

XI-104 - REOXIGENAÇÃO DA ÁGUA POR TUBOS DE VENTURI ASSOCIADOS EM PARALELO

Ajadir Fazolo⁽¹⁾

Engenheiro Sanitarista pela Universidade Federal de Santa Catarina. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

Orlando de Carvalho Júnior

Engenheiro Civil pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista. Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

Victor Marques Frederice

Engenheiro Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina. Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina.

Fernada Martins Nonaka

Engenheira Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina. Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina.

Endereço⁽¹⁾: Avenida dos Pioneiros, 3131 – Jardim Marumbi - Londrina - PR - CEP: 86036-370- Brasil - Tel: (43) 3315-6100 - e-mail: afazolo@utfpr.edu.br

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi avaliar o potencial de reoxigenação da água por meio de tubos de Venturi. Os experimentos foram realizados em um tanque e vertical (TV), com volume útil de 420 L. Foi utilizada uma bomba centrífuga acoplada a um sistema contendo 4 tubos de Venturi instalados em paralelo. Por meio de registro, era possível operar desde 1 até 4 tubos ao mesmo tempo. A desoxigenação da água foi realizada injetando-se nitrogênio gasoso e a reaeração, feita pela injeção de ar sugado pelos tubos de Venturi. A reoxigenação foi acompanhada por um sistema de captura de dados on line, em intervalos de 5 segundos. Com os resultados, foram calculados os valores dos coeficientes globais de transferência de oxigênio do ar para a água (K_{La}) e as eficiências de oxigenação (EO). Como resultado, pelos ensaios de aeração adotou-se o uso de 3 tubos de Venturi no sistema, que apresentaram um K_{La} de $16,31 \text{ h}^{-1}$, uma $TTO_{\text{padrão}}$ de $62,86 \text{ gO}_2\text{h}^{-1}$, uma potência consumida de $0,048 \text{ kW}$ e uma Eficiência de Oxigenação de $1,32 \text{ kgO}_2\text{kWh}^{-1}$, sendo o número de tubos com melhor custo benefício para aeração do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Tubos de Venturi, Eficiência de Oxigenação, Reaeração

INTRODUÇÃO

As principais finalidades da aeração e agitação em sistemas biológicos aeróbios são o suprimento adequado de oxigênio para os microrganismos e a homogeneização do meio. A transferência de oxigênio em biorreatores pode ser realizada por meio da dispersão do gás no meio líquido. Esse processo pode ser acelerado com a aplicação de potência na massa líquida do reator, mediante recirculação do líquido, compressão do gás ou agitação interna (ATKINSON e MAVITUNA, 1991).

Assim, a aeração mecânica (aeradores superficiais, compressores, entre outros) é largamente empregada, particularmente, no tratamento de efluentes líquidos (METCALF & EDDY, 2016).

Em unidades descentralizados de tratamento de esgotos, o fornecimento de oxigênio por sistemas convencionais de aeração pode ser incompatível com os custos de implantação e manutenção. Desta forma, as diferentes condições exigidas nos processos de tratamento de águas residuárias demandam estratégias alternativas de aeração, que melhor se adequem a cada situação.

Os sistemas de autoaspiração de ar são utilizados para promover a oxigenação e homogeneização da água. Trata-se de um método que se baseia no princípio do tubo de Venturi e se utiliza de um ejetor para misturar o oxigênio do ar com a água. Os ejetores são equipamentos capazes de transformar a energia de pressão do fluido

primário em energia de velocidade que, por sua vez, poderá atingir um nível crítico que induz à formação de vácuo na seção de contração do Venturi, realizando a sucção do ar atmosférico através de um vaso paralelo ao escoamento (TEIXEIRA, 1999; BAYLAR et al., 2009.; BAYLAR et al., 2010).

Tubos de Venturi são constituídos, sequencialmente, de uma seção convergente, estrangulamento ou garganta e seção divergente. Sua operação baseia-se na redução da pressão ($<P_{atm}$), com o aumento da velocidade, no estreitamento (garganta) do tubo. Assim, quando um fluido pressurizado entra pelo tubo de Venturi e passa pela região estrangulada, ocorre aumento da velocidade (energia cinética) e, ao mesmo tempo, redução da carga de pressão (BRATER *et al.*, 1996; BAGATUR *et al.*, 2005; OZKAN *et al.*, 2009; BAYLAR, 2010).

Assim, na aeração com ejetores tipo Venturi a oxigenação da água é produzida tanto por processo de ar dissolvido quanto por processo de ar disperso, sem limitações práticas da quantidade de ar que pode ser adicionada e sem a necessidade de compressores de ar, garantindo-se eficiência aceitável com baixo investimento e podendo reduzir consumo energético (GONÇALVES, 1999; BAYLAR et al., 2010). Entretanto, não há um entendimento completo sobre os sistemas que operam com aeração por tubos de Venturi (BAGARUR, 2005; BAYLAR et al., 2009).

O objetivo deste trabalho foi avaliar as potencialidades da aplicação de tubos de Venturi, instalados em paralelo, na reoxigenação da água. Nos ensaios buscou-se determinar experimentalmente os valores dos coeficientes globais de transferência de oxigênio do ar para a água (K_{La}), as taxas de transferência de oxigênio ($TTO_{padrão}$), o consumo energético (P) e a eficiência de oxigenação (EO).

MATERIAL E MÉTODOS

Para os experimentos, foi utilizado um tanque vertical, construídos PVC, com 60cm de diâmetro, 150cm de altura e volume útil de água de 420 Litros, como representado na Figura 1, além dos seguintes acessórios:

- Bomba autoaspirante Mark Dar modelo Jetcom 32, de potência 600W;
- Rotâmetro BLI 5000 faixa 300 a 4000 litros de água por hora, precisão $\pm 2\%$, repetibilidade 0,25%;
- Rotâmetro BLI 200 faixa 300 a 4000 litros de ar por hora, precisão $\pm 2\%$, repetibilidade 0,25%;
- Manômetro Genebre faixa 0 a 60 PSI;
- Vacuômetro Makil faixa – 760 a 0 mmHg;
- Tubos de Venturi D 1” Marca Irritec, CO;
- Medidor de oxigênio dissolvido, marca Thermo, modelo Star 4.

Nos ensaios de reoxigenação foram testadas configurações combinando, 02, 03 e 04 tubos de Venturi instalados em paralelo.

Foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento de abastecimento. Em todas as configurações testadas, a bomba autoaspirante operou com capacidade máxima, sendo realizada a leitura da vazão pelo rotâmetro de água. As medidas de vazão de ar foram realizadas pelo rotâmetro de ar, as de pressão de montante e de jusante por meio dos manômetros e vacuômetro instalados na linha de bombeamento.

Para a determinação da transferência de oxigênio do ar para a água, foi empregado o método estacionário, que consiste na redução da concentração de oxigênio dissolvido na água para, em seguida, injetar ar, de forma a acompanhar a variação do oxigênio dissolvido no meio com o tempo. Desta forma, inicialmente foi injetado nitrogênio gasoso na água para remoção do oxigênio até uma concentração próxima de $2,0 \text{ mg O}_2\text{L}^{-1}$. Em seguida, a bomba foi acionada, permitindo a entrada e difusão de ar pelos tubos de Venturi na massa líquida. A concentração de oxigênio foi monitorada até que alcançasse a saturação. O medidor de OD foi conectado a um computador, permitindo a aquisição "on-line" de dados a cada 2 (dois) segundos.

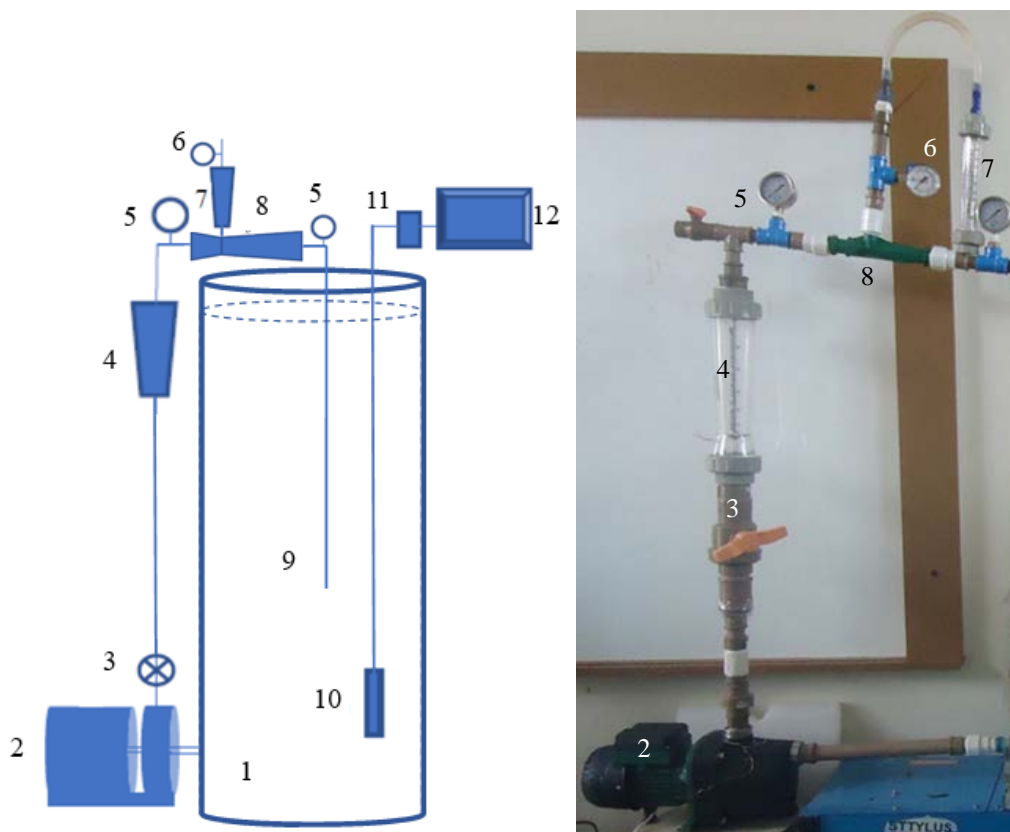


Figura 1. Fotografia e esquema do sistema experimental. Legenda: (1) tanque vertical; (2) bomba centrífuga; (3) registro globo; (4) rotâmetro água; (5) manômetros; (6) vacuômetro (7) rotâmetro de ar; (8) tubos de Venturi; (9) saída de água; (10) sonda de oxigênio dissolvido; (11) medidor de oxigênio dissolvido; (12) computador para aquisição dos dados.

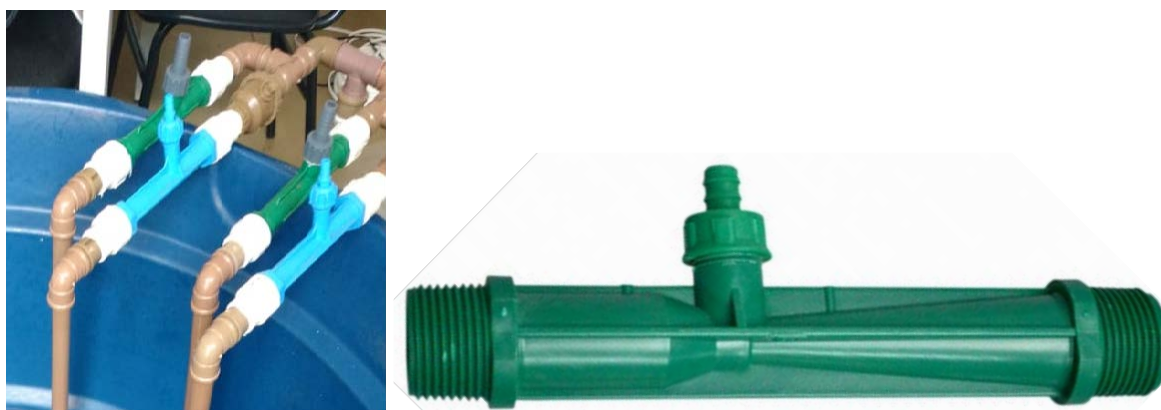


Figura 2. Fotografia do sistema de aeração e tubo de Venturi utilizado

Os dados experimentais foram ajustados pela equação (1) (von SPERLING, 2005). Para cálculo dos resultados foi utilizado o software Origin.

$$C = C^* - (C^* - C_0) \cdot e^{-K_L a \cdot (t - t_0)} \quad (1)$$

Sendo, nesta expressão, C^* a concentração de equilíbrio de oxigênio no meio e C_o a concentração quando se inicia a aeração, t o tempo final e t_o o tempo inicial e K_{La} é o coeficiente global de transferência de oxigênio do ar para a água (h^{-1})

A temperatura da água foi monitorada, a fim de corrigir a o valor de K_{La} para o padrão de 20 °C, de acordo com a equação (2) de Von SPERLING (2005).

$$K_{La}(20^\circ C) = \frac{K_{La}(T^\circ C)}{\theta^{(T-20)}} \quad (2)$$

Em que θ é o coeficiente de temperatura, de valor adotado 1,024.

A taxa de transferência de oxigênio padrão ($TTO_{padrão}$) foi calculada pela equação (3):

$$TTO_{PADRÃO} = \frac{K_{La} \cdot C_{S(20oC)} \cdot V}{1000} \quad (3)$$

Sendo TTO padrão é a taxa de transferência de oxigênio padrão ($gO_2 h^{-1}$), C_s a concentração de saturação de oxigênio na água limpa, nas condições padrão de temperatura ($0^\circ C$) e altitude (0 m) sendo adotado o valor de $9,092 g m^{-3}$ (METCALF & EDDY, 2016) e V o volume do tanque (m^3).

Para estimativa da energia consumida foi adotada a equação (4), descrita por PICCIN *et al.* (2009).

$$P = \frac{(p_2 - p_1) m_{H2O}}{\rho_{H2O}} \quad (4)$$

Em que P é potência (kW), p_1 e p_2 são as pressões de trabalho na entrada e saída do tubo de Venturi ($kN.m^{-2}$), m_{h20} é a vazão mássica de água ($kg s^{-1}$) e ρ_{H2O} é a densidade da água ($kg m^{-3}$).

A eficiência de oxigenação foi obtida pela equação (5), de von SPERLING (2005).

$$EO = \frac{TTO_{padrão}}{P} \quad (5)$$

Sendo EO eficiência de oxigenação ($kg O_2 kWh^{-1}$), $TTO_{padrão}$ a taxa de transferência de oxigênio padrão ($kgO_2 h^{-1}$), dada na Equação 3 e P a potência (kW), dada na Equação 4.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1, são apresentados os valores das vazões de água e de ar sugadas pelos tubos de Venturi e os respectivos valores de K_{La} a temperatura ambiente e corrigidos para $20^\circ C$. A Figura 2(a), ilustra o comportamento das vazões de ar em relação as de água e a determinação do K_{La} para 2 tubos de Venturi em Paralelo.

Tabela 1. Valores das vazões de água e ar e dos coeficientes K_{La} em temperatura ambiente e a $20^\circ C$

Número de tubos	Vazão de água ($L h^{-1}$)	Vazão de ar ($L h^{-1}$)	$K_{La} (h^{-1})$ Ambiente	$K_{La} (h^{-1})$, $20^\circ C$
2	3300	1250	20,27	18,43
3	3500	1000	17,93	16,31
4	3900	450	8,64	7,86

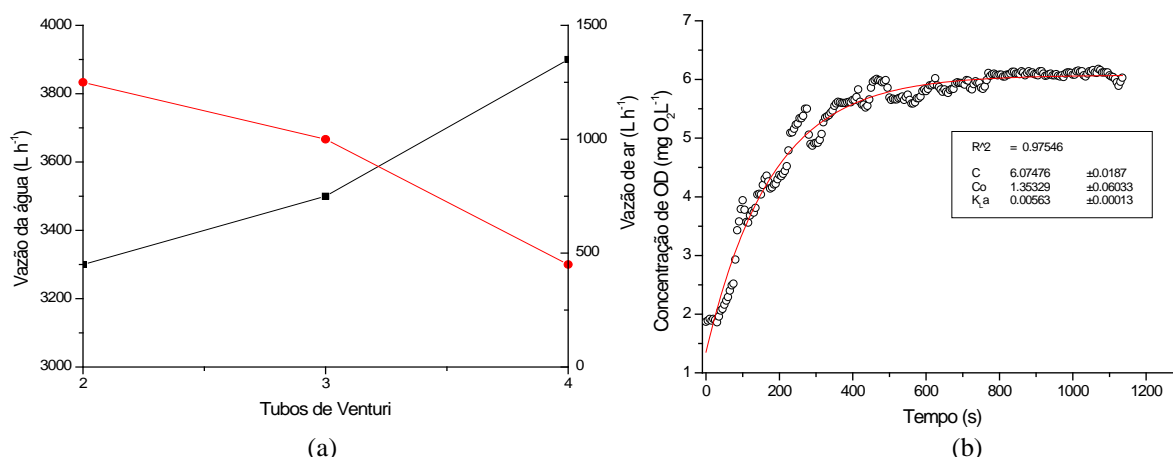


Figura 3. (a) Variação das vazões de água (■) e de ar (■) para as diferentes configurações de tubos de Venturi. (b) Variação temporal da concentração de oxigênio dissolvido (○) e curva de ajuste aos dados experimentais (-) ao modelo dado pela equação (1).

Observa-se na Tabela 1 e Figura 3(a), que a vazão de água aumenta com o número de tubos de Venturi conectados em paralelo, pela menor perda de carga nas tubulações e dispositivos. Entretanto, individualmente, cada em cada Venturi atravessa menor vazão de água (975 L h⁻¹, 1167 L h⁻¹ e 1650 L h⁻¹ para 4, 3 e 2 tubos, respectivamente).

Assim, possivelmente, a redução do ar aspirado, pode estar relacionada com a menor vazão e, consequentemente, menor diferencial de pressão na garganta dos dispositivos de Venturi.

Na Figura 3(b), apresenta a variação temporal da concentração de oxigênio dissolvido e o ajuste ao modelo, (equação (1), para determinação do K_{La} no sistema com 2 tubos de Venturi.

Após a obtenção dos valores de K_{La}, os dados foram corrigidos a temperatura de 20°C, pela equação (2) e calculadas as taxas de transferência de oxigênio padrão (TTO_{padrão}) por meio da equação (3), potência consumida (eq. 4) e eficiência de oxigenação (eq. 5), apresentados na Tabela 2. A Figura 4 destaca a relação entre os valores das taxas de transferência de oxigênio e as eficiências de oxigenação.

Tabela 2. Valores das taxas de transferência de oxigênio padrão (TTO_{padrão}), potência consumida (P) e eficiência de oxigenação (EO)

Número de tubos de Venturi	TTO _{padrão} (gO ₂ h ⁻¹)	P (kW)	EO (kgO ₂ kW h ⁻¹)
2	71,06	0,081	0,878
3	62,86	0,048	1,319
4	30,29	0,027	1,141

Constata-se que na configuração com 2 tubos de Venturi, são observados os maiores valores de K_{La} e, consequentemente, TTO mais elevado, porém, devido a maior perda de carga, a potência consumida é elevada, resultando na mais baixa eficiência de oxigenação.

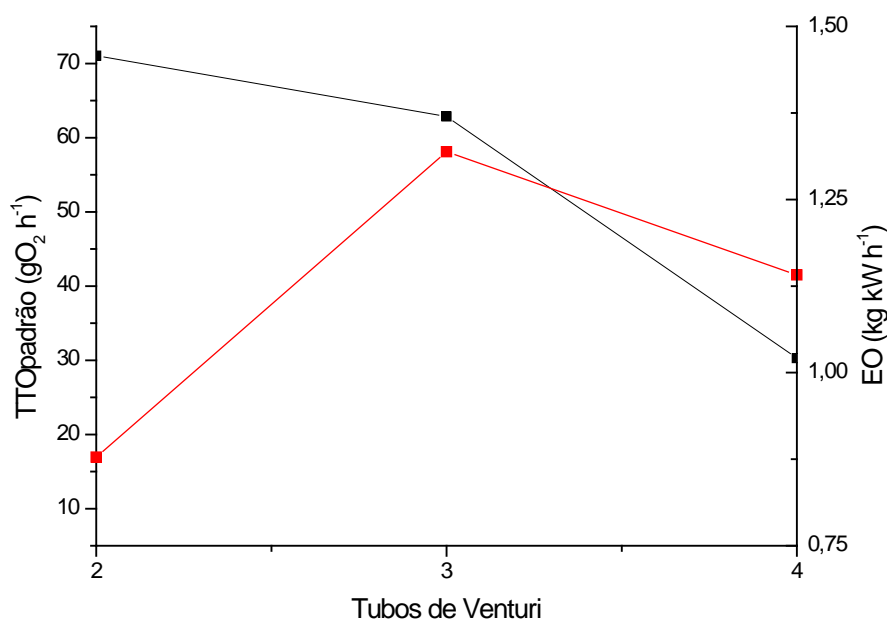


Figura 4. Valores das taxas de transferência de oxigênio (■) e as eficiências de oxigenação (■) em função do número de tubos de Venturi

Os melhores resultados, foram obtidos para a combinação de 3 Venturi, em que a TTO é cerca de 13% inferior, porém a EO é 50% maior. Além disso, o valor de 1,32 kgO₂ kWh⁻¹, se aproxima dos equipamentos convencionais disponíveis no mercado.

CONCLUSÕES

Com base nos experimentos realizados, pôde-se concluir que:

- A instalação de 3 tubos de Venturi em paralelo resultou na melhor combinação para a reaeração do tanque, uma vez que apresentou a mais alta eficiência de oxigenação (EO), de 1,32 kW h⁻¹;

- A combinação de 2 tubos de Venturi instalados em paralelo fornece a maior taxa de transferência de oxigênio (TTO_{padrão}), podendo ser escolhida quando há necessidade de suprir maior demanda de oxigênio. No entanto, o consumo energético (P) é elevado e eficiência de oxigenação (EO) foram os mais baixos, respectivamente 0,081 kW e 0,878 kWh⁻¹;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ATKINSON, B.; MAVITUNA, F. Biochemical engineering and biotechnology Handbook Macmillan Publishers Ltda, p.1115. 2^{ed}, NY, 1991.
2. BAGATUR, T. Technical note: Minimal conditions for venturi aeration of water flows. Water Management, v.158, p.127-130, 2005.
3. BAYLAR, A.; UNSAL, M.; OZKAN, F. Hydraulic structures in water aeration processes. Water, Air and Soil Pollution, v.203, p.1-14, 2009
4. BAYLAR, A.; UNSAL, M.; OZKAN, F. Effect of Air Inlet Hole Diameter of Venturi Tube on Air Injection Rate KSCE Journal of Civil Engineering 14(4):489-492, 2010.
5. CORRÊA, Luiz Carlos. Controle do processo da transferência de oxigênio em corpos hídricos. 2006. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência da Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
6. GONÇALVES, M. A. B. Estudo de transferência de oxigênio em reatores Air-Lift utilizando Venturi e peças cisalhantes. 1999. 144 f. Tese (Doutorado), UNICAMP, Campinas, 1999.

7. METCALF, L.; EDDY, H. P. Tratamento de efluentes e recuperação de recurso. 5. ed. Porto Alegre: Mcgraw-hill, 2016.
8. PICCIN, J. S.; RISSINI, A.L.; KOCH, M.M.; BRIÃO, V. B.; HEMKEMEIER, M. Otimização de sistema de autoaspiração de ar tipo Venturi para tratamento de água ferruginosa. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande - Pb, v.14, n. 5, p.531-537, 2009.
9. TEIXEIRA, M. B. F. Hidrodinâmica e transferência de massa em ejetores líquido-gás com escoamento descendente. Campinas: UNICAMP, 1999. 146p.Dissertação Mestrado
10. VON SPERLING, M. Princípios do Tratamento Biológico de Água Residuárias: Princípios Básicos do Tratamento de Esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.