

MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA MEDIÇÃO DA TAXA DE CONSUMO DE OXIGÊNIO EM SISTEMAS DE LODO ATIVADO

†Sebastian Y. C. Catunda, †Gurdip S. Deep,
‡Adrianus C. van Haandel e †Raimundo C. S. Freire

†UFPB/CCT/DEE, ‡UFPB/CCT/DEC, Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó
Caixa Postal 10004, 58 109 -970, Campina Grande, PB, Brasil
E-Mail: catunda@dee.ufpb.br

Abstract - The measurement of the respiration rate or oxygen uptake rate (OUR) is very important in activated sludge system control. It provides information about the quality of the influent, activated sludge quality and can indicate the presence of toxic elements in the influent that can poison the system. The existing methods for continuously estimating the respiration rate from the measured values of dissolved oxygen concentration have, generally, a long sampling interval of a few minutes. In this paper, a classical method is described and two alternative methods for measuring the respiration rate with much shorter sampling interval are proposed. The results of simulation studies, as well as qualitative experimental results of a microcontroller based data acquisition system connected to a PC, around a laboratory scale biological reactor are presented and the different methods are compared.

Resumo - A Medição da taxa de respiração ou taxa de consumo de oxigênio (TCO) é de grande importância para o controle e monitoração de sistemas de lodo ativado. A TCO provê informações sobre a qualidade do afluente e do lodo ativado e pode indicar também a presença de elementos tóxicos no afluente que possa comprometer o desempenho do sistema. Os métodos existentes para estimação da TCO a partir de medições da concentração de oxigênio dissolvido apresentam, geralmente, um intervalo de amostragem longo, de cerca de alguns minutos. Neste trabalho, são apresentados dois métodos alternativos, que possibilitam intervalo de amostragem de medição da TCO mais curto. Resultados experimentais qualitativos, obtidos com um sistema de lodo ativado em escala reduzida através de um sistema de aquisição de dados a microcontrolador conectado a um PC, e resultados de simulações, são apresentados e comparados.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a maior parte dos sistemas de tratamento de águas residuárias utiliza lodo ativado, que emprega microorganismos aeróbios para consumir a matéria orgânica, principal agente poluidor ambiental. Neste processo, os microorganismos utilizam o oxigênio dissolvido na água, que é repostado através

de aeradores. A taxa de respiração ou taxa de consumo de oxigênio (TCO) é uma das poucas variáveis acessíveis que indica a atividade no lodo (van Haandel e Catunda, 1982). Ela descreve o consumo de oxigênio pelos microorganismos por unidade volumétrica com o tempo, quantificando a atividade metabólica no lodo ativado. Através da TCO é possível obter-se informações sobre a qualidade desse lodo e do afluente, como também detectar indiretamente a presença de elementos tóxicos que possam envenenar os microorganismos e comprometer o sistema de tratamento. A TCO pode ser calculada a partir de medições da concentração de oxigênio dissolvido (OD) em instantes diferentes, utilizando um transdutor adequado (YSI 5700).

Neste trabalho, discute-se um método clássico e apresentam-se dois métodos alternativos para medição da TCO, que possibilitam uma taxa de amostragem maior. O primeiro desses métodos alternativos consiste em calcular diretamente a TCO a partir da equação discreta da dinâmica de OD (Catunda *et alii*, 1996a). O segundo consiste em controlar a concentração média de OD utilizando um determinado valor de referência, usando modulação em largura de pulso da aeração (PWM) e o valor da TCO é obtido a partir do ciclo de trabalho do sinal PWM (Catunda *et alii*, 1996b). O primeiro e o segundo método alternativo são referidos neste trabalho, como método direto e método PWM, respectivamente.

2 DINÂMICA DO OXIGÊNIO DISSOLVIDO

A concentração de oxigênio dissolvido em água num reservatório (tanque, reator, etc.) depende principalmente da concentração de OD no afluente (entrada), da taxa de aeração e do consumo de oxigênio dissolvido no reator, TCO. O modelo matemático contínuo para o balanço de massa de oxigênio dissolvido é dado por (Bastin and Dochain, 1990):

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{Q(t)}{V} [y_{in}(t) - y(t)] + K_L a(q(t)) [y_{sat} - y(t)] - R(t) \quad (1)$$

em que $y(t)$, $y_{in}(t)$ e y_{sat} são as concentrações de oxigênio dissolvido no reator, no afluente e de saturação em miligramas por litro (mg/ℓ), respectivamente; $Q(t)$ é a vazão de entrada do afluente em litro por hora (ℓ/h); V é o volume do líquido no reator em ℓ; $K_L a(q)$ é o coeficiente global de transferência de

Artigo submetido em 23/03/97
1a. Revisão em 29/08/97; 2a. Revisão em 17/12/97
Aceito sob recomendação do Ed. Cons. Prof.Dr. Paulo Sérgio
Pereira da Silva

oxigênio em h^{-1} ; $q(t)$ é a vazão de ar inserido no sistema em l/h e $R(t)$ é a TCO, em $mg/l.h$.

É importante salientar que quando a concentração de OD está acima de um determinado valor crítico, sua influência na TCO pode ser desprezada. Esse valor crítico de concentração de OD pode ser encontrado experimentalmente e geralmente está compreendido entre 0 e 0,5 mg/l (van Haandel e Catunda, 1982).

Considerando-se que a vazão específica de entrada do afluente é bem pequena (uma razão Q/V da ordem de $10 h^{-1}$, ou menor), pode-se desprezar o primeiro termo da equação (1), resultando em:

$$\frac{dy(t)}{dt} = K_L a(q(t)) [y_{sat} - y(t)] - R(t). \quad (2)$$

Na equação (2) a variação da concentração de OD é proporcional à taxa de aeração menos a TCO. Com a velocidade de agitação, a concentração de oxigênio no gás e a pressão do gás constantes, para uma determinada vazão de ar do aerador, a taxa de aeração do sistema na base volumétrica é proporcional à diferença entre o valor de saturação e o valor corrente da concentração de OD e é dada por: $K_L a(q)(y_{sat} - y(t))$, em $mg/l.h$.

O coeficiente global de transferência de oxigênio, $K_L a(q)$, é uma função não linear da vazão de ar $q(t)$ e depende também das condições ambientais e de operação do sistema. No caso de utilização de um sistema de tratamento em escala reduzida, com aeradores pequenos do tipo liga-desliga, pode-se considerar $K_L a(q)$ constante quando o aerador está ligado. Uma forma típica desta curva pode ser vista na Figura 1 (Lindberg, 1995), na qual os valores da vazão de ar fornecido pelo aerador quando está ligado, e desse coeficiente são q_{max} e K_{max} , respectivamente.

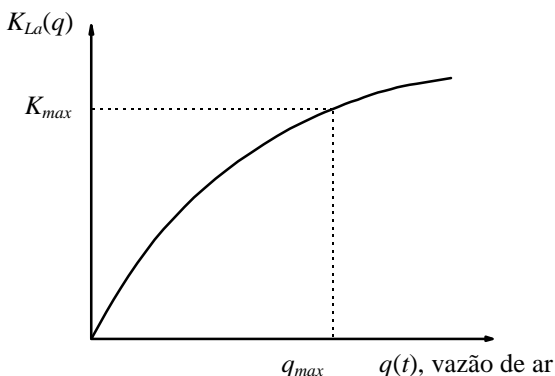


Figura 1. Forma típica da curva do coeficiente global de transferência de oxigênio em função da vazão de ar.

Para os métodos alternativos de medição da TCO apresentados neste trabalho, é necessário que se tenha um modelo discreto no tempo para a concentração de OD. Esse modelo pode ser obtido discretizando-se a equação contínua (2), através de Euler Direto (Lindberg, 1995):

$$y(k+1) = y(k) + h[K_L a(q(k))(y_{sat} - y(k)) - R(k)] \quad (3)$$

em que h é o período de amostragem ($t = k.h$), e é bem menor do que a constante de tempo associada à dinâmica do sistema.

3 MÉTODO CLÁSSICO

Para o método clássico para medição da TCO, define-se duas referências distintas de concentração de OD. O método consiste em aerar o lodo ativado até que a concentração de OD atinja a referência superior. Logo após atingir esse limite, a aeração é interrompida e a diminuição da concentração de OD, devida ao consumo de oxigênio pelos microorganismos, é medida em função do tempo. Quando a concentração de OD atinge a referência inferior, reinicia-se a aeração, começando assim um novo ciclo. A TCO pode ser calculada como a declividade da curva durante a diminuição da concentração de OD, ou seja:

$$\hat{R} = \frac{-\Delta y_m}{\Delta t} \quad (4)$$

em que Δy_m é a variação da concentração de OD, medida no intervalo de tempo Δt , e \hat{R} é a TCO estimada.

Se os valores da concentração de OD $y_m(k)$, medidos durante o intervalo de tempo sem aeração, são disponíveis, pode-se utilizar regressão linear para encontrar a equação da reta que aproxima a curva de diminuição, dada por $y = a - R.t$, que melhor se ajuste a este conjunto de pontos medidos. Define-se então, a função de custo χ^2 para um conjunto de N pontos medidos $y_m(k)$ como:

$$\chi^2(R, a) = \sum_{k=1}^N (y_m(k) - a + R.k.h)^2. \quad (5)$$

Minimizando-se χ^2 com relação a a e R , pode-se obter a TCO estimada, \hat{R} , como (Press *et alii*, 1988):

$$\hat{R} = \frac{\sum_{k=1}^N k \sum_{k=1}^N y_m(k) - N \sum_{k=1}^N y_m(k)k}{N \sum_{k=1}^N k^2 - \left(\sum_{k=1}^N k \right)^2} \frac{1}{h}. \quad (6)$$

Observa-se que o cálculo da TCO através de regressão linear apresenta geralmente melhores resultados do que o cálculo através da equação (4).

4 MÉTODO DIRETO

O método direto de medição consiste em estimar a TCO a partir de uma equação discreta modificada do sistema de oxigênio dissolvido. A partir da equação (3), fazendo-se a seguinte transformação de variáveis:

$$w(k) = y_{sat} - y(k)$$

obtem-se a equação:

$$w(k+1) = [1 - K_L a.h]w(k) + R.h. \quad (7)$$

Como R e $K_L a$ variam lentamente com o tempo, pode-se desconsiderar o índice k em R e a dependência de $K_L a$ em função de $q(k)$, supondo que estes não variam durante um período de amostragem. A equação (7) pode ser considerada como equação de diferença do déficit de oxigênio (o déficit sendo a diferença entre a concentração de OD de saturação e a concentração de OD medida).

Observa-se que a equação (7) representa a equação de uma reta, com $w(k+1)$ em função de $w(k)$. Essa equação pode ser reescrita como:

$$w(k+1) = b.w(k) + a + \varepsilon(k) \quad (8)$$

em que, $b = 1 - K_L a.h$, $a = R.h$ e $\varepsilon(k)$ é o erro associado à medição.

A estimação dos parâmetros a e b em (8) pode ser realizada através de regressão linear, utilizando-se os valores de $w(k)$, calculados a partir dos valores medidos da concentração de OD: $w_m(k) = y_{sat} - y_m(k)$. Entretanto, observa-se experimentalmente que o valor de b é muito próximo da unidade e pequenas variações na estimação deste parâmetro causam grandes variações no cálculo de $K_L a$. Dessa forma, obtém-se melhores resultados realizando a estimação de apenas um parâmetro por vez. A TCO é considerada constante durante um período de N amostras para formulação das equações. Dessa forma, uma variação brusca da TCO causa um erro de estimação, que é reduzido com a aquisição de novos valores de concentração de OD.

Para um conjunto de $N + 1$ amostras de $w_m(k)$, de maneira semelhante ao procedimento realizado com o método clássico, tem-se:

$$\hat{a} = \frac{\sum_{k=1}^N w_m(k+1) - b \cdot \sum_{k=1}^N w_m(k)}{N}, \hat{R} = \frac{\hat{a}}{h} \quad (9)$$

e

$$\hat{b} = \frac{\sum_{k=1}^N w_m(k+1) - a.N}{\sum_{k=1}^N w_m(k)}, \hat{K}_L a = \frac{1 - \hat{b}}{h} \quad (10)$$

Para que se possa realizar a estimação da TCO a cada novo valor de concentração de OD medido através da equação (9) é necessário utilizar uma janela móvel para armazenar os últimos $N + 1$ valores medidos.

4.1 Procedimento para estimação da TCO

Rearranjando-se os termos do somatório de (9), tem-se:

$$\hat{R} = \frac{w_m(N+1) - b.w_m(1) + (1-b) \sum_{k=2}^N w_m(k)}{N.h} \quad (11)$$

Observa-se que para $b = 1$ ($K_L a = 0$, sem aeração), a equação (11) se reduz à equação (4) do método clássico para cálculo de \hat{R} . Dessa forma, para estimação da TCO sem aeração, obtém-se melhores resultados através do método clássico, utilizando-se regressão linear. Sugere-se o seguinte procedimento para estimação experimental da TCO:

1. Desligar a aeração ($K_L a = 0$) e estimar o valor da TCO através do método clássico, equação (6) e do parâmetro a ($\hat{a} = \hat{R}.h$);
2. Ligar a aeração e estimar os valores de b e $K_L a$ através da equação (10), considerando-se que a TCO se mantém constante durante o intervalo: $[0, N.h]$;
3. A partir do valor de \hat{b} , com a aeração ligada, estimar o valor de R para cada valor de concentração de OD amostrado, usando a equação (9).

5 MÉTODO PWM

O método de medição PWM consiste em manter a concentração média de OD constante, utilizando um valor de referência pré-escolhido, podendo ser realizado por um controlador proporcional. A variável de controle utilizada é a taxa de aeração (ou taxa de transferência de oxigênio) que pode ser ajustada variando-se o valor médio efetivo do coeficiente global de transferência de oxigênio utilizando os aeradores (do tipo liga-desliga) em modulação em largura de pulso (PWM), com período total constante e muito mais curto que a constante de tempo associada à transferência de oxigênio (Figura 2). Dessa forma, pode-se definir:

$$K_m(k) = \frac{\tau(k)}{T} K_{max} \quad (12)$$

em que $K_m(k)$ é o valor médio efetivo do coeficiente global de transferência de oxigênio, $\tau(k)$ é o tempo em que o aerador fica ligado, T é o período total de um ciclo de aeração e K_{max} é o valor de $K_L a$ quando o aerador está ligado (Figura 1).

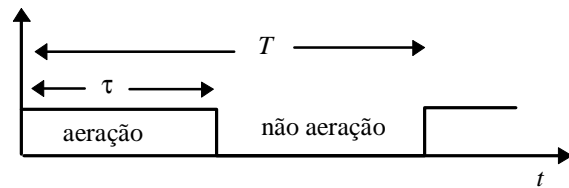


Figura 2. Sinal PWM para acionamento dos aeradores.

A equação (3), para o reator com aeradores acionados com o sinal PWM, pode ser reescrita como:

$$y(k+1) = y(k) + h[K_m(k)(y_{sat} - y(k)) - R(k)] \quad (13)$$

A variável utilizada para controle da concentração de OD foi definida como a taxa de aeração:

$$u(k) = K_m(k)(y_{sat} - y(k)) \quad (14)$$

Para um controlador proporcional, a taxa de aeração pode ser calculada a partir do erro $e(k)$ entre o valor de referência y_{ref} e o valor corrente de concentração de OD:

$$u(k) = kp.e(k) = kp.(y_{ref} - y_m(k)) \quad (15)$$

Combinando-se as equações (15), (14) e (12), $\tau(k)$, pode ser calculado como:

$$\tau(k) = \frac{kp.e(k)T}{K_{max}(y_{sat} - y_m(k))} \quad (16)$$

Nessa equação foi utilizado o valor medido da concentração de OD, $y_m(k)$, por não se ter disponível o valor de $y(k)$. Isso introduz um erro no cálculo final de R não maior que 2%, verificado por simulação. A estimação da TCO pode ser obtida por:

$$\hat{R}(k) = u(k) \quad (17)$$

O cálculo da TCO dessa forma não apresenta erro quando o sistema está em regime ($y(k+1) = y(k)$). Quando houver variação da TCO, $\hat{R}(k)$ segue $R(k)$ com a velocidade descrita pela posição dos pólos do sistema em malha fechada. É necessário introduzir um filtro, para eliminar as oscilações no valor de $\hat{R}(k)$, introduzidas pela discretização do valor medido da concentração de OD, $y_m(k)$.

Na Figura 3 é mostrado todo o esquema de controle da concentração de OD e medição da TCO.

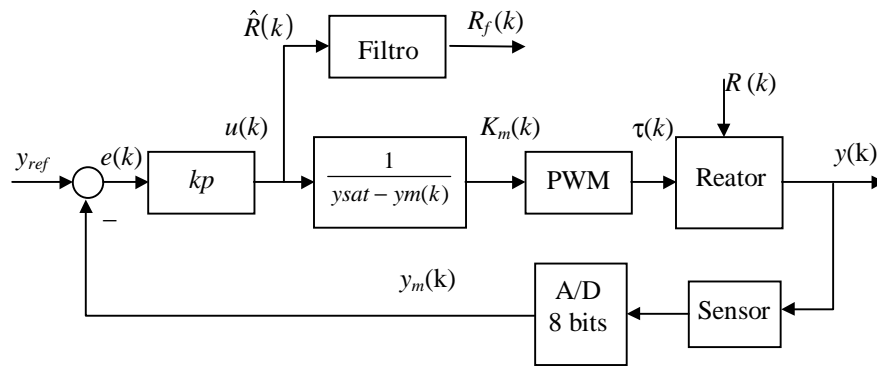


Figura 3 Esquema de controle da concentração de OD e estimação da TCO

5.1 Cálculo do ganho do controlador

A equação discreta do balanço de massa de OD pode então ser escrita em função da taxa de aeração como:

$$y(k+1) = y(k) + h[u(k) - R(k)]. \quad (18)$$

Utilizando-se o operador discreto de deslocamento temporal q , tem-se:

$$(q-1)y(k) = h[u(k) - R(k)] \quad (19)$$

em que $qy(k) = y(k+1)$.

Para que se possa definir a equação da malha de controle com maior precisão, faz-se necessário introduzir a resposta do sensor de oxigênio dissolvido, que pode ser modelado como um sistema de 1ª ordem, com atraso tm (Spanjers, 1993). O modelo discreto para esse sensor pode ser escrito como:

$$y_m(k+1) = cm.y_m(k) + (1-cm)y(k) \quad (20)$$

em que $cm = \exp(-h/tm)$ e h é o período de amostragem.

Pode-se também reescrever a equação (20) em termos de q :

$$(q-cm)y_m(k) = (1-cm)y(k). \quad (21)$$

A partir de (19) e (21), tem-se:

$$(q-1)(q-cm)y_m(k) = h(1-cm)[u(k) - R(k)]. \quad (22)$$

Combinado-se as equações (22) e (15), tem-se:

$$y_m(k) = kp \frac{h(1-cm)(y_{ref} - y_m(k))}{(q-1)(q-cm)} - \frac{h(1-cm)R(k)}{(q-1)(q-cm)}. \quad (23)$$

Observa-se a partir da equação (23) e da Figura 3, que a TCO não está incluída na malha de realimentação do controlador proporcional. Dessa forma, uma vez que a influência da concentração de OD na TCO pode ser desprezada, pode-se então ignorar o termo $R(k)$ em (23), obtendo-se no domínio z (Ogata, 1990):

$$\frac{y_m(z)}{y_{ref}} = kp \frac{h(1-cm)}{z^2 - (1+cm)z + kp.h(1-cm) + cm}. \quad (24)$$

Uma das formas de determinar o ganho do controlador é encontrar o valor máximo de kp , de forma a não causar "overshoot" no sistema. Para o controlador proporcional, os pólos do sistema, alocados em 1 e cm , devem ser realocados para uma mesma posição. Para essa condição, kp é dado por (Ogata, 1990):

$$kp = \frac{(cm+1)^2/4 - cm}{h(1-cm)}. \quad (25)$$

5.2 Procedimento para estimação da TCO

O procedimento a ser realizado para estimação experimental da TCO através desse método é bastante parecido com o do método direto.

1. Desligar a aeração ($K_{La} = 0$) e estimar o valor da TCO através do método clássico, dado pela equação (6);
2. Ligar a aeração e estimar os valores de b e $K_{max} = K_{La}$, através da equação (10), considerando-se que a TCO se mantém constante durante o intervalo $[0, N.h]$;
3. Controlar a concentração de OD no valor de referência utilizando modulação em largura de pulso da aeração.
4. Estimar o valor de R a cada intervalo de amostragem, utilizando a equação (17).

6 SIMULAÇÕES

As simulações, para avaliar os três métodos aqui apresentados, foram realizadas utilizando o MATLAB. Considerou-se que os aeradores são do tipo liga-desliga e que o coeficiente global de transferência de oxigênio assume apenas dois valores discretos 0 e K_{max} , correspondentes ao aerador desligado e ligado respectivamente. A concentração de OD no reator foi calculada utilizando-se a equação discreta do balanço de massa de OD, equação (3), e atribuindo-se à TCO e a K_{max} os valores de 10 mg/l.h e 10,3 h⁻¹, respectivamente. O valor medido da concentração de OD, $y_m(k)$, foi calculado através da equação (20), atribuindo-se a tm um valor próximo ao obtido experimentalmente ($tm = 10$ s). O valor de $y_m(k)$ foi digitalizado com resolução de 8 bits, com o valor de fundo de escala de 8 mg/l (que corresponde a y_{sat}). No instante de tempo igual a 30 min foi simulado um aumento da TCO para 40 mg/l.h.

O período de amostragem do método Direto e do método PWM foram escolhidos empiricamente, levando em consideração o seguinte compromisso: ele deve ser bem menor do que a constante de tempo associada ao sistema, mas não tão rápido que possa introduzir altos níveis de ruído nas medições. Entretanto, devido a realimentação, a resposta do sistema é mais rápida no método PWM do que no método Direto, e dessa forma, pôde-se utilizar um período de amostragem menor.

6.1 Método Clássico

Para o método Clássico, as referências superior e inferior foram definidas como 2,5 e 1,5 mg/l, respectivamente. A TCO foi estimada através da equação (6) no fim do intervalo sem aeração e os valores de OD foram calculados a cada 2s. Os

resultados da concentração de OD e os valores da TCO (R) e TCO estimada (\hat{R}), são mostrados na Figura 4.

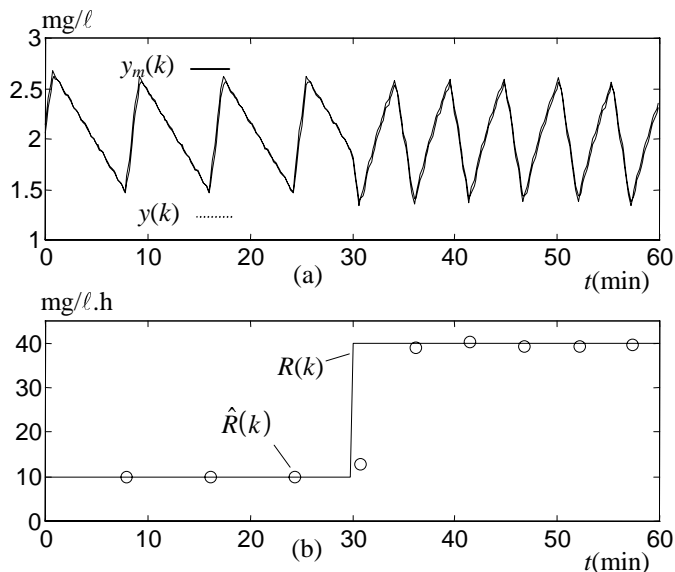


Figura 4 Resultados da simulação com o método clássico: (a) A concentração de OD y , e o valor medido y_m ; (b) A TCO, \hat{R} e a TCO estimada, .

Na Figura 4(a), o intervalo de aumento e o intervalo de diminuição da concentração de OD correspondem às fases de aeração e sem aeração, respectivamente. Observa-se também que a concentração de OD medida atinge valores fora da faixa definida pelas referências. Isso se deve principalmente ao atraso do sensor de OD.

6.2 Método Direto

Para o método direto, o período de amostragem da concentração de OD e da TCO foi de 10 s. O cálculo da TCO foi feito através da equação (9) utilizando um número de amostras N igual a 18, o que é equivalente a uma janela móvel de 3 minutos. Os resultados da concentração de OD e os valores da TCO e TCO estimada são mostrados na Figura 5.

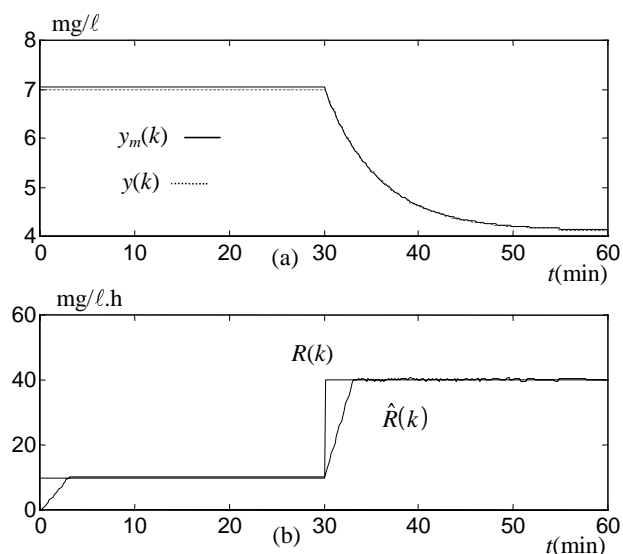


Figura 5. Resultados da simulação com o método direto: (a) Concentração de OD e valor medido; (b) TCO e TCO estimada.

6.3 Método PWM

Para o método PWM, o período de amostragem da concentração de OD e da TCO foi de 2 s (pode-se escolher um período de amostragem menor do que o utilizado no método direto, uma vez que a resposta temporal do sistema torna-se mais rápida quando este é realimentado). O valor de referência e o ganho k_p escolhidos foram 2 mg/l e 45 respectivamente. A TCO foi estimada a partir da equação (17). Para filtragem do valor estimado de TCO, foi utilizado um filtro de segunda ordem com pólo duplo em 1/30 rad/s. Na Figura 6, são mostrados os resultados obtidos por simulação com esse método.

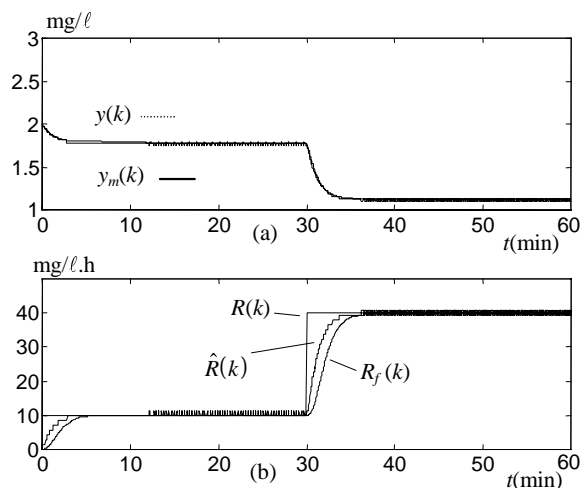


Figura 6 Resultados da simulação com o método PWM para $k_p = 45$: (a) Concentração de OD e concentração de OD medida; (b) TCO, TCO estimada e TCO estimada filtrada, $R_f(k)$.

Pode-se observar a partir da Figura 6, que existe um erro de regime da concentração de OD em relação ao valor de referência. Esse erro é devido ao tipo de controlador escolhido (proporcional) e não influencia no cálculo da TCO.

A mesma simulação foi realizada para verificar o efeito de um ganho proporcional mais alto na estimação da TCO. O valor escolhido para k_p foi 180. Os resultados dessa simulação são mostrados na Figura 7.

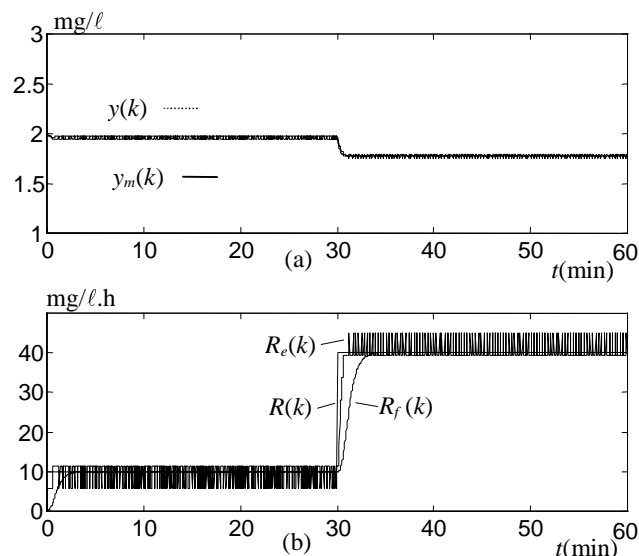


Figura 7. Resultados da simulação com o método PWM para $k_p = 180$: (a) Concentração de OD e concentração de OD medida; (b) TCO, TCO estimada e TCO estimada filtrada.

A partir da Figura 7, pode-se observar que com um ganho maior a estimação da TCO apresenta mais ruído. Por outro lado, um maior ganho resulta em um tempo de resposta menor para uma variação abrupta da TCO.

7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Experimentos foram realizados utilizando um reator de lodo ativado em escala piloto controlado por microcomputador, para verificação dos três métodos descritos. A duração de todos os experimentos foi de 60 minutos. A TCO foi inicialmente estimada durante a fase endógena do lodo ativado (fase na qual praticamente toda matéria orgânica foi consumida e a utilização de oxigênio é mínima) e depois de 30 minutos foi adicionado substrato no reator, forçando um aumento rápido da TCO, que se deve ao aumento do metabolismo dos microorganismos para decomposição do substrato e sintetização de novas células. Os resultados experimentais para cada método são apresentados nos próximos itens.

7.1 Protótipo do sistema de lodo ativado

Um protótipo de um sistema de lodo ativado foi construído no laboratório para realização de testes experimentais, veja Figura 8. O protótipo é constituído de um reator de 6 litros, um agitador, um aerador e um tanque de alimentação. Usou-se um microcontrolador para aquisição de dados, análise e controle dos dispositivos externos. Um executivo em tempo real foi implementado para esse microcontrolador com a finalidade de controlar e sincronizar as diversas tarefas do sistema, tais como aquisição periódica de dados e comunicação com um microcomputador, no qual os dados são apresentados em forma gráfica e armazenados. O lodo ativado foi conseguido naturalmente sem inóculo inicial, colocando-se substrato (alimentação) artificial no reator com aeração contínua.

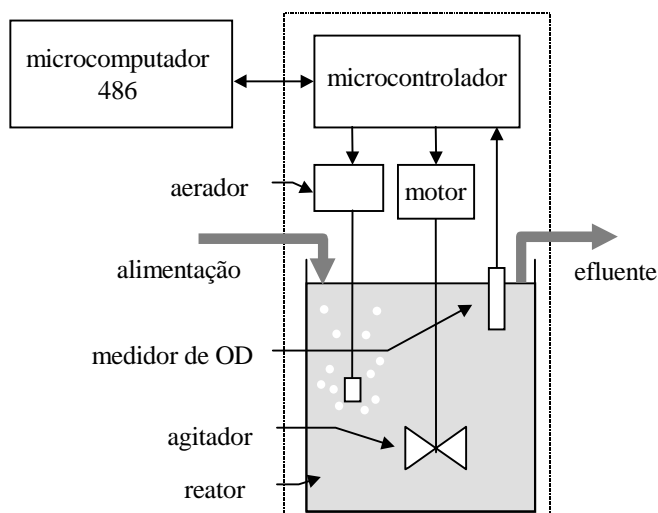


Figura 8. Protótipo de um sistema de tratamento de lodo ativado com sistema de aquisição de dados

7.2 Método Clássico

Para o método clássico, as referências superior e inferior foram definidas em 2,5 e 1,5 mg/l, respectivamente. A concentração de OD foi medida em intervalos de 2 s e os resultados experimentais são apresentados na Figura 9.

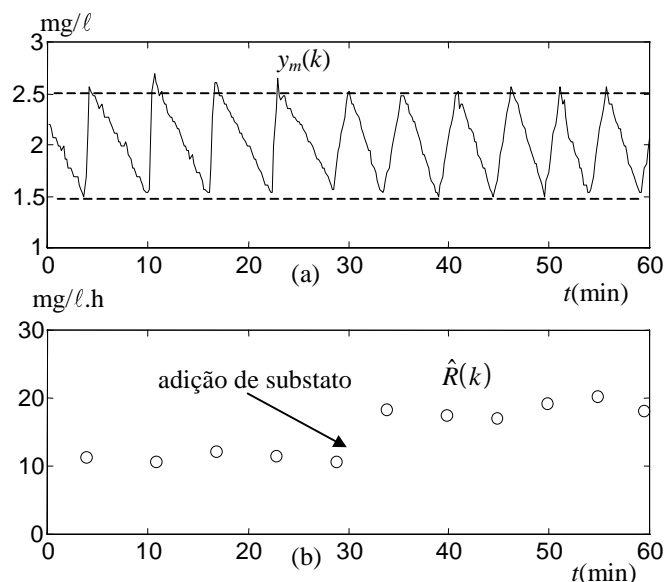


Figura 9 Resultados experimentais para o método clássico. (a) Concentração de OD medida. (b) TCO estimada

A partir dessa figura, observa-se que o intervalo de amostragem na fase endógena é aproximadamente constante em 6 minutos. Após a adição de substrato no reator, em $t = 30$ min, o intervalo de amostragem diminui devido ao aumento da TCO.

7.3 Método Direto

Para o método direto, o período de amostragem foi de 10 s. O número de amostras para estimação da TCO foi de 30, o que resulta em uma janela móvel de 5 minutos. Na Figura 10, são apresentados os resultados experimentais obtidos com o protótipo desenvolvido no laboratório.

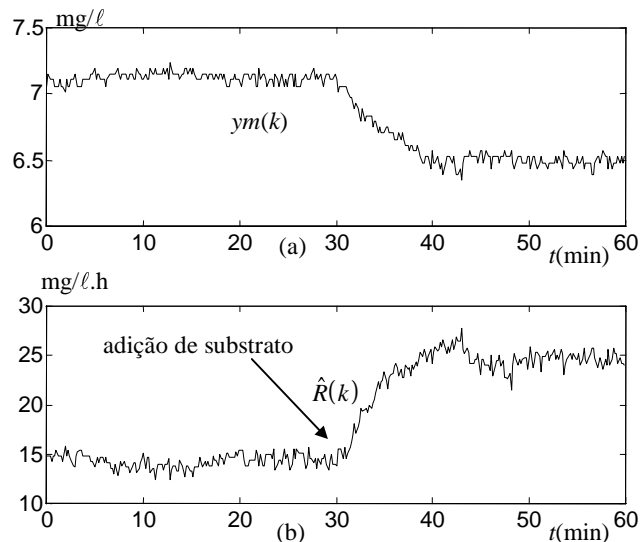


Figura 10. Resultados experimentais com o método direto. (a) Concentração de OD medida. (b) TCO estimada.

Observa-se a partir da Figura 10, um nível de ruído aceitável na TCO estimada, que se deve ao fato de se ter utilizado um número grande de amostra ($N = 30$).

7.4 Método PWM

Para o método PWM, utilizou-se um ganho de 45 para o controlador proporcional e um filtro digital de segunda ordem com pólo duplo em $1/60$ rad/s. O período de amostragem foi de 2 s. Os resultados experimentais são mostrados na Figura 11.

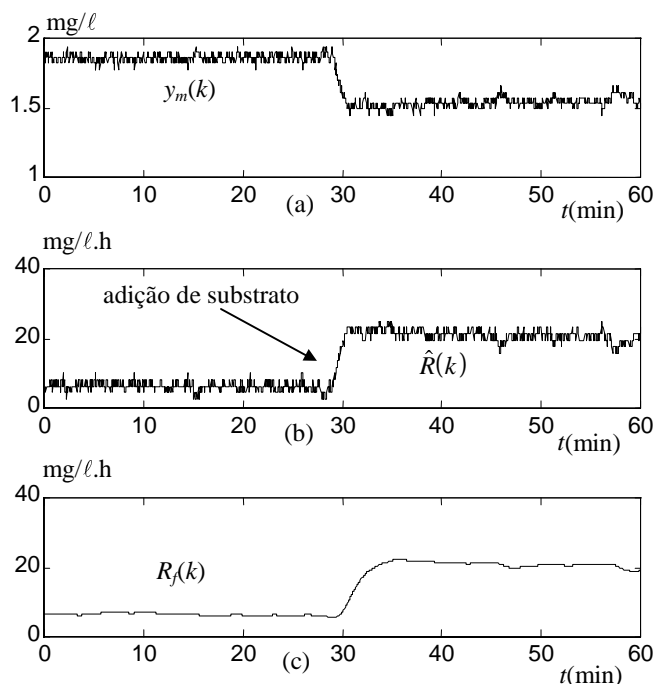


Figura 11. Resultados experimentais para o método PWM. (a) Concentração de OD medida. (b) TCO estimada. (c) TCO estimada e filtrada

As curvas de concentração de OD e da TCO estimada apresentam algum ruído. Isso se deve primeiramente a quantização do sinal de concentração de OD e a escolha do valor de referência como $1/4$ do fundo de escala do conversor A/D. Entretanto, esse ruído pode ser filtrado como mostrado na Figura 11(c).

8 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

A partir das simulações e dos resultados experimentais, pode-se fazer os seguintes comentários sobre os métodos apresentados.

O método clássico apresenta intervalos de amostragem da TCO longos e variáveis, dependendo da própria TCO. Porém, os resultados da estimação podem ser considerados mais confiáveis, porque não dependem da estimação prévia de nenhum parâmetro.

O método direto apresenta o período de amostragem da TCO constante e igual ao da concentração de OD, e o tempo de resposta (a uma variação abrupta da TCO) associado depende do número de amostras utilizadas na estimação. Como nesse método, a comutação frequente dos aeradores não é necessária, ele é o único que pode ser utilizado em sistemas em escala real. Os resultados da estimação da TCO podem ser comprometidos se a estimação prévia do coeficiente global de transferência de oxigênio para o aerador ligado (k_{max}) não for precisa.

O método PWM também apresenta o período de amostragem da TCO constante e igual ao da amostragem da concentração de OD e do ciclo de aeração. O tempo de resposta associado é menor do que nos outros métodos, dependendo do ganho do

controlador proporcional. A estimação da TCO apresenta algum ruído, que pode ser reduzido utilizando-se um filtro digital. Os resultados da estimação da TCO também podem ser comprometidos se a estimação prévia de K_{max} não for precisa.

Os métodos propostos e o clássico, apresentam erro de estimação para variações bruscas da TCO, devido aos tempos de resposta associados. Na prática, em condições normais, a TCO varia lentamente com o tempo, e variações bruscas ocorrem apenas em situações específicas, como adição de substrato ou envenenamento do lodo ativado.

9 CONCLUSÃO

Nesse trabalho, foram apresentados e analisados um método clássico e dois métodos alternativos para medição da taxa de consumo de oxigênio (TCO) em sistemas de tratamento de águas residuárias por lodo ativado, em escala piloto. Os resultados experimentais obtidos para cada método se aproximaram bastante os verificados através de simulação do modelo utilizado. Pode-se observar vantagens dos métodos alternativos com relação ao período de amostragem da TCO e ao tempo de resposta associado, comparados com o método clássico.

10 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro em termos de bolsa de estudos e aos colegas do laboratório pelas diversas discussões. Agradecem também aos revisores, que possibilitaram uma melhoria substancial na redação do artigo

11 REFERÊNCIAS

- Bastin, G. and D. Dochain (1990). On-line Estimation and Adaptive Control of Bioreactors. *Elsevier*, Amsterdam, the Netherlands.
- Catunda, S. Y. C., G. S. Deep, A. C. van Haandel e R. C. S. Freire (1996a). Método de Medição Contínua da Taxa de Respiração em Sistemas de Lodo Ativado. *Anais do XI Congresso Brasileiro de Automática*, São Paulo, SP, Brasil, pp. 269-274.
- Catunda, S. Y. C., G. S. Deep, A. C. van Haandel e R. C. S. Freire (1996b). Fast On-Line Measurement of the Respiration Rate in Activated Sludge Systems. *Proc. of the 1996 IEEE - Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC/96*, Brussels, Belgium, pp. 1320-1325.
- Lindberg, C. F. (1995). Control of Wastewater Treatment Plants. Doctoral Thesis, Uppsala University, Uppsala, Sweden.
- Ogata, K. (1990). *Modern Control Engineering*, Prentice Hall.
- Press, W. H., et alii. (1988). *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press, Cambridge, USA
- Spanjers, H. (1993). Respirometry in Activated Sludge. Doctoral Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, the Netherlands.

van Haandel, A. C. e Catunda, P.F.C. (1982). Determinação da taxa de consumo de oxigênio. *Revista Engenharia Sanitária*. 21, 4, pp. 481-488.

YSI 5700 Series Dissolved Oxygen Probes. Yellow Springs Instrument Co., Inc., Yellow Springs, Ohio, USA