

ALOCÇÃO DA ÁGUA ENTRE MÚLTIPLOS USOS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA

Alexandre Nunes Roberto¹ e Rubem La Laina Porto²

Resumo - O trabalho apresenta os conceitos básicos de uma classe de modelos conhecida pela denominação de *modelos de rede de fluxo*. Para ilustrar o potencial da técnica é feita uma aplicação do modelo Modsim, desenvolvido na Colorado State University, ao sistema do Alto Tietê.

Abstract - The paper presents the basic concepts about the so called *network flow models*. To illustrate the usefulness of this kind of tool it presents an application of the model called Modsim to the Upper Tietê River Basin.

Palavras-Chave - Simulação, otimização, modelos de rede de fluxo, sistemas de suporte a decisões

¹ Bolsista do CNPq, Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da USP, Av. Prof. Almeida Prado 271, CEP 05508-900, São Paulo, SP. Tel: 011 818 5403 E-mail: nunesanr@usp.br

² Professor Doutor, Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da USP, Av. Prof. Almeida Prado 271, CEP 05508-900, São Paulo, SP. Tel: 011 818 5549 E-mail: rlporto@usp.br

INTRODUÇÃO

O problema de alocação da água entre os diversos usos e usuários de uma bacia hidrográfica é clássico. A tarefa de distribuir um bem por um certo número de consumidores pode ser simples quando prevalecem, de forma geral, alguns atributos associados a ele, ou mais especificamente, (1) o recurso é abundante, (2) sua qualidade é compatível com os usos que dele são feitos, (3) a oferta do bem é garantida razoavelmente no espaço e no tempo e (4) a utilização do bem se realiza de forma sustentável. É importante também que haja um relativo equilíbrio entre os atributos para que o problema de alocação não se torne extraordinariamente complexo.

Na inexistência desta situação de equilíbrio, mais cedo ou mais tarde, a sociedade terá que realizar enormes esforços para gerenciar a oferta e a demanda do recurso e estabelecer, na medida do possível, uma situação harmônica. Trazer harmonia a qualquer campo da atividade humana é tarefa sempre difícil. No caso dos recursos hídricos o gerenciamento implica em (1) existência de dispositivos legais adequados, (2) entidades públicas e privadas aparelhadas e competentes para exercer suas funções definidas por lei e requeridas pela sociedade, (3) instrumentos legais e econômicos que induzam ou obriguem o uso racional dos recursos hídricos, (4) investimentos financeiros, usualmente de grande porte, em obras de regularização, adução, controle de inundações e melhoria da qualidade das águas, (5) domínio e utilização de uma ampla gama de instrumentos tecnológicos, dos mais simples aos altamente avançados, (6) existência de entidades de referência ou excelência para a formação e treinamento de recursos humanos bem como para a realização de pesquisas e desenvolvimento das tecnologias necessárias e (7) participação da sociedade no processo decisório e no cumprimento dos dispositivos legais.

Este artigo pretende abordar apenas a questão de alguns instrumentos tecnológicos que podem representar contribuição importante para o campo mais amplo do gerenciamento dos recursos hídricos.

Instrumentos tecnológicos

Trazido para o ambiente acima descrito o problema de alocação da água torna-se extremamente complexo e para ajudar a resolvê-lo tem sido apresentados, principalmente nas últimas três décadas, um grande número de instrumentos que fazem parte de metodologias conhecidas pelos nomes de Pesquisa Operacional, Análise de Sistemas de Recursos Hídricos e mais recentemente Sistemas de Suporte a Decisões. Estas metodologias abrigam duas grandes classes de técnicas genericamente conhecidas como *descritivas* e *normativas* que no campo de recursos hídricos traduzem-se nas técnicas conhecidas por *simulação* e *otimização*, respectivamente.

Um modelo de simulação é construído para representar o comportamento essencial de um sistema de recursos hídricos. A capacidade de processamento de dados e

cálculo dos computadores atuais permite que estes modelos sejam extremamente detalhados, flexíveis e representem o sistema em estudo com alto grau de fidelidade. As incertezas associadas ao comportamento das variáveis de entrada e às demandas podem ser levadas em conta de forma implícita com o auxílio da hidrologia estocástica ou técnicas de Monte Carlo de forma geral. Estes modelos podem calcular o valor de uma função objetivo ou índices de performance solicitados pelo usuário e a não linearidade, seja da função objetivo, seja dos processos simulados geralmente não constitui grande problema. Modelos de simulação são fáceis de entender e, por esta razão são amplamente aceitos por altos níveis gerenciais, geralmente constituído por não-especialistas e até mesmo por leigos. Por estas razões esta classe de modelos é, com certeza, a mais amplamente utilizada na análise de sistemas de recursos hídricos.

Modelos de simulação são incapazes, entretanto, de encontrar os valores das variáveis de decisão que otimizem os critérios formulados pelo usuário, o que constitui o ponto fraco da técnica. O usuário que desejar encontrar valores “satisfatórios” das variáveis de decisão utilizando um modelo de simulação é obrigado a recorrer aos chamados *métodos de força bruta* que se baseiam no processamento repetitivo do modelo, de tal forma a exaurir a faixa de valores possíveis das variáveis de decisão. Mesmo assim não se pode garantir que os valores ótimos tenham sido encontrados.

Os modelos de otimização utilizam-se de algoritmos matemáticos para encontrar os valores das variáveis que maximizem (ou minimizem) o valor de uma função critério. Por restrições computacionais estes modelos são usualmente obrigados a simplificar o sistema físico tratado e costumam levar desvantagem em relação à precisão, flexibilidade e representatividade dos modelos de simulação.

Dentre os métodos de otimização, a programação dinâmica é extremamente atrativa porque a operação de sistemas de recursos hídricos é fundamentalmente um problema de determinar os valores das variáveis de decisão ao longo de estágios sequenciais no tempo. A programação dinâmica admite também que as funções objetivo, bem como as relações funcionais que descrevem o desempenho do sistema, sejam não-lineares, não-convexas e descontínuas, ao contrário do que acontece com uma grande parte de outras técnicas de otimização. Ainda mais, a programação dinâmica pode admitir que a sequência de eventos futuros seja conhecida (programação dinâmica determinística) ou pode considerar os aspectos probabilísticos e estocásticos associados a esta sequência. (programação dinâmica estocástica).

A programação dinâmica determinística é mais eficiente em termos computacionais e pode representar o sistema de recursos hídricos de forma relativamente detalhada. Padece, entretanto, do grave defeito de abordar como determinístico um problema reconhecidamente probabilístico e, por esta razão, é aplicada adotando-se condições hidrológicas predefinidas, tais como, “sequência de anos secos”, “período histórico mais crítico” e outras formulações semelhantes. A hipótese admitida neste tipo de abordagem é que a política ótima assim determinada seja igualmente eficiente quando ocorrerem eventos semelhantes no futuro, o que não é garantido e nem sempre acontece.

A chamada programação dinâmica estocástica requer que as vazões sejam descritas por uma representação probabilística explícita (tipicamente uma distribuição de probabilidade das vazões ou uma cadeia de Markov). Apesar de constituir abordagem elegante e atrativa do ponto de vista teórico, apresenta graves inconvenientes do ponto de vista computacional e usualmente é limitada a sistemas de pequeno porte.

Os aspectos probabilísticos do problema podem ser tratados por meio da programação dinâmica determinística resolvendo o problema de otimização utilizando uma série muito longa de vazões (histórica ou gerada sinteticamente). A hipótese, neste caso, é de que estas séries contenham implicitamente todo o “conhecimento” da hidrologia da região e que, portanto, os resultados da programação determinística incorporem este “conhecimento”. Uma vez realizada a otimização, procura-se expressar as regras de operação do sistema em forma de relações funcionais, usualmente determinadas por regressão entre variáveis de estado e variáveis de decisão. Usualmente estas relações são do tipo “vazão descarregada por um reservatório no mês $i+1$ em função do volume total armazenado no sistema no mês i ”, “volume que cada reservatório deve armazenar no mês $i+1$ em função do armazenamento total do sistema no mês i ” e outras regras semelhantes. As regras de operação determinadas desta forma podem ser testadas por meio de modelos de simulação e refinadas iterativamente por sucessivos testes. Segundo diversos autores (Karamouz et al, 1992 e Karamouz e Houck, 1987) a otimização estocástica implícita apresenta melhores resultados que a explícita porque pode ser formulada de forma a representar o problema mais realisticamente.

Não é demais lembrar que sobre todas as técnicas baseadas em programação dinâmica, em qualquer de suas formas, recai a “maldição da dimensionalidade”, que tende a tornar os problemas computacionalmente intratáveis a medida que os sistemas crescem de porte.

Apesar do arsenal de instrumentos atualmente disponíveis e o avanço meteórico das ciências computacionais durante os últimos anos, o problema de alocação de água por diversos usos e usuários não tem ainda uma solução generalizada e totalmente satisfatória e por esta mesma razão permanece clássico.

Modelos de rede de fluxo

Um dos objetivos principais deste artigo é discutir um tipo de modelo conhecido por “modelo de rede de fluxo”, que embora não seja ainda a solução genérica e definitiva do problema, pode representar uma alternativa interessante para contornar alguns dos problemas relacionados acima. Os modelos de rede de fluxo na realidade misturam características dos modelos de simulação e otimização e podem incorporar as características estocásticas das vazões de entrada, conforme se verá a seguir.

Os modelos de rede de fluxo (MRF) representam sistemas de recursos hídricos por uma rede formada de “nós” e “arcos”. Os nós representam reservatórios, demandas, reversões, confluências, e outros pontos importantes de um sistema. Os arcos são os elos

de ligação entre os nós e representam trechos de rios, adutoras, canais e outras estruturas semelhantes.

Cada arco é caracterizado por três parâmetros, ou seja, os limites superior

($S_{i,j}$) e inferior ($I_{i,j}$) do fluxo que passa pelo arco (ex.: capacidade máxima e mínima de um canal) e um "custo" ($C_{i,j}$) por unidade de fluxo que transita pelo arco. Os custos podem ser positivos ou negativos, ou seja, podem representar uma penalidade (no caso de custo positivo), ou um prêmio (custo negativo). Este custo não significa, obrigatoriamente, um valor monetário, podendo representar preferências estabelecidas pelo usuário. As capacidades máxima e mínima de cada arco podem ser fixas para todo o período de simulação ou podem variar ao longo do tempo. O problema de otimização toma, portanto a forma:

$$\min \sum \sum C_{ij} \times Q_{ij}$$

sujeito a:

$$\sum Q_{ij} - \sum Q_{ki} = 0$$

e

$$I_{ij} \leq Q_{ij} \leq S_{ij}$$

onde: Q_{ij} = vazão que transita do nó j ao nó i

C_{ij} = custo (prioridade) da unidade de vazão que transita entre os nós j e i

N = número total de nós da rede

I_{ij} = limite inferior da vazão no arco ij

S_{ij} = limite superior da vazão no arco ij

A primeira equação é a função objetivo e representa o custo total da rede. A segunda estabelece que a rede deve ser totalmente *conservativa* (diz-se também *totalmente circulante*), ou seja, a soma das vazões afluentes ao nó i ($\sum Q_{ij}$) deve ser igual à soma dos fluxos que saem dele ($\sum Q_{ki}$). Esta é uma imposição do algoritmo que precisa ser obedecida incondicionalmente. A terceira equação representa o segundo tipo de restrição, ou seja, o valor da vazão em cada arco deve estar sempre na faixa limitada pelas capacidades mínimas e máximas do arco.

Cada nó deve conter as características da estrutura que representa. Por exemplo se o nó " i " estiver representando um reservatório, o analista deve fornecer a relação cota-

área-volume, os volumes máximos e mínimos de armazenamento, os níveis de armazenamento que se deseja atingir, o percentual de perdas por infiltração, a taxa de evaporação, etc.

Entre as características que tornam atrativa a utilização dessa classe de modelos para análise de sistemas de recursos hídricos, destacam-se as seguintes (Azevedo, Porto e Zahed, 1997):

1. Na grande maioria dos casos pode-se representar um sistema de recursos hídricos de forma adequada, realista, flexível e bastante clara como uma rede composta de nós e arcos;
2. Esses modelos possuem a flexibilidade típica dos modelos de simulação, ou seja, podem representar o comportamento de um sistema de recursos hídricos de forma bastante completa;
3. Modelos de rede de fluxo incluem também algoritmos de otimização que minimizam o custo total da rede, ou seja, determinam os fluxos em todos os arcos de tal forma que a somatória de todos os custos seja mínima.

Os MRF podem modelar também as interações entre águas superficiais e subterrâneas como, por exemplo, a diminuição das vazões dos rios devido ao bombeamento de aquíferos ou o retorno de vazões aos cursos de água através do subsolo.

Os algoritmos de otimização de redes de fluxo costumam ser altamente eficientes (ordens de magnitude mais rápido que o Simplex) o que significa que sistemas extremamente grandes e complexos podem ser tratados em microcomputadores comuns.

Embora modelos de rede sejam extremamente vantajosos, eles apresentam limitações. Os algoritmos de rede de fluxo otimizam apenas sistemas lineares, uma vez que aplicação de técnicas não lineares ainda não constitui tecnologia madura. A função objetivo é pré-definida e portanto não pode ser livremente especificada pelo usuário.

Estes algoritmos admitem também apenas os dois tipos de restrições acima citados. Como os sistemas de recursos hídricos costumam ser altamente condicionados, em alguns casos pode haver necessidade de adoção de artifícios para que seja obtida representação adequada.

Geralmente a otimização dos MRF é executada a cada intervalo de tempo, de forma sequencial. O intervalo mensal é usualmente o mais utilizado para os problemas de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, embora a técnica seja aplicável a intervalos mais curtos. Deve ser enfatizado, entretanto, que na maioria dos MRF a otimização efetuada não é dinâmica, ou seja, não se garante o ótimo global para um período de “*n*” intervalos de tempo à frente.

As perdas de condução em canais e evaporação em reservatórios representam um desvio da condicionante que impõe o balanço de massas. Tal fato não representa

entretanto grande problema uma vez que estas perdas podem ser calculadas por processos iterativos sem grande perda de eficiência.

Em resumo, os modelos de rede de fluxo reúnem características das técnicas de simulação e otimização. As características de flexibilidade e adaptabilidade dos modelos de simulação são quase que integralmente preservadas nos MRF, ao mesmo tempo que o algoritmo de otimização, apesar das limitações citadas, libera o usuário dos trabalhosos e demorados processos de tentativa e erro.

O modelo Modsim

O modelo Modsim é um modelo de rede de fluxo desenvolvido na Colorado State University sob a liderança do Prof. John Labadie (Labadie, 1988 e Azevedo, Porto e Zahed Filho, 1997). Influíram na escolha o fato de o Modsim ser um modelo generalizado, bem documentado, adaptado para simular as situações mais comuns que ocorrem em sistemas de recursos hídricos e testado em uma variedade de situações. No Brasil registram-se aplicações do modelo para simular o Sistema de Abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza (Souza Filho e Porto, 1996), o sistema da bacia dos rios Itapicurú (Porto et al, 1997 e Porto 1999) e Jacuípe na Bahia (Porto 1997). Algumas aplicações em andamento deverão ser objeto de publicações em futuro próximo (simulações da transposição do Rio São Francisco para diversos estados nordestinos e dimensionamento dos reservatórios dos arroios Salso e Jaguarí no Rio Grande do Sul).

Uma das principais características do Modsim é o fato de que o modelo incorpora automaticamente uma série de funções que são comuns na simulação de bacias hidrográficas sem que o usuário tenha que se preocupar em programá-las. Entre elas as mais importantes são:

- os usuários podem colocar quantos nós de demanda forem necessários para levar em conta as demandas na bacia (consuntivas ou não). O modelo atenderá a estas demandas de acordo com um valor de prioridade atribuída pelo usuário, que pode variar de 1 a 99 (o valor 1 é a maior prioridade). Na realidade as prioridades P e os custos C estão relacionados de forma biunívoca ($C = 10P - 1000$), o que significa que os valores de C que representam prioridades são sempre negativos. Portanto, ao atender uma prioridade o modelo estará diminuindo os custos da rede de um valor C por unidade de vazão fornecida.
- a operação dos reservatórios é feita utilizando-se o conceito de *volume meta* ou *nível meta*, ao qual se atribui uma prioridade. Desta forma sempre que o volume armazenado for menor que o volume meta, o reservatório guardará água desde que as outras prioridades da rede sejam menores. O volume armazenado acima do nível meta tem custo zero, ou seja é livre para atender a quaisquer demandas por menores que sejam suas prioridades.
- as perdas por evaporação dos reservatórios são levadas em conta por meio de processo iterativo

- modelo calcula a produção de energia elétrica (de ponta ou de base) desde que sejam fornecidas as características da usina.
- modelo faz o balanço água superficial - água subterrânea, desde que sejam fornecidas as características do aquífero.

O *Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões* da Escola Politécnica da USP desenvolveu uma interface gráfica para facilitar a aplicação do Modsim, chamada de *ModsimP32* (Roberto, A. N. e Porto, R. L., 1999) que está sendo utilizada no desenvolvimento de um Sistema de Suporte a Decisões para a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP (Porto et Al, 1999). Esta interface foi desenvolvida no formato típico de um sistema de suporte a decisões, ou seja, estão presentes em sua estrutura um módulo de diálogo, uma base de dados e uma base de modelos, que no presente caso é constituída apenas pelo Modsim.

O módulo de diálogo permite que toda a topologia do problema seja formulada apenas com a utilização do mouse e de uma série de ícones (que representam reservatórios, canais, nós de passagem, etc.). Ao se acionar o botão dois do mouse sobre cada um destes ícones tem-se acesso à base de dados da estrutura representada pelo ícone acionado. Após a execução do programa os resultados podem ser consultados em forma tabular ou gráfica. Os dados e resultados podem ser facilmente exportados para planilhas eletrônicas e processadores de texto utilizando-se as funções específicas do Windows 95/98. Da mesma forma, os dados de entrada podem ser importados de planilhas.

A Figura 1 representa o Sistema Alto Tietê, desenhado com a interface ModsimP32 e a Figura 2 exemplifica uma tela que permite o acesso ao Banco de Dados de um dos reservatórios do sistema.

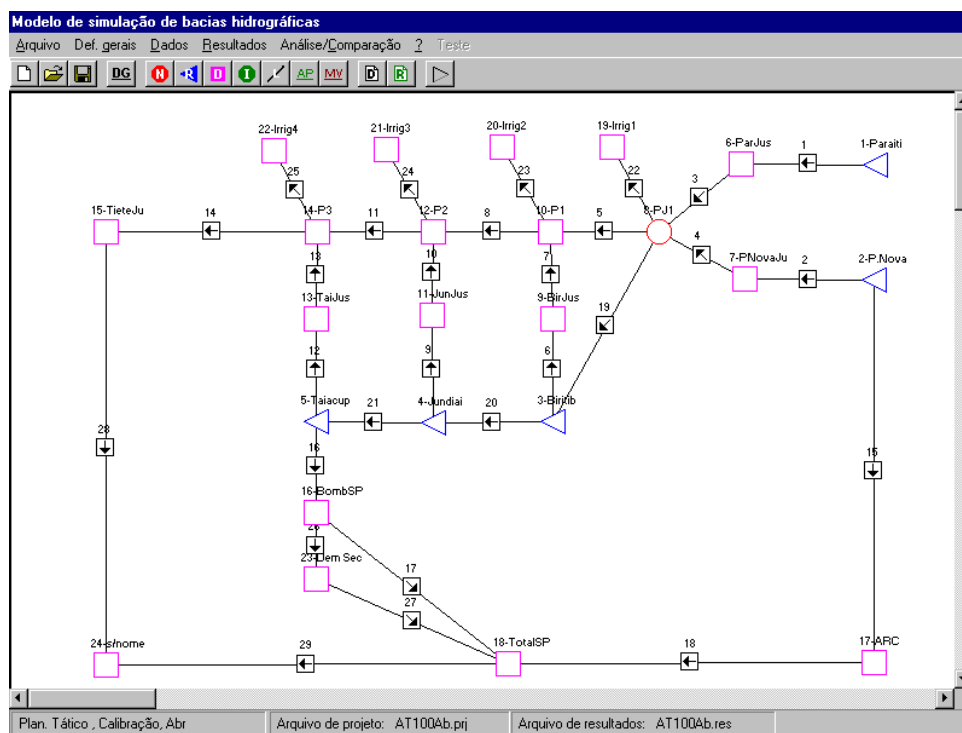


Figura 1 – Rede de Fluxo do Sistema Alto Tietê

Dados do reservatório

RESULTADOS		n/c
Armazenamento	Vazão	Evaporação / Geração
Descrição / Volumes	Eficiência da geração	Taxa de infiltração

Descrição

 Número do nó: 2

 Nome do nó: P.Nova

Área, volume e nível

Área (Km^2)	Volume (Mm^3)	Nível (m)
12.70	42.90	755.00
25.50	332.90	770.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00

Volumes característicos

 Volume máximo (Mm^3): 332.90

 Volume mínimo (Mm^3): 42.90

 Volume inicial (Mm^3): 71.90

Nó 2-P.Nova

Ok

Cancelar

Figura 2 – Tela da interface ModSimP32 para preenchimento de dados de um reservatório

A interface permite que se levem em consideração os aspectos probabilísticos do comportamento de forma implícita, por meio do seguinte procedimento:

1. escolhe-se um horizonte de operação do sistema ($H= 2$ a 5 anos, tipicamente)
2. escolhem-se os níveis iniciais dos reservatórios do sistema e executa-se a simulação de N anos de vazões de entrada (série histórica ou sintética) como explicado a seguir
3. se, por exemplo, o horizonte escolhido for 3 anos, o modelo executará a simulação dos anos 1, 2 e 3 da série histórica e armazenará os resultados
4. em seguida, partindo dos mesmos níveis iniciais anteriores o modelo executará a simulação dos anos 2, 3 e 4 e assim por diante até que sejam executadas $N-H+1$ simulações.
5. os resultados são apresentados na forma de curvas de frequência traçadas com $N-H+1$ pontos

O Sistema Alto Tietê

Para exemplificar a utilização do Modsim em um problema de alocação de água escolheu-se o Sistema Alto Tietê, composto de cinco reservatórios situados a montante da cidade de São Paulo, esquematizado na Figura 3. Atualmente o sistema está em funcionamento parcial, uma vez que os reservatórios dos rios Paraitinga e Biritiba ainda não estão concluídos. As águas do rio Tietê serão conduzidas para a região metropolitana a partir de um bombeamento situado na altura da foz do rio Biritiba. Por meio de túneis e canais estas águas chegarão ao reservatório do rio Jundiá e posteriormente ao reservatório do rio Taiaçupeba, onde serão tratadas e bombeadas para São Paulo. Faz parte do sistema também a Adutora do Rio Claro, obra construída na década de 20, que intercepta este rio a montante de Ponte Nova e contribui hoje com cerca de $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ para o abastecimento da região metropolitana.

A jusante das obras do sistema as águas do Tietê são utilizadas para irrigação do *cinturão verde* de São Paulo, para abastecimento de núcleos urbanos bastante populosos (principalmente Mogi das Cruzes e Suzano) e uma série de indústrias, algumas delas grandes consumidoras de água. Além destes usos há necessidade também de garantir uma vazão mínima a jusante do sistema, estimada em $4 \text{ m}^3/\text{s}$, para preservação da vida aquática e outros usos diversos.

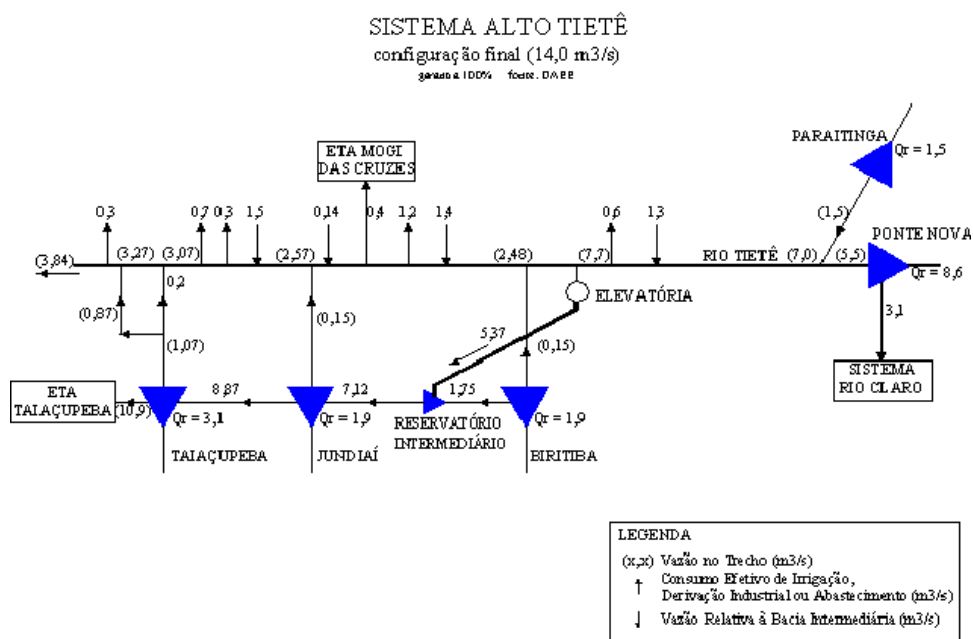


Figura 3 – Esquema da Bacia do Alto Tietê

Análise do Sistema Alto Tietê

A rede de fluxo para simular o Sistema Alto Tietê foi então configurada conforme a Figura 1 com as seguintes prioridades:

- uso para irrigação e abastecimento público: Prioridade 1
- adução do Rio Claro: Prioridade 1
- vazão mínima para jusante: Prioridade 5
- bombeamento para S. Paulo: Prioridade 10
- níveis meta de 100% para os três reservatórios do sistema: Prioridade 50

Configurado desta forma o Modsim atenderá inicialmente os usos já existentes (irrigação e adução do Rio Claro) e em seguida procurará satisfazer a demanda de vazão mínima a jusante do sistema. Somente após atendidas estas necessidades o modelo conduzirá água pelo sistema de bombeamentos, canais, túneis e reservatórios para atender a demanda da Grande São Paulo. Os três reservatórios tem prioridades mais baixas do que todas as demandas. Isto significa que sempre que tiverem alguma água armazenada, esta água

estará disponível para atender as demandas. Todas as sobras serão armazenadas, entretanto, uma vez que os volumes metas dos reservatórios procuram mantê-los cheios.

No exemplo testou-se a possibilidade de aduzir 11 m³/s para São Paulo, além dos 3.1 m³/s da adutora do Rio Claro. Foram utilizadas séries históricas de vazões médias mensais com período comum de 64 anos de observação. O horizonte de operação adotado foi de dois anos e o volume armazenado inicial do sistema (soma do armazenamento dos três reservatórios) variou parametricamente de 10 a 100%. O mês de início da simulação foi abril, uma vez que este é, usualmente, o começo da estação seca na região.

Resultados

Os resultados mostraram que as três demandas mais prioritárias (irrigação e abastecimento público, adutora do Rio Claro e vazões mínimas a jusante) foram sempre atendidas. O atendimento à demanda de 11 m³/s para São Paulo depende, entretanto, do armazenamento inicial do sistema. A Figura 4 mostra a variação da vazão anual média aduzida em função do armazenamento inicial do sistema para diversos níveis de garantia, enquanto a Figura 5 mostra a probabilidade de terminar o período com armazenamento igual ou superior a um dado nível em função do armazenamento inicial.

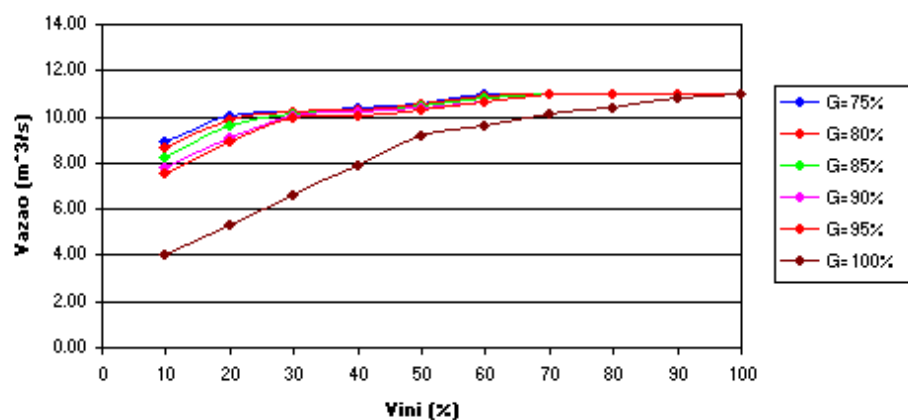


Figura 4 – Vazões médias anuais bombeadas para São Paulo em função do armazenamento inicial do sistema, para diversas garantias

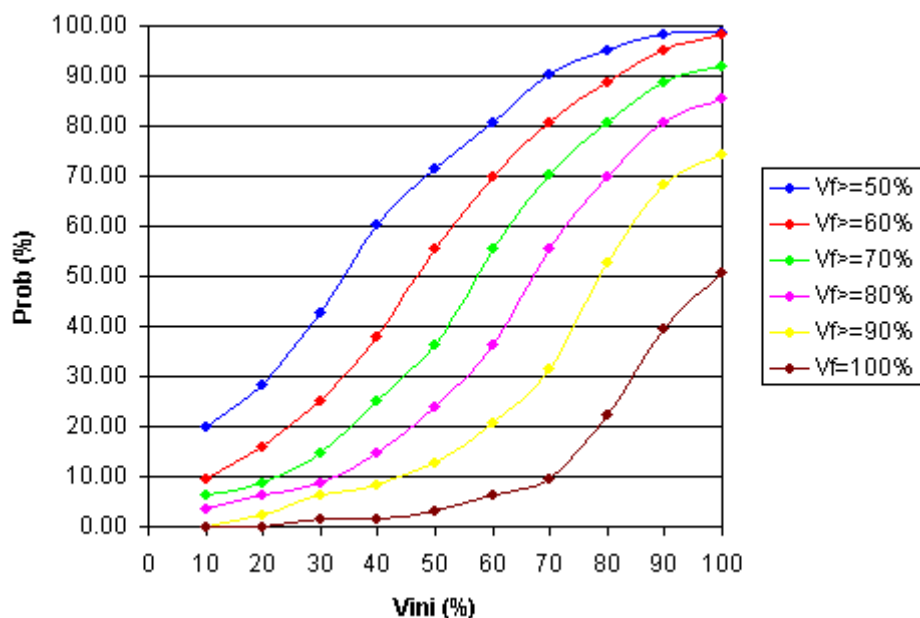


Figura 5 – Probabilidade de atingir armazenamentos especificados ao fim do horizonte de operação, em função do armazenamento inicial

A análise das figuras mostra, por exemplo, que se o sistema começar a estação seca com 70% de seu armazenamento total, a garantia de se obter os 11 m³/s é sempre superior a 95%, o que configura um desempenho bastante bom. A Figura 5 mostra que quando se inicia a estação seca com 70%, a probabilidade de chegar aos mesmos 70% ao fim de dois anos é cerca de 70%, o que representa também uma situação bastante satisfatória. Nota-se também dos gráficos que para garantia de 100% o comportamento do sistema degrada sensivelmente, em especial quando se inicia a estação seca com armazenamento abaixo de 50%.

CONCLUSÕES

O artigo discutiu a questão de alocação da água em bacias complexas e sugeriu a utilização dos chamados modelos de rede de fluxo, em particular o Modsim, como uma possibilidade interessante de proceder a análise deste problema. Escolheu-se um sistema razoavelmente complexo, o Sistema Alto Tietê, para exemplificar a aplicação da técnica

e, a partir dos resultados obtidos na simulação, construíram-se dois gráficos para resumir o comportamento do sistema em função do volume inicial armazenado no início da estação seca.

Os gráficos oferecem possibilidades interessantes para a tomada de decisões a respeito da operação do sistema no início da estação seca como, por exemplo, o eventual nível de racionamento que se necessitaria adotar em função de um risco admitido pela Sabesp. Os resultados são entretanto preliminares e tem, no presente momento, apenas valor ilustrativo.

Um modelo como o Modsim é extremamente útil também para a análise da expansão das demandas (decisão de conceder novas outorgas, por exemplo). Utilizando a interface ModSimP32 é muito simples introduzir novas demandas no sistema ou expandir as existentes. Se a nova demanda for introduzida com prioridade superior às demandas atuais será possível quantificar o efeito da primeira sobre as segundas. Caso contrário será possível quantificar a garantia de atendimento da nova demanda. Em ambos os casos poder-se-á determinar o efeito da introdução do novo consumo sobre a variação dos níveis dos reservatórios.

A interface ModSimP32 torna bastante simples e rápida a análise de sistemas complexos. No caso exemplificado, a montagem da rede e o preenchimento dos dados levaram apenas 15 minutos, uma vez que os dados de vazão já estavam em planilhas eletrônicas. A simulação com uma série hidrológica de 64 anos de vazão leva menos de um minuto em um computador com processador Pentium II de 400 Mhz.

AGRADECIMENTOS

O engenheiro Alexandre Nunes Roberto é bolsista do CNPq e o presente trabalho faz parte de sua dissertação de mestrado. O Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões está executando sob contrato com a Sabesp o projeto denominado *Sistema de Suporte a Decisões para Operação dos Grandes Sistemas Produtores da Sabesp* e o desenvolvimento da interface ModSimP32 foi parcialmente apoiada por este contrato.

BIBLIOGRAFIA

- AZEVEDO, L.G.T, Porto, R.L. e Zahed, K., *Modelos de Simulação e de Rede de Fluxo*, Capítulo 4 in *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*, ABRH-EUFRGS, 1997
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, *Plano Diretor do Aproveitamento dos Recursos Hídricos das Bacias do Alto Tietê e Baixada Santista - Relatório Final*, 1968
- LABADIE, *Rights Planning*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1995

- PORTO, R. L., *Estudos de Operação do Sistema França - São José do Jacuípe*, Relatório Técnico para a Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia, 1997
- PORTO, R. L., *Estudos de Operação do Reservatório de Ponto Novo no Rio Itapicuru*, Relatório Técnico para a Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia, 1999
- PORTO, R. L. et Al. *Sistema de Suporte a Decisões para a Operação dos Grandes Sistemas Produtores da Sabesp* Decimo Terceiro Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, ABRH, 1999
- PORTO, R. L., et Al. “*Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento De Recursos Hídricos*”, editor, Coleção ABRH de Recursos Hídricos, Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 1997.
- ROBERTO, A. N. e Porto, R. L., *MODSIMP32: Manual do Usuário, Interface para o Modelo MODSIM*, Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999
- SOUZA FILHO, F. A., Porto, R. L. *Operação do Sistema de Abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza por Modelo de Rede de Fluxo*, Terceiro Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Salvador, ABRH, 1996.