

II-085 – ESUDO DA REOXIGENAÇÃO DA ÁGUA UTILIZANDO TUBOS DE VENTURI

Ajadir Fazolo

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

Fernanda Martins Nonaka

Engenheira Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. Mestranda em Engenharia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina.

Carlos Henrique Gianjacom⁽¹⁾

Químico pela Universidade Estadual de Londrina. Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina.

Endereço⁽¹⁾: Avenida dos Pioneiros, 3131 – Jardim Marumbi - Londrina - PR - CEP: 86036-370- Brasil - Tel: (43) 33156100 - e-mail: gianjacom@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 horizontal (TH), com volume útil de 100 L. Foram testados diferentes vazão da água (Q_{água}), para um único tubo de Venturi e dois tubos associados em paralelo. Como respostas, foram determinados os coeficientes globais de transferência de oxigênio do ar para a água (K_{La}) e as eficiências de oxigenação (EO). Os resultados indicam que a vazão da água influenciou significativamente os valores de K_{La} e EO. O aumento da vazão da água que passa pelo dispositivo, eleva o volume de ar atmosférico succionado porém, não resulta em melhor transferência de oxigênio, possivelmente pela formação de bolhas com dimensões maiores. De maneira geral, os melhores resultados do K_{La}, de até 35 h⁻¹, foram obtidos para vazões de água mais elevadas, enquanto que, eficiências de oxigenação de até 0,86 kgO₂ kW⁻¹ h⁻¹ foram observadas para baixos valores de vazão de água. A combinação de 2 tubos de Venturi, instalados em paralelo, mantém a transferência de oxigênio e, praticamente, dobra a eficiência de oxigenação, comparando-se com um único tubo.

PALAVRAS-CHAVE: Reoxigenação, Tubos de Venturi, Aeração, Eficiência Oxigenação.

INTRODUÇÃO

A oxigenação pode ser entendida como um processo natural ou mecânico de transferência do oxigênio do ar para a água, com o objetivo de elevar a concentração na massa líquida. Nos sistemas naturais, tais como rios e lagos, o suprimento de oxigênio se dá, principalmente, pela fotossíntese ou por fenômenos espontâneos de transferência. Já os processos biológicos de tratamento de águas residuárias incluem uma ampla gama de alternativas relacionadas a concentrações de oxigênio dissolvido e níveis de agitação do líquido (COX, 2003).

Recentemente, sistemas de micro aeração, com concentrações inferiores a 0,1 mgO₂ L⁻¹, têm sido empregados na remoção de compostos de enxofre (KRAYZELOVA et al. 2015). Tecnologias de remoção de nitrogênio pela via curta, requerem concentrações mais baixas de oxigênio nos tanques de aeração e elevada agitação do meio líquido, difíceis de serem mantidos pelos sistemas convencionais (JIANLONG & NING, 2004; ASLAN et al. 2009).

Nos processos aeróbios de tratamento, que visam a remoção de matéria orgânica e a nitrificação, o fornecimento de oxigênio por ar difuso e aeradores de superfície são os mais utilizados (MUELLER, et al. 2002; VON SPERLING, 2005; METCALF, L. & EDDY, 2016).

Em sistemas descentralizados de tratamento de esgotos, o fornecimento de oxigênio por esses sistemas de aeração pode ser incompatível com os custos de implantação e manutenção. Assim, as diferentes condições exigidas nos processos de tratamento de águas residuárias demandam de estratégias alternativas de aeração,

que melhor se adequem a cada situação. A utilização de estruturas hidráulicas como vertedores, medidores Parshall, escadas, bocais, entre outros, tem sido estudadas (GULLIVER et al, 1991) e apresentam potencial de favorecer a aeração pela grande área interfacial gerada que permite a entrada de ar, associada com a turbulência do escoamento.

Tubos de Venturi, constituídos sequencialmente de uma seção convergente, estrangulamento ou garganta e seção divergente, que são utilizados como dosadores de produtos químicos (cloro, ozônio) e fertilizantes, podem ser aplicados para injeção de ar na massa líquida. Entre as principais vantagens, destacam-se a simplicidade operacional, que se baseia na redução da pressão ($< P_{atm}$) com o aumento da velocidade no estreitamento do tubo, o baixo custo de instalação e manutenção e a possibilidade de gerar bolhas com pequeno diâmetro sem a necessidade de difusores (BAGATUR, 2005, BAYLAR et al 2010 b).

O objetivo desse trabalho foi avaliar as potencialidades da aplicação de tubos de Venturi na reoxigenação da água. Os testes foram realizados em um tanque horizontal, combinando-se sistemas com tubos de Venturi individuais e associados em paralelo. Nos experimentos buscou-se determinar os efeitos da vazão de água, que passa pelos dispositivos nos valores dos coeficientes globais de transferência de oxigênio do ar para a água (KLa) e na eficiência de oxigenação (EO).

MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado um tanque horizontal, construído em acrílico, com dimensões 1,47mx0,28mx0,39m e volume de água de 100 Litros, apresentado nas Figuras 1 e 2



Figura 1: Fotografia do aparato experimental

Foram utilizados os seguintes dispositivos/equipamentos:

- Bomba autoaspirante Mark Dar modelo Jetcom 32, potência de 600W e vazão 0,6-3,6 m³ h⁻¹;
- Rotâmetro BLI 5000 faixa 300 a 4000 Lágua h⁻¹, precisão $\pm 2\%$, repetibilidade 0,25%;
- Rotâmetro BLI 200 faixa 300 a 4000 NLar h⁻¹, 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;
- Sonda e medidor de OD marca Thermo Scientific, modelo Orion 5 Star, com faixa de medição de 0,00 - 20,00 mgO₂ L⁻¹ e resolução de 0,01 mgO₂ L⁻¹.

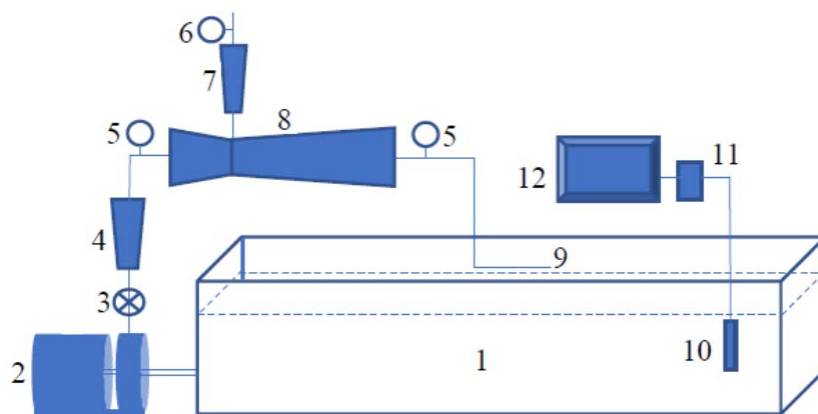


Figura 2: Esquema do tanque horizontal (1), bomba centrífuga (2), registro gaveta (3), rotâmetro água (4), manômetros (5), vacuômetro (6), rotâmetro ar (7), tubo(s) de Venturi (8), saída da água (9), sonda de oxigênio dissolvido (10), medidor de oxigênio dissolvido (11) e computador (12)

Funcionamento dos sistemas

Foi utilizada água potável proveniente de sistema de abastecimento. Para realização dos ensaios, a vazão da bomba era controlada por meio de registro de gaveta (3) e ajustada pela leitura da vazão de água no rotâmetro (4). A medida da vazão de ar era feita no rotâmetro (7), as pressões de montante, e de jusante nos manômetros (5) e vacuômetro (6) instalados na linha de bombeamento.

Nos ensaios com um único tubo de Venturi, a vazão total passava pelo dispositivo, enquanto que para dois tubos associados em paralelo, a vazão era dividida nas linhas, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Valores da vazão de água bombeada para os sistemas com 1 e 2 tubos de Venturi.

Tubo(s) de Venturi	Vazão da água (Lh ⁻¹)				
1	1300	1490	1950	2410	2600
2	1300	1605	2350	3095	3400

A transferência de oxigênio foi medida pelo método estacionário. Inicialmente, era adicionado nitrogênio gasoso para remoção do oxigênio dissolvido, até aproximadamente 2 mgO₂L⁻¹. Em seguida a bomba de água (2) era ligada e o ar injetado na massa líquida. O medidor de OD era conectado a um computador, permitindo a aquisição "on-line" de dados a cada 2 (dois) segundos.

Os valores dos coeficientes globais de transferência de oxigênio do ar para a água (KLa) foram obtidos pelo ajuste dos dados experimentais a equação 1 (von SPERLING, 2005), utilizando-se o software Origin.

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

Nessa expressão, C* é a concentração de equilíbrio do oxigênio no meio líquido, t, t₀ e C₀ são, respectivamente, o tempo final, inicial e a concentração em que se reinicia da aeração.

A temperatura da água foi monitorada em todos os testes, a fim de corrigir para o valor padrão de 20°C, de acordo com a equação 2, descrita por von Sperling (2005):

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

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

A taxa de transferência de oxigênio padrão (TTOpadrão) foi calculada pela equação 3:

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

Em que $TTO_{padrão}$ é a taxa de transferência de oxigênio padrão ($kgO_2 h^{-1}$), K_{La} o coeficiente global de transferência de oxigênio (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) igual a $9,092 g m^{-3}$ (METCALF & EDDY, 2016) e V o volume do tanque (m^3).

Foi adotada a expressão (equação 4) apresentada por Piccin et al. (2009) para estimativa da energia consumida:

$$P = \frac{(p_2 - p_1) m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} \quad (4)$$

Sendo P a potência (kW), p_1 e p_2 são as pressões de trabalho na entrada e saída do tubo de Venturi ($kN m^{-2}$), m_{H_2O} a vazão mássica de água ($kg s^{-1}$) e ρ_{H_2O} é a densidade da água ($kg m^{-3}$).

A eficiência de oxigenação (EO) foi calculada dividindo-se a $TTO_{padrão}$ pela potência consumida (P).

RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

Na Figura 3a apresenta a variação da vazão de ar succionada por um dispositivo de Venturi em função da vazão de água bombeada (nos ensaios com 2 tubos de Venturi as vazões totais medidas, de ar e água, foram divididas por 2).

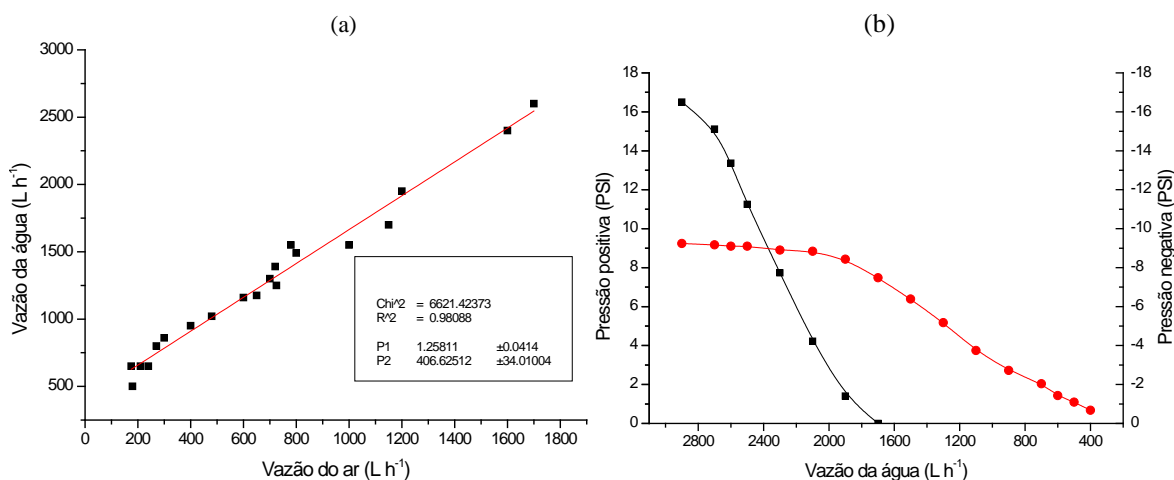


Figura 3: (a) Valores da vazão aspirada de ar em função da vazão de água (■) e linha de ajuste (—) para o modelo linear; (b) Valores da pressão positiva (■) medida na entrada do tubo de Venturi e pressão negativa (●) medida no estrangulamento do tubo

Observa-se que a sucção de ar é iniciada em torno de $400 L h^{-1}$ de água passando pelo tubo. O efeito Venturi acontece devido ao aumento da velocidade e, conseqüentemente, redução da pressão na seção estrangulada do tubo, ou seja, há uma vazão mínima em que a pressão na região concêntrica atinge valor inferior a pressão atmosférica, ocorrendo a sucção do ar pelo orifício localizado no estrangulamento (BAYLAR et al., 2009). Assim, em vazões inferiores a $400 L h^{-1}$, embora ocorra redução da pressão, não há formação de vácuo para succionar o ar atmosférico. Isto pode ser verificado na Figura 3b, que apresenta as variações das pressões (positiva, medida pelo manômetro 5 instalado na entrada do tubo de Venturi) e negativa (medida pelo vacuômetro 6) em função da vazão de água bombeada. Constata-se que para vazões de água mais altas, a pressão negativa se mantém aproximadamente constante, enquanto que a pressão na entrada do tubo de Venturi, se reduz rapidamente, atingindo a pressão atmosférica na vazão próxima de $1500 L h^{-1}$. Possivelmente, isso resulta em maior aspiração de ar. Acima deste valor, a pressão negativa diminui gradativamente, até atingir valores próximos à pressão atmosférica em vazão da água inferior a $400 L h^{-1}$, quando cessa a aspiração de ar.

A Figura 4 apresenta os valores dos coeficientes globais de transferência de oxigênio do ar para a água (K_{La}) e as eficiências de oxigenação (EO) para as vazões de água testadas. Observa-se tendência de aumento do K_{La} com o incremento da vazão. Este comportamento é esperado, uma vez que a elevação da vazão da água resulta em maior incorporação de ar no líquido, possivelmente, facilitando a transferência de oxigênio. O comportamento oposto é verificado com a EO, pois a elevação da vazão da água ocasiona maior perda de carga e, consequentemente, maior potência consumida pelo aumento da altura manométrica a ser vencida pelo conjunto moto-bomba.

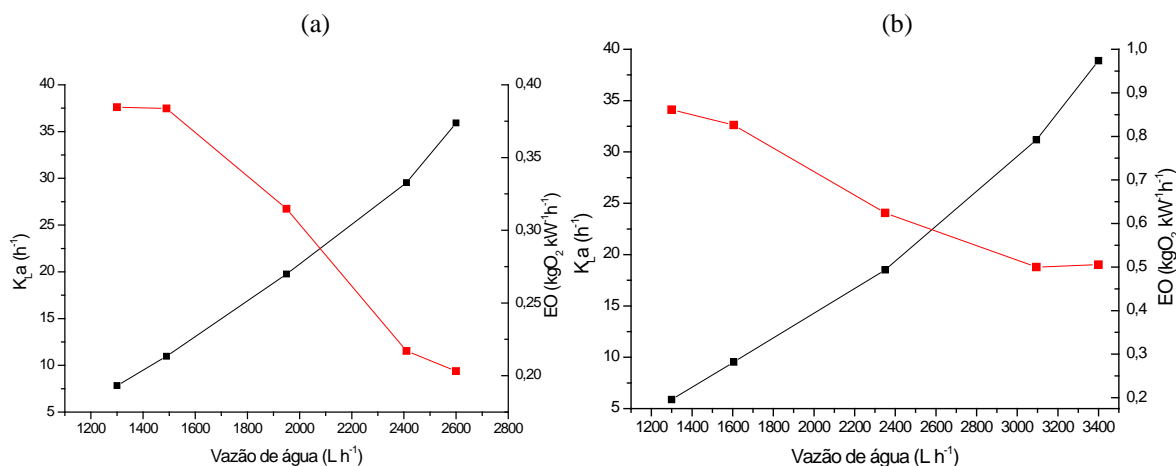


Figura 4: Valores de K_{La} (■) e de EO (■) em função da vazão da água para (a) 1 e (b) 2 tubos de Venturi

A Figura 5 detalha o comportamento do K_{La} em função da vazão da água para 1 e 2 tubos de Venturi.

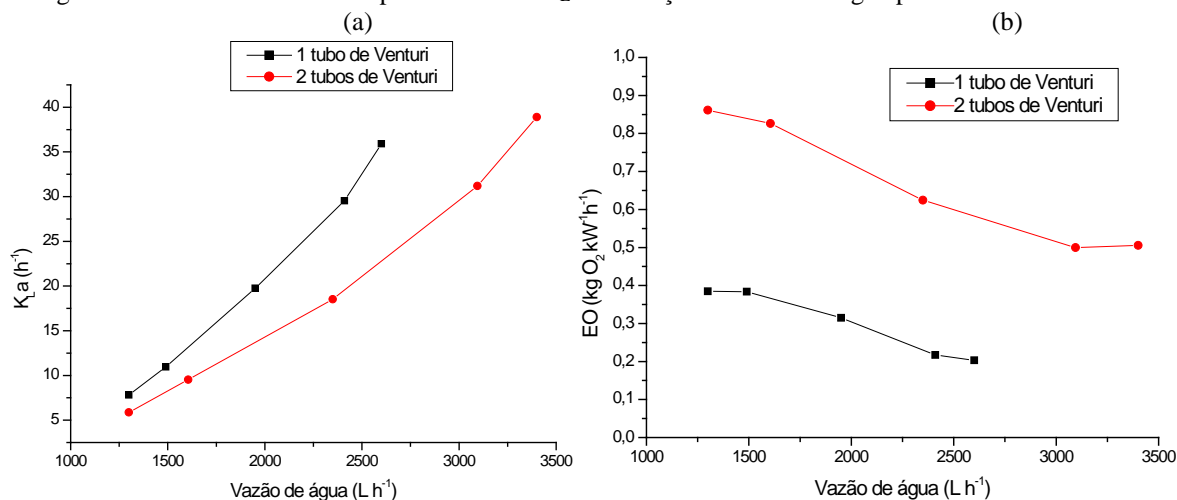


Figura 5: Valores de (a) K_{La} e de (b) EO em função da vazão da água em um único tubo de Venturi (■) e em 2 tubos de Venturi (■) instalados em paralelo

Pode-se verificar na Figura 5a que, para o sistema com 1 tubo, o incremento dos valores de K_{La} são mais acentuados que em dois tubos, com valores máximos de 35,9 h⁻¹, no sistema único com vazão de água de 2600 Lh⁻¹, e 38,9 h⁻¹ nos dois tubos instalados em paralelo para vazão de 3400 Lh⁻¹. Embora a maior vazão da água ocasione um maior volume de ar inserido no tanque, este comportamento pode ser explicado pela formação de bolhas com maior tamanho, com menor área de contato ar e água, reduzindo a eficiência do processo de transferência medido pelo K_{La} . Assim, possivelmente, há um limite na relação entre a vazão de ar aspirado e a vazão da água que proporciona melhor dispersão do ar no líquido favorecendo a transferência do oxigênio.

Na Figura 5b, constata-se que, com a adoção de 2 tubos de Venturi instalados em paralelo, a eficiência de oxigenação (EO) é cerca de 2,2 vezes maior que o sistema único.

Assim, recomenda-se testar a adoção de uma configuração com 3 tubos em paralelo. Possivelmente, espera-se manter a mesma capacidade de transferência de oxigênio, com K_{La} acima de 35 h^{-1} , e ao mesmo tempo, aumentar a eficiência de oxigenação pela menor perda de carga.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

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

- os tubos de Venturi podem ser aplicados na reoxigenação da água, podendo alcançar valores de K_{La} de até 35 h^{-1} ;
- O aumento da vazão da água que passa pelo dispositivo, eleva o volume de ar atmosférico succionado porém, não resulta em melhor transferência de oxigênio, possivelmente pela formação de bolhas com dimensões maiores;
- A eficiência de oxigenação (EO) aumenta com a redução da vazão, chegando a $0,86 \text{ kgO}_2\text{kW}^{-1}\text{h}^{-1}$;
- A combinação de 2 tubos de Venturi, instalados em paralelo, mantém a transferência de oxigênio e, praticamente, dobra a eficiência de oxigenação, comparando-se com um único tubo.

Recomenda-se testar sistema com (03) três tubos de Venturi instalados em paralelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASLAN, S.; MILLER, L.; DAHAD, M. *Ammonium oxidation via nitrite accumulation under limited oxygen concentration in sequencing batch reactors*. Bioresource Technology v. 100p. 659–664, 2009.
2. BAGATUR, T. Technical note: *Minimal conditions for venturi aeration of water flows*. Water Management, v.158, p.127-130, 2005.
3. BAYLAR, A.; AYDIN, M.C.; UNSAL, M.; OZKAN, F.; *Numerical modeling of Venturi flows for determining air injection rates using fluent V6.2.*; Mathematical and Computational Applications, v. 14, n. 2, p. 97-108, 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. (b)
5. COX, B. *A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland rivers*. The Science Of The Total Environment, [s.l.], v. 314-316, p.303-334, 2003.
6. GULLIVER, J. S.; THENE, J. R.; RINDELS, A. J. *Indexing gas transfer in self-aerated flows*. Journal of Environmental Engineering ASCE, 116(3), 503–523, 1991.
7. JIANLONG, W.; NING, Y. *Partial nitrification under limited dissolved oxygen conditions*. Process Biochemistry, v. 39, p. 1223–1229, 2004.
8. KRAYZELOVA, L. et al. *Microaeration for hydrogen sulfide removal during anaerobic treatment: a review*. Environmental Science Biotechnology. 14. P703-725, 2015.
9. METCALF, L.; EDDY, H. P. *Tratamento de efluentes e recuperação de recurso*. 5. ed. Porto Alegre: McGraw-hill, 2016.
10. MUELLER, J.A.; BOYLE, W.C.; PÖPEL, H.J. *Aeration: principles and practice*. New York: CRC Press, 2002.
11. 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.
12. VON SPERLING, M. *Princípios do Tratamento Biológico de Água Residuárias: Princípios Básicos do Tratamento de Esgotos*. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.