monod* para crescimento da biomassa (SSV). Esse modelo indicou a capacidade do reator de amortecer as variações impostas. Nesse trabalho, procurou-se aplicar o modelo matemático simplificado para avaliar a resposta dinâmica de reatores UASB na remoção de matéria orgânica, quando submetidos a variações cíclicas da vazão afluente. A resolução numérica do modelo foi efetuada pelo programa *Matlab*. Para os casos simulados nesse trabalho foi possível verificar que a introdução da vazão senoidal não causou efeitos significativos sobre a eficiência média de remoção de matéria orgânica e de sólidos suspensos voláteis.

PALAVRAS-CHAVE: Comportamento dinâmico, variação cíclica de vazão, carga orgânica, carga hidráulica, modelação matemática, UASB.

INTRODUÇÃO

Estudos sobre o comportamento dinâmico de reatores UASB no tratamento de águas residuárias domésticas e industriais, quando submetidos a cargas de choque hidráulicas ou orgânicas de curta duração, demonstram em geral, sua capacidade de absorção das cargas de choque e recuperação das condições iniciais do processo. Porém, observou-se em algumas ocasiões, entre outras ocorrências, a flotação dos grânulos, problemas com geração de odor, alta concentração de sólidos suspensos no efluente e queda na eficiência do reator.

Não são reportados na literatura relatos extensos sobre o comportamento dinâmico desse tipo de reator quando submetido a cargas cíclicas de curta duração, típicas de instalações de tratamento de esgoto doméstico.

Alguns estudos demonstram a capacidade desses reatores em amortecer flutuações cíclicas impostas à vazão afluenta e que esse amortecimento é inerente aos fenômenos bioquímicos e hidrodinâmicos que ocorrem no reator UASB e não ao efeito de escala, (Pires et al., 2001).

Nesse trabalho, por meio de um equacionamento matemático simplificado, procura-se avaliar a resposta dinâmica de reatores UASB, na remoção de matéria orgânica, quando submetidos a variações cíclicas da vazão afluenta.

O modelo é baseado no regime de escoamento contínuo de mistura completa em reatores em série com cinética de reação de primeira ordem para consumo de substrato e cinética de *Monod* para crescimento da biomassa, conforme reportado na literatura (Batstone et al., 1997). A resolução numérica do modelo foi efetuada pelo programa *Matlab*.

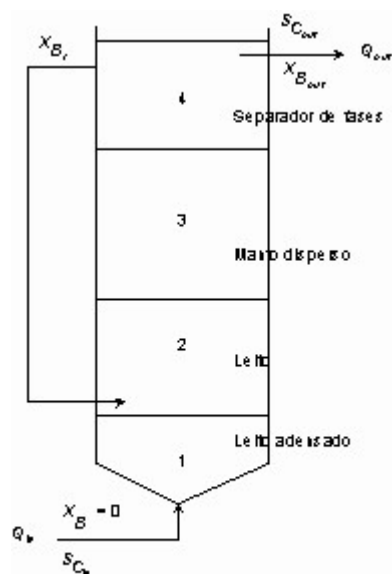
MODELO MATEMÁTICO SIMPLIFICADO

No reator UASB existem duas importantes regiões que complementam-se: a de reações biológicas e a de sedimentação. Na primeira, ocorre a transformação de compostos orgânicos do resíduo a metano e dióxido de carbono, durante a passagem de fluxo ascendente de águas residuárias através de uma camada de lodo altamente ativo. Um separador de fases gás-sólido-líquido, fixado no topo do reator, permite a coleta do gás produzido, a sedimentação do lodo suspenso por bolhas aderidas e a saída da água tratada.

Aspectos hidrodinâmicos de reatores UASB e da cinética da digestão anaeróbia influem na construção do modelo conceitual do reator UASB, base para a dedução dos modelos matemáticos. A hidrodinâmica dos reatores tem papel importante, pois pode influenciar a velocidade das reações biológicas, por meio de alterações na taxa de transferência de massa e na distribuição das reações ao longo do reator.

Nesse trabalho o reator foi dividido em cinco compartimentos em série, com os quatro primeiros compartimentos considerados reativos e o 5º compartimento como um separador da biomassa, a qual retorna em parte para o segundo compartimento (Figura 1). Esse separador de biomassa, apesar de possuir volume, não acumula biomassa ou substrato. Essa configuração foi adotada para simplificar o equacionamento matemático, simular o escoamento do lodo que ocorre em um reator UASB e eliminar regiões mortas e recirculações hidráulicas.

Figura 1: Esquema conceitual do reator UASB dividido em 5 compartimentos.



Nesse balanço simplificado foi considerado apenas o processo de conversão do substrato (DQO) em biomassa ativa

(SSV), o que ocasiona a remoção da matéria orgânica. Com essas simplificações os termos de consumo de substrato e produção de biomassa ativa podem ser modelados conforme procedimentos bem definidos, descritos, por Dochain e Vanrolleghem (2001) e Olsson e Newell (1999).

Para simular a variação horária da vazão afluyente considerou-se que essa variável possui comportamento senoidal, com período de 24 horas, estabelecendo-se a amplitude como uma das variáveis estudadas, equação (1).

Considerando-se, por hipótese, que o reator possui volume constante, o balanço hidráulico é o mesmo para todos os compartimentos, nas duas configurações estudadas, e se resume a:

$$Q_{in} = Q_{out} = \bar{Q}(1 + \alpha \sin \omega t) \quad (1)$$

onde Q é a vazão ($L.T^{-1}$); $\bar{Q}$ é a vazão média afluyente ($L.T^{-1}$); α é metade da amplitude decimal relativa da variação da vazão, que pode assumir valores entre zero e um (adimensional); ω é a frequência da variação da vazão (T^{-1}). Os índices *in* e *out* indicam os dados de entrada e de saída do reator, respectivamente.

A Tabela 1 indica as equações de balanço de massa do substrato e da biomassa para os compartimentos reativos (1, 2, 3 e 4) para o separador de fases (5).

Tabela 1: Equações de balanço de massa do substrato e da biomassa.

Substrato	Biomassa
Compartimentos 1, 3 e 4	
$\frac{dS_{C1}}{dt} = \frac{Q}{V_1}(S_{Cin} - S_{C1}) - \frac{1}{Y_B} \mu_{max1} \left(\frac{S_{C1}}{K_{S1} + S_{C1}} \right) X_{B1}$	$\frac{dX_{B1}}{dt} = -\frac{Q}{V_1} X_{B1} + \mu_{max1} \left(\frac{S_{C1}}{K_{S1} + S_{C1}} \right) X_{B1}$
Compartimento 2	
$\frac{dS_{C2}}{dt} = \frac{Q}{V_2}(S_{C1} - S_{C2}) - \frac{1}{Y_B} \mu_{max2} \left(\frac{S_{C2}}{K_{S2} + S_{C2}} \right) X_{B2}$	$\frac{dX_{B2}}{dt} = \frac{Q}{V_2}(X_{B1} - X_{B2}) + C_S Q \frac{X_{B4}}{V_5} + \mu_{max2} \left(\frac{S_{C2}}{K_{S2} + S_{C2}} \right) X_{B2}$
Compartimento 5	
$S_{Cout} = S_{C4} = S_{C5}$	$X_{B5} = X_{B4}(1 - C_S)$

Os símbolos empregados nas equações de balanço de massa estão indicados na Tabela 2.

A resolução numérica desse sistema de equações diferenciais é apresentada graficamente com a variação de DQO efluente (S_{Cout}) ao longo do tempo (t).

Tabela 2: Símbolos empregados no equacionamento do reator e unidades.

Símbolo	Significado	Unidade
C_S	Coefficiente de separação do compartimento 5	–
K_S	Constante de meia saturação para o substrato	$M(DQO).L^{-3}$
$\mu_{\max}$	Velocidade máxima de crescimento de biomassa	T^{-1}
S_C	Concentração de substrato	$M.L^{-3}$
V	Volume	L^3
X_B	Concentração de biomassa ativa	$M.L^{-3}$
Y_B	Coefficiente de conversão de substrato em biomassa	$M(SSV)/M(DQO)$
$2 a 5$	Subíndices que indicam os compartimentos	–
r	Subíndice que indica retorno, ou recirculação interna	–

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um modelo matemático simplificado foi desenvolvido para avaliar a resposta dinâmica de reatores UASB, quando submetidos a variações cíclicas diárias, na remoção de DQO. Os valores iniciais utilizados para os parâmetros cinéticos no modelo foram aqueles determinados por Paula Jr. e Foresti (1992). Como parâmetro de calibração foi empregado o valor de $\mu_{\max}$, uma vez que estudos anteriores mostraram ser esse o parâmetro de maior influência sobre o resultado. Seu valor foi ajustado para que a simulação matemática apresentasse resultados teóricos próximos dos resultados experimentais. A Tabela 3 indica os valores numéricos dos parâmetros do modelo.

Os parâmetros cinéticos e estequiométricos foram considerados constantes ao longo do reator, uma vez que não foram coletados dados experimentais que permitissem qualquer suposição quanto à suas variações espaciais ou temporais.

Tabela 3: Valores numéricos dos parâmetros do modelo.

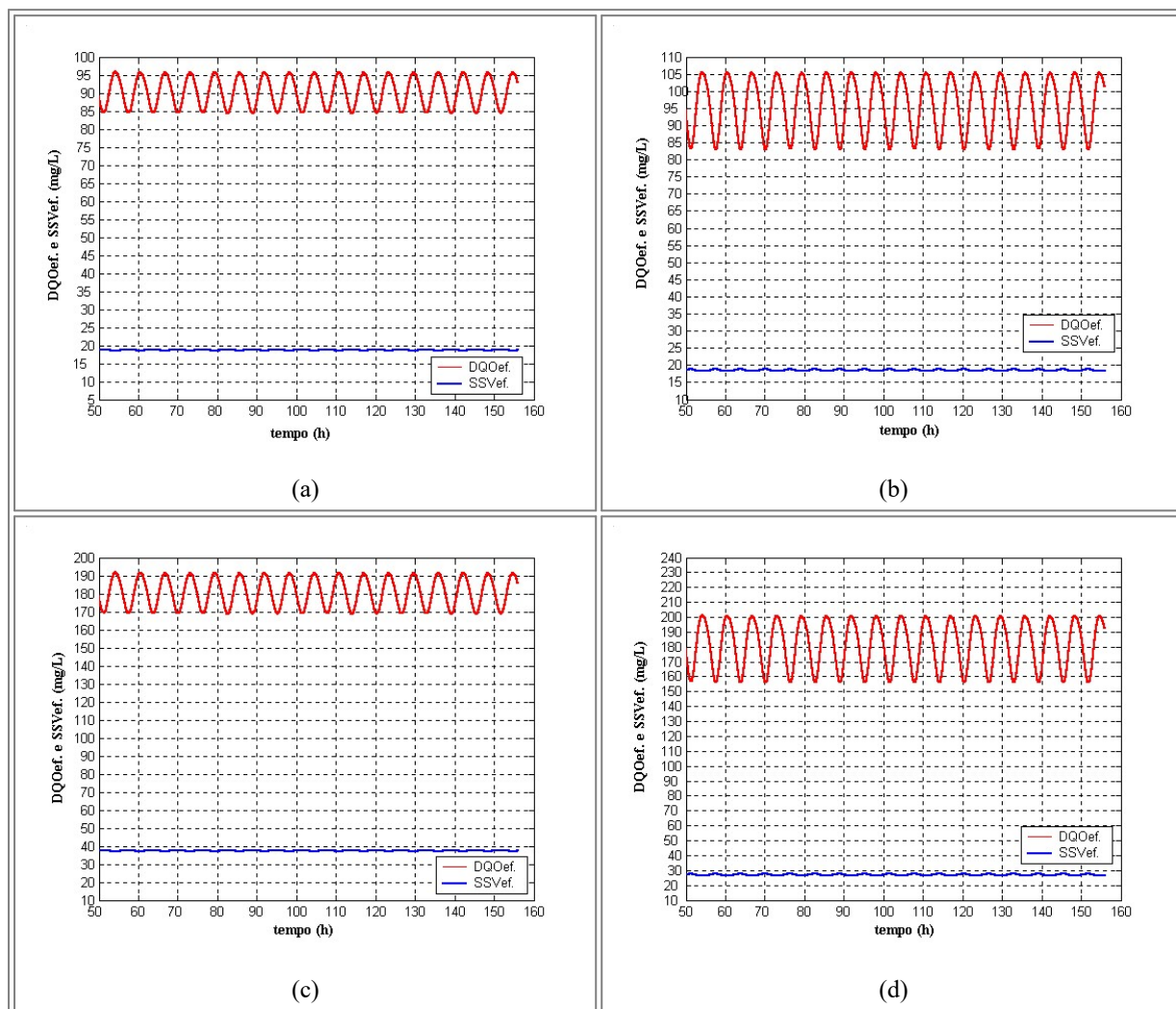
Símbolo	Significado	Valor	Unidade
α	Metade da amplitude da vazão	0,25 e 0,5	–
C_S	Coefficiente de separação (separador de fases)	0,8	–
K_S	Constante de meia saturação para o substrato	82	$mgDQO.l^{-1}$
$Q_{média}$	Vazão média	1,31	$l.h^{-1}$
$\mu_{\max}$	Velocidade máxima de crescimento de biomassa	0,001* 0,0005**	h^{-1}
S_C	Concentração de substrato afluente	500 e 1.000	$mgDQO.l^{-1}$
TDH	Tempo de detenção hidráulica médio	8,02	h
X_B	Concentração inicial de biomassa ativa	30000	$mgSSV.l^{-1}$
Y_B	Coefficiente de conversão de substrato em biomassa	0,15	$mgSSV/mgDQO$

*- para S_C afluente de 500 $mgDQO.l^{-1}$

** - para S_C afluente de 1000 $mgDQO.l^{-1}$

Os resultados das simulações são apresentados na Figura 2. As primeiras horas da simulação que correspondem ao alcance de um regime estável a partir de uma dada condição inicial, não aparecem nos gráficos por não ser esse o interesse desse trabalho.

Figura 2: Resposta do modelo para DQO afluente: (a) e (b) vazão afluente variando em torno de $\pm 25\%$ e $\pm 50\%$, respectivamente, em relação ao valor médio (500 mg.l^{-1}); (c) e (d) vazão afluente variando em torno de $\pm 25\%$ e $\pm 50\%$ %, respectivamente, em relação ao valor médio (1000 mg.l^{-1}).



Observa-se, que a introdução da vazão senoidal não causa efeitos significativos sobre a eficiência média de remoção de DQO. Esse parâmetro fica em torno de 81%, qualquer que seja a amplitude da vazão de entrada e a DQO. O mesmo comportamento também é observado com relação aos sólidos suspensos.

CONCLUSÕES

O modelo matemático simplificado apresenta resultados que corroboram as observações experimentais de trabalhos anteriores, ou seja, a capacidade do reator UASB em amortecer flutuações cíclicas impostas à vazão afluente.

Para os casos simulados nesse trabalho foi possível verificar que a introdução da vazão senoidal não causou efeitos significativos sobre a eficiência média de remoção de DQO e de sólidos suspensos voláteis.

AGRADECIMENTOS

Pelo apoio recebido, os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP

(Projeto temático nº. 01/05489-0, Bolsa de doutorado da Eng. Karina Q. de Carvalho nº. 02/00683-6), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Bolsa de Pesquisa para o Prof. Eduardo C. Pires nº. 300038/88-7 e de mestrado para a Eng. Karina Q. de Carvalho) e ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade de São Paulo em São Carlos -Escola de Engenharia de São Carlos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BATSTONE, D., KELLER, J., NEWELL, B., NEWLAND, M. Model development and full-scale validation for anaerobic treatment of protein and fat based wastewater. *Water Science and Technology*, v. 36, n. 6-7, p. 423-431, 1997.
2. DOCHAIN, D. E VANROLLEGHEM, P.A. *Dynamical Modelling and Estimation in Wastewater Treatment Processes*. IWA Publishing, London, 2001.
3. OLSSON, G.; NEWELL, B. *Wastewater Treatment Systems: Modelling, Diagnosis and Control*. London: IWA Publishing, 1999.
4. PAULA JR., D. R., FORESTI, E. Kinetics studies on a UASB reactor subjected to increasing COD concentration. *Water Science and Technology*, v. 25, p. 103-111, 1992.
5. PIRES, E. C.; PIRES, R. C.; BATISTA, K. B.; CARVALHO, K. Q. Dynamic behaviour of UASB reactors submitted to cyclical loads. In: 9th CONGRESS ON ANAEROBIC DIGESTION, 2001, Antuérpia, Bélgica, Anais, p. 219-221, 2001.