

## SISTEMAS DE SUPORTE À DECISÃO EM RECURSOS HÍDRICOS

### Benedito Braga

Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, EPUSP  
Av. Prof. Almeida Prado, 217 - CEP 05508-900 São Paulo, SP  
benbraga@usp.br

### Paulo Sérgio Franco Barbosa

Departamento de Recursos Hídricos - Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP  
Av. Albert Einstein, 901 - Caixa Postal 6021 CEP 13083-970 Campinas, SP

### Paulo Takashi Nakayama

Centro Tecnológico de Hidráulica - CTH  
Av. Lucio M. Rodrigues, 120 - CEP 05508-900 São Paulo, SP

## RESUMO

Recursos hídricos desempenham um papel fundamental no desenvolvimento de qualquer sociedade, em especial no terceiro mundo. Excesso ou deficit deste precioso e vital recurso são igualmente problemáticos e merecem a atenção de qualquer governo responsável. Igualmente importante é a qualidade da água. O conceito de desenvolvimento sustentável colocou em questão os métodos desenvolvimentistas baseados em um único objetivo, qual seja, a eficiência econômica. De acordo com este conceito o desenvolvimento é um processo de mudança no qual a explicitação de recursos, o direcionamento de investimentos, a orientação do desenvolvimento tecnológico, e as mudanças institucionais estão em harmonia e propiciam o aumento do potencial de atender as necessidades e aspirações humanas do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades.

É dentro deste contexto de sustentabilidade que o planejamento e a gestão integrada de recursos hídricos devem ser discutidos e analisados. O adjetivo integrado indica que os aspectos de qualidade e quantidade devem ser considerados em conjunto e que o recurso hídrico é parte de um sistema regional onde outras interfaces de setores correlatos (por exemplo: transportes, saúde pública, defesa civil, agricultura e outros) devem ser adequadamente consideradas. Neste trabalho são discutidas as ferramentas disponíveis na área tecnológica para o adequado planejamento e gestão integrada de recursos hídricos. Apresenta-se a chamada análise de sistemas de recursos hídricos através da qual sistematiza-se o processo de planejamento com elementos quantitativos. Trata-se inicialmente, por razões histórico-didáticas, do problema de objetivo único destacando-se as técnicas

de otimização e simulação. A seguir, apresentam-se as dificuldades enfrentadas por estas técnicas e os recentes avanços na implementação de métodos de planejamento quantitativo com múltiplos objetivos. Os Sistemas de Suporte à Decisão (SSD) são finalmente introduzidos como o estágio mais recente de utilização destas técnicas de maneira amigável ao tomador de decisão.

## INTRODUÇÃO

Recursos hídricos desempenham um papel fundamental no desenvolvimento de qualquer sociedade, em especial no terceiro mundo. Excesso ou deficit deste precioso e vital recurso são igualmente problemáticos e merecem a atenção de qualquer governo responsável. Igualmente importante é a qualidade da água. Não se concebe o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos sem que se considere ao mesmo tempo os aspectos quantitativos e os qualitativos. Quantidade e qualidade da água são indissociáveis.

No passado a questão do desenvolvimento foi tratada de um ponto de vista puramente econômico incorporando desta forma no valor monetário todos os anseios da sociedade. A junção de custos e benefícios em um arcabouço analítico sistemático, a chamada análise benefício-custo, foi proposta pela primeira vez de uma forma facilmente compreensível pelo leigo no "Flood Control Act" norte-americano de 1936. De acordo com esta lei, todo projeto federal norte-americano de controle de cheias, para ser aprovado deveria mostrar valores presentes de benefícios superiores aos correspondentes custos. Mais recentemente, a preocupação com valores intangíveis do ponto de vista econômico, notadamente na área ambiental, aliada a uma maior participação pública fez com que esta tradicional prática fosse sendo incorporada em

metodologias mais gerais de tomada de decisão com objetivos múltiplos. Esta é uma tendência seguida não só nos países em desenvolvimento, mas principalmente nos países em desenvolvimento. O Brasil é um dos exemplos mais expressivos desta realidade onde a pressão da sociedade civil organizada fez com que a Constituição Federal de 1988 tivesse um capítulo inteiro sobre meio ambiente.

O conceito de desenvolvimento sustentável colocou em questão os métodos desenvolvimentistas baseados em um único objetivo, qual seja, a eficiência econômica. De acordo com este conceito o desenvolvimento é um processo de mudança no qual a explicitação de recursos, o direcionamento de investimentos, a orientação do desenvolvimento tecnológico, e as mudanças institucionais estão em harmonia e propiciam o aumento do potencial de atender as necessidades e aspirações humanas do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades.

É dentro deste contexto de sustentabilidade que o planejamento e a gestão integrada de recursos hídricos devem ser discutidos e analisados. O adjetivo integrado indica que os aspectos de qualidade e quantidade devem ser considerados em conjunto e que o recurso hídrico é parte de um sistema regional onde outras interfaces de setores correlatos (por exemplo: transportes, saúde pública, defesa civil, agricultura e outros) devem ser adequadamente consideradas. A falta de apreço para com estas questões tem implicado em dificuldades para obtenção de licença ambiental em importantes empreendimentos hidráulicos.

Neste trabalho são discutidas as ferramentas disponíveis na área tecnológica para o adequado planejamento e gestão integrada de recursos hídricos. Apresenta-se a chamada análise de sistemas de recursos hídricos através da qual sistematiza-se o processo de planejamento com elementos quantitativos. Trata-se, inicialmente, por razões histórico-didáticas, do problema de objetivo único, destacando-se as técnicas de otimização e simulação. A seguir apresentam-se as dificuldades enfrentadas por estas técnicas e os recentes avanços na implementação de métodos de planejamento quantitativo com múltiplos objetivos. Os Sistemas de Suporte à Decisão (SSD) são finalmente introduzidos como o estágio mais recente de utilização destas técnicas de maneira amigável ao tomador de decisão.

## **ENFOQUE SISTÊMICO NO PLANEJAMENTO INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS**

O processo de implementação de um projeto de engenharia pode ser subdividido em três fases:

### Fase 1 - Planejamento

- Estágio 1 - Estudos preliminares
- Estágio 2 - Coleta e processamento de dados
- Estágio 3 - Formulação e geração de alternativas
- Estágio 4 - Especificação final do projeto
- Estágio 5 - Projeto executivo

### Fase 2 - Implantação

### Fase 3 - Operação

Na Figura 1 apresenta-se de forma esquemática, o processo de planejamento incluindo os quatro estágios anteriores ao projeto executivo. Os estágios são mostrados como parte de um processo decisório sequencial no qual as tarefas a serem executadas a cada estágio estão representadas por blocos conectados, por linhas que representam decisões ou o fluxo de informação que são passadas de um estágio a outro. O quadro é bastante genérico e serve como referencial para a discussão sobre aspectos técnicos do planejamento que será feita a seguir. A utilização do quadro proposto para um estado, região ou país deverá ter seus ajustes específicos em função de legislação vigente, instituições, etc.

O tratamento de problemas eminentemente complexos em recursos hídricos requer diferentes níveis de detalhamento e decisão e a consideração e avaliação de múltiplos usos, o que leva à articulação de compromissos entre objetivos conflitantes. A natureza regional e eventualmente internacional do planejamento de recursos hídricos impõe o envolvimento de especialistas e tomadores de decisão com formação variada e muitas vezes não versada em água tais como: advogados, políticos e cientistas sociais. Os objetivos de tão variado grupo em geral, diferem consideravelmente.

Tal fato sugere que em planejamento de recursos hídricos a coordenação multidisciplinar é fundamental para que os reais objetivos do planejamento sejam alcançados. Complicações adicionais dizem respeito às incertezas tanto na oferta como na demanda de água e à irreversibilidade das decisões tomadas em termos de medidas estruturais. Estas dificuldades enumeradas anteriormente sugerem a importância da aplicação da análise de sistemas ao planejamento e gestão de recursos hídricos.

A Análise de sistemas de recursos hídricos é um enfoque sistêmico através do qual os componentes do sistema de recursos hídricos e suas interações são descritas em termos quantitativos

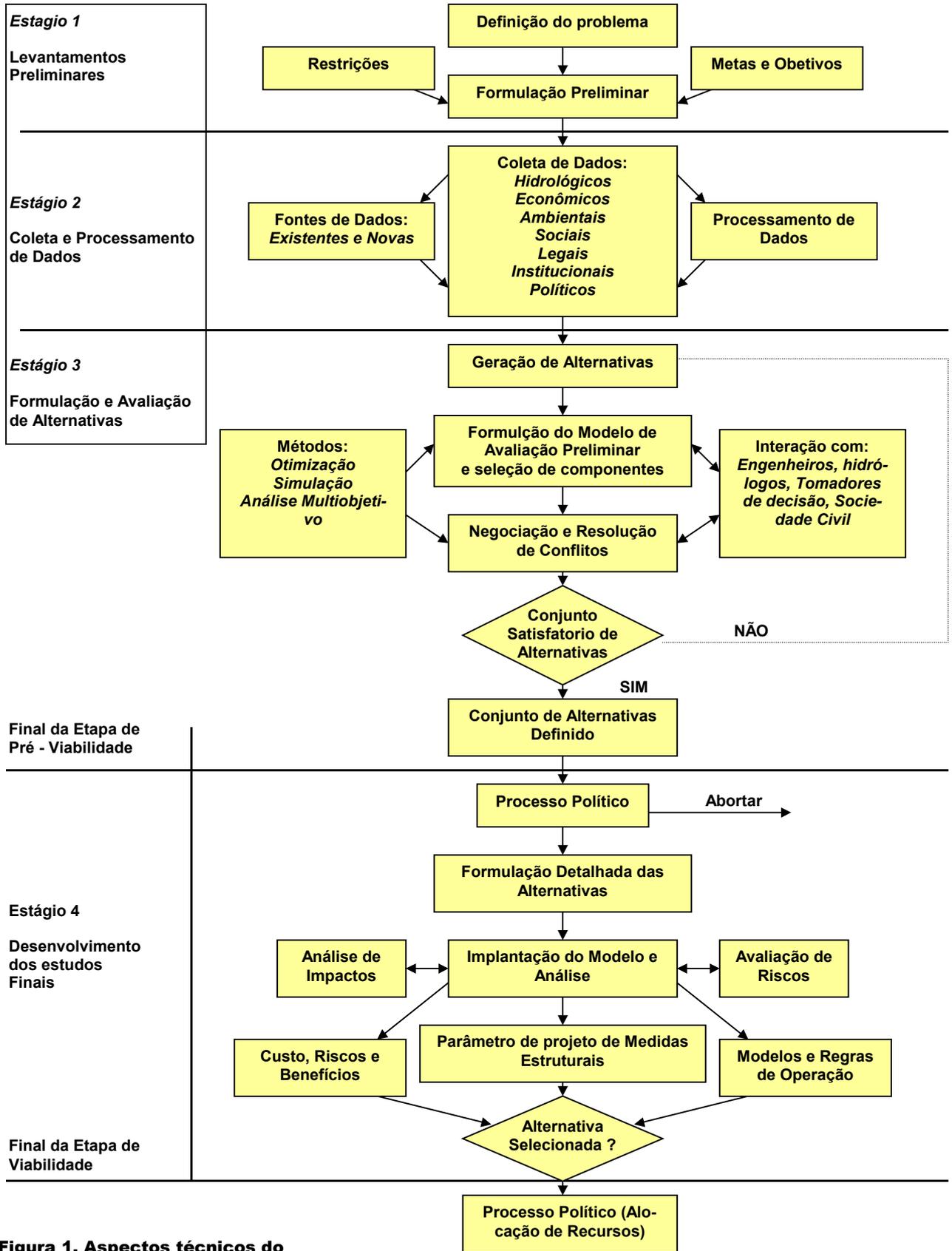


Figura 1. Aspectos técnicos do planejamento integrado de recursos hídricos.

por meio de equações matemáticas e funções lógicas. Em geral, procura-se a combinação elementos do sistema que produza o melhor resultado, ou o ótimo, da função objetivo. Isto não significa que o problema se reduz em determinar o mínimo ou o máximo de uma equação (função objetivo). Além de determinar a melhor solução, dentro de critérios estabelecidos, este enfoque permite que se estruture o problema, indicando como os diversos componentes interagem através de diagramas de bloco. A estruturação do problema é tão ou mais importante que sua solução, uma vez que é nesta fase que os aspectos importantes são definidos para participar dos diferentes modelos componentes do sistema. Nesta fase utiliza-se mais a *arte* do que a *ciência*.

Modelos típicos incluem os chamados *modelos de processos*, ou seja, modelos matemáticos que descrevem os processos físicos simbolizados pelos elementos do sistema; *modelos de entrada e saída* para quantidade e qualidade da água superficial e subterrânea e para sistemas de distribuição. Os modelos de processo podem ser considerados como representações estáticas, tipo curva-chave, ou dinâmicas como no caso das vazões em rios em canais em regime transitório. Estes modelos em sua forma costumeira de utilização são *determinísticos*. Dentro do enfoque sistêmico, entretanto, é necessário considerar-se a incerteza associada aos processos através de *modelos estocásticos* onde as variáveis de interesse não assumem um valor determinado, mas estão associadas a uma distribuição de probabilidade de ocorrência.

Os modelos anteriormente descritos são os usualmente utilizados em projetos de engenharia hidrológica/hidráulica/ambiental. Na análise de sistemas de recursos hídricos outros modelos ligados a *análise de decisão* são frequentemente utilizados. Basicamente têm-se duas classes de modelos: *otimização e simulação*. No primeiro o objetivo do projeto é representado analiticamente através de uma função objetivo (geralmente econômica) que será maximizada ou minimizada dependendo do caso. No segundo, não existe a preocupação de determinar o conjunto de elementos ou regra operativa ótima e sim analisar cenários alternativos e medir o comportamento do sistema. A otimização nada mais é do que um procedimento eficiente de utilizações sucessivas da simulação para determinar a melhor alternativa.

Modelos de otimização e simulação têm sido aplicados a estudos de planejamento de recursos hídricos desde a década de 60. Entretanto, as dificuldades ligadas ao tamanho dos programas na solução de problemas complexos, à falta de comunicação entre tomadores de decisão e

analistas, à consideração de múltiplos objetivos, a inclusão de aspectos não quantitativos no processo de decisão, entre outros, fizeram com que a utilização destas técnicas ficasse prejudicada em aplicações práticas de engenharia. Graças ao desenvolvimento expressivo do micro computador na última década, notadamente com relação a linguagens de programação de alto nível, foi possível a introdução destas técnicas em ambiente computacional amigável. Este fato quebrou a grande barreira da interação Homem-máquina que existia antes destas facilidades. Surge desta forma o conceito de *modelos de visão compartilhada* que permitem a participação do tomador de decisão na formulação do modelo de simulação do sistema. Surgem também os *sistemas de suporte a decisão* que possibilitam visualização adequada das consequências das alternativas, interação do decisor, consideração de múltiplos objetivos, utilização simultânea de otimização e simulação.

## MODELOS COM OBJETIVO ÚNICO

Diversos modelos têm sido desenvolvidos e aprimorados nos últimos vinte anos para solucionar o problema do planejamento e gerenciamento de recursos hídricos. Yeh (1985) fornece uma extensa revisão dos modelos de operação e dimensionamento de reservatórios, onde os métodos disponíveis são classificados em: modelos de otimização (programação linear, programação não-linear e programação dinâmica) e simulação.

### Modelos de otimização

Os modelos de otimização são algoritmos matemáticos que procuram identificar os pontos máximos ou mínimos da chamada função objetivo, que representa por meio de expressão matemática os objetivos estabelecidos na operação. O maior desafio para os analistas de sistemas é a definição dessa função objetivo e sua quantificação, principalmente quando o objetivo não é puramente econômico. Para representar um sistema de reservatórios com modelos de otimização e tornar solúvel o problema de operação, é necessário adotar certas hipóteses e simplificações. Dentre elas, destaca-se a linearização de todas ou parte das equações de restrição e da função objetivo, para que haja convergência e solução dessas equações. Devido a esta simplificação, os modelos otimizantes geralmente fornecem resultados sem grandes refinamentos. Os principais métodos aplicados nos modelos de otimização são as

programações linear e dinâmica. A programação linear se aplica quando todas as funções (objetivo e restrições) são lineares e a programação dinâmica se aplica quando a função objetivo, linear ou não, apresenta a propriedade markoviana.

### **Programação Linear (PL)**

A programação linear (PL) tem sido uma das técnicas mais aplicadas no gerenciamento de recursos hídricos, apesar de ser limitada para resolver um tipo especial de problemas: todas as relações entre as variáveis são lineares, tanto na função objetivo como nas funções de restrição.

O método mais utilizado para a solução dos modelos de programação linear é o método simplex e suas variações. Na maioria das vezes, a PL aplicada a recursos hídricos apresenta o número de restrições bem maior que o número de variáveis de restrição. Pode-se dizer, a grosso modo, que o tempo de execução num computador varia com o cubo do número de restrições e linearmente com o número de variáveis. Portanto, é mais vantajoso resolver o problema na sua forma dual. A forma dual é uma representação diferenciada de um mesmo problema de PL (primal), sendo o mesmo para ambos o valor ótimo da função objetivo.

A aplicação da programação linear, em estudo de recursos hídricos, varia desde problemas relativamente simples de alocação direta de recursos até situações complexas de gerenciamento e operação de reservatórios. Sob certas hipóteses, problemas não-lineares podem ser linearizados e resolvidos por iteração ou procedimentos de aproximação.

A PL pode apresentar algumas variantes: com a incorporação de aleatoriedade nas vazões afluentes originou-se a chamada PL estocástica. Esta técnica foi aplicada por Manne (1962) e Loucks (1968), que propuseram o uso conjunto de PL com a cadeia de Markov. Para a PL sujeita a incerteza, a técnica mais utilizada é o método das restrições probabilísticas, no qual são permitidas as violações das restrições do modelo com certa probabilidade ou risco de falha. Esta técnica, associada à regra de decisão linear, foi inicialmente analisada por Revelle et al. (1969) e posteriormente, aperfeiçoada por Revelle e Kirby (1970). A extensão da técnica para sistemas de reservatórios múltiplos foi feita inicialmente por Hermann (1970). Nayak et al. (1971) aplicaram o método, no qual a função objetivo era minimizar o custo total do sistema. Hermann (1971) utilizou o método no dimensionamento e operação de sistema de vários

reservatórios, num estudo comparativo com outras técnicas. Uma apresentação bastante didática da PL, com restrições probabilísticas, pode ser vista no trabalho de Strobel (1979).

### **Programação Dinâmica (PD)**

A programação dinâmica (PD) é altamente útil em análise que considera uma seqüência de acontecimentos (escala horizontal) e uma série ou faixa de alternativas (escala vertical) correspondendo a cada etapa da seqüência. No gerenciamento de recursos hídricos, a seqüência pode ser um grupo de reservatórios e as alternativas os volumes úteis nos reservatórios, ou a seqüência pode ser um período de intervalos de tempo e as alternativas vazões efluentes de um reservatório.

O princípio básico da técnica de PD foi proposto por Bellman (1957), daí ser conhecido por princípio de otimalidade de Bellman. Segundo este princípio, uma política ótima tem a propriedade de que, sejam quais forem o estado inicial e as decisões iniciais, as decisões restantes devem constituir uma política ótima com relação ao estado que resulta da primeira decisão. Em palavras mais simples, na PD cada etapa da seqüência deve considerar somente os resultados das alternativas da etapa anterior. Desta forma, a melhor solução é encontrada em cada alternativa da etapa considerada e ao chegar ao final da seqüência, são conhecidos tanto a melhor alternativa como o caminho seguido.

O sucesso desta técnica pode ser atribuído ao fato de que as naturezas estocásticas e não-lineares, que caracterizam um grande número de sistema de recursos hídricos, podem ser traduzidas na formulação da programação dinâmica. Além disso, tem a vantagem de poder decompor problemas altamente complexos, com grande número de variáveis, em série de sub-problemas que serão resolvidos recursivamente.

Ao contrário da programação linear, na programação dinâmica não existe uma formulação matemática padrão; para resolução de problemas, é necessário desenvolver as equações que se ajustem a cada situação específica. É comum encontrar problemas que podem ser formulados de mais de uma maneira; parte da habilidade, na PD, depende de escolher a formulação mais eficiente para o problema em questão. É também o caso de se decidir pela formulação regressiva ou progressiva. O procedimento regressivo é conveniente para solucionar os problemas que envolvem o tempo, pois fornece a política ótima em ordem cronológica;

é também essencial em problemas estocásticos. O procedimento de solução progressiva é vantajoso quando um problema determinístico tem que ser resolvido várias vezes para diferentes horizontes de planejamento.

As restrições no estado ou espaço de decisões beneficiam a PD (discreta), pois reduzem a carga computacional. Entretanto, quando a PD é aplicada a sistema de reservatórios múltiplos, sua utilidade é limitada pela chamada "praga da dimensionalidade", que é a necessidade de capacidade de memórias de computador. Para a eficiência computacional, os problemas não devem apresentar mais do que quatro variáveis de estado. Todos os métodos de redução da dimensionalidade envolvem a decomposição em sub-bacias e o uso de procedimentos iterativos.

A PD foi utilizada na operação de reservatórios por diversos autores: Little (1955), Young (1967), Hall et al. (1969), Schweig e Cole (1968), Fitch et al. (1970), Russel (1972), Liu e Tedrow (1973), Araújo e Terry (1974). Para contornar o problema da dimensionalidade, têm surgido diversas variantes da PD: Programação Dinâmica Incremental (PDI), Programação Dinâmica Incremental com Aproximações Sucessivas (PDIAS) e Programação Dinâmica Diferencial Discreta (PDDD).

Larson (1968) introduziu a técnica da PDI, a qual utiliza o conceito de incremento para as variáveis de estado. O uso da PDI, para estudos de operação de reservatórios, foi apresentado por Hall et al. (1969), Trott e Yeh (1971) e Fults e Hancock (1972). Heidari et al. (1971) aplicaram o método PDDD, que é uma versão da PDI, para um sistema de 4 reservatórios e 4 variáveis de estado. Nopmongkol e Askew (1976) analisaram os métodos e concluíram que PDDD é uma generalização de PDI.

A PDIAS decompõe um problema original de PD, com as variáveis de estado múltiplas, em uma série de sub-problemas de uma variável de estado. As seqüências de otimizações sobre os sub-problemas convergem para a solução do problema original. Esta técnica foi aplicada para sistemas de reservatórios múltiplos por Larson (1968) e Trott e Yeh (1971). No caso em que se associa a probabilidade nas vazões afluentes, tem-se a chamada Programação Dinâmica Estocástica, onde o problema pode ser formulado como Programação Dinâmica Estocástica Explícita (PDEE) ou Programação Dinâmica Estocástica Implícita (PDEI).

A PDEE utiliza diretamente a distribuição de probabilidade de vazões afluentes em cada intervalo de tempo (mês, dia) considerado na ope-

ração. Os benefícios são calculados em função da probabilidade dos afluxos. A decisão ótima de operação é obtida pela aplicação da técnica de otimização determinística às distribuições de probabilidades condicionais.

A PDEI utiliza série de vazões afluentes sintéticas e faz uma otimização determinística para cada seqüência da série. Os resultados dos cálculos da série de seqüências são analisados através de regressão múltipla para definir as regras operacionais ótimas. Um exemplo da aplicação deste método é a programação dinâmica Monte Carlo. Como aplicação da PDEE, pode-se citar os trabalhos de Loucks e Falkson (1970), Croley (1974) e Askew (1975); este último utilizou a PDEE com restrições probabilísticas. Braga (1989) propôs um método de decomposição com múltiplos objetivos, que na sua fase operacional utiliza a PDEE para determinação da política ótima. Um recente trabalho sobre a aplicação da PDEI pode ser visto em Barros (1989) e Barros e Braga (1991), onde o método é utilizado para operar os reservatórios do subsistema CESP, na bacia do Rio Paranapanema.

Diversos autores utilizaram a PD associada com a técnica da PL para operação de sistemas de reservatórios múltiplos. Dentre outros, pode-se destacar os trabalhos de: Jamieson e Wilkinson (1972); Trott e Yeh (1973); Dudley e Burt (1973) e TVA (1980). Takeuchi e Moreau (1974) utilizaram a combinação de PL com PDEE. Becker e Yeh (1974) sugeriram uma solução combinada de PL com PD para a determinação da política ótima em tempo real do subsistema "Central Valley Project", na Califórnia. Barbosa (1986) fez a adaptação do mesmo modelo para a operação de reservatórios do sistema CESP. Mariño e Mohammadi (1984) e Mohammadi e Mariño (1984) estenderam o modelo de Becker e Yeh (1974), que maximiza a geração de energia, considerando também a maximização no abastecimento.

## Simulação

Os modelos de simulação são um conjunto de expressões matemáticas estruturadas em seqüência lógica, que descrevem a operação do sistema no espaço e no tempo. Seu objetivo é representar e operar o sistema de forma mais detalhada possível e fornecer informações para avaliar o comportamento do sistema real. A simulação da operação de reservatórios consiste, simplesmente, em fazer a cada intervalo o balanço de massa dos reservatórios; para tanto, são especificadas as afluições nos locais de interesse, as características físicas do sistema e as regras de operação.

A vantagem das técnicas de simulação está no fato de ser aplicável a sistemas complexos e aceitar quaisquer equações de restrição. Ao contrário dos modelos otimizantes, os modelos de simulação não determinam a política ótima de operação. A solução ótima é encontrada iterativamente, processando-se diversas simulações alternativas e comparando seus desempenhos. Sua obtenção depende, geralmente, da experiência e sensibilidade do usuário/operador. Em geral, todos os modelos de simulação para operação de sistemas de reservatórios múltiplos, com finalidades múltiplas, baseiam-se em algumas regras de operação. Essas regras definem o volume de água a ser descarregado em um período, em função das vazões afluentes e do nível do reservatório. Tais regras incluem quatro elementos básicos (Loucks e Sigvaldason, 1982): 1) Níveis ou volumes-meta, 2) Zoneamento múltiplo, 3) Banda de defluência e 4) Curvas-guia condicionais

Um dos mais tradicionais modelos de simulação para sistemas de recursos hídricos é o HEC-5, que foi desenvolvido para fornecer subsídios no dimensionamento e operação de sistema de reservatórios. Um outro modelo de simulação conhecido é o SIMYLD-II (Texas Water Development Board, 1970), semelhante ao HEC-5, porém com a utilização de algoritmo otimizante, o qual minimiza os desvios em relação a uma meta pré-estabelecida. Existe ainda disponível o modelo ACRES (Sigvaldason, 1976) que é uma extensão dos métodos utilizados no HEC-5 e SIMYLD-II. O modelo ACRES foi transformado em um sistema computacional sofisticado chamado ARSP - Acres Reservoir Simulation Program que inclui a análise estocástica de vazões.

Como exemplo da técnica de simulação, existem ainda diversos modelos desenvolvidos para finalidades específicas. Dentre eles, podem-se citar alguns trabalhos: Silva e Hernandez (1979) sugeriram um modelo de simulação específico associando uma rotina de previsão de vazões afluentes, para um sistema de reservatórios com finalidades de regularização e controle de cheias; Verhaeghe et al. (1989) propuseram um modelo de simulação associado à técnica de otimização, para a operação de reservatórios da bacia do Rio Tana, em Kenya.

## MODELOS COM MÚLTIPLOS OBJETIVOS

A abordagem tradicional de seleção de alternativas de projeto baseada na análise técnico-

econômica, especialmente através da Análise Benefício-Custo, tem cedido lugar a uma abordagem mais abrangente que considera múltiplos objetivos. Embora mais complexa, trata-se de uma tendência internacional irreversível, representando um marco de evolução das sociedades, especialmente impulsionada pela conscientização quanto aos problemas ambientais e sociais.

Com grande suporte em modelagem matemática, a abordagem multiobjetivo justifica-se por:

1. permitir organizar melhor as informações e o papel de cada participante nas etapas decisórias;
2. permitir evidenciar os conflitos entre objetivos e quantificar o grau de compromisso existente entre eles;
3. possibilitar o tratamento de cada objetivo na unidade de mensuração mais adequada, sem a distorção introduzida pela simples conversão em unidades monetárias como feito na Análise Benefício-Custo.

Sendo uma área de pesquisa relativamente nova (25 anos) no campo da Pesquisa Operacional, reconhecem-se grandes avanços conseguidos graças às maiores disponibilidades de recursos de informática, bem como ao interesse de usuários que vislumbram perspectivas de aplicação e suporte à decisão em bases mais realísticas.

## Conceitos básicos e terminologia

Um primeiro cuidado a ser observado na leitura de textos sobre as técnicas multiobjetiva refere-se à uma confusão corriqueira no âmbito do planejamento e gestão de recursos hídricos quanto ao emprego dos termos *objetivos* e *propósitos* (Braga, 1987). Um empreendimento hídrico, por exemplo, um reservatório, é de múltiplos usos quando atende a usuários de diferentes setores, tais como: produção de energia elétrica, irrigação, abastecimento de água, controle de cheias, etc. Por outro lado, o empreendimento é de múltiplos objetivos quando atende a diversos objetivos, tais como: eficiência econômica, redistribuição de renda, qualidade ambiental, etc.

Assim, segundo uma definição conceitual precisa, objetivo representa um *ideal* da sociedade sobre o qual existe grande consenso num certo momento histórico. São exemplos: a segurança nacional, o bem-estar social, a eficiência econômica e a distribuição de renda, entre outros. Os *critérios* ou *atributos* constituem a tradução dos

objetivos em características, qualidades ou medidas de performance diante das alternativas de planejamento. São exemplos: a maximização dos benefícios líquidos, a minimização do impacto ambiental, a minimização de riscos, entre outros.

Neste contexto, um empreendimento hídrico, por exemplo, um reservatório construído e operado para usos múltiplos, pode ter um único objetivo -- o aumento do PNB, medido através do critério "valor atual dos benefícios líquidos". Já um reservatório construído e operado para uso único -- por exemplo, irrigação -- pode atender a múltiplos objetivos: aumento do PNB e redistribuição de renda entre regiões.

Para inclusão nos modelos, usualmente são representados os critérios pertinentes ao plano em estudo. Mesmo assim, os modelos são designados *multiobjetivos*, ou *multicriteriais*, ou ainda *multiatributos*.

Um segundo elemento importante na área de técnicas multiobjetivo refere-se ao conceito de *não-dominância* ou *não-inferioridade*. Ele é equivalente ao conceito de *ótimo* nos problemas de otimização com objetivo único. Quem primeiro enunciou tal conceito foi o economista Pareto, em 1896, na forma de seu Princípio da Otimalidade, segundo o qual:

*"Indivíduos têm a máxima satisfação numa certa situação quando é impossível sair desta posição sem que alguns tenham a satisfação diminuída e outros a tenham aumentada."*

A Figura 2 ilustra uma situação onde trata-se de um problema multiobjetivo com duas funções objetivos a serem maximizadas:  $\text{Max } F_1(x), F_2(x)$ . A curva definida pelos segmentos de reta desde o ponto A até D define o conjunto de soluções não-dominadas para este problema. Ela corresponde ao limite máximo de utilização dos recursos disponíveis (capital, físicos, institucionais, legais, etc.) traduzidos na forma das respectivas funções objetivos. Com base no Princípio de Otimalidade de Pareto, pode-se perceber na Figura 2 que, do ponto A para B, a função  $F_1(x)$  aumenta e, em contrapartida  $F_2(x)$  diminui. Assim, o ponto A caracteriza uma solução *nao-dominada*, ou *não-inferior*, ou ainda *eficiente*. Já o ponto E representa uma solução dominada, pois é possível aumentar  $F_2(x)$  sem diminuir  $F_1(x)$ .

Ainda com base na Figura 2, define-se *solução de melhor compromisso* como sendo aquela que, dentre as soluções não-dominadas, melhor atende às expectativas do decisor.

## Metodologia multiobjetivo

Existem pelo menos 50 diferentes técnicas multiobjetivo. O emprego de cada uma delas dependerá de uma série de fatores, tais como: disponibilidade de informações, natureza do problema (ex. discreto ou contínuo), cenário decisório, condicionantes institucionais, etc.

É usual fazer uma distinção entre dois agentes do processo decisório: *analistas* e *decisores*. Com base nesta distinção, um problema de decisão fica estruturado da seguinte forma:

Max  $F(y)$   $Y$ : conjunto de alternativas  
 sujeito a:  $y \in Y$   $y$ : uma alternativa em particular  
 $F$ : função que traduz as preferências

Nesta representação, o analista cuida da investigação de  $Y$ , enquanto que o decisor trata de produzir manifestação sobre  $F$ . É claro que, nem sempre as manifestações do decisor são feitas de maneira analítica através de uma função  $F$ . De qualquer forma, tal função aqui representa a manifestação da preferência do decisor.

A classificação dos métodos é formulada segundo a posição relativa dos papéis do *decisor* e do *analista* no processo decisório, distinguindo-se três grande grupos:

### GRUPO I: TÉCNICAS DE GERAÇÃO DAS SOLUÇÕES NÃO-DOMINADAS

As alternativas são geradas pelo *analista* sem incluir as preferências do decisor. Exs:

MÉTODO DAS PONDERAÇÕES (Zadeh, 1963)

MÉTODO DAS RESTRIÇÕES (Zadeh, 1963)

MÉTODO MULTIOBJETIVO LINEAR (Philip, 1972)

### GRUPO II: TÉCNICAS COM ARTICULAÇÃO DE PREFERÊNCIAS A PRIORI

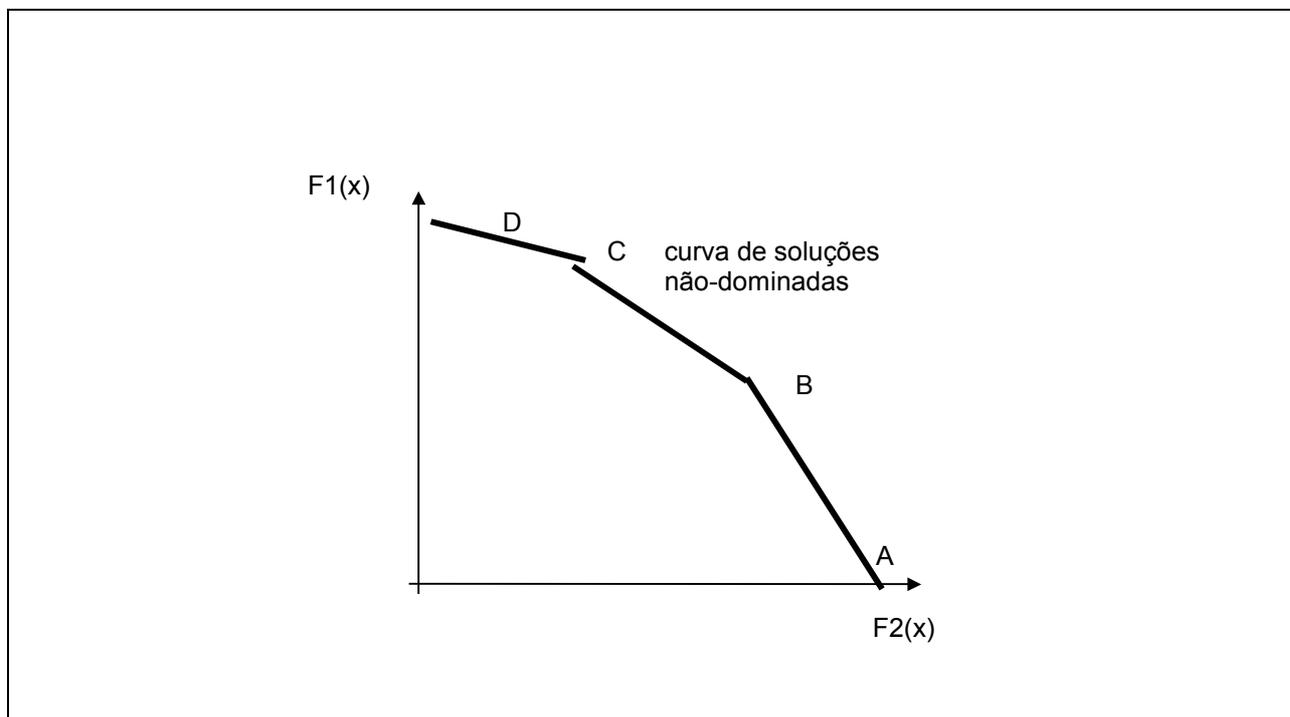
O *decisor* manifesta antecipadamente seu juízo de valor sobre as trocas possíveis entre os objetivos e s/ pesos relativos entre eles. Exs.

MÉTODO DA FUNÇÃO UTILIDADE MULTIDIMENSIONAL

MÉTODO DA PROGRAMAÇÃO POR METAS

MÉTODO ELECTRE

MÉTODO DA MATRIZ DE PRIORIDADES



**Figura 2. Conceito de Não-Dominância.**

### GRUPO III: MÉTODOS COM ARTICULAÇÃO PROGRESSIVA DAS PREFERÊNCIAS

A interação *analista-decisor* ocorre ao longo de todo o processo decisório. Exs:

MÉTODO DA PROGRAMAÇÃO DE COMPROMISSO

MÉTODO DOS PASSOS

Diversos estudos comparativos têm sido feitos para avaliação dos métodos multiobjetivos. Uma discussão pormenorizada das vantagens e desvantagens de cada técnica pode ser encontrada em Teclé (1992). Apesar das diferenças conceituais e metodológicas, percebe-se que em muitos casos, a hierarquia obtida para alternativas de planejamento é coincidente para diversos modelos multiobjetivos.

### SISTEMAS DE SUPORTE A DECISÃO (SSD)

#### O processo da tomada de decisões

A tomada de decisão é um tipo particular de processamento de informações que resulta na

escolha de um plano ou ação. O sistema de processamento de informações pode ser humano (individual ou grupo), máquina ou sistema contendo a participação de ambos, o homem e a máquina.

Simon (1960) descreve a tomada de decisão como um processo envolvendo três estágios: inteligência, elaboração e escolha. A inteligência refere-se à procura de situações que precisem de decisões. São obtidos dados brutos que são processados e examinados em busca de pistas para a identificação de problemas. A elaboração é a organização, desenvolvimento e análise dos possíveis rumos de ação. Isto envolve processos para a compreensão do problema, geração de soluções e realização de testes quanto à sua aplicabilidade. Finalmente, a escolha é a seleção de um rumo de ação específico dentre os disponíveis. A escolha é feita e em seguida implementada.

Estas etapas do processo decisório são úteis para entender a distinção entre problemas bem estruturados e mal estruturados. Se um problema encontrado na tomada de decisão não pode ser totalmente esclarecido e se a exploração de potenciais soluções não pode ser completada antes que a escolha deva ser feita, então o problema é dito mal estruturado. Caso contrário, o problema é dito bem estruturado e pode, em princípio, ser programado.

A probabilidade de acerto, na tomada de decisões, será tanto maior quanto melhor à forma-

ção do *tomador de decisão*, dos seus assessores e a qualidade das informações de que disponham.

Quando se trata de um caso pouco complexo, as informações essenciais são em pequena quantidade e não necessitam de análises que exijam alta tecnologia e a decisão pode ser tomada apenas pelo decisor, baseada em sua atitude própria. À medida que os sistemas crescem em complexidade, a quantidade de informações será tanta que os trabalhos de análise e tomadas de decisões não poderão mais ser enfrentados, baseados somente na experiência e julgamento das equipes encarregadas. Tornam-se necessários sistemas sofisticados de armazenamento de dados e técnicas de análise desses dados.

Para processar as informações e apresentar conclusões mais sintéticas e objetivas é necessário um trabalho feito por especialistas em cada campo. Desta maneira, por mais que a tomada de decisão seja um ato individual, o decisor necessita da assessoria de técnicos especializados.

Muitas vezes poderá ser interessante ou mesmo necessária a utilização de modelos matemáticos para a tomada de decisão. Os modelos nos permitem simular um cenário, ou seja, o decisor pode ter uma visão do que poderia ocorrer se uma determinada atitude fosse tomada.

O advento de microcomputadores pessoais e parafernália decorrentes (sistema de banco de dados, planilhas eletrônicas, etc.) têm tornado cada vez mais viável o uso da técnica de simulação e informatização do processo da tomada de decisões.

Entretanto, por mais que necessite da técnica avançada de análise de dados no processo da tomada de decisão, não se pode esquecer a necessidade de interferência do homem em qualquer fase do processo. Neste sentido, os sistemas de apoio à decisão são bastante apropriados, pois não tornam a atividade decisória completamente automatizada e admitem a incorporação de julgamento do operador no processo de análise, dando oportunidade ao sinergismo homem/máquina.

## **Conceitos gerais sobre sistema de apoio à decisão**

Atualmente, os avanços na tecnologia de computação, aliados ao aumento de complexidade nos problemas de gerenciamento de recursos hídricos, têm estimulado a prática maior de modelos matemáticos como ferramentas para auxiliar as tomadas de decisões. Ao mesmo tempo que os modelos estavam sendo utilizados, eles alcança-

ram também um nível de complexidade que requer a assessoria contínua dos especialistas em modelagem para manter e interpretar os seus resultados. Embora estes modelos sejam desenvolvidos para auxiliar o processo da tomada de decisão, a quantidade de informações que eles exigem para implementação e o abundante resultado que eles são capazes de produzir parecem, às vezes, restringir sua aceitação por aqueles que são responsáveis pela decisão. Aparentemente, o que é necessário é uma reunião integrada de modelos, dados, rotinas de interpretação e outra informação relevante, que processa eficientemente dados de entrada, roda os modelos e expõe os resultados em formato fácil de ser interpretado. Tal conjunto pode ser chamado de sistemas de apoio à decisão (SSD). O conceito de um SSD difere dos simples modelos de simulação, pois um SSD procura estabelecer um alto grau de interação entre o homem e o computador, permitindo ao usuário (decisor) manter controle direto sobre as atividades computacionais e seus resultados.

Quem são tomadores de decisão e do que eles precisam? No presente contexto, um tomador de decisão pode funcionar em diversos níveis com respeito a um SSD. Tradicionalmente, tem sido a função dos analistas e programadores interpretar os resultados produzidos por modelos e traduzi-los em forma fácil de ser entendida (gráficos, tabelas) pelos responsáveis pela decisão. Esta dependência de analistas e programadores tinha deixado os tomadores de decisões relutantes na plena aceitação das tecnologias baseadas em computação, temendo que a decisão fosse tomada mais por aqueles profissionais do que propriamente por eles. Entretanto, nos dias atuais, com a disponibilidade de computadores pessoais na maior parte dos escritórios, o cenário é bastante diferente. Os tomadores de decisão, de qualquer nível, preferem fazer individualmente interpretações dos resultados de modelos, ou até estabelecer um modelo para um problema de sua própria concepção. O conceito de SSD surgiu justamente como resultado dessa facilidade computacional e da necessidade de informatização no processamento de informações para tomada de decisões.

Uma das críticas frequentes que os sistemas de apoio à decisão têm recebido é quanto à falta de teoria. De fato, não há, no sentido estritamente acadêmico do termo, teoria na concepção de um SSD. Entretanto, existem estruturas conceituais ou modelos mentais que os profissionais da área usam para organizar seus pensamentos e orientar suas ações. Um dos principais conceitos desta estrutura é que a tecnologia para SSD consiste num conjunto de recursos nas áreas de

diálogo, dados e construção de modelos, o que Sprague e Carlson (1982) chamam de paradigma DDM (Diálogo, Dados, Modelos). Os autores argumentam que num sistema de apoio à decisão típico tem que haver um equilíbrio entre esses três elementos. Uma outra característica, que o sistema deve ter, é a facilidade no seu uso, a fim de proporcionar interação com usuário não-técnico, que tem pouca experiência computacional.

A descrição detalhada do paradigma DDM será feita no próximo item.

### **Estruturas padrão de um sistema de apoio à decisão**

Em geral, um sistema de apoio à decisão é constituído de três componentes: diálogo, dados e modelos. O diálogo é a interface entre o usuário e o sistema, os dados servem de suporte ao sistema e os modelos proporcionam os recursos para análises. A Figura 3, mostra uma representação das partes componentes de um SSD.

### **O componente diálogo ou interface usuário/sistema**

A interface usuário/sistema deve ser suficientemente conversacional, de forma a não apresentar barreiras ao uso interativo. Esta é uma característica especialmente importante, pois o uso de SSD é geralmente opcional, isto é, é prescindível na realização de um trabalho, ao contrário de muitas outras aplicações tradicionais para computadores. Se o decisor sentir grande dificuldade na sua utilização, simplesmente vai deixar de utilizá-lo. Além disso, o usuário em geral tem pouca experiência computacional e não está interessado em conhecer com profundidade os softwares utilizados e os algoritmos empregados pelos modelos. O que na realidade importa é saber como utilizar o sistema, direcionar as ações e apresentar as respostas do sistema. Bennett (1977) refere-se a esses componentes do diálogo, respectivamente, como o banco de conhecimento, a linguagem de ação e a linguagem de apresentação (Figura 4).

O *banco de conhecimentos* - consiste em sabedoria que o usuário precisa para utilizar um SSD de forma eficaz. O conhecimento pode estar na própria experiência do usuário, num manual do usuário ou numa série de comandos de socorro disponíveis. O SSD pode ainda possuir recursos que facilitem seu uso, como manuais de instruções

que podem ser oferecidos "on-line", onde o usuário pode receber auxílio a qualquer instante do processamento.

A *linguagem de ação* são os estilos e os meios através dos quais o usuário pode se comunicar com o sistema. Como estilo que o usuário pode adotar para controlar um SSD, pode-se destacar a pergunta-resposta, os *menus*, as linguagens de comandos e "preencha as lacunas". Cada estilo apresenta seus prós e contras, dependendo do tipo de usuário, da atividade realizada ou da situação decisória. A comunicação com o sistema é geralmente feita por meio de teclado, entretanto para tornar um SSD mais versátil, pode-se implementar um *mouse* para movimentar o cursor dentro do *menu*. Estão também disponíveis os visores que respondem ao toque, dispensando o uso do teclado.

A *linguagem de apresentação* é a maneira como o usuário vê as saídas produzidas por um SSD. Os relatórios impressos e as saídas na tela (gráficos e tabelas) são os mais usuais. As saídas gráficas são particularmente importantes em um SSD, visto que elas permitem ao responsável pela decisão uma apreciação mais rápida dos resultados do que saídas numéricas. A apresentação dos resultados na tela tem sido beneficiada graças aos excelentes recursos gráficos em cores e de alta resolução.

### **O componente dados**

O componente *dados* é constituído de dois elementos: base de dados e gerenciador de informações. As funções do gerenciador são: receber, identificar e armazenar série de informações numa base de dados bem estruturada, a partir da qual estas podem ser facilmente recuperadas para o uso. A base de dados serve para fornecer informações em resposta à consulta do usuário, suprir dados ao processamento de modelos, bem como para armazenar os resultados intermediários e finais das análises efetuadas. A principal diferença existente entre as bases de dados dos sistemas tradicionais e os aplicáveis a um sistema de apoio à decisão é quanto à acessibilidade a seus conteúdos. As bases destinadas a SSD deve apresentar alta flexibilidade de tal forma que permita ao usuário acrescentar, excluir ou alterar dados, rápida e facilmente. Para tanto, os dados devem ser arranjados em estruturas lógicas de modo que o usuário compreenda o que está disponível e que possa fazer modificações necessárias.



## O componente *modelo*

Os modelos fornecem os recursos para análise num SSD. Os modelos utilizam representação matemática do problema e empregam processos algorítmicos para a geração de informações que servem de suporte às decisões.

Uma distinção deve ser feita entre os modelos que podem ser executados interativamente e aqueles podem ser executados "off-line" e os resultados trazidos através da interface do usuário para interpretação. No primeiro caso, os modelos precisam produzir resultados em tempo de decisão, isto é, em um intervalo suficientemente pequeno de tal modo que não impeça o processo de decisão. No caso posterior, que provavelmente se aplica para a maior parte dos modelos de gerenciamento de recursos hídricos, os arquivos de saída serão armazenados na base de dados para ser examinados e interpretados posteriormente.

## Sistemas especialistas

Os sistemas especialistas são definidos como programas computacionais inteligentes que têm a mesma função e desempenho de um especialista humano na resolução de um determinado problema.

No caso de sistema de apoio à decisão com sistemas especialistas, o próprio programa consulta o banco de dados (ou base de conhecimentos), interage com as informações contidas nele (fornecidas por especialistas) e sugere as soluções mais adequadas para a tomada de decisão.

O desenvolvimento de sistemas especialistas é cada vez mais justificado, já que tal sistema pode ser utilizado para preservar e disseminar o conhecimento e a experiência de um especialista, tornando-os disponíveis como um recurso para profissionais menos experientes.

A principal diferença existente entre os programas tradicionais e os sistemas especialistas é quanto à sua estrutura, ou seja, os primeiros empregam processos algorítmicos, onde os comandos são executados seqüencialmente, passo-a-passo, enquanto os últimos baseiam-se em inferências lógicas, que utilizam de estratégias mais flexíveis e não necessitam de procedimentos seqüenciais. Desta forma, para o desenvolvimento de sistemas especialistas é interessante a utilização de linguagens computacionais especiais como LISP e PROLOG, que são altamente declarativas e apropriadas para programação em lógica.

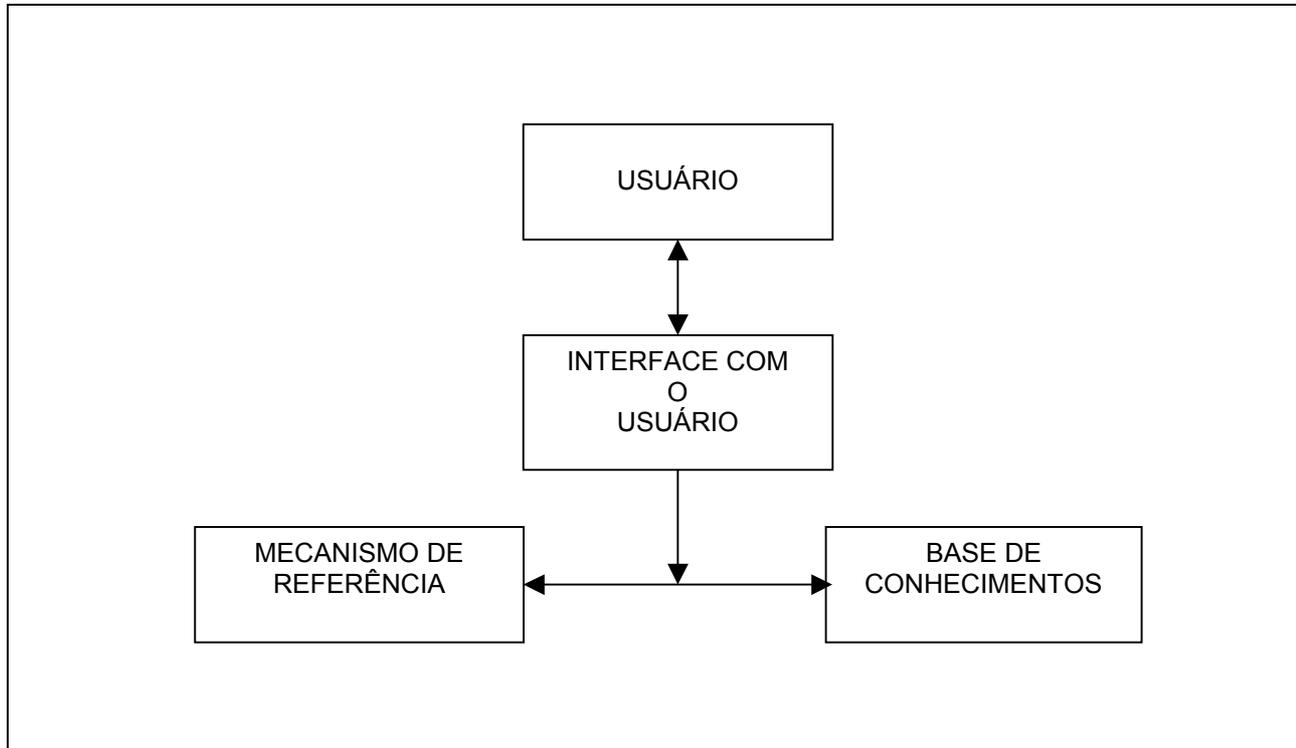
A representação esquemática de um sistema especialista é mostrada na Figura 5. Conforme pode se observar nesta figura, além da interface com o usuário, que permite ao sistema comunicar-se com o usuário, um sistema especialista típico possui também uma base de conhecimentos e um mecanismo de inferência.

A base de conhecimentos contém o conhecimento e as regras para resolver um determinado problema. O conhecimento do assunto traduz-se pelo conjunto de sabedoria adquirida tanto pela teoria quanto pela prática e as regras provêm do raciocínio lógico e de uma parte da própria experiência prática. A base de conhecimentos é construída codificando-se os conhecimentos e as experiências dos especialistas na forma de programa computacional. Para tal codificação, a técnica mais utilizada é a chamada *regra de produção*: trata-se de regra do tipo "se - então", usada para representar as conseqüências de uma determinada condição ou a ação que deveria ser tomada numa determinada situação. Para a construção da base de conhecimentos, existem disponíveis no mercado diversos "shells" de sistemas especialistas, constituídos de uma máquina de inferência generalizada.

A máquina de inferência contém um conjunto de raciocínio que interage com as informações da base de conhecimentos. A sua função é selecionar as regras que devem ser executadas para que um novo conhecimento seja inferido. Dois dos mecanismos de inferência empregados com mais freqüência são o *encadeamento para frente* e o *encadeamento para trás*.

O método de encadeamento para frente começa arbitrariamente com uma regra da base de conhecimentos, tendo como verdadeiras, de antemão, todas as suas premissas. Após executar essa regra, adicionam-se todas as suas conclusões na base de conhecimentos e procura-se pela próxima regra que utilize a conclusão da primeira como uma de suas premissas. Este movimento, que vai da conclusão de uma regra à premissa de outra, é o chamado encadeamento para frente. O processo termina quando uma solução desejada é obtida ou quando não houver mais regras a serem executadas.

O encadeamento para trás é também conhecido como encadeamento orientado por metas. O método de encadeamento para trás começa com uma conclusão e prova-a como verdadeira pela demonstração de suas premissas como verdadeiras. Para provar a verdade de uma premissa, procura-se por uma regra que tenha essa premissa como uma de suas conclusões. Se tal regra é en-



**Figura 5. Arquitetura de um sistema especialista.**

contrada, faz-se o encadeamento para trás até ela e tenta-se prová-la demonstrando a verdade de cada uma de suas premissas da mesma maneira. O processo termina quando não mais houver regras a serem provadas.

### **Sistema de Suporte à Decisão (SSD) aplicado ao gerenciamento de recursos hídricos**

Um dos trabalhos pioneiros no uso interativo de computação gráfica aplicado ao gerenciamento de recursos hídricos é atribuído a D. P. Loucks e seus associados da Universidade Cornell. Inspirado em rápido desenvolvimento de modelos matemáticos e à necessidade de um meio simples e rápido para interpretar os resultados para os *tomadores de decisão*, tal grupo desenvolveu programas de uso amigável, orientado por *menus*, que fornecem suporte aos casos clássicos do gerenciamento de recursos hídricos: operação de reservatórios, controle de cheias, controle de qualidade de água, etc. (Loucks et al., 1985).

Alguns exemplos são apresentados por Johnson (1986), nos quais o autor discute uma variedade de aplicação de sistemas de apoio à decisão nas áreas de abastecimento, sistema de

alerta à inundação e operação de reservatórios. Como exemplos de implementação de SSD na operação de reservatórios, podem-se citar aqueles desenvolvidos para os sistemas dos rios Arkansas, Columbia e Baixo Colorado; podem-se citar ainda os SSDs desenvolvidos para o “Tennessee Valley Authority”, o “Central Valley Project” da Califórnia e a “Duke Power Company” (Toebes e Sheppard, 1979). Cunningham e Amend (1986) desenvolveram uma ferramenta de suporte à decisão baseada em modelo de simulação interativo, cuja finalidade era treinar os operadores a definir uma política operacional mais eficiente em um sistema de reservatórios bastante complexo. Arnold e Sammons (1988) desenvolveram um SSD que teve como objetivo sugerir os parâmetros iniciais para um modelo hidrológico que simula o comportamento de bacias rurais. Câmara et al. (1990) desenvolveram um SSD para gerenciar a qualidade d’água do Estuário Tejo, na Europa Ocidental. Savic e Simonovic (1991) estenderam a idéia de modelo de simulação interativo e desenvolveram um SSD inteligente, denominado REZES, para dar suporte à operação de reservatórios isolados. Porto et al. (1989) propuseram um SSD bastante simples para dar suporte à operação em tempo real do reservatório de Guarapiranga, em São Paulo.

Quanto à aplicação de sistemas especialistas (SE) em Recursos hídricos, o número de

trabalhos é ainda bastante reduzido. Dentre eles, pode-se citar o trabalho de Baffaut e Delleur (1989) que desenvolveram um SE para auxiliar a calibração do modelo de drenagem urbana SWMM e Pessoa (1991) que discute a utilização de um SE para a adoção da vazão de projeto de vertedores.

## ESTUDOS DE CASOS

No sentido de exemplificar a utilização das tecnologias acima descritas apresenta-se, a seguir, duas aplicações práticas realizadas no âmbito do Estado de São Paulo. A primeira um SSD para outorga do direito de uso da água na bacia do Rio Piracicaba e a segunda um modelo multiobjetivo que está sendo utilizado no Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CRH) para planejamento dos recursos hídricos do Alto Tietê.

### Sistema de Suporte a Decisão para outorga na bacia do Piracicaba

A bacia do rio Piracicaba é uma das unidades de gestão hidrográfica de maior complexidade no Estado de São Paulo. Fazendo parte do modelo decisório de estabelecimento de outorga de direito ao uso da água no Estado de São Paulo, desenvolveu uma arquitetura de SSD para o gerenciamento da outorga de direito ao uso da água para a bacia daquele rio, conforme mostrado na Figura 6.

O SSD considerado consta de:

**Sistema especialista**, representado por um "shell" denominado VP-Expert, versão educacional. É o sistema gerenciador do SSD, baseado em regras de coordenação, prevê assistência na preparação dos dados e interface com diferentes programas executáveis, como o do modelo matemático e do SIG para a apresentação e pré-processamento dos dados espaciais. Os aspectos institucionais e as metas de outorga são parte do sistema gerenciador no processo de decisão, envolvendo investigação e exame das regulamentações, regras e leis relevantes para a implementação do instrumento de outorga;

**Componente do banco de dados** é representado por um gerenciador de banco de dados (dBase III plus); é o módulo que manipula o cadastro dos usuários e armazena as informações do sistema, renovando-os e modificando-os a cada solicitação ou renovação de outorga;

**Componente da base de modelos** é representado por um modelo matemático, denominado Simox II, versão 2.0, o qual é acessado pelo sistema gerenciador para produzir a simulação dos parâmetros a serem comparados com os padrões determinados pela legislação;

**Componente de exibição** é representado pelo sistema de informações geográficas - SIG/Idrisi, versão 4.0, e é acessado também pelo sistema gerenciador para produzir uma eficiente interface com o usuário, pela compreensão das informações espaciais, auxiliando o decisor na análise dos resultados e das várias alternativas para a escolha da melhor decisão.

O SSD encontra-se implantado para a bacia do rio Corumbataí funcionando experimentalmente com um conjunto de aproximadamente 100 indústrias e 30 municípios. O sistema é extremamente ágil incorporando todos os aspectos de legislação existente e permitindo analisar em tempo-real a viabilidade de autorização de captação e lançamento de efluentes na bacia daquele rio.

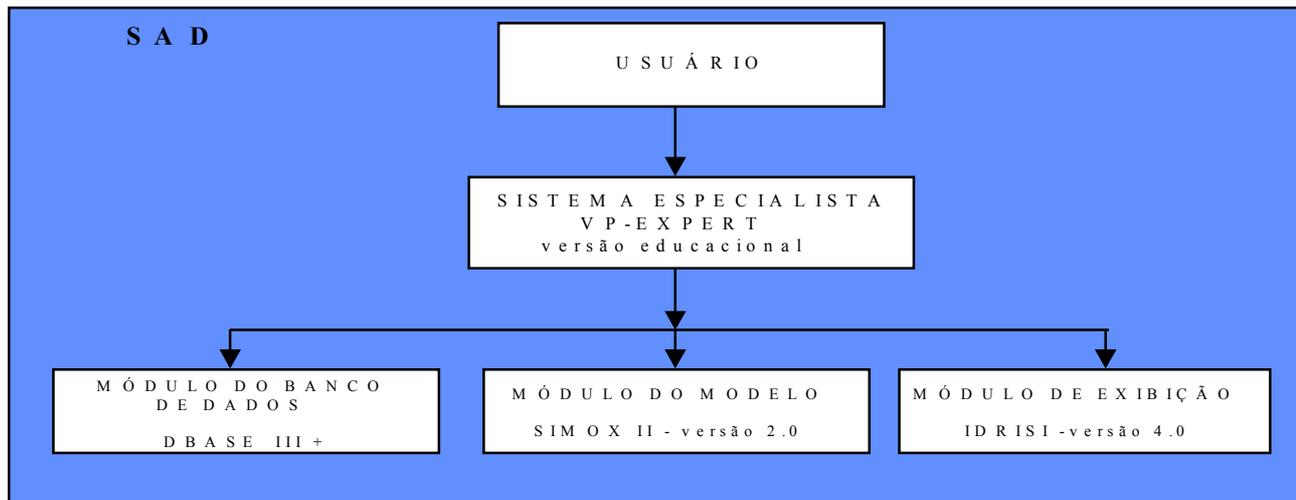
### Operação do sistema de reservatórios do alto Tietê

O objetivo deste SSD é dar suporte à alocação do volume de espera (através da curva-guia) e sugerir as regras de operação de reservatórios em situações críticas de cheia (abertura das válvulas do descarregador de fundo) e estiagem (critério de racionamento) na bacia do Alto Tietê, região metropolitana de São Paulo.

Este SSD é constituído de um modelo de simulação, o qual fornece os parâmetros necessários para a avaliação da política operacional adotada. O modelo de operação foi desenvolvido para atender a três usos conflitantes: controle de cheias, abastecimento público e manutenção de vazão mínima para diluição de esgotos.

O diálogo entre o sistema e o usuário é realizado através de *menus*, onde os parâmetros do modelo como a curva-guia, o valor crítico para o início de racionamento, a taxa de redução no fornecimento de água, etc. são facilmente modificados pelo operador a cada simulação.

**Modelo de operação** - A operação dos reservatórios é feita por um modelo específico de simulação. Para tornar o modelo mais simples, os insumos hidrológicos (vazões afluentes e de de-



**Figura 6. Arquitetura de um SSD para o gerenciamento da outorga do uso da água (Ferraz e Braga, 1997).**

manda) foram tratados deterministicamente. Os trechos de canais entre reservatórios são desprezados de forma a não haver necessidade de se efetuar “routing” em canais. Basicamente, a operação consiste em fazer o balanço de massa dos reservatórios, obedecendo as restrições físicas e operacionais.

Na operação de estiagem, o modelo procura satisfazer as seguintes restrições:

- o nível máximo operacional (nível-meta), em cada mês, é mantido para satisfazer os requisitos de controle de cheias;
- quando o nível d’água no reservatório está entre o nível-meta e o crítico para racionamento, libera-se a vazão de demanda;
- se em algum reservatório o volume armazenado reduzir abaixo do valor crítico (dado em porcentagem do volume útil), iniciar-se-á o racionamento neste reservatório;
- este racionamento será compensado por outros reservatórios que ainda não estão em situação crítica e portanto, o sistema não causará prejuízo no fornecimento de água;
- quando todos os reservatórios do sistema estiverem em situações críticas, iniciar-se-á o racionamento global e conseqüentemente haverá déficit no fornecimento de água.

Na operação de cheia, as restrições satisfeitas são:

- quando o nível d’água do reservatório está na zona de controle de cheias, as descargas serão feitas tentando reduzir o nível até o nível-meta (dado pela curva-guia), sem exceder a capacidade máxima do canal a jusante;
- as descargas serão menores ou iguais à capacidade do canal a jusante, se o topo da zona de controle de cheias não for atingido. Uma vez ultrapassado este nível, a descarga será majorada, conforme a política de abertura das válvulas adotada pelo operador.

**Avaliação do desempenho** - Para avaliar a conseqüência de cada alternativa de operação, foi empregado o critério de penalização das falhas cometidas na operação.

Considera-se como falha no controle de cheias, quando as vazões efluentes do reservatório excedem as capacidades máximas do canal a jusante e como falha no abastecimento ou diluição de esgotos quando ocorrem déficits, ou seja, quando as vazões fornecidas para tais propósitos não atingem a uma meta pré-estabelecida. Em uma falha, tanto para controle de cheias como para suprimento de águas, devem ser levados em conta dois componentes: a intensidade e a duração. Para representar o nível de falhas, para ambos os casos, foram introduzidas funções que apresentam a seguinte forma:

$$F_k = u_k' + u_k'' \quad (1)$$

onde  $F_k$  - função que mede o nível de falhas no controle de cheias ou déficit no fornecimento de água;  $u_k'$  - função que penaliza a intensidade de extravasamento ou déficit no fornecimento de água;  $u_k''$  - função que penaliza a duração de extravasamento ou déficit no fornecimento de água;  $k$  - índice que denota cada propósito (1 para controle de cheias, 2 para abastecimento e 3 para diluição).

Para permitir a comparação (intensidade e duração têm unidades diferentes), as funções  $u_k'$  e  $u_k''$  são normalizadas, ou seja, os seus valores variam de 0 a 1. Como o objetivo é minimizar as falhas na operação e  $u_k'$  e  $u_k''$  são suas medidas, o valor 1 está associado à pior consequência e o valor zero está associado à melhor consequência. Os valores de  $u_k'$  e  $u_k''$  aumentam de acordo com a gravidade do extravasamento ou déficit, até atingir a pior consequência (valor 1) em  $x_k^* = 1$  e  $y_k^* = 1$ . As variáveis  $x_k$  e  $y_k$  são, respectivamente, os valores normalizados de vazão e duração de extravasamento (ou déficit), calculados da seguinte forma:

$$x_k^* = \frac{x_k}{x_k''} \quad (2)$$

$$y_k^* = \frac{y_k}{y_k''} \quad (3)$$

onde  $x_k$  e  $y_k$  são, respectivamente, a vazão máxima e duração de um extravasamento (ou de déficit);  $x_k''$  e  $y_k''$  são, respectivamente, vazão máxima e duração de extravasamento (ou déficit) críticos que causam grande impacto à população.

A forma das funções  $u_k'$  e  $u_k''$  pode ser determinada associando o comportamento do decisor (operador) quanto ao risco, conforme sugerido por Braga (1979). As funções  $u_k'$  e  $u_k''$  são côncavas, lineares ou convexas se o decisor é, respectivamente, averso, neutro ou propenso ao risco.

O decisor averso ao risco procura atribuir uma penalização severa mesmo para pequenas falhas (curva côncava), enquanto o decisor sujeito a risco atribui penalização baixa para pequenas falhas e penaliza de forma mais acentuada somente para grandes falhas (curva convexa). O decisor neutro atribui uma penaliza-

ção moderada uniforme tanto para pequenas como para grandes falhas (linear).

Matematicamente, as funções  $u_k'$  e  $u_k''$  podem ser escritas como:

$$u_k'(x_k^*) = \frac{1 - \exp(-\xi x_k^*)}{1 - \exp(-\xi)} \quad (4)$$

onde  $x_k^*$  e  $y_k^*$  são, respectivamente, a vazão máxima e duração de extravasamento (ou déficit) na forma normalizada;  $\xi$  é o coeficiente de aversão ao risco; o valor positivo de  $\xi$  significa um decisor averso ao risco e o valor negativo de  $\xi$  implica num decisor propenso ao risco.

Em uma falha de operação, tanto no controle de cheias como no suprimento de água, a intensidade e duração são conflitantes, ou seja, ao se procurar reduzir uma delas, há prejuízo da outra. Portanto, existe uma relação de compromisso entre elas. Para dar a importância relativa entre intensidade e duração, um fator de ponderação foi introduzido na Equação 6, que toma a seguinte forma:

$$F_k = \alpha u_k' + (1 - \alpha) u_k'' \quad (5)$$

onde  $\alpha$  é o fator de ponderação que dá importância relativa entre intensidade e duração em um extravasamento (ou déficit); seu valor varia de 0 a 1.

As falhas no controle de cheias são calculadas individualmente para cada reservatório. No caso de abastecimento e diluição de esgotos, as falhas são calculadas somente para o sistema, pois o objetivo é verificar a disponibilidade hídrica do sistema (se o sistema é capaz de suprir a vazão de demanda) e não o comportamento particular de cada reservatório.

As funções de penalização ( $F_k$ ) refletem as consequências de cada política operacional adotada (curva-guia, política de abertura das válvulas e critério de racionamento). A aplicação sucessiva deste modelo para diferentes políticas operacionais fornece um conjunto de soluções (valores de  $F_k$ ), que permite ao responsável pela operação avaliar o desempenho de cada alternativa de operação e adotar aquela que julgar mais adequada.

**Dados de saída** - Após cada simulação completa, o programa fornece na tela um breve sumário dos resultados para que o operador possa avaliar rapidamente o efeito da política operacional adotada. O sumário é dividido em duas telas. Na primeira, são mostrados os resultados referentes ao controle de cheias, quais sejam:

- curva-guia adotada;
- política de abertura das válvulas selecionada;
- fator de ponderação que dá importância relativa entre intensidade e duração numa inundação;
- vazão e duração máximas de extravasamento ocorridas na simulação;
- frequência de extravasamento;
- valor da função  $F_1$  que penaliza as falhas cometidas no controle de cheias.

Na outra tela, são mostrados os resultados relativos ao abastecimento e diluição de esgotos, a saber:

- início de racionamento;
- grau de racionamento para cada propósito;
- fator de ponderação que dá importância relativa entre intensidade e duração num racionamento;
- vazão e duração máximas de racionamento ocorridas na simulação, para cada propósito;
- frequência de racionamento para cada propósito;
- valores das funções  $F_2$  e  $F_3$  que penalizam, respectivamente, as falhas cometidas no abastecimento e diluição de esgotos;
- volume de água armazenado no sistema, no final da simulação.

### **Modelo de planejamento multiobjetivo para a região metropolitana de São Paulo**

A região metropolitana de São Paulo é, com certeza, um dos mais completos laboratórios para teste de metodologias de planejamento integrado de recursos hídricos. Atualmente a região apresenta dois pontos centrais problemáticos relacionados com o gerenciamento de recursos hídricos: a grande demanda de água de abastecimento comparada com a baixa disponibilidade na bacia do Alto Tietê e a disposição dos esgotos gerados na região tendo em vista a inversão do curso do rio Pinheiros. Associe-se a estes problemas uma intensa participação pública e os conflitos de uso decorrentes da inversão do Pinheiros (poluição da represa Billings ou da represa de Barra Bonita).

O SSD desenvolvido para o CRH (Conselho Estadual de Recursos Hídricos)

considerou sete alternativas de planejamento apresentadas sumariamente na Tabela 1.

A alternativa PA-1 é uma solução extrema que preserva o reservatório Billings, mas encaminha a poluição das águas servidas da RMSP para as cidades e reservatórios localizados à jusante da região. A alternativa PA-7 bombeia toda a vazão do Tietê para a usina Henry Borden, poluindo a represa Billings, mas melhorando a situação das populações localizadas à jusante da região. As alternativas intermediárias representam partições alternativas do problema entre as duas regiões.

O algoritmo multiobjetivo utilizado no tratamento do problema foi o ELECTRE I e sua versão expandida ELECTRE II. Diversas vantagens e também críticas têm sido relatadas na literatura especializada. Apesar de algumas controvérsias de natureza teórica, os modelos ELECTRE apresentam-se como técnicas apropriadas de ordenação de alternativas discretas, envolvendo critérios qualitativos e quantitativos.

Oito macro objetivos foram considerados (Tabela 2). Os objetivos foram quantificados em uma escala ordinal comum variando desde 1 (pior situação) até 5 (melhor situação). Com base nesta escala, diferentes conjuntos de especialistas avaliaram o desempenho de cada alternativa na satisfação dos macro objetivos e critérios, montando assim uma matriz de avaliação. Esta matriz, juntamente com os valores limites para aceitação e rejeição  $(p,q)=(0,8;0,2)$  formam os elementos básicos para seleção de alternativas neste problema.

A sensibilidade do modelo foi testada, utilizando-se dois casos extremos. O decisor (D1) tem uma grande preferência pelo objetivo abastecimento de água e também prioriza a preservação da represa Billings. O segundo decisor (D2) representa alguém que prioriza a qualidade da água e os reservatórios de jusante da região. Na Tabela 3 estão indicados os pesos adotados para os diferentes objetivos e a ordenação correspondente das alternativas.

O decisor D1 coloca peso maior no abastecimento, o que resultou nas alternativas PA- e PA-6 como melhores opções. Já o decisor D2 que priorizou o baixo Tietê teve como melhor alternativa a PA-7 uma vez que esta alternativa pressupõe o bombeamento total das vazões para a represa Billings. Outros testes foram realizados, resultando em alternativas intermediárias como as melhores opções.

**Tabela 1. Alternativas de planejamento de recursos hídricos no Alto Tietê.**

Alternativa	Descrição	Custo Estimado (US\$ 10 <sup>-9</sup> )
PA-1	Parada completa da inversão do curso do Pinheiros. Interrupção total da geração na usina Henry Borden.	3.963
PA-2	Vazões bombeadas no Pinheiros somente em situação de cheias. Interrupção parcial do bombeamento na UHB.	3.145
PA-3	Bombeamento paramétrico sujeito a monitoramento da qualidade da água no reservatório Billingsr.	2.733
PA-4	Nenhum bombeamento durante períodos de seca e bombeamento paramétrico durante a estação chuvosa (sujeito à monitoramento).	2.641
PA-5	Construção de lagos laterais isolando o reservatório Billings mantendo os efluentes poluídos no corpo central da represa Billings. Os braços isolados servirão como mananciais de água potável.	2.441
PA-6	Construção de outros lagos laterais de isolamento da represa Billings com função semelhante à alternativa 5.	2.434
PA-7	Construção de um tunel para levar a água poluída bombeada do Pinheiros, diretamente ao reservatório Pedras ao final da represa Billings. O reservatório Pedras alimenta a usina Henry Borden.	3.303

**Tabela 2. Objetivos do planejamento de recursos hídricos na RMSP.**

Macro-objetivo	Medida	Número de Critérios Associados
1-Abastecimento	Disponibilidade de água (m <sup>3</sup> /s)	2
2-Qualidade da Água	Parâmetros de qualidade (OD, DBO e coliformes)	8
3-Saúde Ambiental	Parâmetros associados à saúde pública e ecossistemas naturais	15
4-Geração de Energia	MWh	1
5-Aspectos Sócio Econômicos	subjetiva, baseada na opinião do conjunto de especialistas	6
6-Aspectos Legais e Institucionais	subjetiva, baseada na opinião de equipe multidisciplinar	4
7-Controle de Cheias	nível de proteção contra cheias	2
8-Custos	US\$ bilhões	1

**Tabela 3. Pesos e ordenação das alternativas para dois decisores.**

Decisor D1			Decisor D2		
Peso do macro- objetivo $w_j$	Ordenação	Alternativa	Peso do Macro- objetivo $w_j$	Ordenação	Alternativa
$W1=3$	1	PA-5	$W1=1$	1	PA-7
$W2=1$	2	PA-6	$W2=3$	2	PA-3
$W3=1$	3	PA-7	$W3=1$	3	PA-4
$W4=1$	4	PA-2	$W4=1$	4	PA-6
$W5=1$	5	PA-1	$W5=1$	5	PA-2
$W6=1$	6	PA-4	$W6=1$	6	PA-5
$W7=1$	7	PA-3	$W7=1$	7	PA-1
$W8=1$	---	----	$W8=1$	---	---

## CONCLUSÕES

A revisão do estado da arte indica a existência de tecnologia adequada para tratar quantitativamente o processo de planejamento e gestão de recursos hídricos. O trabalho apresentou métodos de otimização e simulação para o tratamento de problemas com objetivo único. Em geral esta situação é rara no contexto dos problemas reais. Tratou-se então de metodologias para tratamento de problemas multiobjetivo, incluindo os chamados sistemas de suporte à decisão que possibilitam uma maior interação entre analistas e tomadores de decisão.

Os estudos de caso apresentados para outorga de direito de uso da água e o planejamento multiobjetivo da região metropolitana de São Paulo atestam a viabilidade das técnicas apresentadas, bem como representam formas de aumento da eficiência do sistema de gestão de recursos hídricos. Incorporando aspectos qualitativos e quantitativos na análise e permitindo a participação pública, estes SSD deverão em breve ser estendidos para outras regiões do país, onde existam problemas de complexidade similar.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, A. R. & TERRY, L. A. 1974, Operação de sistema hidrotérmico usando programação dinâmica determinística. *Rev. Bras. Energia Elétrica*, n. 29, p. 44-45, Jul/Dez.
- ARNOLD, J. G. & SAMMONS, N. B. 1988, Decision support system for selecting inputs to a basin scale model. *Water Resources Bul.*, v. 24, n. 24, p. 749-759, Aug.
- ASKEW, A. J. 1975, Use of risk premiums chance-constrained dynamic programming. *Water Resources Research*, v. 11, n. 6, p. 862- 866.
- BAFFAUT, C. & DELLEUR, J. W. 1989, Expert system for calibrating Swmm. j. *Water Resources Planning and Management*, Asce, v. 115, n. 3, May.
- BARBOSA, P. S. F. 1986, *Planejamento da operação de um sistema de reservatórios múltiplos para geração hidroelétrica*. Dissertação de Mestrado apresentada à EPUSP. São Paulo: 127p.
- BARROS, M. T. L. 1989, *Otimização estocástica implícita da operação de sistemas de reservatórios considerando múltiplos objetivos*. Tese de Doutorado apresentada à EPUSP. São Paulo: 272p.
- BARROS, M. T. & BRAGA J., B. P. F. 1991, Otimização estocástica implícita da operação de sistemas de reservatórios considerando múltiplos objetivos. *Rev. Bras. Engenharia*, v. 9, n. 1, p. 33-35, Ago.
- BECKER, L. & YEH, W. W-G. 1974, Optimization of real time operation of a multiple reservoir system. *Water Resources Research*, v. 10, n. 6, p. 1107-1112, Dec.
- BELLMAN, R. E. 1957, *Dynamic programming*. New Jersey: Princeton University Press.
- BENNET, J. 1977, *User-oriented graphics, systems for decision support in unstructured tasks*. In: Treu, S. ed. *User-oriented design of interactive graphics systems*. New York: Association for Computing Machinery, p. 3-11.
- BRAGA, B. P. F. 1979, *An evaluation of streamflow forecasting models for short-range multi-objective reservoir operation*. Dissertation submitted to the Department of Civil Engineering and the Committee on Graduate Studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Stanford University, 118p.

- BRAGA, B. P. F. 1989, *Modelo multiobjetivo para operação de sistema de reservatórios em tempo real*. Tese de Livre Docência apresentada à EPUSP. São Paulo.
- BRAGA, B. P. F. 1987, Técnicas de otimização e simulação aplicadas em sistemas de recursos hídricos. In: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. *Modelos para gerenciamento de recursos hídricos* (por Flávio Terra Barth e outros/ São Paulo: Nobel/ABRH, 526p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, 1).
- CÂMARA, A. S. et al. 1990, Decision support system for estuarine water-quality management. *J. Water Resources and Planning Management*, ASCE, v. 116, n. 3, p. 417-432, May/June.
- CROLEY, T. E. 1974, Sequential stochastic optimization for reservoir system. *J. Hydr. Div.*, ASCE, v. 100, n. 1, ser. HY, p. 201-219, Jan.
- CUNNINGHAM, A. B. & AMEND, J. R. 1986, Interactive simulation of water resource systems. *J. Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 112, n. 3, p. 326-338, Jul.
- DUDLEY, N. J. & BURT, O. R. 1973, Stochastic reservoir management and system design for irrigation. *Water Resources Research*, v. 9, n. 3, p. 507-522, Jun.
- FITCH, W. N. et al. 1970, The optimization of the operations of a multipurpose water resources system. *Water Resources Bul.*, v. 6, n. 4, p. 498-518.
- FULTS, D. M. & HANCOCK, L. F. 1972, Optimum operations model for Shasta-Trinity system. *J. Hydr. Div.*, ASCE, v. 98, n. 9, ser. HY, p. 1497-1514, Sept.
- HALL, W. A. et al. 1969, *Optimum firm power output from a two reservoir system by incremental dynamic programming*. Los Angeles: University of California, (Contribution, 130).
- HEIDARI, M. et al. 1971, Discrete differential dynamic programming approach to water resources system optimization. *Water Resources Research*, v. 7, n. 2, p. 273-283, Apr.
- HERMANN, R. M. 1971, *Dimensionamento e operação de sistemas com reservatórios múltiplos*. Tese de Livre Docência apresentada à EPUSP. São Paulo: 105p.
- HERMANN, R. M. 1970, *Stochastic linear models for multi-reservoir systems*. Ph.D. Dissertation. Massachusetts: MIT.
- JAMIESON, D. G. & WILKINSON, J. C. 1972, A short term control strategy for multipurpose reservoir systems. *Water Resources Research*, v. 8, n. 4, p. 911-920.
- JOHNSON, L. E. 1986, Water resources management decision support systems. *J. Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 112, n. 3, p. 308-325, Jul.
- LARSON, R. E. 1968, *State incremental dynamic programming*. New York: American Elsevier Pub.
- LITTLE, J. D. C. 1955, The use of storage water in hydroelectric system. *Operation Research*, v. 3, n. 2, p. 187-197.
- LIU, C-S. & TEDROW, L. A. 1973, Multilake river system operation rules. *J. Hydr. Div.*, ASCE, v. 99, n. 9, ser. HY, p. 1369-1381, Sept.
- LOUCKS, D. P. 1968, Computers models for reservoir regulation. *J. Sanitary Engineering div.*, ASCE, v. 94, n. 4, ser. SA, p. 657-669, Aug.
- LOUCKS, D. P. & FALKSON, L. M. A 1970, comparison of some dynamic, linear and policy iteration methods for reservoir operation. *Water Resources Bul.*, v. 6, n. 3, p. 384-400, May/June.
- LOUCKS, D. P. & SIGVALDASON, O. T. 1982, *Multiple reservoir operation in North America*. In: Kaczbarck, Z. & Kindler, J., ed. The operation of multiple reservoir system. Luxemburg: IIASA.
- LOUCKS, D. P. & TAYLOR, M. R. & FRENCH, P. N. 1985, Interactive data management for resource planning and analysis. *Water Resources Research*, v. 21, n. 2, p. 131-142.
- MANNE, A. S. 1962, Product mix alternatives: flood control, electric power and irrigation. *Inter. Economic Review*, v. 8, n. 1, p. 30-54, Jan.
- MARIÑO, M. A. & MOHAMMADI, B. 1984, Multiple reservoir operation: I. Monthly model for a single reservoir. *J. Hydrology*, v. 69, n. 1/4, p. 1-14, Febr.
- MOHAMMADI, B. & MARIÑO, M. A. 1984, Multiple reservoir operation: II. Daily operation of a multiple reservoir system. *J. Hydrology*, v. 69, n. 1/4, p. 15-28, Febr.
- NAYAK, S. C. & ARORA, S. R. 1971, Optimal capacities for a multireservoir system using the linear rule. *Water Resources Research*, v. 7, n. 3, p. 483-494, Jun.
- NOPMONGCOL, P. & ASKEW, A. J. 1976, Multi-level incremental dynamic programming. *Water Resources Research*, v. 12, n. 6, p. 1291-1297.
- PESSOA, M. de L. 1991, A adoção da vazão de projeto de barragens: o dilema e uma solução inteligente. *Rev. Bras. Engenharia*, v. 9, n. 1, Ago.

- PHILIP, J., 1972, *Algorithms for the Vector Maximization Problem*, Mathematic Programming, v. 2.
- PORTO, R. L. L.; BRAGA J., B. P. F.; NAKAYAMA, P. T. & MARTINEZ J., F. 1989, *Sistema de apoio à decisão: operação de reservatório em tempo real*. In: Simp. Bras. De Recursos Hídricos, ABRH, 8º, Foz do Iguaçu, PR., Nov. 1989. Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo: ABRH, v. 1, p. 97-107.
- REVELLE, C.; JOERES, E. & KIRBY, W. 1969, The linear decision rule in reservoir management and design: I. Development of the stochastic model. *Water Resources Research*, v. 5, n. 4, p.767-777.
- REVELLE, C. & KIRBY, W. 1970, The linear decision rule in reservoir management and design: II. Performance optimization. *Water Resources Research*, v. 6, n. 4, p. 1033-1044, Aug.
- RUSSEL, C. B. 1972, An optimal policy for operating a multi-purpose reservoir. *Operation Research*, v. 20, n. 6, p. 1181-1189.
- SAVIC, D. A. & SIMONOVIC, S. P. 1991, An interactive approach to selection and use of single multipurpose reservoir models. *Water Resources Research*, v. 27, n. 10, p. 2509-2521, Oct.
- SCHWEIG, Z. & COLE, A. 1968, Optimal control of linked reservoirs. *Water Resources Research*, v. 4, n. 3, p. 479-498.
- SIGVALDASON, O. T. 1976, A simulation model for operating a multipurpose multi-reservoir system. *Water Resources Research*, v. 12, n. 2, p. 263-278, Apr.
- SIMON, H. 1960, *The new science of management decision*. New York: Harper & Row.
- SILVA, J. B. & HERNANDEZ, V. 1979, *Operation strategy for multi-purpose reservoirs under flood condition*. In: Congr. Intern. de Recursos Hídricos, 3º, México, D. F., 1979. - Papers of the III World Congress of the International Water Resources Association. Mexico, D. F. v. 4, p. 367-374.
- SPRAGUE, R. H. & CARLSON, E. D. 1982, *Building effective decision support systems*. Englewood Cliffs, N. J.: Printice-Hall.
- STROBEL, O M. 1979, *Dimensionamento e operação de reservatórios através do método de restrições probabilísticas e regra de decisão linear*. Dissertação de Mestrado apresentada à EPUSP. São Paulo: 163p.
- TAKEUCHI, K. & MOREAU, D. H. 1974, Optimal control of multi-unit interbasin water resources system. *Water Resources Research*, v. 10, n. 3, p. 407-414, Jun.
- TECLE, A. S. 1992, Selecting a Multicriterion Decision Making Technique for Watershed Resources Management, *Water Resources Bulletin*, vol. 28, no. 1.
- TENNESSEE, VALLEY AUTHORITY 1980, *Weekly near-future scheduling model for the TVA reservoir system*. Norris: TVA, (Report WR28-1-500-127).
- TEXAS Water Development Board. 1970, *System simulation for management of a total water resource*. Texas: (Report, 118).
- TOEBES, G. H. & SHEPHERD, A. A. 1979, eds. *Proceedings of a National Workshop on Reservoir Operations*. Boulder, Colo: ASCE/OWRT.
- TROTT, W. J. & YEH, W. W-G. 1971, *Multi-level optimization of a reservoir system*. In: Annual and National Environmental Engineering Meeting, ASCE, St. Louis, Mo., Oct. Proceeding of the Annual and National Environmental Engineering Meeting. p. 18-21.
- TROTT, W. J. & YEH, W. W-G. 1973, *Optimization of multiple reservoir systems*. J. Hydr. Div., ASCE, v. 99, n. 10, ser. HY, p.1865-1884, Oct.
- VERHAEGHE, R. J.; KROGT, H. & MOST, H. 1989, Simulation and optimization analysis of the water resources of the Tana River basin in Kenya. Publ. *Delft Hydraulics*, n. 413, May.
- YEH, W. W-G. 1985, Reservoir management and operations models: a state of the art review. *Water Resources Research*, v. 21, n. 12, p. 1797-1818, Dec.
- YOUNG, G. R.1967, *Finding reservoir operation rules*. J. Hydr. Div., ASCE, v. 93, n. 6, ser. HY, p. 297-321, Jun.
- ZADEH, L., 1963, Optimality and no Scalar Valued Performance Criteria, *IEEE Transactions On Automatic Control*, vol. 8, no.59.

## **Support Systems for Water-Resource Decision-Making**

### **ABSTRACT**

*Water resources play a fundamental role in the development of any society, particularly those in third-world countries. Both surplus or deficit of this precious and vital resource present problems which deserve the attention of any responsible government. Quality of water is equally important. The concept of sustainable development (Bruntland, 1972) called into question developmental procedures having the sole objective of economic development. According to this concept, development is a process of change for which the identification of resources, the targeting of investment, the direction of technological development, and institutional change, act harmoniously together, increasing the potential to serve the needs and hopes of the people, without compromising the capacity of future generations to fulfil their own needs.*

*It is within this context of sustainability that the planning and integrated management of water resources should be discussed and analyzed. The adjective 'integrated' shows that both quantity and quality aspects must be considered, and that water is just one component of a regional structure in which it is inter-linked with other sectors (for example: transport, public health, civil defense, agriculture, and others). These linkages must also to be considered. This paper discusses the technological tools available for the proper planning and integrated management of water resources. It gives what might be called a systems analysis of water resources by which the process of planning with quantitative elements is systematized. For historical reasons, the point of departure for the discussion is the single-objective problem for which techniques of optimization and simulation are essential. There follows a discussion of the difficulties encountered when these techniques are used, and a presentation of recent advances in quantitative planning methods having multiple objectives. To conclude, Decision Support Systems (DSS) are introduced as the most recent stage, in which these techniques become available to the decision maker in user-friendly form.*