



Construção e Avaliação de um Aerador Feito com Material de Baixo Custo

Cláudio V. F. dos Santos, Christyne B. de Sá, Warley L. Antunes, Felipe B. V. de Freitas,
Orlandemberg P. Silva e Hans S. Santos

Resumo – Este artigo refere-se à construção de uma bancada de testes para avaliar a eficiência de um aerador feito com material de baixo custo. Para a obtenção dos resultados foi feita desaeração da água utilizando bissulfito de sódio como reagente e cloreto de cobalto hexahidratado como catalisador e posterior reaeração monitorada por um oxímetro. Os testes foram realizados para três vazões diferentes, vazão máxima, média e mínima, com o objetivo de verificar a influência da vazão volumétrica na taxa de aeração. Os resultados mostraram que a vazão e a aeração são diretamente proporcionais, isto significa que a vazão máxima foi a que obteve maior eficiência na aeração frente as vazões menores. Os testes de aeração mostraram que o aerador feito com material de baixo custo conseguiu oxigenar a água de 0 até 4 mg L⁻¹ em menos de 1 hora quando usado na vazão de 0,27 m³ h⁻¹, portanto, ele foi eficiente na transferência de oxigênio.

Palavras-chave: aeração, aerador, oxigênio dissolvido.

Construction and evaluation of an aerator made with low cost material

Abstract – This paper concerns the construction of a bench of tests to evaluate the efficiency of a low-cost aerator. In order to get the results the water was deaerated using sodium bisulfite as reagent and cobalt chloride hexahydrate as catalyst and subsequent reaeration monitored by an oximeter. The tests were carried out for three different flows: maximum, medium and minimum flow, in order to verify the influence of volumetric flow on the aeration rate. The results showed that the flow rate and the aeration are directly proportional, that is, the maximum flow rate that obtained the highest aeration efficiency as opposed to the minimum flow rates. The aeration tests showed that the aerator made with low cost material was able to oxygenate water from 0 to 4 mg L⁻¹ in less than 1 hour when used at the flow rate of 0.27 m³ h⁻¹, so it was efficient in oxygen transfer.

Keywords: aeration, aerator, dissolved oxygen.

I. INTRODUÇÃO

A aeração é uma operação unitária muito importante para um grande número de aplicações, destacando processos aeróbios de tratamento de efluentes e criatórios de peixes [1]. O aerador tem a finalidade de realizar transferência de oxigênio para água. Na primeira aplicação, os aeradores artificiais são importantes para fornecer oxigênio à água e, com isso, promover a oxidação da matéria orgânica devido à ação de microrganismos aeróbios, enquanto na segunda aplicação, a importância está no aumento da produtividade na piscicultura [2].

Segundo Kumar *et al.* (2013) [3], a demanda de oxigênio depende do tamanho da cultura. Caso esta seja muito intensa, a aeração natural não é capaz de atender as necessidades dos seres que vivem naquele ambiente, fazendo com que a aeração artificial se torne essencial.

Essa técnica de aeração ou reaeração trata-se de uma técnica básica, a qual realiza um processo para dissolver oxigênio de maneira forçada através da utilização de aeradores, visto que o oxigênio dissolvido na água é primordial para que haja vida no corpo hídrico [4].

Brandão (2015) [5] relata a construção de um aerador feito com material de baixo custo, construído com materiais comumente utilizados na construção civil e que não necessita de equipamentos específicos como difusores, compressores ou bombas, o que o difere dos encontrados no mercado uma vez que não faz uso de energia elétrica. Entretanto o aerador precisa ter um desvio mínimo de cinco metros em relação à fonte de água para funcionar, aproveitando assim a energia gravitacional para fornecer a energia necessária para o deslocamento da água.

O presente trabalho teve como base o aerador supracitado apresentando poucas alterações no sistema, como a implementação de uma bomba que terá o papel de simular esta queda d'água, uma vez que ficaria inviável implementar este desnível no laboratório de engenharia. Esta mudança apresenta a vantagem de poder reproduzir as características do sistema de aeração em um laboratório e, com isso, poder analisar a taxa de transferência de oxigênio com critérios de engenharia

em um espaço reduzido e também ser aplicado a outros campos que não dispõem de queda d'água.

Este trabalho está organizado na seguinte maneira. A seção II apresenta as teorias envolvidas: oxigênio dissolvido, concentração de saturação de oxigênio, assim como os fatores que afetam a concentração; a seção III descreve os princípios de aeração, transferência de oxigênio, sistemas de aeração, coeficientes de aeração, tipos de aeradores e aplicações dos aeradores; a seção IV apresenta as formas de medição de OD, método químico de sequestro de oxigênio e teste de aeração; a seção V descreve a metodologia; a seção VI apresenta o processamento e interpretação dos dados; na seção VII são sumarizadas as principais conclusões e, por fim, são apresentadas as bibliografias consultadas.

II. OXIGÊNIO DISSOLVIDO

O oxigênio dissolvido (OD) é um parâmetro vital na qualidade e no tratamento de águas residuais, portanto a quantidade de OD nos corpos hídricos é um indicador primário da qualidade da água [6]. A concentração de OD na água é medida usualmente em mg L⁻¹ ou ppm (parte por milhão) [7].

O oxigênio é o agente oxidante mais importante em águas naturais, sendo um gás pouco solúvel em água e a sua solubilidade depende da pressão (altitude), temperatura e sais dissolvidos. Normalmente a concentração de saturação está em torno de 8 mg L⁻¹ a 25 °C, entretanto, ela pode ser alterada pelas condições físico-químicas do corpo d'água, como temperatura, salinidade e solubilidade [8].

A. Concentração de Saturação de Oxigênio

A solubilização consiste na capacidade de uma substância se dissolver em outra por meio da interação entre as moléculas dos dois compostos. Um dos compostos é chamado de soluto, enquanto o outro é o solvente. O soluto é o composto que se deseja solubilizar e que está em menor quantidade no meio, enquanto o solvente é a substância que dissolve e está em maior quantidade. Dessa forma, a solubilização consiste na dissolução de um soluto em um solvente, respeitando as condições de equilíbrio [9].

Diz-se que a água está em equilíbrio, ou em saturação com oxigênio dissolvido quando a pressão de oxigênio na água é igual à pressão de oxigênio na atmosfera [10].

De acordo com Schmidell (2001) [11], quando se trata de uma solução bastante diluída, a Lei de Henry pode ser aplicada, segundo a qual a concentração de oxigênio dissolvido no equilíbrio (saturação) é proporcional à pressão parcial de oxigênio no gás, segundo Eq. 1.

$$C_s = H \cdot p_{O_2} \quad (1)$$

Onde:

C_s = Concentração de oxigênio na saturação (g O₂ m⁻³)

H = Constante de Henry (g O₂ m⁻³ atm⁻¹)

p_{O_2} = Pressão parcial de O₂ na fase gasosa (atm)

A pressão parcial de oxigênio na fase gasosa pode ser calculada pela Eq. 2.

$$p_{O_2} = x_{O_2} \cdot P \quad (2)$$

Onde:

x_{O_2} = Fração molar ou volumétrica de O₂ no gás

P = Pressão total do gás (atm)

Dessa forma, a constante de Henry varia com a variação da composição química de um dado líquido e, conseqüentemente, há variação na concentração de saturação para um dado valor da pressão parcial do oxigênio no gás [11].

Tabela 1. Valores da constante de Henry a diferentes temperaturas (SCHMIDELL, 2001) [11].

Temperatura (°C)	Cte. Henry (mg L ⁻¹ atm ⁻¹)
20	43,9
25	38,8
35	33,4

B. Fatores que Afetam a Concentração de Saturação de Oxigênio

Influência da Temperatura

Um dos fatores que afetam a concentração de saturação de OD em água é a temperatura. Foi visto que a constante de Henry é inversamente proporcional à temperatura, ou seja, com o aumento da temperatura há uma diminuição na constante (tabela 1). Isto provoca uma redução na concentração de saturação, à pressão constante, como pode ser visto na Eq. 1. Observa-se, portanto, que quanto maior a temperatura, menor a solubilidade do gás no meio líquido. A maior agitação das moléculas de água faz com que os gases tendam a passar para a fase [2].

Influência da Solubilidade

A altitude influencia na solubilidade de um gás, por ser inversamente proporcional à pressão atmosférica. Quanto maior a altitude, menor a pressão atmosférica e, conseqüentemente menor a pressão exercida pelo gás no líquido para que haja solubilização [2]. O cálculo da influência pode ser feito pela Eq. 3.

$$f_H = \frac{C_s'}{C_s} = \left(1 - \frac{h}{9450}\right) \quad (3)$$

Onde:

f_H = Fator de correção da concentração de saturação de OD pela altitude

C_s' = Concentração de saturação na altitude H (mg L⁻¹)

C_s = Concentração de saturação a uma dada temperatura (mg L⁻¹)

h = Altitude (m)

Influência da Salinidade

A salinidade também é um fator que afeta a solubilidade do oxigênio [2]. A fórmula empírica, descrita pela Eq.4, expressa a influência de sais dissolvidos no meio.

$$\gamma = 1 - 9 \times 10^{-6} \cdot C_{sal} \quad (4)$$

Onde:

γ = fator de redução na solubilidade (= 1 para água pura)

C_{sal} = concentração de sais dissolvidos (mg Cl⁻ L⁻¹)

A concentração de saturação com sais dissolvidos corresponde ao produto entre a concentração de saturação de OD na água limpa com o fator de redução na solubilidade conforme Eq. 5.

$$C_s^* = C_s \cdot \gamma \quad (5)$$

III. PRINCÍPIOS DE AERAÇÃO

Von Sperling (1997) [2], afirma que “desde que um líquido esteja deficiente de um gás, há a tendência natural do gás passar da fase gasosa, onde se encontra em quantidade satisfatória, para a fase líquida, onde está deficiente”. Quando a concentração de solubilidade, ou seja, a concentração de saturação da fase líquida, é atingida, os fluxos de entrada e saída de oxigênio do meio líquido apresentam magnitudes iguais, de modo que não ocorre mudança global na concentração do gás em ambas as fases. Portanto no equilíbrio, o sistema não cessa a troca gasosa entre a atmosfera e o líquido, mas tem as velocidades de absorção e de liberação iguais. As situações estão representadas na figura 1.

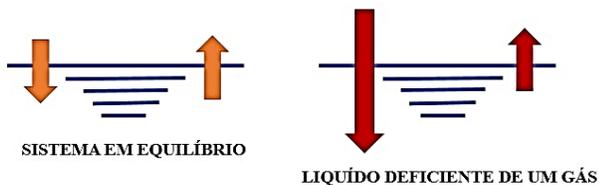


Fig. 1. Trocas gasosas em um sistema em equilíbrio e em um líquido com deficiência do gás dissolvido (Modificado de VON SPERLING, 1997) [2].

A aeração ocorre pelos mecanismos de transporte de maneira natural devido ao movimento do corpo hídrico. Todavia o processo natural apresenta baixa eficiência. A área de troca deve ser significativamente grande devido a quantidade e concentração dos efluentes, o que é incompatível com a área superficial dos corpos hídricos. Então para aumentar a área de transporte de oxigênio dissolvido e, com isso, melhorar a eficiência de aeração, criou-se a aeração forçada ou artificial. O aumento da área de troca se dá pelo aumento da quantidade de bolhas no meio líquido [4].

A. Transferência de Oxigênio

Na transferência de massa de maneira geral, o transporte das espécies químicas pode ser feito por dois mecanismos: difusão e/ou convecção. A difusão é a transferência de massa devido ao gradiente de concentração, enquanto a convecção é a transferência de massa entre uma superfície e um fluido em movimento. Portanto é preciso que o líquido seja suficientemente agitado para que ocorra o transporte convectivo. O movimento do fluido aumenta consideravelmente a transferência de massa removendo o fluido com alta concentração de perto da superfície e

substituindo-o pelo fluido mais afastado e com menor concentração [12].

Segundo Schmidell (2001) [11], o principal objetivo de um sistema de aeração é o fornecimento de oxigênio para um meio. Desta forma, o que se visa é transferir oxigênio da fase gasosa para a fase líquida. Esta transferência de oxigênio (ou simplesmente, de massa) é feita da bolha de ar para a água, passando por algumas resistências à transferência de massa como demonstrada na figura 2.

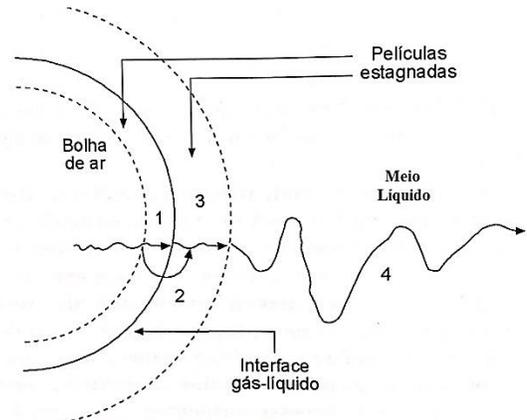


Fig. 2. Resistências associadas à dissolução do oxigênio na água (Modificado de SCHMIDELL, 2001) [11].

Ainda de acordo com Schmidell (2001) [11], estas resistências estão associadas aos seguintes mecanismos de transferência de massa:

1. Difusão pela película estagnada da fase gasosa;
2. Difusão pela interface gás-líquido;
3. Difusão pela película estagnada da fase líquida;
4. Difusão/Convecção (caso seja agitado) através do líquido.

No caso da transferência de oxigênio da bolha para o líquido, pode-se imaginar uma primeira resistência (1) devido a uma película gasosa estagnada, através da qual o oxigênio deve difundir. A seguir, pode-se imaginar uma resistência na interface gás-líquido (2), a resistência associada à película líquida estagnada ao redor da bolha de gás (3) e a resistência associada ao transporte difusivo e convectivo do oxigênio através do meio líquido (4). Se não houver agitação suficiente considera-se apenas a difusão de massa e, caso o líquido da resistência 3 seja igual ao da resistência 4, pode-se considerar apenas uma resistência [11].

B. Sistemas de Aeração

Aeração por ar difuso

A aeração por ar difuso (figura 3) consiste na introdução de ar ou oxigênio no líquido. O sistema de aeração por ar difuso é composto por difusores submersos no líquido, tubulações de transporte de ar, sopradores, tubulações distribuidoras de ar e outras unidades por onde o ar passa. A transferência de oxigênio ocorre à medida que a bolha produzida se eleva à superfície [2].

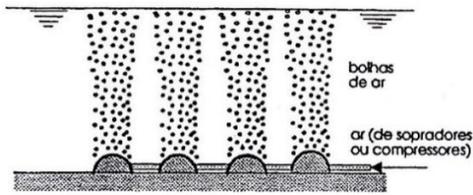


Fig. 3. Representação esquemática do sistema de aeração por ar difuso (VON SPERLING, 1997) [2].

Ainda de acordo com Von Sperling (1997) [2], quanto menor o tamanho da bolha de ar, maior a área superficial disponível para a transferência de gases, ou seja, maior a eficiência de oxigenação.

Aeração mecânica

A aeração mecânica (figura 4) consiste na exposição do líquido ao ar devido ao turbilhonamento causado pelo sistema de aeração e, com isso, ocasionar a entrada do ar atmosférico ao líquido. Na aeração mecânica a transferência do oxigênio da fase gasosa para a fase líquida ocorre predominantemente por difusão turbulenta [2]. De acordo com Corrêa (2006) [4], a intensa agitação devido ao deslocamento do fluido aumenta ainda mais a eficiência da aeração do líquido em questão.

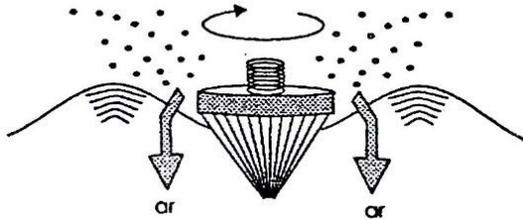


Fig. 4. Representação esquemática do sistema de aeração mecânica (VON SPERLING, 1997) [2].

C. Coeficientes de Aeração

Segundo Neto (2013) [13], em um sistema de aeração é importante determinar a taxa de transferência de massa das bolhas para a água, que pode ser estimada de acordo com a Eq. 6, derivada da lei de Fick:

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C) \quad (6)$$

Onde:

dC/dt = taxa de mudança da concentração de oxigênio ($\text{g m}^{-3} \text{s}^{-1}$)

C = concentração de OD na água em um tempo t qualquer (g m^{-3})

C_s = concentração de saturação de oxigênio na água (g m^{-3})

$K_L a$ = coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio (s^{-1})

Observa-se pela Eq. 6 que quanto menor a concentração de oxigênio, C , ou quanto maior o déficit de oxigênio ($C_s - C$), maior a taxa de transferência de oxigênio (dC/dt) [2].

A integração da Eq. 6 leva a Eq. 7:

$$\ln \left(\frac{C_s - C}{C_s - C_0} \right) = -K_L a (t - t_0) \quad (7)$$

Onde:

C_0 = concentração inicial de OD na água (g m^{-3})

Ou ainda a Eq. 8:

$$C = C_s - (C_s - C_0) \cdot e^{-K_L a (t - t_0)} \quad (8)$$

Para água limpa, em que não há consumo de oxigênio durante a aeração, a concentração C varia de acordo com a Eq. 8. Logo, a concentração tende assintoticamente até a concentração de saturação, C_s , como pode ser visto na figura 5 [2].

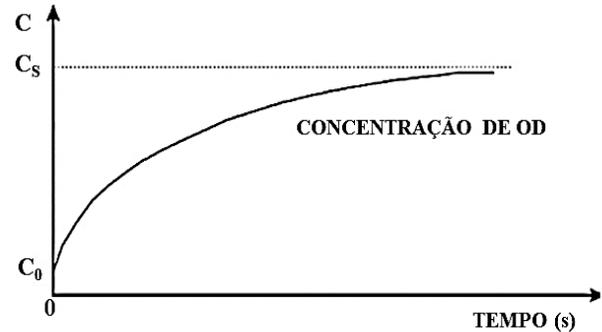


Fig. 5. Progressão temporal da concentração de OD durante a aeração (VON SPERLING, 1997) [2].

A Eq. 7 fornece um gráfico de aspecto linear, no qual a curva mono-log do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio, $K_L a$, corresponde ao coeficiente angular da reta, sendo este, portanto, um parâmetro determinado empiricamente a partir dos dados obtidos na medição de oxigênio da água nos testes de aeração artificial [2].

Esse parâmetro é uma medida da velocidade com que o sistema de aeração transfere oxigênio para a água e serve como referência para a eficiência do processo de aeração [4].

D. Tipos de Aeradores

Aeradores mecânicos

Considera-se um aerador mecânico completo se o mesmo apresentar oxigenação e mistura eficientes, visto que assim se reduz custos. Os aeradores mecânicos apresentam capacidade de succionar o efluente do fundo do tanque, proporcionando o contato do efluente com o oxigênio da atmosfera, o que é suficiente para o efluente absorver oxigênio para alimentar os microrganismos contidos nele, os quais necessitam do oxigênio para sua sobrevivência [14].

Aeradores por ar difuso

De acordo Aquino (2016) [14], o aerador por ar difuso é o mais utilizado pela indústria mundial. Este tipo de aerador apresenta como vantagens:

- Menor consumo de energia elétrica;
- Flexibilidade, visto que sua instalação e manutenção podem ocorrer sem a necessidade de esvaziamento do tanque ou lagoa;
- Melhor decantação do efluente, no qual a mistura ocorre de forma mais suave e não quebra os flocos (como ocorre no

processo mecânico, devido à movimentação), facilitando o processo de decantação;

- Maior transferência de oxigênio, dado que com a sua instalação no fundo do tanque ou lagoa ocorre maior tempo de contato entre o oxigênio e a biomassa;
- Melhor mistura, devido à instalação ocorrer de forma homogênea no fundo da lagoa ou tanque, a mistura se torna mais eficiente evitando a sedimentação de sólidos suspensos;
- Não produzir aerossóis, devido a sua operação no fundo do tanque ou lagoa, impossibilitando o arraste de material fecal e de bactérias no ar, como tende a acontecer com aeradores mecânicos;
- Baixa poluição sonora, visto que apresenta baixo ruído gerado pelos sopradores, instalados em cabines ou câmaras específicas.

Uma outra vantagem é que para uma empresa que trabalha com processo de lodo ativado, este tipo de aerador gera uma alta eficiência na remoção de DBO (demanda bioquímica de oxigênio) e SST (sólidos suspensos totais), podendo apresentar um efluente final para reúso, que poderia ser utilizado para fins de irrigação, lavagem de ruas e até mesmo no processo fabril, dependendo da sua qualidade [14].

Aerador efeito Venturi

Segundo Piccin (2010) [15], o método de sistemas de auto aspiração de ar, o qual se baseia nos princípios do tubo de Venturi, é utilizado para promover a oxigenação da água onde se utiliza o ejetor como equipamento para misturar o oxigênio do ar com a água. Esses ejetores conseguem transformar a energia de pressão do fluido primário em energia de velocidade que induzirá a formação de vácuo na seção de contração do Venturi, promovendo a sucção do ar atmosférico através de um vaso paralelo ao escoamento. Com isso, nesse tipo de aeração a oxigenação da água é produzida tanto pelos processos de ar dissolvido quanto de ar disperso, não apresentando limitações da quantidade de ar que tem a possibilidade de ser adicionada sem a necessidade do uso de compressores de ar. Sendo assim, tem-se uma ótima eficiência com baixo investimento, além de reduzir o consumo energético.

De acordo com Schneider (2000) [16], um medidor do tipo Venturi apresenta melhor desempenho quando comparado com seus similares na função de obstrução.

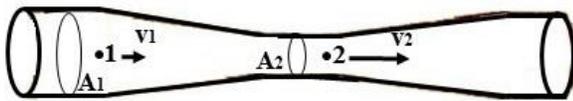


Fig. 6. Representação do efeito Venturi (Modificado de STRIEDER; SCHUCH, 2005) [17].

Cavalcanti *et al.* (2010) [18] descrevem o princípio de funcionamento de um bocal tipo Venturi se baseando na medição de vazão por pressão diferencial, tendo como base duas equações: equação da continuidade e equação de Bernoulli.

A equação da continuidade é aplicada a líquidos incompressíveis, os quais fluem em um tipo de escoamento completamente desenvolvido, o qual se tem uma diminuição

de sua área, o que provoca um aumento na velocidade do fluido mantendo a vazão volumétrica constante. A equação da continuidade é dada por:

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (9)$$

Sendo:

Q = Vazão volumétrica ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

V = Velocidade média do escoamento (m s^{-1})

A = Área de seção transversal (m^2)

A velocidade média ao variar provoca uma mudança na pressão local do fluido, a qual pode ser avaliada através da equação de Bernoulli:

$$\frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 - h_L \quad (10)$$

Onde:

p = Pressão do fluido (Pa)

γ = Peso específico (N m^{-3})

V = Velocidade média do fluido no ponto (m s^{-1})

g = Aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m s}^{-2}$)

z = Altura da coluna de líquido (m)

h_L = Perda de carga (m)

Sendo assim, se as pressões existentes em dois pontos específicos do Venturi são conhecidas, consegue-se determinar a velocidade média do fluido nesses pontos, chegando ao valor da vazão existente na tubulação de forma indireta.

E. Aplicações dos Aeradores

Aquicultura

O oxigênio presente na água provém da atmosfera e dos vegetais que se encontram submersos e liberam o oxigênio através da fotossíntese. Este oxigênio é consumido pelos animais (como os peixes), pelos vegetais (algas e plantas) e também pelo processo de decomposição da matéria orgânica [19].

Devido a esse consumo de oxigênio a concentração do gás diminui, arriscando a vida dos animais. Assim, o processo de aeração proporciona segurança na criação impedindo a ocorrência de déficit de oxigênio que causa a mortalidade dos peixes [20].

Tratamento de efluentes

Sabe-se que a aeração é uma operação fundamental para processos aeróbicos no tratamento de efluentes, visto que quando um líquido está deficiente de um gás (oxigênio nesse caso), há uma tendência natural do gás passar da fase gasosa onde se encontra em condição satisfatória para a fase líquida deficiente.

Como o oxigênio é um gás que se dissolve mal em meio líquido, é necessário em vários sistemas a aceleração do processo de oxigenação para que a taxa de oxigênio naquele meio se dê de forma elevada de modo a ficar equivalente com a taxa de consumo pelas bactérias [2].

Desestratificação de lagos e tanques

Em fundos de tanques e lagos é muito comum se concentrar restos de matéria orgânica como galhos e folhas, restos de fezes dos peixes, ração, entre outros. Sabe-se que a decomposição ocorre na ausência de oxigênio e em meio ácido, nos quais ocorrem a produção de amônia e outros gases tóxicos como o gás sulfídrico (H₂S), por exemplo, que se acumulam no fundo do tanque. Esse lodo que se forma no fundo do tanque se torna inabitável para os organismos aeróbios que ali vivem [21].

Nesse caso, é importante o uso de aeradores que além de atuarem como oxigenadores, desempenham um papel importante na desestratificação dos ambientes aquáticos e, também, na melhora do aspecto da água [22].

Fermentação alcoólica

A fermentação é a principal etapa responsável pela conversão do substrato açucarado em etanol e em outros compostos almeçados.

É importante que alguns fatores desta etapa sejam controlados, tais como: aeração (agitação), pH, temperatura, nutrientes, contaminação bacteriana, e a concentração de etanol no meio, visto que estes interferem diretamente na fermentação alcoólica.

Esses fatores atuam no rendimento fermentativo e produtivo acarretando perdas durante o processamento. É necessário que a aeração e agitação sejam realizadas no início da fermentação para que haja uma melhor multiplicação das leveduras. Em contrapartida, estas duas atividades devem ser evitadas durante o processo, visto que a presença de oxigênio pode favorecer a formação de ácido acético [23].

IV. FORMAS DE MEDIÇÃO DE OD

Segundo Piveli (2010) [24], os dois principais métodos para a determinação da concentração de oxigênio dissolvido em águas são: o método eletrométrico (ou eletroquímico) e o método químico.

No método eletrométrico, empregam-se aparelhos chamados de oxímetros ou medidores de OD, em que a sonda do eletrodo possui uma membrana que adsorve seletivamente o oxigênio, tendo por base o seu raio de difusão molecular.

O método químico consiste em uma série de reações de oxirredução utilizando reagentes químicos específicos.

A. Método Químico de Sequestro de Oxigênio

Segundo Almeida (2014) [25], sequestrantes de oxigênio são substâncias químicas capazes de remover o oxigênio dissolvido presente em água por meio de reações químicas. Este processo é conhecido como desaeração química.

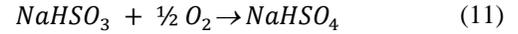
Estas reações são de oxirredução, portanto uma espécie química é oxidada enquanto a outra é reduzida. A substância que sofre oxidação, ou seja, que fornece elétrons, fazendo assim com que outra substância seja reduzida, é chamada de agente redutor [26].

Os sequestrantes químicos de oxigênio normalmente utilizados são: sulfito de sódio, bissulfito de sódio e hidrazina [25]. Neste trabalho o sequestrante utilizado foi o bissulfito de sódio devido ao acesso restrito à hidrazina, e também por levar

vantagem frente ao sulfito, pois o bissulfito não reage com o oxigênio atmosférico quando em solução concentrada [27].

Bissulfito de Sódio

Segundo Silva (2009) [27], o bissulfito de sódio, de fórmula molecular NaHSO₃, é um dos sequestrantes de oxigênio mais empregados na desaeração química. Este reagente é normalmente fornecido sob a forma de solução aquosa 35%, que reage com o oxigênio dissolvido formando bissulfato de sódio, segundo reação química abaixo:



B. Testes de Aeração

Von Sperling (1997) [2] cita que existem 2 tipos de testes de aeração, os quais podem ser avaliados por dois métodos: teste nas condições de operação (método estacionário e não estacionário) e teste com água limpa (método estacionário e não estacionário). O mesmo autor descreve o método estacionário como aquele em que todas as condições no reator estão fixas ou quase fixas, visto que não varia suas condições durante o período do teste. Nesse caso, tem-se um consumo de oxigênio igual à sua produção. Com isso, consegue-se estimar a capacidade de aeração a partir da determinação da taxa de consumo de oxigênio pela biomassa. Já o método não estacionário ou método de reaeração é baseado no religamento dos aeradores, com o intuito de aumentar a concentração de oxigênio dissolvido no meio. Para essa situação, tem-se a taxa de transferência de oxigênio associada à taxa medida de aumento da concentração de oxigênio dissolvido.

Neste trabalho foi utilizado o método com água limpa em estado não estacionário, o qual se toma como base um tanque vazio e enchido com água limpa. Ocorre a remoção do oxigênio dissolvido no reator utilizando bissulfito de sódio e mantendo-se os aeradores desligados. Com isso, calcula-se a capacidade de aeração tomando como base a taxa de acréscimo da concentração de OD após o religamento dos aeradores.

V. METODOLOGIA

Com o objetivo de avaliar a aeração à diferentes vazões volumétricas foi construído um sistema de aeração com materiais de baixo custo. Os testes de aeração foram realizados com o sistema de aeração construído que está disposto no Laboratório de Engenharia da Faculdade Salesiana Maria Auxiliadora.

A. Montagem do Aparato Experimental

O procedimento foi realizado em etapas e durou vários dias. A primeira etapa consistiu na realização do projeto da bancada de testes. Nesta etapa foi feito um estudo para verificar os materiais a serem comprados e como estes seriam montados. A segunda etapa consistiu na compra dos materiais necessários para montagem do aparato experimental. Após a aquisição de todos os materiais necessários, deu-se início a terceira etapa, a montagem do aerador e da bancada.

Montagem do aerador

Os materiais necessários para a montagem do aerador estão listados a seguir.

- 10 cm Tubo PVC 3/4 de polegada
- 10 cm Tubo PVC 1/2 de polegada
- 20 cm Tubo PVC 3/4 de polegada
- 1 Tampão 1/2 polegada com um furo no centro de 5mm
- 1 Conexão “T” PVC 3/4 de polegada
- 1 Tubo de cola para PVC

Após a aquisição dos materiais iniciou-se a montagem do aerador.

Procedimento para montagem do aerador

1. Encaixar tampão com furo de 5 mm no interior do “T”;
2. Encaixar 10 cm de tubo 1/2 polegada no tampão (entrada de água);
3. Encaixar 10 cm de tubo 3/4 polegada na outra extremidade (saída de água);
4. Encaixar 20 cm de tubo 3/4 polegada na parte superior do T (entrada de ar);
5. Usar cola de PVC na junção dos tubos.



Fig. 7. Areador montado.

Ao término da montagem do aerador adicionou-se um joelho de 90° na saída da mistura ar-água com o objetivo de direcionar a corrente para o fundo da caixa d’água.

Montagem da bancada de testes

Os materiais necessários para a montagem da bancada de testes estão listados a seguir.

- 1 Caixa d’água de 150 L
- 1 Bomba centrífuga
- 1 Hidrômetro – Modelo S120-VI – Marca Elster
- 1 Registro de gaveta
- 4 metros de Tubo de PVC 3/4"
- 2 Adaptadores para caixa d’água com válvula esfera
- 1 Tubo de cola para PVC
- 1 Joelho de 90°
- Curvas 90°
- Luvas de redução de PVC
- Uniões de PVC

O processo de montagem da bancada de testes pode ser visto na figura 8.



Fig. 8. Etapas da montagem da bancada de testes. I. Separação dos materiais para início da montagem, II. Acoplamento e fixação da bomba à tubulação, III. Bancada de testes semi-pronta, IV. Bancada de testes pronta.

A bancada de testes apresenta como principais componentes o aerador, por onde o ar se mistura com a água por diferença de pressão; a bomba centrífuga, componente responsável por succionar a água e descarregá-la com maior energia; o hidrômetro, instrumento que mede o volume de fluido que passa por ele; o registro de gaveta, acessório responsável pela regulação da vazão volumétrica; e as válvulas, que tem como função interromper ou liberar o fluxo de fluido no sistema. Os principais componentes podem ser vistos na figura 9.

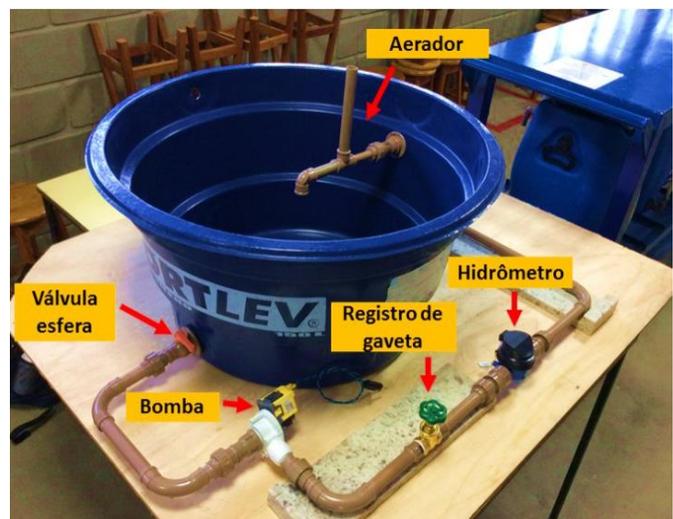


Fig. 9. Bancada de testes finalizada com acessórios em destaque.

Uma ilustração do sistema de aeração com todos os acessórios identificados pode ser vista na figura 10.

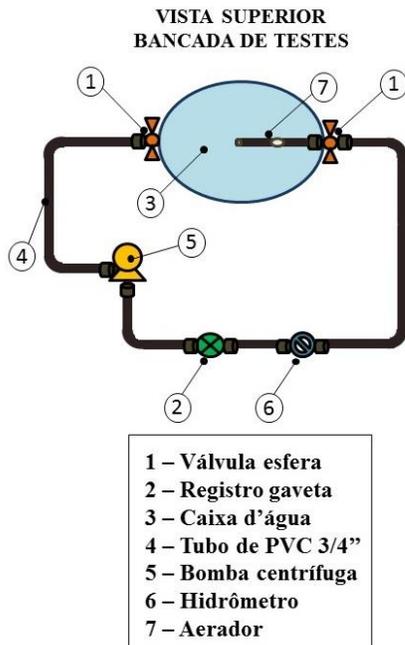


Fig. 10. Esquema do aparato experimental.

A figura 10 mostra a interligação do sistema de aeração. Para iniciar os testes deve-se abrir totalmente as válvulas esfera (1) e registro gaveta (2) e, então, a água contida na caixa d'água (3) irá recircular pela tubulação (4), passando pela bomba e ganhando energia (5) e, em seguida, pelo hidrômetro (6) fazendo com que este registre o volume de água que passa pela tubulação. Ao fim do ciclo, o aerador (7) irá acionar e transferir oxigênio para a água.

As especificações técnicas básicas da bomba e do hidrômetro que compõem a bancada de testes são apresentadas nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Especificação técnica da bomba d'água.

Especificação Técnica	
Tipo	Centrífuga
Marca	Emicol
Tensão	127 V
Potência	34 W
Frequência	60 Hz
Vazão	10 L min ⁻¹

Tabela 3. Especificação técnica do hidrômetro.

Especificação Técnica	
Marca	Elster
Q _{mín}	30 L h ⁻¹
P _N	10 bar
T _{máx}	40 °C
Q _N	1,5 m ³ h ⁻¹

B. O Teste de Aeração

Para a realização do teste de aeração da água seguiu-se os seguintes procedimentos: preparação da solução de bissulfito de sódio, desaeração química da água e, por fim, aeração da água pelo acionamento do sistema de aeração. Em sequência foi realizada a medição da concentração de OD na água em função do tempo, utilizando o oxímetro eletrométrico modelo AK87 da marca AKSO.



Fig. 11. Oxímetro - modelo AK87 (AKSO, 2016) [28].

O reagente, o catalisador e as vidrarias necessárias para o teste foram adquiridos no laboratório de Química da Faculdade Salesiana Maria Auxiliadora.

No laboratório foram preparados e pesados em balança saquinhos de bissulfito (amostras) contendo 35 gramas cada e, em cada saquinho, adicionaram-se 0,05 gramas de cloreto de cobalto (catalisador). Para preparo da solução aquosa de bissulfito, solubilizaram-se 2 amostras de bissulfito de sódio (NaHSO₃) e cloreto de cobalto hexahidratado (CoCl₂.6H₂O), o equivalente a 70 g do reagente e 0,1 g do catalisador, em um béquer de 500 mL com água. Em seguida agitou-se com bastão de vidro e verteu-se a solução para um balão volumétrico de 2 L, que teve seu volume completado até a marcação. Foram realizados 3 testes de aeração, a vazões diferentes. Na tabela 4 seguem os recursos utilizados para cada teste.

Tabela 4. Características dos ensaios realizados durante a etapa experimental.

Teste	Volume de solução (L)	Número de amostras	Massa de NaHSO ₃ (g)	Massa de CoCl ₂ .6H ₂ O (g)
1	14	14	490	0,7
2	10	10	350	0,5
3	10	10	350	0,5

Com a solução de bissulfito de sódio preparada pôde-se dar início ao processo de desaeração da água, ou seja, processo no qual há redução da concentração de oxigênio dissolvido na água até valores próximos de 0 mg L⁻¹.

A desaeração foi monitorada pelo oxímetro acoplado ao tanque e assim pôde-se observar a redução da concentração de OD na água pelo instrumento.

Após a desaeração da água, a bomba foi ligada provocando o acionamento do aerador e todas as válvulas foram abertas

para que houvesse circulação de água, dando início ao processo de aeração.

Com o aerador em operação (figura 12), o cronômetro foi acionado iniciando o processo de coleta de dados de concentração de OD pelo tempo estabelecido. Ficou estabelecido um intervalo de 2 minutos entre as marcações. A vazão máxima foi estabelecida com a abertura total do registro, a média com uma abertura parcial e a mínima com uma pequena abertura.



Fig. 12. Aerador em operação.

Além dos testes de aeração artificial (descritos anteriormente), foi feito um teste de aeração natural para verificar a influência deste tipo de aeração na aeração artificial. Este processo teve um tempo de duração de 2 horas e o oxímetro registrou um aumento de $0,1 \text{ mg L}^{-1}$, comprovando que a aeração natural é mais lenta que a artificial.

VI. PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Os dados de concentração de OD e tempo obtidos com os testes de aeração foram coletados e adicionados a uma planilha no software *Microsoft Excel™*, onde foram dispostos em quadros para obtenção das curvas de aeração. O objetivo de obtenção das curvas é verificar a taxa de aeração e observar a influência da variação de vazão na aeração.

Após analisar os dados de concentração de OD em função do tempo obtidos nos testes de aeração, pôde-se construir o gráfico de aeração em função do tempo para vazão máxima, média e mínima.

O gráfico 1 representa a progressão temporal da concentração de OD para as três vazões: máxima, média e mínima.

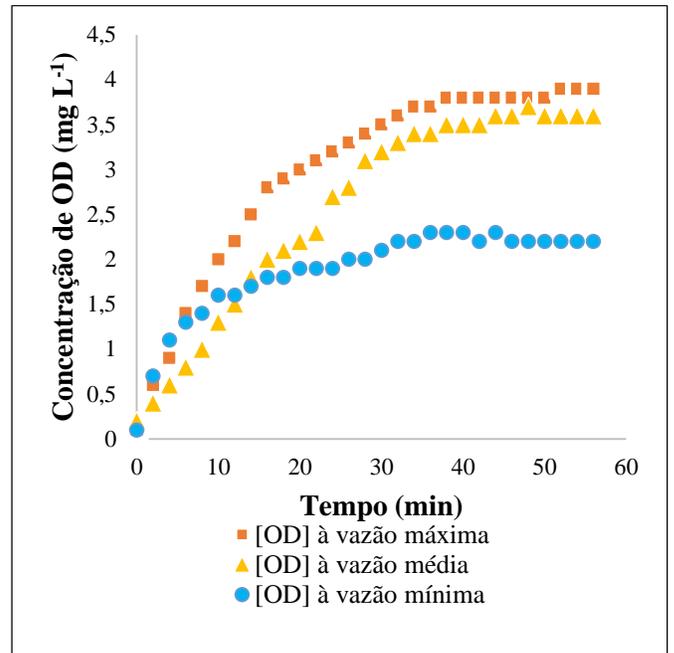


Gráfico 1. Progressão temporal da [OD] para as três vazões durante a aeração.

Através do ajuste das curvas do gráfico 1, pôde-se obter as equações modelo de aeração correspondente a cada vazão. As equações 12, 13 e 14 representam a vazão máxima, média e mínima, respectivamente.

$$C(t) = 3,90 - 3,80 e^{-0,07t} \quad (12)$$

$$C(t) = 3,60 - 3,40 e^{-0,05t} \quad (13)$$

$$C(t) = 2,20 - 2,10 e^{-0,11t} \quad (14)$$

Após a obtenção das curvas ajustadas nas três vazões: máxima, média e mínima, que correspondem a $0,27$, $0,25$ e $0,22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, respectivamente, pôde-se obter o valor do coeficiente de correlação, R^2 , para cada uma das curvas obtendo os valores $0,9956$, $0,9469$ e $0,9625$, que representam respectivamente as vazões máxima, média e mínima.

Uma síntese dos valores verificados nos testes de aeração é apresentada na tabela 5.

Tabela 5. Dados obtidos após testes de aeração.

	C (mg L^{-1})	C_0 (mg L^{-1})	C_s (mg L^{-1})	t_s (min)	T ($^{\circ}\text{C}$)
Qmáx.	5,4	0,1	3,9	52	29
Qméd.	5,1	0,2	3,6	52	26
Qmín.	6,3	0,1	2,2	46	29

Onde:

C = concentração de OD na água antes da desaeração

C_0 = concentração de OD após desaeração

C_s = concentração de saturação de oxigênio na água obtida experimentalmente

t_s = tempo de saturação

T = temperatura da água

A partir do gráfico de progressão temporal da concentração de oxigênio dissolvido pôde-se calcular a taxa média, \bar{T} , de aeração para as três vazões, conforme Eq. (15).

$$\bar{T} = \frac{\Delta C}{\Delta t} = \frac{C_s - C_0}{t_s} \quad (15)$$

As concentrações finais utilizadas nos cálculos foram as concentrações da saturação, C_s , obtidas nos testes, portanto consiste no primeiro ponto no qual a concentração de OD ficou constante. Os valores podem ser vistos na tabela 5, assim como os tempos de saturação, t_s , e as concentrações iniciais, C_0 .

Com isso foi calculada a taxa média de aeração para as três vazões aplicando a Eq. 15. Os valores de taxa média encontrados para vazão máxima, média e mínima, respectivamente, foram: 0,073, 0,065 e 0,046 mg L⁻¹ min⁻¹.

Com as equações modelo de aeração obtidas pelo ajuste das curvas à vazão máxima, média e mínima, pôde-se obter a taxa de aeração (velocidade de aeração, ou ainda, velocidade de oxigenação). A taxa de aeração é dada pela derivada da curva de saturação. Dessa maneira, calculou-se a derivada de cada equação modelo de aeração, obtendo-se o gráfico 2.

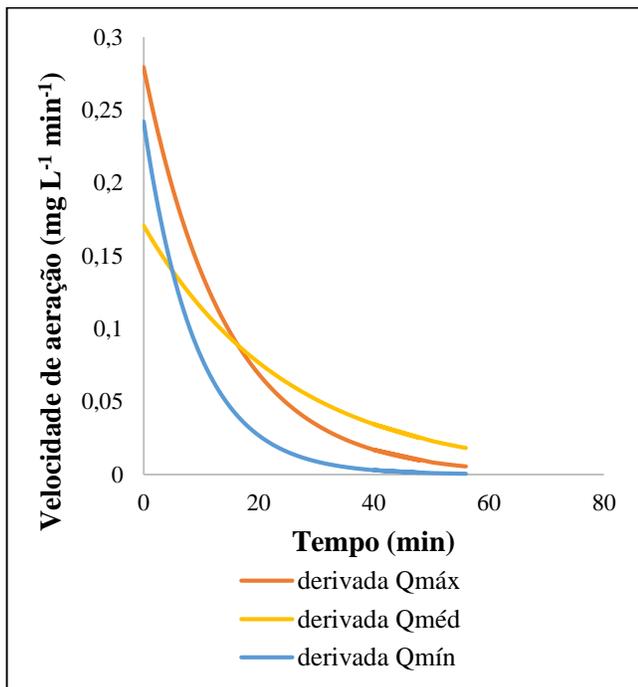


Gráfico 2. Taxa de aeração para todas as vazões.

As equações das taxas de aeração para as vazões máxima, média e mínima estão representadas pelas Eq. 16, Eq. 17 e Eq. 18, respectivamente.

$$\frac{dC}{dt} = 0,2793 e^{-0,07t} \quad (16)$$

$$\frac{dC}{dt} = 0,1708 e^{-0,04t} \quad (17)$$

$$\frac{dC}{dt} = 0,242 e^{-0,11t} \quad (18)$$

A taxa de aeração é maior inicialmente devido ao grande déficit de oxigênio no meio, conforme Eq. 8. A medida que a aeração prossegue o déficit de oxigênio diminui, provocando uma diminuição na taxa de aeração, ou seja, a velocidade de aeração diminui com o tempo, tendendo a zero. Taxa zero significa que a concentração medida é igual a concentração de saturação, logo o sistema atingiu a saturação.

Ao analisar o gráfico 2 nota-se que a taxa de aeração para vazão mínima começa alta, com valor próximo da taxa de aeração para a vazão máxima, entretanto ela cai rapidamente, tendendo a zero em um menor tempo.

A taxa de aeração à vazão mínima começa mais alta que à vazão média, mas passados poucos minutos de teste ela fica mais lenta que a taxa à vazão média. Isso ocorre no início do processo, pois de acordo com a Eq. 6, com vazão menor o déficit de oxigênio ($C_s - C$) é maior, logo será maior a taxa de transferência de oxigênio (dC/dt).

Comparando as três curvas pode-se perceber que a taxa de aeração à vazão mínima ao fim do teste ficou mais próxima do zero que as demais, mostrando que o sistema ficou mais próximo da saturação.

Considerando uma taxa de aeração média para as três vazões durante o decorrer dos 56 minutos considerados no cálculo e obtenção das curvas das taxas, a que apresentou maior valor foi a máxima, seguido da média e mínima.

Com base no gráfico 1 de progressão temporal da concentração de OD pôde-se perceber que no início a aeração do sistema é intensa, ou seja, a concentração de OD aumenta rapidamente em um curto período de tempo. Entretanto com o passar do tempo a concentração de OD passa a aumentar mais lentamente. Este comportamento é esperado visto que a curva tem o aspecto descrito na bibliografia e tende ao valor de concentração de saturação de oxigênio na água. Nesse sentido, o comportamento gráfico obtido com os testes ficou de acordo com a bibliografia de Von Sperling (1997), como pode ser visto na figura 5.

Analisando os resultados para diferentes vazões, ainda de acordo com o gráfico 1, ocorre um aumento da taxa de oxigênio transferido com a maior turbulência existente devido ao aumento da vazão no sistema.

De maneira geral, os resultados encontrados no presente estudo foram condizentes com o esperado, embora algumas considerações puderam ser analisadas, como por exemplo o registro utilizado no projeto (gaveta) não representa um registro adequado para ajuste de vazão, sendo o ideal um registro de pressão, porém este aumentaria a perda de carga e limitaria ainda mais a vazão da planta piloto.

Um outro aspecto importante é o volume da caixa d'água que foi utilizada para acoplar o aerador. A caixa empregada no projeto tinha capacidade de 150 L, no entanto se fosse utilizada uma caixa de menor volume, o resultado da concentração de OD poderia ter sido ainda mais satisfatório,

ou poderiam ser feitos um número maior de testes, em triplicata por exemplo. Este procedimento minimizaria os erros. Além disso o teste seria mais rápido e otimizado, fazendo uso de uma menor massa de reagente.

A temperatura do ambiente é um parâmetro importante que pode ter influenciado também na taxa de aeração, assim como o pH e a salinidade do meio. Como oxigênio é um gás pouco solúvel em água, esses parâmetros podem causar uma variação considerável na concentração de OD verificada.

Um possível erro nas medições seria a presença de bissulfito remanescente no sistema, ou seja, o bissulfito em excesso que não foi reagido devido a ausência de oxigênio na água após a desaeração. Essa massa remanescente poderia reagir após o acionamento do aerador e aeração da água. Com isso, o sistema estaria sendo aerado pela ação do aerador e desaerado, em menor proporção, pelo excesso de bissulfito.

Erros com o oxímetro tais como: incrustação de sais no eletrodo devido a solução eletrolítica, erros durante o processo de calibração do aparelho e a falta de um suporte fixo pode ter acarretado em algumas alterações também nas medições.

As medições foram feitas na região localizada a aproximadamente 15 cm da superfície. A bomba utilizada no projeto foi de baixa capacidade. Fica como sugestão para futuras avaliações a utilização de uma bomba de maior capacidade, e a observação nas taxas de aeração nesta nova configuração. O sistema possibilitou verificar que a taxa de aeração artificial medida na máxima, média e mínima vazão mostraram-se eficientes quando comparadas a taxa de aeração natural, provando que o aerador é eficaz no aumento da concentração de OD do meio e apresenta boa velocidade de aeração.

VII. CONCLUSÕES

Na análise do resultado ficou demonstrado que quanto maior for a taxa média de aeração, consegue-se chegar a um valor próximo da concentração de OD medido antes da desaeração.

Os gráficos construídos com os dados obtidos nos testes ficaram de acordo com a bibliografia consultada, o que foi um ponto positivo na busca pela resposta da questão norteadora deste trabalho.

Os testes de aeração mostraram que o aerador feito com material de baixo custo apresentou bom resultado na taxa de aeração da água, atingindo valores de concentração de oxigênio dissolvido próximos aos medidos com oxímetro antes da realização do teste. Portanto o aerador se mostrou eficiente na transferência de oxigênio para a água.

Por fim, como sugestão para trabalhos futuros, algumas implementações e avaliações podem ser feitas no sistema de aeração, tais como:

- fazer os testes com maior controle de pH e temperatura, instrumentos calibrados com melhor resolução e quantidade de reagente (bissulfito de sódio) estequiometricamente calculada;
- adição de um método de controle de vazão, permitindo uma maior precisão na vazão de operação;
- adição de um suporte para o oxímetro, para que este não balance e acabe provocando alterações nas medições;

- avaliação da influência do diâmetro do orifício do tampão na taxa de aeração, assim como foi feito com a vazão neste trabalho;
- avaliação do aparato experimental na utilização como bancada demonstrativa na aeração mecanizada de líquidos com ênfase em tratamento de efluentes.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Von Sperling. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos – princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.1, DESA-UFMG, ABES, Belo Horizonte. 1996.
- [2] M. Von Sperling. Princípios Básicos do Tratamento de Esgoto. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG Belo Horizonte, 1997, 211p.
- [3] A. Kumar; S. Moulick; B. C. Mal. *Selection of aerators for intensive aquacultural pond*. 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144860913000617>> Acesso em: 29 abr. 2016.
- [4] L. C. Corrêa. Controle do processo da transferência de oxigênio em corpos hídricos. 2006. 81 p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – USP, São Carlos, São Paulo, 2006.
- [5] P. Brandão. Oxigênio renovado – Piscicultor inventou um aerador simples e barato, que recicla água sem gastos com energia elétrica. Revista Globo Rural Editora Globo ano 30 n° 358, agosto de 2015.
- [6] A. Kumar *et al.* *Aeration cost of propeller-aspirator pump aerator at optimum geometric and dynamic conditions*. 2012. Disponível em: <<http://www.ijbbb.org/papers/107-B147.pdf>> Acesso em: 28 abr. 2016.
- [7] J. P. S. Valente *et al.* Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de poluição no ribeirão Lavapés/Botucatu - SP. 1997. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-46701997000100005> Acesso em: 11 nov. 2016.
- [8] A. R. Fiorucci; E. Benedetti Filho. A importância do oxigênio dissolvido em ecossistemas aquáticos. 2004. Disponível em: <<http://qnesc.s bq.org.br/online/qnesc22/a02.pdf>> Acesso em: 08 nov. 2016.
- [9] C. R. Martins; W. A. Lopes; J. B. Andrade. Solubilidade das substâncias orgânicas. Química Nova. 2013, vol.36, n.8, pp.1248-1255. Disponível em: <http://quimicanova.s bq.org.br/imagebank/pdf/Vol36No8_1248_25-ED12977_cor.pdf> Acesso em: 10 ago. 2017.

- [10] C. E. Boyd. *Pond water aeration systems*. 1998. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144860998000193>> Acesso em 07 nov. 2016.
- [11] W. Schmidell *et al.* *Biotecnologia industrial*. v.2. São Paulo: Blucher, 2001.
- [12] Y. A. Çengel; A. J. Ghajar. *Transferência de calor e massa: uma abordagem prática*. 4. ed. São Paulo: AMGH, 2012, 211p.
- [13] I. E. L. Neto. *Transferência de massa em sistema de aeração por jatos bifásicos*. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v18n1/a02v18n1.pdf>> Acesso em: 30 abr. 2016.
- [14] V. Aquino. *Vantagens e desvantagens da aeração por ar difuso e sistema mecânico*. 2016. Disponível em: <<http://www.meiofiltrante.com.br/internas.asp?id=15595&link=noticias>> Acesso em: 09 nov. 2016.
- [15] J. S. Piccin *et al.* *Otimização de sistemas de auto aspiração de ar tipo Venturi para tratamento de água ferruginosa*. 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v14n5/a11v14n5.pdf>> Acesso em: 10 nov. 2016.
- [16] P. S. Schneider. *Medição de velocidade e vazão de fluidos*. 2000. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/medterm/areas/area-ii/vazao_mt.pdf> Acesso em: 10 nov. 2016.
- [17] A. Strieder; C. M. Schuch. *EDUFLUID – Software para o ensino de medição de vazão por perda de carga através de tubo de Venturi*. 2005. Disponível em: <<http://www.revista.unisal.br/sj/index.php/123/article/view/79/92>> Acesso em: 27 ago. 2017.
- [18] C. A. N. Cavalcanti *et al.* *Construção e operação de Venturi para medição de vazão de líquidos*. 2010. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/medterm/trabalhos/trabalhos-2011/Carlos_Fernando_Ricardo.pdf> Acesso em: 10 nov. 2016.
- [19] M. E. M. R. Caldas. *Criação racional de peixes*. 2016. Disponível em: <www.ceplac.gov.br/radar/Artigos/artigo14.htm> Acesso em: 03 nov. 2016
- [20] F. Kubitzka. *A importância da aeração na piscicultura*. *Revista panorama da aquicultura*, v. 18, n. 109, p. 26-33, set./out. 2008.
- [21] Snatural. *Tratamento de água, efluentes, aquicultura e paisagismo*. 2016. Disponível em: <<http://www.snatural.com.br/>> Acesso em: 05 nov. 2016.
- [22] H. L. M. Moreira *et al.* *Fundamentos da moderna aquicultura*. 1 ed. Canoas: ULBRA, 2001. 200 p.
- [23] J. L. U. De Sousa; R. A. B. Monteiro. *Fatores interferentes na fermentação alcoólica para a produção de etanol*. 2011. Disponível em: <<http://www.fazu.br/ojs/index.php/fazuemrevista/article/viewFile/380/268>> Acesso em: 05 nov. 2016.
- [24] R. P. Piveli. *Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos*. 2010. Disponível em: <www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=736> Acesso em 16 nov. 2016.
- [25] J. V. S. Almeida. *Remoção de oxigênio dissolvido da água de alimentação de uma caldeira de alta pressão em uma indústria de celulose*. 2014. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/103838/00932434.pdf?sequence=1>> Acesso em: 21 nov. 2016.
- [26] T. L. Brown *et al.* *Química: a ciência central*. 9. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.
- [27] O. P. Silva. *Qualidade de água injetada em contato com linhas de aço carbono, em poços da Bacia de Campos, RJ*. 2009. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reservatório e de Exploração) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Macaé, 2009.
- [28] Akso. *Medidor multiparâmetro à prova d'água (AK87) + sonda de oxigênio dissolvido*. 2016. Disponível em: <http://www.akso.com.br/produto/kits/medidor_multiparametro_a_prova_d_agua_ak87_sonda_de_oxigenio_dissolvido-302> Acesso em: 03 mai. 2016.