

OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DOS RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO PIRACICABA E DO SISTEMA CANTAREIRA

Ana Rosa Baganha Barp*
Paulo Sérgio Franco Barbosa**

RESUMO: Este trabalho trata de um problema de otimização de fluxos em redes aplicado ao sistema hídrico da bacia do rio Piracicaba e do sistema Cantareira, localizados no Estado de São Paulo, região Sudeste Brasileira. Dentre os métodos matemáticos de otimização, selecionou-se aquele que apresenta grande eficiência computacional, visando à possibilidade de auxiliar o gerenciamento e operação de bacias hidrográficas cuja preocupação central esteja voltada à quantidade e à qualidade de água. Optou-se pelos modelos matemáticos computacionais por se apresentarem como ferramentas rápidas e eficientes nos processos de tomada de decisão. O problema foi tratado segundo uma formulação multiobjetivo através do Método dos Pesos, tendo como suporte um algoritmo de otimização de fluxos em redes com função objetivo linear por partes. Verificou-se que o sistema hídrico atende satisfatoriamente aos objetivos propostos, com hipótese determinística para as vazões ao longo do horizonte de planejamento (24 meses) e, com a devida manipulação dos volumes armazenados do sistema. A visão de conjunto que o modelo proporciona, contrapõe-se aos estudos tradicionais os quais avaliam o benefício das obras hidráulicas de maneira pontual.

Palavras-chave: Recursos hídricos - desenvolvimento. Bacia hidrográfica. Otimização matemática. Processos Decisórios - modelos matemático. Análise de sistemas.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é selecionar métodos que, combinados, possam auxiliar no gerenciamento e na operação de bacias hidrográficas cuja preocupação central esteja voltada à qualidade e à quantidade de água. Dentre os métodos existentes, optou-se pelos modelos matemáticos computacionais, que se apresentam como ferramentas rápidas e eficientes nos processos de tomada de decisão. A eficiência da aplicação desses métodos é aqui interpretada na análise de um estudo de caso, cuja área selecionada é a bacia hidrográfica do rio Piracicaba, a qual é acoplada ao sistema Cantareira através de uma reversão que abastece

a região metropolitana de São Paulo. A complexidade dos problemas de gestão destes sistemas hídricos decorre do crescimento intensivo da industrialização e da explosão urbana, acentuados pela inexistência de planos de longo prazo que garantissem a preservação da qualidade ambiental (Barp, 1995).

A partir da intensificação das restrições financeiras nas administrações municipais, somadas às preocupações ambientais, verificam-se as seguintes tendências mundiais com relação às soluções adotadas no gerenciamento dos recursos hídricos: (a) a substituição de obras para propósito único por obras associadas a propósitos múltiplos; (b) a introdução de tarifas progressivas, para limitar ou adiar as necessidades

* *Engenheira Civil pela Universidade Federal do Pará, Doutora em Engenharia Civil pela FEC/UNICAMP. Professora Titular do curso de Engenharia Civil da Universidade da Amazônia e Pesquisadora do DHS da Universidade Federal do Pará.*

** *Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, Doutor pelo Depto. de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da USP. Professor Adjunto do Depto. de Hidráulica e Saneamento da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP.*

de expansão; (c) o abandono do conceito de planejar, projetar e operar as unidades para abastecimento de água, dissociadas dos propósitos associados ao controle de cheias e controle de poluição; (d) a avaliação de alternativas de planejamento através de enfoque e metodologia multicriterial, em substituição a simples análise econômico-financeiro; (e) o recurso das medidas legislativas como um meio para garantir o uso da água dentro de uma perspectiva de atendimento a metas sociais ao invés da simples satisfação de usuários individuais. No Estado de São Paulo, verificamos que muitos dos instrumentos de gestão supracitados já vêm sendo empregados, especialmente, após a elaboração e a publicação do Plano Estadual de Recursos Hídricos (CERH, 1990).

2. TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO APLICADAS AO PLANEJAMENTO DE RECURSOS HÍDRICO

Os modelos de otimização necessitam, inicialmente, de algumas definições que o conduzirão a um bom desempenho. Então, é necessário estabelecer as variáveis de decisão, as restrições impostas, os objetivos e a quantificação de todos os problemas relevantes para se obter resultados ótimos do modelo resultante. A ausência de certas características e dados insuficientes implicarão na ocorrência de modelos imperfeitos que irão comprometer toda a análise.

A questão aqui abordada foi considerada sob diferentes enfoques e metodologias em outros trabalhos. Por exemplo, em uma das formulações apresentadas por Somlyódy e Pintér (1987) para solução de problemas multiobjetivo, foram admitidos certos pesos para os objetivos propostos, parâmetros de julgamento parcialmente subjetivo e que dependem da importância relativa dos objetivos individuais.

Seguindo a linha de modelos aplicados ao gerenciamento de recursos hídricos, dita-se o MODSIM, modelo de simulação de bacia fluvial, proposto por Labadie et al. (1986) o qual se constitui, basicamente, na “... *otimização estática de cada intervalo de tempo usando o algoritmo out-of-kilter para encontrar o*

custo mínimo da distribuição do fluxo em rede de uma bacia fluvial”. Outra versão aplicada por Labadie (1986) na cidade de Fort Collins, Colorado, USA é o MODSIM3, o qual avalia o “... *suprimento de água em estrutura complexas que incluem escoamento direto, armazenagem e possibilidade de troca de água com outros usuários diretos da bacia*”, podendo também ser usado em planejamento de recursos hídricos para avaliar o impacto de vários projetos de uso múltiplo de água.

Estes tipos de modelos de otimização são capazes de gerar planos operacionais que satisfaçam metas, prioridades e restrições especificadas. Em cada passo de tempo, eles encontram uma disposição sistemática de alocação de fluxo mínimo ou máximo através da rede, usando critérios os quais podem ser estruturados sobre bases econômicas ou prioridades de água potável. Foi através desta linha que se selecionou o programa de otimização de fluxos em redes, atendendo aos objetivos propostos e adequando-se à rede fluvial representada no estudo de caso pela bacia do rio Piracicaba e sistema Cantareira.

3. O MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE FLUXOS EM REDE

A análise de fluxo em rede é uma técnica derivada da teoria dos grafos, a qual se constitui em um conjunto de confluências ou nós que por sua vez estão interligados a elementos chamados de arcos, sendo limitada a um número finito destas entidades (nós e arcos). Entre outros, os tipos de problemas associados à teoria de fluxos em rede são: problemas do caminho mínimo, problemas de fluxo máximo e problemas de transportes (Barbosa e Braga, 1993).

Os arcos são meios ou dispositivos unidirecionais de transporte de produtos. Por exemplo, ruas em sistemas de transportes urbanos; tubulações em rede de distribuição de água, linhas aéreas em sistemas de tráfego aéreo ou fluxo de atividades no planejamento de atividade. Os nós podem ser interpretados como locações ou terminais conectados pelos arcos e servidos por quaisquer meios físicos de

transporte, os quais estão associados os arcos. A Fig. 1 caracteriza um sistema hídrico formado por 4 (quatro) reservatórios, representados pelos círculos (nós) e as linhas (arcos) seriam os cursos d'água de uma bacia fluvial.

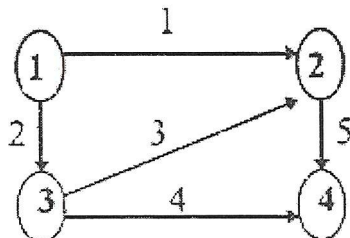


Figura 1 - Representação Gráfica de uma Rede de um Sistema Hídrico

Os arcos que compõe a rede possuem 4 características particulares, formadas pelos seguintes elementos: (a) uma orientação que especifica a ligação do arco a um nó origem e a um nó-destino; (b) um limite superior de fluxo (I_{sup}); (c) um limite inferior de fluxo (I_{inf}); (d) um custo unitário associado aos fluxos.

Sendo os modelos de fluxo em rede um caso especial de Programação Linear, matematicamente, o problema básico de fluxo em rede, do qual podem ser derivadas diversas variantes (Barbosa e Braga, 1993), é denominado de Problema de Fluxo a Custo Mínimo, e pode ser inicializado da seguinte forma:

$$\text{Min } c\mathbf{x} \dots\dots\dots (1)$$

sujeito a:

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \dots\dots\dots (2)$$

$$I_{inf} \leq \mathbf{x} \leq I_{sup} \dots\dots\dots (3)$$

sendo:

- $\mathbf{A}$ é a matriz de incidência nó-arco;
- $\mathbf{c}$ é o vetor de custos associados aos fluxos (i componentes);
- $\mathbf{x}$ é o vetor de todos os fluxos (variáveis de decisão), e
- $\mathbf{b}$ é o vetor de recursos (j componentes).

Os limites superiores e inferiores estabelecidos nos arcos como restrições são fixados com base em objetivos operacionais e em limites físicos dos reservatórios. Ou seja, devem atender ao longo do tempo as exigências de defluência mínima impostas nos múltiplos usos do sistema (navegação, abastecimento, geração de energia) e defluência máxima, para casos de controle de cheias (Barbosa e Braga, 1993).

As vantagens da estrutura em rede incidem em poder explorá-la no desenvolvimento de algoritmos especializados, que produzam soluções em centésimos de tempo e custo reduzido, com relação a algoritmos mais gerais. Outra vantagem é quanto à geometria das redes, a qual pode ser facilmente 'disposta em cenários (desenhos) bidimensionais, de grande auxílio para simplificação na fase de comunicação entre analistas e usuários (Kennington e Heigason, 1976).

4. ESTUDO DE CASO

4.1. DESCRIÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRACICABA

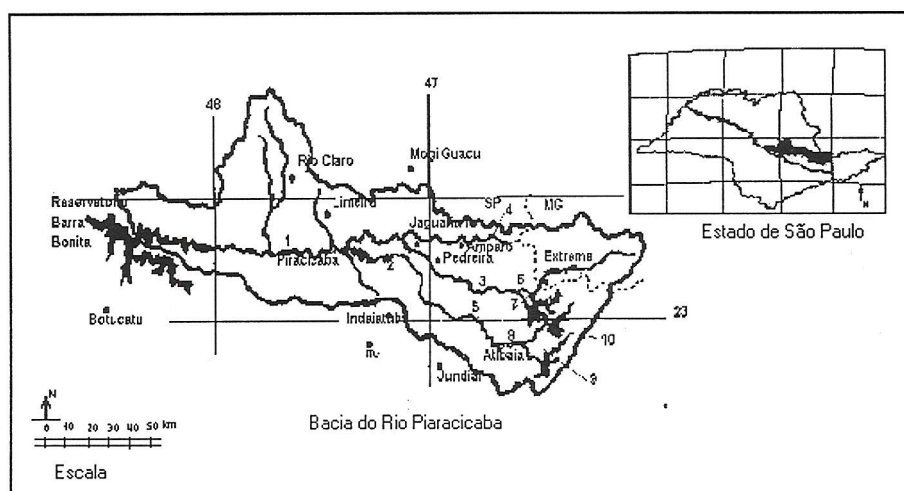


Figura 2 - Localização da Área de Estudo

A área estudada, mostrada na Fig. 2, está inserida na 1ª Zona da divisão hidrográfica do Estado de São Paulo, proposta pelo Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERM) para fins de planejamento e gerenciamento integrado dos recursos hídricos.

Esta divisão compreende 21 (vinte e uma) unidades de gerenciamento, dentre as quais encontra-se a unidade industrializada do Piracicaba, que abrange a bacia do rio Piracicaba, constituída de 4 sub-bacias: sub-bacia do rio Jaguari, sub-bacia do rio Atibaia, sub-bacia do rio Piracicaba e sub-bacia do rio Corumbataí, composta por 45 municípios do Estado de São Paulo e 4 do Estado de Minas Gerais. Esta é a área onde aplicamos o modelo matemático computacional selecionado.

A bacia hidrográfica do rio Piracicaba possui uma área de 12.400 km², sendo 11.020 km² no Estado de São Paulo, com forma alongada no sentido leste-oeste, com comprimento e largura média de 250 km e 50 km, respectivamente (CERH, 1990). Essa bacia está subdividida em quatro sub-bacias: Corumbataí com 1.700 km², Jaguari com 4.290 km², Atibaia com 2.760 km² e Piracicaba com 3.650 km². Suas cabeceiras estão localizadas na serra da Mantiqueira em cota superior a 1700 metros e a foz no reservatório de Barra Bonita no rio Tietê, onde a cota no nível superior da barragem está a 456 metros.

Esta unidade hidrográfica possui uma concentração urbana relevante, aproximadamente 85% da distribuição da população, em relação às bacias não industrializadas. No ano de 1990, possuía uma densidade demográfica de 260 hab/km² contra 135 hab/km² no Estado de São Paulo e 3.080 hab/km² na Grande São Paulo (CERH, 1990). Estudos feitos pela Companhia Energética de São Paulo (CESP), projetam para o ano 2010 uma densidade demográfica em torno de 235 hab/km² para o Estado de São Paulo, referente a uma população de 58 milhões e taxa de urbanização de 97%. Para a bacia do rio Piracicaba, projeta-se uma densidade na faixa de 664 a 937 hab/km². É importante ressaltar que estas projeções demográficas nem sempre são as mesmas, variando o seu valor de acordo com a instituição. Nesse trabalho, se assume como dados oficiais os divulgados pela Fundação IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e Fundação SEADE (Sistema Estadual de Análise de Dados).

Das 25 (vinte e cinco) barragens/

reservatórios existentes e planejadas na bacia do rio Piracicaba, 13 são usinas hidrelétricas em operação, correspondendo a um potencial gerador de 204.651 Kw, dos quais 6,8% correspondem ao potencial instalado no rio Atibaia (Usina Hidrelétrica - UHE de Americana, Salto Grande e Usina Atibaia) e 6,7% no rio Piracicaba (UHE's de Sta Maria da Serra, Luiz de Queiroz e Boyes). A navegação fluvial, hoje, favorecida pelas políticas e incentivos dos governos estadual e regional, visando ao Mercosul, desempenhará um papel importante na economia da região através do escoamento da produção local, interligando-a a Hidrovia Tietê-Paraná, embora hoje, apenas o trecho entre a cidade de Santa Maria da Serra e a barragem de Barra Bonita, cerca de 20 km, esteja em condições de navegabilidade na bacia do Piracicaba.

4.2. FORMULAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

O sistema de fluxo em redes, a ser otimizado, é representado por arcos e nós para um instante t qualquer. O instante t é discretizado mês a mês para um horizonte de estudo de 2 (dois) anos, devido ao fato que, para os reservatórios selecionados, este período seja suficiente para considerar a sua capacidade de regularização intra-anual. Os arcos representam fluxos espaciais (interligação e localização existente entre os reservatórios determinados pela configuração do sistema fluvial) e temporais (transferência entre instantes sucessivos do volume de água dos reservatórios com capacidade regularizadora). As interseções do sistema fluvial e cada reservatório são representados por nós, enquanto o nó fictício representado por **R** (sumidouro), é colocado visando permitir o balanço hídrico na rede como um todo.

Para o sistema hídrico da bacia, num instante $t=1$ mês, foram selecionados 19 arcos (5 com transferência de volume, 3 com vazão de reversão e 11 com vazão liberada) e 10 nós, os quais correspondem as seguintes seções fluviais (Fig. 3):

1. Reservatório de Jaguarí (SABESP¹), no rio Jaguarí;
2. Reservatório de Cachoeira (SABESP), no rio Cachoeira;
3. Reservatório de Atibainha (SABESP), no rio Atibainha;
4. UHE de Jaguarí (CPFL²), no rio Jaguarí;
5. UHE de Salto Grande (CPFL), no rio Atibaia;
6. UHE de Americana (CPFL), no rio Atibaia;
7. Junção do rio Atibaia com o rio Jaguarí;
8. Reversão para Abastecimento de Água para Jundiá, no rio Atibaia;
9. Barragem de Jaguariuna (DAEE³), no rio Camanducaia, e
10. Barragem de Morungaba (DAEE), no rio Jaguarí.

A equação que representa o balanço hídrico das vazões nos reservatórios é da seguinte forma:

$$X(i,t) = X(i,t-1) + q(i,t) + \sum_{j=1}^n L(j,t), \quad j \in M_i. \quad (4)$$

sendo:

- i representa o local ou seção fluvial e t o tempo;
- M_i o conjunto dos aproveitamentos a montante do reservatório i ;
- $X(i,t)$ volume armazenado (hm^3) no reservatório i , no instante t (mês);
- $q(i,t)$ vazão incremental ($\text{hm}^3/\text{mês}$) afluente no nó i ;
- $L(i,t)$ vazão liberada $Q(i,t)$ e/ou Reversão $D(i,t)$ do nó i , e
- $L(i-1,t)$ defluência do reservatório (nó $i-1$) de montante.

Nos casos em que os reservatórios não possuem capacidade regularizadora (p.ex. nó 4) ou nas interseções do sistema fluvial (p.ex. nó 7), a equação da continuidade é da seguinte forma:

$$Q(i,t) = q(i,t) + \sum_{j \in M_i} Q(j,t) \dots\dots\dots (5)$$

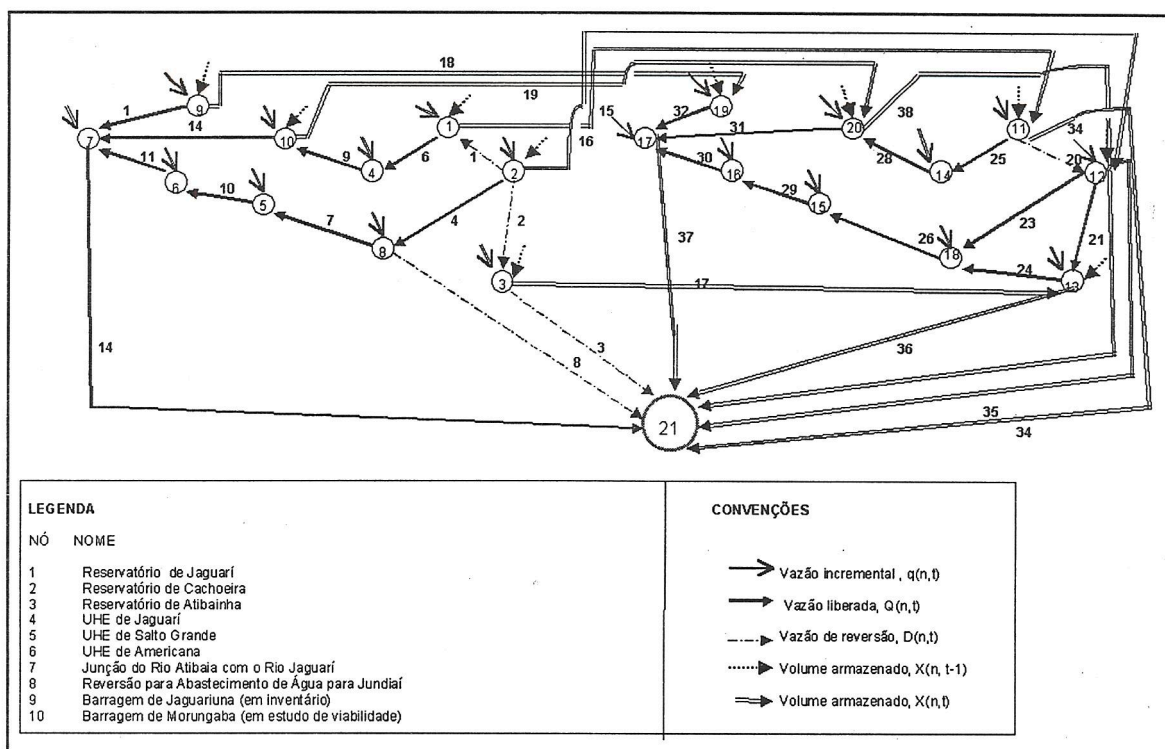


Figura 3 – Representação do Sistema de Fluxo em Redes

¹ Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

² Companhia Paulista de Força e Luz.

³ Departamento de água e Energia Elétrica do Estado de São Paulo.

sendo:

- $Q(i, t)$ é a vazão liberada no nó do reservatório sem capacidade regularizadora i ou na interseção fluvial i ;
- $q(i, t)$ é a vazão incremental afluyente no nó i ;
- $Q(i, t)$ é a vazão liberada no nó j (montante de i), e
- j pertence ao conjunto dos reservatórios a montante.

A título ilustrativo, para o nó 4, a equação 5 é da forma:

$$Q(4, t) = q(4, t) + Q(6, t) \dots\dots\dots(6)$$

As seguintes variáveis são relevantes na modelagem por fluxo em rede:

1. Vazão de reversão para a RMSP, representada pela variável $D(3, t)$;
2. Vazão de reversão para o município de Jundiá, representada pela variável $D(8, t)$;
3. Vazão fluvial a jusante de Piracicaba, representada por $Q(7, t)$;
4. Vazão fluvial de jusante da barragem (em inventário) de Jaguariuna, representada, por $Q(9, t)$, e
5. Vazão fluvial de jusante da barragem (em estudo de viabilidade) de Morungaba, representada por $Q(10, t)$.

Deve-se ressaltar que no estudo de caso foram selecionadas as variáveis (1) e (3) para inclusão na função objetivo. Assim, os objetivos formulados neste modelo foram maximizar ou, pelo menos assegurar a vazão média de 40 m³/s na seção do rio Piracicaba à jusante do município de Piracicaba, e a vazão de 33 m³/s na reversão de água para o Sistema Cantareira para o abastecimento da RMSP. A vazão de reversão para RMSP pode ser interpretada como meta a ser atingida, em razão da pequena amplitude de variação permitida. Portanto, a formulação multiobjetivo do problema proposto tem como função objetivo representar a

maximização dos benefícios associados às metas propostas e, assume a seguinte estrutura matemática:

$$MAX \sum_{t=t_0}^T G[Q(14, t)] + w \cdot F[D(3, t)] \dots(7)$$

sujeito às restrições das equações (4) e (5).

sendo:

- t_0 é o instante inicial (mês);
- T o horizonte de planejamento (meses);
- $G[.]$ é a função benefício associada à qualidade de água no rio Piracicaba;
- $F[.]$ é a função benefício associada à reversão para os sistemas de abastecimento de água da RMSP e Jundiá, respectivamente,
- w corresponde ao peso para a função abastecimento, adotado para gerar múltiplas soluções do problema multiobjetivo em detrimento da qualidade de água a jusante do rio Piracicaba.

Os dados para compor as funções $F[.]$ - Benefício x Vazão no Rio Piracicaba e $G[.]$ - Benefícios x Vazão para Abastecimento de São Paulo, foram obtidos na CETESB¹ e SABESP, respectivamente, os quais possuem as seguintes formas ilustradas nas Fig. 4 e Fig. 5. Estas foram executadas a partir da equação linear correspondente aos limites superiores dos reservatórios, para os períodos discretizados.

A interpretação analítica da Fig. 4, seção no rio Piracicaba (arco 14), considerando os pontos A (0.0;0.0), B (40.; 8.0) e C (60.0; 10.0), é:

- À direita de C: benefício marginal decrescente, poucos benefícios para a qualidade da água;
- BC: melhoria da qualidade da água, em termos de aumento da capacidade de autodepuração, melhoria do nível de oxigênio dissolvido (OD), e
- B: valor mínimo a ser garantido, estabelecido em lei.

Para a Fig. 5, a interpretação toma o seguinte sentido, considerando os pontos A (20.0;0.0); B (29.2;9.0), C (310;10.0) e D (40.0;10,0):

¹ Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental.

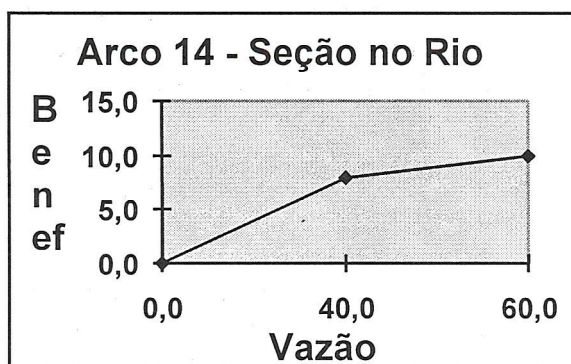


Figura 4 - Benefícios Escala de 0 a 10) X Vazão do Rio Piracicaba

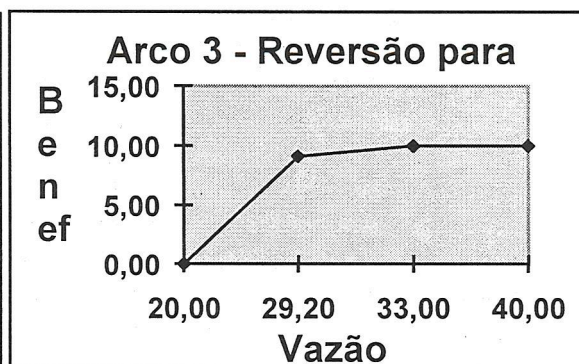


Figura 5- Benefícios Escala de 0 a 10)X Vazão para abastecimento RMSP

- C: capacidade de bombeamento do Sistema Cantareira;
- $\overline{BC}$: prejuízos moderados ao abastecimento, com início de necessidade de distribuição dos déficits através do sistema de rodízio, principalmente no período de estiagem entre junho a novembro, sendo a maior intensidade nos meses de agosto, setembro e outubro;
- $\overline{AB}$: prejuízos acentuados ao abastecimento, com déficits distribuídos a toda Região Metropolitana de São Paulo, com necessidade de rodízio, mesmo em ocasiões de períodos úmidos, e
- Abaixo de A: situação catastrófica para o abastecimento. O sistema não pode prescindir deste valor mínimo, caso contrário, implica em calamidade pública.

5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Foi utilizado um algoritmo de otimização de fluxos em rede, com função objetivo linear por partes, desenvolvido por Marins (1987). Este programa exige uma forma especial de entrada de dados. Assim, com base no trabalho prévio de Barros e Barbosa (1994), foi desenvolvido um algoritmo denominado Programa Montador de Rede, em linguagem Pascal versão Turbo 7.0. Também, o algoritmo de otimização de fluxos em redes foi atualizado para a versão Turbo Pascal 7.0.

O sistema em estudo, mostrado na **Fig. 3**, tem os reservatórios com as características apresentadas na **Tab. 1**.

Tabela 1: Características dos Reservatórios do Sistema em Estudo

Reservatório	Volume útil (hm ³)	Controle de Cheias	Vol. Máx. reservado p/ Cont. de Cheias ~ (21)
Jaquarí	783,00	Sim	154,00
Cachoeira	48,00	Sim	36,00
Atibainha	100,00	Sim	20,00
Jaguariuna	38,00	Não	
Morungaba	207,00	Não	

Uma vez os programas ajustados ao novo cenário, foi construído um arquivo com as vazões médias mensais (m^3/s) dos 10 postos fluviométricos, que correspondem as vazões incrementais nos nós da rede, para o período histórico observado de 1949 a 1977.

Dentre o conjunto de biênios da série histórica de vazões observadas, foram selecionados aqueles que apresentaram o período mais seco (vazões mínimas) e o mais úmido (vazões máximas). Na seleção, os biênios mais secos foram 1954/1955, 1962/1963 e 1971/1972 e o mais úmido 1976/1977. A análise das vazões revela que o biênio 1954/1955 foi o que apresentou a menor vazão média anual, $111,27 \text{ m}^3/\text{s}$, seguido dos biênios 1962/1963 e 1971/1972, $116,51 \text{ m}^3/\text{s}$ e $136,5 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

Com esse dados e definido os percentuais dos volumes úteis dos reservatórios, o passo seguinte da investigação foi saber para que valores do peso w as vazões e volumes não seriam alteradas em seu valor nos respectivos arcos, mantidos os percentuais. Os valores do peso w , durante o teste, variaram de 1000 até 0.001 para os biênios, de maneira que, após várias tentativas (rodadas computacionais) encontrou-se o intervalo dos pesos, onde a variação era pequena ou quase nula, para cada biênio escolhido.

Para cada biênio foram escolhidos dois valores extremos de peso – w_1 e w_3 , em que as vazões ou volumes permanecem constantes para qualquer variação de w e um valor intermediário – w_2 , para o caso contrário.

O passo seguinte foi gravar um arquivo, com os conjuntos de vazões para cada peso w escolhido no período t igual a 24 meses dos anos hidrológicos, correspondentes aos arcos 3 (Reversão para Região Metropolitana de São Paulo) – Fig. 6 - e 14 (Seção no Rio Piracicaba) – Fig. 7. Através do aplicativo Excel, foram construídos planilhas e os gráficos $Q (\text{m}^3/\text{s}) \times t$ (mês), para cada arco.

O mesmo procedimento foi tomado para os arcos com transferência de volume: arco 15 (Reservatório de Jaguarí - $VU=783 \text{ hm}^3$), arco 16 (Reservatório de Cachoeira - $VU=48 \text{ hm}^3$), arco 17 (Reservatório de Atibainha - $VU=100 \text{ hm}^3$), arco 18 (Reservatório de Jaguariuna - $VU=38 \text{ hm}^3$) e arco 19 (Reservatório de Morungaba - $VU=207 \text{ hm}^3$). Os gráficos foram construídos a partir do percentual de volume útil de cada reservatório versus o tempo em mês do ano hidrológico.

6. CONCLUSÕES

Foi estudado neste trabalho o problema do gerenciamento de recursos hídricos de bacias hidrográficas de grande complexidade, quanto aos aspectos técnicos-operacionais e institucionais. Para avaliar a metodologia proposta, tomou-se para estudo de caso a bacia do rio Piracicaba, a qual contempla um nível de complexidade bastante acentuado.

Os problemas que se manifestaram nas alterações de quantidade e qualidade dos recursos

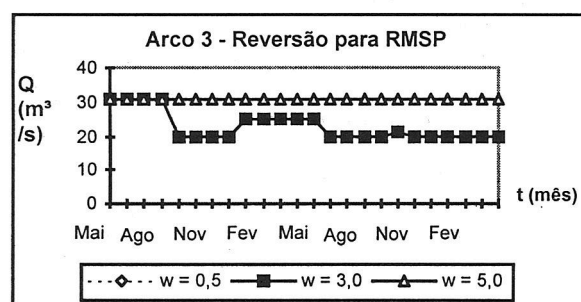


Figura 6 – Variação da Vazão para RMSP (arco 3)

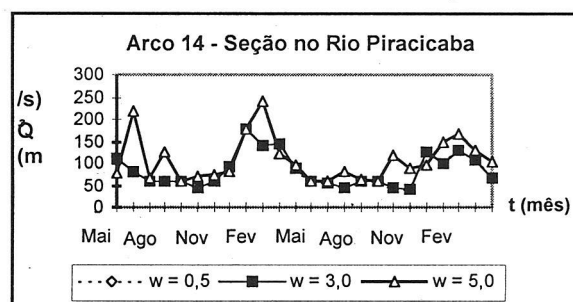


Figura 7 – Variação da Vazão Seção Rio Piracicaba (arco 14)

hídricos da bacia, provenientes do crescimento industrial acelerado juntamente com a urbanização, foram objeto de estudos para fins de planejamento.

Os resultados do modelo estudado poderão subsidiar a análise da viabilidade de uma das soluções alternativa propostas pela JPE (1994), que é de construir as 2 (duas) barragens de regularização de vazões - Jaguariuna e Morungaba - para manter o abastecimento público das bacias do Piracicaba e Capivari.

A visão de conjunto que o modelo estudado proporciona, através da interpretação dos benefícios de maneira conjunta, contrapõe-se aos estudos tradicionais que avaliam o benefício das obras hidráulicas de maneira pontual. Além disso, consegue-se avaliar as alternativas de planejamento sobre diferentes cenários hidrológicos (média, árido e úmido), o que se constitui em componente de grande valor para subsidiar alguns programas que objetivam a conservação e a recuperação dos mananciais da Bacia.

O modelo foi aplicado em torno de um problema específico - estudo de caso - mas a flexibilidade de sua estrutura computacional permite a sua adaptação em diferentes sistemas hídricos e atualização e/ou modificação de cada módulo dos programas que o compõe, bem como na alteração do horizonte de planejamento proposto pelos tomadores de decisão.

7. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- AZEVEDO, L. G. T. **Integration of water quantity and quality in multi-sector river basin planning**. Fort Collins: Colorado State University, 1993. 364p. Tese (Doutorado), Department of Civil Engineering, Colorado State University, 1994.
- BARBOSA, P. S. F., BRAGA, B. P. F. The use of network flow optimization in water control and management. In: *Advances in hydro-science and engineering*. Washington, S. S. Y. Wang, v.1, 1993, p. 399-405.
- BARP, A. R. B. **Contribuição ao gerenciamento de recursos hídricos do rio Piracicaba**. Campinas: UNICAMP, 1995. 115 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 1995.
- BARROS, L. G. O., BARBOSA, P. S. F. **A modelagem dos recursos hídricos do sistema Cantareira e bacia do Piracicaba através da técnica de fluxo em rede**. Relatório de Projeto, CNPq/PIBIC. Campinas: Unicamp, 1994. 19 p.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Diagnóstico da poluição ambiental no interior do estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 1994, 302p.
- GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. **Plano Estadual de Recursos Hídricos**. São Paulo: DAEE, 1990.
- KENNINGTON, Jeff L., HELGASON, Richard V. **Algorithms for networks programming**. New York: John Wiley & Sons, 1980, 291 p.
- LABADIC, J.W., BODE, D.A., PINEDA, A. M. Network model for decision-support in municipal raw water supply. *Water resources bulletin*. S. l., v. 22, n. 6, p. 927-940, dec., 1986.
- MARINS, Fernando A. Silva. **Estudos de programas em redes lineares por parte**. Campinas: UNICAMP, 1987. 144 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, 1987.
- SÃO PAULO. Secretaria do Meio Ambiente (SMA). **Estabelecimento de metas e reenquadramento dos corpos d'água: bacia do rio Piracicaba**. São Paulo: CETESB, dez/ 1994, 302p.
- SOMLYÓDY, L., PINTÉR, J. Optimization models in water quality control. In: *Systems analysis in quality management*. Proceeding of Symposium, London, 1987. Oxford: Pergamon Press, p. 201-210, jun/jul., 1987.