

Eixo Temático ET-07-014 - Tratamento de Efluentes Sanitários e Industriais

DETERMINAÇÃO DA ORDEM DE REAÇÃO PARA REMOÇÃO DE DQO EM REATOR ANERÓBIO HÍBRIDO, UTILIZANDO MODELAGEM MATEMÁTICA

Dayane de Andrade Lima, Jéssyca de Freitas Lima, Rosângela Maria da Silva, José Gilmar da Silva do Nascimento

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 713. Pici. Fortaleza-CE (CEP 60455-900).

RESUMO

Sistemas de tratamento biológico de esgoto sanitário, criteriosamente projetados e bem operados, removem de maneira satisfatória constituintes indesejáveis, tais como, matéria orgânica biodegradável e sólidos em suspensão. Uma maneira de se prevê a eficiência de um sistema é realizar a modelagem matemática do mesmo. A presente pesquisa objetivou avaliar o desempenho de um reator Anaeróbio Híbrido – RAH e realizar a modelagem matemática dos dados obtidos. Foi utilizado um RAH, que é composto por dois reatores sobrepostos: um reator UASB na parte inferior e um filtro anaeróbio na parte superior, o mesmo foi operado em escala piloto (108 L) com adição extra de sulfato no esgoto bruto. Foram calculados os valores de K para o parâmetro DQO (Demanda Química de Oxigênio) dos dados de entrada e saída do sistema. Foram comparados os valores de k obtidos com a modelagem (0,138 e 0,230) com o valor de k de Von Sperling (2007) (0,40). Além da comparação com um K da literatura, foi realizada também a comparação entre a solução analítica e a numérica com diferentes passos. Percebeu-se que ao se utilizar a solução numérica com passos pequenos, ela se aproxima bastante da solução analítica, que é uma solução mais complexa e que representa os valores reais.

Palavras-chave: Reator Anaeróbio Híbrido; Solução Analítica; Solução Numérica.

INTRODUÇÃO

As tecnologias anaeróbias de tratamento de águas residuárias têm ganhado cada vez mais popularidade devido as suas vantagens em relação ao tratamento aeróbio, principalmente pelo baixo custo de implantação e operação dessa tecnologia. Além disso, o clima é um fator condicionante para esses sistemas, pois as bactérias anaeróbias trabalham melhor em altas temperaturas (CHERNICHARO, 2007). Os principais sistemas anaeróbios utilizados no Brasil para tratamento de esgotos são as lagoas anaeróbias, o decanto-digestor, o filtro anaeróbio, o reator anaeróbio de leito expandido e/ou fluidificado, e o reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo – UASB (PASSIG, 2005).

O Reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) foi desenvolvido pelo professor Lettinga e seu grupo na Universidade Wageningen, na Holanda, e surgiu na década de 70. Sua configuração consiste em um tanque, onde o esgoto a ser tratado entra pela base do reator, promovendo um fluxo ascendente, e conseqüentemente um

turbilhonamento na mata de lodo, o líquido percorre o reator até o topo, onde encontra-se o dispositivo mais característico do UASB, o separador trifásico (separador de gás-sólidos-líquido), que funciona como uma barreira para que os sólidos não sejam arrastados para fora do reator, e o líquido saia clarificado, além de coletar o gás produzido (VAN HAANDEL e VAN DER LUBBE, 2012). Dentre as diversas tecnologias anaeróbias, esse reator é o que mais se sobressai, por possuir baixo custo de implantação e operação, baixo consumo de energia e baixa produção de biomassa, comparado aos sistemas aeróbios.

O Reator Anaeróbio Híbrido possui na sua parte inferior uma manta de lodo (UASB), e na parte superior contém um leito recheado com material suporte, ele foi desenvolvido por Maxham and Wakamiya em 1981 (PASSIG, 2005). Desde então, muitos pesquisadores (PASSIG, 2005) vêm tentando operacionalizar este tipo de reator, otimizando a configuração e também alguns parâmetros operacionais. Esse tipo de reator procura combinar as vantagens e minimizar as desvantagens do UASB em um só reator. As desvantagens que o mesmo apresenta é devido aos processos da digestão anaeróbia, que carrega no efluente uma fração remanescente relativamente elevada de material carbonáceo (DQO) e compostos reduzidos (amônio, fosfatos e sulfeto). Por este motivo, muitos dos sistemas de tratamento que utilizam reatores anaeróbios como a unidade principal para remoção de material orgânico requerem unidades de pós-tratamento, objetivando fazer um polimento a mais no efluente (PASSIG, 2005).

Existem modelos matemáticos que ajudam a otimizar os reatores biológicos, descrevendo as alterações espaciais e temporais dos constituintes. A escolha do modelo depende de muitos fatores tais como: os objetivos da análise, a disponibilidade de dados e o tempo de resposta. Dentre os objetivos, duas categorias gerais são distinguidas: entendimento/pesquisa e gerenciamento/prática.

OBJETIVOS

Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal realizar a modelagem matemática de um reator biológico.

Específicos

- i. Analisar os dados obtidos através do monitoramento de um reator anaeróbio híbrido para o tratamento de esgoto sanitário;
- ii. Encontrar o k para os dados adquiridos com o experimento;
- iii. Traçar gráficos para comparar a solução analítica com a solução numérica;
- iv. Comparar o k obtido com um k da literatura;
- v. Avaliar a remoção de material carbonáceo no processo anaeróbio.

MATERIAL E MÉTODOS

Sistema Experimental

O sistema experimental é constituído de um Reator Anaeróbio Híbrido – RAH (Figura 1), o mesmo possui na sua parte inferior um reator UASB, e na parte superior um Filtro Anaeróbio munido de meio suporte. O meio suporte utilizado foi esponjas de poliuretano, por já serem referências como meio suporte, ao qual se agrega grande

quantidade de biofilme. Os parâmetros referentes ao RAH estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros, dimensionamento e aspectos operacionais do RAH.

Diâmetro	200 mm
Material Construtivo	PVC
Altura	2 m
Volume total	62 L
Volume útil	52 L
Volume do UASB	27 L
Volume do Filtro	25 L
Tempo de Detenção Hidráulica – UASB	6 h
Tempo de Detenção Hidráulica – Filtro	6 h
Tempo de Detenção hidráulica – Total	12 h
Vazão Efluente	108 L/d

A alimentação do sistema experimental foi realizada por bateladas, sendo 4 bateladas e 6 horas, a mesma aconteceu de forma ascendente com a saída do efluente tratado na parte superior após o filtro.

A biomassa utilizada como inóculo foi proveniente de um reator UASB (UpFlow Anaerobic Sludge Blanket). As concentrações do inóculo em termos de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis totais (SVT) foram, respectivamente, de 48 gST.L^{-1} e 28 gSVT.L^{-1} .

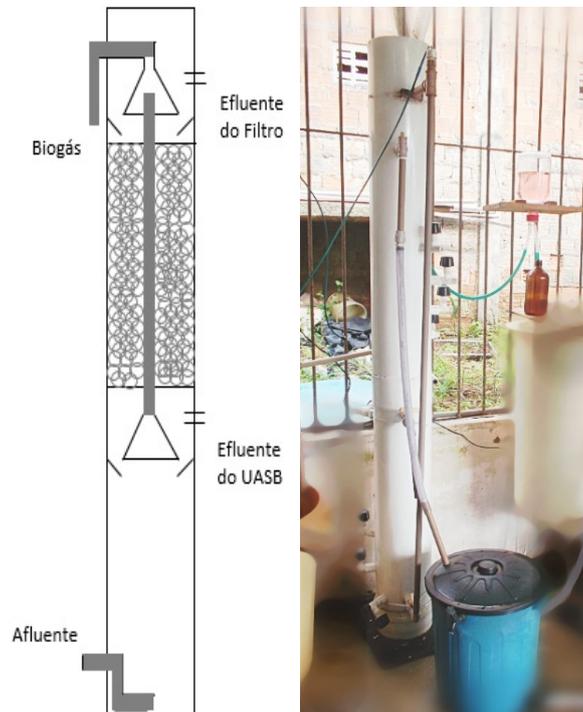


Figura 1. Esquema e Foto do RAH.

Acompanhamento e Monitoramento dos Reatores

Foram realizadas semanalmente análises dos parâmetros físicos e químicos listados na Tabela 2. Essas análises foram desempenhadas no afluente e no efluente dos reatores, possibilitando assim a verificação de eficiência de remoção dos mesmos.

Tabela 2. Parâmetros analisados no acompanhamento do desempenho dos reatores.

Variáveis	Métodos Analíticos	Referência
DQO*	Titulométrico Refluxação Fechada	Seção 5220 C. / APHA et al. (2012)
pH	Potenciométrico	Seção 4500 / APHA et al. (2012)
Alcalinidade	Kapp	Seção BUCHAUER (1998)
Sólidos Suspensos Totais	Gravimétrico	Seção 2540 D / APHA et al. (2012)
Sólidos Suspensos Voláteis	Gravimétrico	Seção 2540 E / APHA et al. (2012)
Sólidos Suspensos Fixos	Gravimétrico	Seção 2540 E / APHA et al. (2012)

*DQO - Demanda Química de Oxigênio.

Modelagem Matemática

Para realizarmos a modelagem de um reator biológico, temos que entendê-lo como um rio. Os principais tópicos são:

- Cinética de reações
- Balanço de massa
- Representação hidráulica de rios
- Equações da mistura esgoto – rio

O primeiro passo é saber qual a ordem de reação. A taxa de reação é o termo usado para descrever o desaparecimento ou formação de um composto ou espécie química. A relação entre a taxa de reação, a concentração do reagente e a ordem da reação é dada pela expressão:

$$r = KC^n$$

Onde:

r = taxa de reação ($ML^{-3} T^{-1}$)

K = constante da reação (T^{-1})

C = concentração do reagente (ML^{-3})

n = ordem da reação

Para diferentes valores de n, tem-se:

- n = 0 reação de ordem zero
- n = 1 reação de primeira ordem
- n = 2 reação de segunda ordem

A Figura 2 apresenta diferentes valores de n. A interpretação da figura é feita da seguinte forma:

- A reação de ordem zero, resulta numa linha horizontal. A taxa de reação é independente da concentração do reagente, ou seja, ela é a mesma para qualquer concentração de reagente.
- A reação de primeira ordem, possui um taxa de reação diretamente proporcional à concentração do reagente.
- A reação de segunda ordem possui uma taxa de reação proporcional ao quadrado da concentração do reagente.

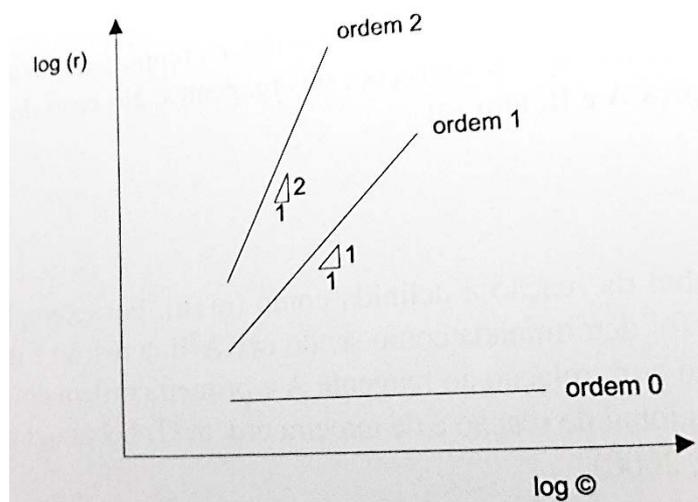


Figura 2. Determinação da ordem de reação. Fonte: Von Sperling (2007).

Os dados do sistema experimental apresenta reações de primeira ordem, ou seja, a taxa de reação é proporcional a concentração do reagente. Admitindo-se uma reação em que o reagente esteja sendo removido, tem-se uma equação da seguinte forma:

$$\frac{dC}{dt} = -K \times C$$

A integração analítica da equação anterior conduz a:

$$C = C_0 \times e^{-k \times t}$$

Sempre que houver disponível a solução analítica deve-se utiliza-la, pois conduz a valores exatos. Porém, existem casos em que a solução analítica pode não ser disponível ou sua dedução ser bastante difícil, neste caso utilizam-se métodos numéricos de integração. Há vários métodos de integração numérica, o método mais simples é o de Euler, que tem-se a seguinte equação:

$$C_t = C_{t-1}(\text{Taxa de reação} \times \Delta t)$$

Onde:

C_t = concentração em um tempo t qualquer (mg.L^{-1})

$C_{t-\Delta t}$ = concentração no instante de tempo imediatamente anterior (mg.L^{-1})

Taxa de reação = produção ou consumo ($\text{mg.L}^{-1}.\text{d}$). O valor é positivo para produção do constituinte, e negativo para consumo do constituinte. Para os constituinte que seguem a cinética de primeira ordem, a taxa de reação é igual a $K.C$, e para ordem zero é K .

Δt = intervalo de tempo, ou passo de integração.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Comparação da Solução Analítica e Numérica

Com os resultados obtidos das análises laboratoriais realizadas semanalmente no efluente do reator UASB (parte inferior do Reator Anaeróbio Híbrido), calculou-se o valor de k , após obter o valor de k para cada dia de análise, utilizou-se a média do valor de DQO e a média do k para traçar um gráfico (Figura 3) que exemplifica-se o consumo do material orgânico em cada batelada do UASB (6 h).

Utilizou-se a solução analítica e numérica com dois passos diferentes e bastante pequenos para que fossem comparados com o valor real.

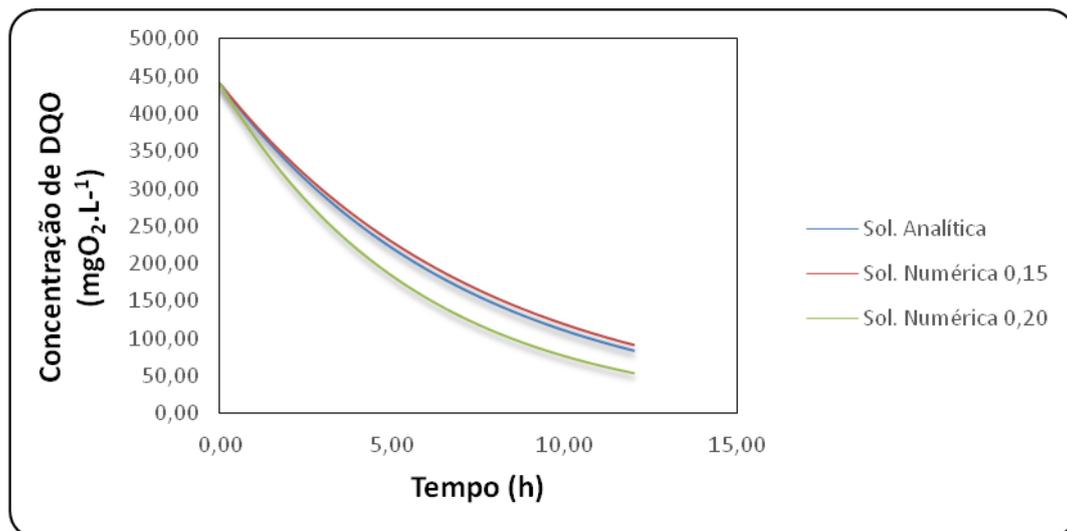


Figura 3. Comparação da Solução Analítica X Solução Numérica com diferentes passos - UASB.

Como foi visto que o passo de 0,20 dias utilizado na solução numérica foi excessivo, realizou-se novamente a modelagem com um passo um pouco menos (0,15) que mostrou uma diferença bastante grande em comparação com o outro passo (0,20). Observa-se claramente a maior concordância entre os dois métodos quando se utiliza um passo menor.

Na modelagem analítica (exata) a concentração de DQO na hora 6,08 é de 189,82 mg.L^{-1} , já na solução numérica com o passo de 0,20 h a concentração é de

151,60 mg.L⁻¹, e com um passo de 0,15 h a concentração é de 198,40 mg.L⁻¹ sendo próximo do valor real. Caso tivesse sido adotado passos ainda menores, teria um aumento na precisão.

Com os resultados obtidos das análises laboratoriais realizadas semanalmente no efluente do filtro anaeróbio (parte superior do Reator Anaeróbio Híbrido), calculou-se o valor de k, após obter o valor de k para cada dia de análise, utilizou-se a média do valor de DQO e a média do k para traçar um gráfico (Figura 4) que exemplifica-se o consumo do material orgânico em cada batelada no filtro (6 h).

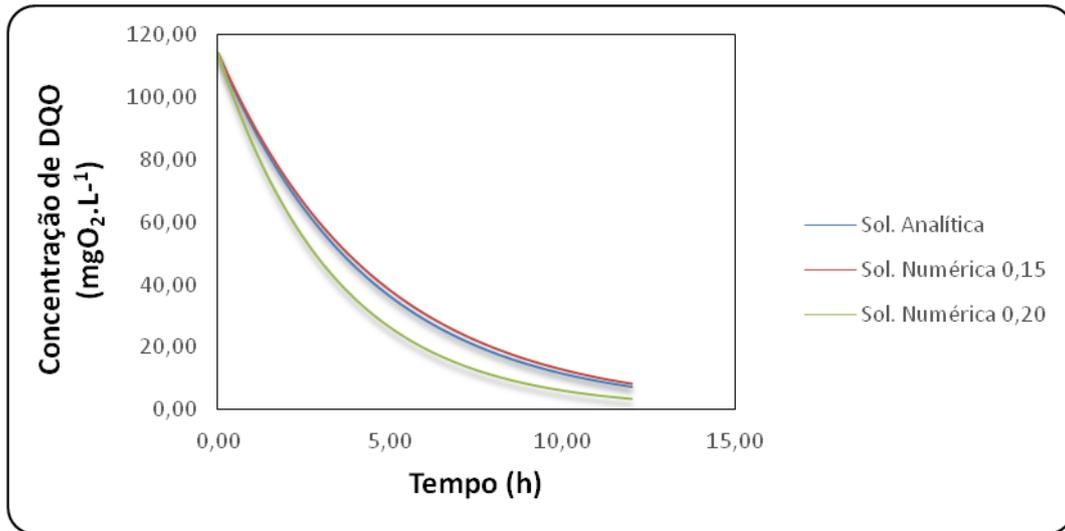


Figura 4. Comparação da Solução Analítica X Solução Numérica com diferentes passos - FILTRO.

A modelagem do filtro anaeróbio foi realizada da mesma forma que a modelagem do reatores UASB. Sendo que na modelagem analítica a concentração de DQO na hora 10,08 é de 11,19 mg.L⁻¹, já na solução numérica com o passo de 0,20 h a concentração é de 5,85 mg.L⁻¹, e com um passo de 0,15 h a concentração é de 12,45 mg.L⁻¹ sendo bastante próximo do valor real.

Comparação dos dados com valores de k diferentes

Foi realizada a modelagem matemática com o valor de k obtido no experimento e também com um k existente na literatura, para uma posterior comparação dos dados. A Figura 5 e 6 apresenta os dados modelados com o valor de k obtido (0,138 e 0,230) e o valor de k de Von Sperling (2007) (0,40).

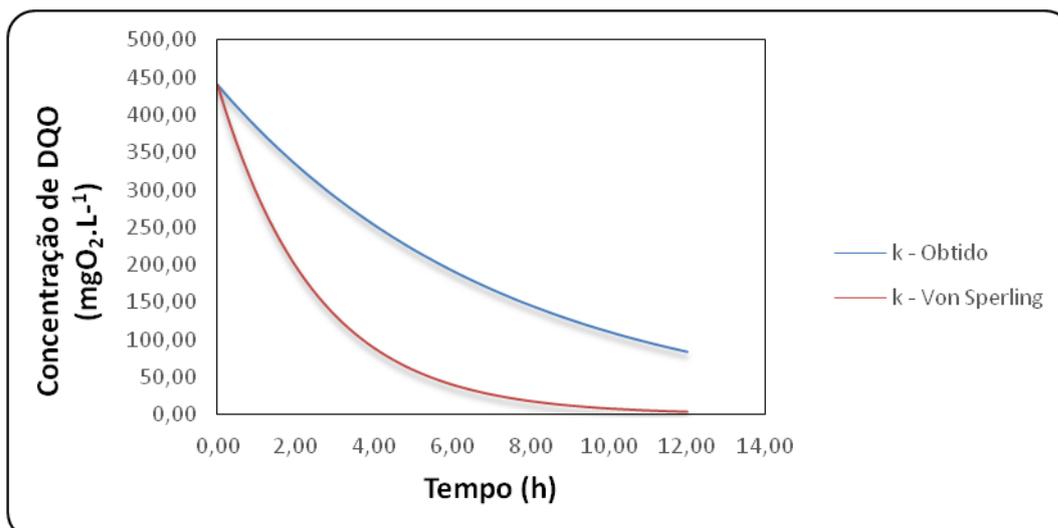


Figura 5. Comparação dos valores com diferentes k – UASB.

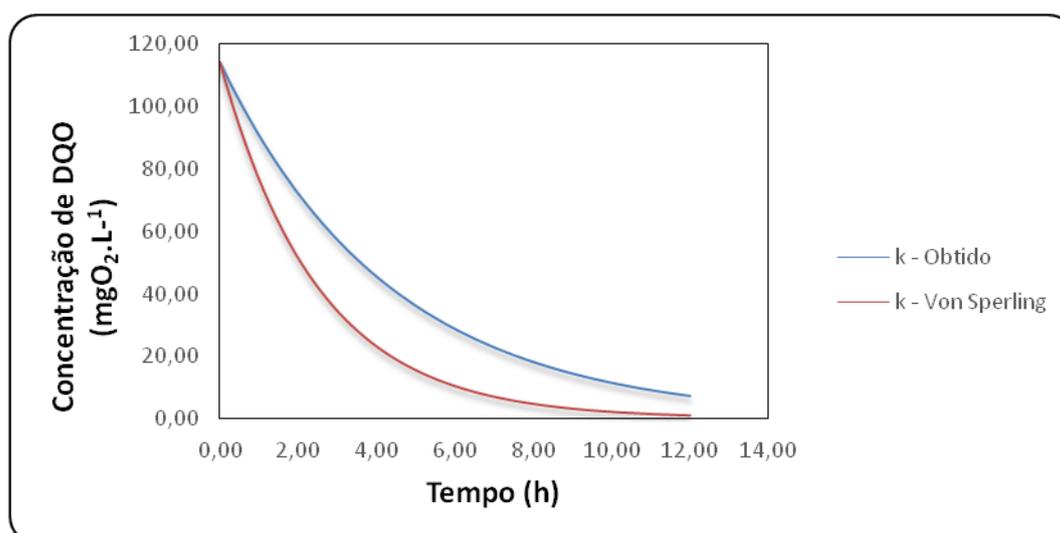


Figura 6. Comparação dos valores com diferentes k - FILTRO.

Os gráficos expressos nas Figuras 5 e 6, apresentam os dados do experimento com dois valores de k distintos, um valor obtido e outro da literatura. É possível perceber que os valores se distanciaram bastante ao se utilizar os valores de k diferentes, isso não quer dizer que o valor de k esteja errado, pois diversos fatores podem contribuir para k diferentes, como por exemplo a temperatura, como a cidade de Campina Grande (onde se realizou o experimento) possui uma temperatura média de 22,9 °C que pode contribuir para essa enorme diferença.

CONCLUSÕES

Pode-se concluir com trabalho que:

- Os modelos matemáticos simulam situações reais de um modo fácil, rápido e barato, apenas com poucos dados de campo;
- Ao se utilizar a solução numérica com passos pequenos, ela se aproxima bastante da solução analítica, que é uma solução mais complexa e que representa os valores reais, e a medida que o passo aumenta os valores se distanciam do real.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 17 mar. 2005.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 13 de maio de 2011.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Reatores Anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2007.

GASTALDINI, M. C. C.; SEFFRIN, G. F. F.; PAZ, M. F. Modelagem da qualidade da água do Rio Ibicuí. Anais do VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2002.

PASSIG, F. H.; CAMPOS, J. R. **Reator anaeróbio híbrido para tratamento de esgoto sanitário**. Anais do 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Mato Grosso do Sul, 2005.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 4. ed. New York: Metcalf & Eddy Inc., 2003.

VAN HAANDEL, A. C.; VAN DER LUBBE, J. **Handbook biological wastewater treatment, design and optimization of activate sludge systems**. 2. ed. s.l.: IWA, 2012.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Estudos e modelagem da qualidade de água. 1. ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2007. v. 7.