

RECUPERAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO BILLINGS COM O SISTEMA DE FLOTAÇÃO DO RIO PINHEIROS

Mario T. Leme de Barros¹; Luiz F. Orsini Yazaki²; Monica F. Amaral Porto³; J. Rodolfo S. Martins⁴; José C. Mierzwa⁵; Rosa H. O. Martins⁶; Ludmilson A. Mendes⁷; Camila B. N. Borges⁸; Marcelo M. de Castro⁹; Renato C. Zambon¹⁰; Carlos R. Pereira¹¹; Fernando J. Moliterno¹²

RESUMO – Este artigo é uma síntese dos trabalhos realizados para a avaliação da qualidade das águas do sistema Pinheiros-Billings com a operação do protótipo da estação de tratamento por flotação, implantado para o tratamento das águas do Rio Pinheiros que são transpostas para o reservatório Billings. As análises estatísticas das variáveis de qualidade monitoradas mostraram que a eficiência do protótipo foi próxima à esperada para estações de tratamento desse tipo. Houve significativa remoção de fósforo e redução, em maior ou menor nível, de outros poluentes. Considerando as variáveis de qualidade monitoradas durante os testes não foram detectados, além da zona de mistura, impactos negativos nas águas do reservatório Billings, que pudessem ser associados diretamente à operação do protótipo, isto é: não houve nenhuma diferença estatisticamente mensurável nas variáveis de qualidade monitoradas antes e pós-operação do sistema. Este resultado foi também confirmado nas avaliações feitas através das simulações em modelo matemático. Portanto, analisando-se os aspectos estritamente técnicos, sem levar em conta questões relativas à viabilidade econômica, e considerando o universo dos indicadores de poluição estudados, o sistema de tratamento por flotação demonstrou possuir capacidade para mitigação dos impactos do bombeamento das águas do rio Pinheiros para o reservatório Billings.

ABSTRACT – This article synthesizes the work performed to assess the water quality of Pinheiros-Billings system with the flotation treatment plant prototype operation, constructed to reduce water pollution transferred from Pinheiros River to Billings reservoir. Statistical analysis showed that the efficiency of the prototype was close to expected for such treatment plants. There was significant removal of phosphorus and reduction of other pollutants. During the tests negative impacts in the water of the Billings reservoir were not detected, considering the quality variables monitored. There was no statistical difference in measurable quality variables monitored before and after operation of the system. This result was also confirmed in the assessments by using mathematical model. Therefore, without taking into account issues relating to economic viability, and considering the universe of studied pollution indicators, the flotation system has demonstrated potential ability to mitigate the impacts of pumping water from the Pinheiros River to Billings reservoir.

Palavras-chave: usos múltiplos, qualidade da água, flotação.

¹ Professor Titular da Escola Politécnica da USP. Av. Prof. Luciano Gualberto, tr 3, nº 380, 05508-970 São Paulo, SP. E-mail mtbarros@usp.br

² Engenheiro da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. Rua Pde. Garcia Velho, 73, cj. 44, 05421-030 São Paulo, SP. E-mail luizorsini@fcth.br

³ Professor Titular da EPUSP. Av. Prof. Luciano Gualberto, tr 3, nº 380, 05508-970 São Paulo, SP. E-mail mporto@usp.br

⁴ Professor Doutor da EPUSP. Av. Prof. Luciano Gualberto, tr 3, nº 380, 05508-970 São Paulo, SP. E-mail scarati@usp.br

⁵ Professor Livre Docente da EPUSP. Av. Prof. Luciano Gualberto, tr 3, nº 380, 05508-970 São Paulo, SP. E-mail mierzwa@usp.br

⁶ Engenheira, consultor autônomo, E-mail rh.martins@uol.com.br

⁷ Engenheiro da FCTH. Rua Pde. Garcia Velho, 73, cj. 44, 05421-030 São Paulo, SP. E-mail ludmilson@fcth.br

⁸ Economista da FCTH. Rua Pde. Garcia Velho, 73, cj. 44, 05421-030 São Paulo, SP. E-mail camila@fcth.br

⁹ Engenheiro da FCTH. Rua Pde. Garcia Velho, 73, cj. 44, 05421-030 São Paulo, SP. E-mail marcelo.casto@fcth.br

¹⁰ Professor Doutor da EPUSP. Av. Prof. Luciano Gualberto, tr 3, nº 380, 05508-970 São Paulo, SP. rczambon@usp.br

¹¹ Engenheiro da Empresa Metropolitana de Águas e Energia. Av. N. Sa. do Sabará, 5312, 04447-010 São Paulo, SP. E-mail pereira@emaes.sp.gov.br

¹² Engenheiro da EMAE. Av. N. Sa. do Sabará, 5312, 04447-010 São Paulo, SP. E-mail fernando.moliterno@emaes.com.br

1. INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta uma síntese dos trabalhos desenvolvidos pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) para o projeto de Pesquisa & Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em convênio de cooperação com a Empresa Metropolitana de Águas e Energia (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 (Projeto QAPB) tem como objetivo fornecer subsídios para o EIA/RIMA 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, será possível voltar a bombeá-las para o reservatório Billings e, assim, aumentar a disponibilidade hídrica para a produção de energia hidrelétrica no complexo Henry Borden, sem prejuízo aos demais usos da água.

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 $157 \text{ m}^3/\text{s}$ 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 apenas a contribuição direta da bacia do reservatório é insuficiente. As obras do sistema de reversão, que abrangeram a retificação do rio Pinheiros e a construção das elevatórias de Pedreira e Traição, foram implantadas nos anos 30. Atualmente o sistema de reversão tem capacidade máxima de $395 \text{ m}^3/\text{s}$, mas somente opera em caso de risco de extravasamento das calhas dos rios Tietê e Pinheiros.

Desde sua construção, a qualidade da água do reservatório Billings vem piorando gradativamente. A ocupação da bacia do Billings e o aumento da poluição dos rios Tietê e Pinheiros aumentaram a carga de poluentes lançada no reservatório. Na tentativa de melhorar sua condição de qualidade, o bombeamento contínuo para geração de energia foi paralisado. A reversão Pinheiros-Billings passou então a ser feita somente para o controle de cheias dos rios Pinheiros e Tietê e, com essa medida, a capacidade de produção da usina de Henry Borden foi reduzida em aproximadamente 75%. Mais recentemente, no braço do rio Taquacetuba, entrou em operação uma tomada d'água que transfere água do Billings para o reservatório Guarapiranga. Esta transferência tem a finalidade de aumentar a disponibilidade de água na captação da SABESP – Cia de

Saneamento Básico do Estado de São Paulo - situada no Guarapiranga. Portanto, o reservatório Billings e o sistema de reversão Pinheiros-Tietê são hoje empregados para três finalidades: geração de energia, controle de cheias e abastecimento.

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. Como mostrado neste artigo, o Projeto QAPB se concentra nas questões ambientais ao analisar os impactos da operação do sistema de flotação no reservatório Billings.

2. PREMISSAS

O sistema de tratamento avaliado neste trabalho foi concebido a partir da importância estratégica da usina de Henry Borden para o Sistema Elétrico e da possibilidade de melhorar as condições ambientais do rio Pinheiros, de forma que possam ser revertidas para o reservatório Billings, sem comprometer seu uso para abastecimento público atendendo, portanto, às disposições legais.

No futuro, a implantação do sistema completo, aliado a medidas complementares de controle de poluição, permitirá a reversão de 50 m³/s para o reservatório Billings e, conseqüentemente, um aumento médio de 280 MW na produção de energia na usina de Henry Borden.

A importância estratégica dessa medida fundamenta-se, não somente na possibilidade de aumentar a oferta de energia, mas também nas premissas do uso múltiplo das águas, destacando-se as seguintes questões:

- A usina hidrelétrica de Henry Borden, além de se situar praticamente dentro do maior centro de consumo do país, é uma das usinas de maior produtividade do Brasil, produzindo cerca de 6 MW por m³/s vertido.
- Para efeito de comparação, constatou-se que 1 m³/s de água vertida para Henry Borden produz o dobro de energia que a mesma vazão lançada na cascata dos rios Tietê e Paraná.
- Para a recuperação ambiental do reservatório deve-se reduzir o tempo de residência hídrica e, por conseguinte, possibilitar a troca mais freqüente da água.
- A disponibilidade hídrica dos sistemas produtores atuais para abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo está no limite. O risco de haver um colapso no abastecimento é iminente (FUSP, 2007). Por esse motivo o sistema de reversão do Taquacetuba (Billings-Guarapiranga) deverá continuar em operação por bastante tempo, até que novos mananciais sejam viabilizados.
- As áreas ribeirinhas do rio Pinheiros vêm se transformando em novos pólos de

desenvolvimento urbanístico, com relevante importância para o desenvolvimento da cidade de São Paulo. A recuperação da qualidade das águas do rio Pinheiros recuperará a harmonia paisagística indispensável para o progresso desses pólos.

A primeira fase deste empreendimento consiste na operação do protótipo do sistema de flotação, com capacidade de 10 m³/s, instalado no trecho do canal do rio Pinheiros entre o córrego Zavuvus e a Barragem de Pedreira. O estudo do desempenho do protótipo e de seus impactos ambientais sobre o sistema hídrico subsidiará o projeto do sistema definitivo, o Estudo de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) e o processo de licenciamento.

3. OBJETIVOS

Os objetivos gerais do estudo são:

- Avaliar a eficiência do processo de flotação do rio Pinheiros quanto à sua capacidade de remover os principais poluentes monitorados neste rio;
- Avaliar o impacto do bombeamento das águas flotadas do rio Pinheiros no reservatório Billings e no reservatório Guarapiranga com o acompanhamento da variação de indicadores de qualidade da água, durante os testes do protótipo.
- Estudar, através de modelo matemático de qualidade da água, os efeitos do bombeamento das águas flotadas do rio Pinheiros sobre o reservatório Billings em diferentes cenários de vazões e cargas poluidoras afluentes ao lago.

4. METODOLOGIA

Para este estudo foi desenvolvido e implantado um sistema de monitoramento temporário que permitiu a avaliação do comportamento da qualidade das águas do Sistema Pinheiros-Billings em função da operação do protótipo do sistema de flotação. Os dados coletados foram armazenados em um banco de dados também alimentado com dados do monitoramento sistemático da SABESP, da CETESB e dados de operação do sistema gerados pela EMAE.

Para consulta ao banco de dados foi desenvolvido um sistema de acesso que permite ao usuário visualizar e exportar os dados de diferentes formas, facilitando assim os procedimentos de análise.

A avaliação do desempenho do sistema abrangeu basicamente: análise estatística dos padrões de qualidade das águas dos rios Pinheiros e Tietê na entrada e na saída da estação de tratamento; análise estatística da variação dos indicadores de qualidade no reservatório Billings antes e após o funcionamento do protótipo.

Para o estudo dos impactos do bombeamento das águas flotadas do rio Pinheiros no reservatório Billings, foi também utilizado, como ferramenta, um modelo matemático de qualidade que permitiu avaliar o comportamento do sistema quando submetido a vazões e cargas diferentes das observadas nos testes. Com essa técnica foi possível inferir, por exemplo, os padrões de qualidade de água no reservatório Billings quando o sistema definitivo, com capacidade de 50 m³/s, entrar em operação.

5. O PROTÓTIPO DO SISTEMA DE FLOTAÇÃO

Conceitualmente, o processo de tratamento por flotação tem como objetivo 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 para destinação final. Para que a separação dos sólidos seja eficiente é necessário utilizar processos e operações unitárias que possibilitem a desestabilização das partículas presentes na água 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 a estes sólidos.

A eficiência do processo varia em função do tipo de poluente, da engenharia do sistema e da sistemática operacional. Nos testes do sistema instalado no rio Pinheiros verificou-se que nem sempre a eficiência do protótipo foi a esperada, tanto em relação à eficiência teórica como em relação aos testes anteriores em menor escala.

O protótipo de flotação em teste no rio Pinheiros é composto de duas estações em linha, denominadas E1 e E2, instaladas no canal a uma distância de 3.300 m entre si. A primeira estação da flotação (E1) localiza-se a jusante da foz do córrego Zavuvus. A segunda estação (E2) localiza-se a 770 m da Usina Elevatória de Pedreira. As localizações das estações de tratamento e das demais unidades de operação do sistema Pinheiros-Billings são mostradas esquematicamente na Figura 1. A descrição do processo pode ser vista, em cada uma das suas fases, na Figura 2, apresentada na seqüência.

Os itens subseqüentes descrevem as diversas fases do tratamento de água por flotação que ocorrem em cada uma das duas estações instaladas no Rio Pinheiros.

5.1. 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 suspensas,

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, coletada a jusante da estação.

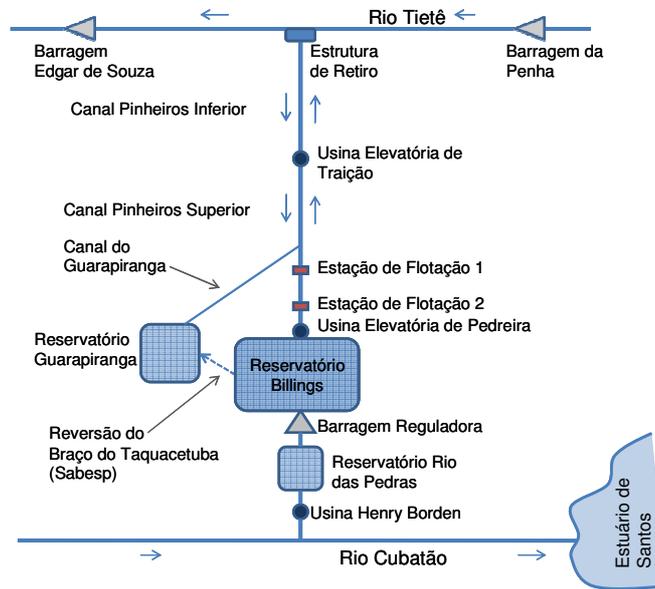


Figura 1 – Diagrama Unifilar do Sistema Pinheiros-Billings

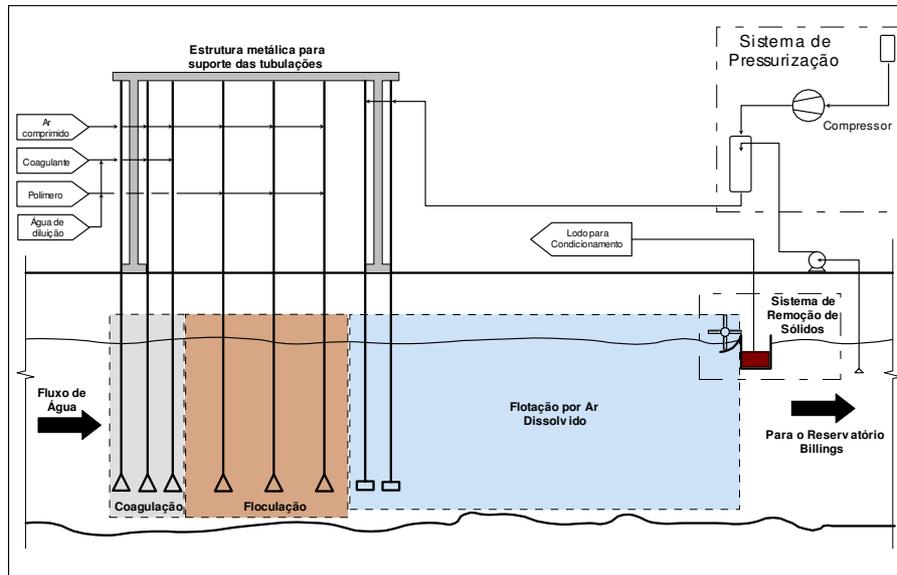


Figura 2– Esquema do processo de flotação do rio Pinheiros

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 ficam 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.

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. A Figura 3 apresenta uma imagem desta etapa do processo.

5.2. 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



Figura 3 – Adição química e mistura rápida

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. A Figura 4 apresenta uma imagem desta etapa do processo.

5.3. 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 10% a 15% 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 flitem para a superfície da água, promovendo assim a clarificação. A Figura 5 apresenta uma imagem desta etapa do processo.



Figura 4 – Processo de floculação



Figura 5 – Injeção de ar dissolvido e flotação

5.4. Remoção dos sólidos flotados

Ao final do trecho da bacia de flotação, os flocos se acumulam na superfície da água, formando um lodo que é direcionado à estrutura de remoção. Esta estrutura é constituída por pás rotativas que lançam o lodo em um sistema de calhas coletoras de onde é bombeado para o sistema de desidratação, para posterior disposição final.

A água clarificada passa sob a estrutura de remoção de lodo, seguindo o curso do rio, de onde é bombeada para a represa Billings. As figuras 6 e 7 apresentam imagens desta etapa do processo.



Figura 6 - Pás de coleta de sólidos flotados



Figura 7 – Lodo flotado na superfície do rio

5.5. Adensamento e desidratação do lodo

O lodo retirado do rio é direcionado à central de adensamento, na margem do rio, cujo objetivo é aumentar a concentração de sólidos antes do processo de desidratação. O lodo adensado é então encaminhado para separadores centrífugos, onde ocorre a injeção de uma solução de 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. A Figura 8 mostra esta etapa do processo.

5.6. 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. A Figura 9 e a Figura 10 apresentam imagens desta etapa do processo.



Figura 8 – Desidratação do lodo



Figura 9– Carregamento do lodo desidratado



Figura 10– Lançamento do lodo no bota fora

6. O SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA

Para o acompanhamento dos testes foi montado um sistema especial de monitoramento. Inicialmente procedeu-se ao planejamento da campanha com a identificação física dos pontos de amostragem previstos, a verificação e a aquisição de equipamentos, a definição das variáveis de qualidade a serem monitoradas, da rotina de coleta e análise de dados de campo.

O Plano de Monitoramento abrangeu o monitoramento hidrológico e o monitoramento de qualidade da água em pontos notáveis do sistema compreendido pelo rio Tietê, rio Pinheiros, reservatório Billings e reservatório Guarapiranga.

O monitoramento hidrológico foi conduzido a partir de estações climatológicas existentes e teve por finalidade quantificar as entradas e saídas hídricas no reservatório Billings durante o teste.

O monitoramento de qualidade abrangeu 200 variáveis amostradas em pontos distribuídos

Tabela 2- Quantidade de resultados obtidos com a sonda de qualidade no período de 22/08/2007 a 30/09/2008

Variável de Qualidade	Resultados
Temperatura	7.689
Pressão da coluna de água	7.683
Pressão atmosférica	7.689
Turbidez	7.615
Condutividade	7.600
Amônia	3.146
Oxigênio Dissolvido	5.539
pH	7.666
Total	57.927

A sonda automática da FCTH, instalada no ponto P4A situado na entrada da bomba da elevatória da Pedreira, opera transmitindo dados em tempo real a cada 5 minutos. Os dados são transmitidos ao Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo (SAISP), também operado pela FCTH, onde são arranjados em gráficos e tabelas. No site do SAISP esses dados são disponibilizados em um link de acesso restrito, que pode ser consultado pela equipe do projeto e por outros usuários autorizados pela EMAE. O banco de dados QAPB seleciona e armazena os dados de qualidade da água coletados pela sonda nas horas cheias (0h00, 1h00, 2h00, etc.) que, no período analisado, somam um total de mais de 57 mil dados.

Tabela 3 - Quantidade total de resultados obtidos no monitoramento

Tipo de monitoramento	Quantidade de resultados
Monitoramento Discreto	90.405
Monitoramento Contínuo	57.927
Total	148.332

7. 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 devido aos seguintes motivos:

- a) Interrupção da flotação para operações de controle de cheias no rio Pinheiros quando a vazão do rio é muito superior aos 10 m³/s. Ao final de episódios de cheias é feita a limpeza da calha do rio e o sistema de flotação permanece desligado por mais 48 horas.
- b) Paradas para manutenção programada ou para reparo de equipamentos do sistema de flotação.
- c) Período inicial de ajustes do processo que abrangeu os primeiros dois meses de operação (setembro e outubro de 2007).

Entre final de outubro de 2007 e fevereiro de 2008, na estação de chuvas, as operações de controle de cheia foram mais frequentes impedindo o funcionamento regular do protótipo da flotação por períodos mais prolongados. Conforme os dados apresentados no gráfico da Figura 12, durante esse período, a parcela do volume de água flotada bombeado para o reservatório Billings foi muito menor que o volume bombeado devido a operações de controle de cheias.

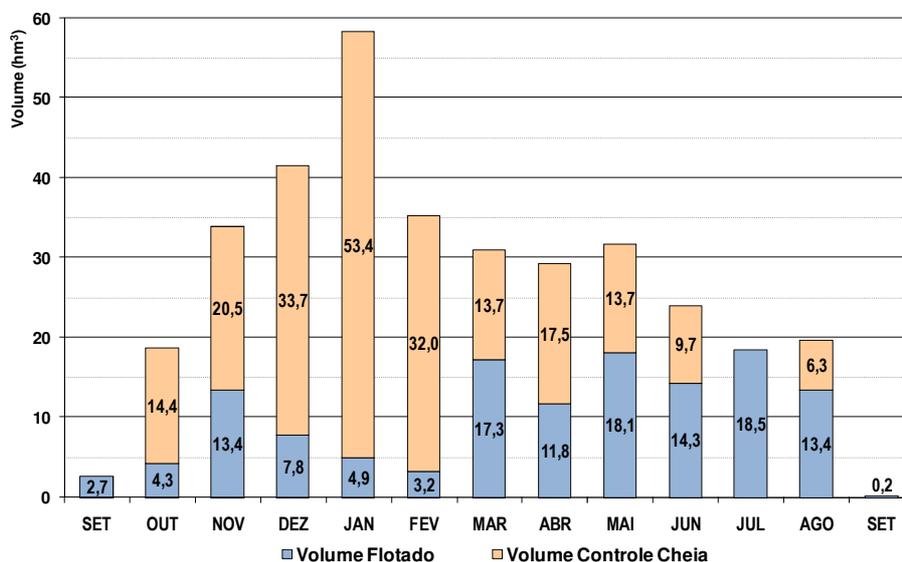


Figura 12 – Volume bombeado para o reservatório Billings (hm³) entre 01/09/07 e 18/09/08

Analisando o tempo de operação da flotação em cada mês em relação ao tempo esperado de funcionamento, isto é, descontando-se as paradas para controle de cheias e limpeza do canal, observam-se melhores índices de operação a partir de março de 2008, conforme mostra a Figura 13.

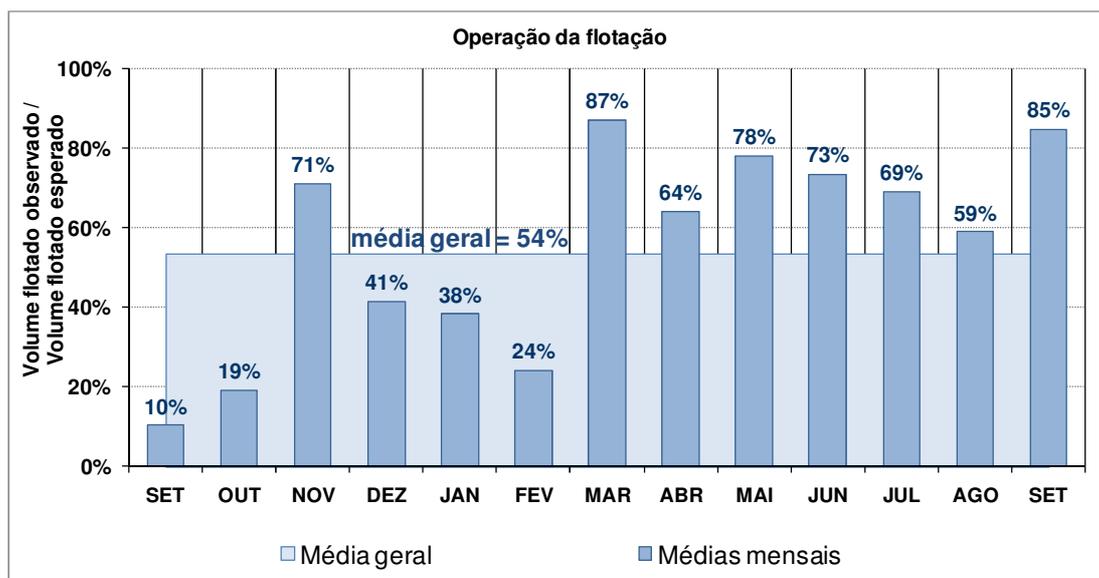


Figura 13 – Operação observada em relação a operação esperada entre 01/09/07 e 18/09/08

8. EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE FLOTAÇÃO 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, obteve-se 88 dias de operação contínua 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, correspondente ao tempo de translação da água entre esses dois pontos.

Para determinar a eficiência do tratamento por flotação, foram analisados 25 indicadores de qualidade. Apresenta-se aqui um resumo dos resultados obtidos para seis desses indicadores: Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅), Oxigênio Dissolvido (OD), Fósforo Total, Nitrogênio Amoniacal, Coliformes (E.Coli) e Turbidez.

A Tabela 4 apresenta as concentrações médias dessas variáveis nos pontos de monitoramento P1 e P4A (antes e depois do sistema de flotação) e os respectivos índices de conformidade. Estes últimos definidos como sendo a razão entre o número de resultados abaixo dos limites pré-fixados na Composição Judicial que determinou a realização do teste e o número total de resultados.

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

Variável de qualidade	Valores médios		Variação P1-P4A		Conformidade	
	P1	P4A	Obtida	Esperada	P1	P4A
Fósforo Total (mg/L)	0,586	0,050	-92%	-95%	21%	73%
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	24,2	20,6	-15%	-	20%	37%
Escherichia coli (NMP/100mL)	300.494	29.699	-90,1%	-99,9%	Sem limite fixado	
DBO ₅ (mg/L)	72	34	-53%	-71%	35%	95%
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	2,3	3,1	+34%	-	2%	4%
Turbidez (UNT)	58	31	-46%	-91%	96%	100%

Um exame mais detalhado da Tabela 4 permite verificar que houve remoção significativa de fósforo total (92%), indicador de grande relevância para o controle do processo de eutrofização do reservatório Billings. Por outro lado, houve baixa remoção de nitrogênio amoniacal (15%), o que era esperado para esse tipo de processo.

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

Em relação à remoção de matéria orgânica, em termos de DBO₅, o processo de flotação mostrou uma eficiência de 53%.

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.

Todos os resultados se mostraram abaixo dos esperados em relação aos resultados obtidos em testes anteriores feitos em modelos em escala reduzida.

9. CARGAS LANÇADAS NO RESERVATÓRIO BILLINGS

Para melhor avaliar o impacto das cargas lançadas no reservatório Billings foi feita a comparação entre as cargas de poluentes da água tratada por flotação e da água não tratada lançada nos eventos de controle de cheias. Para tanto foi selecionado um grupo de cinco variáveis de qualidade: Fósforo Total, Nitrogênio Amoniacal, Nitrogênio Nitrato, DBO₅ e Sólidos em Suspensão Totais. Os eventos analisados possuem as seguintes características:

- Flotação: inclui os resultados das amostras coletadas nos mesmos 88 dias de operação contínua avaliados no item anterior.
- Controle de cheias: inclui 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 e 350 m³/s.

O cálculo foi feito com os valores médios das concentrações dos poluentes e com as vazões de bombeamento. Os resultados são apresentados na Figura 14.

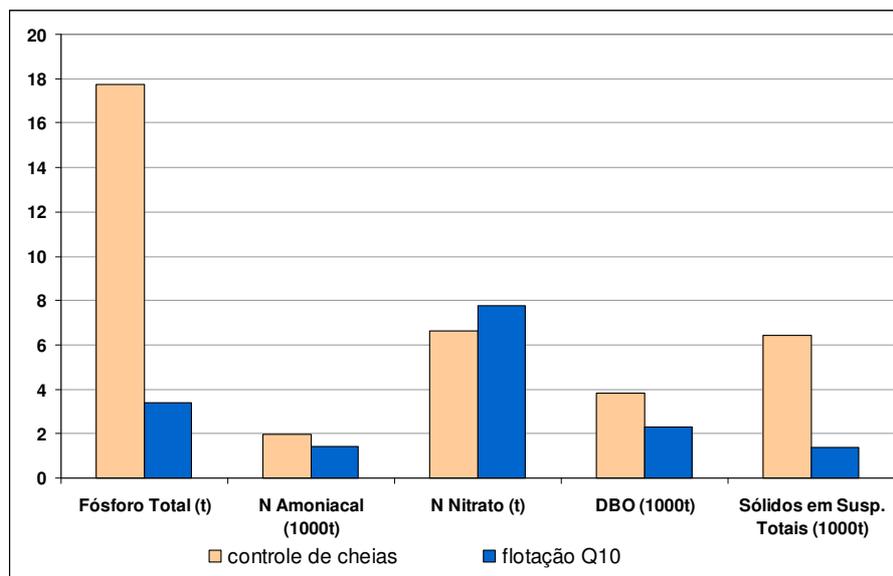


Figura 14 – Carga de poluentes bombeada ao reservatório Billings durante a flotação de 10 m³/s (88 dias) e durante o controle de cheias (17 dias).

Elevatória de Pedreira, foi utilizado como referência o ano de 2006, onde se observaram 256 dias de flotação e 68 dias de controle de cheias. Os resultados estão na Figura 15. Verifica-se que a carga de controle de cheias é superior, mesmo na escala anual de operação.

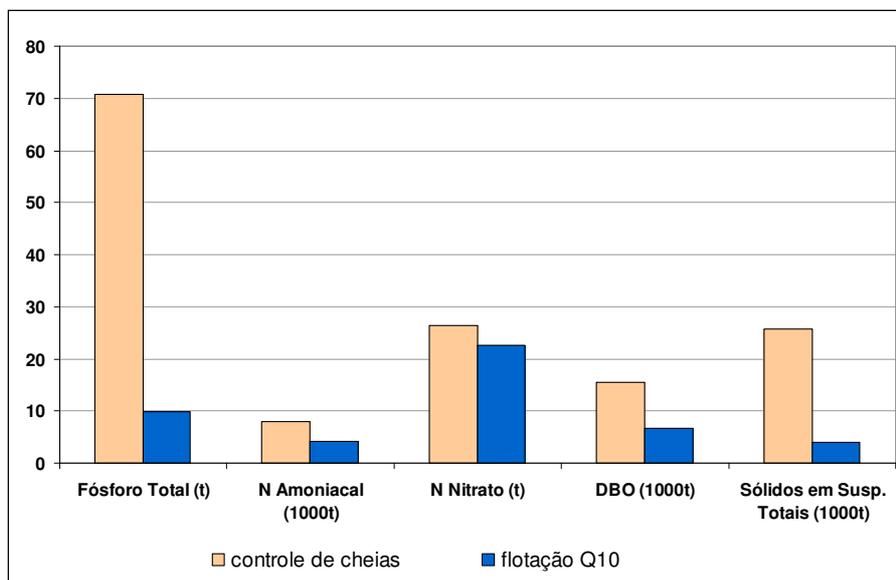


Figura 15 – Carga anual média bombeada à Billings em 68 dias de controle de cheias e 256 dias de flotação.

A Figura 16 apresenta os resultados de lançamento resultante de três operações distintas no ano típico (2006): controle de cheias por 68 dias e bombeamento de 50 m³/s com e sem flotação por 256 dias. Observa-se que nesta situação o controle de cheias ainda lança mais fósforo na Billings do que a flotação. O lançamento sem flotação apresenta a pior situação em relação ao fósforo.

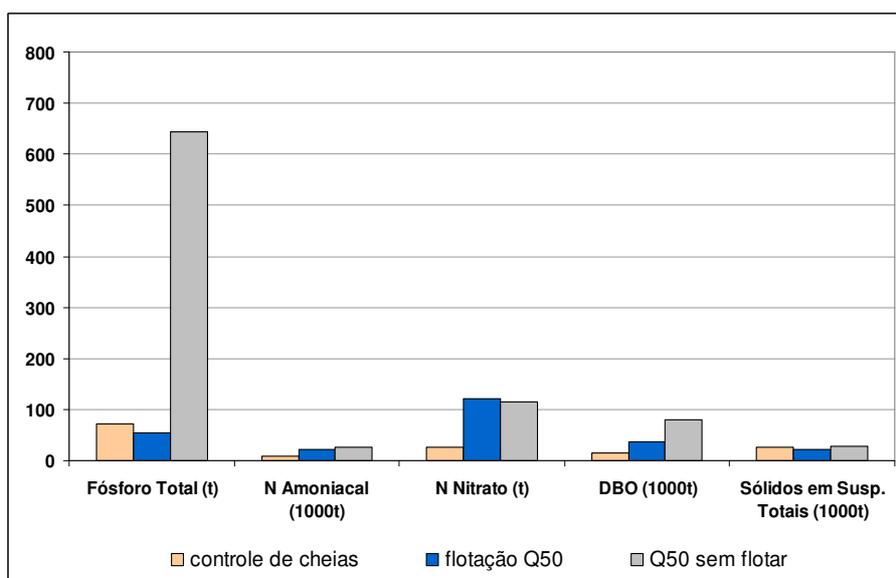


Figura 16– Carga anual média revertida à Billings em 68 dias de controle de cheias e 256 dias de bombeamento de 50 m³/s com e sem flotação.

Deve-se destacar que, além das cargas lançadas pela reversão do Rio Pinheiros (seja por controle de cheias, seja pela operação do sistema de flotação), o reservatório Billings recebe as cargas provenientes das ocupações existentes na sua bacia de contribuição direta. Para os estudos aqui descritos a concessionária de serviços de saneamento, SABESP- Cia de Saneamento do Estado de São Paulo, não forneceu os dados sobre a quantidade de esgotos lançada no reservatório Billings (esgotos não coletados mais esgotos coletados que não são enviados para tratamento e são lançados na rede de drenagem). Essas cargas foram então estimadas através da análise da ocupação atual da bacia e da projeção da população não atendida por rede de esgotos a partir dos dados disponíveis mais recentes. Esta estimativa mostrou que as cargas provenientes da própria bacia são relevantes e produzem impactos maiores que os impactos devidos à reversão do rio Pinheiros, com ou sem flotação. Por exemplo: as parcelas de fósforo lançadas no reservatório Billings considerando a reversão de 50 m³/s de água flotada do rio Pinheiros foram assim estimadas: 9% proveniente do lançamento de água flotada, 12% proveniente do lançamento da água de controle de cheias e 79% proveniente da própria bacia. Nas fases subseqüentes do trabalho esse balanço de cargas está sendo reavaliado inclusive com dados coletados diretamente nos afluentes do reservatório. Entretanto, já indicam que a recuperação do reservatório Billings depende mais das ações de saneamento na bacia do próprio reservatório do que do controle da reversão do Rio Pinheiros.

10. QUALIDADE DA ÁGUA DOS RESERVATÓRIOS BILLINGS E GUARAPIRANGA

Tratando-se de reservatórios, que possuem uma dinâmica própria na resposta ao lançamento de poluentes, a avaliação da qualidade da água dos reservatórios Billings e Guarapiranga foi realizada considerando todo o período monitorado, sem distinção dos períodos de controle de cheias ou de flotação. Foram utilizadas nesta avaliação as mesmas variáveis consideradas na análise da eficiência da flotação do rio Pinheiros.

A qualidade da água dos reservatórios é apresentada em termos de índices de conformidade nos pontos de coleta, expressos pelas porcentagens de resultados que atenderam aos limites estabelecidos pelo enquadramento dos reservatórios, sendo o Billings aqui considerado como Classe 2 e o Guarapiranga como Classe 1. Os resultados são apresentados nas tabelas 5 e 6.

Os resultados para o reservatório Billings confirmam um quadro de degradação, em função do excesso de nutrientes e a da 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 do processo de decaimento e mistura, dado que este gera campos de advecção mais intensos. Da mesma forma que o fósforo, os índices de nitrogênio

amoniacoal são elevados, indicando a presença de lançamentos 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.

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

Variável	Índice de Conformidade para Classe 2 (%)					
	B1S	B2S	B3S	B4S	B5S	B6S
P Total (mg/L)	21	49	64	80	100	100
N Amoniacoal (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

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

Variável	Índice de Conformidade para Classe 1 (%)			
	G0	G1	G2S	G3S
P Total (mg/L)	70	0	42	44
N Amoniacoal (mg/L)	70	22	58	78
Pb Total (mg/L)	90	67	92	67
DBO ₅ (mg/L)	100	100	100	100
OD (mg/L)	64	40	62	70
Turbidez (NTU)	100	100	100	100

De modo geral, não foi possível detectar no lago da Billings impactos diretamente associados à operação do protótipo, pelo menos para as variáveis monitoradas. Isso se deve principalmente a ao elevado número de 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 bombeamento de água tratada pelo protótipo da flotação.

Os resultados para o Guarapiranga mostram que o reservatório está com problemas relativos a excesso de nutrientes e lançamento de esgotos, este último considerando a elevada concentração de nitrogênio amoniacoal 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 m³/s do rio Pinheiros, pelo menos para variáveis monitoradas no teste. 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.

11. ESTUDO DE CENÁRIOS ATRAVÉS DE MODELAGEM MATEMÁTICA

Para estudar o comportamento do reservatório Billings foi utilizado um modelo hidrodinâmico bidimensional horizontal especialmente desenvolvido para ecossistemas aquáticos, o IPH-ECO (Fragoso *et al*, 2007). O modelo IPH-ECO foi desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do rio Grande do Sul e foi previamente aplicado a lagos e reservatórios tropicais com resultados satisfatórios. Tal modelo permite estimar o comportamento do escoamento em lagos de raso 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 de cerca de 67% do volume útil no reservatório;
 - Cenário base de referência: só bombeamento controle de cheias, regra de turbinamento e hidrologia de 2006;
 - Q10s a Q50s: 10 a 50 m³/s sem flotação;
 - Q10c a Q50c: 10 a 50 m³/s com flotação.

O modelo foi inicialmente calibrado para as condições hidrodinâmicas e de qualidade observadas entre 01/07/2006 a 30/06/2007 quando o protótipo de flotação ainda não operava. Para tanto foram utilizados dados operacionais da EMAE e dados do monitoramento sistemático da CETESB. Para a validação do modelo foi escolhido o período de 01/07/2007 a 31/12/2007 já com a utilização de dados do monitoramento do projeto.

Na Figura 17 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.

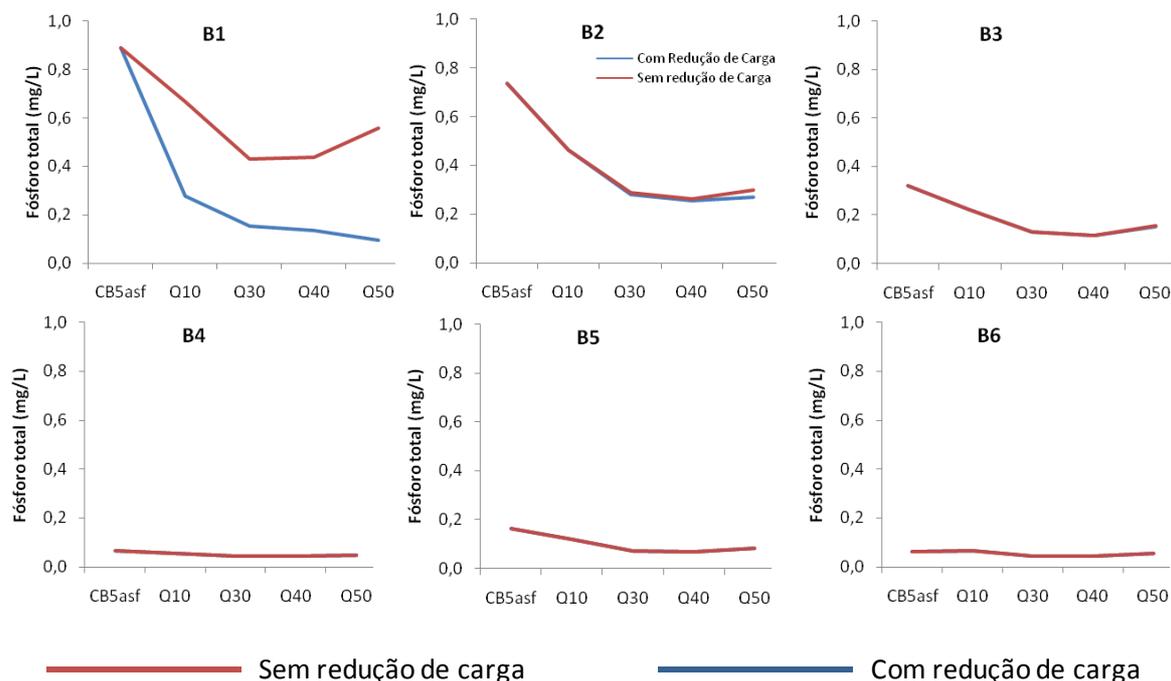


Figura 17– Variação da concentração média de fósforo total para os cenários simulados.

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.

12. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

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%, valor próximo do esperado para esse tipo de processo;
- A remoção de outros poluentes também foi razoável, com destaque para a redução de DBO;
- 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 operações de campo;
- De acordo com as variáveis de qualidade observadas na Billings, a operação do protótipo da flotação (10 m³/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, variando-se a vazão flotada entre 10 a 50 m³/s, observam-se impactos significativos na qualidade da água do lago da Billings até a região do braço Bororé. Ou seja: o alcance esperado se restringe a uma pequena área do reservatório, mesmo com o bombeamento máximo previsto de 50 m³/s. Este resultado precisa ser mais bem avaliado, considerando principalmente cenários de recuperação ambiental das áreas ocupadas no entorno do reservatório;
- 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.

BIBLIOGRAFIA

São Paulo, Constituição do Estado de São Paulo, 1989 [on line]. Disponível em:

<http://www.legislacao.sp.gov.br/dg280202.nsf/a2dc3f553380ee0f83256cfb00501463/46e2576658b1c52903256d63004f305a?OpenDocument>

EMAE Empresa Metropolitana de Águas e Energia, “O Complexo de Geração Henry Borden”, 2008 [on line]. Disponível em: www.mp.sp.gov.br/portal/page/portal/Billings/O_que_e_flotacao

FUSP – FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Plano da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê – Diagnóstico Analítico da Bacia. São Paulo, 2007.

James et al., An Introduction to Water Quality Modelling, 2nd. Ed., John Wiley & Sons Ltd., 1993, p. 324.

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.

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.