

# Projeto de Avaliação da Qualidade das Águas do Sistema Pinheiros-Billings em Função da Operação do Protótipo da Flotação

M.T.L. de Barros, M.F.A. Porto, J.R.S.Martins, J.C.Mierzwa, L.F.O.Yazaki, R.H.O.Martins, F.L.Filho, L.A.Mendes, C.B.N.Borges, F.Amaral, M.M. de Castro, R.C.Zambon, P.Omuro, M.C.S.Pereira, C.R. Pereira.

**Resumo** – Este artigo apresenta uma síntese dos trabalhos desenvolvidos para a avaliação da qualidade das águas do sistema Pinheiros-Billings durante a operação do protótipo do processo de flotação das águas do Rio Pinheiros. Tratando-se devidamente este rio, será possível bombeá-lo para o reservatório Billings, aumentando a produção energética da Usina Henry Borden. O trabalho foi desenvolvido em três frentes: monitoramento da qualidade das águas do sistema, análise estatística dos dados obtidos e simulações de cenários de geração para avaliar a condição da Billings segundo diferentes regras operativas. Os resultados obtidos pelo protótipo são promissores. A flotação remove elevado percentual de fósforo e a água bombeada para a Billings não produz impactos negativos consideráveis no lago, se for levada em conta a condição atual de degradação do reservatório.

**Palavras-chave** – Billings; Flotação; Modelagem matemática; Monitoramento; Qualidade da água.

## I. Introdução

Este artigo apresenta uma síntese dos trabalhos desenvolvidos pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) para o projeto de Pesquisa & Desenvolvimento P&D 0061-002/2007 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que tem como proponente a Cia. Energética de São Paulo (CESP) e como cooperada a Empresa Metropolitana de Águas e Energia (EMAE), nos termos do Convênio de Cooperação entre FCTH e EMAE, firmado em agosto de 2007.

O Convênio, denominado *Convênio de Cooperação Técnico-Científica para o Desenvolvimento do Projeto de Avaliação da Qualidade das Águas do Sistema Pinheiros-Billings em Função da Operação do Protótipo da Flotação*, chamado *Projeto QAPB*, tem como objetivo fornecer subsídios para o estudo de viabilidade do sistema de

tratamento das águas do rio Pinheiros pelo processo de flotação.

A implantação do sistema de tratamento por flotação parte do princípio de que, despoluindo-se as águas do rio Pinheiros, seria possível voltar a bombeá-las para o reservatório Billings e, assim, aumentar a produção de energia hidrelétrica no complexo Henry Borden.

O complexo Henry Borden, localizado em Cubatão, é composto por duas usinas que aproveitam a energia produzida pela queda de aproximadamente 720 m existente entre o reservatório Billings, situado no planalto, e o sopé da Serra do Mar. As usinas, uma externa e outra subterrânea, possuem capacidade instalada total de 889 MW, potência correspondente à vazão 157 m<sup>3</sup>/s derivada do reservatório Billings. Para produzir uma vazão dessa magnitude, entretanto, o reservatório Billings depende da reversão de parte da vazão dos rios Tietê e Pinheiros já que a bacia que contribui diretamente para o reservatório produz uma vazão muito menor. Assim, nos anos 1930, foram feitas as obras que possibilitaram essa reversão através da retificação do rio Pinheiros e da construção das estações elevatórias de Pedreira e Traição. Atualmente o sistema de reversão tem capacidade máxima de 395 m<sup>3</sup>/s.

Devido ao aumento da poluição das águas dos rios Tietê e Pinheiros, a conseqüente degradação do reservatório Billings e a opção de utilizá-lo também como manancial de água para abastecimento público, a reversão passou a ser feita somente para o controle de cheias.

O Artigo 46 do Ato das Disposições Transitórias da Constituição do Estado de São Paulo [1] dispõe sobre esse assunto ao estabelecer que: “no prazo de três anos, a contar da promulgação desta Constituição, ficam os Poderes Públicos Estadual e Municipal obrigados a tomar medidas eficazes para impedir o bombeamento de águas servidas, dejetos e de outras substâncias poluentes para a represa Billings.”

Para cumprir as disposições constitucionais a Resolução Conjunta SMA/SES 03/92, atualizada pela Resolução SEE-SMA-SRHSO-I de 13/03/96, estabeleceu que as águas do Canal Pinheiros não poderiam mais ser bombeadas para o Reservatório Billings, exceto nos casos de risco de inundações. Com isso a capacidade de produção da usina de Henry Borden foi reduzida em aproximadamente 75% [2].

A despoluição das águas do rio Pinheiros, portanto, é condição necessária para o aumento da produção de energia em Henry Borden. Além disso, o reservatório Billings desde o ano 2000 é utilizado como manancial para abastecimento público através da transposição do braço do Taquacetuba para o reservatório do Guarapiranga, com uma vazão média da ordem de 2 m<sup>3</sup>/s.

<sup>1</sup> Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

M.T.L.de Barros (e-mail: [mtbarros@usp.br](mailto:mtbarros@usp.br)), M.F.A.Porto ( e-mail: [mporto@usp.br](mailto:mporto@usp.br)), J.R.S.Martins (e-mail: [scarati@usp.br](mailto:scarati@usp.br)) e J.C.Mierzwa (e-mail: [mierzwa@usp.br](mailto:mierzwa@usp.br)) são professores da Escola Politécnica da USP.

L.F.O.Yazaki (e-mail: [luzorsini@fcth.br](mailto:luzorsini@fcth.br)), L. A. Mendes (e-mail: [ludmilson@fcth.br](mailto:ludmilson@fcth.br)), C.B.N. Borges (e-mail: [camila@fcth.br](mailto:camila@fcth.br)), F. Amaral (e-mail: [fernando@fcth.br](mailto:fernando@fcth.br)), R.C. Zambon (e-mail: [rczambon@usp.br](mailto:rczambon@usp.br)), P. Omuro (e-mail: [pedro.omuro@gmail.com](mailto:pedro.omuro@gmail.com)), M.C.S. Pereira (e-mail: [crissantana@gmail.com](mailto:crissantana@gmail.com)) e M.M. de Castro (e-mail: [marcelo.castro@fcth.br](mailto:marcelo.castro@fcth.br)) trabalham na Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica.

R.H.O. Martins (e-mail: [rh.martins@uol.com.br](mailto:rh.martins@uol.com.br)) e F.L.Filho (e-mail: [fredlage@usp.br](mailto:fredlage@usp.br)) são consultores autônomos.

C.R. Pereira é engenheiro da EMAE (e-mail: [pereira@emaef.sp.gov.br](mailto:pereira@emaef.sp.gov.br)).

A viabilidade do sistema de tratamento por flotação, que possibilitaria o bombeamento de maior quantidade de água para o reservatório Billings, implica em uma série de questões técnicas, econômicas e ambientais. O Projeto QAPB se concentra nas questões ambientais ao analisar os impactos da operação do sistema de tratamento por flotação das águas do rio Pinheiros sobre o reservatório Billings.

#### A. Contextualização do Projeto

Considerando a importância estratégica da usina de Henry Borden para o Sistema Elétrico e a possibilidade de melhorar as condições ambientais das águas do canal do rio Pinheiros, de forma que possam ser revertidas para o reservatório Billings, sem comprometer seu uso para abastecimento público e, portanto, atendendo às disposições legais, foi concebido o sistema de tratamento avaliado neste trabalho. A implantação do sistema completo, aliado a medidas complementares de controle de poluição, permitirá a reversão de 50 m<sup>3</sup>/s para o reservatório Billings e, conseqüentemente, um aumento médio de 280 MW na produção de energia na usina de Henry Borden.

Como primeira fase deste empreendimento foi instalado, no trecho do canal do rio Pinheiros entre o córrego Zavuvus e a Barragem de Pedreira, um protótipo do sistema de flotação com capacidade de 10 m<sup>3</sup>/s. O estudo do desempenho do protótipo e de seus impactos ambientais sobre o sistema hídrico, realizado neste trabalho, subsidiará o Estudo de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) que está sendo elaborado pela EMAE.

#### B. Conteúdo do Projeto

Para a avaliação dos impactos do sistema de flotação, o Projeto QAPB foi desenvolvido em três frentes:

- Monitoramento do sistema hídrico composto pelos rios Tietê, Pinheiros e pelos reservatórios Billings e Guarapiranga, envolvendo tanto variáveis de qualidade de água como variáveis operacionais e climatológicas.
- Análises estatísticas das variáveis de qualidade da água monitoradas, abrangendo a análise da eficiência do sistema de tratamento e alterações na qualidade da água dos reservatórios Billings e Guarapiranga.
- Modelação matemática do reservatório Billings, com análise de diferentes cenários de vazões revertidas e níveis de tratamento.

## II. Desenvolvimento da Pesquisa

Os objetivos deste estudo foram avaliar a eficiência do processo de flotação do rio Pinheiros, determinar o impacto do bombeamento do rio para o reservatório Billings e estudar através de modelos matemáticos de qualidade da água os efeitos da implementação do protótipo da flotação na qualidade das águas do rio e do reservatório.

#### a. Metodologia

Foi desenvolvido e implantado um sistema de monitoramento temporário que permite a avaliação do comportamento do Sistema Pinheiros-Billings, considerando o aspecto de qualidade das águas, em função da operação em fase de teste, do sistema de tratamento de água por flotação, construído junto à elevatória de Pedreira. Foram coletados dados de variáveis de qualidade da água que permitiram a caracterização da eficiência do funcionamento do protótipo da flotação.

Outra ferramenta utilizada foi a simulação, através de modelos numéricos, de diferentes cenários de gestão de qualidade da água do reservatório que permitiram a interpretação de seus efeitos de médio e longo prazo no Sistema Pinheiros - Billings.

Desta maneira, foram de relevante interesse a variação no espaço e no tempo da qualidade da água do reservatório levando em conta as forças hidrodinâmicas, que são o vento e as vazões que entram e que saem do reservatório, e as cargas de poluentes oriundas do bombeamento do rio e das sub-bacias hidrográficas adjacentes ao reservatório.

#### b. O Protótipo para Flotação do rio Pinheiros

A flotação em si é um processo de tratamento cujo objetivo básico é clarificar uma corrente líquida por meio da utilização de ar dissolvido, transportando os sólidos suspensos presentes na corrente líquida para a superfície, de onde são removidos por meio de dispositivos adequados para posterior processamento e destinação final. Para que a separação dos sólidos seja eficiente é necessário utilizar processos e operações unitárias que possibilitem a desestabilização das partículas presentes e a sua agregação. Adicionalmente aos sólidos em suspensão, é possível a remoção de contaminantes que reagem com os compostos químicos adicionados e aqueles que estejam aderidos ou adsorvidos aos sólidos em suspensão.

No caso do protótipo de flotação em teste no rio Pinheiros, são utilizadas duas estações, denominadas E1 e E2, instaladas em dois trechos do canal. A primeira estação da flotação (E1) localiza-se no rio Pinheiros próxima à foz do córrego Zavuvus, a 4.070 m da Usina Elevatória de Pedreira. A segunda estação (E2), a jusante da estação E1, localiza-se a 770 m da Usina Elevatória de Pedreira. A localização das estações pode ser observada esquematicamente na Figura 1.

Em cada uma das estações de flotação, o processo de tratamento pode ser resumido nas etapas detalhadas na seqüência.

#### Adição química e mistura rápida

Em um trecho do rio, na entrada da estação, é feita a adição de coagulante, cujo objetivo é desestabilizar as partículas que se encontram em suspensão. A dispersão do coagulante na massa líquida é feita por meio da injeção de ar comprimido, que produz bolhas grossas. A adição química e a injeção de ar são feitas a uma profundidade de 1,0 m, com a utilização de mangueiras presas a uma estrutura metálica

Os produtos químicos utilizados são recebidos concentrados e estocados em tanques de armazenagem. O ajuste da concentração de dosagem é feita por diluição com a própria água clarificada no processo, próximo ao ponto de dosagem.

De todas as etapas do processo de flotação, a desestabilização das partículas é a mais crítica, pois caso ela não ocorra de maneira eficiente as demais etapas são comprometidas. Por isso, a dispersão do coagulante na massa líquida exige uma atenção especial, sendo que esta é afetada pelas condições hidráulicas do sistema e climatológicas da região, além das condições operacionais das barragens de Traição e Pedreira.

Ressalta-se que o processo de mistura com a utilização de ar comprimido não é o convencional tendo sido utilizado

como alternativa para as condições específicas do sistema implantado no rio Pinheiros.

### Processo de floculação

Com as partículas desestabilizadas, é necessário fazer com que elas se aglomerem para permitir a sua separação da fase líquida por flotação com ar dissolvido. A aglomeração é obtida mediante uma mistura lenta da massa líquida, permitindo o movimento aleatório e a colisão entre as partículas, resultando na formação de flocos. A mistura lenta também é obtida pela adição de ar comprimido, com menor intensidade que na mistura rápida. Nesta etapa, a velocidade horizontal de escoamento deve respeitar intervalos específicos, para evitar a deposição dos aglomerados formados ou a sua quebra. Outro parâmetro importante no processo de floculação é o tempo, que deve variar entre 20 e 40 minutos.

### Flotação por ar dissolvido

O processo de flotação por ar dissolvido ocorre após a etapa de floculação e consiste em se injetar no fundo e ao longo de toda a extensão do canal, uma corrente líquida saturada com ar.

Como a solubilidade do ar atmosférico na água é uma propriedade termodinâmica que depende da pressão e da temperatura, é possível saturar uma corrente líquida através de sua pressurização com o ar atmosférico. Para o processo de flotação do rio Pinheiros, uma fração da água clarificada, entre 8% a 10% da vazão do sistema, é submetida a um processo de pressurização com ar comprimido, pressão entre 4 e 5 atmosferas, no tanque de saturação. Nesta condição, uma parcela do ar acaba sendo dissolvida na massa líquida. Posteriormente, esta corrente saturada é distribuída ao longo da largura do canal do rio Pinheiros, também por meio de mangueiras, neste caso, dotadas de válvulas redutoras de pressão em suas extremidades.

Quando a pressão da corrente saturada é reduzida para a pressão atmosférica, o ar que estava dissolvido na água dá origem a inúmeras microbolhas com movimento ascendente que ao se deslocarem interceptam e aderem aos flocos formados na etapa de floculação. Nesta condição, a densidade das partículas é reduzida, fazendo com que as partículas flodem para a superfície da água, promovendo assim a clarificação.

### Remoção dos sólidos flutuados

Ao final do trecho da bacia de flotação, os flocos estão basicamente na superfície da água, formando um lodo de superfície, o qual é direcionado à estrutura de remoção, dotada de pás rotativas que conduz o lodo para o sistema de desidratação, para posterior disposição final.

A água clarificada passa sob a estrutura de remoção de lodo para ser bombeada para a represa Billings, parte dessa água é encaminhada para o sistema de pressurização.

### Adensamento e Desidratação do Lodo

O lodo retirado do rio Pinheiros é encaminhado a um tanque de homogeneização, na margem do rio, sendo então bombeado para separadores centrífugos, onde ocorre a injeção de uma solução polimérica para auxiliar o processo de separação de sólidos. Tipicamente um lodo com cerca de 2% de sólidos em massa entra na centrífuga e o lodo

resultante, separado por centrifugação, terá um teor de sólidos em torno de 20 a 25% em massa.

### Disposição do lodo desidratado

O lodo desidratado é transportado por caminhões basculantes para um aterro construído ao lado da central de adensamento, para disposição do lodo gerado durante a realização dos ensaios. A área de disposição foi devidamente preparada para recebimento e confinamento do lodo produzido, sendo dotada de impermeabilização por manta de material polimérico, sendo que após os ensaios deverá ser feita a cobertura final do aterro.

### c. O Sistema de Monitoramento da Qualidade da Água

Descreve-se, a seguir, o sistema de monitoramento montado para acompanhamento dos testes. Inicialmente procedeu-se ao planejamento da campanha com a identificação física dos pontos de amostragem previstos, a verificação e a aquisição de equipamentos, o estabelecimento das variáveis de qualidade a serem monitorados e da rotina de coleta e análise de dados de campo, bem como o treinamento da equipe de campo.

Apresenta-se na Figura 1 o diagrama unifilar do Sistema Pinheiros-Billings, objeto deste estudo.

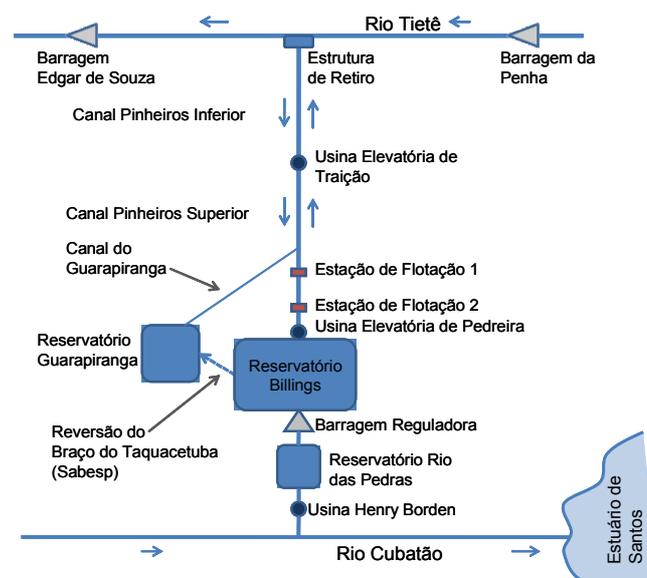


Figura 1 – Diagrama Unifilar do Sistema Pinheiros-Billings

O Plano de Monitoramento foi feito com duas vertentes importantes: o monitoramento hidrológico e o monitoramento de qualidade de água do sistema.

O monitoramento hidrológico foi conduzido a partir de estações de terra, e teve por finalidade o controle das entradas e saídas hídricas no reservatório Billings durante o teste.

Foram monitoradas 200 variáveis em 25 pontos e a frequência de amostragem proposta procurou garantir um intervalo compatível com o desenvolvimento do estudo, bem como reduzir os custos laboratoriais. Tanto os pontos de amostragem como as frequências foram otimizados durante o desenvolvimento do projeto.

Estes pontos foram divididos em cinco grandes conjuntos, relacionando os pontos aos corpos hídricos a quais esses pontos pertencem. No conjunto Tietê está compreendido apenas o ponto TIE (Ponte dos Remédios). No conjunto Pinheiros estão compreendidos os pontos P1 (montante da

E1), P2 (jusante da E1), P3 (montante da E2), P4 (jusante da E2) e P4-A (Pedreira). Em todos os pontos localizados nos rios Pinheiros e Tietê ocorreram amostragens diárias. O conjunto Billings foi composto pelos pontos B1 (Anfiteatro), B2 (corpo central em frente ao Bororé), B3 (corpo central em frente ao Taquacetuba), B4 (Taquacetuba na captação da SABESP), B5 (corpo central em frente ao Rio Pequeno) e B6 (próximo à Barragem Reguladora Billings-Pedras). A amostragem nos pontos B1, B2 e B4 foi semanal e nos demais pontos foi mensal, em todos os pontos da Billings foram feitas coletas na superfície e no fundo. No conjunto Guarapiranga, os pontos G0, G1 e G2 foram submetidos à amostragem mensal e o ponto G3 a amostragem semanal. O conjunto ABV é composto apenas pelo ponto ABV (ETA ABV), cuja frequência de monitoramento foi semanal. A localização dos pontos é mostrada na Figura 2.

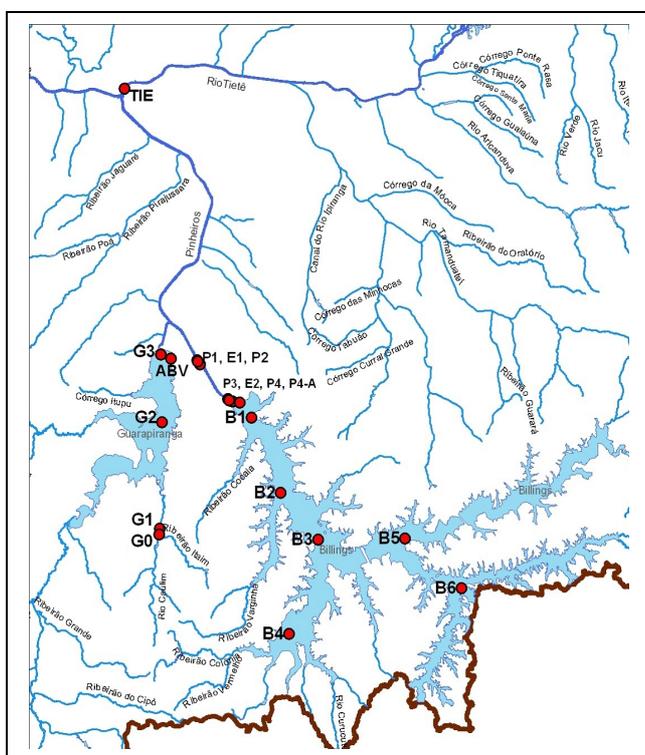


Figura 2 - Localização dos Pontos de Monitoramento

O número de resultados obtidos a partir das amostras coletadas no período de 22/08/2007 a 30/09/2008 em cada um dos corpos hídricos estudados encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Número de resultados obtidos em cada corpo hídrico

Corpo Hídrico	Pontos	Resultados
Tietê	1	9.630
Pinheiros	5	38.088
Billings	12	29.739
Guarapiranga	6	12.628
ETA ABV	1	320
TOTAL	25	90.405

Além disto, foi instalada uma sonda de monitoramento automático e contínuo na estação elevatória de Pedreira. O

número de resultados obtidos na sonda por variável de qualidade monitorada encontra-se na Tabela 2; o resumo dos resultados obtidos durante o monitoramento pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 2 – Número de resultados obtidos com a sonda automática

Variável de Qualidade	Resultados
Temperatura	5.565
Turbidez	5.563
Condutividade	5.564
Amônia	3.145
Oxigênio Dissolvido	4.606
pH	5.564
Total	30.007

Tabela 3 – Resumo dos resultados obtidos com o monitoramento

Resumo	
Monitoramento Discreto	90.405
Monitoramento Contínuo	30.007
Total	120.412

#### d. Histórico da Operação do Sistema de Flotação

Durante a operação do protótipo da flotação, de 01/09/07 a 18/09/08, ocorreram várias interrupções no seu funcionamento, destacando-se, ao longo do período de estudo, os seguintes motivos:

1. Interrupção da flotação para operações de controle de cheias no rio Pinheiros. Esse tipo de interrupção não é considerado falha da flotação, devido ao aumento considerável da vazão do rio, muito superior aos 10 m<sup>3</sup>/s. Ao final de episódios de cheias, há necessidade de limpeza da calha do rio, o que acarreta prolongamento do período de tempo sem operação da flotação, em torno de 48 horas.

2. Com relação ao período de 48 horas ao final do controle de cheias, dois critérios foram considerados para constatar ou não uma falha de operação do sistema. Primeiro, se a flotação voltar a ser operada antes desse intervalo de tempo, então o tempo decorrido em horas é contabilizado como horas de flotação. Porém, se a flotação não voltar à ativa após 48 horas, então deste ponto em diante considera-se que ocorreu falha de operação da flotação.

3. Paradas para manutenção e/ou conserto de equipamentos e dispositivos associados à flotação (vazamentos em tubulações e mangotes, bombas de sucção de lodo, etc.).

Conforme os dados operacionais fornecidos pela EMAE, os primeiros dois meses de atividade do Protótipo da flotação (setembro e outubro de 2007) foram pouco produtivos, devido a problemas eletro-mecânicos de equipamentos.

Com o início da estação chuvosa, observaram-se a partir de 26/10/07 frequentes operações de controle de cheia que impediram o funcionamento do protótipo da flotação por períodos mais prolongados, situação que perdurou até fevereiro/2008. Conforme os dados apresentados no gráfico da Figura 3, durante esse período, a parcela do volume bombeado para o reservatório Billings referente à flotação foi muito restrita, em comparação com o volume bombeado devido a operações de controle de cheias.

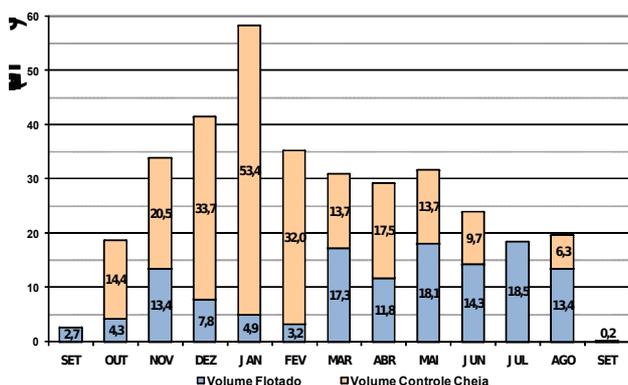


Figura 3 – Volume bombeado para o reservatório Billings (hm³) entre 01/09/07 e 18/09/08

Analisando o tempo de operação da flotação em cada mês em relação ao tempo esperado de funcionamento, isto é, descontando as paradas para controle de cheias e limpeza do canal, observam-se melhores índices a partir de março/2008, conforme demonstra a Figura 4. Entre 01/09/07 e 18/09/08, a flotação operou, em média, 54% do tempo, ou seja, a operação ficou suspensa por problemas técnicos, em média, 46% do tempo.

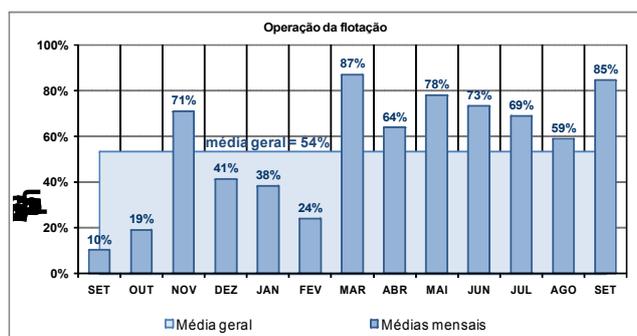


Figura 4 – Operação observada em relação a operação esperada entre 01/09/07 e 18/09/08

#### e. Análise da Eficiência do Protótipo da Flotação no Tratamento da Água do Rio Pinheiros

Para a análise da eficiência na remoção de poluentes, foram selecionados os períodos em que o sistema da flotação funcionou continuamente por pelo menos seis dias, descontadas as primeiras 48 horas de funcionamento após cada novo acionamento do sistema.

Considerando esse critério, fazem parte da avaliação dos resultados as análises de amostras coletadas nos seguintes períodos em 2008: 27/02 a 13/03; 25/03 a 03/04; 07/05 a 01/06 e 20/06 a 25/07. Têm-se, assim, 88 dias de operação para análise comparativa entre água bruta e água flotada no rio Pinheiros.

Para adequar a comparação dos resultados das coletas realizadas na entrada do sistema (ponto P1) com as da saída do sistema (ponto P4A), os dados de P1 foram defasados em um dia em relação aos dados de P4A. Isso se justifica pois, no processo de flotação, são necessárias cerca de 20 horas para a água bruta em P1 percorrer todo trecho do canal do Pinheiros entre as duas estações de flotação até chegar em P4A como água flotada.

Para determinar a eficiência do tratamento por flotação, foram analisados sete indicadores de qualidade da água: Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Oxigênio

Dissolvido (OD), Fósforo Total, Nitrogênio Amônico, Coliformes (E.Coli), Turbidez e Chumbo Total.

A Tabela 4 apresenta um resumo das concentrações médias das variáveis de qualidade analisadas em cada um dos pontos de monitoramento, bem como a variação das concentrações entre P1 e P4A e os índices de conformidade de cada variável em cada ponto, ou seja, o percentual das leituras que se mostraram em conformidade com o limite estabelecido para a variável.

Tabela 4 – Eficiência de remoção de poluentes com operação contínua do protótipo da flotação

Variável de qualidade	Valores médios	
	P1	P4A
Fósforo Total (mg/L)	0,586	0,050
Nitrogênio Amônico (mg/L)	24,0	20,6
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100mL)	345.132	31.745
Chumbo Total (mg/L)	0,033	0,015
DBO (mg/L)	73	34
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	2,3	3,1
Turbidez (UNT)	57	31
Variável de qualidade	Variação P1-P4A	
	Obtida	Esperada
Fósforo Total (mg/L)	-91%	-95%
Nitrogênio Amônico (mg/L)	-14%	-
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100mL)	-90,8%	-99,9%
Chumbo Total (mg/L)	-53%	-
DBO (mg/L)	-53%	-71%
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	+34%	-
Turbidez (UNT)	-46%	-91%
Variável de qualidade	Conformidade	
	P1	P4A
Fósforo Total (mg/L)	21%	73%
Nitrogênio Amônico (mg/L)	20%	37%
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100mL)	*	*
Chumbo Total (mg/L)	100%	100%
DBO (mg/L)	35%	95%
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	1%	0%
Turbidez (UNT)	*	*

\*Variáveis sem limite de conformidade definido.

Um exame mais detalhado da Tabela 4 permite verificar que houve remoção significativa de fósforo total (91%), elemento de grande relevância para controle do processo de eutrofização do reservatório Billings. Por outro lado, houve baixa remoção de nitrogênio amônico (14%).

A redução das concentrações de *Escherichia coli*, principal indicador da contaminação por esgotos de corpos d'água, foi elevada (90%), entretanto a concentração remanescente ainda é elevada.

Foi observada a remoção de metais pesados, por exemplo o chumbo, com eficiência bastante razoável de 53%. O mecanismo predominante pode ser por incorporação aos flocos formados da flotação. É possível também que tenha ocorrido alguma sedimentação de parte dos sólidos floculados no leito do rio.

Em relação à remoção de matéria orgânica, baseada na medida da DBO, o processo de flotação possibilitou obter eficiência de 53%, provavelmente associada aos sólidos em suspensão presentes na água. Esta hipótese pode ser comprovada com base na avaliação da eficiência na redução da turbidez.

Para a variável OD, foi verificado um aumento de 34% na sua concentração, entre os pontos P1 e P4A, indicando uma pequena melhoria neste trecho do rio.

*f. Carga Lançada no Reservatório Billings por Flotação e por Controle de Cheias*

Objetivando-se comparar a carga de poluentes que é lançada na Billings por flotação e por controle de cheias, foi selecionado um grupo de cinco variáveis de qualidade. Os eventos analisados possuem as seguintes características:

- Flotação: Este grupo inclui os resultados das amostras coletadas nos maiores períodos de operação contínua da flotação. Foram selecionados os mesmos períodos apresentados na seção c, isto é, de 27/fev a 13/mar, de 25/mar a 03/abr, 07/mai a 01/jun e de 20/jun a 25/jul de 2008, totalizando 88 dias.
- Controle de cheias: Neste grupo estão incluídos os resultados das coletas realizadas em P4A nos horários em que a Elevatória de Pedreira realizou operações de controle de cheias. Nesse período, reunindo os resultados das coletas realizadas em 17 dias, as vazões variaram entre 50 m<sup>3</sup>/s e 350 m<sup>3</sup>/s.

Foram selecionadas as seguintes variáveis de qualidade das águas: Fósforo Total, Nitrogênio Amoniacal, Nitrogênio Nitrato, DBO e Sólidos em Suspensão Totais.

O cálculo foi feito com os valores médios das concentrações dos poluentes e com as vazões de bombeamento. Os resultados são apresentados na Figura 5.

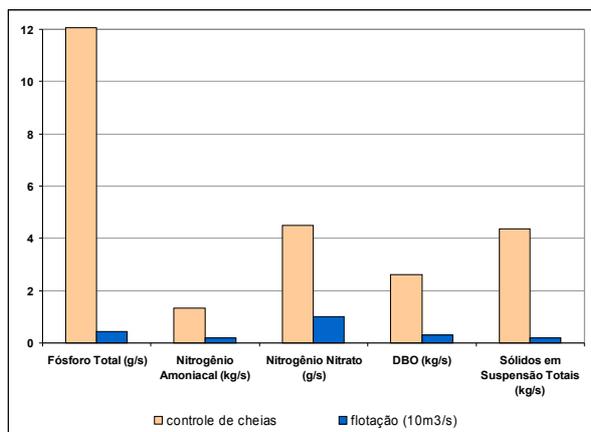


Figura 5 – Taxa de bombeamento de poluentes ao reservatório Billings por Pedreira em operações de flotação e de controle de cheia

Com as taxas obtidas, foi calculada a carga total de poluentes bombeada ao reservatório Billings nos 88 dias de flotação e nos 17 dias de controle de cheias utilizados nessa análise comparativa. Os resultados são apresentados na Figura 6.

Para avaliar a carga média anual de poluentes que chegam ao reservatório Billings pela Usina Elevatória de Pedreira, foi utilizado o ano de 2006, com 256 dias de flotação e 68 dias de controle de cheias e as taxas apresentadas na Figura 5. Os valores obtidos para a vazão de 10 m<sup>3</sup>/s estão na Figura 6. A Figura 7 apresenta a carga de poluentes bombeada ao reservatório Billings num ano hipotético, considerado típico considerando a flotação funcionando continuamente. A Figura 8 compara a carga total de poluentes resultante de três operações distintas no ano típico: controle de cheias por 68 dias e bombeamento de 50 m<sup>3</sup>/s com e sem flotação por 256 dias.

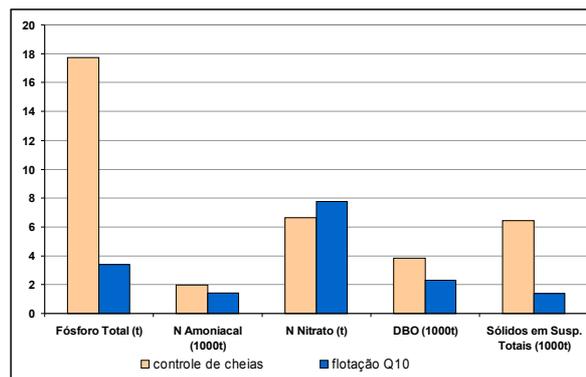


Figura 6 – Carga de poluentes bombeada ao reservatório Billings durante a flotação de 10 m<sup>3</sup>/s (88 dias) e durante o controle de cheias (17 dias).

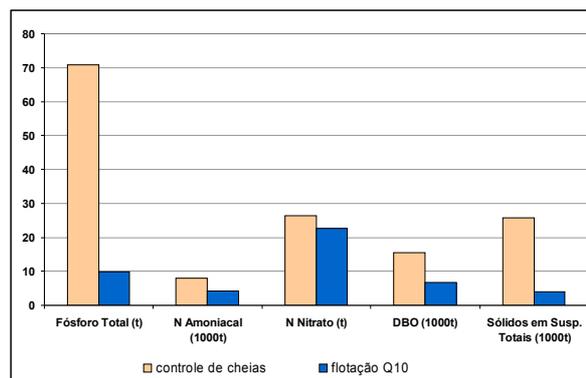


Figura 7 – Carga anual média bombeada à Billings em 68 dias de controle de cheias e 256 dias de flotação.

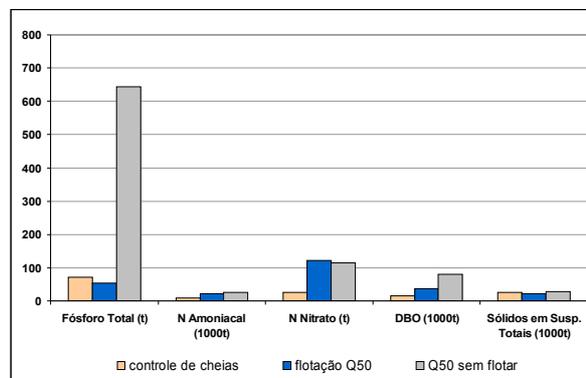


Figura 8 – Carga anual média revertida à Billings em 68 dias de controle de cheias e 256 dias de bombeamento de 50 m<sup>3</sup>/s com e sem flotação.

*g. Avaliação da Qualidade da Água nos Reservatórios Billings e Guarapiranga Durante a Flotação*

A seguir, são apresentadas as análises de qualidade da água do reservatório Billings com base no monitoramento realizado. Foram utilizadas nesta avaliação as mesmas variáveis consideradas na análise da eficiência da flotação do rio Pinheiros. Convém salientar que essas amostras também incorporam os bombeamentos de controle de cheia feitos durante os testes.

A análise dos indicadores de qualidade da água do reservatório Billings se vale do índice de conformidade das variáveis, ou seja, a porcentagem das coletas cujos resultados atenderam aos limites estabelecidos pelo enquadramento do reservatório, aqui considerado como Classe 2. A Tabela 5 mostra os índices de conformidade obtidos para as variáveis apresentadas neste item para os pontos de monitoramento no reservatório Billings,

considerando as coletas feitas próximas da superfície do lago.

Tabela 5 – Índices de conformidade das variáveis analisadas no reservatório Billings

Parâmetro	Índice de Conformidade (%)					
	B1S	B2S	B3S	B4S	B5S	B6S
P Total (mg/l)	21	49	64	80	100	100
N Amoniacal (mg/l)	18	40	64	60	60	50
Pb Total (mg/l)	88	94	80	80	100	78
DBO (mg/l)	97	97	100	100	100	100
OD (mg/l)	21	60	67	73	73	73
Turbidez (NTU)	100	100	100	100	100	100

Os dados da Tabela 5 confirmam um quadro de degradação do reservatório, com excesso de nutrientes e a presença de esgoto de origem doméstica. Em todos os pontos de monitoramento o limite para a concentração de fósforo não foi alcançado, muito embora, perceba-se uma boa melhoria das concentrações na direção das cabeceiras da bacia. Certamente o fluxo de água para geração de energia é um indutor desse processo de decaimento e mistura, provocado pelo campo de advecção. Da mesma forma que o fósforo, os índices de nitrogênio amoniacal são elevados, indicando o lançamento de esgoto em diversas regiões do reservatório. Cabe também salientar a não conformidade para metais, principalmente chumbo, decorrente da atividade industrial não controlada, e da poluição difusa, gerada nas áreas urbanizadas na bacia. Os resultados indicam a baixa concentração de oxigênio dissolvido, o que limita sobremaneira a vida aquática no reservatório. A não conformidade da cor aparente é também um forte indicador da eutrofização do reservatório.

De modo geral, os resultados demonstraram que o impacto da flotação no reservatório Billings foi extremamente baixo, devido principalmente a todas as outras fontes poluidoras existentes na bacia. O controle de cheias e as fontes de esgotos e lançamentos clandestinos não controlados constituem agravantes muitas vezes mais importantes do que o volume bombeado pelo protótipo da flotação. Portanto, não foi detectado na Billings qualquer impacto negativo provocado pela operação do protótipo.

A Tabela 6 apresenta, para os pontos da Guarapiranga, os índices de conformidade das variáveis analisadas. Estes resultados mostram que o reservatório está com problemas relativos a excesso de nutrientes e lançamento de esgotos, este último considerando a elevada concentração de nitrogênio amoniacal existente. Considerando a diferença entre os enquadramentos dos lagos, classe 1 para a Guarapiranga e classe 2 para a Billings, os índices de conformidade de Guarapiranga são inferiores que os da Billings. Preocupam também as concentrações de chumbo encontradas, acima dos limites legais. Do mesmo modo, as concentrações de oxigênio dissolvido também apresentam valores inferiores aos da Classe 1. Há, evidentemente, sinais importantes que indicam elevado potencial de eutrofização no lago, considerando principalmente os índices de nutrientes existentes no reservatório. Do mesmo modo que a Billings, não é possível detectar na Guarapiranga qualquer impacto direto decorrente da operação do protótipo da flotação para o bombeamento de 10 m<sup>3</sup>/s do rio Pinheiros.

Seguramente o ponto G0, local mais próximo da captação Taquacetuba, não sofreu qualquer tipo de impacto de qualidade da água em função da flotação realizada.

Tabela 6 – Índice de conformidade das variáveis analisadas no reservatório Guarapiranga

Parâmetro	Índice de Conformidade (%)			
	G0	G1	G2S	G3S
P Total (mg/L)	70	0	42	44
N Amoniacal (mg/L)	70	22	58	78
Pb Total (mg/L)	90	67	92	67
DBO (mg/L)	100	100	100	100
OD (mg/L)	64	40	62	70
Turbidez (NTU)	100	100	100	100

#### h. Metodologia do Modelo de Qualidade da Água do Reservatório Billings

Reservatórios, enquanto corpos d'água superficiais, apresentam características peculiares, tais como: escoamentos apresentando velocidades pequenas, quando comparadas àquelas observadas em rios, estuários e oceanos; efeitos decorrentes de estratificação de densidade nas características dos escoamentos; fluxo de momentum horizontal através da superfície livre induzido pela ação do vento; estruturas de descarga cujas localizações e formas de operação podem afetar substancialmente estes escoamentos.

Alterações importantíssimas nos padrões de escoamento em reservatórios podem decorrer de gradientes de densidade pequenos e também pela ação do vento. Assim, reservatórios podem tornar-se estavelmente estratificados durante longos períodos de tempo, ou então, apresentarem-se como bem misturados, podendo existir um amplo espectro de situações intermediárias, dependendo também da ação do vento, vazões de entrada e saída e da meteorologia local.

Os modelos matemáticos de simulação da qualidade de água em lagos e reservatórios podem ser classificados de várias maneiras, seja em número de dimensões espaciais envolvidas, dos tipos de variáveis de qualidade da água analisadas, das hipóteses hidrodinâmicas e de outras características. Quanto ao número de dimensões espaciais consideradas os modelos de simulação de escoamentos em reservatórios podem ser classificados em modelos de dimensão zero, com uma dimensão espacial, bidimensionais em plano vertical ou horizontal, modelos bidimensionais em plano horizontal com múltiplas camadas e modelos tridimensionais

O reservatório Billings possui uma série de características que foi de fundamental importância para a escolha adequada dos modelos de simulação hidrodinâmica e de qualidade da água.

Primeiro, as cargas das variáveis de interesse ocorrem de maneira mais distribuída no espaço, isto é, com intenso aporte de cargas difusas no entorno do reservatório. Desta forma, torna-se razoável adotar a hipótese de uniformidade da carga ao longo de uma dimensão, tal como a dimensão vertical. Modelos com número menor de dimensões espaciais podem produzir resultados aceitáveis, sem demandar muito tempo de processamento.

Para fins deste projeto, o uso do solo na bacia foi atualizado para a situação de 2007 e recalculados os aportes de origem difusa. Ainda no sentido de se verificar a dimensionalidade do modelo a ser adotado, foram analisados os aspectos físicos da área inundada pelo espelho d'água deste reservatório, mediante a análise das cotas observadas.

Ao longo do registro histórico para o período de 1982 a 2007, os registros diários dos níveis d'água fornecidos pela EMAE indicaram desde valores mínimos de 738,56 m (RN EPUSP) no dia 24/12/1985 até valores máximos de 746,31 m (RN EPUSP) no dia 10/03/1996 e um valor médio para o período de 743,68 m (RN EPUSP). No período posterior à vigência artigo 46, das Disposições Transitórias da Constituição do Estado de São Paulo (de 1993 a 2007) os valores observados foram: máximo de 746,31 m (RN EPUSP), mínimo de 738,61 m (RN EPUSP) e médio de 743,35 m (RN EPUSP), indicando uma variação do nível d'água de 7,70 metros.

Neste contexto, foram analisadas as cotas do nível d'água médias e a batimetria, tendo-se chegado a valores que oscilaram entre zero e dezoito metros de profundidade. Estas áreas superficiais do espelho d'água (braços e corpo principal), ponderadas pelas respectivas profundidades de cada célula resultaram numa profundidade média para o reservatório, no período, de 6,91 metros. Este valor retrata um lago raso (profundidade média inferior a 10 metros) [3], ou seja, aonde os efeitos em planta (plano horizontal XY) podem prevalecer sobre a dimensão vertical (eixo Z, das profundidades).

A se julgar que, se mantenham as regras operacionais nos cenários sem flotação e com flotação e vazão característica variando entre 10 e 50 m<sup>3</sup>/s, notadamente a variação dos níveis, a abordagem da dimensionalidade do modelo a ser utilizado como sendo do tipo 2D-H (bidimensional horizontal), ou seja, com distribuição uniforme das variáveis de interesse ao longo da dimensão vertical, se justifica fortemente.

Além desses aspectos, é escassa a disponibilidade de modelos hidrodinâmicos desenvolvidos especialmente para ambientes tropicais. Assim, na metodologia utilizada para escolha do modelo matemático a ser utilizado, este também foi um fator de peso relevante. Neste contexto, buscou-se a aplicação de um modelo matemático que representasse a dinâmica da água e dos poluentes no interior do reservatório em ambiente tropical.

O modelo foi aplicado considerando cenários de entrada e saída de água em quantidade e qualidade variável (condições de contorno). Também foram considerados nos cenários os aspectos de maior ou menor incidência de energia solar, temperatura, ventos e pluviosidade, de acordo com a época do ano.

Para estudar o comportamento do reservatório propôs-se a utilização de um modelo hidrodinâmico bidimensional horizontal especialmente desenvolvido para ecossistemas aquáticos, o IPH-ECO [4] [5]. O modelo IPH-ECO foi desenvolvido no IPH, e foi previamente aplicado a lagos e reservatórios tropicais com resultados satisfatórios. Tal modelo permite estimar o comportamento do escoamento em lagos de água rasa resolvendo as equações de movimento em duas dimensões.

Resumidamente, o modelo IPH-ECO foi aplicado com as seguintes premissas:

- modelo bidimensional horizontal, com malha de 100 x 100 m, intervalos de tempo de 120 s e período de 5 anos;
- variáveis de qualidade simuladas: temperatura, OD, nitrogênio total, fósforo total, DBO e clorofila A;
- calibração considerando uma hidrologia mediana típica do ano de 2006;

Para a análise de cenários foram considerados:

- política de turbinamento com manutenção do nível 743.60 m (cerca de 67% do volume útil) na Billings;
- cenário base de referência: só bombeamento controle de cheias, regra de turbinamento e hidrologia de 2006;
- Q10s a Q50s: 10 a 50 m<sup>3</sup>/s sem flotação;
- Q10c a Q50c: 10 a 50 m<sup>3</sup>/s com flotação.

#### i. *Calibração do Modelo de Qualidade da Água da Billings*

Calibração é a fase em que a aceitação do modelo é analisada. Os parâmetros do modelo são ajustados de forma que a saída do modelo se aproxime aos dados observados. Os valores de referência iniciais dos parâmetros foram obtidos na literatura e seus valores foram sendo ajustados manualmente e gradualmente de modo que fosse minimizada a diferença entre os valores calculados e observados.

O período escolhido para a calibração dos aspectos hidrodinâmicos e de qualidade da água foi de 01/07/2006 a 30/06/2007 (período sem flotação). Para a validação do modelo foi escolhido o período de 01/07/2007 a 31/12/2007 (período com flotação).

Os dados utilizados para realização desta atividade estão listados abaixo:

- Batimetria atual do reservatório;
- Série de vazões que afluem ao reservatório através do bombeamento do Rio Pinheiros, em Pedreira;
- Série de vazões que efluem do reservatório através captação da SABESP, no braço do Taquacetuba;
- Série de vazões que efluem do reservatório através da tomada de água para a geração de energia, no Summit Control;
- Série de vazões que afluem ao reservatório pelas sub-bacias adjacentes, estimadas a partir do balanço hídrico;
- Estimativa das cargas de poluentes geradas nas sub-bacias adjacentes, considerando as condições de uso e ocupação do solo, as quais foram determinadas a partir metodologias aplicadas em estudos anteriores (SMA, 2004);
- Estimativa das cargas poluentes oriundas do Rio Pinheiros com e sem o tratamento por flotação;
- Séries climáticas de temperatura do ar e da água, vento (direção e intensidade), radiação solar, precipitação, evaporação e umidade relativa do ar;
- Registros de níveis d'água em alguns pontos do reservatório para a calibração hidrodinâmica do modelo;
- Dados monitorados de qualidade da água (DBO, OD, Nitrogênio Total, Fósforo Total, Coliformes, Clorofila-a, Z Secchi ou PAR - I0 e Iz - e sólidos suspensos).

Para fins da calibração do módulo de qualidade do modelo foram verificados os dados das estações de

monitoramento de qualidade de água existentes no Reservatório Billings, no compartimento de Pedreira. Diversas entidades são responsáveis pelo monitoramento de diferentes variáveis de qualidade em diferentes pontos do reservatório. Para esta etapa de calibração foram usados dados provenientes dos monitoramentos realizados pela CETESB (pontos BILL02100, BILL02500, BILL02900, BITQ00100 e BITQ00100) e pela SABESP (pontos BL101 a BL106) no período de 01/07/2006 a 30/06/2007. O modelo foi validado e no período de 01/07/2007 a 31/12/2007, com os dados provenientes dos monitoramentos realizados pela SABESP, CETESB e durante o próprio projeto QAPB.

Muitas das variáveis de interesse observadas no campo ficaram abaixo dos limites de detecção, por exemplo, valores de DBO<sub>5</sub> menor que 5 mg/L. Por estes motivos, foi considerada uma faixa de incerteza decorrente do método, para comparação com os valores simulados. Nos pontos onde existiam informações medidas ao longo da coluna d'água, por exemplo, superfície, meio e fundo, foi considerada a média dos valores observados para a coluna d'água e uma faixa de incerteza correspondente aos valores máximos e mínimos.

Os aspectos hidrodinâmicos foram simulados considerando-se a variabilidade das vazões de entrada e de saída no reservatório. Na Figura 9 é apresentada a comparação entre os valores observados e simulados do nível d'água em Pedreira. Observa-se um bom ajuste da modelação no período de calibração e validação do modelo. O modelo mostrou ser convergente e conservativo. Momentâneas diferenças entre os valores observados e simulados ocorreram devido à impossibilidade de representar fielmente o balanço hídrico em curtos intervalos de tempo.

Com relação aos aspectos de qualidade, pode-se dizer que como resultado da alta urbanização no compartimento que vai de Pedreira até a ponte da Rodovia dos Imigrantes, os padrões de qualidade da água neste compartimento são distintos dos padrões encontrados no compartimento entre a ponte da Rodovia dos Imigrantes e o Summit Control.

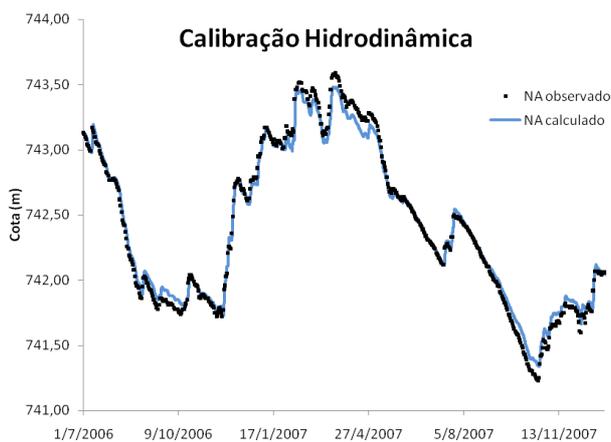


Figura 9 – Comparação dos valores observados e simulados de nível d'água em Pedreira.

Exemplos da calibração de qualidade da água podem ser observados na Figura 10 e na Figura 11 onde são apresentados, respectivamente, os dados observados e simulados das concentrações de OD no ponto BL105 e das concentrações de fósforo total no ponto BL102.

Pode-se dizer que o modelo, de maneira geral, representou bem as concentrações observadas *in situ* para todos os aspectos de qualidade da água.

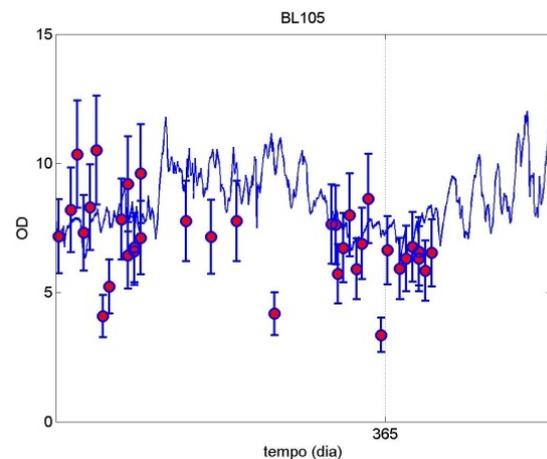


Figura 10 – Simulação de OD em mg/L no ponto BL105 durante o período de calibração e validação do modelo.

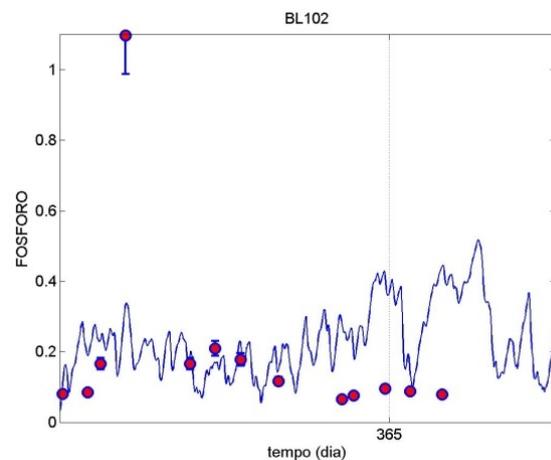


Figura 11 – Simulação de fósforo total em mg/L no ponto BL102 durante o período de calibração e validação do modelo.

#### j. Simulação da Qualidade da Água na Billings para Diferentes Cenários

As variáveis envolvidas na construção de cenários podem ser separadas em dois grupos:

- Variáveis Passíveis de Controle: vazões bombeadas por Pedreira, vazões efluentes pelo Summit Control, valores estes próximos das vazões turbinadas em Henry Borden e variáveis de qualidade da água flotada, função da eficiência do tratamento feito pelo protótipo.
- Variáveis Não Passíveis de Controle: vazões afluentes pelas sub-bacias obtidas através do balanço hídrico dos dados do ano de 2006; vazões efluentes pela tomada do Taquacetuba, adotadas como sendo as que efetivamente ocorreram no período de janeiro a dezembro de 2006, cargas e concentrações afluentes pelas sub-bacias que dependem do crescimento populacional, do tipo de esgotamento sanitário, do uso e ocupação do solo, da rede de drenagem, entre outros, e os dados meteorológicos, baseados no ano de 2006.

O modelo foi utilizado para simular o comportamento do reservatório operando sob diferentes regras. Para tanto, para análises comparativas, foi criado um cenário base. Este

cenário representa o estado do reservatório considerando somente a transposição para controle de cheias.

Para a formação dos demais cenários foi estipulada uma regra operacional de modo a variar as vazões afluentes por Pedreira e efluentes pelo Summit Control. Foram escolhidas quatro vazões características de operação em Pedreira: 10 m<sup>3</sup>/s, vazão de operação do protótipo; 30 m<sup>3</sup>/s e 40 m<sup>3</sup>/s que são as vazões que efetivamente devem ocorrer, caso o sistema seja implementado, além da vazão de 50 m<sup>3</sup>/s, a máxima prevista para o sistema.

Para cada vazão característica afluente por Pedreira foram criados dois grupos de cenários, variando-se em cada um as cargas afluentes por Pedreira.

O primeiro grupo de cenários considera que há bombeamento do Rio Pinheiros para a Billings com a finalidade de geração de energia, mas sem tratamento, ou seja, considera que o reservatório opera como operava anteriormente ao Artigo 46 das Disposições Transitórias da Constituição do Estado de São Paulo, com as vazões características já mencionadas de bombeamento em Pedreira, acrescidas de vazões para geração de energia.

O segundo grupo de cenários considera o sistema de tratamento, por flotação.

Doravante será utilizada a notação com os índices s e c, que representam, respectivamente, os cenários sem flotação (primeiro grupo) e os cenários com redução de carga (segundo grupo) em Pedreira. Por exemplo, o cenário com vazão característica de 50 m<sup>3</sup>/s e sem flotação em Pedreira, será chamado de Q50s, enquanto o mesmo cenário considerando a flotação em Pedreira será chamado Q50c.

A divisão nesses dois grupos, para cada vazão característica simulada, permite diferenciar a qualidade da água do reservatório Billings sem e com a flotação.

As porcentagens de redução foram obtidas através da comparação entre os dados de concentrações das variáveis de interesse nos pontos P1 e P4-A. A redução de concentração de determinada variável entre estes dois pontos foi considerada como efeito do tratamento.

Na Figura 12 são apresentados, em cada um dos pontos de interesse (B1 a B6), os resultados das variações das concentrações médias de fósforo total conforme se aumenta a vazão característica que aflui por Pedreira.

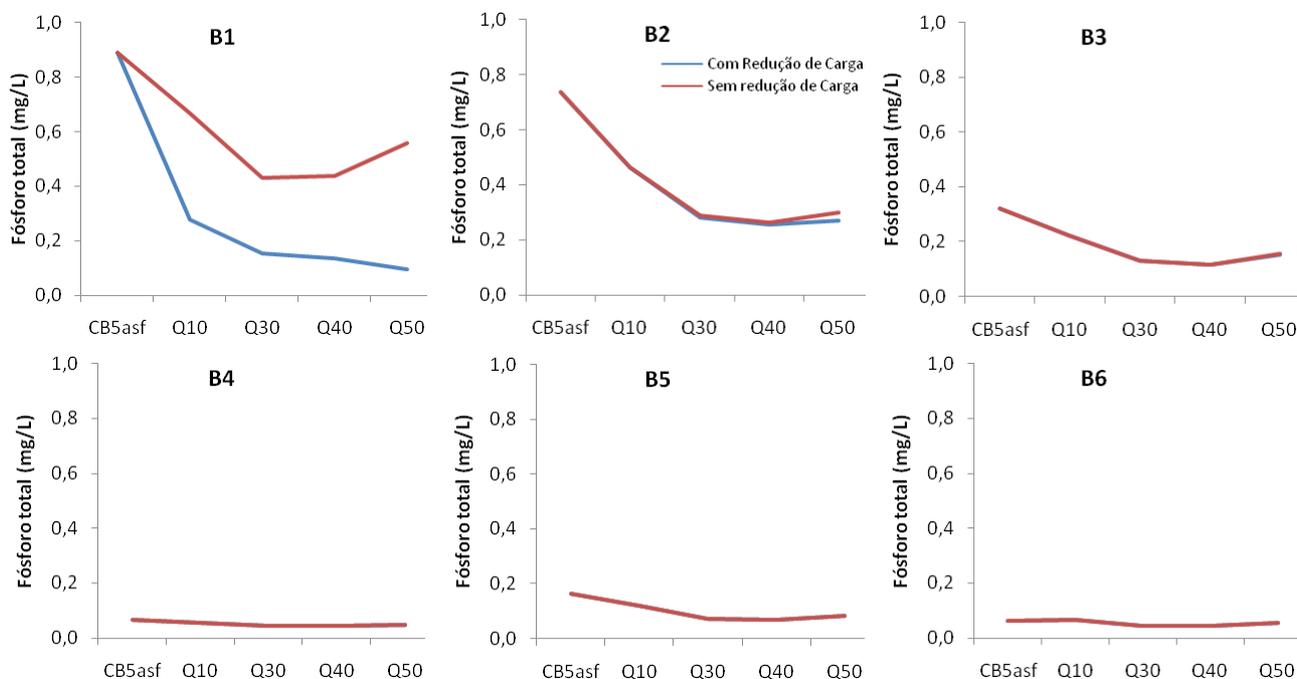


Figura 12 – Variação da concentração média de fósforo total para os cenários simulados.

É possível observar que a flotação só tem influência no ponto B1, pois nos outros pontos os resultados das concentrações médias de fósforo total para todos os cenários, com ou sem flotação, são os mesmos.

No ponto B1 as condições operacionais que apresentaram as menores concentrações médias de fósforo total foram o Q50s e o Q50c, que são coincidentes. Fica evidente que quanto maior a vazão característica que aflui por Pedreira, menor a concentração de fósforo total neste ponto. O cenário base apresentou concentrações médias de fósforo total próximas de 0,9 mg/l, o aumento desta vazão característica para 50 m<sup>3</sup>/s reduziu esta concentração para menos de 0,1 mg/L. Todos os cenários com vazão característica diferente de zero (10, 30, 40 e 50 m<sup>3</sup>/s) apresentaram concentrações de fósforo total inferiores a 0,3 mg/L, demonstrando que, independente da vazão, a

concentração média de fósforo total no ponto B1 fica reduzida a menos de um terço da concentração do cenário-base, o que caracteriza uma excelente melhoria na qualidade da água deste ponto.

Para os pontos que vão do B2 ao B5, o cenário que apresentou as maiores concentrações de fósforo total foi o cenário-base. Para os pontos B2, B3 e B5 os cenários que apresentaram as menores concentrações de fósforo total foram os cenários Q40c e Q40s, que são coincidentes. Nestes três pontos, há uma redução da concentração média de fósforo total com o aumento da vazão, até esta ser igual a 40 m<sup>3</sup>/s. Para os cenários de vazões características 50 m<sup>3</sup>/s verifica-se que há uma ligeira piora da qualidade da água, com relação ao fósforo total.

No ponto B4 a melhor situação, para o fósforo total ocorre nos cenários Q30c e Q30s. A concentração média de

fósforo total reduz com o aumento da vazão até esta ser igual a 30 m<sup>3</sup>/s, a partir de então esta concentração aumenta com o aumento da vazão. Isto ocorre, provavelmente, em função das cargas de fósforo das sub-bacias.

Já no ponto B6, os cenários que apresentaram as maiores concentrações médias de fósforo total foram os cenários Q10c e Q10s, coincidentes. Os cenários que apresentaram as menores concentrações médias foram os cenários Q30c e Q30s.

Outro aspecto importante é a variação significativa dos tempos de detenção no reservatório Billings para os diversos cenários, como se observa na Tabela 7.

Certamente as regras de turbinamento que levam a tempos de detenção menores propiciam melhorias nas condições de mistura do lago, como pode ser observado na Figura 12.

Tabela 7 – Tempos de detenção no reservatório Billings

Cenário	Tempo de Detenção (anos)
Cenário-Base	2,38
Q10	1,36
Q30	0,98
Q40	0,86
Q50	0,74

### III. Conclusões

Considerando os objetivos do estudo são apresentadas as seguintes conclusões e recomendações:

- A eficiência do processo de flotação para remoção de fósforo foi de 91%, ou seja, a remoção foi bastante elevada, com ajustes no processo talvez seja possível alcançar os 95% esperados;
- A remoção de outros poluentes também foi significativa, com destaque para a redução de DBO e de metais;
- Houve uma série de interrupções no processo de flotação, a questão da intermitência na operação precisa de melhor avaliação, para que se possa rever a logística de ações de campo;
- De acordo com as variáveis de qualidade observadas na Billings, a operação do protótipo da flotação (10 m<sup>3</sup>/s) não produziu impacto negativo detectável no reservatório;
- O modelo matemático da qualidade de água da Billings foi desenvolvido e está capacitado a estimar os impactos de diferentes cenários de lançamento de poluentes no reservatório e de novas regras operativas;
- De acordo com os cenários analisados pelo modelo de qualidade, o alcance do bombeamento de água flotada para Billings só é significativo até a região do braço Bororé. Esse resultado é extremamente favorável, pois, o alcance esperado se restringe a uma pequena área do reservatório, mesmo com o bombeamento máximo previsto de 50 m<sup>3</sup>/s;
- O modelo de qualidade demonstrou que a troca de água do reservatório em menores intervalos de tempo favorece a mistura de poluentes, isso sugere analisar novas políticas de turbinamento, que poderão contribuir para a redução do tempo de detenção, conseqüentemente, melhorando as condições de mistura de poluentes no reservatório.

### IV. Agradecimentos

Os autores agradecem a todos os que colaboraram para tornar possível este trabalho:

- Prof. Steven Chapra da Tufts University
- Hidrometrista José Roberto Siqueira;
- Equipe de pesquisadores do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul;
- Eng. Fernando José Moliterno, gerente do Depto. de Engenharia da EMAE;
- Eng. Sebastião Deusdediti Lopes, gerente do Depto. de Gestão Ambiental da EMAE;
- Daniel Jesus de Lima, técnico em meio ambiente da EMAE;
- Jacqueline Punkas Funtowicz, analista administrativo da EMAE;
- César Cyrillo Lloret, estagiário da FCTH;
- Maria Cristina Santana Pereira, estagiária da FCTH.

### V. Referências Bibliográficas

- [1] São Paulo, Constituição do Estado de São Paulo, 1989 [on line]. Disponível em: <http://www.legislacao.sp.gov.br/dg280202.nsf/a2dc3f553380ee0f83256cfb00501463/46e2576658b1c52903256d63004f305a?OpenDocument>
- [2] EMAE *Empresa Metropolitana de Águas e Energia*, “O Complexo de Geração Henry Bordem”, 2008 [on line]. Disponível em: [www.mp.sp.gov.br/portal/page/portal/Billings/O\\_que\\_e\\_flotacao](http://www.mp.sp.gov.br/portal/page/portal/Billings/O_que_e_flotacao)
- [3] A. James *et al.*, *An Introduction to Water Quality Modelling*, 2nd. Ed., John Wiley & Sons Ltd., 1993, p. 324.
- [4] C. R. Fragoso Jr, C. E. M. Tucci, W. Collischonn, and D. M. L. M. Marques, “Simulação de Eutrofização em Lagos Rasos: I - Modelo e Precisão Numérica”, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, p. 23-35, 2007.
- [5] C. R. Fragoso Jr, C. E. M. Tucci, W. Collischonn, and D. M. L. M. Marques, “Simulação de Eutrofização em Lagos Rasos: II – Sistema do Taim (RS)”, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, p. 23-35, 2007.