

27º. Encontro Técnico AESABESP

ESTUDO EXPLORATÓRIO PARA ESTIMATIVA DA CARGA DE AERAÇÃO NECESSÁRIA PARA A MANUTENÇÃO DO OXIGÊNIO DISSOLVIDO NO RIO PINHEIROS DE FORMA A CONTER A FORMAÇÃO DE MAUS ODORES.

Ana Lúcia Silva⁽¹⁾

Gerente da Divisão de Controle Sanitário do Médio Tietê - RMOC em Sistema de Saneamento da Divisão de Controle Sanitário Centro – RMOC da SABESP - Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

Luiz Yoshiaro Ito

Engenheiro do Departamento de Execução de Projetos de Pesquisa, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação – TXE da SABESP - Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

Américo de Oliveira Sampaio

Coordenador de saneamento na Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos do Estado de São Paulo.

Endereço⁽¹⁾: Rua Adolfo Pardini, 555, Jd. Paraíso, Botucatu – São Paulo – SP - CEP: 18610-250 - Brasil - Tel: +55 (14) 3811-8295 - e-mail: anasilva@sabesp.com.br

RESUMO

O presente estudo tem por objetivo estimar a potência de aeração necessária a ser aplicado em trechos do Rio Pinheiro, São Paulo – SP, para a manutenção da concentração de oxigênio dissolvido (OD) acima de 1 mg/L e evitar a liberação de maus odores. Também apresenta uma modelagem matemática quanto ao risco de liberação de gases eventualmente presentes na massa líquida desse rio, com foco no impacto à saúde humana. O trabalho baseia-se na metodologia de pesquisa exploratória e visa estabelecer critérios, métodos e técnicas para obtenção de informações e formulação de hipóteses acerca do problema apresentado.

PALAVRAS-CHAVE: remoção de mau odor, aeração forçada

INTRODUÇÃO

O presente trabalho estudo tem caráter exploratório, ou seja, foi trabalhado de forma a apresentar hipóteses acerca de um objeto de estudo, sendo esse objeto a proposição de alternativas para a contenção, minimização ou mitigação da formação de maus odores no Rio Pinheiros, São Paulo – SP. Baseou-se na literatura técnica disponível sobre soluções similares aplicadas em outros países, com relativo sucesso. A exemplo do que se observa no Rio Pinheiros, canais e rios retificados como o Rio Tâmis, no Reino Unido, ou o Canal de Chicago, EUA (EPA, 2000; SHEEHAN et al, 1984), a entrada de cargas de poluição antrópica e as baixas velocidades apresentadas na configuração desses corpos hídricos propicia condições para que os níveis de oxigênio dissolvido mantenha-se abaixo do necessário para assegurar a oxidação e a auto-depuração.

Dessa forma, a qualidade da água sofre uma alteração indesejável, e um dos sintomas é a formação e liberação de maus odores. A primeira, ou uma das principais soluções adotadas para os casos internacionais, similar ao que realizado no Estado de São Paulo, foi a implantação de sistemas de tratamento de esgoto, inclusive avançados, cujo objetivo era o de remover a matéria poluidora e evitar a redução dos níveis de OD. Os resultados não foram nada animadores, uma vez que a condição de baixa oxigenação se dá por fatores inclusive físicos. Tratam-se de obras de engenharia por onde massas d'água passam a transitar sem que as condições naturais de reoxigenação sejam atendidas. Além das cargas pontuais de poluição que podem até ser ponto ser removidas em estações de tratamento de esgoto na capacidade máxima que a engenharia dispõe hoje de tratamento, há que se considerar a entrada de cargas difusas de poluição, extremamente complexas de se controlar. Portanto, a aeração artificial não se trataria exatamente de um tratamento a mais, mas sim de atribuir a esses canais uma funcionalidade que lhe foi retirada, que é encontrada na natureza em rios não alterados pelo homem. Nesses, a aeração se dá pelo contorno natural, quedas d'água, desniveis, entre outros fatores físicos que permitem gradientes de velocidade, misturas e consequentemente a oxigenação necessária para que na interação com o meio ambiente as concentrações mínimas de OD se mantenham na massa líquida. A primeira aplicação de aeração artificial, no mundo, teria sido em meados de 1940, no Lago Bret, Suíça. No Rio Tâmis, como as ações de saneamento realizadas haviam sido insuficientes para revitalizar o rio, optou-se pela aeração

em pontos com depleção de OD através de barcas. Algum tempo após o início da aeração voltou-se a observar o salmão.

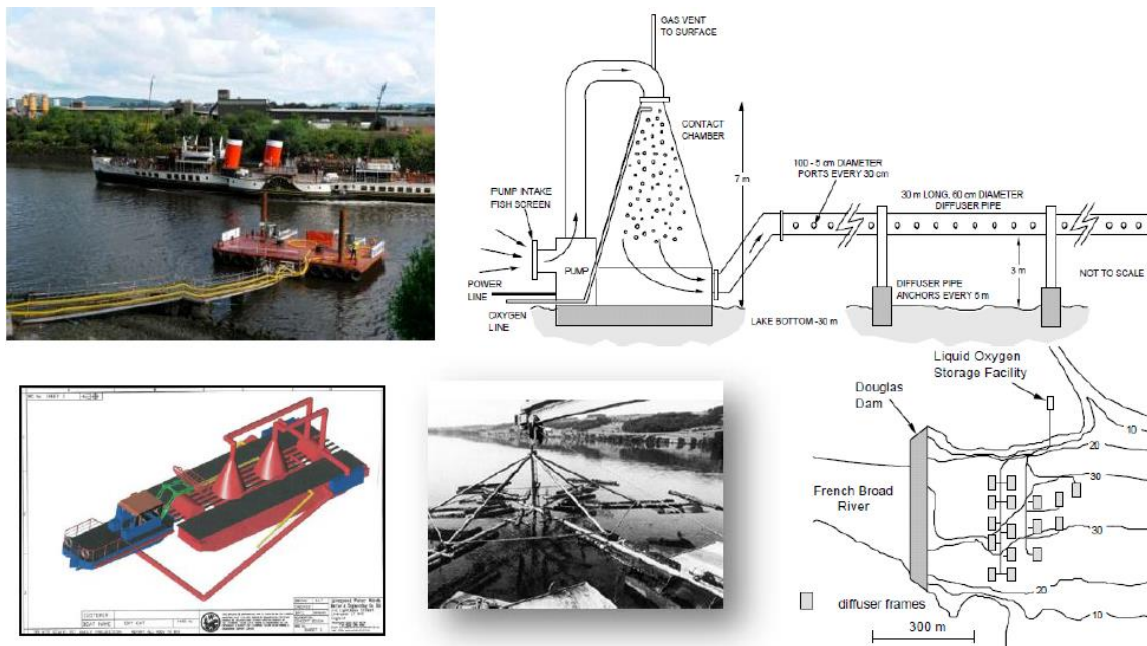


Figura 1 – Sistemas de aeração forçada nos Rios Tâmisia, Rio Clyde (Escócia), Lago Baldegg (Suíça), Represa Douglas, Lago Richard B. Russel, Lago Amish e Reservatório Camanche (EUA).

Nos corpos d'água onde essa técnica vem sendo aplicada constata-se:

- Aumento da biodiversidade aquática;
 - Na Represa Douglas, EUA, o gás sulfídrico não foi mais observado a partir da manutenção da concentração de OD ≥ 5 ppm;
 - Diminuição dos teores de manganês, ferro, amônia, fósforo e sulfetos (40–80%)
- A eficiência na transferência do OD é de 45-90%, dependendo da técnica aplicada.

OBJETIVO

O presente estudo apresenta uma estimativa da potência de aeração necessária para garantir níveis de oxigênio dissolvido de forma a manter o Rio Pinheiro em condições aeróbias. O objetivo da manutenção do corpo d'água em condições aeróbias é principalmente a redução da geração de odor através da liberação de gás sulfídrico. Trata-se de contribuição elaborada pelo presente grupo técnico e não relacionada a estudos definidos pela SABESP. Seu objetivo é tão somente fornecer subsídios básicos que permitam uma avaliação bastante rudimentar da possibilidade de melhoria das características da qualidade da água do rio Pinheiros através de sua aeração, visando principalmente à redução de odor. Não deve ser entendido como um tratamento, mas sim uma forma de aceleração do processo de autodepuração deste corpo de água. Como benefício incremental, termos uma melhoria da qualidade da água do rio Tietê, à jusante da Região Metropolitana de São Paulo. Também foi realizado um estudo, a partir de modelo matemático disponível no site da Agência Ambiental Americana (EPA), para estimar e avaliar se na eventual presença de gases dissolvidos no Rio Pinheiros, a liberação e mecanismo de dispersão, uma vez que há presença maciça de veículos nessa região – risco à saúde pública.

MATERIAIS E MÉTODOS

Desenvolvimento das hipóteses

Sulfetos são uma forma química do enxofre, gerada em águas normalmente por falta de OD. Relatórios de qualidade da água do Rio Pinheiros, disponíveis em sites da CETESB, demonstram a presença de sulfatos na massa líquida, os quais são reduzidos a sulfetos por reações biológicas e químicas, e produzem odor

desagradável, similar a ovo podre. A liberação é acentuada em situações onde o pH é reduzido a menor que 8. Basicamente, ou simplificada, ocorrem quatro reações até a transformação total do sulfeto em sulfato, sendo que duas dessas equações ocorrem entre o sulfeto e demais compostos presentes no meio (equações químicas 3 e 4), e uma delas com o tiosulfato formado na equação 3. A equação de primeira ordem de tempo de reação do sulfeto durante a oxidação foi determinada empiricamente por ALÉM SOBRINHO et al., conforme equação 1.



Teoricamente, a relação de oxigênio necessário para oxidar sulfetos é de 1:1. A concentração de sulfeto é o fator limitante da reação, e determinante do tempo de reação. O gás sulfídrico (H₂S) liberado do meio aquático passa a ser gerado em casos de anoxia na coluna d'água (falta de OD) e é perceptível ao ser humano, à distância, quando a concentração de sulfeto encontra-se acima de 2 mg/L.

$$\ln \text{Ct} / \text{C0} = - \text{K} \cdot \text{tr} \quad \text{equação 5}$$

Onde:

Ct = concentração inicial de S⁻² (mg/L)

C0 = concentração de S⁻² (mg/L) no tempo t

K = constante cinética de primeira ordem (min⁻¹)

tr = tempo de reação (min)

A aplicação da equação (1) aos resultados obtidos por ALÉM SOBRINHO et al permitiram determinar as seguintes constantes cinéticas:

$$\text{K1} = 0,0313 \text{ /min ou } 1,879/\text{h} \quad \text{equação 6}$$

$$\text{K2} = 0,068 \text{ /min ou } 0,407/\text{h} \quad \text{equação 7}$$

Utilizando a equação (1), temos que o tempo necessário para oxidar 16 mg/L de sulfeto até a concentração de 2 mg/L é de 2,0 a 2,5 h. A aeração das águas tem a eficiência máxima entre 85 e 90%. Nos testes realizados o tempo de operação ótima, com remoções entre 70% e 85% de S⁻², ocorre entre 40 e 50 minutos. A injeção de ar atmosférico e oxigênio puro não fazem diferença na eficiência de remoção de sulfetos.

Cálculos para aeração do canal do rio pinheiros

Características adotadas do canal do Rio Pinheiros:

Extensão: 25 km

Largura média= 85 m

Profundidade média= 4,5 m

Vazão= 30 m³/s

Tempo de residência= 3,7 dias

Como a intenção é que o meio não se torne anóxico para que ocorra a liberação de H₂S, e considerando que a relação O₂/HS⁻ (1,0 kg de O₂/Kg de HS⁻) é menor que a relação O₂/DBO₅ (1,3 kg de O₂/Kg de DBO₅), os cálculos a seguir tratam da concentração de DBO₅ no meio, variável esta relacionada a condição de autodepuração. Considerou-se ainda a manutenção de 1 mg/L como a concentração mínima ideal a ser mantida ao longo de todo o rio. Como os aeradores estarão distribuídos ao longo do canal, a concentração média será maior, já que ocorrerão picos de concentração no local de maior liberação de oxigênio pelos equipamentos, e essa concentração decairá até o mínimo de 1 mg/L, sendo aumentado novamente com a introdução forçada de mais oxigênio na massa líquida – Gráfico 1. A proposta, portanto, é de instalação de unidades de aeração distribuídas ao longo do rio com o intuito de manter uma aeração forçada e assegurar a autodepuração.

A distância entre as unidades de aeração foi estimada com base no modelo de STREETER e PHELPS (BEZERRA et al, 2008). Por esse modelo, a concentração de OD no rio versus o tempo pode ser estimada por meio da seguinte expressão:

$$\text{Ct} = \text{Cs} - \{ (\text{K1L0}/(\text{K2}-\text{K1})) \times (\text{e}^{-\text{K1t}} - \text{e}^{-\text{K2t}}) + (\text{Cs} - \text{C0}) \text{e}^{-\text{K2t}} \} \quad \text{equação 8}$$

Onde: Ct: Concentração de OD no tempo;

Cs: Concentração de OD de saturação;

C0: Concentração de OD na mistura;

L0: DBO de primeiro estágio no ponto de lançamento;

K1: Coeficiente de desoxigenação;

K2: Coeficiente de reoxigenação;

t: tempo

A DBO remanescente ao final de cada trecho foi estimada com base na equação abaixo:

$$L = L_0 \cdot e^{-K_1 t} \quad \text{equação 9}$$

Onde:

L = DBO remanescente

Na simulação foi adotado para coeficiente de desoxigenação (K1) o valor de $0,30 \text{ d}^{-1}$. Esse valor é maior que o de rios limpos ($0,09 - 0,21 \text{ dias}^{-1}$) e corresponde ao valor do limite inferior para água residuária fraca ($0,30 - 0,40 \text{ dia}^{-1}$). Já o valor do coeficiente de reoxigenação foi estimado com base na equação de O'CONNOR E DOBBINS (1958), conforme expressão abaixo:

$$K_2 = 3,73 V^{0,5} H^{-1,5} \quad \text{equação 10}$$

Onde:

V: Velocidade em m/s;

H: Profundidade em m.

A potência do sistema de aeração foi estimada adotando os seguintes parâmetros:

- Vazão: Variável ao longo do rio;
- DBO: variável ao longo do rio;
- Taxa de transferência de oxigênio para as condições padrão: $N_0 = 1,2 \text{ kg O}_2/\text{cv.h}$;
- Temperatura do líquido no verão: $25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Altitude do local em relação ao nível do mar: 720 m ;
- α : relação entre transferência de O_2 para água residuária e para água limpa = $0,85$
- β : relação entre o OD de saturação para água residuária e para água limpa = $0,95$
- CSW: concentração de OD de saturação para água limpa na altitude e temperatura de campo = $7,8 \text{ mg/L}$
- CL: OD a ser alcançado no rio = $5,0 \text{ mg/L}$

Para as condições de campo, tem-se:

$$N = N_0 \lambda \quad \text{equação 11}$$

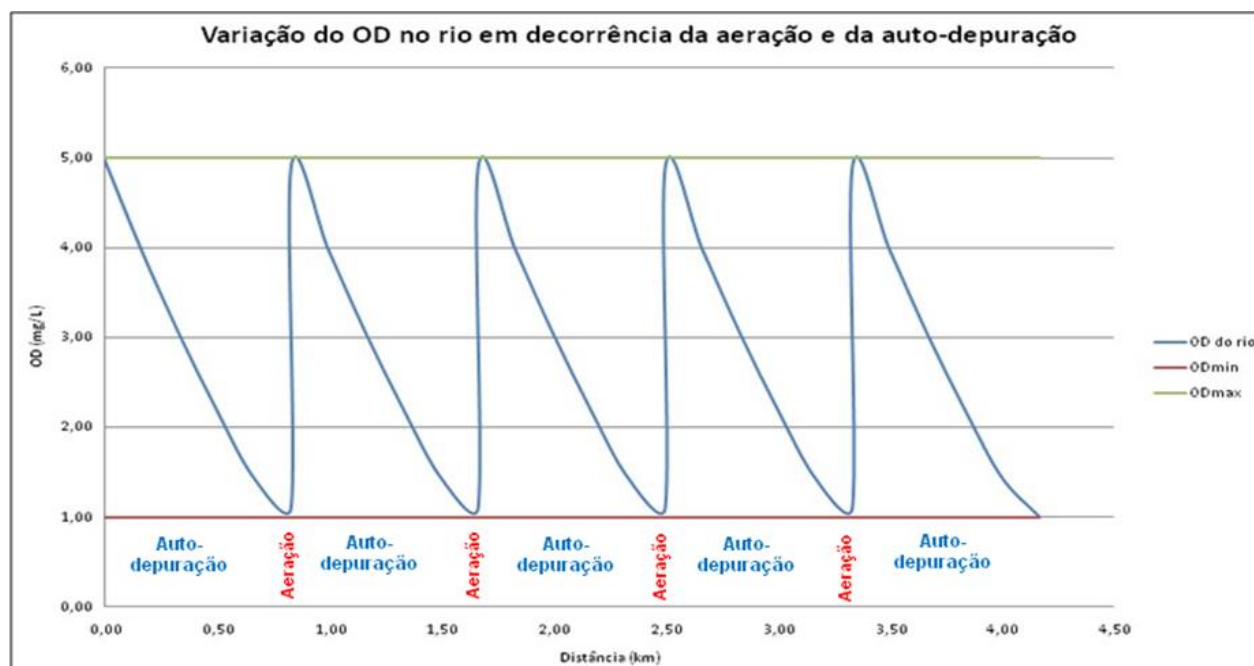


Gráfico 1: Variação do OD ao longo do rio a partir da aeração forçada

Onde:

λ : coeficiente de correção para condições de campo

$$\lambda = [\alpha (\beta C_{sw} - CL) 1,024 T^{-20}] / 9,17$$

$$\text{equação 12}$$

$\lambda = 0,25$

Logo, para as condições de campo:
 $N = 0,25 \times 1,2 = 0,30 \text{ kg O}_2/\text{cv.h}$

A fim de avaliar o impacto da elevação de OD no rio sobre a potência do sistema de aeração, foi feita simulação também para OD de 3,0 mg/L. Para essa nova condição, a taxa de transferência de oxigênio para as condições de campo será de $\lambda = 0,46$. Logo, para as condições de campo:

$N = 0,46 \times 1,2 = 0,55 \text{ kg O}_2/\text{cv.h}$

A necessidade de oxigênio foi estimada da seguinte forma:

- ✓ Para manutenção do OD entre 1 e 5 mg/L, $\text{Nec. O}_2 = 4(\text{g/m}^3) \times Q(\text{m}^3/\text{s}) \times 3,6(\text{s/h}) = 14,4 \times Q(\text{kg O}_2/\text{h})$
- ✓ Para manutenção do OD no rio entre 1 e 3 mg/L, $\text{Nec. O}_2 = 2(\text{g/m}^3) \times Q(\text{m}^3/\text{s}) \times 3,6(\text{s/h}) = 7,2 \times Q(\text{kg O}_2/\text{h})$

Cálculos complementares – oxidação do sulfeto

Adicionalmente, foi calculado o tempo e distância necessária para a oxidação de sulfeto em uma concentração inicial de 16 mg/L, até a concentração final de 2 mg/L, a partir da qual, mesmo em situação anóxica não ocorreria liberação de gás sulfídrico em concentração perceptível. Para tanto, foi utilizada a equação de primeira ordem determinada empiricamente por ALÉM SOBRINHO et al – equação 5. Aplicando as variáveis chega-se à distância necessária para $C_t = 16 \text{ mg/L}$ de 316 metros. Como o rio possui cerca de 25 km, a oxidação ocorreria em um pequeno trecho no início do rio.

Compostos orgânicos voláteis

Os VOCs presentes em um meio aquoso podem ser liberados para o ar, por vários mecanismos, adsorvidos e sedimentados, ou ainda, biodegradados. A transferência da fase líquida para a gasosa através do arraste com ar através pode ocorrer pela aeração superficial ou por ar difuso (aeração sub-superficial). Vários trabalhos técnicos têm estudado a volatilização dos VOC em sistemas de tratamento de esgoto através do arraste de ar. Considerando apenas as características similares entre os processos físicos e químicos que podem ocorrer em ambos os meios, apresentamos estimativas para o que pode ocorrer no Rio Pinheiros a partir de NAMKUNG e RITTMANN (1987):

$$V \frac{dS}{dt} = QS_0 - Q_eS - Q_wS + R_{\text{bio}} + R_{\text{ads}} + R_{\text{vol}} \quad \text{equação 13}$$

V = volume, m^3

S = concentração do VOC, g/m^3

t = tempo, dia

Q = vazão de entrada, m^3/dia

S_0 = Concentração inicial do VOC, g/m^3

Q_e = vazão de saída, m^3/dia

Q_w = vazão de lodo, m^3/dia

R_{bio} = taxa de acumulação do VOC por biodegradação, g/dia

R_{ads} = taxa de acumulação do VOC por adsorção, g/dia

R_{vol} = taxa de acumulação do VOC por volatilização, fase gasosa, g/dia

Assumindo um sistema estacionário, ou vazão constante, temos $V \frac{dS}{dt} = 0$

$$0 = Q(S_0 - S) + R_{\text{bio}} + R_{\text{ads}} + R_{\text{vol}} \quad \text{equação 14}$$

Volatilização: A transferência do VOC entre a fase líquida e a gasosa pode ser modelada como um processo de quasi-equilíbrio, se considerarmos a aplicação de ar difuso. Um balanço de massa nos dá:

$$R_{\text{vol}} = - \frac{G(P_{\text{ex}} - P_{\text{in}}) \times (\text{MW})}{RT} \quad \text{equação 15}$$

Onde:

G = vazão de ar, m^3/dia

P_{ex} = pressão parcial de saída do VOC, atm

P_{in} = pressão parcial de entrada do VOC, atm

R = constante universal dos gases ($8,206 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{atm}/^\circ\text{K} \cdot \text{mol}$)

T = temperatura absoluta, $^\circ\text{K}$

MW = peso molecular do VOC, g/mol

Considerando $P_{\text{in}} = 0$, já que na entrada o composto usualmente apresenta-se em concentrações baixas, temos:

$$R_{\text{vol}} = - \frac{G P_{\text{ex}} \times (\text{MW})}{RT} \quad \text{equação 16}$$

RT

Quando o gás deixa a fase líquida, a pressão parcial atinge um equilíbrio com a concentração solúvel (S):
 $P_{ex} = HS/ MW$ equação 17

Onde:

H = constante da lei de Henry, atm.m³/mol.

Quanto maior o valor de H, maior a tendência do composto em se volatilizar. Compostos facilmente voláteis possuem $H \geq 0,001$ atm.m³/mol. Substituindo as duas equações anteriores, verifica-se que a taxa de volatilização R_{vol} é linear à taxa de ar aplicado (G) e à concentração S no meio aerado, assim como à constante da Lei de Henry, H.

$R_{vol} = - GHS/RT$ equação 18

Adsorção: a adsorção pode ocorrer através da capacidade que um composto orgânico tem de aderir a um sólido orgânico. A quantidade do composto removido via adsorção pode ser expresso por:

$R_{ads} = - Q_w.X_{vw}.q$ equação 19

Onde:

X_{vw} = concentração dos sólidos orgânicos, (g SSV/m³)

q = densidade do composto adsorvido (g/g SSV)

O particionamento na massa orgânica seguirá uma relação linear com a concentração:

$q = k_p.S$

O coeficiente de partição k_p (m³/g SSV) pode ser proporcional ao coeficiente de partição octanol/água, K_{ow} (m³ H₂O/m³ octanol), o qual é proporcional à hidrofobia do contaminante:

$k_p = (6,3 \times 10^{-7}) \text{foc} \cdot K_{ow}$ equação 20

Onde:

foc = fração do VOC no sólido (g carbono orgânico/g sólido)

Um alto valor de K_{ow} indica que o composto é susceptível a adsorção. Para células biológicas, foc = 0,531, o que nos dá:

$k_p = (3,345 \times 10^{-7}) K_{ow}$ equação 21

Substituindo nas equações anteriores temos:

$R_{ads} = - (3,345 \times 10^{-7}) Q_w.X_{vw} \cdot K_{ow}$ equação 22

Biodegradação: baseado na cinética de Monod, a taxa de reação biológica será:

$R_{bio} = - kX_aSV/(K_s + S)$ equação 23

Onde:

k = taxa máxima específica de utilização do substrato, g/g SSV.dia

X_a = concentração células ativas, g SSV/m³

K_s = constante de meia-velocidade de Monod, g/m³

Assumindo que a concentração dos VOCs no início é baixa, temos $S < S_0 \ll K_s$, reduzindo a cinética de Monod para uma relação de primeira ordem para S:

$R_{bio} = - k_1 X_a SV$ equação 24

Onde:

k₁ = constante de reação biológica de primeira ordem (=k/ K_s), m³/g SSV.dia

A combinação de todos os mecanismos nos fornece um balanço de massa para um único composto:

$0 = Q(S_0 - S) - (GH/RT) - (3,345 \times 10^{-7}) Q_w.X_{vw} \cdot K_{ow} \cdot S - k_1 X_a SV$ equação 25

Para um reator estacionário, desejando obter a concentração S, temos:

$S = (Q \cdot S_0)/Q + (GH/RT) + (3,345 \times 10^{-7}) \cdot Q_w.X_{vw} \cdot K_{ow} \cdot S + k_1 X_a SV$ equação 26

Podemos considerar que as perdas de VOC por biodegradação e adsorção no Rio Pinheiros serão mínimas, sendo o mecanismo principal a volatilização devido as condições forçadas de aeração. Desta forma, K_{ow} e k₁ são iguais a zero teremos então:

$S = Q \cdot S_0/Q + (GH/RT)$ equação 27

RESULTADOS

Aeração

Na tabela 3 estão os resultados da simulação feita em planilha excell com base no modelo de Streeter-Phelps para manter OD no rio em entre 1,0 e 5,0 mg/L. O total é de 5.828 cv a ser aplicado.

Tabela 3: Estimativa de potência do sistema de aeração para manutenção do OD no rio entre 1 e 5 mg/L

Estação de aeração	Vazão (m ³ /s)	Velocidade média no trecho (m/s)	Profundidade média no trecho (m)	Distância entre estações (m)	Distância acumulada (m)	DBO _{5,20} (mg/L)	DBO remanescente (mg/L)	Nec. O ₂ (kg O ₂ /h)	Potência (cv)
1	1,47	0,011	3,43	0	0	29	37,3	21,2	71
2	1,47	0,011	3,43	290	290		33,2	21,2	71
3	1,47	0,011	3,43	330	620		29,0	21,2	71
4	1,47	0,011	3,43	390	1.010		24,8	21,2	71
5	1,47	0,011	3,43	450	1.460		20,7	21,2	71
6	1,47	0,011	3,43	570	2.030		16,5	21,2	71
7	1,47	0,011	3,43	750	2.780		12,2	21,2	71
8	1,47	0,011	3,43	1.120	3.900		7,8	21,2	71
9	5,15	0,024	3,80	2.550	6.450	42	40,0	74,2	247
10	5,15	0,024	3,80	600	7.050		35,8	74,2	247
11	5,15	0,024	3,80	650	7.700		31,8	74,2	247
12	5,15	0,024	3,80	750	8.450		27,6	74,2	247
13	5,15	0,024	3,80	900	9.350		23,4	74,2	247
14	5,15	0,024	3,80	1.050	10.400		19,2	74,2	247
15	5,15	0,024	3,80	1.400	11.800		14,9	74,2	247
16	5,15	0,024	3,80	1.900	13.700		10,5	74,2	247
17	11,41	0,05	3,32	3.200	16.900	53	40,0	164,3	548
18	11,41	0,05	3,32	1.250	18.150		35,8	164,3	548
19	11,41	0,05	3,32	1.450	19.600		31,6	164,3	548
20	11,41	0,05	3,32	1.650	21.250		27,4	164,3	548
21	11,41	0,05	3,32	1.950	23.200		23,1	164,3	548
22	11,41	0,05	3,32	2.450	25.650		18,7	164,3	548

Total 5.828 cv

Tabela 4: Estimativa de potência do sistema de aeração para manutenção do OD no rio entre 1 e 3 mg/L

Estação de aeração	Vazão (m ³ /s)	Velocidade média no trecho (m/s)	Profundidade média no trecho (m)	Distância entre estações (m)	Distância acumulada (m)	DBO _{5,20} (mg/L)	DBO remanescente (mg/L)	Nec. O ₂ (kg O ₂ /h)	Potência (cv)
1	1,47	0,011	3,43	0	0	29	37,3	10,6	19
2	1,47	0,011	3,43	140	140		35,3	10,6	19
3	1,47	0,011	3,43	150	290		33,4	10,6	19
4	1,47	0,011	3,43	155	445		31,4	10,6	19
5	1,47	0,011	3,43	160	605		29,5	10,6	19
6	1,47	0,011	3,43	180	785		27,5	10,6	19
7	1,47	0,011	3,43	200	985		25,4	10,6	19
8	1,47	0,011	3,43	220	1.205		23,3	10,6	19
9	1,47	0,011	3,43	240	1.445		21,2	10,6	19
10	1,47	0,011	3,43	260	1.705		19,1	10,6	19
11	1,47	0,011	3,43	300	2.005		17,0	10,6	19
12	1,47	0,011	3,43	340	2.345		14,9	10,6	19
13	1,47	0,011	3,43	400	2.745		12,7	10,6	19
14	1,47	0,011	3,43	480	3.225		10,5	10,6	19
15	1,47	0,011	3,43	615	3.840		8,2	10,6	19
16	1,47	0,011	3,43	850	4.690		5,8	10,6	19
17	1,47	0,011	3,43	1.550	6.240		40,0	10,6	19
18	5,15	0,024	3,80	300	6.540	42	38,1	37,1	67
19	5,15	0,024	3,80	300	6.840		36,1	37,1	67
20	5,15	0,024	3,80	320	7.160		34,1	37,1	67
21	5,15	0,024	3,80	350	7.510		32,0	37,1	67
22	5,15	0,024	3,80	360	7.870		29,8	37,1	67
23	5,15	0,024	3,80	390	8.260		27,8	37,1	67
24	5,15	0,024	3,80	430	8.690		25,7	37,1	67
25	5,15	0,024	3,80	470	9.160		23,6	37,1	67
26	5,15	0,024	3,80	520	9.680		21,5	37,1	67
27	5,15	0,024	3,80	560	10.240		19,4	37,1	67
28	5,15	0,024	3,80	650	10.890		17,2	37,1	67

29	5,15	0,024	3,80	730	11.620		15,0	37,1	67
30	5,15	0,024	3,80	860	12.480		12,8	37,1	67
31	5,15	0,024	3,80	1.040	13.520		10,6	37,1	67
32	5,15	0,024	3,80	1.380	14.900		8,2	37,1	67
33	5,15	0,024	3,80	2.000	16.900		40,0	37,1	67
34	11,41	0,05	3,32	630	17.530	53	37,9	82,2	149
35	11,41	0,05	3,32	650	18.180		35,8	82,2	149
36	11,41	0,05	3,32	720	18.900		33,6	82,2	149
37	11,41	0,05	3,32	750	19.650		31,5	82,2	149
38	11,41	0,05	3,32	810	20.460		29,3	82,2	149
39	11,41	0,05	3,32	900	21.360		27,1	82,2	149
40	11,41	0,05	3,32	990	22.350		24,9	82,2	149
41	11,41	0,05	3,32	1.080	23.430		22,7	82,2	149
42	11,41	0,05	3,32	1.170	24.600		20,5	82,2	149
43	11,41	0,05	3,32	1.350	25.950		18,2	82,2	149

Total 2.900 cv

Volatilização e dispersão de gases

Para os VOCs monitorados no Rio Pinheiros, temos as seguintes informações (EMAE, 2008):

Tabela 2 – Concentrações de VOC no Rio Pinheiros/vazão

VOC	H (atm.m ³ /mol)x10 ⁻³	Concentração Rio Pinheiros µg/L – P4A	
		média	máxima
Benzeno	4,6	-	2*
Clorobenzeno		-	2*
Clorofórmio	3,4	11,9	75
1,2 dicloro etano	1,1	-	2*
Etilbenzeno	5,7	2	4,2
Tetracloroeto de carbono	22,6	< 2	< 2
Tolueno	5,7	36,325	204
1,2 Trans di cloroetileno	5,7	-	2*
1,1,1 Tri cloro etano	3,6	-	2*
Tricloro etileno	10	-	2*
Xileno	7,87	-	2*

* valor adotado igual a 2 µg/L, embora o resultado analítico tenha sido <2 µg/L (limite do método). Este valor foi adotado já que não permite que se afirme a inexistência dos compostos no Rio Pinheiros.

Conforme foi modelado para o Oxigênio dissolvido, o Rio Pinheiros foi dividido em 3 módulos com 3 vazões:

$$Q1 = 1,47 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q2 = 5,15 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q3 = 11,41 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$T = 298,15$$

$$G = 709.206 \text{ m}^3/\text{dia} - \text{ aerador superficial de baixa rotação}$$

$$R = 8,206 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{atm}/^\circ\text{K} \cdot \text{mol}$$

A tabela 3 apresenta os resultados para as vazões acima, e para os valores médios e máximo de concentração (mg/m^3):

Tabela 3 – Limites máximos toleráveis no ar para a concentração de VOC.

VOC	Q1 = 1,47 m^3/s		Q2 = 5,15 m^3/s		Q3 = 11,41 m^3/s	
	Concentração					
	Média	Máx	Média	Máx	Média	Máx
Benzeno	-	1,98	-	1,99	-	2
Clorobenzeno	-	1,98	-	1,99	-	2
Clorofórmio	11,81	74,42	11,87	74,83	11,89	74,93
1,2 dicloro etano	-	1,99	-	2	-	2
Etilbenzeno	1,97	4,15	1,99	4,18	2	4,19
Tetracloroeto de carbono	1,9	1,9	1,97	1,97	1,99	1,99
Tolueno	35,86	198,42	36,19	200,26	36,26	200,66
1,2 Transdicloroetileno	-	1,97	-	1,99	-	2
1,1,1 Tricloroetano	-	1,98	-	1,99	-	2
Tricloroetileno	-	1,96	-	1,99	-	1,99
Xileno	-	1,96	-	1,99	-	2

Os dados são coerentes com os de Namkung e Rittmann (1987) e de Pereira e Andrade (2000). Na tabela 4 abaixo temos os limites toleráveis conforme a lei.

Tabela 4 – Limites máximos toleráveis no ar conforme legislação específica:

VOC	Norma segurança ocupacional brasileira – até 48 h (mg/m^3)
Benzeno	Não é tolerado-*
Clorobenzeno	275
Clorofórmio	94
1,2 dicloroetano	640
Etilbenzeno	340
Tetracloroeto de carbono	50
Tolueno	290
1,2 Transdicloroetileno	-
1,1,1 Tricloroetano	-
Tricloroetileno	420
Xileno	340

* EU: 0,005 mg/m^3 no ar atmosférico

Os estudos realizados por Roberts et al (1984) e Zambon et al (2003) para difusores de ar apresentam uma menor capacidade de arraste de ar, embora esta ainda seja significativa nos resultados de Roberts et al para alguns dos VOCs trabalhados nesta simulação. Em Zambon et al (2003) verifica-se uma volatilização entre 1,5 e 13% para o Tetracloroeto de carbono, enquanto em Roberts et al (1984) este valor fica entre 50 e 75%. Os trabalhos de Zambon et al (2003) divergem razoavelmente dos resultados obtidos por Namkung e Rittmann (1987), Pereira e Andrade (2000) e Roberts et al (1984).

Dispersão da pluma: Para a simulação da dispersão da pluma foi utilizado o modelo *Screen Air Dispersion*, disponibilizado pela EPA, SCREEN3. O modelo utiliza uma distribuição gaussiana para cálculo da dispersão da pluma, e uma única fonte. O modelo fornece as concentrações máximas da fonte por ponto, área, flare e volume. Para o composto **benzeno** foi construída uma curva - figura abaixo. Foi inserida a taxa em $\text{g}/\text{m}^2.\text{s}$ de formação de benzeno gás para uma área de um dos trechos do Rio Pinheiros. Considerou-se ainda uma altura de 10 metros entre a superfície da lâmina d'água e a pista da marginal Pinheiros. Não foi inserida qualquer informação sobre vento, o que pode tornar mais otimista o resultado obtido.

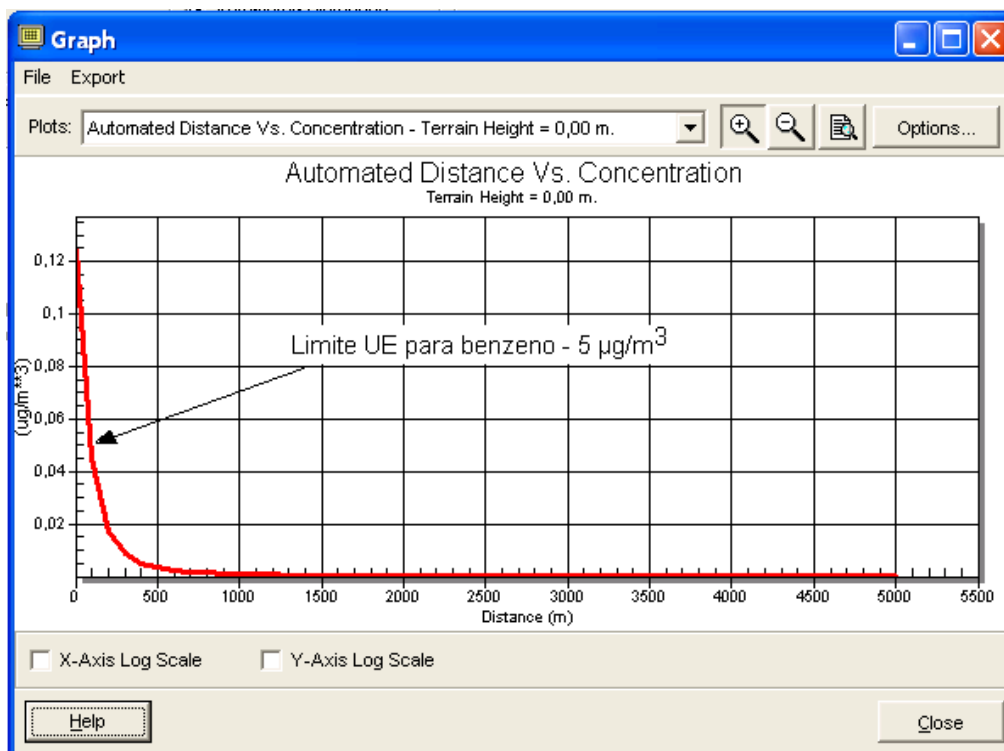


Figura 2 - Dispersão da pluma de benzeno calculada pelo modelo *Screen Air Dispersion*, disponibilizado pela EPA, SCREEN3.

É importante salientar que os modelos aplicados apresentam uma série de limitações, que devem ser consideradas. Não existe limite de referência para o meio ambiente para os VOCs analisados, com exceção do limite definido na União Européia para o benzeno. Recomenda-se um estudo que avalie a pluma de dispersão dos poluentes e uma análise de risco. Conforme pode ser observado na figura, o limite definido pela Legislação Européia, de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seria atingido nos primeiros 100 metros, partindo-se da superfície da lâmina d'água.

O resultado obtido indica, portanto, que poderão existir restrições relacionadas a saúde ocupacional – operários que estejam atuando próximos ao rio durante o período de aeração. Entretanto, esta análise deve ser refeita pois utilizei dados para o benzeno que não condizem com a realidade - a análise do monitoramento atingiu o limite de detecção, e por isso usei esse limite. Entretanto, a concentração desse composto no Rio Pinheiros deve ser menor do que a utilizada.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A avaliação dos resultados deve passar ainda por uma análise da viabilidade econômico-financeira. Os trabalhos analisados, com fundamentação na realidade de outros países, demonstram que apenas a melhoria dos processos de tratamento de esgoto, com avanços para tratamento terciário ou avançado não resolveram os problemas em canais e rios retificados, dentro do foco do presente estudo: contenção de maus odores e manutenção dos níveis de concentração de OD. Diante disso, seria interessante apresentar estudo que avaliasse os custos envolvidos para se atingir nas principais estações de tratamento de esgoto da Região Metropolitana de São Paulo até que o limite da capacidade de engenharia em entregar efluentes tratados da melhor qualidade possível. Diante da impossibilidade de se mensurar esse custo, comparamos o custo da presente alternativa com o custo de implantação de uma estação convencional.

Os custos envolvidos na implantação de aeração forçada no Rio Pinheiros relacionam-se à aquisição de equipamentos de aeração, instalação dos mesmos e manutenção contínua. Para atingir um patamar de concentração de até $3 \text{ mg}/\text{L}$ de OD, a potência instalada seria de 2900 cv. Comparativamente, seria a mesma potência instalada para uma ETE para 1750 L/s, com sistema de lodos ativados. Apenas a ETE Barueri trata atualmente 9500 L/s, por sistema de lodos ativados. Em termos de retirada de lodo que será formado no processo, podemos estabelecer a mesma comparação utilizando para isso a potência de aeração instalada

necessária para oxidar a matéria orgânica. Na ETE Barueri, é correto afirmar que são gerados aproximadamente 5,4 vezes mais lodo (em volume) do que seria gerado na presente alternativa. Importante salientar que o projeto trata apenas da aeração, não sendo possível comparar o processo existente na ETE Barueri e o investimento e custos exigidos, uma vez que nessa ETE ainda há outras unidades operacionais instaladas. De forma que a solução apresentada ainda apresenta a hipótese de ser menos onerosa. Apesar de não estar atualizado, apresentamos levantamento de custos para 2010, quando este trabalho foi inicialmente elaborado.

O consumo com energia elétrica na ETE Barueri, da época deste estudo, era de aproximadamente R\$ 721.000,00/mês.

Tabela 5 – Custos com energia elétrica

Oxigênio dissolvido no Rio Pinheiros	Aeração entre 1,0 e 5,0 mg/L	Aeração entre 1,0 e 3,0 mg/L
Potência do sistema de aeração (cv)	5.280	2.900
Potência consumida (kW.h/mês)	3.088.374	1.536.768
Gasto mensal com energia (R\$/mês)*	R\$ 360.531,00	R\$ 179.500,00
% custo em relação a ETE Barueri	49%	25%

*estimativas de 2010

Tabela 6 – Custos para aquisição dos aeradores

Preço do aerador submerso (25 cv) R\$/un*	R\$ 40.000	
Número de aeradores de 25 cv	233	116
Custo de aquisição dos aeradores (R\$)	R\$ 9.320.000	R\$ 4.640.000
Custo anual com manutenção (R\$/ano)	R\$ 372.800	R\$ 185.600
Custo mensal com manutenção (R\$/mês)	R\$ 31.067	R\$ 15.467

*estimativas de 2010

CONCLUSÃO

Com base nos resultados podemos emitir as seguintes hipóteses:

- Para manter o OD no rio Pinheiros entre 1,0 e 5,0 mg/L, serão necessárias 22 unidades de aeração distribuídas ao longo do mesmo. A potência total das unidades de aeração será da ordem de 5.800 cv;
- Para manter OD entre 1,0 e 3,0 mg/L no rio Pinheiros, serão necessárias 43 unidades de aeração distribuídas ao longo do rio. A potência total das unidades de aeração será da ordem de 2.900 cv;
- A DBO₅ pode ser considerada a variável crítica e determinante da concentração de oxigênio dissolvido no meio.
- A aeração dos rios é uma alternativa aplicada em diversos países onde se constatou a necessidade pelas características dos canais e a não ocorrência de aeração natural, o que ocorre em rios naturais. Torna-se, portanto, uma alternativa viável e factível, técnica e economicamente considerando os dados aqui apresentados, como solução para o Rio Pinheiros.

Com relação a formação e dispersão de gases orgânicos:

- Embora possa ocorrer um arraste significativo de VOCs para o ar atmosférico, as concentrações esperadas estão abaixo dos limites de tolerância da legislação brasileira para a saúde ocupacional (exposição de até 48 h). A distância em que o limite europeu seria atendido é de aproximadamente 100 metros a partir da fonte, para o composto benzeno. Entretanto, não foram considerados dados climatológicos como o vento, por exemplo.

Importante ainda considerar que:

- Em comparação aos dados de qualidade do ar de grandes metrópoles brasileiras, em relação ao benzeno, verifica-se que não são atendidos os padrões estabelecidos por lei (SOUZA, 2002)
- Nos trabalhos referenciados neste estudo as principais variáveis que interferem na porcentagem de volatilização dos VOCs estudados são: (1) Tamanho do diâmetro da bolha, conforme a tecnologia aplicada; (2) Ocorrência de turbulência no meio; (3) Taxa/vazão de ar aplicado; (4) Profundidade da aplicação.
- O aerador superficial, mesmo com gradeamento a montante, pode apresentar problemas operacionais em virtude da presença de sólidos (fibras, plásticos, etc). No rio, esses problemas, provavelmente, serão ainda maiores. Portanto, esse é um desafio a ser considerado;

- Na simulação não foi considerada a demanda bentônica. Se adotarmos uma demanda bentônica de 1,5 g O₂/m².dia (THOMANN & MUELLER (1987) a potência para atender a demanda bentônica será da ordem de 443 cv (((85m x 25.000m x 1,5 gO₂/m².dia/24 h/dia)/1000 g/kg)/0,30 kgO₂/cv.h) para elevarmos OD até 5,0 mg/L. Para elevarmos OD até 3,0 mg/L a potência do sistema de aeração será da ordem de 242 cv.
- Os valores de vazão e de velocidade adotados provêm de uma simulação matemática com uso do software QUAL2E, cujos dados foram cedidos pela PI. O cenário simulado é para o ano de 2018, considerando o atingimento da meta de coleta de 90% e de tratamento de esgotos, 100%.
- Os dados de DBO_{5,20} utilizados na simulação foram extraídos do relatório de Qualidade das Águas Superficiais da CETESB de 2010;
- A concentração de sulfeto considerada neste tudo se refere aos dados da década de 80, da Barragem de Pirapora. Não existem dados mais recentes a respeito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALÉM SOBRINHO, P.; TIRLONE, C. E.; GASI, T. M. T.; ROSSIN, C. A.; NABHAN, N. M. Estudos sobre oxidação de sulfetos em reservatórios. CETESB. 1985.
2. NAHON, I. M. Sistema de apoio à análise de outorga de lançamento de efluentes para a variável demanda bioquímica de oxigênio: Estudo de caso na Bacia do Alto Iguaçu. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2006.
3. NAMKUNG, E. RITTMANN B. E. - Estimating volatile organic compounds emissions from publicly owned treatment works. Water Environment Federation, V.59. n. 7, p: 670-678, 1987.
4. SOUZA, K. R. P. Estudos sobre compostos orgânicos voláteis presentes no ar do município de Paulínia. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas, 2002.
5. TIRLONE, C. E.; ROSSIN, C. A.; AWAZU, L. A. M.; SERIACOPI, M. T.; HADDAD, E.; RIVELLI, V. Ensaio e métodos para determinação da oxidação de sulfetos em reservatório. CETESB. 1985.
6. ZAMBON, R. C. MORITA, D. M. SOUZA, P. A. Modelo matemático de remoção de compostos orgânicos voláteis em unidades de arraste com ar difuso. Revista de Engenharia Sanitária. 2003.
7. PEREIRA, I. W. ANDRADE, E. M. Estudo sobre compostos orgânicos voláteis na estação de tratamento de esgotos de Suzano, SP. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.
8. EMAE (2009). Relatórios dos testes de flotação do Rio Pinheiros. Disponível em: <http://www.emae.com.br/arquivos/internet/Projetos%20e%20Empreendimentos/Melhoria%20das%20Aguas%20do%20Rio%20Pinheiros/Volume%201%20-%20Sumario .pdf>