

DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA DE AERAÇÃO POR CIRCULAÇÃO ARTIFICIAL DA COLUNA D'ÁGUA PARA O RESERVATÓRIO GUARAPIRANGA, EM SÃO PAULO

Luiz Henrique Werneck de Oliveira⁽¹⁾

Engenheiro Sanitarista pela Escola de Engenharia Mauá; Bacharel em Ciências Sociais pela Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da USP; Mestre em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da USP; Doutorando em Engenharia pela Escola Politécnica da USP; Engenheiro da COBRAPE, coordenador de trabalhos relacionados à qualidade da água e gerenciamento de resíduos sólidos.



Lilian C. Poll

Engenheira Civil pela Faculdade de Engenharia Industrial, com especialização em Obras Hidráulicas; curso de Extensão Universitária no Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento de Resíduos Industriais Perigosos e estágio na Central de Tratamento de Resíduos Industriais Perigosos, na Alemanha. Engenheira da COBRAPE, atuando junto ao Programa Guarapiranga na área de qualidade da água e gerenciamento de resíduos sólidos.

Alceu Guérios Bittencourt

Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia da Universidade Federal do Paraná, com Curso de Especialização em Administração de Empresas para Graduados da Fundação Getúlio Vargas. Diretor da COBRAPE - Cia. Brasileira de Projetos e Empreendimentos, a partir de 1989; responsável técnico pelos trabalhos da empresa nos Estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná.

Carlos Alberto Amaral de Oliveira Pereira

Engenheiro Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; Diretor Técnico da COBRAPE - Cia. Brasileira de Projetos e Empreendimentos, a partir de 1992; atualmente é coordenador técnico de equipes de trabalho nos Estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná.

Jonathan French⁽²⁾

Bacharel em Engenharia e Física Aplicada pela Harvard University; Mestre em Engenharia Hidráulica e Civil pelo California Institute of Technology; Doutor em Oceanografia e Hidráulica Avançada pelo California Institute of Technology; Engenheiro da CDM - Camp Dresser & McKee International, desde 1971; especialista em recursos hídricos.

Endereço⁽¹⁾: COBRAPE Cia. Brasileira de Projetos e Empreendimentos: Rua Pinheiros 1405 - 1º andar - Pinheiros - São Paulo - SP - CEP: 05422-012 - Brasil - Tel: (011) 813-2111 - Fax: (011) 813-2111 - e-mail: cobrape@dialdata.com.br.

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido em função da constatação de problemas nas condições de oxigenação do fundo do reservatório Guarapiranga, principalmente nas zonas mais profundas, próximo à captação. A partir de dados fornecidos pela SABESP, através do monitoramento sistemático de oxigênio dissolvido e temperatura, foi constatada uma anoxia cada vez mais severa e freqüente nos meses de verão, de acordo com a plotagem de curvas “iso-oxigênio

dissolvido” e “iso-termas”. As conseqüências da anoxia podem incluir a ressolubilização das cargas internas sedimentadas no fundo, com a liberação de quantidades significativas de nutrientes na coluna d’água. A presença de tais constituintes em águas de abastecimento é indesejável, além de causar o agravamento das condições ecológicas do reservatório, contribuindo para novas florações de algas. Para enfrentar o problema detalhou-se um sistema de aeração por circulação artificial da coluna d’água do reservatório, cuja metodologia de dimensionamento é descrita no presente trabalho. Trata-se de uma aplicação da teoria de jatos e plumas para calcular a indução de quantidade de movimento capaz de promover a circulação da coluna d’água com baixo consumo de energia, devido ao efeito das plumas de bolhas de ar em ascensão desde o fundo até a superfície. A racionalização do número de fontes de ar é apresentada, bem como a estimativa de perda de carga em função do diâmetro dos tubos de ar, no sentido de definir um arranjo otimizado de condução das vazões de ar pretendida aos locais desejados para promover a mistura com o grau de intensidade necessário, sem efeitos perversos de excesso de mistura capazes de perturbar os sedimentos, mas permitindo misturar o volume alvo na escala de tempo definida.

PALAVRAS-CHAVE: Reservatório Guarapiranga, Anoxia, Aeração, Circulação Artificial, Dimensionamento.

INTRODUÇÃO

O reservatório Guarapiranga é subtropical de altitude, raso, de grande porte, e dendrítico.

Constatou-se, anteriormente, que sua dinâmica de oxigênio é intimamente associada às grandes cargas externas de nutrientes e ao fenômeno de estratificação por pequenos diferenciais de temperatura nos meses de verão. Tal fenômeno ocorre em reservatórios artificiais, mesmo os tropicais (FROELICH *et al.*, 1978). Neste caso, o padrão de estratificação térmica é do tipo polimítico, ocorrendo a mistura diversas vezes por ano (THOMAS, MEYBECK e BEIM, 1992). A estratificação constatada pelo monitoramento é fraca e instável. Embora não cheguem a definir uma termoclina e tampouco uma divisão clara entre o epilímnio e o hipolímnio, tais ciclos de estratificação e mistura produzem resultados identificáveis na qualidade da água, tais como deficiência de oxigenação na porção mais profunda (THORNTON; KIMMEL e PAYNE, 1990). Estas situações de anoxia podem ser associadas a cargas internas outrora sedimentadas no fundo, com a liberação de quantidades significativas de Fe^{++} , Mn^{++} , PO_4^{+++} , e S^- , que se ressolubilizam e se tornam disponíveis na coluna d’água (KORTMANN, 1980; KORTMANN e RICH, 1994). A presença de tais constituintes em águas de abastecimento é indesejável, além de causar o agravamento das condições ecológicas do reservatório, afetando todo o equilíbrio de especiação de metais e nutrientes (STUMM e MORGAN, 1970; SAWYER, McCARTY e PARKIN, 1994), contribuindo para intensificar novas florações de algas.

Ações de restauração de qualidade da água de reservatórios podem ser procedidas tanto na bacia hidrográfica quanto diretamente no corpo d’água. No caso do Programa Guarapiranga, as ações que visam garantir a sustentabilidade da recuperação são compostas por investimentos

em infra-estrutura sanitária e no estabelecimento da gestão futura da bacia. Até que tais ações surtam efeito e estejam plenamente em regime, e para aumentar o grau de segurança quanto à manutenção de qualidade da água compatível com seu uso para o abastecimento público, ações de intervenção direta no corpo d'água foram consideradas para implantação (COBRAPE, 1995).

Dentre estas, destaca-se o procedimento de aeração por circulação artificial do reservatório, que deve garantir boas condições de oxigenação em toda a coluna d'água de uma determinada área de influência. Como não ocorre uma definição clara da termoclina nos eventos de estratificação do Guarapiranga, optou-se pelo procedimento de promover a circulação artificial, induzida por plumas de bolhas de ar em movimento ascensional (COOKE *et al.*, 1992; KORTMANN, KNOECKLEIN e BONNELL, 1994). Tal prática já é conhecida e aplicada no exterior, com resultados geralmente benéficos para a qualidade da água (LACKEY, 1973). No sentido de garantir que o grau de mistura não seja nem excessivo nem insuficiente, aplicou-se uma metodologia de dimensionamento do sistema quanto à vazão de ar necessária para misturar o volume pretendido na escala de tempo pretendida (LEMCKERT e IMBERGER, 1993). A escala de tempo para a mistura foi definida em função de estudos de demandas de oxigênio exercidas por sedimentos de corpos d'água eutrofizados (KORTMANN, 1980; KOLB e HEINEMAN, 1995).

OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo do trabalho é estabelecer uma metodologia de dimensionamento de um sistema de aeração por circulação artificial da coluna d'água como meio de equacionar o problema de falta crônica de oxigênio dissolvido observada no fundo da coluna d'água do reservatório Guarapiranga nos meses de verão, fenômeno constatado a partir de dados de monitoramento da SABESP, sistematizados conforme metodologia de desenvolvimento de curvas “iso-oxigênio dissolvido” e “iso-termas” (OLIVEIRA *et al.*, 1995; COBRAPE, 1996).

METODOLOGIA

A partir da análise de curvas “iso-oxigênio dissolvido” e “iso-termas” desenvolvidas para o ponto de monitoramento próximo à captação do Guarapiranga em uma série histórica de dez anos e de curvas similares desenvolvidas para os demais pontos de monitoramento no ano de 1994, justificou-se a factibilidade de implementar um sistema de aeração por circulação artificial para o reservatório Guarapiranga (COBRAPE, 1995; 1996). A Figura 1 mostra a distribuição sazonal de concentrações de oxigênio dissolvido versus a profundidade no ponto de monitoramento GU-101, que representa a média dos perfis de 5 anos, onde aparecem dois intervalos anóxicos durante o verão, entre outubro e abril. Pode-se observar um padrão bimodal de anoxia severa, ocorrente nos meses de fevereiro e novembro, sem continuidade nos meses de dezembro e janeiro. A Figura 2 mostra uma análise semelhante para os perfis de temperatura do mesmo período, mostrando que as diferenças de temperatura são maiores entre a superfície e o fundo nos meses de verão, mesmo quando não ocorre a anoxia. O mês em que se espera a estratificação mais intensa é o de novembro, de forma simultânea à anoxia. No mês

típico de dezembro ocorre a diferença de temperatura, mas não ocorre anoxia com a mesma frequência. Disso decorre a necessidade de se prever um sistema de aeração por circulação artificial ágil o suficiente para ser ligado ou desligado em situações de emergência, ao mesmo tempo forte o suficiente para quebrar uma estratificação mais forte, e regulável de modo a lidar com situações de estratificação mais tênue.

Para estabelecer uma metodologia de dimensionamento foram analisadas as condições específicas do reservatório Guarapiranga no que tange às suas características morfológicas, sua dinâmica de estratificação e oxigenação, bem como as condições limnológicas do reservatório. Em função da batimetria do reservatório e da constatação da profundidade típica para a ocorrência de anoxia, foram estimadas taxas de liberação internas de nutrientes a partir dos sedimentos, avaliando-se o tempo necessário para a exaustão do oxigênio. Concluiu-se, para tais efeitos, ser necessário misturar o volume pretendido em um intervalo de aproximadamente cinco dias. Por ser uma prática inédita no Brasil, em escala considerável e aplicada a manancial estratégico, optou-se pelo dimensionamento de um sistema protótipo, capaz de influenciar 10% do volume mais representativo do reservatório, que corresponde à sua porção mais profunda e de jusante, próxima à tomada d'água, constituída por uma descarga de fundo. A porção do reservatório que se pretende influenciar é mostrada na Figura 3.

Considerando uma pluma de bolhas de ar em movimento ascensional em meio linearmente estratificado, para uma dado gradiente de densidade N , o fluxo de água Q_w induzido pela vazão Q_b sobe pela altura vertical L em variação de pressão, arrastando quantidade de água para dentro da pluma em sua porção inferior, onde a pressão é maior, para em seguida liberar a água radialmente para fora quando a pressão se torna menor, até a superfície, onde a pressão é igual à pressão atmosférica.

O parâmetro de controle Q_b é a vazão de ar que emerge da fonte de ar, a qual deve ser corrigida para as condições normais de temperatura e pressão pela equação [1] a seguir:

$$Q_b = H / [(H + D) \cdot Q_a] \quad [1]$$

Onde H é a pressão atmosférica absoluta no reservatório e D é a profundidade (10 metros de coluna d'água). Assumindo-se que o aquecimento adiabático seja nulo, define-se o parâmetro de "gradiente de densidade" conforme o equacionamento de mecanismos de "entrainment" da teoria de jatos e plumas, modelado pela equação de Brunt-Vaisälä, de frequência de densidade (em função da unidade), conforme a equação [2] seguir:

$$N = (g / \rho \cdot d\rho / dy)^{1/2} \quad [2]$$

Através da limitação da altura de subida (a pluma de bolhas não passa da superfície), é possível encontrar condição de contorno para sua solução, calculando o volume de ar necessário para movimentar certa massa d'água em determinado intervalo de tempo. Considerando a faixa de temperatura de 15 a 25°C, uma mudança de temperatura de 1°C resulta em uma mudança de densidade no fluido de 0,26kg/m³. Para $g = 9,81\text{m/s}^2$ e $\rho = 997\text{kg/m}^3$, tem-se o valor de N em função da variação de temperatura conforme a equação [3] a seguir:

$$N = 0,0016 \cdot T^{1/2} \quad [3]$$

Como a altura de subida da pluma de bolhas é limitada à profundidade da coluna d'água, esta pode ser expressa pela combinação das equações anteriores, resultando a equação [4]:

$$L = 4,5 [(Q_b \cdot g) / N^3]^{1/4} \quad [4]$$

E o fluxo de água a ser arrastado será dado pela equação [5] a seguir:

$$Q_w = 0,68 [(Q_b \cdot g)^3 / N^5]^{1/4} \quad [5]$$

Para gradientes de temperatura encontrados no reservatório Guarapiranga (1 a 8°C) e para determinadas faixas de valores de Q_b , a tabela 1 mostra, em negrito, os valores de Q_a superiores a 5 normais pés cúbicos por minuto (Nft³/min) é possível atingir valores de L superiores a 15m, o que atende às condições de profundidade máxima do reservatório, mesmo quando a diferença de temperatura seja de 8°C.

Tabela 1: variação da altura L do fluxo induzido conforme a equação [4].

Q _b (m ³ /s)	Q _a Nft ³ /min	N = DT =	0,016	0,023	0,032	0,045	Q _w (m ³ /s) p/ D = 10m
			1	2	4	8	
0,0002	1	L =	21,05	16,23	12,51	9,65	3,195
0,0006	2,5	L =	27,70	21,36	16,47	12,70	4,608
0,0012	5	L =	32,94	25,40	19,59	15,10	5,805
0,0024	10	L =	39,17	30,21	23,29	17,96	7,314
0,0060	25	L =	49,26	37,98	29,29	22,58	9,927
0,0120	50	L =	58,58	45,17	34,83	26,86	12,507
0,0241	100	L =	69,73	53,77	41,46	31,97	15,780

Em tais casos, as plumas emergem, ao invés de se dispersar radialmente a uma dada profundidade, quando ocorre o equilíbrio entre a pressão conferida pelo sistema e a pressão da coluna d'água. Como o valor de L não tem significado físico de ser maior do que o de D , as equações [2] e [3] podem ser usadas para calcular Q_w a partir de Q_b , assumindo-se valores artificialmente grandes de N , suficientes para forçar o L a ser igual à profundidade D da água. Combinando-se então aquelas duas equações, elimina-se N , do que resulta a equação [6]:

$$Q_w = 0,55 (Q_b \cdot g)^{1/3} \cdot D^{5/3} \quad [6]$$

A última coluna à direita da tabela 1 indica os valores de Q_w para $D=10$ metros. Para uma profundidade $D = 15$ metros, os valores são essencialmente duplicados.

RACIONALIZAÇÃO DAS FONTES DE AR

Como o fluxo de água induzido (Q_w) por vazões de ar é dado pelas equações [3] e [4], este é proporcional à energia da vazão de ar, é possível racionalizar as fontes de ar no sentido de aumentar a vazão de água induzida pela multiplicação de fontes com capacidade total igual. Dessa forma, uma única fonte de 100Nft³/min induz menos água do que duas fontes de 50Nft³/min, e do que quatro fontes de 25Nft³.min, e assim por diante. Isso, por sua vez, permite selecionar o melhor arranjo de distribuição de fontes de bolhas de ar para misturar o volume desejado, permitindo visualizar se um dado arranjo (número de fontes com dada capacidade) mistura o volume pretendido, ou se o volume misturado no tempo pretendido é insuficiente excessivo.

O equacionamento desenvolvido permite calcular os volumes misturados por circulação artificial e por “entrainment” a partir das plumas de bolhas de ar, para diversas fontes com diversas vazões, misturando o reservatório por um período de cinco dias consecutivos, conforme a tabela 2 a seguir:

Tabela 2: Fluxo induzido por 5 dias (m³) para as fontes indicadas.

Qb (Nft ³ /min)	Qw (m ³ /s)	3 fontes	5 fontes	8 fontes	10 fontes
1	3,195	4,14E+06	6,90E+06	1,10E+07	1,38E+07
2,5	4,608	5,97E+06	9,95E+06	1,59E+07	2,00E+07
5	5,805	7,52E+06	1,25E+07	2,01E+07	<i>2,51E+07</i>
10	7,314	9,48E+06	1,58E+06	<i>2,53E+07</i>	<i>3,16E+07</i>
25	9,927	1,29E+07	2,14E+07	<i>3,43E+07</i>	<i>4,29E+07</i>
50	12,507	1,62E+07	<i>2,70E+07</i>	<i>4,32E+07</i>	<i>5,40E+07</i>
100	15,780	2,05E+07	<i>3,41E+07</i>	<i>5,45E+07</i>	<i>6,28E+07</i>
250	21,387	<i>2,77E+07</i>	<i>4,62E+07</i>	<i>7,39E+07</i>	<i>9,24E+07</i>

A tabela acima mostra, em **negrito**, quais os arranjos que permitem misturar 20 milhões de metros cúbicos em cinco dias, em *itálico*, quais os arranjos que misturariam volumes maiores, gerando deseconomia do sistema, e quais os arranjos com capacidade insuficiente, em caracteres normais. Com base em tais variações é possível decidir qual o melhor arranjo de fontes com determinada capacidade em função da economia do sistema para diferentes volumes de aeração pretendidos para cada profundidade.

Dessa forma, pode-se escolher diferentes arranjos para circular o volume desejado, arbitrado em 20 milhões de metros cúbicos, em cinco dias. Pela tabela 2, pode-se observar que o mesmo trabalho pode ser feito por 3 fontes de ar com 100Nft³/min, ou por 5 fontes de ar de 25Nft³/min, ou por 8 fontes de ar de 5Nft³/min, ou mesmo por 10 fontes de ar com 2,5Nft³/min. As vazões totais de ar, no entanto, decrescem com o aumento do número de fontes, o que garante economia ao sistema. A vantagem econômica de se dividir entre diversas fontes menores é clara. Entretanto, há um limite para o valor mínimo de uma única fonte para garantir a emersão da pluma a uma profundidade de 15 metros, que é de 5Nft³/min. Por esta razão, adotou-se o arranjo de 8 fontes com uma vazão mínima de 5Nft³/min cada uma.

A área de influência de cada sistema é função da celeridade e do tempo, pois a celeridade é a velocidade em que a área de influência é afetada, que por sua vez é função de N e da espessura da pluma de bolhas, d, conforme a equação [7]:

$$C = 21/2 \cdot N \cdot d = 1,414 \cdot N \cdot d \quad [7]$$

Para uma pluma cujo diâmetro seja da ordem de 0,5 metro na superfície (produzida por uma bateria de difusores, por exemplo), para uma diferença de 1°C na temperatura, ao longo de 5 dias o raio de influência será de 2.000 metros, que é a dimensão aproximada da barragem, ou a máxima dimensão do volume de influência pretendido para um caso de 10 metros de profundidade. Considerando a batimetria do reservatório, que faz com que sua profundidade média (5,7m) seja um pouco maior nesta parte de jusante, uma pluma de dimensões modestas possuirá um raio de influência suficiente para causar a circulação da água no volume pretendido.

Para realizar o trabalho, embora as 8 fontes resultem uma vazão mínima total de 40Nft³/min, optou-se por uma capacidade instalada de 344Nft³/min, compatível com compressores de porte comercial, com potências entre 75 e 100cv. Um sistema de regulação deve permitir operar em qualquer faixa de vazão de ar neste intervalo, com controle individuais para o máximo das fontes de ar. Para vencer a pressão da coluna d'água, com a vazão mínima é necessário prover uma pressão de 25psi, e com a vazão máxima é necessário prover uma pressão de 74psi, o que demanda um tanque de armazenamento de ar comprimido, capaz de acionar os compressores de forma automática.

CÁLCULO DA PERDA DE CARGA

Uma vez definido um número de fontes considerado adequado para misturar o volume desejado no período necessário, torna-se necessário definir o arranjo de linhas de ar, calculando-se as perdas de carga, o que passa a ter grande influência no "lay-out" desejado.

O cálculo da perda de carga por atrito é dado, em Pascal, pelas equações [8], [9] e [10]:

$$(\frac{b}{2}) (f \cdot L / D) U^2 \quad [8]$$

$$b = a / k \quad [9]$$

$$k = H / (H + D) \quad [10]$$

Onde H é a pressão atmosférica no reservatório (aproximadamente 9,5 metros de coluna d'água, D é a profundidade da água onde o ar é descarregado, f é o fator de atrito de Darcy-Weisbach (função do número de Reynolds, assumindo a parede interna do tubo lisa f = 0,013 para esta faixa de valores de Reynolds), L é o comprimento do tubo, U é a velocidade do ar, e k é o fator de compressão do ar. A velocidade do fluxo de ar, U, é igual à vazão volumétrica, Qb, dividida entre área da seção transversal do tubo. A vazão volumétrica real sob condições

de compressão, Q_b , é relacionada à vazão volumétrica relatada, Q_a , através do fator de compressão k .

A perda de carga em Pascal pode ser expressa em termos de pés de coluna d'água dividindo-se pelo peso unitário da água, $997\text{kg/m}^3 \times 9,81\text{Newtons/m}^3$. Como as unidades comerciais dos compressores são em sistema inglês (normais pés cúbicos por minuto, por exemplo), converte-se a perda de carga para pés de coluna d'água multiplicando-se o fator k por 1,41, resultando valores numericamente iguais em psi, ou libras por polegada ao quadrado

Assim, a perda de carga é dada pela equação [11] a seguir:

$$h = (a \cdot f \cdot L \cdot k / 2 \cdot g) \cdot (Q_a \cdot d^5 / 0,6162) \quad [11]$$

A tabela 3 mostra as pressões de ar requeridas em função de diâmetros comerciais de mangueiras de ar (1, 1½ e 2 polegadas) correspondentes às parcelas de pressão hidrostática e às perdas por fricção, para as vazões mínima e máxima do sistema, imaginando-se que as 8 fontes se distribuam em espaçamentos iguais ao longo de 2km do reservatório, para uma profundidade de 15 metros, para comprimentos de tubos variando entre 125 metros e 1875 metros.

Tabela 3: Pressão de ar total requerida em psi (hidrostática + total).

diâmetro	L (m)	$Q_a = 8 \times 5\text{Nft}^3/\text{min}$	$Q_a = 8 \times 43\text{Nft}^3/\text{min}$
1"	125	21,3psi	29,3psi
1"	1875	22,8psi	74,0psi
1½"	125	21,2psi	22,3psi
1½"	1875	21,4psi	37,2psi
2"	125	21,2psi	21,5psi
2"	1875	21,3psi	25,0psi

A tabela 3 indica que o aumento da descarga total de 40 Nft³/min para 344Nft³/min sobre a região de influência, principalmente para o maior comprimento de tubulação com diâmetro de 1", implica em um aumento considerável de pressão e perda de carga. Pode-se verificar que quando o diâmetro é aumentado, a pressão e conseqüentemente a perda de carga diminuem. Disso decorre um arranjo alternativo em que os trechos mais longos de condução de ar são feitos em diâmetros maiores, instalando-se uma bifurcação para diâmetros menores, e utilizando-se os diâmetros menores apenas nos comprimentos limitados de 125m abertos a partir das linhas principais. O arranjo geral é mostrado de forma esquemática na Figura 4.

CONCLUSÕES

A metodologia e o equacionamento aplicados ao dimensionamento do sistema de aeração por circulação artificial permitiram estabelecer as vazões de ar necessárias para movimentar um volume da ordem de 20 milhões de metros cúbicos na escala de tempo de cinco dias, que este é o tempo necessário para ocorrer diminuição severa da concentração de oxigênio em função das demandas exercidas pelos sedimentos em situações de estratificação instável do corpo d'água.

A análise da batimetria e das curvas "iso-oxigênio dissolvido" permitiu estabelecer uma correlação entre as cargas internas, as áreas em que estas ocorrem e os volumes de água potencialmente afetados. Isso permitiu estabelecer a estratégia de aerar por circulação artificial, em caráter de protótipo, um volume da ordem de 10% do total do reservatório, correspondentes aos 20 milhões de metros cúbicos mais a jusante do reservatório.

A vazão de ar mínima de uma fonte a uma profundidade de 15m para permitir que a pluma de bolhas de ar atinja a superfície é de 5Nft³/min. Como se trata de um protótipo, e como misturar o volume alvo em tempos menores pode ser uma necessidade no futuro, foi estabelecida uma vazão máxima de 43Nft³/min para cada fonte. Um arranjo com 8 fontes com as capacidades mencionadas é economicamente atraente, uma vez que com um número menor de fontes a vazão de ar necessária aumenta, aumentando os requerimentos de energia para manter a área de influência desejada, da ordem de 350há.

Após checar as condições de vencimento das perdas de carga hidrostática e por fricção associadas a este sistema, foi possível definir que as 8 fontes podem receber ar por 5 linhas, 3 das quais se bifurcam para diâmetros pequenos após conduzir o ar em diâmetros maiores (para minimizar as perdas de carga), com 2 outras de diâmetros pequenos, com perda de carga pequena devido ao seu comprimento também ser menor.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à SABESP e à CETESB pelo fornecimento das bases de dados para realizar a análise, bem como à Unidade de Gerenciamento do Programa Guarapiranga, cujo contrato de Apoio ao Gerenciamento permitiu a realização dos serviços aqui relatados.

Figura 1: Curvas Iso-OD do Ponto GU-101 – Médias 1991 à 1995.

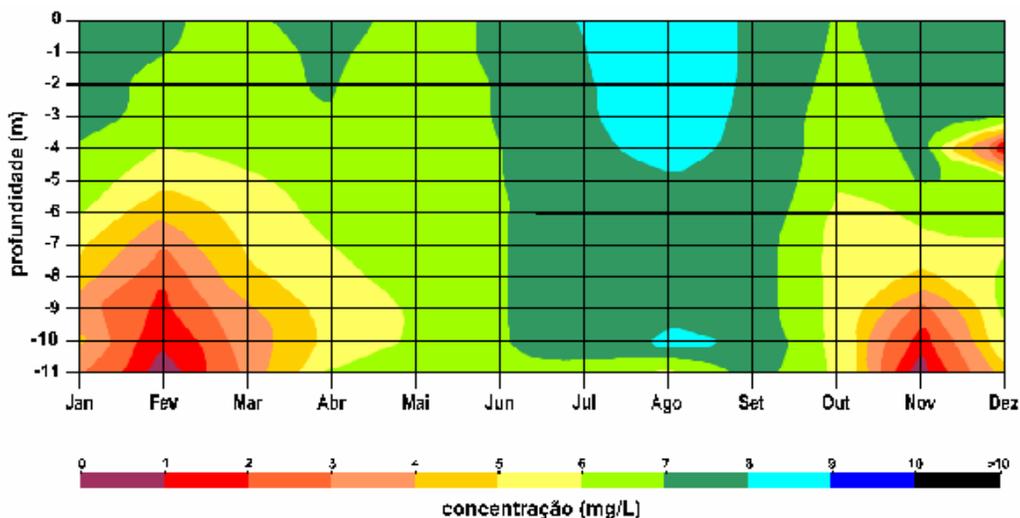


Figura 2: Curvas Iso-termas do Ponto GU-101 – Médias 1991 à 1995.

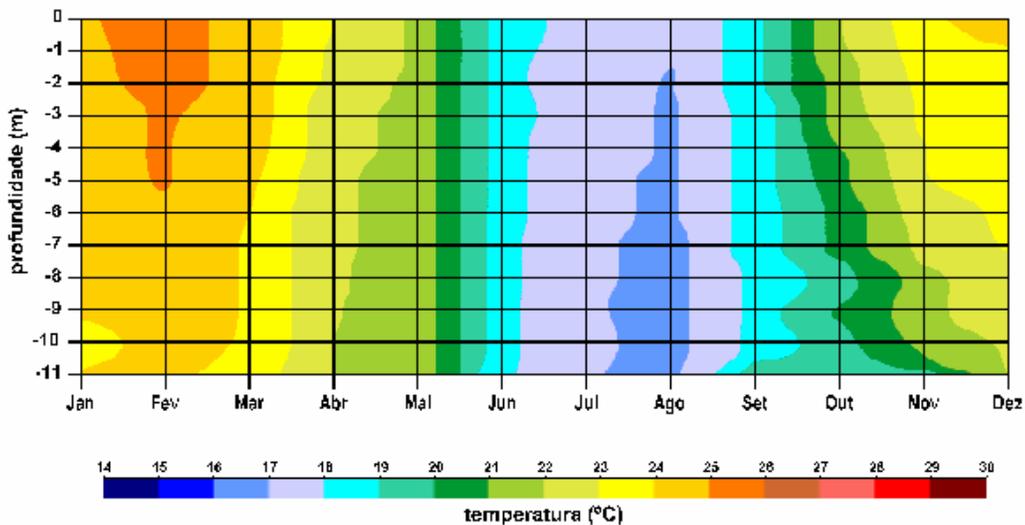


Figura 3: Reservatório Guarapiranga com a Localização das Fontes de Ar ao Longo do Talvegue na Região Específica de Influência.

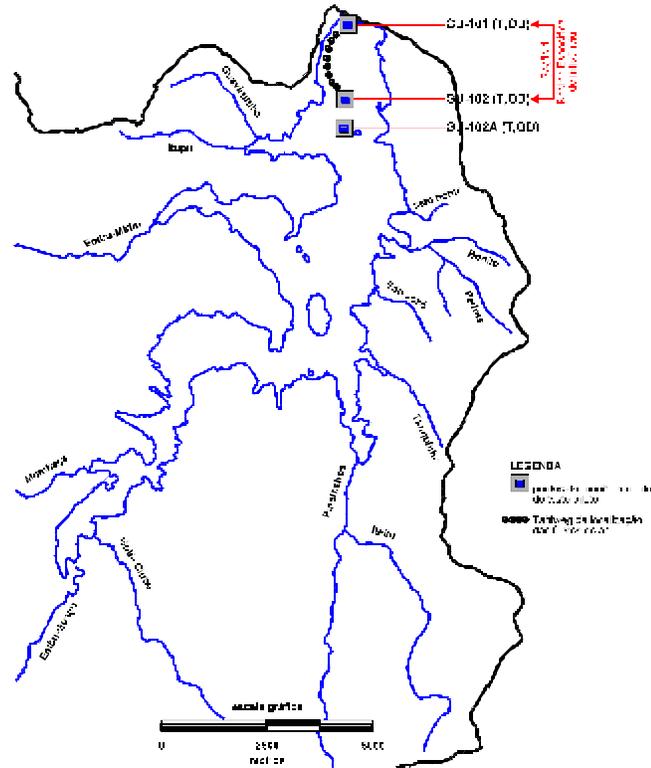
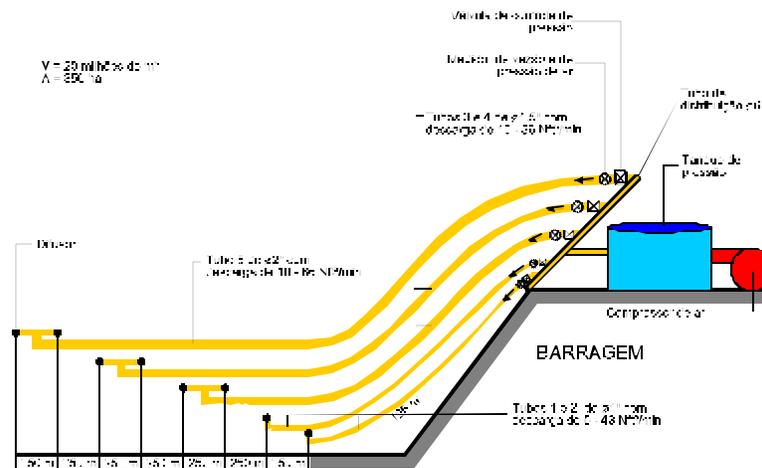


Figura 4: Croqui Esquemático do Programa de Protótipo de Aeração do Reservatório Guarapiranga.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. COBRAPE. *Relatório Consolidado dos Estudos Complementares Relacionados à Qualidade da Água: Análise e Proposições*. São Paulo: UGP/COBRAPE, 1994.
2. COBRAPE. *Ações Diretamente Relacionadas à Qualidade da Água: Relatório de Andamento para Avaliação de Meio Termo do Programa*. São Paulo: UGP/COBRAPE, 1995.
3. COBRAPE. *Relatório dos Estudos de qualidade da água referentes às ações de aeração/circulação artificial no reservatório Guarapiranga*. São Paulo: UGP/COBRAPE, 1996.
4. COOKE, G. D. *et al.* Restoration and management of lakes and reservoirs. 2.ed. Boca Raton: Lewis Publishers, 1990.
5. FROELICH, C.G., *et al.* "Temperature and Oxygen Stratification in Americana Reservoir, São Paulo" *Verh. International Verein. Limnol*, v.20, p. 1710-1719, 1978.
6. KOLB, B. and HEINEMAN, M.C. Controlling mechanisms of sediment-driven dissolved oxygen dynamics in New Bedford Outer Harbor. *Mar. Freshwater*, v. 46, p. 69-79, 1995.
7. KORTMANN, R.W. Benthic and atmospheric contributions to the nutrient budgets of a softwater lake. *Limnol. Oceanogr.*, v. 25, n. 2, p. 229-239, Feb. 1980.
8. KORTMANN, R.W. and RICH, P.H. Lake ecosystem energetic: the missing management link. *Lake and Reservoir Management*, v. 8, n. 2, p. 77-97, Feb. 1994.
9. KORTMANN, R.W.; KNOECKLEIN, G.W. and BONNELL, C.H. Aeration of stratified lakes: theory and practice. *Lake and Reservoir Management*, v. 8, n. 2, p. 99-120, Feb. 1994.
10. LACKEY, R.T. Artificial reservoir destratification effects on phytoplankton. *Journal of Water Pollution Control Federation*, v. 45, n. 4, p. 668-673. Apr. 1973.
11. LEMCKERT, C.J. and IMBERGER, J. Energetic bubble plumes in arbitrary stratification. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 119, n. 6, p. 680-703, Jun. 1993.
12. OLIVEIRA, L.H.W. de et al. Desenvolvimento de curvas "iso-oxigênio dissolvido" para o gerenciamento do reservatório Guarapiranga. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 18. Salvador: ABES, 1995.
13. SAWYER, C.N.; McCARTY, P.L., and PARKIN, G.F. *Chemistry for environmental engineering*, 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1994.
14. STUMM, W, and MORGAN, J.J. *Aquatic chemistry: an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters*. New York: Wiley-Interscience, 1970.
15. THOMAS, R.; MEYBECK, M. and BEIM, A. Lakes and reservoirs. In: CHAPMAN, D. (Ed.) *Water quality assessments*. London: Chapman & Hall/UNESCO/WHO/UNEP, 1992. p. 317-369.
16. THORNTON, K.W.; KIMMEL, B.L., and PAYNE, F.E. *Reservoir limnology: ecological perspectives*. New York: Wiley-Interscience, 1990.