

APLICAÇÃO DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O GERENCIAMENTO DOS USOS MÚLTIPLOS DA ÁGUA DE RESERVATÓRIOS

Frederico Fábio Mauad [1]
James Lacerda Maia [2]
Alexandre Augusto Barbosa [3]

Introdução

A tomada de decisões em relação aos sistemas hídricos envolve diversos fatores e atualmente deve ser realizada com a participação de vários setores da sociedade, tornando-se uma tarefa cada vez mais complexa. Para auxiliar no processo decisório de operação de reservatórios tornam-se necessários planejamentos estratégicos que possam identificar as melhores alternativas de desenvolvimento dos recursos hídricos, considerando a distribuição equitativa, o uso racional, a minimização dos impactos ambientais e o enfoque do aproveitamento múltiplo das águas, ou seja, sistemas de exploração e controle de recursos hídricos voltados para a satisfação das necessidades humanas e das demandas vinculadas às atividades econômicas e sociais. Estas incluem o fornecimento de água para as cidades e indústrias, a irrigação, a geração de energia elétrica, a navegação, os usos relacionados com o lazer e a recreação das populações, o controle de cheias e o controle da poluição hídrica.

Com o crescimento da demanda por recursos hídricos começam a surgir conflitos entre usos e usuários da água, que passa a ser escassa e então, precisa ser gerida como bem econômico, ao qual deve ser atribuído o justo valor. Cada uso da água deve ter normas próprias, mas são necessárias normas gerais que regulamentem suas inter-relações e estabeleçam prioridades e regras para a solução dos conflitos entre usos e usuários. A disputa pelo uso da água é verificada em diversas regiões do Brasil e no Estado de São Paulo apresenta um quadro preocupante em relação à disponibilidade, demanda e poluição descontrolada do recurso hídrico.

Vale ressaltar, que para os processos de expansão e operação de reservatórios, elementos comumente utilizados para acumulação e controle dos recursos hídricos, é necessário considerar os usos concorrentes que serão beneficiados pelo sistema em questão. Assim, é fundamental avaliar objetivamente a potencialidade do sistema e a sua melhor forma de operação.

A análise de sistemas e a pesquisa operacional, em paralelo com o advento da “Era da Informática”, têm contribuído muito para o desenvolvimento de metodologias e ferramentas que têm sido aplicadas aos modelos de análise de sistemas de reservatórios, dentre as quais, destacam-se: as técnicas de análise benefício-custo; os modelos de simulação digital; os modelos de otimização com programação matemática (linear, não-linear, quadrática, inteira, mista, etc.); os modelos de rede de fluxo; os modelos de otimização com programação dinâmica; as técnicas de modelagem de bancos de dados. Algumas dessas técnicas e metodologias

obtiveram mais sucesso que outras, em função de diversos fatores, como facilidade de aplicação, adequação aos problemas, flexibilidade, abrangência, dificuldades computacionais, representatividade dos resultados, etc.

Os modelos de otimização procuram a solução do problema de forma a atender aos objetivos estabelecidos para a operação do sistema. Isso se dá a partir da definição de uma função-objetivo, que é uma representação matemática dos objetivos a serem alcançados pela operação do sistema em análise. Dessa forma, os modelos de otimização buscam a maximização ou minimização da função-objetivo, cujas variáveis básicas são as chamadas variáveis de decisão. Uma vez resolvido o problema, o conjunto das variáveis de decisão obtido é a solução ótima para a operação do sistema. Todos os processos físicos e condições de contorno do problema formam o conjunto das equações de restrição, como por exemplo, os limites para as capacidades do reservatório, os limites para as vazões defluentes, o respeito ao balanço de massa, etc. (BRANDÃO, 2004).

Yeh (1985) aborda vários tipos de modelagem para operação de reservatórios, porém o maior destaque é dado aos modelos de otimização como a programação linear (PL) e a programação dinâmica (PD) e suas variações (PD estocástica, PD incremental com aproximações sucessivas, PD com restrições probabilísticas e otimalidade progressiva). A programação linear (PL) tem sido umas das técnicas mais aplicadas no gerenciamento de recursos hídricos, apesar de ser limitada para resolver um tipo especial de problemas onde todas as relações entre as variáveis são lineares, tanto na função-objetivo como nas funções de restrição. A aplicação da PL varia desde problemas relativamente simples de alocação direta de recursos hídricos até situações complexas de gerenciamento e operação de reservatórios (BRAGA *et al.*, 1998).

Yen e Chen (2001) através da programação linear testaram diferentes estratégias de alocação de água para prever oferta e demanda deste recurso em Taiwan no ano de 2011. O propósito foi maximizar os benefícios dos usos da água e minimizar os custos, tendo como restrições equações de continuidade, vazões máximas e mínimas atingidas, capacidade dos reservatórios e leis de conservação locais que priorizam os usos na seguinte ordem: doméstico, agricultura, produção de energia e industrial. Dotando de dados hidrológicos de 1974 a 1993 os resultados indicaram que em 2011 haverá períodos de seca, recomendando melhoria da infra-estrutura dos reservatórios e transferência da água utilizada na irrigação para os setores industriais. Francato e Barbosa (1997) analisaram alguns fatores que podem influenciar os resultados de modelos de otimização de sistemas hidrelétricos. Nesse estudo, foram enfocados aspectos relacionados ao tipo da função-objetivo e à topologia do sistema. As análises foram feitas com base na modelagem dos reservatórios de Emborcação e Itumbiara, localizados no rio Paranaíba.

Em se tratando de programação não-linear (PNL) um programa que incorpora tais algoritmos é o pacote *MINOS* desenvolvido pelo Laboratório de Otimização de Sistemas da Universidade de Stanford, Califórnia, EUA. Peng e Buras (2000) apud Brandão (2004) apresentam uma aplicação do *MINOS* na otimização da operação de reservatórios, enfatizando que a evolução dos computadores e dos algoritmos de

pesquisa operacional tem ampliado o campo de utilização dos pacotes para solução de problemas de PL e PNL de grande porte. Os autores desenvolveram uma modelagem para sistemas de reservatórios com objetivos múltiplos utilizando o método implícito para consideração da natureza estocástica das afluições.

Neste contexto e considerando a crescente complexidade de problemas que são enfrentados na gestão dos recursos hídricos, torna-se necessário a adoção dessas novas tecnologias, de forma que, a maioria dos aspectos do sistema sejam considerados e representados com o mínimo de simplificações através de um modelo de otimização aplicado para operação do reservatório de Barra Bonita no estado de São Paulo, considerando os usos múltiplos da água com objetivo de auxiliar nos processos de decisão e abordagem integrada de recursos hídricos.

Materiais e métodos

Localização e caracterização da área de estudo

O reservatório de Barra Bonita está localizado na sub-bacia do Médio Tietê Inferior, uma das sub-bacias integrantes da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos classificada com o número 10 (UGRHI-10), denominada Bacia Hidrográfica do rio Sorocaba/Médio Tietê abrangendo a porção da bacia do rio Tietê que vai desde a Barragem de Pirapora, passando pela Usina Hidrelétrica (UHE) de Rasgão até o reservatório de Barra Bonita, com 367 km de extensão e área de drenagem de aproximadamente 6.830 km². O seu braço direito está inserido na bacia dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá que influencia bastante na qualidade de suas águas. Apesar de ser formado principalmente pelo barramento dos rios Tietê e Piracicaba, o reservatório conta também com a contribuição de vários outros afluentes de maior ou menor importância conforme mostra a figura 1.



Figura 1 - Foto de satélite do reservatório, com seus afluentes (Google Earth).
Fonte: <http://earth.google.com/intl/pt/download-earth.html> (2006).

Segundo o Comitê da Bacia Hidrográfica do Sorocaba/Médio Tietê (2000), a sub-bacia do Médio Tietê Inferior é composta por sete municípios (Anhembí, Bofete, Botucatu, Conchas, Pereiras, Porangaba, Torre de Pedra) com uma população de 149.983 habitantes, exceto Botucatu (108.112 habitantes) os demais municípios têm população aproximadamente igual ou inferior a dez mil habitantes. O território abrangido pela (UGRHI-10) contém áreas urbanas, vegetação natural, pastagens, reflorestamento, culturas de horta, frutas, milho e cana de açúcar, além da extração e processamento de calcário. As indústrias presentes na região são têxteis, alimentícias, química, mecânica, eletroeletrônica e agroindústrias.

A vegetação predominante na região é a monocultura intensiva de cana, com cerca de 1.140 km² de área cultivada, com a presença de uma das maiores indústrias de álcool do mundo, que produz cerca de 1,7 milhões de litros por dia e despeja seus resíduos no rio Tietê, causando grandes impactos a sua jusante (CALIJURI; TUNDISI, 1990). Em relação às características limnológicas, o reservatório apresenta padrão de circulação do tipo polimítico, com curtos períodos de estratificação, encontrando-se em adiantado estado de eutrofização. O tempo médio de retenção das águas é de 30 dias no verão e 6 meses no inverno (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 1990).

O clima da região é considerado de transição entre os climas tropical e subtropical e as estações anuais não são bem definidas. De forma mais específica, segundo Monteiro (1973) a maior parte da área de estudo pode ser classificada quanto aos climas zonais, como climas controlados por massas equatoriais e tropicais; quanto aos climas regionais como climas tropicais alternadamente secos e úmidos (A2) e quanto às feições climáticas individualizadas nos climas regionais segundo as unidades geomorfológicas como depressão do *Perceé* do Tietê (VI).

A evaporação no reservatório é em média 1315 mm/ano, observa-se que este valor aproxima bastante da precipitação média anual, uma vez que o inverno é caracterizado por apresentar temperaturas médias diárias que variam de 11°C a 21°C, valores médios de radiação solar variando entre 204 cal/min.cm² e 370 cal/min.cm², com média de 305 cal/min.cm². No mês mais seco, as precipitações são inferiores a 30 mm. No verão, as temperaturas médias variam de 23°C a 33°C, os valores de radiação solar variam entre 313 cal/min.cm² e 683 cal/min.cm², com média de 464 cal/min.cm², e as chuvas são abundantes, atingindo valores de até 30 mm/dia, a precipitação anual nesta região chega a atingir uma média de 1300 mm (CALIJURI, 1999).

O reservatório de Barra Bonita foi construído para a geração de energia elétrica, porém, atualmente é também utilizado para transporte hidroviário (Hidrovia Tietê-Paraná), irrigação, turismo, lazer, pesca e como suporte ao desenvolvimento do complexo industrial da região. Na tabela 1 seguem as características do reservatório.

Tabela 1 - Características do reservatório de Barra Bonita.

Características do Reservatório	
Condições de Montante	
Área do espelho d'água no nível máximo útil	310 km ²
Perímetro	525 km
Volume morto	569 hm ³
Volume útil	2.566 hm ³
Volume reservado para cheia de projeto	487 hm ³
Volume total	3.622 hm ³
NA máximo maximorum	453 m
NA máximo útil	451,5 m
NA mínimo	439,5 m
Profundidade máxima	30,2 m
Profundidade média	10,2 m
Vazão máxima média diária observada (07/06/1983)	4.011 m ³ /s
Condições de Jusante	
NA máximo maximorum	434 m
NA máximo útil	428 m
NA mínimo	426 m
NA crítico da UHE Barra Bonita	435 m
Vazão máxima recomendável	2.000 m ³ /s

Fonte: AES Tietê (2006).

Usina Hidrelétrica de Barra Bonita

A Usina Hidrelétrica de Barra Bonita (Figura 2) está localizada na bacia hidrográfica do Médio Tietê Inferior, altura do quilômetro 480 do rio Tietê, entre os municípios de Barra Bonita e Igarapu do Tietê. A tabela 2 mostra as características das unidades geradoras da usina.



Figura 2 - Barragem e casa de força da UHE Barra Bonita. Fonte: Mauad et al. 13/07/2007.

Tabela 2 - Características das unidades geradoras.

Unidades geradoras	
Turbinas	
Tipo	Kaplan
Quantidade	4 unidades
Potência nominal (queda de 23 m)	34.800 kW
Queda máxima	25 m
Queda nominal	23,5 m
Queda mínima	12 m
Engolimento nominal	195 m ³ /s
Vazão turbinada nominal total	712 m ³ /s
Velocidade nominal	128,6 rpm
Velocidade de disparo	337 rpm
Diâmetro do rotor	4,85 m
Geradores	
Tipo	Umbrela de eixo vertical
Potência nominal unitária	35.190 kW
Potência nominal total instalada	140.760 kW

Fonte: AES Tietê (2006).

Segundo o inventário das restrições operativas hidráulicas dos aproveitamentos hidrelétricos do Operador Nacional do Sistema (ONS) e informações cedidas pela Applied Energy Services Tietê (AES Tietê) as restrições operativas do reservatório de Barra Bonita são as seguintes:

- o nível mínimo para manter a navegabilidade no rio Tietê é de 448,86 m ou 1.800 hm³ do volume útil, sendo o volume útil 2.566 hm³ considerado máximo para este estudo. Para níveis d'água do reservatório em cotas acima de 452,50 m as turbinas não podem operar, em virtude da inundação da Casa de Força pela água que pode subir pelo poço da comporta da tomada d'água;
- será permitido um deplecionamento máximo de 20% do volume do reservatório entre períodos consecutivos;
- os valores de vazões turbinadas deverão estar entre 10 m³/s (mínimo exigido para que a geração de energia em cada turbina seja possível) e 780 m³/s o engolimento máximo do sistema considerando as quatro turbinas em conjunto;
- os valores das vazões vertidas não deverão ultrapassar os 4.530 m³/s (capacidade máxima dos vertedores) a vazão vertida mínima é de 78 m³/s visando oxigenação da água e não-mortandade de peixes à jusante;
- os valores das vazões liberadas pelo reservatório deverão estar entre 78 m³/s e 2.000 m³/s, vazões defluentes superiores a 1.300 m³/s ocasionam formação de ondas dificultando a navegação,

vazões defluentes superiores a 2000 m³/s interrompem a navegação fluvial por impedimento do funcionamento da eclusa e causa danos a cidade de Barra Bonita

Período de análise e passo de cálculo dos modelos de operação

Segundo Wurbs (1996) a seleção do período de análise e do intervalo de tempo de cálculo dos modelos de operação de reservatórios depende de uma série de fatores, tais como, as características e os objetivos da modelagem em questão, a disponibilidade de dados de vazão e sua variabilidade temporal, as características das demandas de águas, etc. No caso de estudos de planejamentos que envolvem usos como eclusagem, geração hidrelétrica, navegação e outros usos associados ao armazenamento da água, o período de análise adotado pode ter duração de alguns anos (passo de cálculo adotado é geralmente o mensal).

O setor elétrico brasileiro adota para o planejamento da operação de reservatórios modelos que compreendem um período de análise de cinco anos com passo de cálculo mensal e modelos com horizonte de um ano, chegando a discretização semanal para o primeiro mês. Dado que a modelagem aplicada neste trabalho tem por objetivo abordar questões referentes ao planejamento da operação do reservatório de Barra Bonita, adotou-se um período de análise de cinco anos e passo de cálculo mensal.

Seleção de cenários hidrológicos

A seleção de cenários hidrológicos desenvolveu-se neste estudo a partir da série de vazões afluentes ao reservatório de Barra Bonita, obtidas através do Operador Nacional do Sistema (ONS). Para a otimização do sistema foram calculadas as médias móveis de cinco anos consecutivos para essa série de vazões. A partir da distribuição dessas variáveis foram selecionados os casos que correspondem aproximadamente ao 1°, 2° e 3° quartil, ou seja, períodos de cinco anos consecutivos cujas médias móveis estão associadas a probabilidades acumuladas conjuntas, respectivamente, iguais a 25%, 50% e 75%. Esses cenários foram denominados seco, médio e úmido e apresentam as seguintes séries de vazões: cenário seco - corresponde aproximadamente a uma probabilidade acumulada igual a 25%, cujas vazões médias referem-se ao período de outubro de 1941 a setembro de 1946; cenário médio - corresponde aproximadamente a uma probabilidade acumulada igual a 50%, cujas vazões médias referem-se ao período de outubro de 1959 a setembro de 1964 e cenário úmido - corresponde aproximadamente a uma probabilidade acumulada igual a 75%, cujas vazões médias referem-se ao período de outubro de 1982 a setembro de 1987.

Modelo de otimização para operação de reservatórios

Otimizar a regra operacional de um reservatório significa determinar a descarga operada ótima para certo intervalo de tempo, que maximiza ou minimiza uma ou

mais funções-objetivo e que atenda a diversas restrições pré-estabelecidas. As restrições consideradas serão referentes às liberações durante o período de tempo “t” no reservatório, à capacidade de armazenamento e às demandas dos diversos usos da água. Assim, o modelo de otimização foi baseado em Brandão (2004) e elaborado com base na linguagem estruturada para solução de problemas de programação matemática General Algebraic Modeling System (GAMS) (BROOKE *et al.*, 1998), juntamente com o algoritmo de otimização MINOS que permite a solução de problemas de programação linear e não-linear.

Segundo Brandão (2004) o GAMS foi especificamente idealizado para modelagem de problemas de programação linear, não-linear e programação inteira e mista. A ferramenta é útil na solução de problemas complexos e de grande porte. A linguagem foi desenvolvida com o propósito de atender aos seguintes requisitos: produzir uma linguagem de alto nível voltada para a representação compacta e adequada de modelos complexos e de grande porte; permitir que as mudanças no modelo sejam feitas de forma simples e segura; não permitir declarações ambíguas das relações algébricas; permitir que o processo de elaboração de modelos possa ser independente dos pacotes de otimização a serem utilizados. Além disso, de acordo com as características de cada problema, podem ser utilizados diversos pacotes de otimização para solução de um mesmo modelo.

O algoritmo computacional MINOS é destinado a resolver problemas de otimização de grande escala permitindo a solução de problemas de programação linear e não-linear segundo a seguinte formulação básica:

$$\text{Minimizar } x,y: \quad F(x) + c^t + d^t y \quad (1)$$

sujeito a:

$$f(x) + A_{1y} = b_1 \quad (2)$$

$$A_{2x} + A_{3y} = b_2 \quad (3)$$

$$l \leq \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \leq u \quad (4)$$

Onde: os vetores c , d , b_1 , b_2 , l , u e as matrizes A_1 , A_2 e A_3 são constantes, $F(x)$ é uma função escalar contínua e $f(x)$ é um vetor de funções contínuas. Os n_1 componentes de x são as variáveis não-lineares e os n_2 componentes de y são as variáveis lineares. Analogamente, as m_1 equação (2) são as chamadas restrições não-lineares e as m_2 equação (3) são as restrições lineares. As equações (2) e (3) representam a totalidade das restrições do problema. As restrições representadas pela equação (4) indicam os limites superiores e inferiores de todas as variáveis. Nos casos em que as funções $F(x)$ e $f(x)$ não existam, o problema se resume a uma aplicação de programação linear (PL). Nesse caso, o MINOS utiliza o método

Simplex para solução do problema. Quando os aspectos não-lineares estão confinados à função $F(x)$ da função-objetivo, tem-se um problema de programação não-Linear (PNL) com restrições lineares.

O MINOS resolve este tipo de problema utilizando o método do gradiente reduzido em combinação com o método quasi-Newton. Quando o problema contém restrições não-lineares, o MINOS usa o método Lagrangiano aumentado. Todos esses métodos são descritos em Mays (1996) e Hillier e Lieberman (1995). Dessa forma, o MINOS é um programa apto a resolver uma grande variedade de problemas de otimização linear e não-linear. Essa flexibilidade é muito importante na procura de soluções de problemas de operação de reservatórios, onde os aspectos não-lineares podem aparecer tanto na função-objetivo como nas restrições. (BRANDÃO, 2004).

Os usos enfocados no estudo de caso foram à geração de energia elétrica e a navegação, pois são os principais usos do reservatório. Segundo Oliveira (2004) as demandas de água mensais para eclusagem são de 3,64 m³/s. Quanto à geração de energia foram feitas análises da produção energética resultante da modelagem considerando como variável de análise a média de cinco anos da energia total da usina e as médias mensais, correspondente a cada seqüência temporal otimizada. O problema de otimização também levou em conta as demais restrições operacionais do reservatório/usina.

Formulação do Modelo – Método das Restrições

Função-objetivo:

Maximizar em (maximizar a energia média do sistema). (5)

Equações auxiliares:

$$qmon(t, u) = afl(t, u) - afl(t, u - 1) \quad (6)$$

$$qdf(t, u) = qtur(t, u) + qver(t, u) \quad (7)$$

$$named(t, u) = [a0(u) + a1(u) * vfim(t, u) + a2(u) * vfim(t, u)^2 + a3(u) * vfim(t, u)^3 + a4(u) * vfim(t, u)^4 a0(u) + a1(u) * Vfim(t - 1, u) + a2(u) * vfim(t - 1, u)^2 + a3(u) * vfim(t - 1, u)^3 + a4(u) * vfim(t - 1, u)^4]/2 \quad (8)$$

$$amed(t, u) = \left[\begin{matrix} S0(u) + S1(u) * Vfim(t, u) + S0(u) \\ + S1(u) * Vfim(t - 1, u) \end{matrix} \right] / 2 \quad (9)$$

$$naj(t, u) = b0(u) + b1(u) * qdf(t, u) + b2(u) * qdf(t, u)^2 + b3(u) * qdf(t, u)^3 + b4(u) * qdf(t, u)^4 \quad (10)$$

$$h(t, u) = named(t, u) - naj(t, u) \quad (11)$$

$$\text{ener}(t, u) = \text{qtur}(t, u) * h(t, u) * k(u) \quad (12)$$

$$\text{enertot}(t) = \sum_u \text{ener}(t, u) \quad (13)$$

$$\text{em} = [\sum_t \text{enertot}(t)]/60 \quad (14)$$

Restrições:

$$\text{vfim}(tt, u) = \text{vfim}(tt - 1, u) + \frac{\{[\text{qtur}(tt, u) - \text{qvert}(tt, u) - \text{quso}(tt, u)] * dt(tt)\}}{1000000} - [\text{amed}(tt, u)]/1000 \quad (15)$$

$$\text{ener}(t, u) \leq \text{pi}(u) * \text{fr}(u) \quad (16)$$

$$\text{ener}(t, u) \leq \{h(t, u) * [c0(u) + c1(u) * h(t, u)] * k(u)\} * \text{fr}(u) \quad (17)$$

$$\text{vfim}(t, u) \leq \text{vmaxesp}(t, u) \quad (18)$$

$$\text{vfim}(t, u) \geq \text{vmfn}(u) \quad (19)$$

$$\text{qdf}(t, u) \geq \text{qmfn}(u) \quad (20)$$

Condições de contorno:

$$\text{se } tt = 0 \rightarrow \text{vfim}(tt, u) = 0; \text{v0}(u); \text{quso}(tt, u) = 0 \quad (21)$$

$$\text{se } tt = 60 \rightarrow \text{vfim}(tt, u) = \text{v0}(u) \quad (22)$$

$$\text{se } u = \text{bbo} \rightarrow \text{qmont}(tt, u) = 0; \quad (23)$$

Onde:

u = índice de usina: bbo (Barra Bonita);

t = índice de tempo: 1,2,.....,60;

tt = índice auxiliar de tempo: 0,1,.....60;

em = energia média do sistema ao longo do período de análise;

qmon(t,u) = vazão a montante do reservatório u no intervalo de tempo t;

afl(t,u)* = vazão natural afluyente ao reservatório u no intervalo de tempo t;

qtur(tt,u) = vazão turbinada pela usina u no intervalo de tempo tt;

qver(tt,u) = vazão vertida pela usina u no intervalo de tempo tt;

qdf(tt,u) = vazão defluente total da usina u no intervalo de tempo tt;

quso(tt,u)* = vazão para eclusa extraída do reservatório da usina u no intervalo de tempo tt;

$v_{fim}(tt,u)$ = volume do reservatório da usina u no final do intervalo de tempo tt ;
 $named(tt,u)$ = nível d'água médio do reservatório da usina u ao longo do intervalo de tempo tt ;
 $amed(tt,u)$ = área média do reservatório da usina u ao longo do intervalo de tempo tt ;
 $naj(t,u)$ = nível d'água no canal de fuga da usina u ao longo do intervalo de tempo t ;
 $a0(u)^* \dots a4(u)^*$ = parâmetros da curva cota-volume da usina u ;
 $s0(u)^*, s1(u)^*$ = parâmetros da curva área-volume da usina u ;
 $b0(u)^* \dots b4(u)^*$ = parâmetros da curva-chave do canal de fuga da usina u ;
 $h(t,u)$ = queda bruta da usina u no intervalo de tempo t ;
 $k(u)^* = 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot \eta_g \cdot \eta_t \cdot \eta_h$: produtividade específica da usina u ;
 $ener(t,u)$ = energia gerada pela usina u no intervalo de tempo t ;
 $dt(tt)^*$ = número de segundos do intervalo de tempo tt ;
 $pi(u)^*$ = potência instalada da usina u ;
 $fr(u)^*$ = fator de reserva ou índice de disponibilidade de máquinas da usina u ;
 $c0(u)^*, c1(u)^*$ = parâmetros da equação da vazão turbinada máxima em função da queda da usina u ;
 $v_{maxesp}(t,u)^*$ = volume máximo do reservatório da usina u no final do intervalo de tempo t , considerando volumes de espera;
 $v_{min}(u)^*$ = volume mínimo do reservatório da usina u ;
 $v0(u)^*$ = volume inicial do reservatório da usina u .

Observações: volumes em milhões de m^3 ; vazões em m^3/s ; áreas em Km^2 ; níveis d'água em metros; queda em metros; energia em MW-médios; potência em MW. As grandezas assinaladas com (*) são dados de entrada do modelo.

Resultados e discussões

Na seqüência do trabalho houve a necessidade de se definir o mês mais adequado para o início do processo de otimização e assim, evitar que esse aspecto influenciasse significativamente nos resultados. Para tanto, iniciou-se a modelagem em meses que o reservatório estivesse cheio, definindo esse mês a partir dos armazenamentos médios dos anos de 2001 a 2006. Os resultados indicaram que as médias mais elevadas referem-se aos armazenamentos com início sempre no mês de maio e fim no mês de abril. O valor resultante foi de um armazenamento inicial para o reservatório de Barra Bonita de 93,67%.

Os processamentos para análise do método das restrições foram feitos com base na maximização da energia média gerada em cada seqüência temporal considerada. As vazões derivadas para a eclusa foram tratadas como restrições, estas vazões não sofreram nenhum fator de sazonalidade, correspondendo a uma vazão média anual de 43,68 m^3/s . A seguir, têm-se os resultados gerados pelo modelo de otimização, visando à maximização da energia gerada pela UHE Barra Bonita e obedecendo as restrições impostas pelas características físicas do sistema e pelos outros usos da água do reservatório.

A figura 3 apresenta as variações de armazenamento no reservatório para o final de cada período e nos três cenários analisados. Observa-se que durante todo o tempo o armazenamento não ultrapassou os limites máximos e mínimos, sendo que o limite máximo foi estipulado como o volume útil do reservatório (2566 hm³) e o volume mínimo operacional sendo (1800 hm³), que é o volume mínimo para que se possa manter a navegação no reservatório. Os menores armazenamentos foram observados em sua maioria nos meses de dezembro, julho e agosto, e os maiores armazenamentos foram observados no mês de maio. Mesmo com a otimização da geração de energia, o cenário seco conseguiu manter os seus volumes dentro do mínimo operacional não prejudicando a navegação.

A figura 4 apresenta a variação do nível d'água do reservatório nos três cenários analisados, onde os resultados demonstram que não houve grandes oscilações, ficando sempre entre 451,54m (máximo) e 448,86m (cota mínima equivalente ao volume útil e não ao volume total do reservatório).

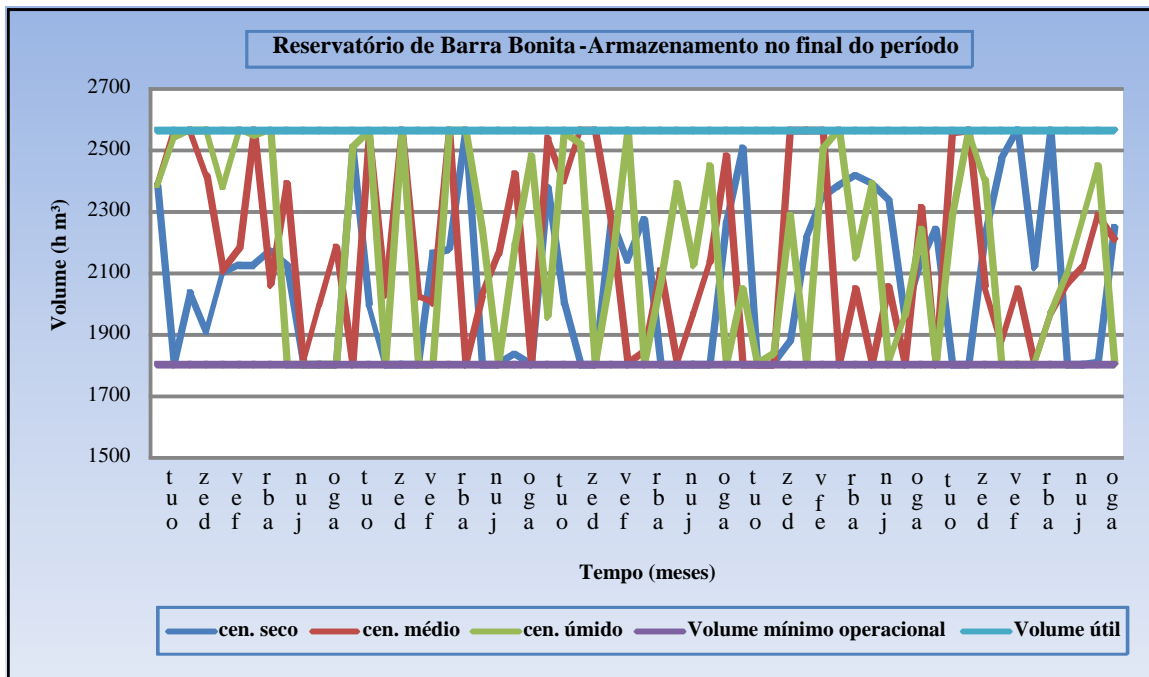


Figura 3 – Variação do armazenamento do reservatório. Fonte: Mauad et al. 25/08/2007.

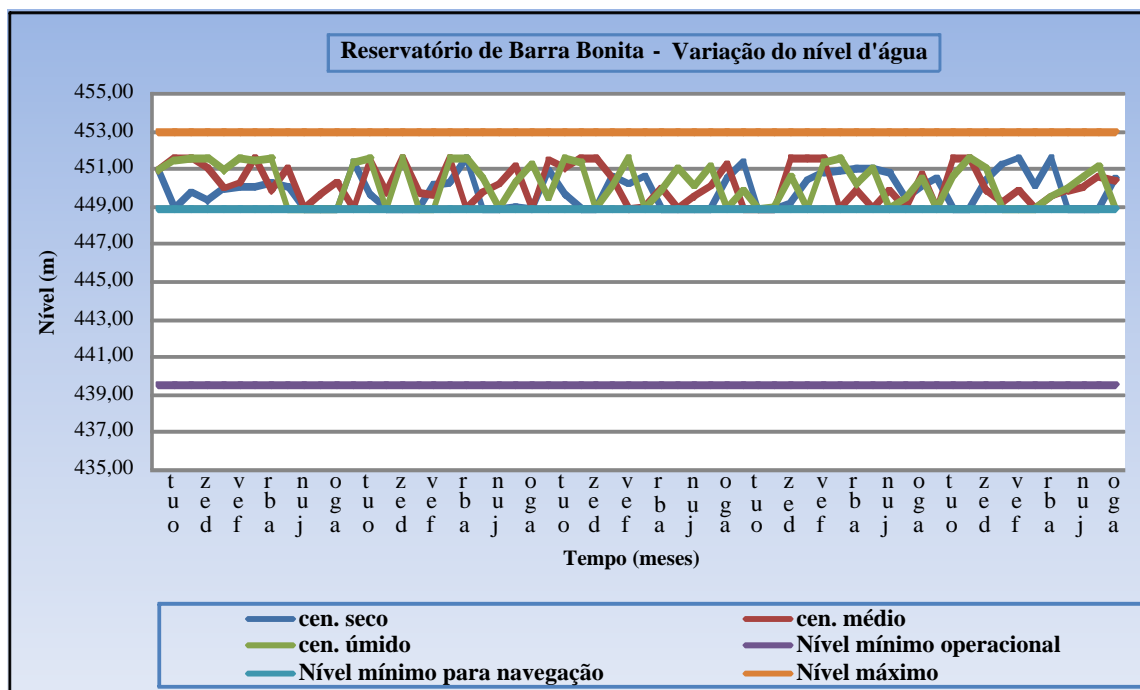


Figura 4 – Variação do nível d'água. Fonte: Mauad et al. 25/08/2007.

A figura 5 apresenta a variação das vazões turbinadas para os três cenários considerados e os resultados demonstram que as maiores vazões turbinadas ocorreram no cenário úmido, alcançando em alguns meses seu limite máximo. Os valores para os três cenários variam simultaneamente com a ocorrência de períodos chuvosos (janeiro a abril) apresentando valores elevados, e os períodos de estiagem (maio a setembro) apresentando os valores mais baixos.

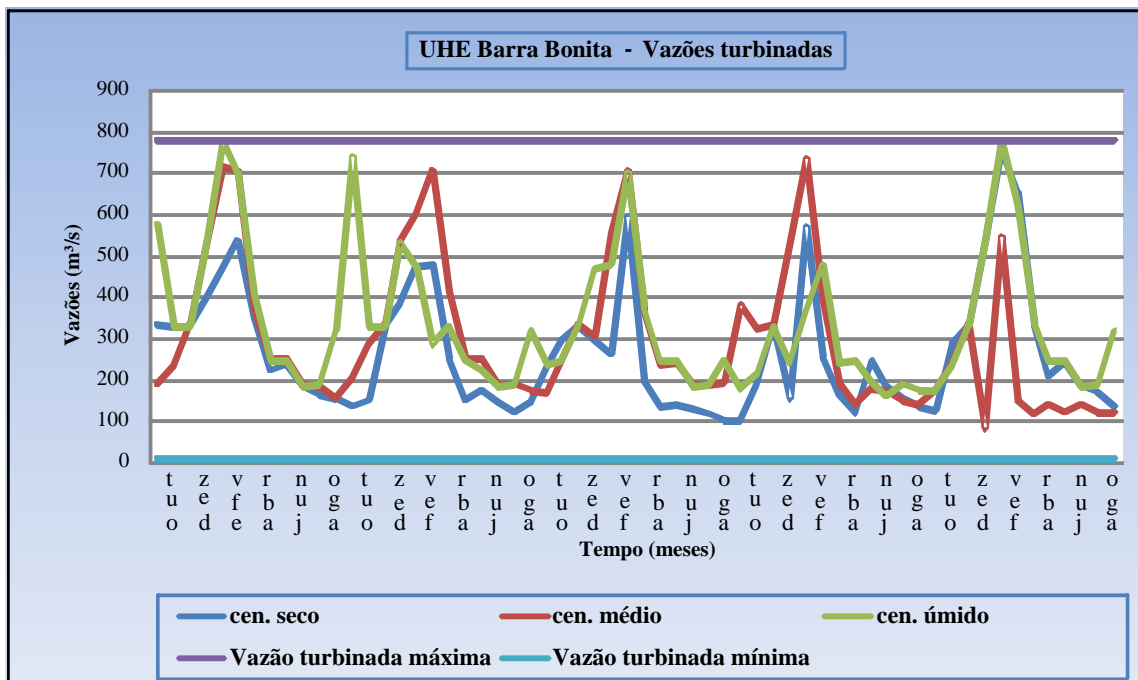


Figura 5 – Variação dos valores de vazões turbinadas. Fonte: Mauad et al. 25/08/2007.

A figura 6 apresenta a variação dos valores de vazões vertidas para os três cenários considerados e os resultados demonstraram que devido à maximização da geração de energia, quase não se teve vertimentos nos cenários seco e médio, sendo estes isolados. No cenário úmido houve um maior número, mas com muitas falhas no decorrer do tempo.

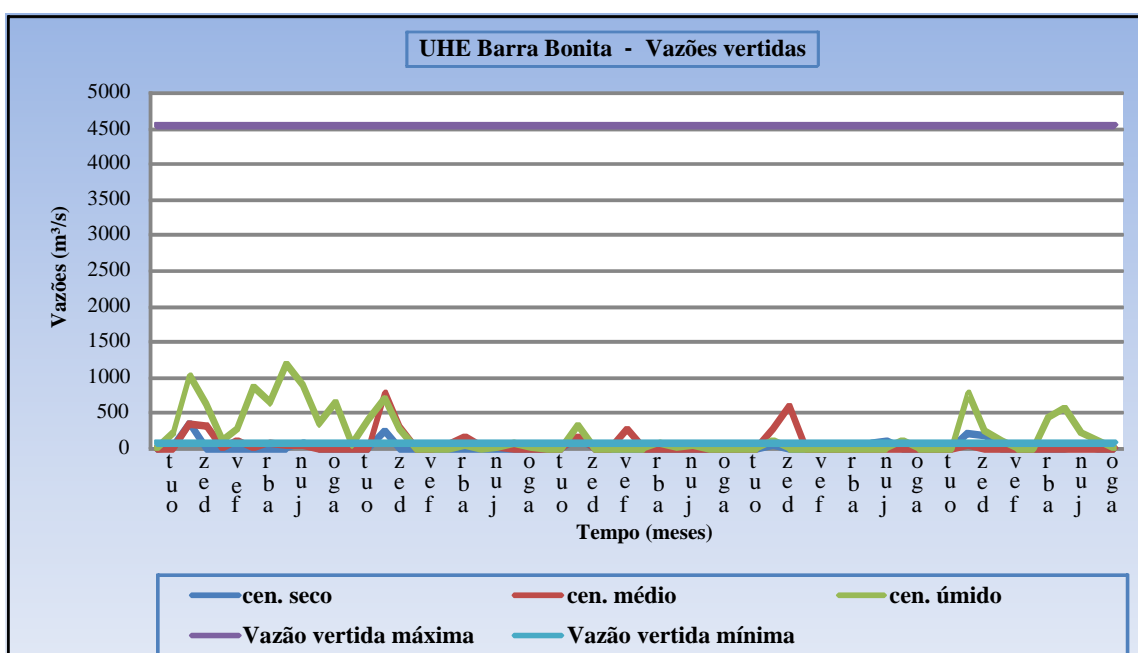


Figura 6 – Variação dos valores de vazões vertidas. Fonte: Mauad et al. 25/08/2007.

A figura 7 apresenta a variação dos valores das vazões liberadas pelo reservatório, considerando a soma das vazões vertidas e turbinadas nos três cenários considerados. Todos os três cenários analisados mantiveram-se dentro do limite máximo recomendado para vazões relacionadas a enchentes. No cenário seco as vazões liberadas ficaram abaixo da vazão ecológica 160 m³/s (que representa 50% da vazão $Q_{7,10}$) no período de estiagem (abril a setembro) e também no mês de outubro. No cenário médio as vazões estiveram abaixo da vazão ecológica já no final do período de tempo, sendo que no cenário úmido essas vazões liberadas ficaram todo tempo dentro do limite da vazão ecológica com valores de vazões liberadas mais altos obviamente.

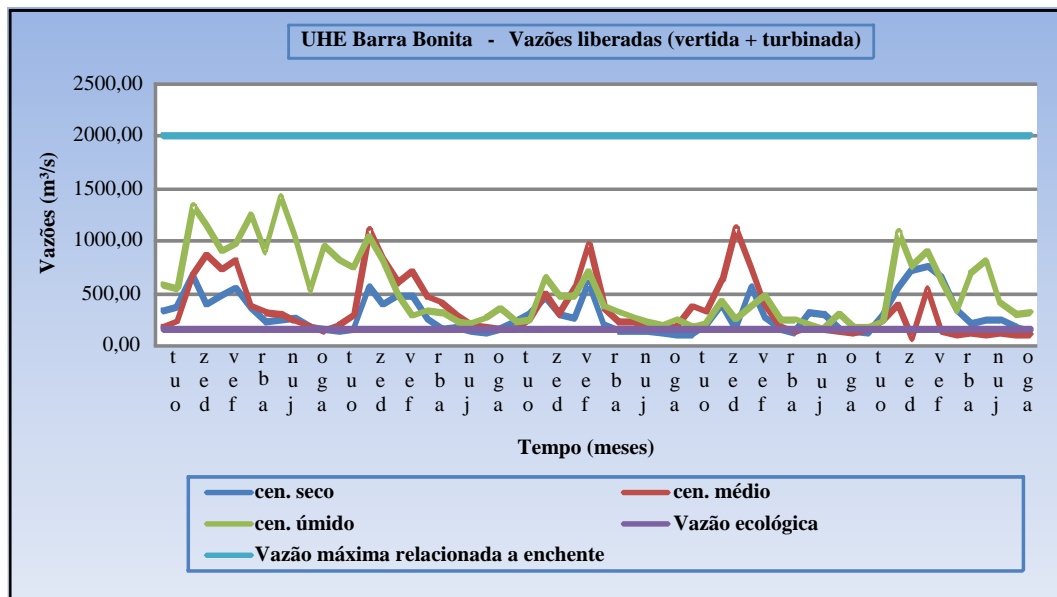


Figura 7 – Variação dos valores de vazões liberadas pelo reservatório.
Fonte: Mauad et al. 25/08/2007.

A figura 8 a seguir, apresenta os valores obtidos de potência gerada para os três cenários considerados e seus resultados demonstram que em ambos os cenários, os valores de potência gerada variam proporcionalmente aos valores de vazão turbinada, além de apresentarem certa variação sazonal entre períodos chuvosos e de estiagem. Observa-se que no cenário médio no final do período a potência gerada reduziu-se bastante, mas não chegando ao limite mínimo (10 MW). Todos os cenários se mantiveram nos limites máximos e mínimos de geração.

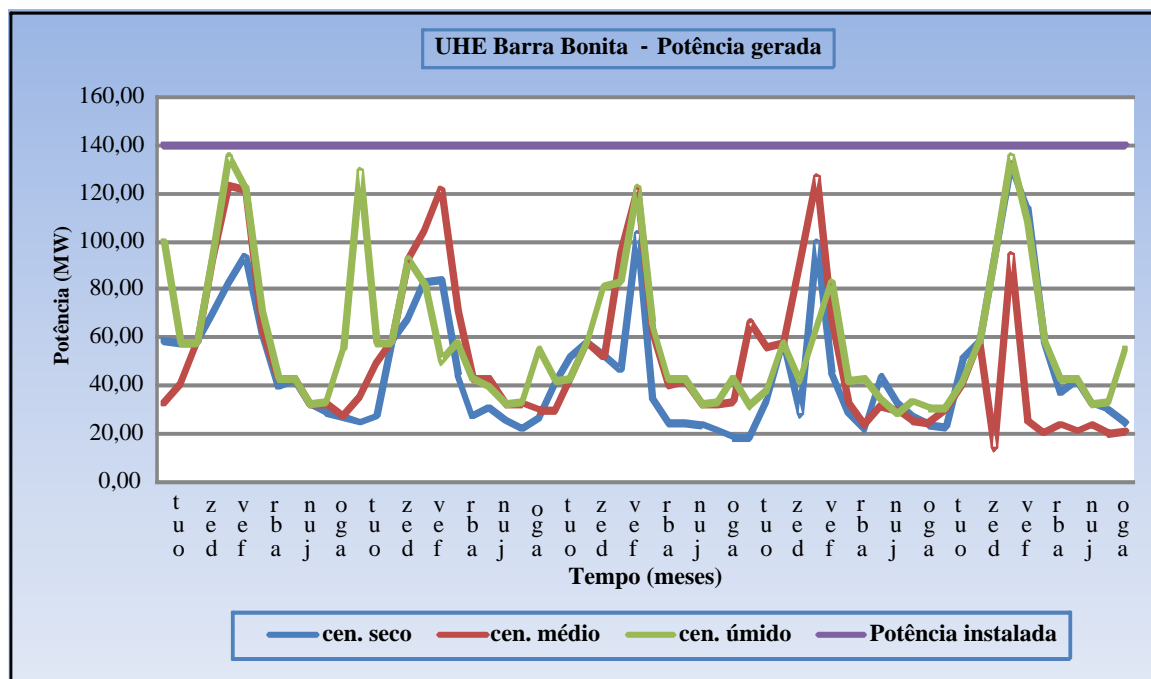


Figura 8 – Variação dos valores de potência gerada pela UHE.
 Fonte: Mauad et al. 25/08/2007

A tabela 3 apresenta os valores médios dos cinco anos utilizados para o período de cálculo da otimização para todos os fatores analisados, considerando os três cenários hidrológicos. Os resultados demonstraram que neste período houve aumento dos valores de um cenário para outro, devido as vazões afluentes se alterarem em cada período. Mesmo não variando as vazões de eclusagem (pois estas teriam que ser atendidas sempre) os valores médios do período encontrados para os outros usos da água foram satisfatórios, pois apenas as vazões vertidas no cenário seco estiveram bem abaixo dos outros cenários. Mesmo com a otimização da geração de energia, a navegação que é outro uso importante do reservatório não foi prejudicada, pois o armazenamento médio do reservatório e a variação média do nível da água não tiveram grandes oscilações no período de análise e se mantiveram dentro dos limites estabelecidos pelas restrições operativas do sistema.

Tabela 3 – Valores médios de todos os fatores analisados (período de 5 anos).

Fatores analisados	Cenário seco	Cenário médio	Cenário úmido
Armazenamento no final do período (hm ³)	2066	2160	2179
Variação no nível da água (m)	449,82	450,15	450,20
Vazões turbinadas (m ³ /s)	269,01	296,86	337,59
Vazões vertidas (m ³ /s)	25,18	60,81	192,68
Vazões liberadas (m ³ /s)	294,19	357,67	530,26
Potência gerada (MW)	46,56	51,38	58,43

Fonte: Mauad et al. 25/08/2007

Conclusões

Através da descrição do local de estudo, pode-se perceber que se trata de um sistema complexo de recursos hídricos, sendo importante uma análise da operação e do desempenho do reservatório segundo a ótica dos usos múltiplos da água. Dado que em muitos sistemas há uma competição pela água entre os diversos usos, este tipo de enfoque leva inevitavelmente a determinação de regras para partilha da água. Essas regras são geralmente definidas a partir de métodos e critérios de alocação do recurso hídrico para cada setor usuário.

O modelo de otimização através da solução de problemas de programação não-linear utilizou as ferramentas de programação matemática *GAMS* para elaboração do modelo e o pacote de otimização *MINOS* para solução do problema. O *GAMS* permitiu a elaboração do modelo utilizado neste trabalho com flexibilidade e rapidez. O uso do *MINOS* foi também bastante benéfico, com grande adaptabilidade para solução do problema proposto.

Foi realizada a otimização da geração de energia pela Usina Hidrelétrica de Barra Bonita, considerando três cenários hidrológicos diferentes com extensão de cinco anos cada um, a partir da série histórica de vazões afluentes ao reservatório de Barra Bonita. Esses cenários foram denominados como seco, médio e úmido. Pode-se observar que nos três cenários foi possível manter os volumes e os níveis do reservatório dentro dos limites relacionados ao armazenamento e à navegação. As vazões turbinadas e vertidas também se mantiveram dentro dos limites físicos impostos pelo engolimento máximo das turbinas e a capacidade dos vertedores, respectivamente. Os valores de potência gerada também se mantiveram dentro dos limites físicos impostos pela potência instalada da usina.

Referências

AES Tietê. **Usina hidrelétrica de Barra Bonita**. 2006. Disponível em: <<http://www.aestiete.com.br>>. Acesso em: 16/01/2006.

BRAGA, B. P. F. Sistemas de suporte a decisão em recursos hídricos, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.3, n.3. p.123-124, abr. 1998.

BRANDÃO, J. L. B. **Modelo para operação de sistemas de reservatórios com usos múltiplos**. 2004. 182p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

BROOKE, A. *et al.* **GAMS: A user's guide**. Washington-DC: **GAMS Development Corporation**. December, 1998.

CALIJURI, M. C. **Respostas fisioecológicas da comunidade fitoplanctônica e fatores ecológicos em ecossistemas com diferentes estágios de eutrofização**. 1998. 293p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

CALIJURI, M. C.; TUNDISI, J. G. Limnologia comparada das represas do Lobo (Broa) e Barra Bonita - Estado de São Paulo: mecanismos de funcionamento e bases para o gerenciamento. **Revista Brasileira de Biologia**, São Carlos, v. 50, n.4, p. 893-913, jun. 1990.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SOROCABA/MÉDIO TIETÊ. **Relatório Zero**: relatório da situação atual dos recursos hídricos na bacia hidrográfica. 2000. Disponível em <<http://www.sigrh.sp.gov.br>>. Acesso em: 20/03/2006.

FRANCATO, A. L.; BARBOSA, P. S. F. Fatores determinantes das propriedades operativas ótimas de um sistema hidroelétrico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12., 1997. Vitória. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 1997. p.22-29.

GOOGLE EARTH. **Foto de satélite do reservatório de Barra Bonita**. 2006. Disponível em <<http://earth.google.com/intl/pt/download-earth.html>>. Acesso em: 23/05/2006.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to operations research**. New York: MacGraw-Hill, 1995.

MAYS, L. W. **Water resources handbook**. New York: McGraw-Hill, 1996.

MONTEIRO, C. A. F. **A dinâmica climática e as chuvas do estado de São Paulo**: estudo em forma de atlas. São Paulo: IGEOG/USP, 1973.

OLIVEIRA, H. R. **Análise do aproveitamento múltiplo do reservatório de Barra Bonita - SP, através de aplicação de técnica de programação linear associada à modelo de rede de fluxo**. 2004. 147p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). **Vazões médias mensais nos aproveitamentos hidrelétricos período 1931 a 2004**. 2006. Disponível em: <http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx>. Acesso em: 24/07/2006.

PENG, C. S.; BURAS, N. Dynamic operation of a surface water resources system. **Water Resources Research**, New York, v.36, n.9, p.2701-2709, sep. 2000.

TUNDISI, J. G; MATSUMURA-TUNDISI, T. Limnology and eutrophication on Barra Bonita Reservoir, Sao Paulo State, Southern Brazil. **Hydrobiology**, Chennai, v.33, n.10, p.661-667, abr. 1990.

WURBS, R. A. **Modeling and analysis of reservoir system operations**. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 1996.

YEH, W.W. G. Reservoir management and operations models: a state-of-the-art review. **Water Resources Research**, New York, v.21, n.12, p.1797-1818, dec./1985.

YEN, J.H.; CHEN, C.Y. Allocation strategy analysis of water resources Management. **Water Resources Research**, New York, v.15, n.5, p.283-297, out. 2001.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – CT-HIDRO edital 043/2004 (Processo 142482/2004-8).

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), (Processo 05/55209-5).

Ao Núcleo de Hidrometria do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) – SHS – EESC – USP.

RESUMO

A tomada de decisões em relação aos sistemas hídricos envolve diversos fatores, para auxiliar no processo decisório, pois são necessários planejamentos estratégicos que possam identificar as melhores alternativas de desenvolvimento dos recursos hídricos. Nos processos de expansão e operação de reservatórios, que são os elementos comumente utilizados para acumulação e controle da água, é necessário que se leve em conta todos os usos concorrentes que serão beneficiados pelo sistema em questão. Muitas vezes há conflitos, uma vez que o recurso disponível não é suficiente para atender às demandas de todos os usuários de um determinado sistema. Frente a este cenário, o objetivo do trabalho é apresentar a aplicação de um modelo de otimização para operação de reservatórios considerando os usos múltiplos da água, para três cenários hidrológicos distintos (cenário seco, médio e úmido). Espera-se que o mesmo auxilie nos processos de decisão, segundo uma abordagem integrada de recursos hídricos. O modelo foi implantado, calibrado e validado na sub-bacia do Médio Tietê Inferior, no reservatório de Barra Bonita, no Estado de São Paulo. Os resultados são apresentados através de gráficos e tabelas e mostram que, mesmo com a otimização da geração de energia, a navegação que é outro uso importante do reservatório não foi prejudicada, pois o armazenamento médio do reservatório no final do período e a variação média do nível da água se mantiveram dentro dos limites estabelecidos pelas restrições operativas do sistema.

Palavras-chave: Recursos hídricos. Reservatório de Barra Bonita. Usos Múltiplos da Água. Modelo de Otimização. Geração de Energia. Navegação.

ABSTRACT

The decision-making on water systems involves several factors, to assist in decision-making, strategic planning is necessary because we can identify the best alternatives for the development of water resources. In the process of expansion and operation of reservoirs, which are the elements commonly used for accumulation and control of water, it is necessary to take into account all the competing uses that will benefit the system in question. Often there are conflicts, since the feature available is not sufficient to meet the demands of all users of a particular system. In front of this scenario, the goal of the work is to present the application of a model for optimizing operation of reservoirs considering the multiple uses of water, to three separate scenarios hydrological (scenario dry, medium and humid). It is expected that the same help in decision-making processes, in an integrated approach to

water resources. The model was implanted, calibrated and validated in the sub-basin of the Middle Tietê Lower, in the reservoir of Barra Bonita, in the State of São Paulo. The results are presented through graphs and tables and show that, even with the optimization of the generation of energy, the navigation that is another important use of the reservoir was not damaged, as the storage medium of the reservoir at the end of the period and the average level the water remained within the limits set by the restrictions of the operating system.

Key words: Water Resources. Reservoir of Barra Bonita. Multiple Uses Water. Model Optimization. Power Generation. Navigation.

Informações sobre os autores:

[1] Frederico Fábio Mauad – <http://lattes.cnpq.br/2888462035279167>
Engenheiro Agrícola, Prof. Dr. Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP).
Contato: mauadffm@sc.usp.br

[2] James Lacerda Maia – <http://lattes.cnpq.br/3286608040702817>
Administrador, Doutorando do Programa de Pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP).
Contato: jamesjanela@yahoo.com.br

[3] Alexandre Augusto Barbosa – <http://lattes.cnpq.br/3079634479646035>
Engenheiro Mecânico, Prof. Dr. Universidade Federal de Itajubá.
Contato: barbosa@unifei.edu.br