

# Desenvolvimento de sistema de Controle Ótimo para processo de tratamento de efluentes

*Development of Optimal Control systems for wastewater treatment system*

José Antonio Tosta dos Reis<sup>1</sup>, Antonio Sérgio Ferreira Mendonça<sup>1</sup>

## RESUMO

Este trabalho teve por objetivo geral propor e avaliar técnicas de desenvolvimento de sistemas de controle automático para processos de tratamento de efluentes envolvendo lodos ativados. Os sistemas de controle propostos foram estabelecidos a partir da aplicação da Teoria de Controle Ótimo, considerando o emprego de um modelo dinâmico simplificado do processo de lodos ativados. Simulações computacionais foram utilizadas para a avaliação do desempenho dos sistemas de controle propostos. Os resultados obtidos permitiram concluir que o modelo dinâmico do processo de lodos ativados utilizado neste trabalho, estabelecido a partir de uma simplificação de modelo largamente aceito, segundo literatura técnica corrente, mostrou-se estável e adequado à definição de sistemas de controle.

**Palavras-chave:** modelo matemático; Controle Ótimo; lodos ativados.

## ABSTRACT

This study aimed at developing and evaluating techniques for the development of automatic control systems for wastewater treatment systems involving activated sludge process. The proposed control systems were established from the application of Optimal Control Theory, considering the use of a simplified dynamic model of the activated sludge process. Computer simulations were used to assess the performance of the control systems proposed. The results showed that the dynamic model of the activated sludge process utilized in this study, obtained by simplifying a very well accepted model, according to the current technical literature, was stable and suitable for the definition of control systems.

**Keywords:** mathematical model; Optimal Control; activated sludge.

## INTRODUÇÃO

Os processos de lodos ativados, apresentados originalmente na Inglaterra no início do século passado, envolvem a produção de flocos biológicos (biomassa), formados a partir de microrganismos que crescem e se aglutinam no interior de um tanque aerado. Aeradores mecânicos ou difusores, além de garantirem a manutenção de ambiente aeróbio e completamente misturado no interior do reator biológico, mantêm a biomassa suspensa e permanentemente em contato com os compostos orgânicos que lhes servem de substrato. Os processos de lodos ativados normalmente apresentam elevados consumos de energia, consideráveis índices de mecanização e elevadas produções de lodo. Entretanto, produzem efluentes finais com elevada qualidade e apresentam requisitos de área para implantação inferiores àqueles apresentados por outros processos aeróbios.

Nas últimas décadas, as pressões ambientais e econômicas têm forçado a busca de projetos e estratégias de operação que tornem os processos de tratamento de esgotos mais eficientes. Projetistas e operadores

têm se defrontado com elevados custos de implantação dos sistemas de tratamento, crescentes custos de operação (principalmente aqueles relacionados à energia elétrica, produtos químicos e mão de obra) e de padrões de qualidade ambiental cada vez mais rigorosos. Nesse contexto, o controle operacional automatizado apresenta-se como uma alternativa para a melhoria da *performance* dos processos de tratamento de esgotos.

A Teoria Convencional de Controle, que se consolidou até o final da década de 1950, permitiu o desenvolvimento de diversos sistemas de controle aplicáveis aos processos de lodos ativados. Os trabalhos de Garret (1958), Jenkins e Garrison (1968), Lech *et al.* (1978) e Clifft e Garrett (1988) ilustram a aplicação das técnicas convencionais para o controle dos processos de lodos ativados.

Mais recentemente, com a proposição de abrangentes modelos dinâmicos voltados para a descrição e avaliação do comportamento dos processos de lodos ativados, o Controle Convencional tem disputado espaço com técnicas estabelecidas pelo Controle Moderno.

<sup>1</sup>Professor do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) - Vitória (ES), Brasil.

**Endereço para correspondência:** José Antonio Tosta dos Reis - Avenida Fernando Ferrari, 514 - Goiabeira - 29075-910 - Vitória (ES), Brasil - E-mail: jatreis@gmail.com

**Recebido:** 26/10/11 - **Aceito:** 13/06/14 - **Reg. ABES:** 102

Diferentes técnicas reunidas pelo Controle Moderno empregam modelos matemáticos para a descrição do comportamento dinâmico dos sistemas de tratamento no desenvolvimento dos controladores. Os trabalhos de Kabouris e Georgakakos (1990), Lindberg e Carlsson (1996), Lindberg (1998), Lukasse *et al.* (1998), Reis (2003), Aguilar-López (2008), Koumboulisa *et al.* (2008), Amand e Carlsson (2012) e Han *et al.* (2012) constituem alguns exemplos de aplicação da Teoria Moderna no desenvolvimento de sistemas de controle aplicáveis aos processos de lodos ativados.

Samuelsson (2001), no entanto, observa que os modelos dinâmicos mais frequentemente utilizados para a descrição do comportamento dos processos de lodos ativados são complexos, envolvendo considerável número de componentes e de taxas de reação. Segundo ele, esses modelos são de difícil calibração e têm tido utilização direta limitada no desenvolvimento de sistemas de controle aplicáveis aos processos de lodos ativados.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo principal avaliar as perspectivas de desenvolvimento de sistemas de controle automático para os processos de lodos ativados, considerando o emprego da Teoria de Controle Ótimo e o uso de um modelo dinâmico simplificado do processo de lodos ativados.

## METODOLOGIA

### Modelo dinâmico

Neste trabalho, o comportamento do tanque de aeração foi descrito a partir de um modelo dinâmico simplificado que simula o comportamento das concentrações de biomassa heterotrófica ativa ( $X_b$ ), de substrato rapidamente biodegradável ( $S_s$ ) e de substrato lentamente biodegradável ( $X_s$ ). O modelo empregado reproduz as equações originalmente propostas por Henze *et al.* (1987) mas não considera, no entanto, fenômenos de crescimento aeróbio de microrganismos autotróficos e de decaimento de microrganismos autotróficos nem outras parcelas de sólidos presentes no processo de lodos ativados.

O comportamento dinâmico do decantador secundário foi simulado a partir do modelo unidimensional proposto por Vitasovic (1989). Para a simulação do comportamento do decantador secundário, assumiu-se divisão em dez camadas.

Os modelos dinâmicos utilizados neste trabalho para descrever o comportamento do tanque de aeração e do decantador secundário foram linearizados com o emprego da Técnica da Perturbação, detalhadamente apresentada e discutida por Garcia (1997).

### Projeto dos sistemas de controle ótimo

Para a definição do sistema de controle ótimo, admitiu-se que o modelo dinâmico do processo de lodos ativados poderia ser escrito por meio da seguinte notação matricial:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Dw(t). \quad (1)$$

O vetor  $x$  representa o vetor de estado (vetor que reúne os desvios das variáveis  $X_b$ ,  $S_s$  e  $X_s$  em relação às condições de equilíbrio),  $u$  o vetor de controle (vetor que descreve a variação das vazões de recirculação e descarte do lodo em relação às condições de equilíbrio) e  $w$  o vetor de distúrbio (vetor que descreve a variação da vazão afluente bruta ao tanque de aeração em relação às condições de equilíbrio). As matrizes  $A$ ,  $B$  e  $D$  são denominadas, respectivamente, matrizes de estado, de entrada e de transmissão de distúrbios. Adicionalmente, ao se projetar o controlador ótimo, admitiu-se que o sistema seria completamente controlável e que seria possível implementar uma lei de controle na seguinte forma:

$$u(t) = -Kx(t), \quad (2)$$

sendo  $K$  a matriz de ganho de realimentação. Combinando-se as duas últimas equações, obteve-se um sistema realimentado descrito pela seguinte equação:

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) + Dw(t). \quad (3)$$

Ao se projetar um sistema de controle ótimo, deseja-se determinar a matriz de ganho de realimentação  $K$  do vetor de controle, de tal forma que um determinado índice de desempenho seja minimizado. Neste trabalho, foi utilizado o índice de desempenho quadrático, índice comumente utilizado no projeto de sistemas de controle ótimo. O referido índice foi representado pela seguinte expressão:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t))dt \quad (4)$$

Para sistemas lineares e invariantes no tempo, Kwakernaak e Sivan (1972) demonstram que a matriz  $K$  pode ser obtida por meio da seguinte expressão:

$$K = R^{-1}B^T P. \quad (5)$$

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

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T R + Q = 0. \quad (6)$$

Neste trabalho, as matrizes de ponderação que compõem o índice quadrático de desempenho (matrizes  $Q$  e  $R$ ) foram definidas a partir da aplicação do Método Inverso Quadrático de Bryson (BRYSON e HO, 1969).

## Projeto do observador de estados

Na prática operacional de um processo de lodos ativados, nem todas as variáveis de estado podem ser monitoradas, sendo necessário estimar aquelas que não puderem ser medidas. O dispositivo (ou programa de computador) que estima as variáveis de estado é denominado observador de estados.

Para a definição do observador de estados proposto neste trabalho, considerou-se que o sistema descrito pelas equações (1) e (5) poderia ser aproximado por meio da seguinte expressão:

$$\dot{\bar{x}}(t) = A\bar{x}(t) + Bu(t) + Dw(t) + K_c[y(t) - C\bar{x}(t)]. \quad (7)$$

A última expressão representa o observador de estados. Nessa expressão, o último termo do segundo membro representa uma correção que envolve a diferença entre o vetor de saída e o vetor estimado pelo observador ( $C\bar{x}(t)$ ). A lei de controle passou, então, a ser baseada no estado observado e foi reescrita da seguinte forma:

$$u(t) = -K\bar{x}(t) \quad (8)$$

Definindo-se um vetor erro ( $e(t)$ ) como sendo a diferença entre o estado real e o estado observado,

$$e(t) = x(t) - \bar{x}(t) \quad (9)$$

a dinâmica do sistema, com a inclusão do observador de estados, passou a ser representada pela seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}'(t) \\ \dot{e}'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A-BK & BK \\ 0 & A-K_cC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix} w(t) \quad (10)$$

sendo  $K_c$  a matriz de ganho do observador.

Ogata (1982) observa que as matrizes de ganho do controlador e do observador são independentes e podem ser calculadas separadamente; adicionalmente, sugere como regra prática a adoção de uma resposta para o observador que seja, no mínimo, de duas a cinco vezes mais rápida que a resposta do sistema. Esse procedimento, o mais intuitivo dos procedimentos de ajuste de um observador, foi utilizado no presente trabalho. Adicionalmente, assumiu-se durante o desenvolvimento dos observadores de estado que apenas a concentração de substrato poderia ser monitorada.

## Descrição do sistema de tratamento

Para o estabelecimento de um sistema de controle aplicável ao processo de lodos ativados, foi utilizado, como exemplo, o sistema de tratamento proposto por Van Haandel e Marais (1999). Nesse sistema, o processo

de tratamento dos esgotos se estabelece em um tanque de aeração considerado completamente misturado, seguido por um decantador secundário, características que conformam um sistema convencional de lodos ativados. Na Tabela 1, estão reunidos os parâmetros empregados na modelagem do processo de lodos ativados.

Os dados referentes às características do material orgânico presente no afluente ao sistema são apresentados na Tabela 2. Nessa tabela estão indicadas a concentração de material orgânico afluente e a sua distribuição entre as frações biodegradável e não biodegradável, solúvel e particulada. É relevante observar, no entanto, que apenas as frações biodegradáveis foram consideradas na construção dos sistemas de controle objetos deste estudo.

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 3.

## Avaliação do desempenho dos sistemas de controle

Nas simulações computacionais realizadas neste trabalho para avaliação do desempenho dos sistemas de controle propostos, a vazão afluente ao tanque de aeração variou segundo as funções pulso, degrau e senoidal. Esses padrões de variação, que de fato constituem funções temporais muito simples, são entradas típicas de teste, comumente

**Tabela 1 - Parâmetros empregados na modelagem do processo de lodos ativados.**

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Fator de produção de biomassa heterotrófica	Y	gDQO <sub>formada</sub> /gDQO <sub>oxidada</sub> <sup>-1</sup>	0,45
Fração de biomassa que produz particulados	f <sub>p</sub>	adimensional	0,20
Constante de decaimento da biomassa heterotrófica	b <sub>H</sub>	dia <sup>-1</sup>	0,24
Taxa de crescimento específico máxima da biomassa heterotrófica*	m <sub>H</sub>	dia <sup>-1</sup>	6,00
Constante de saturação para o oxigênio	k <sub>OH</sub>	gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	0,10
Constante de saturação para o substrato	k <sub>S</sub>	gDQO/m <sup>3</sup>	160
Taxa de hidrólise específica máxima do material lentamente biodegradável*	k <sub>H</sub>	gDQO/gDQO.dia <sup>-1</sup>	2,20
Constante de saturação para hidrólise do material lentamente biodegradável*	k <sub>x</sub>	gDQO/gDQO.dia <sup>-1</sup>	0,15
Constantes de sedimentabilidade	n	L.g <sup>-1</sup>	0,46
	n	m.h <sup>-1</sup>	6,00

Fonte: adaptado de Van Haandel e Marais (1999). Nota: \*Valores adotados a partir de Henze *et al.* (1987).

**Tabela 2** - Características do material orgânico presente no afluente ao processo.

Parâmetro	Unidade	Valor
DBO afluente	mg.L <sup>-1</sup>	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

DBO: demanda bioquímica de oxigênio.  
Fonte: Van Haandel e Marais (1999).

**Tabela 3** - 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 <sup>3</sup>	3.699,00
Área do decantador	m <sup>2</sup>	577,00
Profundidade do decantador	M	4,00
Vazão afluente ao tanque de aeração	m <sup>3</sup> .dia <sup>-1</sup>	12.000,00
Vazão efluente do tanque de aeração	m <sup>3</sup> .dia <sup>-1</sup>	15.938,00
Vazão de recirculação de lodo	m <sup>3</sup> .dia <sup>-1</sup>	5.160,00
Vazão de descarte de lodo	m <sup>3</sup> .dia <sup>-1</sup>	1.232,00

Fonte: Van Haandel e Marais (1999).

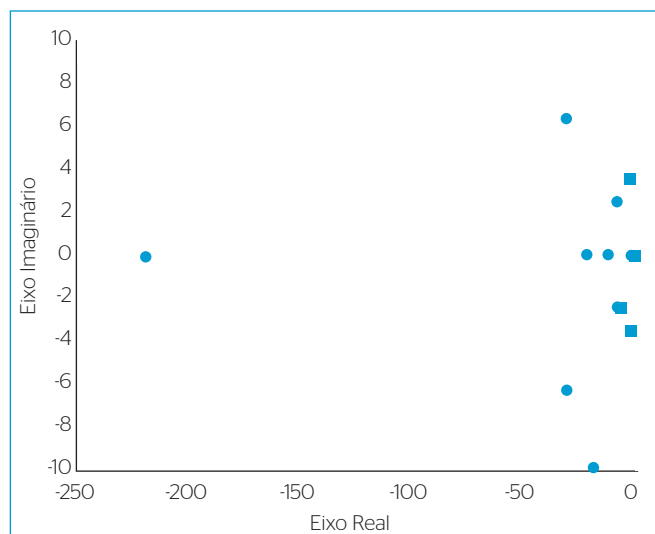
utilizadas durante o estabelecimento e a avaliação do desempenho dos sistemas de controle. Segundo Ogata (1982), os sistemas de controle projetados com base nos sinais de teste usualmente apresentam desempenho satisfatório quando submetidos a entradas reais. Adicionalmente, Ogata (1982) observa que os sinais de teste permitem comparar o desempenho de todos os sistemas de controle projetados em relação a uma mesma base.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Sistema de controle sem observação de estados

O aspecto mais importante para o desenvolvimento de um sistema de controle é, normalmente, sua estabilidade. Simplificadamente, pode-se dizer que um sistema é estável se sua saída volta ao estado de equilíbrio quando o sistema é submetido a uma excitação inicial. Por outro lado, caso as respostas divirjam do seu estado de equilíbrio após a excitação inicial, o sistema é considerado instável.

Conforme discutem Kwakernaak e Sivan (1972), um sistema contínuo no tempo é considerado estável quando todos os seus autovalores estão situados no semiplano esquerdo do plano complexo. Como indica Figura 1, o sistema de equações utilizado neste estudo para descrever o tanque de aeração e o decantador secundário apresentou-se estável.

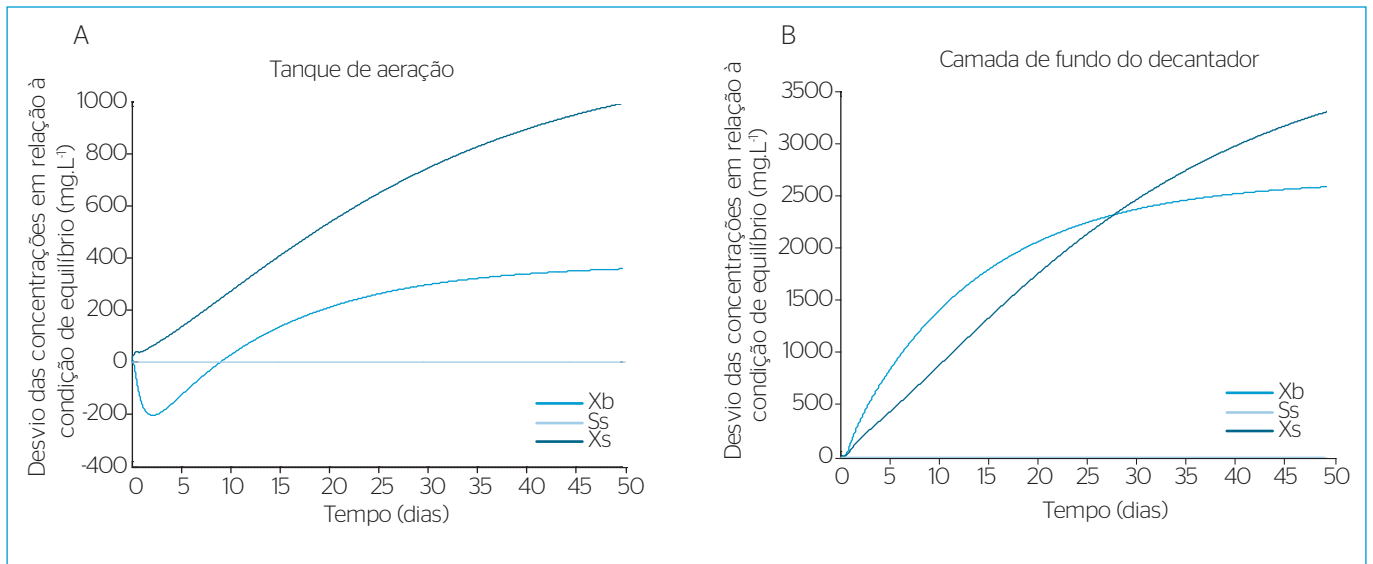
**Figura 1** - Autovalores do sistema que descreve o comportamento do tanque de aeração e decantador secundário do processo de lodos ativados.

O comportamento das variáveis de estados para o tanque de aeração e para a camada de fundo do decantador, considerando a imposição de um degrau à vazão afluente, está ilustrado nas Figuras 2 e 3. O comportamento das variáveis de estado sem a ação do controlador sobre o processo de lodos ativados está ilustrado na Figura 2. Os ganhos produzidos com a incorporação do controlador podem ser avaliados a partir da Figura 3. Nesse grupo de simulações, o degrau imposto à vazão afluente equivale a 20% do valor da referida vazão nas condições de equilíbrio do sistema.

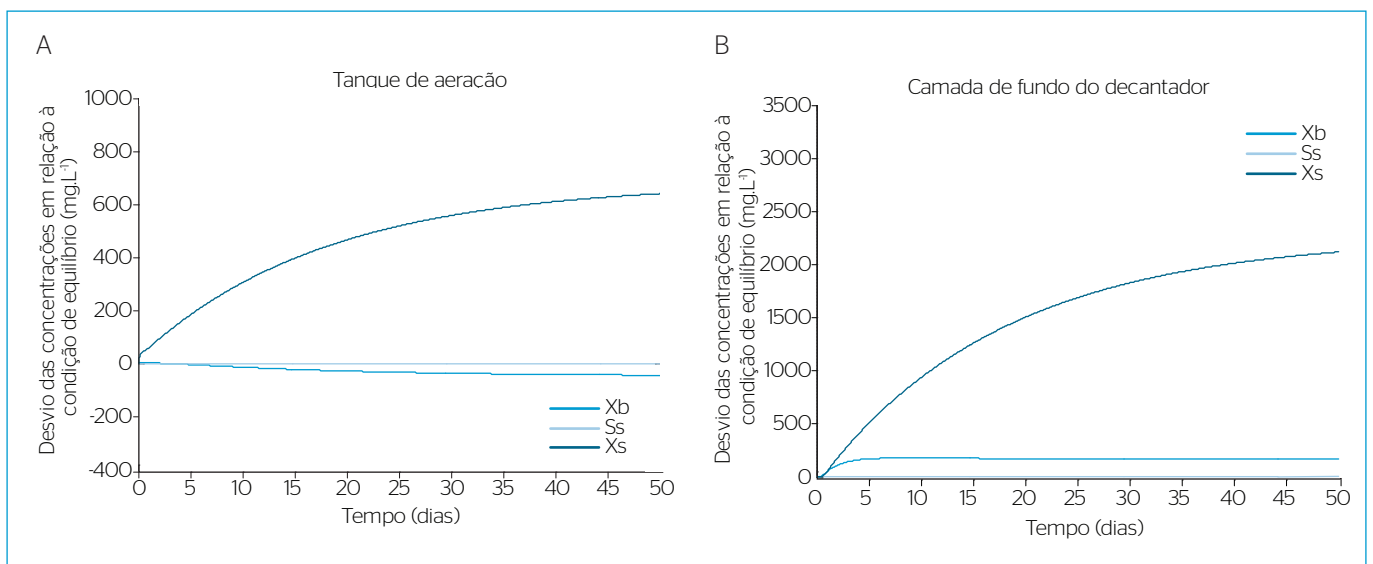
Com o aumento da vazão afluente, a quantidade de sólidos no fundo do decantador e, por consequência, no lodo recirculado, progressivamente, foi aumentada. Como aumentos na vazão afluente foram seguidos por elevações nas vazões de recirculação do lodo (elevações, embora menores, foram também indicadas para a vazão de descarte do lodo), as novas concentrações de equilíbrio para a biomassa e para as diferentes parcelas de substrato no tanque de aeração foram superiores àquelas que eram observadas para o sistema não perturbado.

Com a incorporação do controlador ao processo de lodos ativados (resultados apresentados pela Figura 3), os desvios das variáveis de estado em relação às condições de equilíbrio e o tempo necessário para que novas condições de equilíbrio fossem estabelecidas foram reduzidos. A ação do controlador reduziu substancialmente os desvios apresentados pelas concentrações de  $X_b$  e, como consequência, reduções foram também observadas nas concentrações de  $X_s$ .

As reduções nas concentrações de  $X_s$ , entretanto, não foram significativas em razão dos seguintes aspectos: (a) as concentrações de  $X_s$  no afluente foram maiores que aquelas observadas nas condições iniciais de equilíbrio do tanque de aeração (para a biomassa e para as demais



**Figura 2** - Desvios das variáveis de estado no tanque de aerção (A) e na camada de fundo do decantador (B), sem a ação do controlador, considerada a imposição de um degrau à vazão afluyente.



**Figura 3** - Desvios das variáveis de estado no tanque de aerção (A) e na camada de fundo do decantador (B), com a ação do controlador, considerada a imposição de um degrau à vazão afluyente.

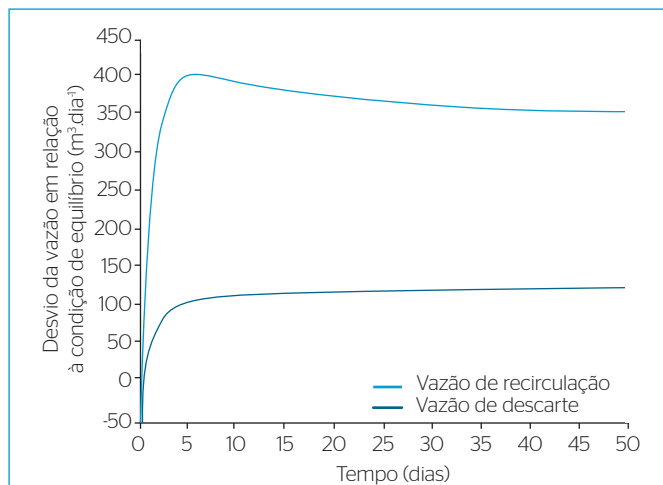
parcelas do substrato ocorreu o inverso) e (b) a maior parcela da biomassa decaída foi convertida em substrato lentamente biodegradável.

O comportamento das variáveis de controle do processo de lodos ativados está ilustrado na Figura 4. Nessa figura pode ser observado que elevações na vazão afluyente foram seguidas por elevações nas vazões de recirculação e, em menor grau, de descarte do lodo.

Os resultados obtidos com a imposição de um pulso na vazão afluyente foram qualitativamente similares àqueles obtidos na aplicação de variação segundo a função degrau. No caso do pulso, entretanto, como a vazão afluyente retornou às condições iniciais, as variáveis de

estado progressivamente retornaram aos valores que apresentavam antes da aplicação do pulso.

Os resultados obtidos para o tanque de aerção e para a última camada do decantador, a partir da variação periódica da vazão afluyente, estão apresentados nas Figuras 5 e 6. Na primeira figura, estão ilustrados os resultados obtidos sem a ação do controlador sobre o processo de lodos ativados. Na segunda, é mostrado o comportamento das variáveis de estado após a incorporação do controlador. É relevante observar que a variação periódica imposta à vazão afluyente foi estabelecida a partir da função seno, considerando-se

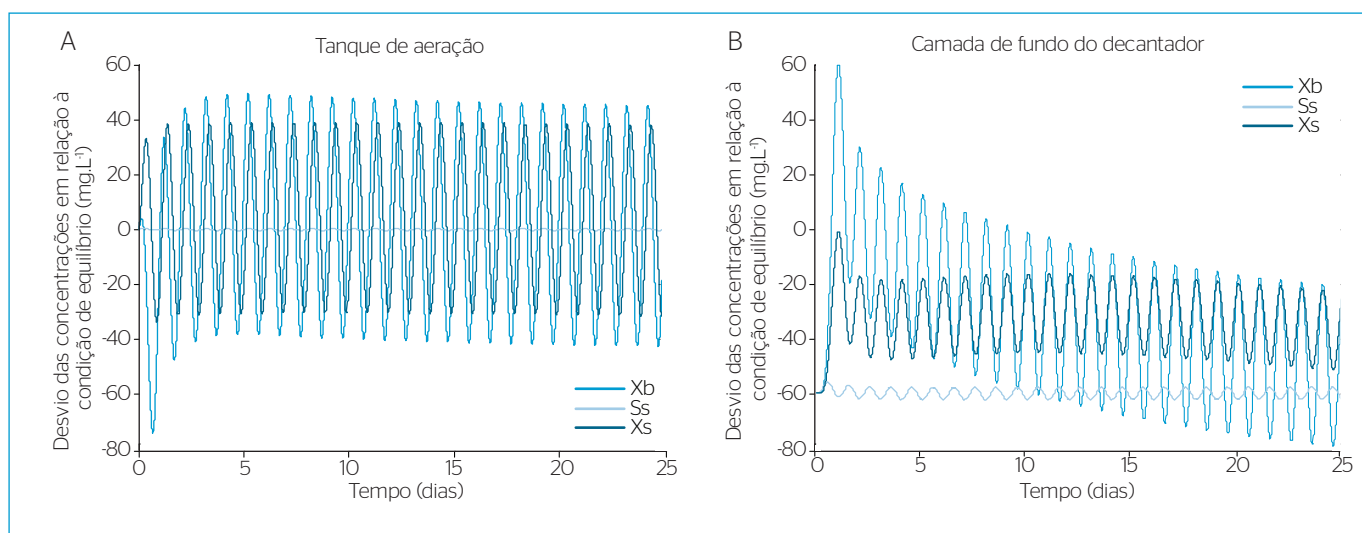


**Figura 4** - Desvios das variáveis de controle do processo de lodos ativados.

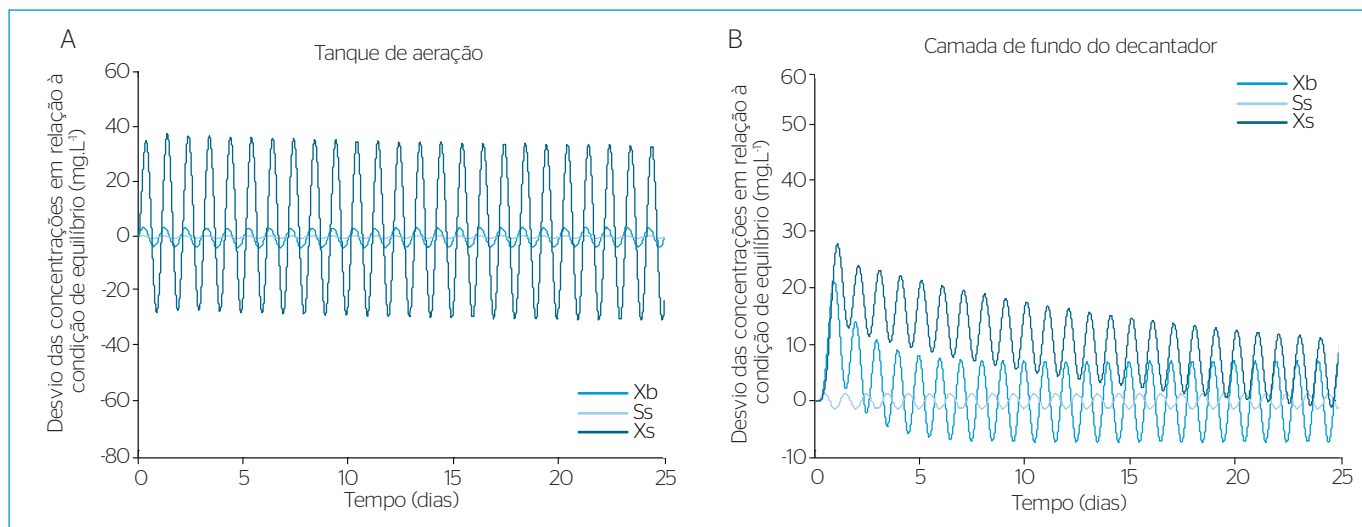
que, nos picos de variação da vazão afluyente, o desvio em relação à condição de equilíbrio era de  $\pm 20\%$ .

Da simples inspeção das Figuras 5 e 6, pode-se observar que as variações periódicas da vazão afluyente não provocaram aumentos consideráveis nas concentrações de sólidos recirculados para o tanque de aeração. Os desvios observados na camada de fundo do decantador foram pouco expressivos quando comparados com as concentrações de equilíbrio das diferentes variáveis de estado no lodo recirculado. Adicionalmente, a incorporação da ação do controlador tornou ainda menos relevantes esses desvios.

O comportamento das variáveis de controle do processo está apresentado na Figura 7. Percebe-se, dessa figura, que elevações na vazão afluyente foram seguidas por aumentos nas vazões de recirculação e de descarte do lodo. Da mesma forma, reduções na vazão afluyente



**Figura 5** - Desvios das variáveis de estado no tanque de aeração (A) e na camada de fundo do decantador (B), sem a ação do controlador, considerada a imposição de uma variação periódica à vazão afluyente.



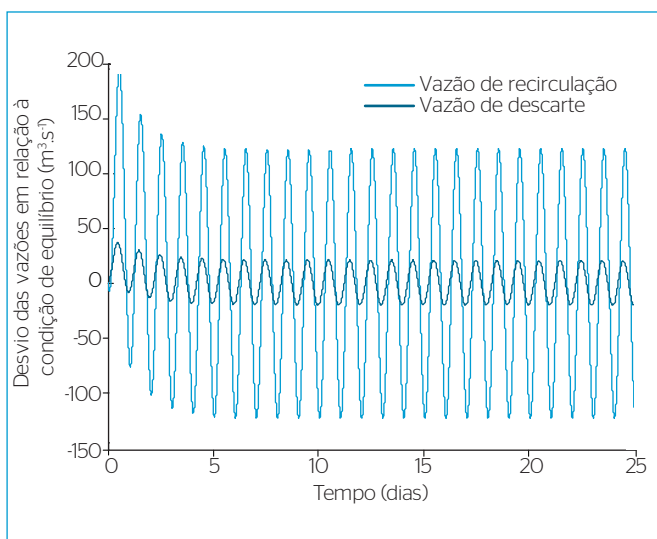
**Figura 6** - Desvios das variáveis de estado no tanque de aeração (A) e na camada de fundo do decantador (B), com a ação do controlador, considerada a imposição de uma variação periódica à vazão afluyente.

produziram reduções nos valores das variáveis de controle. Como nas demais situações simuladas, os desvios foram mais expressivos na vazão de recirculação do lodo.

### Sistema de controle com observação de estado

Para a definição do observador de estado, as parcelas biodegradáveis de substrato (soma das concentrações das frações rápida e lentamente biodegradáveis do substrato) no tanque de aeração e em cada uma das camadas do decantador constituíram as variáveis disponíveis para a realimentação do sistema de controle.

Para a definição da matriz de ganho do observador de estados, os pólos do observador foram escolhidos de tal maneira que as respostas



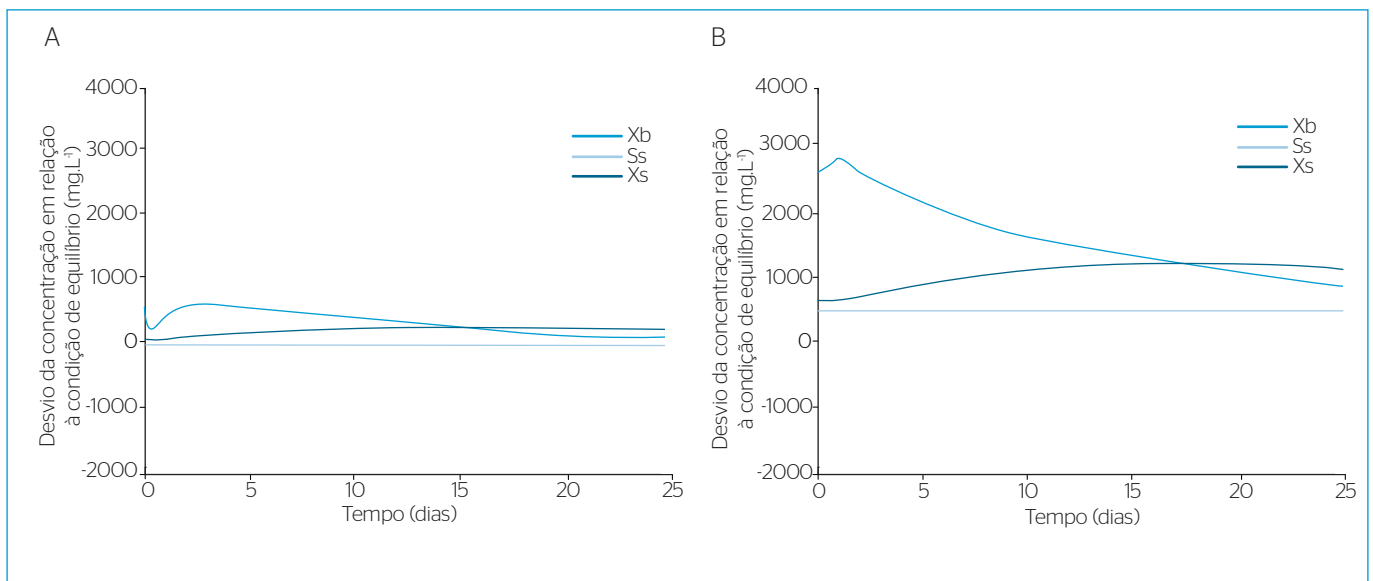
**Figura 7** - Desvios das variáveis de controle do processo de lodos ativados, considerada a imposição de uma variação periódica à vazão afluente.

fossem mais rápidas que aquelas apresentadas pelo controlador. Dessa forma, a partir da alocação dos pólos do observador em diferentes posições do plano complexo, selecionou-se a matriz de ganho do observador de estados.

O desempenho do sistema de controle foi avaliado, então, a partir da resposta das variáveis de estado a condições iniciais arbitrárias. Nessa etapa do trabalho, considerou-se que todas as variáveis de estado apresentavam concentrações 25% acima dos seus valores de equilíbrio. As respostas obtidas com as diferentes possibilidades de controle estão ilustradas nas Figuras 8 a 10. Na primeira figura, as vazões de recirculação e descarte do lodo permaneceram constantes. Na Figura 9, são ilustrados os efeitos produzidos com a incorporação do controlador, não existindo observação de estados (nesse caso, todas as variáveis de estado apresentavam-se disponíveis para realimentação). A Figura 10, por sua vez, ilustra o comportamento das variáveis de estado após a incorporação de um controlador com realimentação de estados observados.

A partir da observação das três últimas figuras, apresentam-se como relevantes as seguintes considerações:

- como o sistema dinâmico que descreve o comportamento do tanque de aeração e do decantador secundário é estável, as concentrações de equilíbrio das variáveis de estado foram restabelecidas mesmo sem a atuação de um controlador (Figura 8);
- a incorporação do controlador reduziu rapidamente os desvios apresentados pelas variáveis de estado e o tempo necessário para que as concentrações de equilíbrio fossem restabelecidas (Figura 9);
- a introdução do observador de estados aumentou o tempo de acomodação e os desvios das variáveis de estado, se considerados os resultados obtidos com a ação do controlador sem a observação de estados.



**Figura 8** - Resposta das variáveis de estados que caracterizam o tanque de aeração (A) e última camada do decantador secundário (B), sem a ação do controlador, a condições iniciais arbitrárias.



No entanto, se considerados os resultados ilustrados na Figura 8 (sistema sem a ação do controlador), a incorporação de um controlador com reconstrução de estados (Figura 10) melhorou substancialmente o desempenho do processo de lodos ativados.

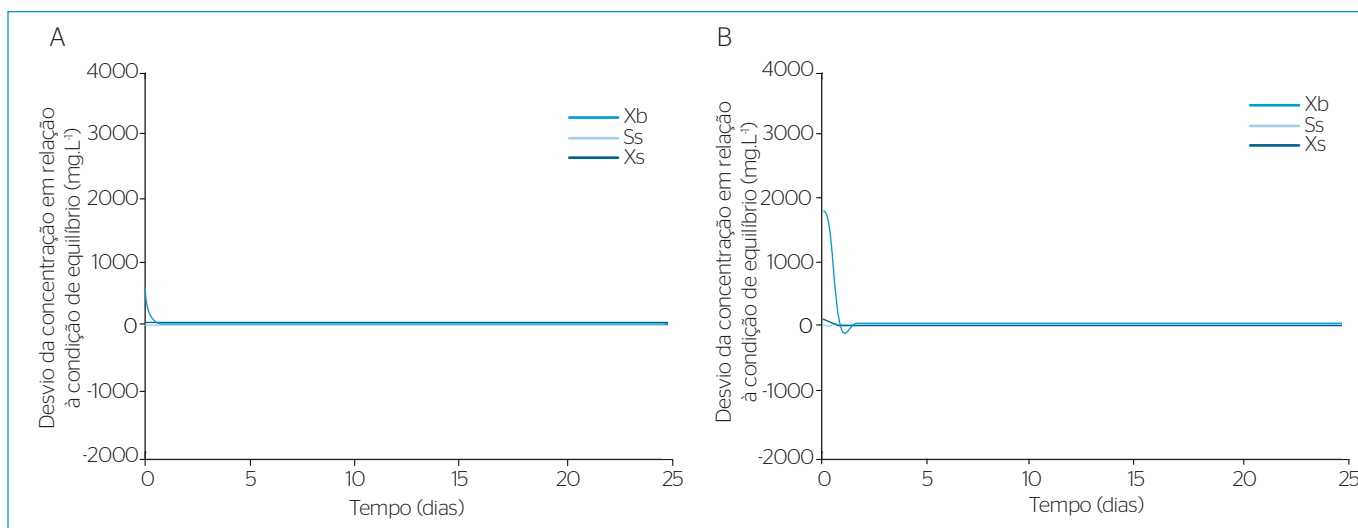
## CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas a partir deste trabalho podem ser assim sumarizadas:

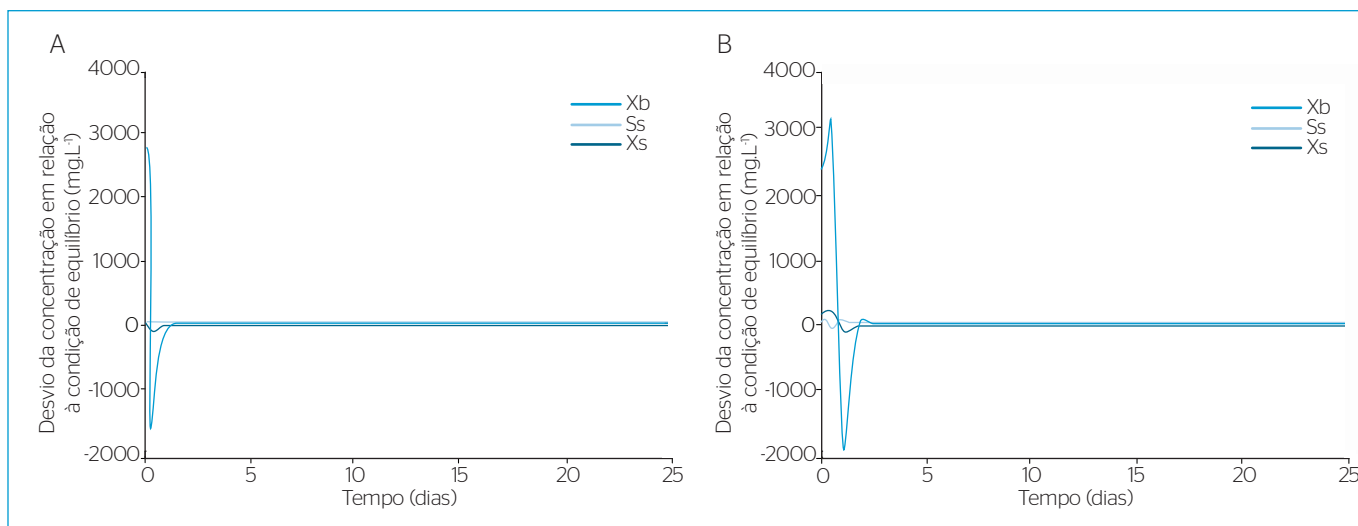
- O modelo linear e invariante no tempo utilizado para a descrição do comportamento dinâmico dos processos de lodos ativados,

obtido a partir de uma simplificação de modelo consagrado pela literatura técnica corrente, mostrou-se estável e adequado à definição de sistemas de controle.

- Os sistemas de controle propostos para o processo de lodos ativados permitiram reduzir de forma substancial as oscilações apresentadas pelas concentrações de biomassa. As reduções nas oscilações da parcela lentamente biodegradável, entretanto, não foram significativas. A diferença nas composições do afluente 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



**Figura 9** - Resposta das variáveis de estados que caracterizam o tanque de aeração (a) e última camada do decantador secundário (b), com a ação do controlador e sem observador de estados, a condições iniciais arbitrárias.



**Figura 10** - Resposta das variáveis de estados que caracterizam o tanque de aeração (a) e última camada do decantador secundário (b), com a ação do controlador e com observador de estados, a condições iniciais arbitrárias.



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; essa 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 afluente. 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.

- Nas simulações do comportamento do processo de lodos ativados, o esforço de controle produziu variações nas vazões de recirculação e descarte do lodo. Nesta última, entretanto, as variações foram menos significativas.

- Os controladores com observação de estados permitiram melhorar o desempenho dos processos de lodos ativados, diminuindo os desvios das variáveis de estado em relação aos seus valores nominais e o tempo necessário para que as condições de equilíbrio fossem restabelecidas após a imposição de perturbações à vazão afluente.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES) pelo apoio financeiro para a condução do projeto “Desenvolvimento de controladores automáticos para processos de lodos ativados a partir da utilização de modelos dinâmicos simplificados”, registrado na referida fundação por meio do processo nº 36250929/2007.

## REFERÊNCIAS

- AGUILAR-LÓPEZ, R. (2012) Robust Generic Model Control for Dissolved Oxygen in Activated Sludge Wastewater Plant. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, v. 22, n. 1, p. 71-79.
- AMAND, L. & CARLSSON, B. (2012) Optimal aeration control in a nitrifying activated sludge process. *Water Research*, v. 46, n. 7, p. 2101-2110.
- BRYSON, A.E. & HO, Y.C. (1969) *Applied Optimal Control*. Massachusetts: Ginn & Co.
- CLIFFT, R.C. & GARRETT, M.T. (1988) Improved oxygen dissolution control for oxygen activated sludge. *Water Science Technology*, v. 20, n. 4-5, p. 101-108.
- DUPPONT, R. & HENZE, M. (1992) Modeling of the secondary clarifier combined with the Activated Sludge Model nº 1. *Water Science Technology*, v. 25, n. 6, p. 285-300.
- GARCIA, C. (1997) *Modelagem e Simulação*. São Paulo: EDUSP.
- GARRETT, M.T. (1958) Hydraulic control of activated sludge growth rate. *Sewage and Industrial wastes*, v. 30, p. 253-261.
- HAN, H.; QIAO, J.; CHEN, Q. (2012) Model predictive control of dissolved oxygen concentration based on a self-organizing RBF neural network. *Control Engineering Practice*, v. 20, n. 4, p. 465-476.
- HENZE M.; GRADY Jr, C.P.L.; GUJER, W.; MARAIS, G.V.R.; MATSUO, T. (1987) General sludge model for single sludge wastewater treatment. *Water Science Technology*, v. 21, n. 5, p. 505-515.
- JEPSSON, U. & DIEHL, S. (1996) On the modeling of the dynamic propagation of biological components in the secondary clarifier. *Water Science Technology*, v. 34, n. 5-6, p. 85-92.
- KABOURIS, J.C. & GEORGAKAKOS, A.P. (1990) Optimal control of the activated sludge Process. *Water Research*, v. 24, n. 10, p. 1197-1208.
- KOUMBOULISA, F.N.; KOUVAKAS, N.D.; KING, R.E.; STATHAKI, A. (2008) Two-stage robust control of substrate concentration for an activated sludge process. *ISA Transactions*, v. 47, p. 267-278.
- KWAKERNAAK, H. & SIVAN, R. (1972) *Linear Optimal Control Systems*. New York: John Wiley & Sons.
- LECH, R.F.; GRADY Jr, C.P.; LIM, H.C.; KOPPEL, L.B. (1978) Automatic control of the activated sludge process - II. Efficacy of control strategies. *Water Research*, v. 12, p. 91-99.
- 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.
- LINDBERG, C.F. (1998) Multivariable modeling and control of an activated sludge process. *Water Science Technology*, v. 37, n. 12, p. 149-156.
- LUKASSE, L.J.S.; KEESMAN, K.J.; KLAPWIJK, A.; VAN STRATEN, G. (1998) Optimal control of N-removal in ASPs. *Water Science Technology*, v. 38, n. 3, p. 255-262.

OGATA, K. (1982) *Engenharia de Controle Moderno*. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil.

REIS, J.A.T. (2003) *Desenvolvimento de sistemas de Controle Ótimo aplicáveis à operação de processos aeróbios de tratamento de esgotos*. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Programa de Pós-graduação em Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.

SAMUELSSON, P. (2001) *Modelling and Control of Activated Sludge Processes with Nitrogen Removal*. Dissertação (Licentiate of

Philosophy in Automatic Control) -Department of Systems and Control Information Technology, Uppsala University, Uppsala, Suécia.

VAN HAANDEL, A. & MARAIS, G. (1999) *O comportamento do sistema de lodo ativado - Teoria e aplicações para projeto e operação*. Campina Grande: Epgraf.

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.