

**XI SILUBESA*****Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*****28/03 a 02/04/2004 - Natal - Rio Grande do Norte - Brasil**

II-100 - SISTEMAS DE CONTROLE APLICÁVEIS À OPERAÇÃO DE PROCESSOS DE LODOS ATIVADOS

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

Neste trabalho, a partir da aplicação da Teoria de Controle Ótimo, foi estabelecido um sistema de controle aplicável aos processos de lodos ativados, processo largamente empregado para o tratamento de resíduos líquidos. Para a descrição do comportamento dinâmico do tanque de aeração do processo de lodos ativados foi utilizado o modelo proposto pela *International Water Association (IWA)*; as equações que constituem o modelo, as considerações para sua definição e as restrições ao seu uso são apresentadas por HENZE et. al. (1987). O comportamento dinâmico do decantador secundário do processo, por sua vez, foi descrito a partir do modelo proposto por VITASOVIC (1989). Os resultados demonstram que o sistema de controle proposto permite reduzir substancialmente os tempos de acomodação e as oscilações apresentadas pelas variáveis de estado em relação as suas condições de equilíbrio.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas de controle, controladores, Controle Ótimo, Lodos Ativados.

INTRODUÇÃO

Os processos de lodos ativados, apresentados originalmente na Inglaterra no início do século passado, são amplamente utilizados para o tratamento de efluentes domésticos e industriais naquelas situações em que alta qualidade do efluente tratado e reduzido consumo de área são necessários. Estes processos, no entanto, apresentam elevados consumos de energia, consideráveis índices de mecanização e elevadas produções de lodo.

A Teoria Convencional de Controle, que se consolidou até o final da década de 50, permitiu o desenvolvimento de diversos sistemas de controle aplicáveis aos processos de lodos ativados. Mais recentemente, com o desenvolvimento de abrangentes modelos dinâmicos utilizados para a descrição e avaliação do comportamento dos processos de lodos ativados, o Controle Convencional tem sido progressivamente substituído pelo Controle Moderno. Os trabalhos de LECH (1978), CLIFFT & ANDREWS (1988), KABOURIS & GEORGAKAKOS (1990), LINDBERG E CARLSSON (1996), LUKASSE (1998) e REIS (2003) constituem alguns exemplos de aplicação da Teoria de Controle no desenvolvimento de sistemas de controle aplicáveis aos processos de lodos ativados.

Este trabalho tem por objetivo propor controladores para o processo de Lodos Ativados a partir da aplicação da Teoria

de Controle Ótimo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Modelo dinâmico do processo

A implementação dos sistemas de Controle Ótimo envolve, invariavelmente, a utilização de modelos dinâmicos que adequadamente descrevam os processos a serem controlados. Neste trabalho, o comportamento dinâmico do tanque de aeração processo de lodos ativados foi descrito a partir do modelo proposto pela *International Water Association (IWA)*, detalhadamente apresentado e discutido por HENZE et al. (1987).

Neste trabalho, o tanque de aeração foi caracterizado por seis diferentes variáveis de estado: concentração de biomassa heterotrófica ativa (X_b), concentração de substrato lentamente biodegradável (X_s), concentração de substrato rapidamente biodegradável (S_s), concentração de material particulado produzido pelo decaimento da biomassa (X_p), concentração de substrato particulado inerte (X_i) e vazão efluente. Como o substrato solúvel inerte não é adsorvido ou metabolizado pelos flocos biológicos, o comportamento desta parcela do substrato não foi simulado. As equações que descrevem o comportamento destas variáveis de estado tomaram a seguinte forma:

$$\frac{dX_b}{dt} = \frac{Q_i}{V} X_{bi} + \frac{Q_r}{V} X_{br} - \frac{Q_d}{V} X_b - \frac{Q_o}{V} X_b + \mu_H \frac{S_s}{k_s + S_s} \frac{S_o}{k_o + S_o} X_b - b_H X_b, \quad \text{equação (01)}$$

$$\frac{dS_s}{dt} = \frac{Q_i}{V} S_{si} + \frac{Q_r}{V} S_{sr} - \frac{Q_d}{V} S_s - \frac{Q_o}{V} S_s - \frac{1}{Y_H} \mu_H \frac{S_s}{k_s + S_s} \frac{S_o}{k_o + S_o} X_b + k_H \frac{\frac{X_s}{X_b}}{k_x + \left(\frac{X_s}{X_b}\right)} \frac{S_o}{k_o + S_o} X_b, \quad \text{equação (02)}$$

$$\frac{dX_s}{dt} = \frac{Q_i}{V} X_{si} + \frac{Q_r}{V} X_{sr} - \frac{Q_d}{V} X_s - \frac{Q_o}{V} X_s + (1 - f_p) b_H X_b - k_H \frac{\frac{X_s}{X_b}}{k_x + \left(\frac{X_s}{X_b}\right)} \frac{S_o}{k_o + S_o} X_b, \quad \text{equação (03)}$$

$$\frac{dX_p}{dt} = \frac{Q_i}{V} X_{pi} + \frac{Q_r}{V} X_{pr} - \frac{Q_d}{V} X_p - \frac{Q_o}{V} X_p + f_p b_H X_b, \quad \text{equação (04)}$$

$$\frac{dX_i}{dt} = \frac{Q_i}{V} X_{ii} + \frac{Q_r}{V} X_{ir} - \frac{Q_d}{V} X_i - \frac{Q_o}{V} X_i \quad \text{equação (05)}$$

$$\frac{dQ_o}{dt} = Q_i + Q_r - Q_d - Q_o \quad \text{equação (06)}$$

Nas expressões anteriores:

- V: volume do tanque de aeração (L^3);
- Q_i : vazão de esgoto bruto afluente ao reator (L^3/T);
- Q_o : vazão efluente do reator (L^3/T);
- Q_r : vazão de recirculação de lodo (L^3/T);
- X_{BH_i} : concentração de biomassa ativa no esgoto bruto afluente ao reator (M/L^3);
- X_{BH_r} : concentração de biomassa ativa no lodo recirculado para o reator (M/L^3);
- X_{BH} : concentração de biomassa ativa efluente do reator (M/L^3);
- S_{s_i} : concentração de substrato solúvel rapidamente biodegradável no esgoto bruto afluente ao reator (M/L^3);
- S_{s_r} : concentração de substrato solúvel rapidamente biodegradável no lodo recirculado para o reator (M/L^3);
- S_s : concentração de substrato solúvel rapidamente biodegradável efluente do reator (M/L^3);
- X_{s_i} : concentração de substrato solúvel lentamente biodegradável no esgoto bruto afluente ao reator (M/L^3);
- X_{s_r} : concentração de substrato solúvel lentamente biodegradável no lodo recirculado para o reator

(M/L³);

- X_S : concentração de substrato solúvel lentamente biodegradável efluente do reator (M/L³);
- μ_H , k_S , k_X , k_{OH} , b_H e η_H : parâmetros cinéticos do processo;
- Y_H e f_p : parâmetros estequiométricos do processo.

O comportamento do decantador secundário, importante para a avaliação das características do lodo que retorna ao tanque de aeração, foi avaliado a partir da versão simplificada do modelo proposto por VITASOVIC (1989). Neste modelo, o decantador é dividido em um número finito de camadas horizontais, no interior das quais assume-se existir uma massa líquida completamente misturada. Desta forma, a variação na concentração da biomassa e das diferentes parcelas da fração carbonácea da matéria orgânica no interior do decantador foi descrita, neste trabalho, pela seguinte equação:

$$\frac{dX_{T,j}}{dt} = \frac{v_u (X_{T,j-1} - X_{T,j})}{h_j} + \left[\frac{\min(J_{S,j}; J_{S,j-1}) - \min(J_{S,j}; J_{S,j+1})}{h_j} \right] \quad \text{equação (07)}$$

As expressões adotadas, respectivamente, para a camada superficial e para a camada do fundo do decantador tomaram a seguinte forma:

$$\frac{dX_{T,1}}{dt} = \left[\frac{\left(\frac{Q_i X_{T,i}}{A_S} \right) - v_u X_{T,1} - \min(J_{S,1}; J_{S,2})}{h_1} \right] \quad \text{equação (08)}$$

$$\frac{dX_{T,n}}{dt} = \left[\frac{v_u (X_{T,n-1} - X_{T,n}) + \min(J_{S,n-1}; J_{S,n})}{h_n} \right] \quad \text{equação (09)}$$

Nas três últimas expressões:

- v_u : velocidade descendente da massa líquida (L/T);
- J_S : fluxo de sedimentação dos sólidos (M/L²T);
- h : altura da camada (L);
- Q_i : vazão afluente ao decantador (L³/T);
- A_S : área da seção transversal do decantador (L²);
- X_T : concentração de sólidos suspensos (M/L³);
- j : índice que identifica a camada;
- n : índice que indica a última camada do decantador.

REIS (2003) apresenta uma versão linearizada do modelo dinâmico estabelecido a partir da combinação dos modelos propostos por HENZE et al. (1987) e por VITASOVIC (1989). Este modelo linear foi empregado para a definição do controlador ótimo estabelecido neste trabalho, conforme apresentado nas seções subsequentes.

Controle Ótimo

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

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{Ax}(t) + \mathbf{Bu}(t) + \mathbf{D}_w \mathbf{w}(t), \quad \text{equação (10)}$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{Cx}(t). \quad \text{equação (11)}$$

Neste trabalho, as concentrações de biomassa heterotrófica ativa (X_b), as concentrações das diferentes parcelas biodegradáveis da matéria orgânica (S_s e X_s) e a vazão efluente (Q_o) do tanque de aeração constituem as variáveis de estado do processo de lodos ativados. As vazões de recirculação e descarte de lodo (Q_r e Q_d) são as entradas de controle e a vazão de esgoto bruto afluente ao reator (Q_i) a entrada de distúrbio.

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

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{Kx}(t), \quad \text{equação (12)}$$

sendo $\mathbf{K}$ a matriz de ganho de realimentação, também invariante no tempo. Substituindo-se a lei de controle definida pela equação (12) na equação de estado do sistema (equação (10)), tem-se um sistema realimentado descrito pela seguinte equação:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{BK})\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_w\mathbf{w}(t). \quad \text{equação (13)}$$

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:

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t)\mathbf{R}\mathbf{u}(t)) dt. \quad \text{equação (14)}$$

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

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}. \quad \text{equação (15)}$$

A matriz $\mathbf{P}$ 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:

$$\mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0}. \quad \text{equação (16)}$$

Um esquema do controlador proposto, considerada a incorporação do observador de estados, está apresentado na Figura 01.

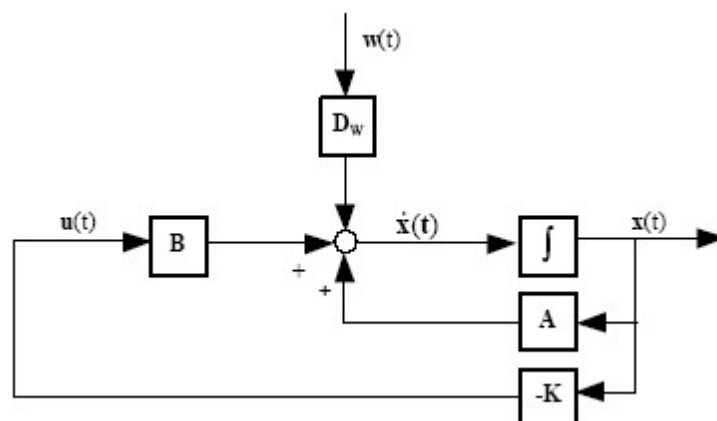


Figura 01 – Diagrama de blocos do sistema de controle ótimo, considerada a ação dos distúrbios externos

Descrição do sistema de tratamento estudado

Para o estabelecimento de um sistema de controle para o processo de lodos ativados, foi utilizado, como exemplo, o sistema de tratamento proposto por VAN HAANDEL & MARAIS (1999). Neste sistema, o processo de lodos ativados é constituído por um tanque de aeração, considerado completamente misturado, no interior do qual se desenvolvem as reações bioquímicas responsáveis pela estabilização dos compostos orgânicos presentes no efluente bruto, seguido por um decantador secundário, responsável pelo adensamento e acumulação do lodo recirculado ao tanque de aeração e, conseqüentemente, pela clarificação do efluente tratado. Uma representação esquemática do sistema de tratamento considerado neste trabalho é apresentada na Figura 02.

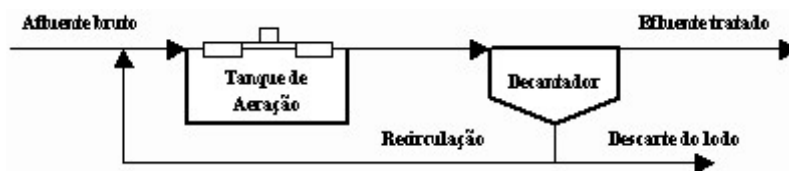


Figura 02 – Representação esquemática do processo de lodos ativados

Na Tabela 01 estão reunidos os parâmetros empregados quando da modelagem do processo de lodos ativados.

Tabela 01 - Parâmetros empregados na modelagem do processo de lodos ativados

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Fator de produção de biomassa heterotrófica	Y	gDQO _{formada} /gDQO _{oxidada}	0,45
Fração de biomassa que produz particulados	f _p	adimensional	0,20
Constante de decaimento da biomassa heterotrófica	b _H	dia ⁻¹	0,24
Taxa de crescimento específico máxima da biomassa heterotrófica *	μ _H	dia ⁻¹	6,00
Constante de saturação para o oxigênio	k _{OH}	gO ₂ /m ³	0,10
Constante de saturação para o substrato	k _S	gDQO/m ³	160
Taxa de hidrólise específica máxima do material lentamente biodegradável *	k _H	gDQO/gDQO.dia	2,20
Constante de saturação para hidrólise do material lentamente biodegradável *	k _x	gDQO/gDQO.dia	0,15
Constantes de sedimentabilidade	n	l/g	0,46
	v	m/h	6,00

Fonte: adaptado de VAN HAANDEL & MARAIS (1999).

* Valores adotados a partir de HENZE et al. (1987).

Os dados referentes às características do material orgânico presente no afluente ao sistema estão apresentados na Tabela 02. Nesta tabela, VAN HAANDEL & MARAIS (1999) indicam a concentração de material orgânico afluente e a sua distribuição entre as frações biodegradável, não biodegradável, solúvel e particulada. As características físicas do tanque de aeração e do decantador secundário, bem como as vazões esperadas para o sistema quando condições estacionárias de funcionamento forem estabelecidas, estão apresentadas na Tabela 03.

Tabela 02 - Características do material orgânico presente no afluente ao processo

Parâmetro	Unidade	Valor
DBO afluente	mg/l	650,00
Fração não biodegradável e solúvel afluente	adimensional	0,10
Fração não biodegradável e particulada afluente	adimensional	0,08
Fração biodegradável e solúvel afluente	adimensional	0,21
Fração biodegradável e particulada afluente	adimensional	0,61

Fonte: VAN HAANDEL & MARAIS (1999).

Tabela 03 - Características físicas das unidades e as vazões, em regime permanente, para cada uma das unidades que constituem o sistema

Item	Unidade	Valor
Volume do tanque de aeração	m ³	3699,00
Área do decantador	m ³	577,00
Profundidade do decantador	m	4,00
Vazão afluente ao tanque de aeração	m ³ /dia	12000,00
Vazão efluente do tanque de aeração	m ³ /dia	15938,00
Vazão de recirculação de lodo	m ³ /dia	5160,00
Vazão de descarte de lodo	m ³ /dia	1232,00

Fonte: VAN HAANDEL & MARAIS (1999).

Simulações realizadas

Nas simulações computacionais utilizadas para a avaliação do desempenho dos sistemas de controle propostos, a vazão afluente 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:

$$\bullet \text{ Função degrau : } w(t) = \begin{cases} A, & \text{para } t > 0 \\ 0, & \text{para } t < 0 \end{cases} \quad \text{equação (17)}$$

$$\bullet \text{ Função senoidal : } w(t) = \begin{cases} A \cdot \sin \omega t, & \text{para } t > 0 \\ 0, & \text{para } t < 0 \end{cases} \quad \text{equação (18)}$$

Nas expressões anteriores A e ω representam constantes. Uma representação gráfica das funções degrau e senoidal está apresentada na Figura 03.

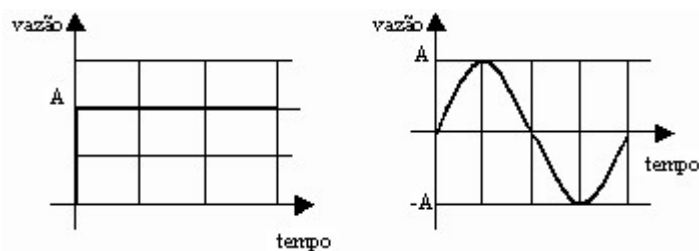


Figura 03 – Representação gráfica das funções degrau (*esquerda*) e senoidal (*direita*).

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

RESULTADOS

Conforme estabelecido na seção anterior, para a avaliação da efetividade do controlador proposto foi considerada a variação da vazão afluyente segundo as funções degrau e senoidal. O comportamento das variáveis de estados para o tanque de aeração e para a camada de fundo do decantador, considerada a variação da vazão afluyente segundo a função degrau, está ilustrado nas figuras 04 e 05. O comportamento das variáveis de estado, sem a ação do controlador sobre o processo de lodos ativados, está ilustrado na Figura 04; já os ganhos produzidos com a incorporação do controlador podem ser avaliados a partir da Figura 05.

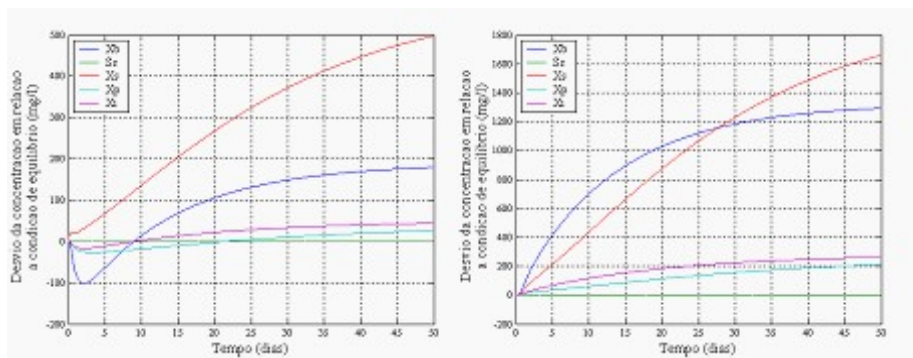


Figura 04 – Desvios das variáveis de estado no tanque de aeração (*esquerda*) e na camada de fundo do decantador (*direita*), sem a ação do controlador, em resposta a uma variação degrau da vazão.

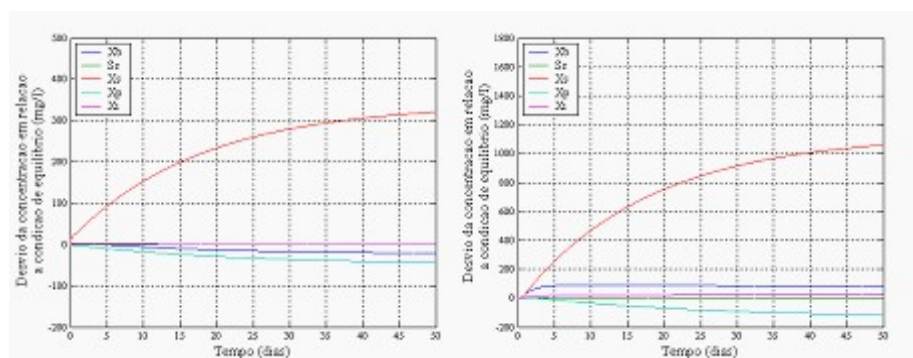


Figura 05 – Desvios das variáveis de estado no tanque de aeração (*esquerda*) e na camada de fundo do decantador (*direita*), com a ação do controlador em resposta a uma variação degrau da vazão afluyente.

Com o aumento da vazão afluyente, a quantidade de sólidos no fundo do decantador e, por conseqüência, no lodo recirculado progressivamente é aumentada. Como aumentos na vazão afluyente resultam em acréscimos nas vazões de recirculação do lodo (acréscimos, embora menores, são também observadas na vazão de descarte do lodo), as novas

concentrações de equilíbrio para a biomassa e para as diferentes parcelas de substrato no tanque de aeração são superiores àquelas observadas para o sistema não perturbado (ver Figura 04).

Com a incorporação do controlador ao processo de lodos ativados (resultados apresentados na Figura 05), os desvios das variáveis de estado e o tempo necessário para estabelecimento das condições de equilíbrio são reduzidos. A ação do controlador reduz substancialmente os desvios nas concentrações de X_b e X_i e, como consequência das reduções nas concentrações de X_b , reduções são também observadas nas concentrações de X_s e X_p . As reduções nas concentrações de X_s , entretanto, são menos significativas, função dos aspectos já mencionados anteriormente: *a)* as concentrações de X_s no afluente são maiores que aquelas observadas nas condições iniciais de equilíbrio do tanque de aeração (para a biomassa e demais parcelas do substrato ocorre o inverso) e *b)* a maior parcela da biomassa decomposta (80%, conforme a Tabela 01) é convertida em substrato lentamente biodegradável.

O comportamento das variáveis de controle do processo de lodos ativados (vazões de recirculação e descarte do lodo) está ilustrado na Figura 06. Desta figura pode-se observar que elevações na vazão afluente são seguidas por elevações nas vazões de recirculação e de descarte do lodo; nesta última, entretanto, as variações são menores.

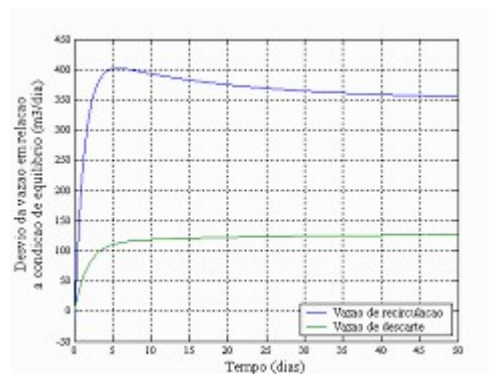


Figura 06 – Desvios das variáveis de controle do processo de lodos ativados, em resposta a uma variação degrau da vazão afluente.

Os resultados obtidos para o tanque de aeração e para a última camada do decantador, a partir da variação periódica da vazão afluente, estão apresentados nas figuras 07 e 08. Na primeira figura estão ilustrados os resultados obtidos sem a ação do controlador sobre o processo de lodos ativados; na segunda, o comportamento das variáveis de estado após a incorporação do controlador.

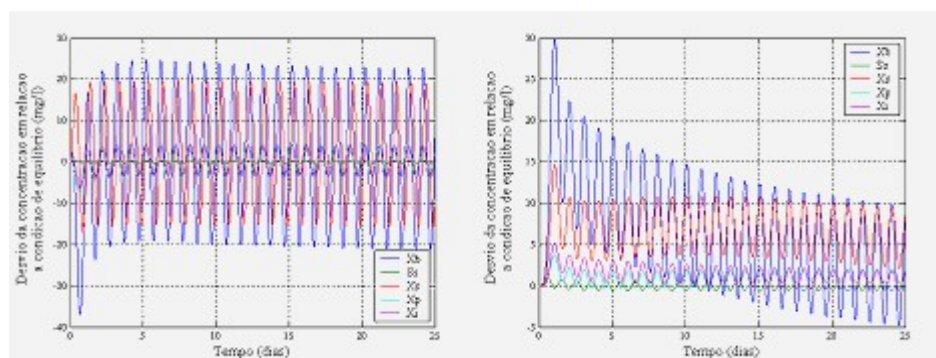


Figura 07 – Desvios das variáveis de estado no tanque de aeração (esquerda) e na camada de fundo do decantador (direita), sem a ação do controlador, em resposta a uma variação periódica da vazão afluente.

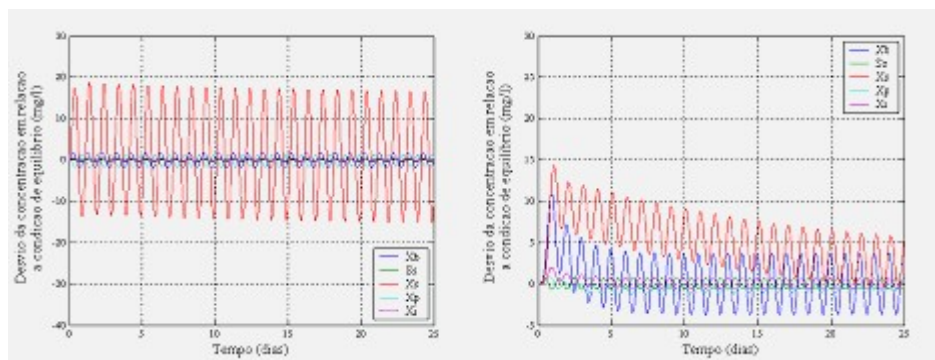


Figura 08 – Desvios das variáveis de estado no tanque de aeração (esquerda) e na camada de fundo do decantador (direita), com a ação do controlador, em resposta a uma variação periódica da vazão afluyente.

Das figuras anteriores pode-se observar que as variações periódicas da vazão afluyente não provocam aumentos consideráveis nas concentrações de sólidos recirculados para o tanque de aeração; as oscilações observadas na camada de fundo do decantador são pouco expressivas quando comparadas com as concentrações de equilíbrio das diferentes variáveis de estado no lodo recirculado. A ação do controlador reduz estes desvios, tornando ainda menor a influência da dinâmica do decantador sobre as concentrações das variáveis de estado no tanque de aeração.

O comportamento das variáveis de controle do processo está apresentado na Figura 09. Percebe-se, desta figura, que o sistema reage às elevações na vazão afluyente com aumentos nas vazões de recirculação e descarte do lodo; da mesma forma, às reduções na vazão afluyente com reduções nos valores das variáveis de controle. Como nas demais situações simuladas, os desvios são mais expressivos na vazão de recirculação do lodo.

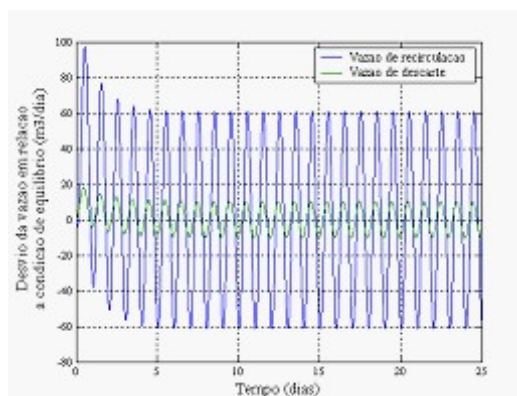


Figura 09 – Desvios das variáveis de controle do processo de lodos ativados, em resposta a uma variação periódica da vazão afluyente.

CONCLUSÕES

Deste trabalho podem ser apresentadas as seguintes observações e conclusões:

- Os modelos lineares e invariantes no tempo utilizados para a descrição do comportamento dinâmico dos processos de lodos ativados mostraram-se estáveis e adequados à definição dos sistemas de controle;
- Os sistemas de controle propostos para os processos de lodos ativados permitiram reduzir de forma substancial as oscilações apresentadas pelas concentrações de biomassa, de material particulado produzido com o decaimento da biomassa e de substrato particulado inerte. As reduções nas oscilações da parcela lentamente biodegradável, entretanto, foram menores; a diferença nas composições do afluyente bruto, do lodo recirculado e do conteúdo do tanque de aeração e as intrincadas relações entre as variáveis tornaram difícil o estabelecimento de uma estratégia de controle que aproximasse todas as variáveis de estado de seus valores de equilíbrio. A parcela rapidamente biodegradável, por sua vez, apresentou um comportamento diferenciado em todas as simulações realizadas; esta parcela, prontamente removida da massa líquida pela ação dos microrganismos, apresentou-se sempre em concentrações muito baixas, independentemente da ação do controlador ou do padrão de variação imposto à vazão afluyente. Adicionalmente, convém observar que a ação do controlador permitiu

diminuir o tempo necessário para que novas condições de equilíbrio fossem estabelecidas após as variações impostas à vazão afluente;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CLIFFT, R. C.; ANDREWS, J. F. (1981). Aeration control for reducing energy consumption in small activated sludge plants. *Water Science Technology*, v. 13, p. 371-379.
2. HENZE M., et al. (1987). General sludge model for single sludge wastewater treatment. *Water Science Technology*, v. 21, n. 5, p. 505-515.
3. KABOURIS, J. C.; GEORGAKAKOS, A. P. (1990). Optimal control of the activated sludge Process. *Water Research*, v. 24, n.10, p. 1197-1208.
4. KWAKERNAAK, H.; SIVAN, R. (1972). Linear Optimal Control Systems. New York, John Wiley & Sons.
5. LECH, R. F., et al. (1978). Automatic control of the activated sludge process - II. Efficacy of control strategies. *Water Research*, v. 12, p. 91-99.
6. LINDBERG, C. F.; CARLSSON, B. (1996). Adaptive control of external carbon flow rate in an activated sludge process. *Water Science Technology*, v.34, n. 3-4, p. 173-180.
7. LUKASSE, L. J. S., et al (1998). Optimal control of N-removal in ASPs. *Water Science Technology*, v.38, n. 3, p. 255-262.
8. OGATA, K. (1998). Engenharia de Controle Moderno. Rio de Janeiro, Prentice-Hall do Brasil.
9. VAN HAANDEL, A.; MARAIS, G. (1999). O comportamento do sistema de lodo ativado. Teoria e aplicações para projetos e operação. Campina Grande, epigraf.
10. VITASOVIC, Z. (1989). Continuous settler operation: a dynamic model. In: PATRY, G. G.; CHAPMAN, D. (org). *Dynamic Modeling and Expert Systems in Wastewater Engineering*. Michigan: Lewis Publishers, p. 59-81.
11. 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, São Carlos, SP.