

**24º. Encontro Técnico AESABESP
Norma para elaboração dos Trabalhos Técnicos**

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO PARA AVALIAÇÃO DA
EFICIÊNCIA DE TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO – OTE EM
SISTEMAS DE LODOS ATIVADOS.**

Bruno Sidnei da Silva⁽¹⁾

Engenheiro Sanitarista do Departamento de Projetos de Pesquisa da Superintendência de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP.

Marcelo Kenji Miki

Engenheiro Civil. Gerente do Departamento de Projetos de Pesquisa da Superintendência de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP.

Endereço⁽¹⁾: Rua Costa Carvalho, nº 300 – Pinheiros – São Paulo – São Paulo CEP: 05429-900 Brasil - Tel: 55 (11) 3388-9751- Fax: 55 (11) 3388-8695 - email: bsidnei@sabesp.com.br

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo para avaliação da eficiência de transferência de oxigênio dos difusores de membrana instalados nas estações de tratamento de esgotos, com o emprego da metodologia 'off-gas'. Foram realizados três testes em duas ETEs da região metropolitana de São Paulo. Os testes indicaram um bom desempenho do equipamento para sistemas com distribuição homogênea de difusores, e certa limitação para aplicação em sistemas com avarias severas no sistema de distribuição de ar do tanque, como rompimento de membranas e barriletes de alimentação danificados. A principal vantagem em relação a outros testes para determinação da eficiência de transferência de oxigênio, como, por exemplo, com peróxido de hidrogênio (H₂O₂), é não alterar a rotina operacional da estação de tratamento, e ser mais seguro do ponto de vista da segurança ocupacional. Com isso o monitoramento periódico da OTE torna-se viável, e um instrumento para gestão energética da estação. Com dados de OTE ao longo do tempo, o gestor da ETE terá subsídios para determinar o melhor momento para limpeza ou troca do conjunto de difusores de ar.

PALAVRAS-CHAVE: Transferência de Oxigênio, Difusores de Ar, Lodos Ativados.

INTRODUÇÃO

O consumo de energia pelos sistemas de aeração é, de acordo com a literatura, entre 45 a 70% do consumo energético total de uma estação de tratamento de efluentes. No ano de 2012, as principais estações de tratamento de esgotos da Região Metropolitana de São Paulo consumiram 146.145.155 kWh a um custo de R\$ 17.239.464,00.

A difusão de ar em tanques de aeração com difusores de bolha fina é uma das alternativas mais eficientes de aeração. Entretanto, a sua eficiência sofre uma redução gradativa com o tempo, aumentando com isso o consumo de energia pelos sopradores de ar.

Para recuperar parte da perda de eficiência de transferência de oxigênio para a massa líquida dos tanques de aeração são necessárias limpezas periódicas dos difusores. No estudo realizado pela California Energy Commission (2010), constatou-se que, com a limpeza dos difusores de ar, a eficiência de transferência de oxigênio (OTE) passou de 16,1% para 18,6%, ou seja, houve um aumento de aproximadamente 15%.

Este trabalho apresenta uma proposta para viabilizar o monitoramento a longo prazo da eficiência de transferência de oxigênio dos difusores de ar instalados nos tanque de aeração por lodos ativados. Com o emprego da metodologia do off-gas, será possível gerar um banco de dados de eficiência de transferência de oxigênio, que comparados ao consumo específico de energia dos sopradores de ar, fornecerão informações relevantes para o gestor da estação tomar decisões, como a realização de operações de limpeza ou substituição do conjunto de difusores.

OBJETIVO

Disponibilizar uma nova ferramenta para auxiliar a gestão do consumo energético nas ETEs, de fácil manuseio e adequada às rotinas operacionais da estação. O monitoramento da OTE, perda de carga e consumo de energia dos sopradores de ar ao longo do tempo permitirão aos gestores das estações determinarem o melhor momento para intervir no sistema de aeração, seja com operações de limpeza ou substituição dos difusores.

MATERIAIS E MÉTODOS

Descrição da Metodologia

A metodologia do 'Off-gas' tem por objetivo determinar a eficiência de transferência de oxigênio dos difusores de ar instalados em tanques de aeração de lodos ativados.

Por essa metodologia, são analisados os gases que são injetados no fundo do tanque de aeração, denominado de 'ar de referência' e os gases liberados pela superfície do tanque denominado de 'off-gas', adotando-se as seguintes hipóteses:

- Os gases inertes não são produzidos nem consumidos no processo;
- A desnitrificação é desprezível;
- A vazão de ar é constante durante o teste;
- A pressão atmosférica do local é constante durante o teste;
- A transferência de oxigênio pela superfície do líquido é desprezível;
- A concentração de oxigênio dissolvido (OD) no líquido permanece constante durante o período de teste.

Com base no balanço de massa e nas hipóteses adotadas, a eficiência de transferência de oxigênio para as condições de campo (OTE_f) pode ser estimada, de acordo com a equação 1 (Redmon et al,1983).

$$OTE_f = \frac{MR_{o/i} - MR_{og/i}}{MR_{o/i}} \quad \text{equação (1)}$$

As proporções molares do oxigênio do ar de referência ($MR_{o/i}$) e do off-gas ($MR_{og/i}$) podem ser calculadas pelas equações 2 e 3:

$$MR_{o/i} = \frac{Y_R}{1 - Y_R - Y_{CO2(R)} - Y_{H2O(R)}} \quad \text{equação (2)}$$

$$MR_{og/i} = \frac{Y_{og}}{1 - Y_{og} - Y_{CO2(og)} - Y_{H2O(og)}} \quad \text{equação (3)}$$

Onde:

- Y_R , $Y_{CO2(R)}$, $Y_{H2O(R)}$: Fração molar do oxigênio, do gás carbônico e do vapor d'água na entrada do tanque de aeração (ar de referência);
- Y_{og} , $Y_{CO2(og)}$, $Y_{H2O(og)}$: Fração molar do oxigênio, do gás carbônico e do vapor d'água na saída do tanque de aeração (off-gas).

Para evitar danos ao sensor do analisador, o vapor d'água foi removido do ar por meio de uma coluna de adsorção de sílica gel instalado no quadro de análise.

A eficiência de transferência do oxigênio do tanque de aeração, para as condições de campo, foi calculada por meio da média ponderada da OTE_{fi} em relação as vazões para cada um dos pontos monitorados, através da equação 4.

$$OTE_{f.tanque} = \frac{\sum_{i=1}^n OTE_{fi} x q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad \text{equação (4)}$$

A variável q_i é a vazão do gás para as condições padrão (1 atm e 20 °C). Já a eficiência de transferência do oxigênio para água de processo e para as condições padrão – $SOTE_{pw}$ (1 atm e 20°C), em cada ponto monitorado, é calculada através da equação 5 (ASCE, 1997).

$$SOTE_{pw} = OTE_{sp20} \times C_{\infty 20}^* \times \beta \quad \text{equação (5)}$$

O valor de OTE_{sp20} é calculado através da equação 6 (ASCE, 1997).

$$OTE_{sp20} = \frac{OTE_f}{(C_{\infty f}^* - C)} \times 1,027^{(20-T)} \quad \text{equação (6)}$$

Onde:

- $C_{\infty f}^*$: Concentração de saturação de OD na água de processo para as condições de campo (mg/L)
- C : Concentração de OD na água de processo (mg/L);
- T : Temperatura da água de processo (°C).

Em sistemas de aeração por ar difuso, o valor de $C_{\infty f}^*$ pode ser estimado através da equação 7 (ASCE, 1997).

$$C_{\infty f}^* = C_{\infty 20}^* \times \frac{P_f}{P_0} \times \frac{C_s}{C_{s20}} \times \beta \quad \text{equação (7)}$$

Sendo:

- P_f : Pressão atmosférica do local (atm);

- C_s : Concentração de saturação de OD para água limpa e para as condições do campo (mg/L);
- C_{s20} : Concentração de saturação de OD para água limpa e para as condições padrão (mg/L);
- $C_{\infty 20}^*$: Concentração de saturação de OD da água limpa para as condições padrão e específica para as características do tanque e do sistema de aeração (mg/L);
- P_o : Pressão atmosférica ao nível do mar (1 atm);
- β : Relação entre a concentração de saturação do OD na água de processo e na água limpa.

Para sistemas de aeração por ar difuso, o valor de $C_{\infty 20}^*$ pode ser estimado através da equação 8 (Stenstrom et al, 2006).

$$C_{\infty 20}^* = C_s \left[\frac{P_o + CF \left(\frac{h}{2} \right)}{P_o} \right] \quad \text{equação (8)}$$

Onde:

- CF: Fator de conversão de pressão (0,09664 para pressão em atm);
- h: Lâmina d'água sobre o difusor (m).

Caso não se disponha da pressão atmosférica do local, o valor de P_f pode ser estimado através da equação 9.

$$P_f = 1 - 1,15 \times 10^{-4} \times H \quad \text{equação (9)}$$

Onde:

- H: altitude do local de teste em relação ao nível do mar, em metros;

O valor de β pode ser estimado através da equação 10 (ASCE, 1997).

$$\beta = 1,00 - \frac{0,01 \times SDT}{1,000} \quad \text{equação (10)}$$

Onde:

- SDT é a concentração de sólidos dissolvidos totais, em mg/L.

A eficiência de transferência de oxigênio do tanque de aeração ($SOTE_{pw.tanque}$) para água de processo e para as condições padrões (1 atm e 20°C) foi calculada através da equação 11.

$$SOTE_{pw.tanque} = \frac{\sum_{i=1}^n SOTE_{pwi} \cdot q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad \text{equação (11)}$$

Onde:

- $SOTE_{pwi}$: Eficiência de transferência de OD do ponto de monitoramento i para a água de processo nas condições padrões de temperatura e pressão (%);
- q_i : vazão do 'off-gas' no ponto i para as condições padrões (1atm e 20 °C).

Espaço Amostral

A metodologia do 'Off-gas', descrita no *Standard Guidelines for In-Process Oxygen Transfer Testing* (ASCE-18-96), recomenda que a área mínima de amostragem seja igual ou superior a 2% da área superficial do tanque de aeração. Assim, a área mínima de amostragem foi calculada através da equação 12.

$$\text{Aamostragem} = 0,02 * AT \quad \text{equação (12)}$$

Onde:

- AT é a Área Superficial do Tanque de Aeração.

O número de pontos de amostragem – NP foi calculado pela razão entre a Área de Amostragem e a Área Interna do Coletor de 'Off-gas', conforme equação 13 e 14.

$$NP = \frac{\text{Aamostragem}}{\text{Área Interna do Coletor}} \quad \text{equação (13)}$$

$$NP = \frac{0,02*AT}{\text{Área Interna do Coletor}} \quad \text{equação (14)}$$

Após definido o número de pontos de amostragem – NP, a distribuição destes pontos no tanque de aeração considera um dos seguintes critérios:

- Se a distribuição de difusores no tanque for homogênea (uma única zona de densidade), os pontos de amostragem deverão ser distribuídos de forma equidistante ao longo do tanque, conforme ilustrado na Figura 1.

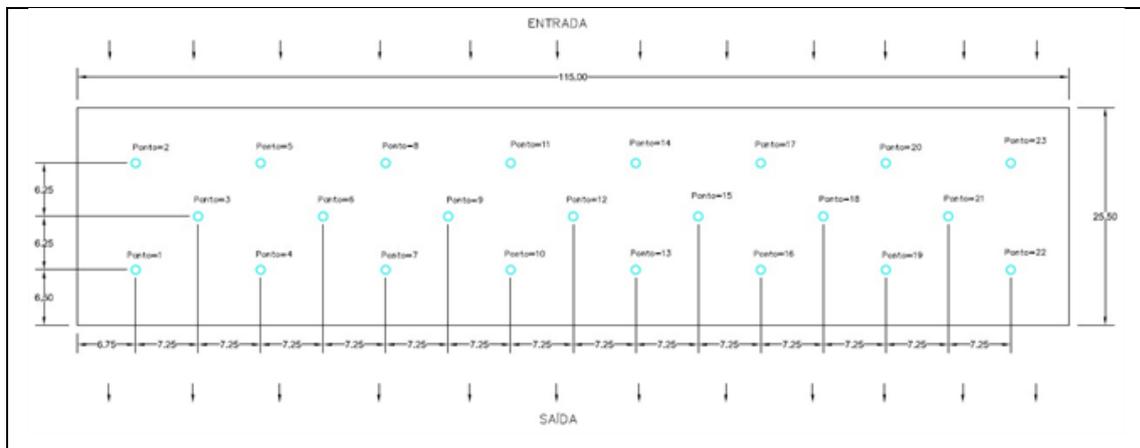


Figura 1 – Croqui de Distribuição dos Pontos de Análise do 'Off-gas' no Tanque de Aeração Com Uma Única Densidade de Difusores (Situação da ETE ABC da SABESP)

- Se a densidade de difusores for escalonada pelo tanque, o número de pontos de amostragem - NP será dividido pela quantidade de Zonas de Aeração – ZA (equação 15).

$$NPZ = \frac{NP}{ZA} \quad \text{equação (15)}$$

Quando o resultado de NPZ for inferior a 2, é adotado no mínimo 2 pontos de amostragem por zona, ou seja, NPZ = 2.

A figura 2 abaixo apresenta a distribuição dos pontos de amostragem em um tanque com várias zonas de densidade dos difusores de ar.

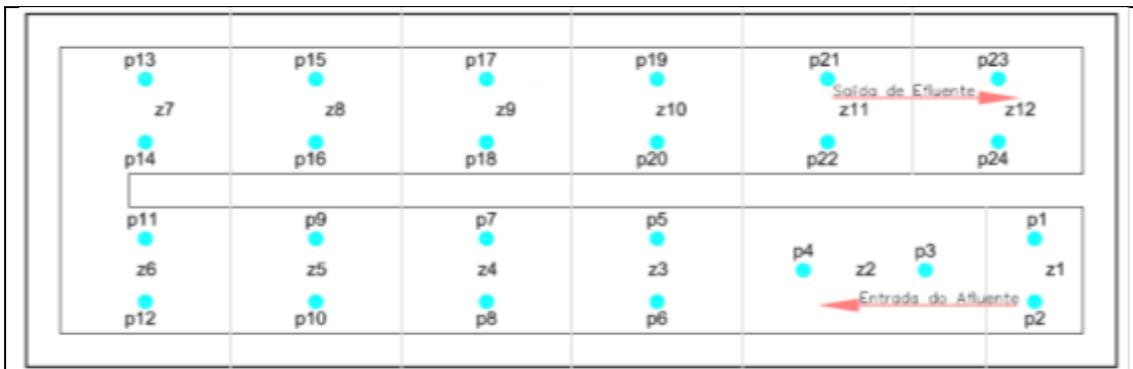


Figura 2 – Croqui de Distribuição dos Pontos de Análise do ‘Off-gas’ no Tanque de Aeração com Zonas de Aeração Escalonada de Difusores (Situação da ETE São Miguel da SABESP)

Materiais e Métodos

O protótipo desenvolvido para avaliação da eficiência de transferência de oxigênio dos difusores de ar possui duas estruturas principais: equipamento coletor de ‘off-gas’ e quadro de análises.

O equipamento coletor de ‘off-gas’ foi construído com placas de alumínio, e possui as seguintes dimensões:

- Comprimento: 1,80 metros
- Largura: 0,90 metros
- Área Interna: 1,51 m² (1,76m x 0,86m)

Este equipamento possui flutuadores laterais projetados com placas de isopor, fixados nas suas paredes laterais internas (ao longo de seu comprimento), conforme ilustrado na Figura 3.

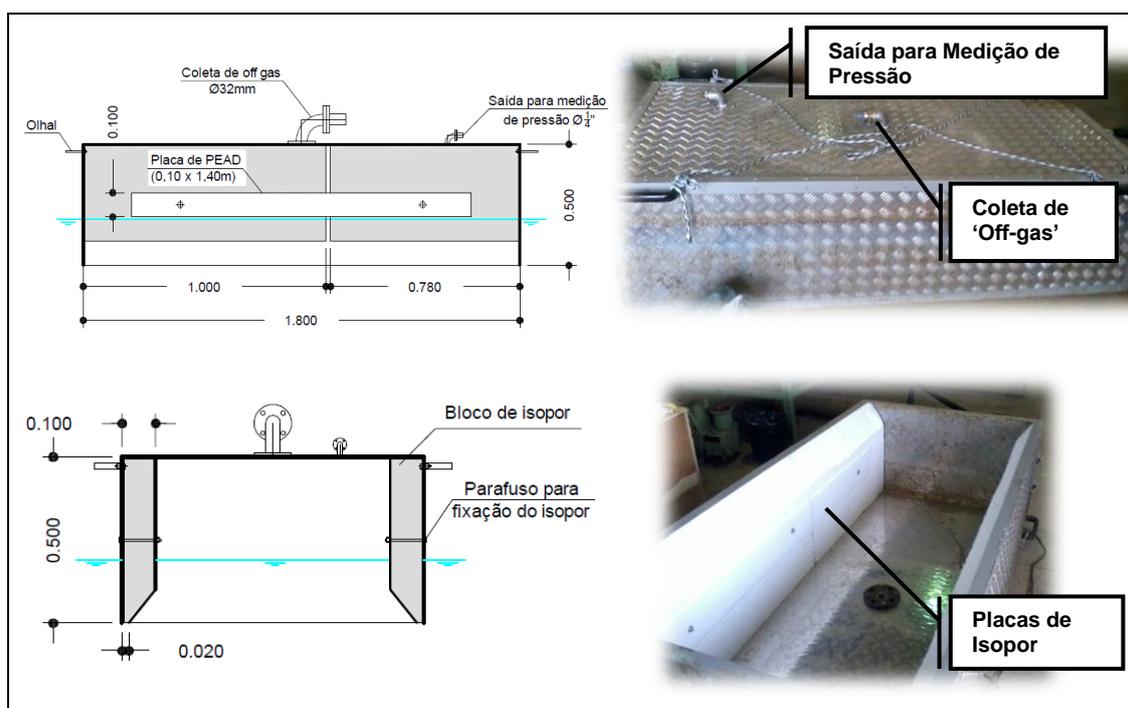


Figura 3 – Equipamento Coletor de ‘Off-gas’

Para fazer a análise dos gases confinados no equipamento coletor de 'off-gas', foi montada uma estrutura denominada de quadro de análises. No quadro, foram instalados os seguintes dispositivos de medição: rotâmetro, manômetro, vacuômetro e termômetro.

Junto ao quadro de análise foi alocado um analisador de gases, cuja função é medir as concentrações de O_2 e CO_2 do 'off-gas' e do ar de referência. O quadro apresenta a configuração apresentada na figura 4 abaixo.

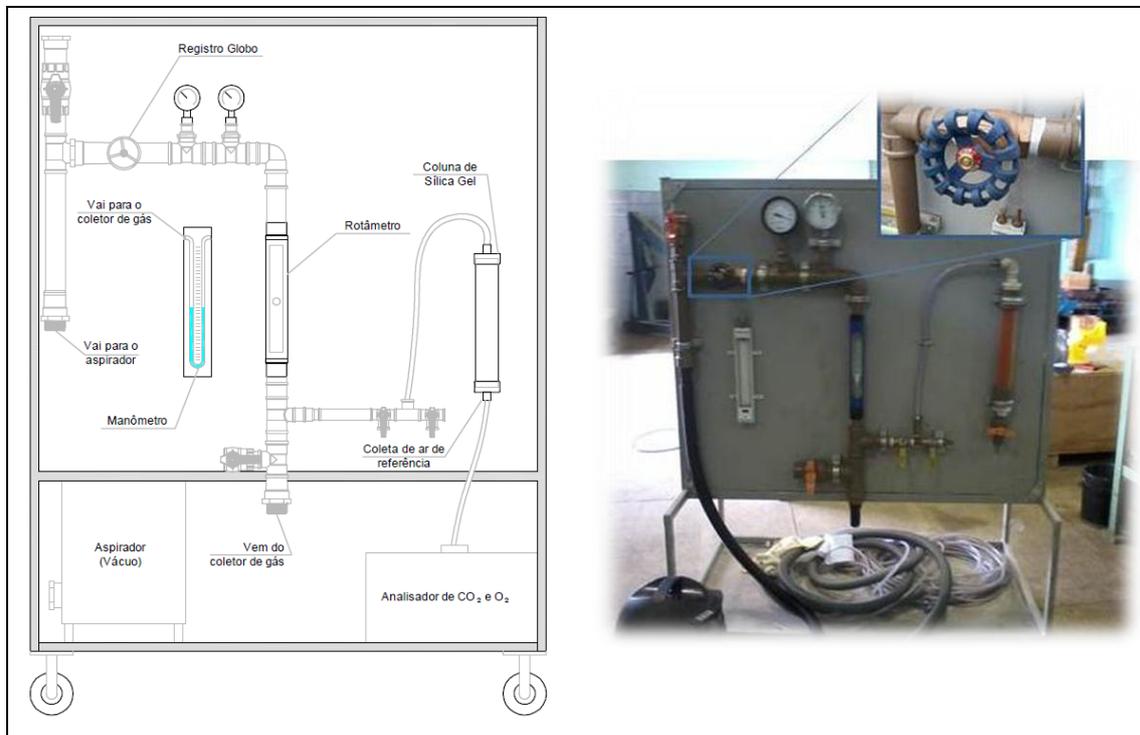


Figura 4: Quadro de análise do 'Off-gas' com Detalhe para o Registro Globo

O gás liberado pela superfície do tanque de aerção é confinado no interior da campânula do equipamento coletor de 'off-gas' e encaminhado por sucção ao quadro de análise com o auxílio de um mangote flexível ligado a um aspirador de pó.

O ajuste da vazão de gás extraído do coletor é realizado com o auxílio de um manômetro e por manobra de abertura ou fechamento do registro globo. Quando a pressão relativa no interior da campânula, em cada ponto de coleta, apresentava-se próxima à zero, derivava-se uma fração do gás coletado para o analisador paramagnético de alta precisão, para medição das concentrações de oxigênio e gás carbônico. O sensor do analisador possui exatidão de 0,1% em uma faixa de medição de O_2 de 0 a 25 % em volume, e exatidão de 0,2% em uma faixa de medição de CO_2 de 0 a 10 % em volume (figura 5). A cada ponto coletado é registrado em planilha de campo, as concentrações de O_2 e CO_2 e os valores de vazão de sucção, pressão e temperatura.

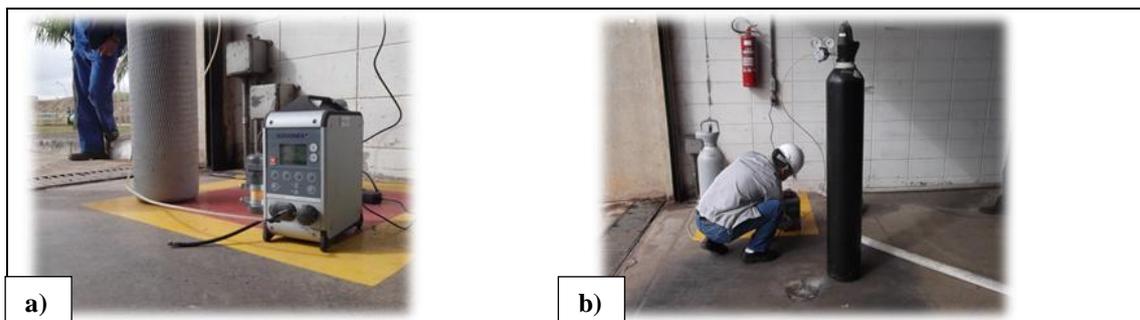


Figura 5: Analisador de Gases – O_2 e CO_2 e Processo de Calibração do Analisador

Para a medição do Oxigênio Dissolvido no interior do Tanque de Aeração é utilizado um oxímetro de membrana portátil. As medições de OD foram realizadas o mais próximo possível do ponto de amostragem, e a uma profundidade de aproximadamente $\frac{1}{2}$ (metade) da submersão (profundidade) dos difusores de ar.

RESULTADOS

Foram realizados três testes para avaliar o desempenho operacional do protótipo e sua acurácia na medição da eficiência de transferência de oxigênio dos difusores de ar. Os dois primeiros testes foram realizados na Estação de Tratamento de Esgotos do ABC, cujo tanque de aeração apresenta distribuição homogênea dos difusores e regime de mistura completa. O terceiro teste foi realizado na Estação de Tratamento de Esgotos de São Miguel, que apresenta distribuição de difusores não homogênea e tanque de aeração por fluxo em pistão, ou seja, com zonas distintas de aeração no tanque. As duas estações ficam localizadas no Município de São Paulo. A figura 6 apresenta imagens da execução dos testes.

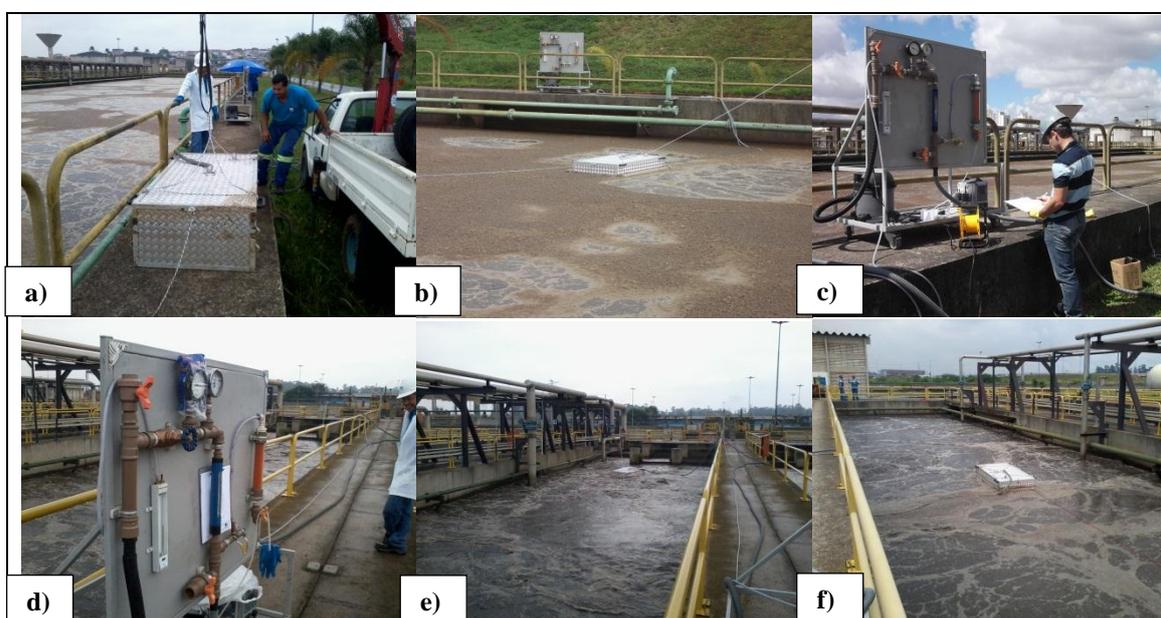


Figura 6: a, b, c) Testes na ETE ABC; d, e, f) Teste na ETE São Miguel

O primeiro teste no primeiro tanque de aeração da ETE ABC apresentou resultado médio em termos de O_{T_e} na ordem de 21,7%. O segundo teste no mesmo tanque de aeração apresentou resultados de O_{T_e} na ordem de 25,6%.

Esta variação no resultado de O_{T_e} no segundo teste pode ser explicada pela ocorrência de chuvas na noite que antecedeu a realização deste teste. Com a diluição da concentração de DBO no esgoto afluente, a concentração de agentes interferentes como substâncias surfactantes diminui, aumentando a eficiência de transferência de oxigênio nestas condições.

Contudo, observa-se que a $SOTE_{pw,tanque}$ apresentou menor variação em termos percentuais, de 32,4 % no primeiro teste para 33,6% no segundo teste, ou seja, uma variação inferior a 4%. A figura 7, abaixo, apresenta os gráficos com a dispersão dos resultados pontuais de O_{T_e} e $SOTE_{pw}$, realizados na ETE ABC, em agosto de 2012 (1º Teste) e novembro de 2012 (2º Teste).

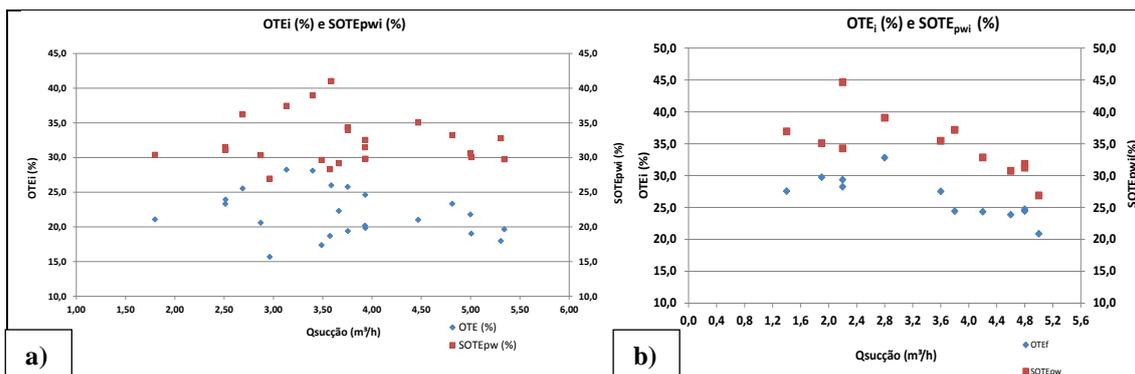


Figura 7: a) Resultados de OTE_i e SOTE_{pwi} no 1º Teste na ETE ABC; b) Resultados de OTE_i e SOTE_{pwi} no 2º Teste na ETE ABC.

Os resultados de OTE_i e SOTE_{pwi} nas curvas de dispersão permitem visualizar uma tendência de redução da eficiência de transferência de oxigênio, a partir de uma determinada faixa de vazão de ar. Este fato tem relação com a expansão dos poros da membrana do difusor, indicando que a partir de uma determinada vazão de ar, o difusor perde eficiência devido à expansão excessiva dos poros, acarretando formação de bolhas de maior diâmetro, e menor área superficial (prevalência de bolhas médias em relação a bolhas finas). Esta constatação deve ser levada em consideração para projetos de novos sistemas de aeração, pois a vazão de ar por difusor é função da vazão de ar fornecida pelos sopradores e pela quantidade de difusores instalados no tanque (densidade de difusores). A vazão por difusor terá consequência na eficiência de transferência de oxigênio de todo o sistema.

O terceiro teste com este protótipo, utilizando a metodologia do 'off-gas', foi realizado na ETE São Miguel em dezembro de 2012, e apresentou resultados de OTE_f e SOTE_{pw} bastante variáveis, conforme ilustrado na figura 8.

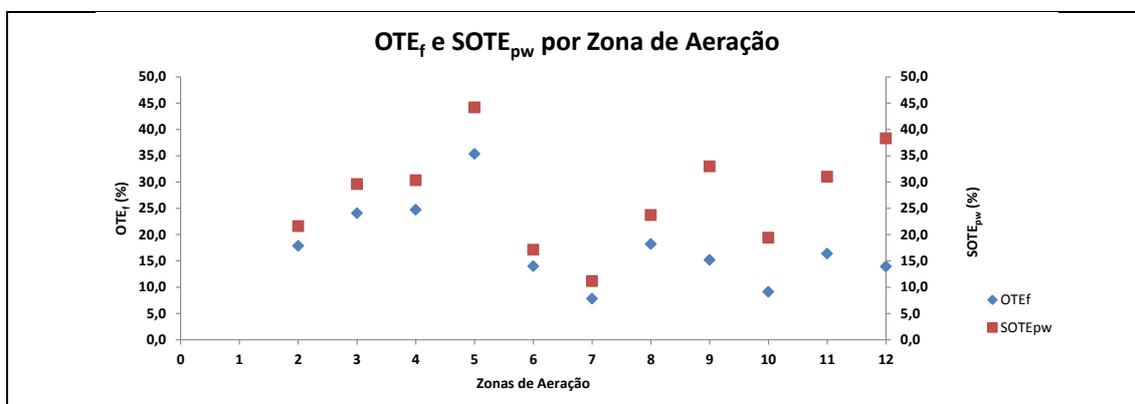


Figura 8: a) Resultados de OTE_f e SOTE_{pw} do Teste na ETE São Miguel

A grande variação dos resultados de OTE_f entre as zonas de aeração é devido a dois fatores principais: densidade heterogênea de difusores no tanque e presença de zonas com forte agitação do licor misto, devido a rompimento de membranas e barriletes de distribuição de ar.

Devido às características de fluxo em pistão, a concentração de oxigênio dissolvido no compartimento de entrada e no compartimento de saída do tanque de aeração variou bastante (ver Figura 2). Além disso, a análise de 'off-gas' no primeiro compartimento foi prejudicada devido ao grande número de pontos com forte agitação do licor misto. Nestes pontos, a campânula do equipamento coletor tendia a se deslocar para as zonas de menor agitação, o que acabava majorando os resultados de eficiência de transferência de oxigênio deste compartimento, já que os pontos de forte agitação não eram efetivamente medidos.

Assim, os resultados de OTE_f e SOTE_{pw} para todo o tanque de aeração foi considerado a partir das medições realizadas no segundo compartimento (compartimento de saída), onde as

interferências mencionadas no parágrafo anterior eram menos significativas. A ordem de grandeza para eficiência de transferência de oxigênio foi de 12,0 % em termos de OTE_f e 25,4% em termos de $SOTE_{pw.tanque}$.

CONCLUSÃO

Os três testes realizados com o protótipo, utilizando-se a metodologia do 'off-gas', permitiram concluir que a metodologia é viável para o monitoramento da eficiência de transferência de oxigênio de sistemas de difusores de ar, desde que o sistema não apresente avarias severas, como difusores com membranas rompidas ou barriletes de distribuição de ar arrebitados.

A operação do equipamento coletor é simples, necessitando de treinamento prévio apenas para o operador do quadro de análises, que será o responsável pela execução do teste.

Outro ponto relevante é o número de colaboradores necessários para realização do teste, bem como o tempo necessário para sua realização. Na ETE ABC e ETE São Miguel, que são estações de tratamento de esgotos de grande porte, foram utilizados quatro colaboradores. Os testes foram realizados durante um dia de trabalho (6 a 8 horas). Como o tempo para realização do teste é função da quantidade de pontos a ser amostrado, em estações de médio e pequeno porte, estima-se que a execução do teste seja realizada em menos de 4 horas.

CONSIDERAÇÕES

A realização dos testes com o protótipo desenvolvido neste estudo permitiu identificar alguns aspectos relevantes durante a execução do teste, tais como (tabela 1):

Tabela 1: Considerações sobre o Teste Off-gas

ASPECTO	CONSIDERAÇÃO
Coleta dos Dados de OTE	A tomada de dados deve ser realizada quando a pressão na campânula estiver estabilizada, e próxima da pressão atmosférica (variação $\leq 5\text{mmca}$).
Colaboradores	Para realização do teste são necessários quatro colaboradores.
Tempo de Duração	Estima-se que o tempo para realização dos testes varie de 4 a 8 horas para ETÊs de grande porte. Para sistemas de médio e pequeno porte estima-se que a execução do teste seja realizada em menos de 4 horas.
Métodos de Limpeza	O teste 'off-gas' pode ser um instrumento útil para comparar dois ou mais métodos de limpeza de difusores. A efetividade de um método de limpeza pode ser avaliada com a determinação da eficiência de transferência de oxigênio, e determinação da perda de carga nos difusores, antes e depois da operação de limpeza.

RECOMENDAÇÕES

Para o monitoramento da evolução temporal da eficiência de transferência de oxigênio e comparação dos resultados entre dois ou mais sistemas semelhantes, apresentam-se as seguintes recomendações (tabela 2):

Tabela 2: Recomendações para Aplicação da Metodologia ‘Off-gas’

ASPECTO	RECOMENDAÇÃO
Densidade de Difusores	Sob condições similares de projeto e operação, tanques com maior quantidade de difusores por área (maior densidade) apresentarão maiores eficiência de transferência de oxigênio.
Regime de Mistura no Tanque de Aeração	A comparação entre sistemas semelhantes deve considerar o regime de mistura do tanque. A literatura relata que tanques com fluxo em pistão, geralmente apresentam maior eficiência de transferência de oxigênio.
Vazão por Difusor	Os difusores de ar apresentam uma faixa ótima de vazão de operação. Acima da faixa ótima de operação, a eficiência de transferência do difusor tende a decrescer, provavelmente associada a uma expansão excessiva dos poros da membrana.
Concentração de OD	Não se recomenda realizar o teste ‘off-gas’, quando a concentração de OD no tanque de aeração for $\leq 0,5$ mg/l.
Características do Esgoto Afluente	A literatura relata que com o aumento da DBO afluente, aumenta também a concentração de agentes interferentes, como substâncias surfactantes, diminuindo a eficiência de transferência de oxigênio. Portanto, para efeitos de monitoramento da evolução temporal da OTE, os testes devem ser realizados em condições típicas do esgoto afluente à estação, e preferencialmente durante um mesmo período do dia.
Perda de Carga nos Difusores	O aumento do consumo de energia dos sopradores é influenciado pela diminuição da eficiência de transferência de oxigênio e pela evolução da perda de carga dos difusores. Para monitorar a perda de carga do sistema de difusores, recomenda-se instalar medidor de pressão no corpo do difusor, conforme recomendado no Manual de Projetos para Sistemas de Aeração com Bolhas Finas (U.S. EPA, 1989) e Manual de Orientação para Plantas de Tratamento de Esgoto – Auditoria de Processos (Ontario Ministry of the Environment, 2006).
Gestão Energética dos Sopradores	Para o processo de gestão energética dos sopradores, os dados de OTE (SOTE) e Perda de Carga dos difusores devem ser comparados com os dados de consumo de energia elétrica dos sopradores de ar.
Vazão de Ar do Sistema	Para calcular a vazão mássica de ar fornecida ao sistema, deverá a estação prever a instalação de medidor de vazão, temperatura e pressão na linha de distribuição de ar para os difusores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASCE. Standard Guidelines for in Process Oxygen Transfer Testing, New York, NY. 1997
2. CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. A Digital Control System for Optimal Oxygen Transfer Efficiency. Los Angeles. 2010.
3. REDMON, D. ET AL. Oxygen Transfer Efficiency Measurements in Mixed Liquor Using Off-gas Techniques. Journal WPCF, Vol. 55, n. 11. 2006.
4. STENSTROM, M.K. ET AL. Theory to Practice: Oxygen Transfer and the New ASCE Standard. Civil and Environmental Engineering Dept, UCLA, Los Angeles, Ca. (2006).
5. ONTARIO MINISTRY OF THE ENVIRONMENT. Guidance For Sewage Treatment Plant. Process Audits. 2006.
6. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION OF RESEARCH AND DEVELOPMENT- EPA. Fine Pore Aeration Systems - Design Manual. 1989.