
Modelos Matemáticos no Dimensionamento e Operação de Reservatórios — Um exemplo de aplicação

ROBERTO MAX HERMANN*

* Superintendente do CNEC — Consórcio Nacional de Engenheiros Consultores S.A.; Professor Livre Docente da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

O objetivo deste artigo é o de apresentar e discutir a utilização de modelos de programação linear e simulação no tratamento de problemas relacionados com reservatórios de regularização.

Para colocar a discussão num contexto concreto utilizaram-se a configuração e as características do conjunto de reservatórios constituintes do Sistema de Produção Cantareira, da SABESP. Os resultados numéricos aqui apresentados, a título de ilustração, foram obtidos durante a elaboração de um trabalho profissional executado sob a orientação e supervisão do autor.

I — INTRODUÇÃO

Dimensionar um reservatório significa definir o seu volume útil, para que ele possa atender a um ou mais propósitos. Trata-se de um dos parâmetros de maior importância no planejamento do uso de água de uma bacia, pois dele dependem todas as outras decisões técnico-econômicas relacionadas com a construção de obras de barramento e outros deles dependentes. Utilizando a linguagem da Teoria de Controles esta é a decisão de nível hierárquico mais alto a ser tomada durante o processo decisório que envolva a definição básica de um reservatório ou sistema de reservatórios.

Outra característica desse dimensionamento é a sua irreversibilidade. Uma vez construída a barragem com altura correspondente ao volume útil desejado, torna-se, para todos os fins práticos, impossível alterá-la, no sentido de proporcionar um aumento ou diminuição no volume útil. Por serem as barragens estruturas

de longa vida útil, os efeitos da definição de sua característica básica — o volume útil — serão percebidos durante décadas.

Operar um reservatório requer a especificação da descarga regularizada, ou volume armazenado, em função do tempo. Tal especificação pode ser feita de diferentes maneiras, como por exemplo:

— Apontando descargas regularizadas fixas para cada uma das estações em que foi dividido o ano hidrológico**;

— Fazendo as descargas dependerem dos volumes armazenados no reservatório em análise e/ou em outros que com ele interagem;

— Levando em consideração informações relacionadas com projeções de demanda e/ou disponibilidades hídricas em intervalos de tempo subseqüentes, em pontos diferentes do sistema;

— Combinando duas ou mais das técnicas acima mencionadas.

A primeira regra de operação apontada é aquela especificada através de descargas regularizadas, independentemente das condições das variáveis de estado (correspondentes aos volumes armazenados em cada um dos reservatórios) do sistema. As técnicas de análise para sua derivação são das mais simples mas, devido à falta de flexibilidade em se adaptarem às condições do sistema, são as que se mostram menos eficientes.

Uma especificação alternativa seria aquela que utiliza volumes armazenados como variá-

** Um procedimento mais simplificado, porém menos eficiente, seria adotar uma única descarga regularizada, como geralmente se faz no diagrama de RIPPL.

veis indicadoras, deixando as descargas a serem efetuadas como decorrências do atendimento das condições impostas aos volumes. Este é o processo mais largamente utilizado na prática, sendo a especificação efetuada através das curvas guias. Se, por um lado este enfoque elimina a inconveniência apontada anteriormente, acarreta, por outro, graves dificuldades na operação do sistema, quando os objetivos dessa operação são expressos em termos de vazão, conforme se aponta no exemplo a ser discutido posteriormente.

É importante observar que tanto o dimensionamento como a operação de reservatórios constituem problemas de caráter probabilístico, por duas razões principais: o insumo hidrológico futuro disponível ao sistema e as condições sócio-econômicas. Para contornar esta dificuldade é possível utilizar um preditor de condições futuras, seja em relação à hidrologia ou, por exemplo, em relação às condições de demanda de água para os diferentes propósitos que o sistema vá atender.

A introdução de conhecimentos prévios hidrológicos na operação simulada do sistema é trivial. Tal não acontece na operação real pois, nesse caso, exigem-se cuidadosas análises fenomenológicas e estatísticas dos deflúvios afluentes, bem como um sistema de telecomunicação e controle para incorporar essas informações no processo operativo. Muitas vezes tal refinamento não é justificado e restringe a análise de operação simulada aos dois primeiros critérios.

Finalmente, em algumas circunstâncias é necessário estabelecer-se conjuntos alternativos de regras de operação sendo, por exemplo, um válido para condições hidrológicas normais e outro a ser utilizado quando a disponibilidade hídrica estiver abaixo do normal.

Do exposto se depreende que o estabelecimento de regras ou políticas de operação para um sistema de recursos hídricos é tarefa extremamente complexa e que pode ser tratada a diferentes níveis de sofisticação.

O último ponto que merece destaque relaciona-se com a inter-relação entre o dimensionamento e a operação. Na realidade, os dois aspectos estão intimamente relacionados no sentido de que, dado um reservatório com volume útil fixado, ao variar sua regra de operação varia também sua eficiência para atingir determinados objetivos. Este fato tem uma implicação clara: ao dimensionar um reservatório é preciso associar ao volume útil uma determinada regra de operação. Em outras palavras, mesmo durante a fase de planejamento é necessária a execução de estudos de operação.

Combinando-se essas duas idéias conclui-

se que estudos de dimensionamento devem incluir o estabelecimento de uma regra de operação que não exige alto grau de detalhamento e eficiência, bastando demonstrar que os volumes úteis escolhidos têm possibilidade de atingir os objetivos préfixados. Ela poderia ser chamada de **operação planejada**. Numa segunda etapa, quando na elaboração dos estudos de operação real do sistema, a operação planejada poderá ser refinada visando uma utilização mais eficiente dos recursos hídricos disponíveis. Este procedimento tem a vantagem de otimizar os recursos envolvidos no processo de dimensionamento e estabelecimento de regras de operação, evitando estudos de operação muito detalhados na fase de planejamento, quando um grande número de diferentes configurações deve ser testado.

II — METODOLOGIA DE ANÁLISE

A análise necessária ao dimensionamento e operação de sistemas com reservatórios múltiplos é um dos problemas mais complexos a serem enfrentados pelo planejador do uso da água. Uma descrição das dificuldades presentes, das técnicas empregadas, bem como de suas vantagens e desvantagens pode ser encontrada em (1)*.

A estratégia utilizada neste trabalho constitui-se na combinação de duas técnicas de análise, a saber, a programação linear com restrições probabilísticas e a simulação, utilizando-se séries hidrológicas de longa duração geradas sinteticamente. Tal combinação apresenta vantagens, pois as duas categorias de modelos têm atributos complementares.

Modelos de programação linear gozam de capacidades otimizantes mas, por serem de formato rígido, não permitem a inclusão de relações não-lineares entre as equações de condição e/ou função objetivas; também não incluem, de maneira satisfatória, avaliações do risco hidrológico.

Por outro lado, modelos de simulação são totalmente flexíveis. Com o auxílio de séries hidrológicas longas, que se constituem em amostras adequadas dos processos estocásticos em questão, podem avaliar o risco associado a uma configuração e a uma regra de operação escolhidas exogenamente. Sofrem, entretanto, da desvantagem de não poderem localizar a configuração e a regra de operação ótimas, servindo apenas para testar a confiabilidade quando esses elementos já foram fornecidos.

* Os números entre parênteses referem-se à Bibliografia indicada no fim do texto.

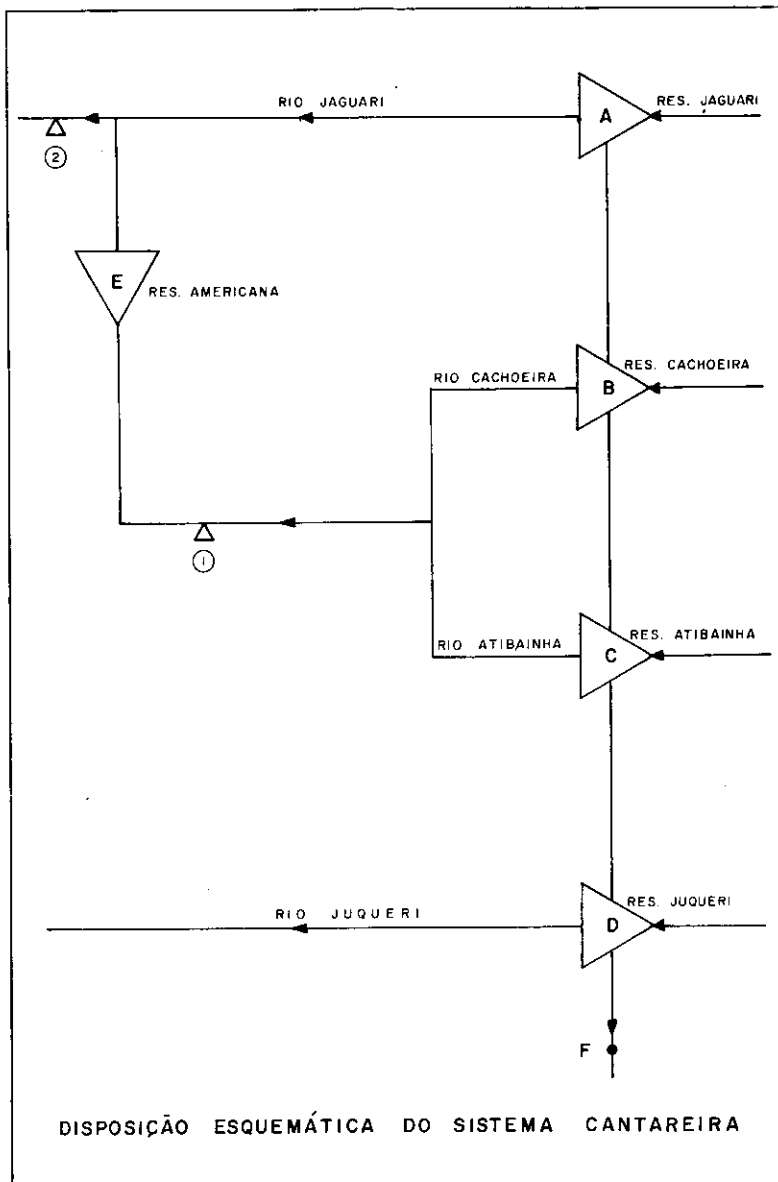
O sistema de reservatórios objeto deste artigo foi analisado, de início, com um modelo de programação linear, que forneceu uma estimativa do volume útil a ser alocado a um de seus componentes bem como as descargas regularizadas, consideradas como metas a serem atingidas, posteriormente, na análise por simulação.

II — 1 — Configuração

Como já mencionado, os modelos matemáticos aqui apresentados foram montados e explorados para a configuração do Sistema Cantareira.

Quando da realização dos estudos ora rela-

tados, os volumes úteis dos reservatórios dos Rios Cachoeira, Atibainha e Juqueri, já estavam definidos, em estudos anteriores, bem como a capacidade nominal das Estações Elevatória de Santa Inês e de Tratamento do Guaraú e das interligações entre os diferentes componentes à exceção daquela que conecta o Reservatório do Rio Jaguari com o do Rio Cachoeira. Restava, porém, uma decisão de extrema importância a ser tomada: a definição do volume útil do Reservatório do Rio Jaguari, que responde pelo fornecimento de cerca de 65% da vazão objetivo global. A figura a seguir mostra a configuração do sistema em análise e as interligações entre os diferentes componentes.



Um levantamento das necessidades hídricas, presentes e futuras, das regiões situadas à jusante dos reservatórios de derivação, indicou que:

— torna-se necessária a manutenção de vazões mínimas imediatamente a jusante de cada reservatório; tais vazões serão deduzidas das descargas regularizadas totais e os remanescentes serão enviados através das interligações para reforçar o abastecimento da área metropolitana de São Paulo.

— em dois pontos situados a consideráveis distâncias dos reservatórios de derivação (indicados na figura pelos números 1 e 2) é indispensável a manutenção de vazões acima de um certo mínimo para atendimento de condições locais. Como o Reservatório de Americana, de propriedade da Centrais Elétricas de São Paulo S.A., está a montante, e portanto exerce controle sobre um desses pontos, foi o mesmo incluído na configuração do sistema a ser analisado.

Neste ponto pode-se enunciar o problema que deu origem à modelagem aqui apresentada: determinar o volume útil **mínimo** (que corresponde ao mínimo custo) do Reservatório do Jaguari de maneira a assegurar a manutenção das vazões sanitariamente recomendáveis nas bacias fornecedoras dos recursos hídricos a serem revertidos, bem como a vazão objetivo global para reversão que é de 33 m³/seg.

II — 2-Modelo de Programação Linear

O insumo hidrológico para o modelo aqui descrito é do tipo cíclico e o intervalo de tempo elementar utilizado para a sua descrição é de um mês.

GLOSSÁRIO DE SÍMBOLOS (VER FIGURA)

- m^V_A — Volume armazenado no reservatório A, no começo do mês m ($10^6 m^3$)
- m^{R_A} — Descarga regularizada no reservatório A, durante o mês m , para atendimento de condições sanitárias ($10^6 m^3/mês$).
- $m^{D'A}$ — Descarga regularizada no reservatório A, enviada ao reservatório B, durante o mês m ($10^6 m^3/mês$).
- $m^{D''A}$ — Descarga regularizada, enviada do reservatório B ao reservatório A, durante o mês m ($10^6 m^3/mês$).
- m^I_A — Deflúvio afluente ao reservatório A, durante o mês m ($10^6 m^3/mês$).
- m^I_1, m^I_2 — Deflúvios afluentes intermediários entre os reservatórios de montante e

os pontos 1 e 2, respectivamente ($10^6 m^3/mês$).

m^{S_A} — Extravazamento do reservatório A, durante o mês m ($10^6 m^3/mês$).

Um conjunto semelhante de símbolos será utilizado para cada um dos reservatórios. Ainda mais, para os reservatórios e vínculos hidráulicos já construídos, é necessário incluir símbolos que definam suas capacidades.

K_B, K_C, K_D, K_E , volumes úteis dos reservatórios B, C, D, E ($10^6 m^3$).

K_{BC}, K_{CD}, K_{DE} — capacidade dos vínculos hidráulicos entre os reservatórios B e C, C e D e entre o reservatório D e a estação Elevatória F ($10^6 m^3/mês$).

$1^{T_{min}}$ — vazão mínima a ser mantida, devido as necessidades sanitárias no ponto 1 ($10^6 m^3/mês$).

$2^{T_{min}}$ — idem, no ponto 2 ($10^6 m^3/mês$).

$R_{A_{min}}, R_{B_{min}}, R_{C_{min}}, R_{D_{min}}$ — vazões mínimas a serem mantidas a jusante dos reservatórios ($10^6 m^3/mês$).

R — vazão total necessária para o abastecimento urbano ($10^6 m^3/mês$).

Equações de Condição

O primeiro bloco de equações atende às condições de continuidade intertemporal; para o reservatório A,

$$m + 1^V_A = m^V_A + m^I_A - m^{R_A} - (m^{D'A} - m^{D''A}) - m^{S_A} \quad (1)$$

$$m = 1, 12; \quad \text{se } m = 12, \quad m + 1 = 1$$

As diferentes grandezas que comparecem na equação acima são de caráter estocástico: no início do intervalo m , quando a decisão sobre a descarga regularizada deve ser tomada, o deflúvio afluente não é conhecido. Isto implica que esta descarga deve ser interpretada como uma vazão-meta a ser atingida, caso haja disponibilidade hídrica, decorrendo daí seu caráter estocástico.

Analogamente, caso o volume no início do intervalo m , somado ao deflúvio afluente e deduzido da descarga regularizada, exceda o volume máximo do reservatório, haverá extravasamento. A priori, esse eventual extravasamento não é conhecido, o que justifica tratá-lo, também, como variável estocástica. Finalmente, pela mesma razão, os volumes devem ser tratados, em geral, como variáveis estocásticas.

A introdução desse caráter estocástico na modelagem de reservatórios conduz a difícil-

dades teóricas intransponíveis, o que se deve à escassez de resultados disponíveis relacionados com as distribuições de probabilidades de volumes, descargas e extravasamento. Para contornar essa dificuldade é necessário introduzir a hipótese simplificadora de que todas as grandezas presentes, exceção feita aos insumos hidrológicos, são determinísticas. Duas são as razões para essa exceção: deflúvios naturais não se prestam, nas condições tecnológicas atuais, a qualquer tipo de controle, ao contrário das outras grandezas sobre as quais algum controle pode ser exercido. Além do mais, para os deflúvios afluentes existem informações históricas relacionadas com suas distribuições de probabilidades. Torna-se então possível e desejável tratar essa última grandeza como sendo de caráter estocástico tornando-se necessário definir um índice estatístico representativo desses deflúvios. O método das restrições probabilísticas assume tal índice como sendo o valor do insumo, com probabilidade prefixada, a critério do planejador, de ser igualado ou excedido.

A justificativa de tal adoção pode ser feita com as seguintes considerações: a violação mais séria da equação acima ocorre quando o deflúvio afluente, no período m , é insuficiente para garantir a descarga com confiabilidade suficientemente elevada de acordo com o propósito que se pretende atender. Para tal, é preciso que o deflúvio afluente permita a efetivação desta descarga, ou, em símbolos:

$$P(m + 1^{\forall A} - m^{\forall A} + m^{\forall RA} + (m^{\forall D'A} - m^{\forall D''A}) + m^{\forall SA} \leq m^{\forall IA} \geq \alpha)$$

onde, além dos símbolos já definidos, tem-se:

- $m^{\forall IA}$ – variável estocástica associada aos deflúvios afluentes durante o período m no reservatório A.
- $P(\)$ – probabilidade de ocorrência associada ao evento entre parênteses.
- α – nível de confiabilidade imposto ao modelo ($0 \leq \alpha \leq 1$)

Esta última equação pode ser remanejada, e escrita como:

$$P(m + 1^{\forall A} - m^{\forall A} + m^{\forall RA} + (m^{\forall D'A} - m^{\forall D''A}) + m^{\forall SA} \geq m^{\forall IA} \leq 1 - \alpha)$$

ou, utilizando a função cumulativa de probabilidade dos deflúvios, levantada a partir do traço histórico, e cujo inverso é aqui designado por $F^{-1}(\)$ vem:

$$m + 1^{\forall A} - m^{\forall A} + m^{\forall RA} + (m^{\forall D'A} - m^{\forall D''A}) + m^{\forall SA} \leq F^{-1}(1 - \alpha) \quad (2)$$

A comparação das equações (1) e (2) mostra que, no método das restrições probabilísticas, o deflúvio afluente é representado pelo valor correspondente ao nível de risco $(1 - \alpha)$ assumido.

Como a estrutura matemática desta equação é linear, a técnica de programação linear pode ser utilizada. Computacionalmente tal fato é importante pois permite a utilização de programas já prontos, de grande eficiência, baseados no método Simplex.

Uma forma mais geral de equação de continuidade poderia ser utilizada incluindo perdas por evaporação; a avaliação destas perdas, no caso presente, indica que a correção da evaporação é desprezível, não precisando ser incluída.

Analogamente, para os outros reservatórios, a condição de continuidade intertemporal escreve-se:

$$m + 1^{\forall B} = m^{\forall B} + m^{\forall IB} + (m^{\forall D'A} - m^{\forall D''A}) - m^{\forall RB} - (m^{\forall D'B} - m^{\forall D''B}) - m^{\forall SB}$$

$$m + 1^{\forall C} = m^{\forall C} + m^{\forall IC} + (m^{\forall D'B} - m^{\forall D''B}) - m^{\forall RC} - (m^{\forall D'C} - m^{\forall D''C}) - m^{\forall SC}$$

$$m + 1^{\forall D} = m^{\forall D} + m^{\forall ID} + (m^{\forall D'C} - m^{\forall D''C}) - m^{\forall RD} - m^{\forall DD} - m^{\forall SD}$$

$$m + 1^{\forall E} = m^{\forall E} + m^{\forall RE} + m^{\forall RC} + m^{\forall I1} - m^{\forall DE} - m^{\forall SE} + m^{\forall SB} + m^{\forall SC}$$

Para essas equações $m = 1, 12$; se $m = 12$, $m + 1 = 1$

A partir dessas equações e com as mesmas considerações anteriores pode-se conseguir as equações correspondentes à equação (2) para os outros reservatórios.

O segundo conjunto de equações visa a garantir o atendimento das condições sanitárias atrás mencionadas. Como as descargas regularizadas são tratadas com variáveis determinísticas as seguintes equações asseguram esse atendimento.

$$1^{\forall T_{min}} - (m^{\forall RB} + m^{\forall RC}) \leq F^{-1}(1 - \alpha) \quad m^{\forall I1}$$

$$2^{\forall T_{min}} - (m^{\forall RA} + m^{\forall DE}) \leq F^{-1}(1 - \alpha) \quad m^{\forall I2}$$

$m = 1, 12$; se $m = 12$, $m + 1 = 1$

onde:

$m^{\forall I1}$ e $m^{\forall I2}$ – são respectivamente, variáveis, estocásticas associadas às contribuições intermediárias entre os pontos de controle sanitário e as barragens.

As equações a seguir garantem a manutenção das vazões mínimas imediatamente a jusante das barragens e adicionalmente para o reservatório D impõe o atendimento das necessidades de abastecimento urbano.

$$m^R A \geq R_{A_{\min}}$$

$$m^R B \geq R_{B_{\min}}$$

$$m^R C \geq R_{C_{\min}}$$

$$m^R D \geq R_{D_{\min}}$$

$$m^{D'} D = R$$

$$m = 1,12$$

O próximo bloco de equações impõe que, para obras com capacidade já definidas, os valores de volumes armazenados e vazões transferidas não excedam as capacidades disponíveis.

$$m^V B \leq K_B$$

$$m^V C \leq K_C$$

$$m^V D \leq K_D$$

$$m^V E \leq K_E$$

$$m^{D'} B - m^{D''} B \leq K_{BC} \quad m = 1,12$$

$$-(m^{D'} B - m^{D''} B) \leq K_{BC}$$

$$m^{D'} C - m^{D''} C \leq K_{CD}$$

$$-(m^{D'} C - m^{D''} C) \leq K_{CD}$$

$$m^{D'} D - m^{D''} D \leq K_{DF}$$

$$-(m^{D'} D - m^{D''} D) \leq K_{DF}$$

Função — Objeto $m = 1,12$

A exploração do modelo foi conduzida de maneira a obter o mínimo volume útil do Reservatório Jaguari capaz de manter as condições acima; definindo

$$M \geq m^V A$$

e minimizando M

$$m = 1,12$$

obtém-se o efeito desejado.

O número de equações do modelo é da ordem de 200 e o número de variáveis se aproxima de 500. O tempo de execução para modelo desse porte é de 15 minutos utilizando-se um computador IBM 360/40 com 128 k de memória.

Dois observações, relacionadas com os resultados fornecidos pelo modelo descrito neste item, são importantes:

a) — os volumes indicados pelo modelo de programação linear como sendo os armazenados no início de cada mês correspondem somente à componente sazonal; tal fato é um reflexo do caráter cíclico assumido para os insumos aos reservatórios. Uma estimativa do volume útil necessário deve acrescentar a esta componente uma outra de compensação plurianual. A fórmula de HURST, para regulação parcial, foi aplicada ao Reservatório do Jaguari

obtendo-se uma estimativa do volume total (incluindo as componentes sazonal e plurianual) que foi utilizado para os testes através do modelo de simulação.

b) as vazões regularizadas mensais de cada reservatório foram usadas como vazões-meta para o modelo de simulação.

II — 3 — Modelo de simulação

Como já se indicou, a análise por simulação tem o objetivo de verificar os resultados obtidos pelo modelo de programação linear. Tal verificação torna-se necessária devido às hipóteses restritivas assumidas no estabelecimento do insumo hidrológico do modelo de programação linear.

No âmbito deste artigo, simular consiste em antecipar o comportamento futuro do protótipo utilizando um programa de computador digital. Este programa tem sua lógica organizada de maneira a incorporar todos os aspectos essenciais do sistema em análise.

O processo de simulação é efetuado em duas etapas:

— geração de seqüências sintéticas de vazões médias mensais, o que é discutido mais adiante.

— simulação propriamente dita: aceitando os insumos hidrológicos gerados na primeira etapa, procede-se ao balanço intertemporal de massas de acordo com o esquema indicado a seguir;

O comportamento de cada reservatório é controlado por 3 parâmetros: duas vazões-meta fornecidas pela programação linear (para controle de poluição e para abastecimento) e pelo volume disponível no período. O volume disponível em cada período é a soma do volume do reservatório no início desse período com o volume de água afluente durante o mesmo intervalo de tempo.

O esquema de descarga de cada reservatório prevê prioridade mais alta para as vazões destinadas à manutenção de condições sanitárias a jusante dos pontos de reversão. Somente após a liberação desta vazão é que se processa o envio de água para abastecimento da área metropolitana de São Paulo. Como já se mencionou, as vazões-meta indicadas pelo modelo de programação linear, modificadas por análises de sensibilidade quando necessário, constituem objetivos que cada reservatório tenta atingir. Se houver água disponível para tanto, as duas vazões-meta serão cumpridas no período, respeitada a prioridade citada. Caso não exista água suficiente, a vazão descarregada no período será constituída pelo volume disponível com o conseqüente esvaziamento do reservatório. Da mesma maneira que no modelo

de programação linear, adotou-se o intervalo de tempo mensal como período elementar para a simulação.

A estrutura do modelo de simulação é bastante simples, constando das seguintes etapas, para um mês genérico:

a) leitura das vazões sintéticas afluentes, em cada reservatório, para o mês em análise.

b) aplicação do esquema de descarga já indicado; se existir água suficiente em cada um dos reservatórios para atender as descargas apontadas pelo modelo de programação linear essas serão cumpridas. Caso contrário, o reservatório será esvaziado e a descarga resultante será menor do que as previstas. Por outro lado, se o volume no início do período somado à vazão afluente e deduzida da efluente for maior do que o volume máximo do reservatório haverá extravasamento.

c) terminada a etapa precedente calcula-se o novo volume armazenado em cada reservatório e repetem-se as etapas a, b e c.

O processo de simulação digital gera um volume muito grande de informações numéricas. Para o sistema em análise, considerando que cada um dos cinco reservatórios presentes requer quatro variáveis em cada período elementar, chega-se a cerca de 50.000 números que devem ser manipulados estatisticamente de maneira a fornecer indicações da eficiência

com que o sistema atinge seus objetivos. Estas indicações, que se podem traduzir em índices de eficiência, serão apresentadas e discutidas no item III.

Geração das séries sintéticas de vazões

O objetivo da técnica de geração de vazões é construir réplicas do traço histórico que sejam estatisticamente indistinguíveis deste e com duração muito superior. Com este processo consegue-se exibir a variabilidade hidrológica da população dos deflúvios afluentes que pode não estar presente na série histórica que é, em geral, uma amostra de dimensão reduzida desta população.

A hipótese básica aqui assumida é que o processo estocástico descritivo dos deflúvios é fracamente estacionário bastando, portanto, reproduzir, na série sintética, a média, desvio padrão e estrutura de correlação da série histórica, por serem estes os momentos relevantes para a análise do problema de reservação.

O método adotado para a geração das séries estocásticas de vazões está descrito em 1 bastando citar aqui que foi utilizada uma equação de recursão baseada nos logaritmos dos deflúvios. A concordância entre os momentos das séries histórica e sintética foi excelente como se pode avaliar pelo exemplo mostrado a seguir.

RIO JAGUARI PARÂMETROS DAS SÉRIES HISTÓRICA E SINTÉTICA

MÊS	Médias		Desvio padrão		Coeficientes de correlação	
	Hist.	Sint.	Hist.	Sint.	Hist.	Sint.
JANEIRO	43.39	43.41	17.26	17.65	0.67044	0.63747
FEVEREIRO	47.82	48.95	21.29	21.81	0.45689	0.48321
MARÇO	44.86	45.39	16.51	17.02	0.54982	0.58253
ABRIL	27.76	27.88	8.42	8.51	0.74723	0.74946
MAIO	21.52	21.88	6.33	6.21	0.76194	0.76673
JUNHO	18.42	18.63	5.00	4.84	0.72034	0.68810
JULHO	15.18	15.34	3.08	2.98	0.88212	0.86616
AGOSTO	13.43	13.51	2.70	2.81	0.71313	0.70793
SETEMBRO	13.42	13.54	4.52	4.24	0.45929	0.48702
OUTUBRO	16.51	16.55	6.77	6.28	0.56968	0.52875
NOVEMBRO	17.57	17.95	4.85	4.56	0.53003	0.48651
DEZEMBRO	31.90	32.32	18.70	18.14	0.40697	0.33749

As séries sintéticas geradas cobrem um período de 200 anos.

III — ÍNDICES DE EFICIÊNCIA

O objetivo deste item é apresentar a definição dos índices de eficiência já referidos anteriormente. Como se viu, esses índices são computados a partir dos resultados fornecidos pelo modelo de simulação e devem refletir a eficiência com que a configuração e a regra

de operação testadas atingem seus objetivos. No caso em análise os objetivos a serem atingidos são:

— manutenção da vazão objetivo de 33 m³/s para o abastecimento urbano;

— manutenção das vazões necessárias, do ponto de vista sanitário, imediatamente a jusante dos reservatórios e nos pontos 1 (cor-

RESERVATÓRIOS

respondente à cidade de Acima de Paulínea) e 2 (Piracicaba).

A regra de operação adotada foi aquela indicada pelo modelo de programação linear. Variou-se o volume útil do Reservatório do Rio Jaguari em torno do valor indicado pelo modelo de programação linear com o objetivo de testar a sensibilidade dos índices de eficiência

em relação a este fator.

Os índices adotados estão abaixo relacionados:

1 — o primeiro desses índices consiste, como é natural, nas probabilidades das vazões globais e nos pontos 1 e 2 atingirem as metas desejáveis; os valores obtidos, em função dos volumes alocados ao Reservatório do Jaguari, estão mostrados na tabela abaixo.

Vol. útil no Reservatório Jaguari (10 ⁶ m ³)	Probab. de ocorrência de vazões iguais a 33 m ³ /s (%)	Probab. de ocorrência de vazões iguais às recomendadas no ponto 1	Probab. de ocorrência de vazões iguais às recomendadas no ponto 2
300	97,625	99,333	99,458
450	98,405	99,375	99,458
600	98,833	99,375	99,458
750	98,833	99,375	99,458
900	98,960	99,375	99,458

Os requerimentos a jusante de cada reservatório foram cumpridos integralmente em todos os casos. Para todos os fins práticos a confiabilidade do sistema é insensível à variações no volume útil do Reservatório do Jaguari, dentro da gama de valores examinados.

2 — para cada volume, calculou-se o déficit acumulado em relação à vazão objetivo global. Tal índice foi obtido computando-se a diferença entre a vazão de 33 m³/s e aquela efetivamente veiculada e somando-se essas diferenças no horizonte de análise.

Os valores obtidos são mostrados a seguir.

Volume útil no Res. Jaguari (10 ⁶ m ³)	Déficit acumulado (33 - Q)	Déficit médio (33 - Q)
		2400
300	637,03	0,265
450	211,46	0,088
600	211,46	0,088
750	171,96	0,071
900	99,33	0,041

Este índice caracteriza o comportamento médio do sistema. A segunda coluna pode ser interpretada como o déficit de volume acumulado nos 200 anos de simulação enquanto que a terceira fornece a vazão média deficitária no mesmo período.

O sistema mostrou-se bastante sensível, em termos relativos, às variações de volume útil do Reservatório Jaguari quando da utilização deste índice. Por outro lado é preciso notar que a vazão média deficitária máxima é da ordem de 0,08% da vazão objetivo global para

abastecimento; esta porcentagem é muito inferior aos próprios erros relativos cometidos durante a medição das vazões afluentes.

3 — outra caracterização do comportamento do sistema face ao parâmetro escolhido para análise de sensibilidade pode ser conseguida analisando-se os valores médio e mínimo assumidos pela vazão objetivo. Em função do volume tais valores são:

Volume útil no Reserv. Jaguari (10 ⁶ m ³)	Valor médio da vazão Objetivo Global (m ³ /s)	Valor mínimo da vazão Objetivo Global (m ³ /s)
300	32,71	6,48
450	32,84	9,21
600	32,90	12,08
750	32,92	17,48
900	32,94	21,92

A tabela acima demonstra, mais uma vez, a relativa insensibilidade do sistema, avaliada em termos médios. Entretanto, o comportamento do sistema quando avaliado em condições hidrológicas críticas é bastante sensível ao volume do seu maior reservatório.

IV — SUMARIO E CONCLUSÕES

O objetivo deste artigo, como estabelecido na introdução, foi o de apresentar uma metodologia envolvendo modelos de programação linear com restrições probabilísticas e de simulação para o dimensionamento de sistemas como reservatórios múltiplos. Para colocar o problema num contexto realista foram utilizados a configuração, as características e os resultados obtidos durante estudos levados a

cabo para o dimensionamento do Reservatório Jaguari, integrante do Sistema de Produção Cantareira.

Enfatizou-se a necessidade da adoção de uma regra de operação já na fase de planejamento, pois um reservatório com características físicas definidas comporta-se de maneira diferente ao variar-se sua política de operação. A regra de operação aqui utilizada foi das mais simples, consistindo num conjunto de vazões objetivo mensais, fixadas para cada reservatório. Este tipo de operação, que poderia ser chamada de **operação planejada**, é fácil de ser obtida embora não seja das mais eficientes. Seu uso justifica-se somente na fase de dimensionamento do reservatório. Ao decidir-se sobre a regra de operação a ser efetivamente imposta ao sistema é necessário maior aprofundamento para permitir a utilização mais eficiente dos recursos hídricos disponíveis.

Outro ponto que mereceu destaque foi a dificuldade em caracterizar o comportamento de um sistema de reservatórios. Os índices discutidos mostraram que, em termos médios, o comportamento do sistema é pouco sensível a variações no volume do Reservatório Jaguari, na faixa analisada. Por outro lado, em períodos hidrológicamente desfavoráveis, a variação causa mudança sensível na eficiência do sistema. Este fato sugere que em estudos de operação detalhada, procure-se combinar duas regras de operação: para períodos hidrológicamente normais e de emergência. Outro fator importante considerado, no caso específico do Sistema Cantareira, é que o mesmo trabalha integradamente com outros sistemas produtores de água, podendo eventuais déficits no fornecimento serem cobertos por outras fontes.

Finalmente, resta mencionar que, em geral, outros fatores, além dos aqui apresentados, influem no dimensionamento de reservatórios. Entre esses, mencionam-se especialmente o custo incremental (ao qual corresponderá um acréscimo nos diferentes índices) bem como uma avaliação das conseqüências advindas do não atendimento das vazões objetivo.

Somente após efetuar-se uma análise abrangente de todos esses fatores será possível uma decisão quanto ao volume útil a ser alocado a um determinado reservatório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Hermann, R.M. — **Dimensionamento e Operação de Sistemas com Reservatórios Múltiplos** — Tese de Livre Docência, EPUSP, 1971.