



XI SILUBESA

Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

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

II-101 - PROPOSIÇÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE APLICÁVEIS À OPERAÇÃO DE FILTROS BIOLÓGICOS

José Antônio Tosta dos Reis⁽¹⁾

Doutor em Engenharia Civil, com ênfase em Hidráulica e Saneamento, pela Escola de Engenharia Civil de São Carlos, Universidade de São Paulo. Professor da Coordenadoria de Saneamento Ambiental do Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo.

Fazal Hussain Chaudry

PhD em Engenharia Civil pela Colorado State University. Professor do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Endereço⁽¹⁾: Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo. Coordenadoria de Saneamento Ambiental. Avenida Vitória, 1729, Jucutuquara, Vitória, ES. CEP: 29.040-333.

 tosta@cefetes.br

RESUMO

Este trabalho propõe um sistema de controle aplicável a operação de filtros biológicos, sistemas comumente empregados para o tratamento de esgotos domésticos e industriais. Para o estabelecimento do sistema de controle, foi empregada a Teoria de Controle Ótimo. O comportamento dinâmico do filtro foi descrito a partir do modelo proposto por RITTMANN (1989), através do qual é possível avaliar a variação nas concentrações de substrato no interior do filtro biológico. O fluxo de substrato foi avaliado a partir de um polinômio de quarta ordem que reproduz os resultados obtidos a partir do modelo de ordem variável proposto por RITTMANN & McCARTY (1978). Os resultados demonstram que o sistema de controle estabelecido permite reduzir substancialmente os tempos de acomodação e os desvios apresentados pelas concentrações de substrato em relação às suas condições de equilíbrio no efluente final do filtro biológico.

PALAVRAS-CHAVE: Filtros biológicos, Controle Ótimo, sistemas de controle, controladores.

INTRODUÇÃO

Os filtros biológicos são constituídos por um leito fixo (meio suporte), altamente permeável, sobre o qual aderem e se desenvolvem os microrganismos responsáveis pela estabilização dos compostos orgânicos presentes no afluente bruto.

Segundo RITTMANN (1989), os processos biológicos que utilizam filmes biológicos fixos apresentam como principais vantagens as excelentes eficiências de remoção dos compostos orgânicos e a possibilidade de construção de reatores com reduzidos volumes. Entretanto, os pequenos volumes dos reatores podem tornar os processos sensíveis às flutuações de cargas afluentes, deteriorando a qualidade do efluente tratado após longos períodos de operação ou nos períodos em que os processos sejam submetidos a elevações bruscas de carga. Neste contexto, RITTMANN (1989) sugere que o controle em tempo real dos processos de tratamento pode constituir uma alternativa para se mitigar os efeitos das flutuações de carga.

Este trabalho tem como objetivo a proposição de sistemas de controle aplicáveis aos filtros biológicos. Os sistemas de controle serão estabelecidos a partir da aplicação da Teoria de Controle Ótimo e terão por objetivo o controle da remoção da parcela carbonácea da matéria orgânica. Tendo em vista a dificuldade de monitoramento de todas as variáveis de estado envolvidas, os sistemas de controle incorporam observadores de estado.

MATERIAIS E MÉTODOS

Modelo dinâmico do processo

Neste trabalho, o filtro biológico não foi considerado um único reator de mistura completa; assumiu-se a idealização de que o filtro poderia ser dividido em vários reatores completamente misturados e dispostos em série. Esta idealização já foi utilizada por diversos autores (RITTMANN (1982), KISSEL et al (1984), JACOB et al (1997), VAYENAS & LYBERATOS (1994), VAYENAS et al. (1997) e WIK (1999)) quando da avaliação do comportamento dinâmico de reatores com filme biológico fixo.

Considerando-se a divisão do filtro biológico em n reatores completamente misturados, RITTMANN (1989) sugere que as concentrações de substrato e de biomassa ativa pode ser avaliado a partir do seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} \frac{dS_1}{dt} &= \frac{Q}{V} \cdot S_i - \frac{Q}{V} \cdot S_1 - J_1 \cdot A; \quad \frac{d(A \cdot X_f \cdot L_{f1})}{dt} = A \cdot Y \cdot J_1 - b' \cdot X_f \cdot L_{f1} \cdot A \\ \frac{dS_2}{dt} &= \frac{Q}{V} \cdot S_1 - \frac{Q}{V} \cdot S_2 - J_2 \cdot A; \quad \frac{d(A \cdot X_f \cdot L_{f2})}{dt} = A \cdot Y \cdot J_2 - b' \cdot X_f \cdot L_{f2} \cdot A \\ (01) \\ \frac{dS_n}{dt} &= \frac{Q}{V} \cdot S_{n-1} - \frac{Q}{V} \cdot S_n - J_n \cdot A; \quad \frac{d(A \cdot X_f \cdot L_{fn})}{dt} = A \cdot Y \cdot J_n - b' \cdot X_f \cdot L_{fn} \cdot A \end{aligned}$$

A formulação proposta para o balanço de massa para as concentrações de substrato e de biomassa ativa baseia-se nas seguintes simplificações:

- A biomassa que eventualmente cresce dispersa no interior do reator não é considerada quando da avaliação do consumo de substrato ou da acumulação de filme biológico sobre o meio suporte;
- O reator (ou segmento do reator) é considerado completamente misturado.

O principal problema na adoção do modelo proposto pela equação (01) é a determinação do fluxo de substrato (J) como uma função apenas das concentrações de substrato na massa líquida e de parâmetros cinéticos.

Admitindo-se que as concentrações no interior do filtro biológico fossem grandes o suficiente para que ali se desenvolvesse um biofilme plano e profundo, o fluxo de substrato foi avaliado, a princípio, com o modelo de ordem variável proposto por RITTMANN & McCARTY (1978). Este modelo, capaz de estimar o fluxo de substrato a partir dos parâmetros cinéticos do processo e das concentrações de substrato na massa líquida, produziu um modelo final para os filtros biológicos cujas equações tornam laborioso o trabalho de linearização, tarefa necessária quando do estabelecimento dos controladores propostos. Optou-se, então, pela substituição do modelo de ordem variável por um polinômio de quarta ordem. Este polinômio foi obtido (REIS, 2003) a partir da análise de regressão realizada sobre os resultados numéricos do modelo proposto por RITTMANN & McCARTY (1978), onde os valores de fluxo de substrato são apresentados em função das concentrações de substrato. Desta forma, o fluxo passou a ser avaliado a partir da seguinte expressão:

$$J = - 2,7237 \cdot S^4 + 13,657 \cdot S^3 - 25,938 \cdot S^2 + 31,88 \cdot S + 0,411 \quad \text{equação (02)}$$

O coeficiente de correlação entre os valores estimados pelo modelo de ordem variável e o pelo polinômio ficou muito próximo da unidade ($r^2 = 0,99$). Uma representação gráfica da regressão e os valores estimados pelo modelo de ordem variável estão apresentados na Figura 01.

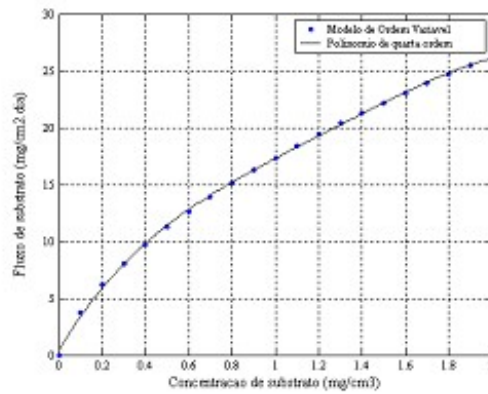


Figura 01 – Valores de fluxo de substrato estimados pelos modelos de ordem variável e pelo polinômio de sexta ordem.

Uma versão linearizada do modelo dinâmico (equações (01)) utilizado para descrever o comportamento do filtro biológico e uma discussão sobre a definição do número de reatores a serem adotados, quando da idealização do filtro como uma seqüência de reatores de mistura completa, são apresentadas por REIS (2003). Neste estudo, o filtro biológico foi dividido em 10 reatores.

Controle Ótimo

Para a definição do controlador ótimo, admite-se que o modelo dinâmico do processo de lodos ativados possa ser escrito através da seguinte notação matricial:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{D}_w\mathbf{w}(t), \quad \text{equação (03)}$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad \text{equação (04)}$$

Neste trabalho, as concentrações de substrato no interior de cada camada do filtro constituem as variáveis de estado. A vazão de recirculação atuou a variável de controle. A vazão de afluente bruto, por sua vez, constituiu a entrada com distúrbio ao filtro biológico.

Considera-se também que o vetor de controle possa ser expresso através da seguinte equação:

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t), \quad \text{equação (05)}$$

sendo $\mathbf{K}$ a matriz de ganho de realimentação, também invariante no tempo. Substituindo-se a lei de controle definida pela equação (05) na equação de estado do sistema (equação (03)), tem-se um sistema realimentado descrito pela seguinte equação:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{BK})\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_w\mathbf{w}(t). \quad \text{equação (06)}$$

Ao se projetar um sistema de controle ótimo, deseja-se determinar a matriz de ganho de realimentação $\mathbf{K}$ do vetor de controle, de tal forma que um determinado índice de desempenho seja minimizado. O índice de desempenho quadrático, comumente utilizado no projeto de sistemas de controle ótimo, é dado pela seguinte expressão:

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t)\mathbf{R}\mathbf{u}(t)) dt. \quad \text{equação (07)}$$

Para sistemas lineares e invariantes no tempo, KWAKERNAAK & SIVAN (1972) demonstram que a matriz $\mathbf{K}$ é obtida através da seguinte expressão:

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} \quad \text{equação (08)}$$

A matriz P apresentada na expressão anterior (comumente conhecida como matriz de Riccati) é determinada, por sua vez, a partir da resolução da Equação Matricial Reduzida de Riccati, cuja expressão tem a seguinte forma:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{R} + \mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad \text{equação (09)}$$

Um esquema do controlador proposto, considerada a incorporação do observador de estados, está apresentado na Figura 02.

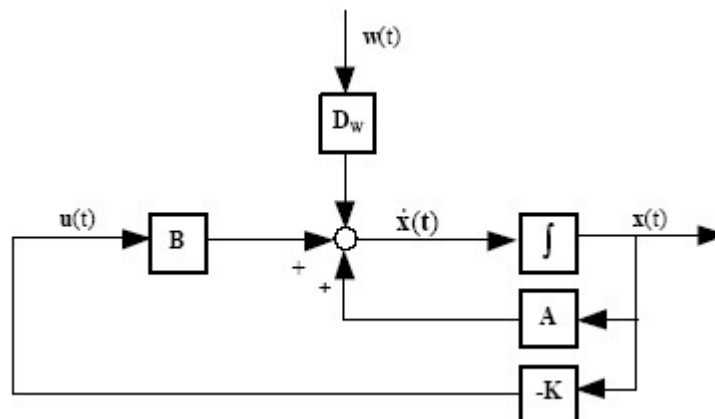


Figura 02 – Diagrama de blocos do sistema de controle ótimo, considerada a ação dos distúrbios externos

Descrição do sistema de tratamento estudado

Para a determinação de um sistema de controle aplicável aos filtros biológicos, foi utilizado o sistema de tratamento apresentado por METCALF & EDDY (1991). Neste sistema, o filtro biológico é preenchido com meio suporte em material plástico e o biofilme que se estabelece sobre o meio suporte é considerado profundo. Admitiu-se, adicionalmente, que a recirculação ocorre a partir do efluente do próprio filtro. Uma representação esquemática do sistema de tratamento considerado neste trabalho é apresentada na FIGURA 03.

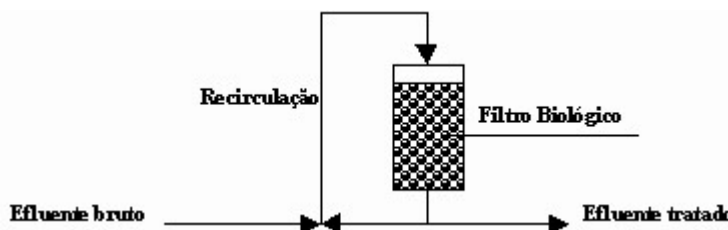


FIGURA 03 – Representação esquemática do processo de lodos ativados

Na Tabela 01 estão reunidos os parâmetros utilizados para a modelagem do sistema. A Tabela 02, por sua vez, reúne as características do afluente ao filtro biológico e as características físicas do reator.

Tabela 01 - Parâmetros empregados na modelagem do processo do filtro biológico

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Fator de produção de biomassa	Y	gDQO _{formada} /gDQO _{oxidada}	0,50
Constante de decaimento da biomassa	b'	dia ⁻¹	0,25
taxa de utilização do substrato específica máxima	μ	dia ⁻¹	8,00
Concentração de biomassa ativa no interior do biofilme	X _f	g/m ³	40000,00
Constante de saturação para o substrato	k _S	g/m ³	10,00
Coefficiente de difusão do substrato no interior do biofilme	D _f	cm ² /dia	0,64
Coefficiente de difusão do substrato na massa líquida	D	cm ² /dia	0,80

Fonte: RITTMANN & McCARTY (1981) e SÁEZ & RITTMANN (1988).

Tabela 02 - Características do material orgânico presente no afluente, características físicas do reator e vazões, em regime permanente, afluentes e efluente do filtro biológico

Item	Unidade	Valor
DBO afluente	g/m ³	450,00
Vazão afluente	m ³ /dia	7571,00
Vazão de recirculação	m ³ /dia	7571,00
Vazão efluente	m ³ /dia	15142,00
Altura do reator	m	9,00
Seção transversal do reator	m ²	186,00
Superfície específica do meio suporte	m ² /m ³	79,00

Fonte: METCALF & EDDY (1991).

Simulações realizadas

Nas simulações computacionais utilizadas para a avaliação do desempenho dos sistemas de controle propostos, a vazão afluente ao filtro biológico variou segundo as funções degrau e senoidal, esta última utilizada para a definição de um padrão periódico de variação da vazão de esgoto bruto. Estes padrões de variação, que de fato constituem funções temporais muito simples, são entradas típicas de teste, comumente utilizadas durante o estabelecimento e avaliação do desempenho dos sistemas de controle. Segundo OGATA (1998), os sistemas de controle projetados com base nos sinais de teste usualmente apresentam desempenho satisfatório quando submetidos a entradas reais; adicionalmente, OGATA (1998) observa que os sinais de teste permitem comparar o desempenho de todos os sistemas de controle projetados com relação a uma mesma base.

As funções degrau e senoidal podem ser matematicamente representados da seguinte maneira:

- Função degrau : $w(t) = \begin{cases} A, & \text{para } t > 0 \\ 0, & \text{para } t < 0 \end{cases}$ equação

(10)

- Função senoidal : $w(t) = \begin{cases} A \cdot \sin \omega t, & \text{para } t > 0 \\ 0, & \text{para } t < 0 \end{cases}$ equação

(11)

Nas expressões anteriores A e ω representam constantes. Uma representação gráfica das funções degrau e senoidal está apresentada na Figura 04.

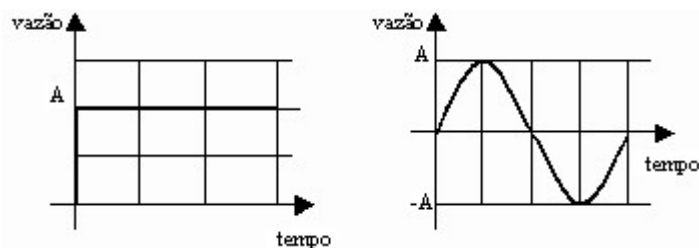


Figura 04 – Representação gráfica das funções degrau (*esquerda*) e senoidal (*direita*).

Durantes as simulações computacionais realizadas neste trabalho assumiu-se para a constante A 10% do valor nominal da vazão afluyente.

RESULTADOS

As alterações produzidas nas concentrações de substrato e na espessura de biofilme, em resposta a uma variação degrau da vazão afluyente e considerando-se que o controlador não atua sobre o filtro biológico, estão ilustradas na Figura 05. Desta figura percebe-se que as concentrações de substrato são aumentadas ao longo de todo o filtro; os maiores desvios, entretanto, são observados na porção superior da unidade. Como consequência da maior disponibilidade de substrato, novas (e maiores) espessuras de biofilme são estabelecidas sobre o meio suporte. É relevante observar ainda que o tempo necessário para o estabelecimento de novas condições de equilíbrio para as espessuras de biofilme é substancialmente maior que o tempo necessário para a obtenção das novas concentrações de equilíbrio do substrato.

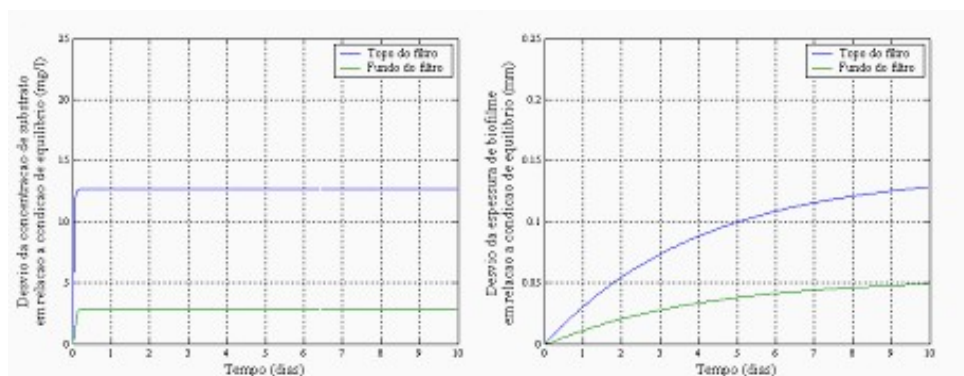


Figura 05 – Desvios das concentrações de substrato (*esquerda*) e espessura de biofilme (*direita*), sem a ação do controlador, em resposta a uma variação degrau da vazão afluyente.

Com a incorporação do controlador, a vazão de recirculação (a variável de controle do processo) é substancialmente reduzida, diminuindo os efeitos da diluição no topo do filtro. Como consequência, as concentrações de substrato e as espessuras de biofilme são aumentadas na porção superior do filtro; as elevações nas concentrações de substrato, por produzirem maiores fluxos de substrato, conduzem a menores disponibilidades de substrato (e, por consequência, menores aumentos na espessura de biofilme) na porção inferior do filtro. Como pode ser observado na Figura 06, a ação do controlador permite que a concentração de substrato e a espessura do biofilme permaneçam praticamente inalterados no fundo do filtro após a aplicação do degrau a vazão afluyente. A ação do controlador sobre a vazão de recirculação, por sua vez, é ilustrada na Figura 07.

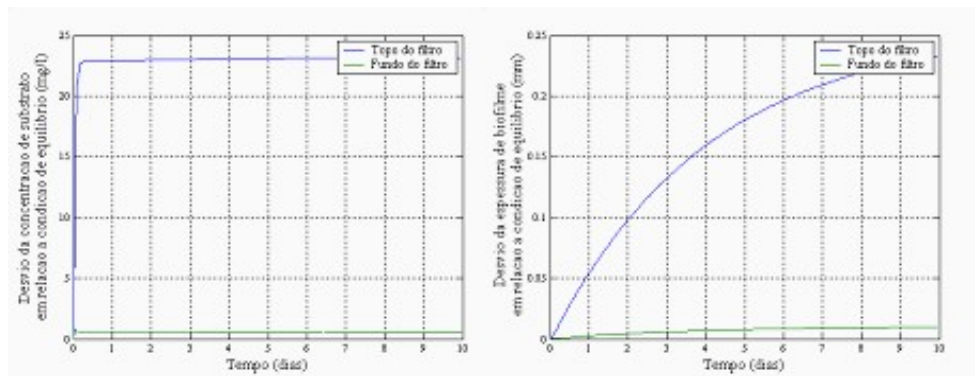


Figura 06 – Desvios das concentrações de substrato (esquerda) e espessura de biofilme (direita), com a ação do controlador, em resposta a uma variação degrau da vazão afluyente.

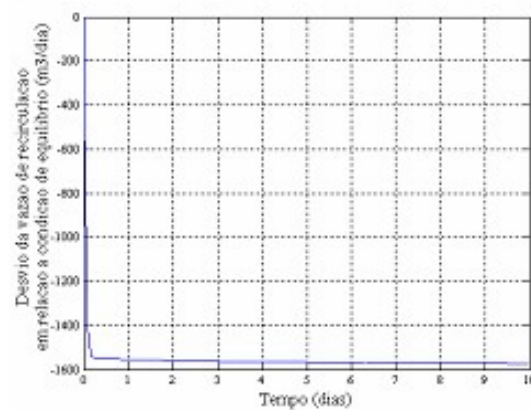


Figura 07 – Desvios da vazão de recirculação do filtro biológico, em resposta a uma variação degrau da vazão afluyente.

Em resposta a uma variação periódica na vazão afluyente, as variáveis de estado e as de controle passam também a oscilar entorno de seus valores de equilíbrio. As oscilações na concentração de substrato e na espessura de biofilme, sem a ação do controlador sobre o filtro biológico, estão apresentadas na Figura 08. Como era de se esperar, as oscilações, para ambas as variáveis de estado, são maiores no topo do que no fundo do filtro biológico.

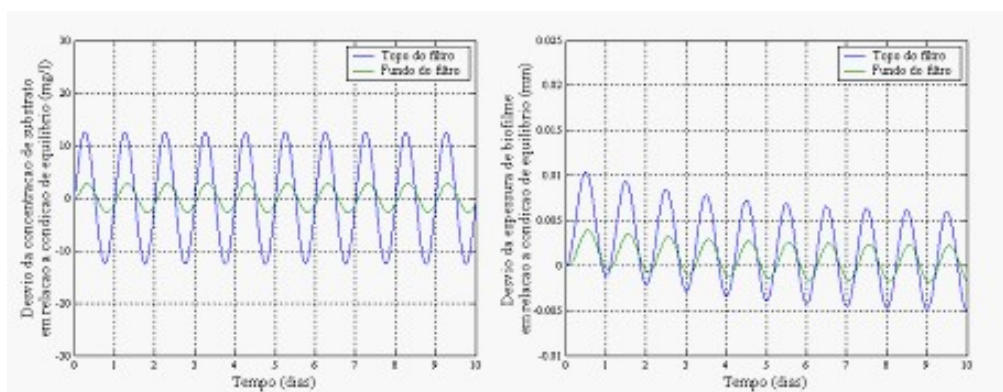


Figura 08 – Desvios das concentrações de substrato (esquerda) e espessura de biofilme (direita), sem a ação do controlador, em resposta a uma variação periódica da vazão afluyente.

Assim como foi observado com a imposição de variações do tipo degrau à vazão afluyente, também para a variação periódica a incorporação do controlador aumenta os desvios no topo do filtro. Na camada de fundo, entretanto, os desvios para as concentrações de substrato e espessuras de biofilme são praticamente nulos. Os efeitos produzidos com a incorporação do controlador, em resposta à variação periódica da vazão afluyente, estão apresentados pela Figura 09.

O comportamento da vazão de recirculação, por sua vez, está ilustrado na Figura 10. Desta figura pode-se observar que

o padrão estabelecido pelo controlador para a vazão de recirculação aproxima-se de uma imagem em espelho da vazão afluyente ao filtro. Elevações na vazão afluyente produzem reduções na vazão de recirculação; como consequência, a diluição na entrada do filtro é diminuída, o fluxo de substrato na porção superior do filtro é aumentado e os desvios nas concentrações de substrato e espessura de biofilme na porção inferior do filtro substancialmente reduzidos. Já nos períodos em que a vazão de recirculação é aumentada, os desvios nas concentrações de substrato e espessura de biofilme são reduzidos, agora, como consequência do aumento da diluição no afluyente ao sistema.

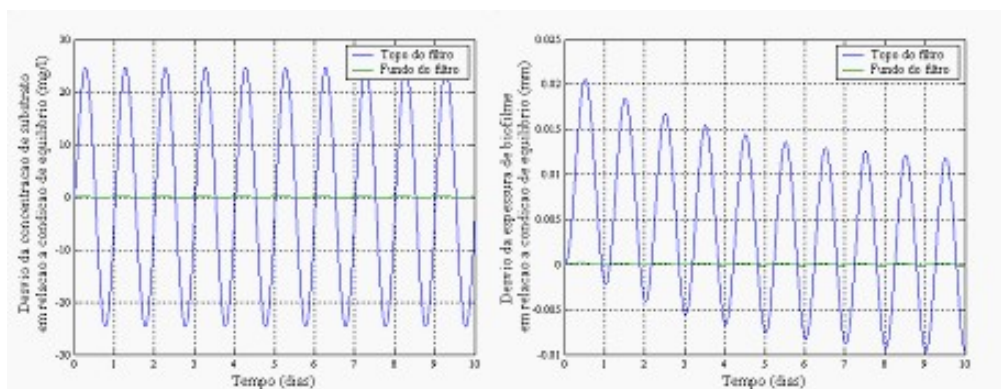


Figura 09 – Desvios das concentrações de substrato (esquerda) e espessura de biofilme (direita), com a ação do controlador, em resposta a uma variação periódica da vazão afluyente.

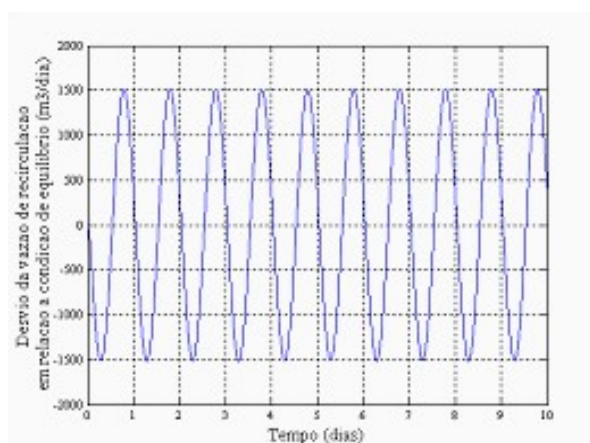


Figura 10 – Desvios da vazão de recirculação do filtro biológico, em resposta a uma variação periódica da vazão afluyente.

CONCLUSÕES

Este trabalho conduziu as seguintes conclusões:

- O modelo dinâmico proposto para avaliar o comportamento dos filtros biológicos, além de apresentar-se estável e adequado à definição dos sistemas de controle, permitiu a simulação de fenômenos normalmente observados durante a operação destes sistemas de tratamento. Nas condições de equilíbrio, a concentração de substrato e a espessura de biofilme estimados pelo modelo decresceram ao longo da profundidade do reator. Nas simulações em que a vazão afluyente ao filtro foi submetida a uma variação em degrau, as variações de concentração de substrato e espessura de biofilme também foram reduzidas do topo para o fundo do filtro. Outro importante efeito que pode ser observado com a aplicação do modelo foi a diferença entre os intervalos de tempo necessários ao estabelecimento das condições de equilíbrio para as concentrações de substrato e espessura de biofilme; o tempo necessário ao estabelecimento de concentrações de substrato constantes no interior do reator foi consideravelmente menor que o tempo necessário à obtenção de um biofilme com espessura constante;
- A implementação dos sistemas de controle pôde conduzir a sensíveis reduções na concentração de substrato no efluente final do filtro biológico. Nas simulações, a manipulação da vazão de recirculação permitiu interferir na diluição da vazão afluyente ao sistema e nas taxas das reações que deveriam se desenvolver no interior do reator.

Como consequência, as oscilações das variáveis de estado em torno das suas condições de equilíbrio claramente aumentaram no topo do reator em comparação às oscilações estimadas para o caso não controlado; nas camadas de fundo, entretanto, os valores das variáveis de estado permaneceram bem mais próximas aos seus valores de equilíbrio. Este comportamento no interior do filtro biológico pôde ser verificado para os diferentes padrões de variação impostos à vazão afluyente ao sistema de tratamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. JACOB, J.; LANN J. M.; PINGAUD, H.; CAPDEVILLE, B. (1997). A generalized approach for dynamic modeling and simulation of biofilters: application to waste-water denitrification. *Chemical Engineering Journal*, v. 65, p. 133-143.
2. KISSEL, J. C., et al. (1984). Numerical simulation of mixed-culture biofilm. *Journal of Environmental Engineering*, v.110, n. 2, p. 393-411.
3. KWAKERNAAK, H.; SIVAN, R. (1972). Linear Optimal Control Systems. New York, John Wiley & Sons.
4. METCALF & EDDY (1991). *Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse*. 3 ed. New York, Metcalf & Eddy Inc.
5. OGATA, K. (1998). *Engenharia de Controle Moderno*. Rio de Janeiro, Prentice-Hall do Brasil.
6. REIS, J. A. T. (2003). Desenvolvimento de sistemas de Controle Ótimo para a operação de processos aeróbios de tratamento de esgotos. 240f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
7. RITTMANN, B. E.; McCARTY, P. L. (1978). Variable-Order model of bacterial-film kinetics. *Journal of Environmental Engineering Division*, v. 104, n EE5, p. 889-900.
8. RITTMANN, B. E.; McCARTY, P. L. (1981). Substrate flux into biofilms of any thickness. *Journal of Environmental Engineering Division*, v. 107, n EE4, p. 831-849.
9. RITTMANN, B. E. (1982). The effect of shear stress on biofilm loss rate. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 10, p. 501-506.
10. RITTMANN, B. E. (1989). Mathematical modeling of fixed-film growth. In: PATRY, G. G.; CHAPMAN, D. (org). *Dynamic Modeling and Expert Systems in Wastewater Engineering*. Michigan: Lewis Publishers, p. 39-57.
11. SÁEZ, P. B.; RITTMANN, B. E. (1988). Improved pseudoanalytical solution for steady-state biofilm kinetics. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 32, p. 379-385.
12. VAYENAS, D. V.; LIBERTAOS, G. (1994). A novel model for nitrifying trickling filters. *Water Research*, v. 28, n. 6, p. 1275 – 1284.
13. VAYENAS, D. V.; PAVLOU, S.; LIBERTAOS, G. (1997). Development of a dynamic model describing nitrification and denitrification in trickling filters. *Water Research*, v. 31, n. 5, p. 1135 – 1147.
14. WIK, T. (1999). Rational transfer function models for nitrifying trickling filters. *Water Science Technology*, v. 39, n. 4, p. 121-128;