

## 26º. Encontro Técnico AESABESP

# ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DE BOLHAS DE AR NA TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO EM REATORES EM BATELADA

### **Stephani Loren de Menezes**

Graduanda em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG. Bolsista PIBIC/CNPq.

### **Daniel Jadyr Leite Costa**

Professor Assistente II do curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG.

### **Vinícius Carvalho Rocha**

Professor Auxiliar I do curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG.

### **Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves**

Professor Adjunto II do curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG.

**Endereço:** Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas – Departamento de Engenharia Ambiental - Av. Doutor Randolpho Borges Jr, 1250 – Univerdecidade - Uberaba, MG - CEP. 38064-200 – Brasil – Tel. +55 (34) 3331-3000 – e-mail: danielcosta.geo@gmail.com

## **RESUMO**

Existem algumas limitações no processo de transferência de massa de oxigênio em sistemas de tratamento que utilizam microrganismos aeróbios. Em alguns casos, as velocidades de transferência do oxigênio desde a bolha de gás até as células consumidoras podem limitar a conversão biológica e reduzir significativamente a eficiência do sistema. O parâmetro que determina numericamente a transferência de massa de oxigênio em um meio líquido em um determinado intervalo de tempo é o coeficiente de reoxigenação ( $K_L a$ ), o qual pode ser influenciado por diversos fatores, dentre eles a área superficial de contato entre as bolhas de oxigênio e o meio a ser oxigenado. Esse trabalho teve como objetivo estudar a transferência de massa de oxigênio por em reatores em batelada em escala reduzida através da variação do diâmetro das bolhas de ar injetadas. Os experimentos foram realizados com meio abiótico e a variação do diâmetro das bolhas foi realizada através da presença ou ausência de difusores. Por meio dos resultados é possível verificar que variações no diâmetro das bolhas ocasionam significativa influência no coeficiente no reoxigenação e consequentemente na eficiência de sistemas de tratamento aeróbios.

**PALAVRAS-CHAVE:** transferência de oxigênio, sistema de tratamento aeróbio, reator em batelada.

## **INTRODUÇÃO**

A água como deveria ser conhecimento de todos, é um bem essencial à vida e a sua conservação é de extrema importância para a humanidade. Tendo isso em mente, no ano de 1997 com a Lei Federal nº 9.433, foi instituída a Política Nacional dos Recursos Hídricos para que a atual geração, assim como as futuras, tenha acesso à água de qualidade e suficiente através da distribuição racional e integrada.

A água tratada contém parâmetros de qualidade que devem ser respeitados, dentre estes se encontra: cor, turbidez, sabor e odor, temperatura, pH, alcalinidade, acidez, dureza, ferro e manganês, cloretos, nitrogênio, fósforo, oxigênio dissolvido, matéria orgânica, micropoluentes inorgânicos e orgânicos. Dentre todos esses parâmetros o que nos interessa nesse trabalho é o oxigênio dissolvido (OD).

O OD é de essencial importância para os organismos aeróbios. Durante a estabilização da matéria orgânica, as bactérias fazem uso do oxigênio nos seus processos respiratórios, podendo vir a causar uma redução da sua concentração no meio. Dependendo da quantidade de matéria orgânica, essa redução de OD pode ser fatal para diversos seres aquáticos. (Von Sperling, 2009).

Em se tratando de análise de reatores aeróbios um dos mecanismos mais importantes é a transferência de oxigênio do meio gasoso para o meio líquido e, conseqüentemente, a sua disponibilização para os microrganismos. Essa transferência torna-se mais importante quando reatores heterogêneos, contendo células imobilizadas, são empregados.

Em processos que utilizam células imobilizadas, é importante a quantificação das limitações à transferência de massa para que se possam projetar reatores que apresentem melhor desempenho. Esse desempenho está diretamente relacionado com a minimização dessas limitações, pois a velocidade global de reação nesses sistemas heterogêneos pode ser reduzida devido à resistência à transferência de massa entre as fases (Zaiat, 1996).

As limitações à transferência de massa e a possibilidade de obstrução do meio suporte devem ser consideradas. Em alguns casos, as velocidades de transferência do oxigênio desde a bolha de gás até as células consumidoras podem limitar a conversão biológica (Fazolo, 2003).

O parâmetro que determina numericamente a transferência de massa de oxigênio em um meio líquido em um determinado intervalo de tempo é o coeficiente de reoxigenação ( $K_L a$ ), o qual pode ser obtido por meio da equação 3.

## OBJETIVOS

Sendo assim, esse trabalho teve como objetivo estudar a transferência de massa de oxigênio por em reatores em batelada em escala reduzida através da variação do diâmetro das bolhas de ar injetadas, para verificação da alteração da eficiência do processo de aeração.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado, em escala reduzida, um reator em batelada com meio abiótico, um compressor de ar e duas mangueiras para injeção de ar atmosférico com e sem difusores.

O compressor de ar possui duas saídas com capacidade nominal total de vazão de ar de 3,5 L/min. Foram utilizadas mangueiras com diâmetro interno de 4mm, capazes de produzir bolhas de oxigênio com o mesmo diâmetro. Foram utilizados difusores com geometria no formato cilíndrico, com altura de 32mm e diâmetro da seção transversal de 16mm, capazes de produzir bolhas de oxigênio com diâmetro de até 2mm. Para a realização dos experimentos o meio era desoxigenado com o uso de um gás inerte (butano), com alicação do processo de *stripping*. Em seguida era injetado ar atmosférico no reator pelo compressor até chegar em concentrações de oxigênio próximas da saturação. A desoxigenação sempre foi realizada com acompanhamento da aferição da concentração de OD no meio líquido por uma sonda (oxímetro), e o processo era interrompido ao atingir valores próximos de 4,5 mgOD/L. Os valores de concentração de saturação de oxigênio ( $C_s$ ) foram obtidos a partir de dados experimentais de temperatura da água, pressão atmosférica, salinidade em conjunto com os valores tabelados e apresentados por Weiss (1970) e USGS (2014).

A aferição da concentração de OD foi realizada com o uso de um oxímetro, com sensores de OD do tipo luminescente (LDO – Luminescence Dissolved Oxygen) da marca Hach, tipo HQ40d. O método de luminescência da Hach é recomendado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), para medição de OD em águas e efluentes. Esta sonda é capaz de medir a concentração de OD em uma faixa de 0,2 a 20 mg/L e possui um adaptador tipo USB que permite a transferência dos dados para o computador.

Para avaliação do processo de reoxigenação foi utilizado o modelo empírico clássico proposto por Adney e Becker em 1919. Segundo o modelo, o fluxo de massa ou a taxa de transferência gasosa por unidade de área normal ao fluxo é diretamente proporcional ao déficit relativo à saturação do gás no líquido, ou seja

$$J = \frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = K_L (C_s - C) \quad [1]$$

em que J é o fluxo de massa ou taxa de entrada de gás dissolvido; A é a área de interface gás-líquido ou área superficial da bolha; m a massa de gás dissolvido; t o tempo;  $C_s$  a concentração de saturação do gás no líquido; C a concentração do gás dissolvido no volume líquido e  $K_L$  o coeficiente global de transferência de massa.

Substituindo o termo  $dm/dt$  por  $d(VC)/dt$ , em que V é o volume do líquido no qual a massa do gás se dissolve, a equação 1 passa a ter a seguinte forma

$$\frac{dC}{dt} = K_L \frac{A}{V} (C_s - C) = K_L a (C_s - C) \quad [2]$$

Nessa expressão, a é a área interfacial do gás-líquido por unidade de volume líquido [ $L^{-1}$ ] e  $K_L a$  é o coeficiente volumétrico global de transferência de massa [ $T^{-1}$ ] ou coeficiente de reoxigenação. Esse coeficiente é o parâmetro mais importante na caracterização do processo de transferência de massa de oxigênio em um reator aeróbio e a sua determinação, em conjunto com a variação do diâmetro das bolhas de injeção pelos difusores, é o principal objetivo deste trabalho.

Para a obtenção dos valores de  $K_L a$  a equação 2 foi integrada para uma concentração inicial  $C_0=0$  em  $t=0$ , o que resulta na seguinte solução analítica

$$C = C_s + (C_0 - C_s) e^{-K_L a t} \quad [3]$$

A partir da equação 3 os valores de  $K_L a$  podem ser obtidos por regressão não-linear, através do método dos mínimos quadrados (ASCE, 1992).

Para corrigir o valor do coeficiente de reoxigenação para uma temperatura qualquer, foi utilizada a seguinte relação

$$K_L a(T) = K_L a(20) \theta^{(T-20)} \quad [4]$$

Em que

$K_L a(T)$  =  $K_L a$  a uma temperatura T qualquer;

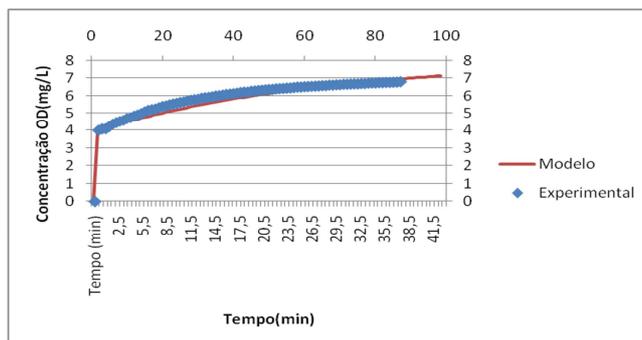
$K_L a(20)$  =  $K_L a$  a uma temperatura  $T=20^\circ C$ ;

$\theta$  = coeficiente de correção de temperatura.

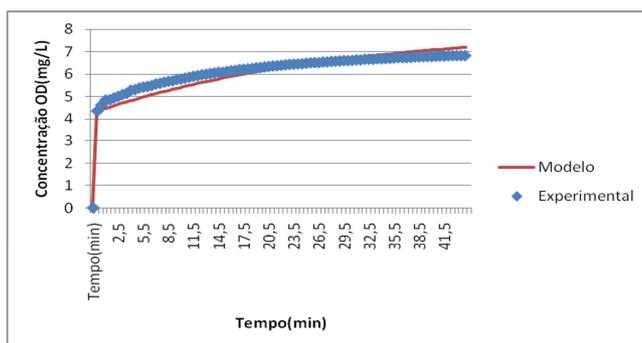
Um valor bastante utilizado para o coeficiente de correção de temperatura,  $\theta$ , é 1,024, pois de acordo com EPA (1985) este valor representa a média entre os extremos registrados por Streeter & Phelps (1926), Elmore & West (1961), Churchill et al (1962) e Tsvoglou (1967).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

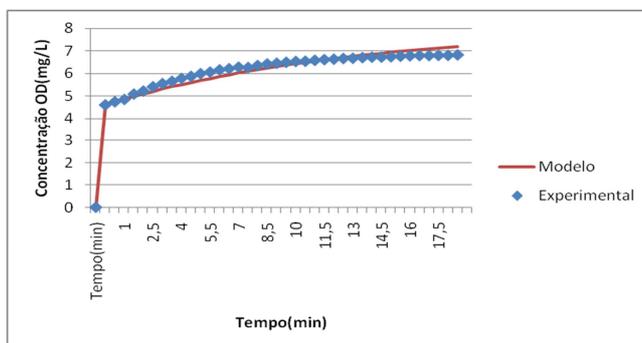
Nos gráficos 1 a 8 estão apresentados os resultados experimentais do processo de reoxigenação do reator em batelada para os experimentos realizados. As condições experimentais foram realizadas em duplicata.



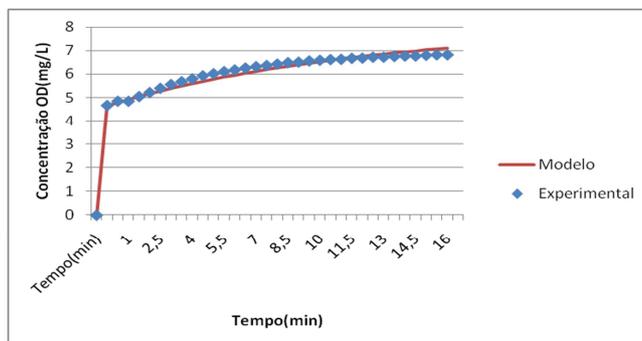
**Gráfico 1. Resultados do experimento 1: uma mangueira sem difusor.  $K_{L,a} = 0,0359$  (1/dia)**



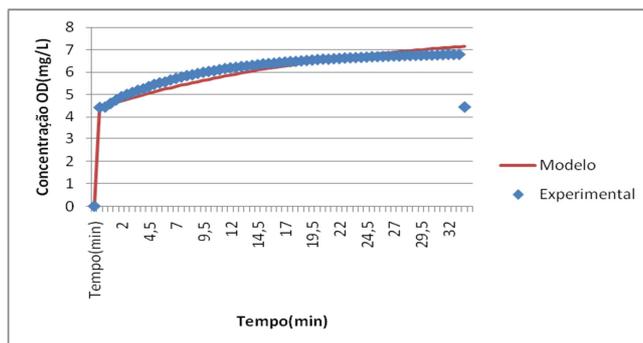
**Gráfico 2. Resultados do experimento 2: uma mangueira sem difusor.  $K_{L,a} = 0,0347$  (1/dia)**



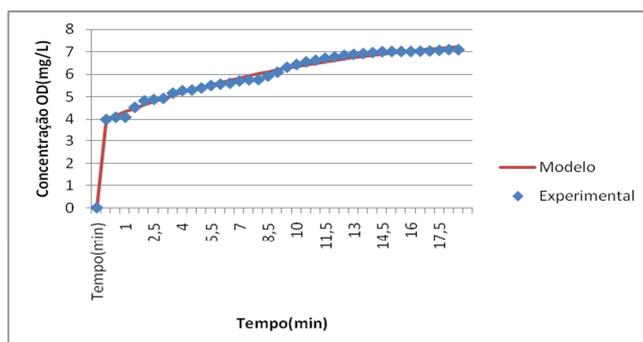
**Gráfico 3. Resultados do experimento 3: uma mangueira com difusor.  $K_{L,a} = 0,0768$  (1/dia)**



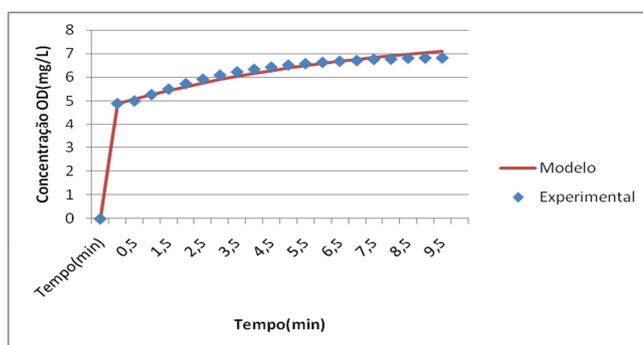
**Gráfico 4. Resultados do experimento 4: uma mangueira com difusor.  $K_{L,a} = 0,0831$  (1/dia)**



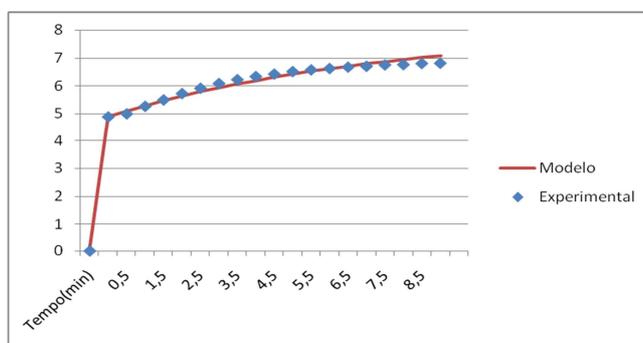
**Gráfico 5. Resultados do experimento 5: duas mangueiras sem difusor.  $K_L a = 0,0437$  (1/dia)**



**Gráfico 6. Resultados do experimento 6: duas mangueiras sem difusor.  $K_L a = 0,0880$  (1/dia)**



**Gráfico 7. Resultados do experimento 7: duas mangueiras com difusor.  $K_L a = 0,1319$  (1/dia)**



**Gráfico 8. Resultados do experimento 8: duas mangueiras com difusor.  $K_L a = 0,1346$  (1/dia)**

Na Tabela 1 está apresentada uma síntese dos resultados experimentais, considerando-se a temperatura média do meio, pressão atmosférica e concentração inicial de OD.

**Tabeta 1. Resultados experimentais.**

Condição experimental	Duração do experimento (min)	Temperatura média (°C)	Pressão atmosférica (atm)	Concentração inicial de OD (mg/L)	Diâmetro aproximado da bolha (mm)	$K_L a$ (1/dia)	$K_L a_{\text{médio}}$ (1/dia)
1 - uma mangueira sem difusor	45	25,3	0,916	4,02	4	0,0359	0,0353
2 - uma mangueira sem difusor	49	24,2	0,920	4,35	4	0,0347	
3 - uma mangueira com difusor	19	25,8	0,916	4,60	2	0,0768	0,07995
4 - uma mangueira com difusor	16	24,6	0,920	4,84	2	0,0831	
5 - duas mangueiras sem difusor	33	25,0	0,919	4,43	4	0,0437	0,06585
6 - duas mangueiras sem difusor	31	24,5	0,922	3,99	4	0,0880	
7 - duas mangueiras com difusor	9	25,0	0,919	4,89	2	0,1319	0,13325
8 - duas mangueiras com difusor	12	23,1	0,922	4,89	2	0,1346	

Considerando-se o desenvolvimento realizado nas equações 2 e 3, pode-se notar que quanto maior a superfície de contato da interface ar-água das bolhas, maior será a área para a troca de gases, ou seja, espera-se, teoricamente, para essa condição obter maiores valores do coeficiente de reoxigenação ( $K_L a$ ). De acordo com os resultados experimentais disponíveis na Tabela 1 verifica-se que o uso de difusores na injeção do ar atmosférico aumentou significativamente a transferência de massa de oxigênio para o meio líquido.

Aparentemente houve uma pequena discrepância no resultado experimental do experimento 6, ao compará-lo com os resultados do experimento 5, o qual possui condições experimentais semelhantes. Analisando o comportamento do processo de reoxigenação desses experimentos nos gráficos 5 e 6, nota-se uma sutil descontinuidade ao longo do desenvolvimento do experimento 6, o que pode indicar a possibilidade de interferências externas para este experimento, que não foram contabilizadas pelo modelo utilizado.

Comparando-se os resultados dos experimentos 1 e 2 com os experimentos 3 e 4, verifica-se que uma redução aproximada de 50% no diâmetro das bolhas injetadas no meio ocasionou um aumento maior que 50% no valor do coeficiente volumétrico global de transferência de massa ( $K_L a$ ). O mesmo comportamento ocorreu entre os experimentos 5 e 6 ao compará-los com os resultados dos experimentos 7 e 8. Portanto, para o mesmo fluxo volumétrico (vazão) quando há a diminuição do diâmetro das bolhas há uma otimização da eficiência de transferência gasosa.

Além disso, houve uma significativa interferência no tempo de duração dos experimentos ao realizar a variação do diâmetro das bolhas e alterar a forma de distribuição da vazão de ar. Nos experimentos 1 e 2 verifica-se que o tempo mínimo para atingir a concentração de saturação de OD foi de 45 minutos, para os experimentos 7 e 8, o tempo mínimo foi de 9 minutos. A diferença entre esses resultados deve-se a dois fatores, sendo o primeiro o mais importante: i) redução do diâmetro das bolhas com o uso de difusores; e ii) redução da perda de carga do escoamento nos experimentos 7 e 8, devido a distribuição da vazão nominal do compressor com o uso de duas mangueiras, o que reduz a velocidade do escoamento em cada uma delas e como consequência há um fluxo volumétrico relativamente maior para esses experimentos, visto que de acordo com a Fórmula Universal de Darcy-Weisbach, utilizada para o cálculo da perda de carga distribuída em escoamentos, a perda de carga é proporcional ao quadrado da velocidade.

## CONCLUSÕES

Por meio dos valores alcançados conclui-se que foi corroborada a hipótese de que o diâmetro da bolha influencia consideravelmente coeficiente volumétrico global de transferência de massa ( $K_L a$ ), sendo que para os mecanismos de reoxigenação estudados nesse trabalho, uma redução de 50% no diâmetro da bolhas de ar ocasionou um aumento acima de 50% na eficiência da transferência de massa de oxigênio no meio.

## RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se o uso da metodologia aplicada nesse trabalho para a obtenção de parâmetros e critérios de projeto em sistemas de tratamento de águas residuárias por via aeróbia, como por exemplo, os sistemas de lodos ativados, especificamente na etapa de determinação do cálculo da potência dos aeradores a serem utilizados no reator de mistura completa. Recomenda-se que ao se realizar *scale-up* a partir de resultados experimentais obtidos com o uso de protótipos, sejam consideradas as defasagens provenientes do aumento de escala e limitações do modelo físico reduzido e modelo matemático que foi utilizado na simulação. Como trabalhos futuros sugere-se a realização de ensaios com meio biótico para incluir o incremento de massa de oxigênio necessário para a manutenção das atividades dos microrganismos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o CNPq pela bolsa de iniciação científica, modalidade Jovens Talentos, concedida à primeira autora.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADNEY, W. E. & BECKER, H. G. (1919). The determination of the rate of solution of atmospheric nitrogen and oxygen by water. Part I. Philosophical Magazine, s. 6, v. 38, n. 225. p. 317-337, September.
2. ASCE (1992). ASCE Standard - Measurement of oxygen transfer in clear water. ANSI-ASCE 2-91, 2ª Edição.
3. EPA, United States Environmental Protection Agency (1985). Rates, constants and kinetics formulations in surface water quality modeling. 2ª ed. Athens, 455p.
4. FAZOLO, A. (2003). Determinação de parâmetros cinéticos e de transferência de massa em reator radial aeróbio-anóxico alimentado com esgoto sanitário tratado em reator anaeróbio. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
5. USGS (2014). United States Geological Survey (Serviço Geológico dos Estados Unidos). Disponível em: <<http://water.usgs.gov/software/DOTABLES/>>
6. VON SPERLING, M. (2009). Princípios de tratamento biológico de águas residuárias. Volume 1, 3ª ed., DESA, UFMG. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.
7. WEISS, R.F. (1970). The solubility of nitrogen, oxygen, and argon in water and seawater: Deep Sea Research, v. 17, no. 4, p. 721-735.
8. ZAIAT, M. (1996). Desenvolvimento de reator anaeróbio horizontal de leito fixo para tratamento de águas residuárias. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.