



II-230 – PROPOSTA DE MODELO MATEMÁTICO SIMPLIFICADO PARA AVALIAR A RESPOSTA DINÂMICA DE REATOR UASB SUBMETIDO A CARGAS HIDRÁULICAS CÍCLICAS

Karina Querne de Carvalho⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade Estadual de Maringá. Mestre em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Docente da Coordenação de Ambiental do *campus* Campo Mourão da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. (UTFPR). Coordenadora do III Curso de Especialização em Gerenciamento e Auditoria Ambiental do *campus* Campo Mourão da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Monique Toledo Salgado⁽²⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Mestre em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Engenheira da Prefeitura Municipal de Vitória (PMV) na área de saneamento integrado para áreas de assentamento precário na região de Vitória - ES.

Fernando Hermes Passig⁽³⁾

Engenheiro Sanitarista pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Docente da Coordenação de Ambiental do *campus* Campo Mourão da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Gerente de Pesquisa e Pós-graduação do *campus* Campo Mourão da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Eduardo Cleto Pires⁽⁴⁾

Engenheiro Mecânico pela Universidade de São Paulo (USP). Mestre em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUCRJ). Doutor em Engenharia Civil em Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo. Professor titular da Universidade de São Paulo (EESC/USP).

Endereço⁽¹⁾: Rua Mamborê, 987 - Centro – Campo Mourão - PR - CEP: 87302-140 - Brasil - Tel: (44) 3017-5891 – e-mail: kaquerne@gmail.com.

RESUMO

Para melhor compreender a resposta dinâmica desses reatores submetidos a essas variações, foi desenvolvido o modelo MMS baseado no modelo hidrodinâmico de mistura completa em reatores em série, modelo cinético de 1ª ordem para consumo de substrato e para crescimento da biomassa e equacionamentos empíricos reportados na literatura. Esse modelo indicou a capacidade do reator de amortecer as variações impostas e a influência da cinética na eficiência de remoção da matéria orgânica. Para calibrar o MMS, foi avaliado o desempenho de um reator UASB no tratamento de esgoto sanitário da cidade de São Carlos submetido a variações senoidais cíclicas, de cargas orgânica e hidráulica, em valores inferiores e superiores a 40% e 60% da vazão afluente de 16,0 L.h⁻¹. O MMS indicou faixa de valores para a DQO efluente com diferença em relação aos resultados observados experimentalmente de 37% para vazão afluente constante de 16 L.h⁻¹ e 59% e 56% para variações senoidais cíclicas de 40% e 60% da vazão afluente, respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: Comportamento Dinâmico, Modelação Matemática, UASB, Variação Cíclica da Vazão.

INTRODUÇÃO

Modelos matemáticos têm sido desenvolvidos com o objetivo de melhorar a compreensão das etapas envolvidas na conversão biológica e conseqüentemente aperfeiçoar projetos de sistemas de tratamento.

Provavelmente, um dos primeiros modelos matemáticos para aplicação em reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB) foi proposto por Bolle *et al.* (1986) que observaram crescimento da produção gasosa e da DQO efluente devido as variações na vazão afluente, arraste de biomassa no efluente do reator pode ser evitado e cargas de choque hidráulicas amortecidas com aumento da eficiência do sedimentador



interno. Desde então, diversos modelos tem sido reportados na literatura para casos específicos (Stamatelatou *et al.*, 2003) e para aplicação geral (Batstone *et al.*, 2002).

A aplicação desses modelos pode prever possíveis falhas dos processos biológicos e possibilitar a tomada de medidas de proteção para que o sistema seja capaz de recuperar suas condições iniciais de operação. Um exemplo dessas falhas pode ser a redução na eficiência de reatores UASB quando submetidos a variações cíclicas diárias de cargas orgânicas e hidráulicas. Essas variações podem causar flotação dos grânulos, problemas com geração de odor, elevada concentração de sólidos suspensos no efluente e conseqüentemente lançamento de efluentes com concentrações de poluentes superiores aos limites estabelecidos pela legislação ambiental brasileira vigente (Pires *et al.*, 2001).

Para melhor compreender os eventuais amortecimentos e atrasos nas respostas desses reatores quando submetidos a essas variações, foi desenvolvido um modelo matemático simplificado (MMS) baseado no modelo hidrodinâmico de mistura completa em reatores em série, modelo cinético de 1ª ordem para consumo de substrato e crescimento da biomassa e equacionamentos empíricos reportados por Paula Jr. e Foresti (1992) e Batista (2000). Os resultados do monitoramento de um reator UASB (160 L) tratando esgoto sanitário municipal da cidade de São Carlos foram aplicados como dados de entrada para validação do MMS.

MATERIAIS E MÉTODOS

Um modelo matemático simplificado (MMS) foi desenvolvido com base no modelo hidrodinâmico de mistura completa em reatores em série, modelo cinético de 1ª ordem para consumo de substrato e crescimento da biomassa e equacionamentos empíricos reportados por Paula Jr e Foresti (1992) e Batista (2000).

Os dados de entrada usados no modelo correspondem aos resultados experimentais obtidos com a operação de um reator UASB (160 L) durante 370 d: etapa I – vazão afluente de 16.0 L.h^{-1} e tempo de detenção hidráulica (TDH) de 10 h durante 198 d; etapas II e III – aplicação de variações senoidais cíclicas em valores inferiores e superiores a 40% e 60% na vazão afluente durante 34 d e 27 d, respectivamente.

Uma rotina computacional foi desenvolvida no *Matlab* para otimizar o valor da constante cinética aparente de 1ª ordem (k_1) por meio da minimização da soma do quadrado da diferença dos valores de DQO efluente obtidos com a operação do reator UASB e os observados nas simulações do MMS. A constante cinética foi adotada como parâmetro de calibração do modelo, pois Carvalho e Pires (2002) verificaram ser esse parâmetro o de maior influência nos resultados. Os efeitos de transferência de massa foram desprezados quando havia mudança na velocidade de escoamento.

No desenvolvimento das equações de balanço de massa, o reator foi dividido n-reatores (compartimentos) em série, isotérmicos e de mesmo volume, sendo o último compartimento como um simples separador proporcional da biomassa que, em parte, retorna para o segundo compartimento. O último compartimento não acumula biomassa ou substrato. Essa configuração foi adotada por simplificar o equacionamento matemático, simular o escoamento do lodo e eliminar regiões mortas e recirculações hidráulicas.

A resolução numérica das equações diferenciais ordinárias (EDO) dos balanços de massa foi realizada pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem com aplicação do *Matlab*. O número de equações de balanço de massa variava em função do número de reatores de mistura completa em série (N-CSTR) obtidos nos ajustes teóricos uniparamétricos (Levenspiel, 1999) dos ensaios hidrodinâmicos realizados com traçador eosina Y para cada etapa de operação do reator.

No balanço simplificado foi considerada conversão de substrato (DQO) em biomassa ativa (SSV) e remoção da matéria orgânica de acordo com procedimentos bem definidos por Olsson e Newell (1999). Foi estabelecida variação horária da vazão afluente com comportamento senoidal em período de 24 h.

Os dados reportados por Passig e Campos (2004) para reator UASB operado com vazão constante (TDH=6 h; Vasc = 0.78 m.h^{-1} , etapa IV) e com recirculação de vazão de 50% (TDH = 6 h, Vasc = 1.71 m.h^{-1} , etapa V) foram aplicados na validação do MMS. A Tabela 1 apresenta as equações de balanço de massa para o substrato e biomassa dos compartimentos n a n+3.



Tabela 1. Equações de balanço de massa dos compartimentos n a n+3

Substrato	Biomassa
compartimentos n a n+2	
$\frac{dS_{Cn}}{dt} = \frac{Q}{V_n} (S_{Cin} - S_{Cn}) - k_n \cdot S_{Cn}$	$\frac{dX_{Bn}}{dt} = -\frac{Q}{V_n} X_{Bn} + Y_B k_n S_{Cn}$
$\frac{dS_{C(n+2)}}{dt} = \frac{Q}{V_{(n+2)}} (S_{C(n+1)} - S_{C(n+2)}) - k_{(n+2)} S_{C(n+2)}$	$\frac{dX_{B(n+2)}}{dt} = \frac{Q}{V_{(n+2)}} (X_{B(n+1)} - X_{B(n+2)}) + Y_B k_{(n+2)} S_{C(n+2)}$
compartimento n+1	
$\frac{dS_{C(n+1)}}{dt} = \frac{Q}{V_{(n+1)}} (S_{Cn} - S_{C(n+1)}) - k_{(n+1)} S_{C(n+1)}$	$\frac{dX_{B(n+1)}}{dt} = \frac{Q}{V_{(n+1)}} (X_{Bn} - X_{B(n+1)}) + C_S Q \frac{X_{B(n+2)}}{V_{(n+3)}} + Y_B k_{(n+1)} S_{C(n+1)}$
compartimento n+3	
$S_{C_{out}} = S_{C(n+3)} = S_{C(n+2)}$	$X_{B(n+3)} = X_{B(n+2)} (1 - C_S)$

Nota: C_s (coeficiente de separação do separador de fases) = 0.8; k_1 (constante cinética de 1ª ordem, h^{-1}) = $f(F)$, Q (vazão média afluente, $L \cdot h^{-1}$), S_{Cin} (concentração de substrato afluente dos dados experimentais, $mgDQO \cdot L^{-1}$), S_{Cn} (concentração de substrato efluente dos dados experimentais, $mgDQO \cdot L^{-1}$), V_n (volume do compartimento n, L), V_{n+1} (volume do último compartimento, L), X_{Bn} (concentração inicial de biomassa ativa, $mgSSV \cdot L^{-1}$), Y_B (coeficiente de conversão de substrato em biomassa) = $0.15 \text{ mgSSV} \cdot (mgDQO)^{-1}$.

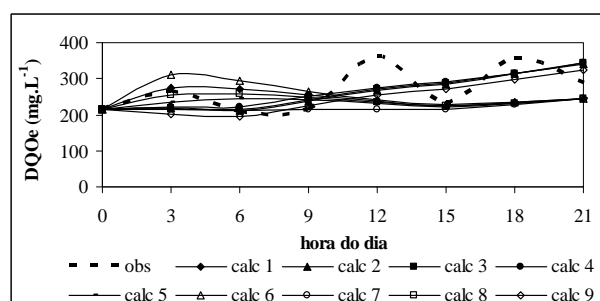
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com as simulações foi possível obter equações polinomiais da variação de DQO afluente ao longo do tempo e os valores otimizados das constantes cinéticas k_1 para os perfis de amostragem temporal do reator UASB (etapas I a III) e para os dados reportados por Passig e Campos (2004) (etapas IV e V). As equações da variação de DQO afluente e os valores da constante cinética de 1ª ordem obtidos com a otimização foram aplicados nas simulações do modelo MMS.

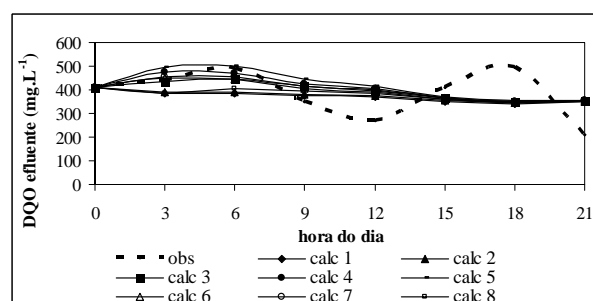
Os valores obtidos de k_1 iguais a 0.61 h^{-1} , 0.52 h^{-1} , 0.22 h^{-1} para as etapas I, II e III foram similares àqueles reportados por Zaiat *et al.* (2000) e Batstone *et al.* (2002).

É possível observar redução de aproximadamente 15% e 64% nos valores de k_1 para as etapas I, II e III, que pode estar relacionada: ao menor tempo de contato entre os microrganismos e o substrato devido à aplicação de maiores velocidades ascensionais e menores valores de TDH; e às velocidades ascensionais mais elevadas que podem ter aumentado o arraste de sólidos no efluente do reator, reduzindo conseqüentemente a concentração de biomassa no reator e os valores de k_1 .

A Figura 1 apresenta os resultados observados e calculados da variação da DQO efluente ao longo do tempo do último reator (compartimento) N-CSTR em série para as etapas I, II, III, IV e V.



(a)



(b)

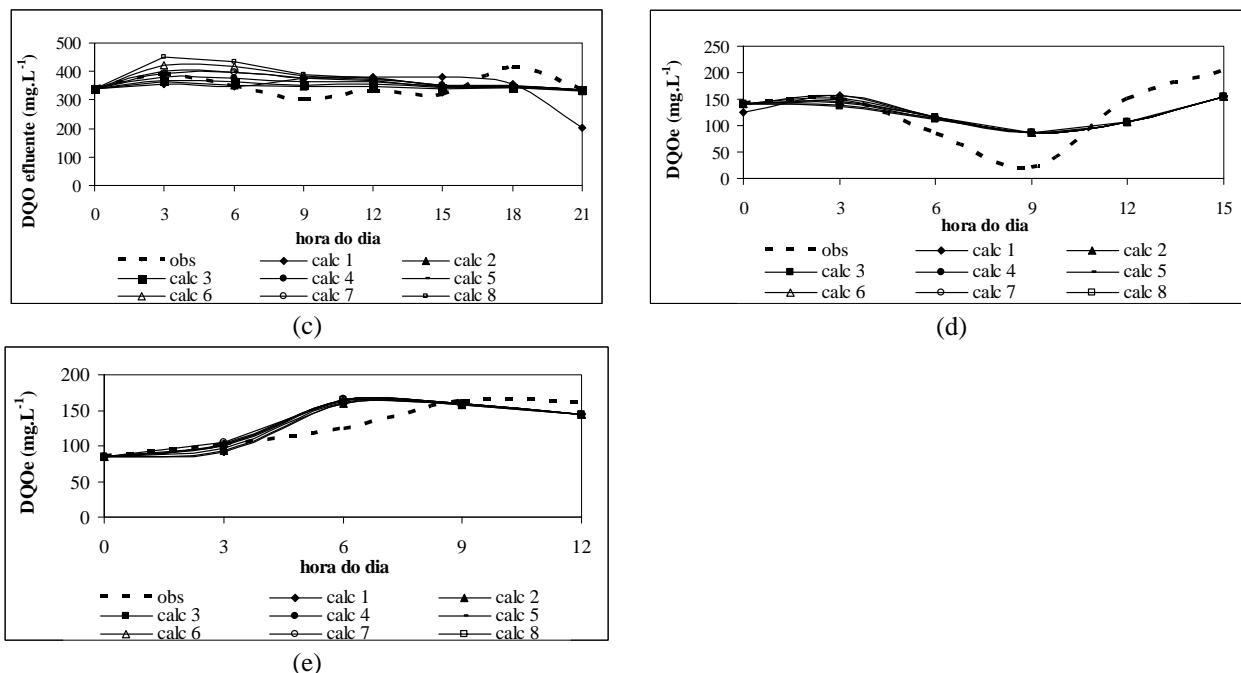


Figura 1. Resultados da variação de DQO efluente ao longo do tempo observada e calculada nos perfis de 24 h de amostragem temporal do reator: a) etapa I; b) etapa II; c) etapa III; d) etapa IV; e) etapa V.

O modelo indicou faixa de valores da DQO efluente de 214 a 311 mg.L^{-1} para etapa I (Figura 1 a.), 342 a 456 mg.L^{-1} para etapa II (Figura 1 b) e 204 a 452 mg.L^{-1} para etapa III (Figura 1 c.), ou seja, diferenças de aproximadamente 59% e 56%, respectivamente. As maiores diferenças entre os valores observados e calculados de DQO efluente nesses perfis podem ser justificadas pelo arraste de sólidos mais significativo quando foram aplicadas variações na vazão afluyente, que limitaram as respostas do MMS. Apesar de considerar a equação da variação da DQO afluyente ao longo do tempo, o modelo apresentou pequena sensibilidade em relação à variabilidade da DQO afluyente ao longo do tempo.

Nas simulações com os dados reportados por Passig e Campos (2004), houve aumento de aproximadamente 13% no valor de k_1 para as etapas IV (0.79 h^{-1}) e V (0.89 h^{-1}) com aplicação da vazão de recirculação que pode estar relacionado à expansão do leito da biomassa microbiana. Ao comparar os resultados observados e calculados de DQO efluente, foi possível verificar variação de 20 a 203 mg.L^{-1} e 86 a 158 mg.L^{-1} para o perfil 1; e de 85 a 163 mg.L^{-1} e 85 a 166 mg.L^{-1} para o perfil 2, respectivamente, ou seja, amplitudes com diferença de aproximadamente 60% e 4% entre os valores calculados e observados para os perfis 1 e 2, respectivamente (Figura 1 c, Figura 1 d).

Os resultados obtidos nas simulações corroboram as observações reportadas por Passig e Campos (2004), pois o autor destacou melhor resposta do reator na eficiência de remoção de DQO, DBO e de SST de aproximadamente 81%, 91% e 79%, respectivamente, com aumento da velocidade ascensional para 1.17 m.h^{-1} .

CONCLUSÕES

O modelo MMS indicou a capacidade do reator de amortecer as variações impostas e a influência da cinética na eficiência de remoção da matéria orgânica.

Os valores obtidos para k_1 diminuíram com aplicação das variações da vazão afluyente, provavelmente devido ao menor tempo de contato entre os microrganismos e o substrato resultante da aplicação de maiores velocidades ascensionais e menores TDH.

Além disso, velocidades ascensionais mais elevadas podem ter aumentado o arraste de sólidos no efluente do reator, reduzindo conseqüentemente a concentração de biomassa no reator e os valores de k_1 . As maiores diferenças entre os valores observados e calculados da DQO efluente resultaram da limitação do modelo em



considerar o arraste de sólidos no efluente que ocorreu em toda operação e mais acentuadamente quando foram aplicadas variações na vazão.

Como não é possível prever o arraste de sólidos no efluente, não há como quantificar e conseqüentemente modelar a parcela “perdida” de sólidos do reator. Na validação do MMS, foi observado aumento no valor de k_1 para aplicação de vazão de recirculação, provavelmente devido à expansão do leito da biomassa microbiana que melhora a transferência de massa. Os resultados corroboraram as observações reportadas por Passig e Campos (2004).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, ao CNPq e a CAPES pelo apoio recebido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BATISTA, K.B. (2000). Resposta dinâmica dos reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) submetidos a cargas senoidais. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
2. BATSTONE, D. *et al.* (2002). Anaerobic Digestion Model no 1. IWA Publishing, London. 77 p.
3. BOLLE, W.L. *et al.* (1986). An integral dynamic model for the UASB reactor. *Biotechnology and Bioengineering*, v.28, n.11, p.1621-1636.
4. CARVALHO, K.Q., PIRES, E.C. (2002). Dynamic response of UASB reactors submitted to diurnal cyclical flow: simplified mathematical model. In: VII Latin American Workshop and Symposium on Anaerobic Digestion, 2002, Mérida, México, Annals: 189-196.
5. LEVENSPIEL, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering*. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, p. 688.
6. OLSSON, G.E., NEWELL, B. (1999). *Wastewater Treatment Systems: Modelling, Diagnosis and Control*. London: IWA Publishing, 728 p.
7. PASSIG F.H., CAMPOS, J. R. Hybrid anaerobic reactor for domestic sewage treatment. In: II IWA Leading Edge Conference on Water and Wastewater Treatment Technology, 2004, Praga, República Theca.
8. PAULA JR, D.R., FORESTI, E. (1992). Kinetics studies on a UASB reactor subjected to increasing COD concentration. *Water Science and Technology*, v.25, n.7, p.103-111.
9. PIRES, E.C., PIRES, R.C., BATISTA K.B., CARVALHO K.Q. (2001). Dynamic behaviour of UASB reactors submitted to cyclical loads. In: 9th Congress on Anaerobic Digestion, 2001, Antwerp, Belgium, Annals: 219-221.
10. STAMATELATOU K., VAVILIN V., LYBERATOS G. (2003). Performance of a glucose fed periodic anaerobic baffled reactor (PABR) under increasing organic loading conditions: 1. Experimental results. *Bioresource Technology*, v.88, n.2, p.131-136.
11. ZAIAT M., PASSIG, F.H., FORESTI, E. (2000). A mathematical model and criteria for designing horizontal-flow anaerobic immobilized biomass reactors for wastewater treatment. *Bioresource Technology*, v.71, n.3, p.235-243.