KAMEL ZAHED FILHO
Engenheiro Civil, Escola Politécnica da USP, 1978

ALGUMAS METODOLOGIAS PARA O
DIMENSIONAMENTO E OPERAÇÃO
DE RESERVATÓRIOS

Dissertação Apresentada à Es
cola Politécnica da USP para
a obtenção do Título de Mes
trado em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Kokei Uehara
Professor Titular do Departamento
de Engenharia Hidráulica e Sanitá
ria da EPUSP

São Paulo - 1984

FD-561

- RESUMO -

O estudo apresenta uma revisão bibliográfica sobre métodos de dimensionamento e operação de sistemas de reservatôrios simples e múltiplos e analisa uma metodologia de simulação de operação de reservatôrios.

Na revisão bibliográfica de métodos de dimensionamento de reservatôrios simples, é feita uma classificação geral. Alguns métodos são descritos e brevemente analisados.

Na revisão bibliográfica de modelos de dimensionamento e operação de reservatôrios múltiplos é apresentada uma classificação dos métodos segundo suas características e potencialidades de aplicação. São discutidos alguns modelos otimizantes, com destaques para a regra de decisão linear e a programação dinâmica. É apresentado um modelo simplificado de simulação para a introdução dos conceitos desse método.

Para ambos os casos, é descrita a aplicação da hidrologia sintética associada aos modelos de operação e dimensionamento.

A metodologia para o estudo de operação de sistemas de reservatôrios múltiplos, através de modelos de simulação é apresentada com maiores detalhes. São discutidas as necesidades do uso de um modelo de simulação e os procedimentos a serem seguidos durante as etapas de um estudo de operação por simulação.

O modelo de simulação da operação de um sistema de reservatôrios múltiplos, - HEC-5- é analisado em um capítulo específico. São discutidos os propósitos do modelo, suas capacidades e limitações de aplicação. São descritos os diversos critérios adotados no modelo para a operação de um sistema. São

formuladas algumas considerações práticas para a aplicação do modelo. São também apresentadas as evoluções recentes da sua estrutura e uma modificação introduzida no modelo durante o estudo.

Para exemplificar a aplicação do modelo HEG-5, é discutido um caso de estudo da operação de um sistema complexo de reservatórios, onde se analisa os procedimentos e os resultados obtidos.

Algumas considerações e conclusões obtidas do estudo são discutidas, de forma a ponderar sobre a potencialidade e as restrições de aplicação das diversas metodologias analisadas.

- ABSTRACT -

The study shows a literature review of methods for design and operation of single and multiple reservoirs systems. It's also analyzed a simulation procedure for reservoir operation studies.

In the literature review, a general classification of methods for single reservoirs design is made and some methods are briefly described.

A classification of methods for complex reservoir systems design and operation is proposed, according to their features and application potencialities. Some otimizing methods are discussed with special attention to the linear decision rule and dynamic programming. A simplified simulation model is shown to introduce basic concepts of the process. For both cases, the use of synthetic hydrology is described.

The procedure of a multiple reservoir system operation study through simulation models is presented with some details. The need of a simulation model and the procedures to be followed are discussed.

HEC-5, a simulation model of multiple reservoir systems operation and its purposes, capacity and limitations are analyzed. Criteria used for operations and some practical considerations for the model application are described. Latest evolutions of the model and a modification introduced in the model during this study are also shown.

To exemplify the model application, a case study of a complex reservoir system is discussed foccusing on the procedures used and on the results obtained.

Some considerations and conclusions gathered from the study are discussed with the intention of analyze the potenciality and restrictions of the several presented procedures.

- APRESENTAÇÃO -

Este trabalho foi desenvolvido por Kamel Zahed Filho, sob a orientação do Profº Dr. Kokei Uehara, como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia, pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

A escolha do tema do dimensionamento e da operação de reservatórios baseou-se na oportunidade de se dispor de um modelo de simulação da operação de reservatórios e no interesse de um assunto que envolve conhecimentos de obras hidráulicas, hidrologia e análise de sistemas.

Procurando ampliar e aprofundar os conhecimentos neste tema, analisou-se a bibliografia disponível, sobre diversas metodologias de dimensionamento e operação de reservatórios simples e de sistemas de reservatórios múltiplos. A maioria da bibliografia disponível encontra-se na forma de artigos, em geral, muito sucintos, o que dificultou bastante o trabalho.

Ao longo do desenvolvimento dos estudos efetuados para a elaboração do presente trabalho, vislumbrou-se a ampla gama de conhecimentos necessários, em diversas áreas para uma abordagem abrangente do assunto.

Procurou-se, a partir da coletânea de trabalhos efetuada, analisar as técnicas existentes e elaborar uma classificação segundo suas características e os objetivos de aplicação. Uma aplicação prática do trabalho foi exemplificada através da aplicação de um modelo de simulação de operação de reservatórios a um caso de estudo.

A necessidade crescente do uso múltiplo da água, através da construção de grandes sistemas de reservatórios tem exigido uma pesquisa constante nesta área. Pretendeu-se apre

sentar o tema sob uma forma simples e didática, na esperança de contribuir com alguma informação àqueles que pretendem - pesquisar de forma mais aprofundada sobre algumas metodologias de dimensionamento e operação de reservatórios aqui expostas.

- AGRADECIMENTOS -

Inúmeras são as pessoas que colaboraram e incentivaram para a consecução deste trabalho. Aproveito para agradecer a todas as pessoas nos nomes do Prof. Dr. Kokei Uehara, por sua orientação e apoio, do colega Luiz Nicanor L. da Silveira, pelas frutíferas discussões e sugestões, dos engenheiros João Gilberto Lotufo Conejo e Dr. Benedito Pinto F. Braga, Jr., pela colaboração e orientação, da secretária Sônia Maria B. Soares, responsável pela datilografia do trabalho, dos analistas da Diretoria de Planejamento do DAEE e do CCE-USP e das bibliotecárias da Escola Politécnica, do Laboratório de Hidráulica e da Faculdade de Saúde Pública, cuja colaboração foi essencial para a elaboração do estudo.

A meus Pais

ÍNDICE	Pág.	
LISTA DE NOTAÇÕES UTILIZADAS	01	
LISTA DE FIGURAS	05	
LISTA DE TABELAS	07	
Capítulo 1	INTRODUÇÃO	08
Capítulo 2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1.	DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS ÚNICOS	13
2.1.1.	Definição de Termos	14
2.1.2.	Métodos de Período Crítico	15
2.1.2.1.	Métodos que Indicam a <u>Va</u> riação do Volume no Tempo	15
2.1.2.2.	Métodos de Análise de <u>Am</u> plitudes e Déficits	17
2.1.2.3.	Métodos de Análise de <u>Se</u> quências de Vazões Míni- mas	18
2.1.3.	Métodos de Matrizes de Probabili- dades	21
2.1.4.	Métodos que Utilizam Geração <u>Est</u> cástica de Dados	26
2.2.	DIMENSIONAMENTO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE RESERVATÓRIOS MÚLTIPLOS	30
2.2.1.	Generalidades	30
2.2.2.	Classificação dos Modelos	34
2.2.2.1.	Modelos Empíricos e <u>Mode</u> los Racionais	34
2.2.2.2.	Modelos para Planejamento e Projeto e Modelos de <u>O</u> peração em Tempo Real(Lon go Prazo e Curto Prazo)	36
2.2.2.3.	Dimensões do Sistema <u>Estu</u> dado	41

	Pág.
2.2.2.4. Propósitos dos Sistemas de Reservatórios	44
2.2.2.5. Modelos com Objetivos Simples e Múltiplos	46
2.2.2.6. Modelos Determinísticos e Modelos Estocásticos	50
2.2.2.7. Modelos Otimizantes e Modelos de Simulação	59
2.2.3. Discussão de Alguns Modelos Otimizantes	63
2.2.3.1. Programação Linear	63
2.2.3.2. Regra de Decisão Linear	65
2.2.3.3. Programação Convexa	69
2.2.3.4. Programação Dinâmica	70
2.2.4. Discussão de Alguns Algoritmos de Solução da Programação Dinâmica	79
2.2.4.1. Programação Dinâmica Incremental	79
2.2.4.2. Programação Dinâmica Incremental com Níveis Múltiplos	83
2.2.5. Modelos de Simulação	87
2.2.5.1. Um Modelo de Simulação Simplificado	87
2.2.5.2. A Técnica dos Níveis-Índices	95
2.2.6. A Utilização da Hidrologia Sintética na Operação de Sistemas Complexos	99
 Capítulo 3	
METODOLOGIA PARA ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE RESERVATÓRIOS MÚLTIPLOS ATRAVÉS DE MODELOS DE SIMULAÇÃO	102
 3.1. NECESSIDADE DO USO DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO	102
 3.2. ETAPAS DO ESTUDO	105

	Pág.
3.2.1. Identificação do Sistema	105
3.2.2. Determinação dos Objetivos do Estudo e Especificação dos Critérios de Avaliação dos Objetivos	106
3.2.3. Coleta e Análise dos Dados do Sistema	107
3.2.4. Formulação de um Modelo de Simulação	109
3.2.4.1. Regras de Operação do Sistema	112
3.2.5. Calibração do Modelo	116
3.2.6. Organização e Execução das Simulações	117
3.2.7. Análise e Avaliação dos Resultados	119
Capítulo 4 ANÁLISE DE UM MODELO GENERALIZADO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE RESERVATÓRIOS MÚLTIPLOS HEC-5	124
4.1. GENERALIDADES	124
4.2. PROPÓSITOS DO MODELO	125
4.3. REQUISITOS DE "SOFTWARE" E HARDWARE" DO PROGRAMA	126
4.4. CAPACIDADE E LIMITAÇÕES DO PROGRAMA	133
4.5. REPRESENTAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA NO MODELO	134
4.5.1. Características Gerais do Sistema	134
4.5.2. Descrição dos Reservatórios	135
4.5.3. Descrição dos Pontos de Controle	136
4.6. DADOS DE VAZÕES NECESSÁRIAS	137
4.7. AMORTECIMENTO NOS RESERVATÓRIOS	139

	Pág.
4.8. CRITÉRIOS OPERACIONAIS DOS RESERVATÓRIOS	140
4.8.1. Conceitos Gerais	140
4.8.2. Restrições de Operação Intrínse- cas aos Reservatórios	141
4.8.3. Restrições de Operação Impostas por Pontos de Controle a Jusante dos Reservatórios	142
4.8.4. Restrições de Operação para o Ba lanceamento dos Armazenamentos	143
4.8.4.1. Solução Analítica para as Descargas, com Balan- ceamento de Armazenamen- tos	144
4.8.4.2. Reservatórios Equivalentes	149
4.9. PROPAGAÇÃO DAS DESCARGAS DOS RESERVATÓRIOS PELOS CANAIS	151
4.10. CONSIDERAÇÕES SOBRE DERIVAÇÕES DO SISTEMA	153
4.11. OPERAÇÃO DE SISTEMAS COM GERAÇÃO DE ENER- GIA	155
4.12. ANÁLISE DE SEQUÊNCIAS DE CHEIAS	156
4.13. CÁLCULO DA PERDA MÉDIA ANUAL ESPERADA POR INUNDAÇÕES	158
4.14. AVALIAÇÃO DE CONFIGURAÇÕES ALTERNATIVAS DO SISTEMA	160
4.14.1. Avaliação de Reservatórios Alterna- tivos	160
4.14.2. Avaliação de Alternativas de Melho- rias dos Canais e de Medidas Não Estruturais	160

	Pág.
4.15. ANÁLISE DE SISTEMAS DE RESERVATÓRIOS PARA ATENDER A PROPÓSITOS MÚLTIPLOS	162
4.16. CONSIDERAÇÕES PARA A UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA	165
4.16.1. Organização dos Dados de Entrada	165
4.16.2. Opções de Saídas Impressas das Simulações	166
4.16.2.1. Notas Sobre Verificações da Saída do HEC-5	167
4.17. EXEMPLO-TESTE DO MODELO HEC-5	171
4.18. EVOLUÇÕES RECENTES DO MODELO	179
Capítulo 5 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MODELO HEC-5 A UM CASO DE ESTUDO	185
5.1. GENERALIDADES	185
5.2. DESCRIÇÃO DA BACIA DO RIO JUQUIÁ	187
5.3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO	188
5.4. COLETA E ANÁLISE DOS DADOS HIDROLÓGICOS	191
5.5. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA ADOTADA NO MODELO	194
5.6. DESCRIÇÃO E ANÁLISE CRÍTICA DE ALGUMAS SIMULAÇÕES EFETUADAS	198
Capítulo 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	210
Capítulo 7 CONCLUSÕES	215

		Pág.
ANEXO I	- EQUAÇÕES DOS MÉTODOS DE PROPAGAÇÃO DE CHEIAS EM CANAIS, UTILIZADOS NO MODELO HEC-5	220
	Anexo I.1. MÉTODO DE MUSKINGUM	220
	Anexo I.2. MÉTODO DA MÉDIA MÓVEL PROGRESSIVA	221
	Anexo I.3. MÉTODO DE PULS MODIFICADO	222
	Anexo I.4. MÉTODO DO "WORKING R & D"	223
ANEXO II	- ESTRUTURA DE ENTRADA E SAÍDA DO MODELO HEC-5	224
	Anexo II.1. ORGANIZAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA DO MODELO HEC-5	224
	Anexo II.2. OPÇÕES DE SAÍDAS IMPRESSAS DAS SIMULAÇÕES DO MODELO HEC-5	229
BIBLIOGRAFIA		
	- BIBLIOGRAFIA CITADA	238
	- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	247

- LISTA DE NOTAÇÕES UTILIZADAS -

A	- matriz de configuração do sistema, com dimensão $m \times m$, onde m é o número total de pontos de controle.
$a_{i,j}$	- elemento da linha i e coluna j da matriz de configuração do sistema.
AA	- matriz com dimensão $m \times m$, onde m é o número de elementos do sistema.
Ad	- área de drenagem.
$\vec{B}$	- vetor de recursos da programação linear.
Bo	- parâmetro do método de análise de amplitudes e deficiências.
BB	- matriz com dimensão $m \times m$, onde m é o número de elementos do sistema.
b_t	- parâmetro de decisão da regra de decisão linear, no período t .
b_r	- coeficiente de regressão.
$C_1, C_2, \dots, C_n$	- coeficientes de propagação das vazões pelo canal.
$\vec{C}$	- vetor de benefícios da programação linear.
$C(Q_{mi})$	- custo para liberar a vazão meta Q_{mi} .
$Cort$	- componente de correlação de uma série de vazões.
$C_{sj}(\bar{u})$	- custo subjetivo de uma falha do sistema.
$D_{i,t}, Der_{i,t}$	- vazão de derivação do reservatório i , no período t .
$\vec{Dert}$	- vetor derivação, para o instante t .
DPk,t	- retirada de água necessária, no instante t .
d	- taxa de desconto.
F	- valor da função objetivo.
$F(Q_{di})$	- benefício obtido por uma descarga real Q_{di} .
$\vec{F}(\bar{u})$	- vetor função objetivo, função do vetor de decisão $\bar{u}$.
F_1, F_2, F_3	- parâmetros para definição das probabilidades de fracasso.
$F_1(\bar{u}), F_2(\bar{u}), \dots, F_p(\bar{u})$	- função objetivo referente ao objetivo $1, 2, \dots, p$ do vetor de decisão.
$F_o(V_n)$	- probabilidade de ocorrer ao menos uma falha na vida do sistema.

$F_A(V_i)$	- número esperado de falhas nos i anos restantes da vida do sistema.
$F_c(V_i)$	- probabilidade de fracasso no período.
$F_k^*(X_k)$	- retorno ótimo nos estágios restantes, dado o estado atual X_k .
$F_N(V_i)$	- probabilidade de não haver fracasso nos i anos restantes da vida do sistema.
FR_t	- função de probabilidade acumulada dos afluxos.
$f_i^*(V_i)$	- benefício líquido máximo esperado nos i anos restantes da vida do sistema.
$g_i(\bar{u})$	- equações de restrição.
I_n, I_{n-1}	- ordenadas do hidrograma na seção de montante de um trecho de canal
J_i	- variável auxiliar da regra de decisão linear.
K	- parâmetro de propagação do Muskingum.
K_i	- variável auxiliar da regra de decisão linear.
K_h	- expoente de Hurst.
L_k	- limite inferior do valor da função objetivo $F_k(\bar{X})$.
M	- matriz tecnológica da programação linear.
$NCOEF$	- número de coeficientes da equação de propagação, da média móvel progressiva.
$P(q_j)$	- probabilidade acumulada de ocorrência de uma vazão q_j no período j .
$\bar{Q}$	- vazão média de longo período.
$Q_{afl i, t}$	- vazão afluenta média no instante t ao local i .
Q_{di}	- descarga do reservatório no instante i .
Q_{dt}^*	- descarga ótima no período.
$\bar{Q}_{d, t}$	- vetor de descargas, no instante t .
$Q_{loc i, t}$	- vazão local afluenta ao ponto i , no instante t .
$Q_{m, t}$	- vazão de descarga meta.
$\bar{Q}_{min, t}$	- vetor de descargas mínimas.
Q_t	- ordenada de um hidrograma, no instante t .
Q_T	- vazão de demanda total de um ponto de controle.
$QD(1), QD(2)$	- vazões de trabalho do método de propagação de cheias.
Q^t	- valores das vazões padronizadas.
R	- amplitude de variação do diagrama de massas.

$R_k(X_k, U_k)$	- retorno no estágio k , associado ao estado atual - X_k e à decisão U_k .
r	- coeficiente de correlação.
$r_t^{\alpha_1}$	- inverso da função de distribuição acumulada de volumes afluentes ao nível de confiança α_1 .
S_t	- componente de sazonalidade de uma série de vazões.
S	- desvio-padrão.
s	- estado atual.
STAG	- número de períodos de defasagem do valor médio, no método de propagação da média móvel progressiva.
STRAD	- número de ordenadas do hidrograma a serem computadas na média, no método da média móvel progressiva.
T_t	- componente de tendência secular de uma série de vazões.
t_i	- variável pseudo-aleatória.
$\vec{U}$	- vetor de decisão.
$\{\vec{U}\}_k$	- domínio do vetor de decisão, no estágio k .
V	- volume do reservatório.
V_0	- volume armazenado inicial no reservatório.
V_{afl}	- volume afluente ao reservatório.
V_{crit}	- déficit máximo de volume.
$V(1), V(2)$	- volume armazenado em um trecho de canal, no início e fim de um intervalo.
V_d	- volume constante descarregado em um período.
V_{dmin}	- volume regularizado mínimo.
V_{evap}	- volume evaporado em um período.
V_{ext}	- volume extravasado em um período.
$V_{i,t}$	- armazenamento ao final do período t , no reservatório i .
V_{max}	- armazenamento máximo permissível.
V_{min}	- armazenamento mínimo permissível.
$\vec{V}_{max,t}$	- vetor de armazenamentos máximos, no intervalo t .
$\vec{V}_{min,t}$	- vetor de armazenamentos mínimos, no intervalo t .
$V_{Pi,t}$	- armazenamento mínimo permissível entre os reservatórios 1 e i .
$VR(1), VR(2)$	- armazenamentos de trabalho, no início e final do

	período.
V_T	- volume total do armazenamento dentro de uma zona do reservatório.
V_t	- volume armazenado no final do período t .
$\vec{V}_t$	- vetor de armazenamento, no período t .
V_u	- volume útil do reservatório.
V_z	- volume armazenado dentro de uma zona do reservatório, no final de um período.
V_{zo}	- valor do armazenamento dentro de uma zona, no início do período.
v_t	- volume destinado a "free-board" no período t .
$VX_{i,t}$	- volume armazenado no sistema, entre os reservatórios l e i .
W	- valor numérico do coeficiente de penalidade W_l .
W_l	- penalidade hipotética atribuída a uma falha do sistema.
$w_1, w_2, \dots, w_j$	- coeficientes de ponderação.
X^*_k	- valor ótimo da variável de estado X , no período k .
$\vec{X}_{ok}$	- vetor estado inicial, associado ao estágio k .
$\vec{X}_o$	- vetor estado inicial imposto.
$\vec{X}_k$	- vetor de estado, no período k .
$\{X\}_k$	- domínio do vetor de estado X , no período k .
$\vec{X}_f$	- vetor estado final, imposto.
x	- coeficiente do método de propagação de Muskingum.
$\vec{Y}_k$	- vetor afluente ou exógeno, no período k .
α	- nível de confiança.
$\alpha_i, \beta_{i-1}, \gamma_{i-2}$	- constantes para definição da vazão descarregada, no período i , na regra de decisão linear.
β	- limite superior da probabilidade $F_0(V_n)$.
γ	- limite superior da probabilidade $F(V_n)$.
Δt	- intervalo de tempo de cálculo.
ϵ_t	- componente de aleatoriedade de uma série de vazões.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
2.1. Dimensionamento de reservatório pelo método das se quências de vazões mínimas	18
2.2. Histograma dos afluxos ao reservatório	22
2.3. Componentes estatísticas de um hidrograma	27
2.4. Sistema de rotas para o problema do caixeiro viajan te	71
2.5. Algoritmo da programação dinâmica incremental	80
2.6. Elementos e nós para o caso bi-dimensional	81
2.7. Comparação da decomposição convencional do sistema e pela PDIM - Configuração do Sistema	84
2.8. Separação convencional do sistema	84
2.9. Decomposição do sistema, no primeiro nível de PDIM	85
2.10. Decomposição do sistema, no segundo nível de PDIM	86
2.11. Representação esquemática de um sistema de reservatô rios	88
2.12. Solução gráfica do problema de dois reservatórios	93
2.13. Corte longitudinal esquemático de um reservatório	96
2.14. Diagrama de prioridades de esvaziamento dos reserva- tórios	99
4.1. Diagrama de blocos do modelo HEC-5	130
4.2. Inter-relacionamento lógico das subrotinas do modelo HEC-5	131
4.3. Ordem de Chamadas das subrotinas do modelo HEC-5	132
4.4. Representação esquemática do zoneamento de um reser vatório	145
4.5. Representação esquemática de um sistema de dois re servatórios paralelos	146
4.6. Representação esquemática de um sistema de dois re servatórios em série	148
4.7. Representação esquemática de um sistema de três re servatórios	149
4.8. Esquema funcional da nova versão do modelo HEC-5	180
5.1. Sistema Juquiã - Localização esquemática dos reserva tórios e dos postos fluviométricos	188A
5.2. Sistema Juquiã - Perfil Longitudinal do sistema	188B
5.3. Representação esquemática do sistema de reservatórios do Rio Juquiã	194A

	Pág.
5.4. Configuração inicial do sistema adotada no modelo	195
5.5. Configuração final do sistema adotada no modelo	196
5.6. Variação anual da derivação de GD3-GD4-LH3 para Rosas	203
5.7. Configuração do sistema B2-B4-B1-LH1 adotada no modelo desenvolvido	205
5.8. Variação anual do volume armazenado no reservatório de Rosas	207

- LISTA DE TABELAS -

	Pág.
2.1. Matriz de transição de estados (modelo mutuamente exclusivo)	23
2.2. Matriz de probabilidades de armazenamento	23
2.3. Matriz de transição de estados (modelo simultâneo)	25
2.4. Valores da função-objetivo para o quarto estágio	72
2.5. Valores da função-objetivo para o terceiro estágio	72
2.6. Valores da função-objetivo para o segundo estágio	73
2.7. Valores da função-objetivo para o primeiro estágio	73
2.8. Níveis-índices correspondentes aos diferentes <u>armazenamentos</u> no reservatório	97
2.9. Níveis-índices dos reservatórios do sistema	98
4.1. Níveis-índices dos reservatórios do sistema e do reservatório equivalente	150
4.2. Imagem-cartão dos dados de entrada no modelo	172
4.3. Impressão intitulada dos dados de entrada	173
4.4. Saída da simulação do teste	174
5.1. Algumas características dos reservatórios do sistema	190
5.2. Relação dos postos fluviométricos existentes	192

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A necessidade de um planejamento e de um gerenciamento dos recursos hídricos está ganhando reconhecimento crescente, particularmente em regiões, onde as expansões industrial, residencial ou agrícola causam demandas de água presentes e futuras superiores à capacidade natural de fornecimento.

Muitas vezes, a água se encontra na natureza em locais e em épocas que não correspondem às necessidades do homem. Para regularizar o comportamento do regime temporal e espacial das vazões, constroem-se os sistemas de reservatórios.

Um sistema de reservatórios múltiplos consiste em um conjunto de reservatórios, interligados por rios ou obras de interligação, que regularizam as vazões, armazenando os excessos e reduzindo as enchentes durante as cheias e liberando quantidades adicionais de água às vazões naturais nas estiagens. Isto permite um uso racional e contínuo da água.

Um sistema moderno de reservatórios de grande porte é caracterizado por uma operação integrada para atender a propósitos múltiplos. Estes propósitos incluem abastecimento de água para irrigação, indústria e uso doméstico, geração de energia, melhorias da qualidade da água, recreação, preservação da psicologia e da vida animal em geral, controle de cheias e navegação. Por este motivo, a viabilidade, a justificativa e a aceitabilidade pela sociedade, da construção de grandes sistemas de reservatórios obriga a consideração dos diversos propósitos mencionados.

O estudo da operação de sistemas de reservatórios não está afeto apenas aos planejadores do uso dos recursos hídricos,

mas também aos elementos responsáveis pelo projeto e pela operação das obras. Assim, diversos aspectos relativos ao dimensionamento das obras de regularização e controle de um sistema com plexo de reservatórios estão ligados ao conhecimento de sua operação. Por exemplo, o dimensionamento dos volumes dos reservatórios e das estruturas de segurança das barragens exige considerar as demais obras do sistema. A escolha de uma política de operação dos reservatórios adequada pode fazer prescindir a construção de obras adicionais, com evidente redução de custos. Da mesma forma, a operação eficiente de um sistema existente gera benefícios adicionais representativos. Segundo Jamieson (1976), a implantação de uma operação eficiente pode proporcionar um acréscimo de 20% da capacidade útil de um sistema.

Uma vez definidos os propósitos e objetivos de um sistema de reservatórios, resta a tarefa de obter uma operação eficiente dos diversos componentes. O sucesso da solução depende do conhecimento de três informações básicas confiáveis, quais sejam, o conhecimento do estado atual do sistema, o conhecimento das variáveis hidrológicas futuras e a existência de uma política de operação ótima.

O conhecimento do estado atual do sistema envolve a coleta de informações sobre precipitação, níveis, vazões, volumes acumulados nos reservatórios, etc. Nas fases de planejamento ou projeto, esses dados são obtidos de observações anteriores ou são gerados matematicamente. Na fase de operação, podem ser coletados nas formas clássicas de medições, para as operações de longo prazo, ou através de sistemas eficientes de telemetria para as operações de curto prazo. Além disso, a operação do sistema integrado exige um conhecimento profundo das características das diversas obras de regularização e das estruturas de interligação.

O conhecimento das variáveis hidrológicas futuras depende da disponibilidade de um modelo ou um processo de previsão eficiente. Esse aspecto é muito importante, pois uma previsão

incorreta pode reduzir os benefícios advindos de uma boa política de operação. A hidrologia sintética (ou hidrologia operacional), torna-se pois um capítulo importante, que merece um estudo particular.

A procura da política de operação ótima tem sido alvo de pesquisa de inúmeros autores. Os resultados desses estudos constituem-se nas metodologias de dimensionamento e operação de sistemas de reservatórios propostas na literatura.

O desenvolvimento dos métodos modernos de dimensionamento e operação de reservatórios remonta a 1883, quando foi proposto por Rippl o método do diagrama de massas. Os métodos foram evoluindo, passando a considerar o aspecto estocástico das vazões, podendo-se citar os trabalhos de Waitt (1945), Hurst - (1951) e dos matemáticos Moran (1955) e Gani (1958). A evolução dos estudos conduziu ao uso das técnicas de Análise de Sistemas, muito apropriadas a estes casos. O desenvolvimento teórico dos modelos de análise exigiu capacidades computacionais crescentes, obrigando ao uso de grandes computadores e à pesquisa de algoritmos de cálculo simplificativos. O progresso da tecnologia nos últimos 20 anos na área de computadores propiciou a expansão da pesquisa na área de operação de reservatórios.

Os estudos de pesquisa efetuados encontram-se descritos por diversos autores. A variação do enfoque de solução é característico das diferenças existentes nos objetivos dos estudos. Baseando-se numa parcela da bibliografia existente, procura-se aqui, abordar de uma forma simples, algumas características das metodologias existentes e a potencialidade de sua aplicação, em função do tipo do sistema analisado e dos resultados esperados do estudo.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A bibliografia referente ao planejamento e operação de sistemas de reservatórios desenvolveu-se de forma marcante nos últimos vinte anos. Entretanto, sabe-se que as primeiras tentativas de abordar o problema de uma forma analítica remonta ao ano de 1883, quando Rippl introduziu o método do diagrama de massas para o dimensionamento de volumes úteis de reservatórios simples.

Os sistemas de reservatórios foram se tornando mais complexos ao longo do tempo, quando foram introduzidas operações conjuntas de reservatórios para atender a um ou mais propósitos, inclusive com transferência de água entre reservatórios. Consequentemente, as técnicas utilizadas tiveram que ser desenvolvidas para acompanhar o desenvolvimento desses sistemas.

Das técnicas simplificadas, onde não se considerava análises sequenciais das vazões, evoluiu-se para os modelos atuais de simulação e de otimização de sistemas de reservatórios múltiplos.

Não existe, na realidade, uma metodologia consagrada para o estudo da operação de sistemas de reservatórios, uma vez que os casos de aplicação são muito distintos, sob vários aspectos. A complexidade e estrutura dos modelos de operação dependem do número de reservatórios do sistema. Os modelos sofisticados de otimização da operação de reservatórios possuem restrições quanto ao número de reservatórios do sistema, pois o esforço computacional requerido cresce exponencialmente, o que tem sido denominado na literatura por "praga da dimensionalidade". Outros fatores que distinguem os modelos são: o número de propósitos de uso da água que devem ser atendidos; o intervalo de

operação considerado e o estágio de aplicação, quer seja em planejamento, projeto ou operação.

Os estudos de operação de reservatórios abrangem áreas de conhecimento da Economia, da Hidráulica, da Hidrologia, das Ciências Ambientais, da Análise de Sistemas e de outras áreas. O levantamento bibliográfico efetuado não teve a intenção de ser abrangente, mas procurou definir as tendências de utilização das diversas metodologias existentes para os estudos de operação de reservatórios. Os modelos de operação necessitam, algumas vezes, de técnicas auxiliares, como previsão ou geração de vazões, cálculo de amortecimento de ondas de cheias em canais e análise de benefício-custo, chegando mesmo a extrapolar o limite da área de Engenharia Civil, exigindo o conhecimento da operação de sistemas computacionais e sistemas de telemetria e teleoperação. Entretanto, qualquer citação de metodologias dessas áreas terão por mérito complementar de forma parcial as informações referentes à operação de sistemas de reservatórios.

As técnicas utilizadas para o planejamento ou projeto de sistemas de reservatórios diferem no objetivo das técnicas aplicadas à operação dos reservatórios, pois nas primeiras, quer-se determinar o volume dos reservatórios, para atender a uma ou várias demandas, enquanto, as últimas procuram orientar a programação de armazenamentos e descargas ao longo do tempo para reservatórios com dimensões conhecidas. Algumas técnicas podem ser empregadas nos dois casos de aplicação citados, enquanto outras são específicas para determinadas fases de estudo.

As técnicas utilizadas para estudo da operação ou dimensionamento de sistemas de reservatórios múltiplos podem também ser aplicadas a sistemas com apenas um reservatório. É imediato concluir que o inverso não é verdadeiro.

A seguir são descritos alguns métodos para o dimensionamento de sistemas com reservatórios únicos.

2.1.

DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS ÚNICOS

O volume útil necessário a um reservatório para atender aos seus propósitos de projeto depende de três fatores básicos:

- variabilidade das vazões afluentes;
- quantidade de água necessária para atender à demanda; e
- grau de confiabilidade no atendimento da demanda.

Os métodos de determinação do volume útil de reservatórios podem ser classificados como técnicas preliminares e técnicas de projeto final.

As técnicas preliminares visam eliminar algumas alternativas de locais ou dimensões de reservatórios, de maneira a se prosseguir com estudos mais detalhados nos demais casos. Nestas técnicas são admitidas algumas hipóteses simplificadoras como:

- descargas constantes dos reservatórios ao longo do tempo;
- as perdas por evaporação e sedimentação são ignoradas;
- não se consideram as probabilidades de insucesso do reservatório; e
- não são consideradas as características sazonais das vazões.

As técnicas de projetos final são mais precisas e procuram se aproximar da realidade, levando em consideração:

- propriedades estocásticas das vazões afluentes;
- variação sazonal das descargas;

- possibilidade de restrições de demanda;
- efeito da evaporação; e
- probabilidade da demanda não ser atendida.

Os processos utilizados na determinação do volume útil de um reservatório podem ser divididos em três grandes grupos:

- Métodos de Período Crítico: definem a capacidade do reservatório como a diferença do volume de água descarregado de um reservatório, inicialmente cheio, e o volume afluente no período de estiagem mais crítico.
- Métodos de Matrizes de Probabilidades: consistem em desenvolvimentos da teoria de armazenamento de Moran (1959), que propôs, inicialmente uma equação integral relacionando afluxos, descargas e volumes armazenados. Gould (1961) apresentou um processo prático de aplicação, discretizando essas variáveis ao longo do tempo.
- Métodos baseados na Geração Estocástica de Vazões: embora conhecidos há mais de 60 anos, sô foram desenvolvidos na década de 1960, com o advento dos computadores de alta velocidade.

2.1.1.

Definição de Termos

Para melhor clareza, serão definidos alguns termos que serão utilizados com frequência ao longo do texto.

Volume Útil: Volume compreendido entre o nível normal e o nível mínimo de operação da tomada d'água mais baixa.

Reservatório de Regularização Intra-Anual: projetado para fornecer água em períodos de estiagem menores que um ano.

Reservatórios de Regularização Pluri-Anual: projetados para a tender à demanda em períodos de estiagem superiores a um ano.

Reservatório Finito: conceito teórico de um reservatório que pode extravasar e ser operado vazio.

Reservatório Semi-Infinito: conceito teórico de um reservatório que pode extravasar, mas nunca esvazia.

Reservatório Infinito: conceito teórico de um reservatório que pode esvaziar, mas não pode extravasar.

Regra de Operação: critérios de decisão para determinar o volu me de água descarregado em um período, em função da demanda, das vazões afluentes e do nível do reservatório.

Período Crítico: intervalo em que o nível do reservatório sai da condição de "totalmente cheio" para uma condição de "vazio", sem extravasamento nesse período.

2.1.2.

Métodos de Período Crítico

Os métodos de período crítico podem ser divididos em três tipos principais. O primeiro são os métodos que indi cam a variação do volume ao longo do tempo. O segundo são os métodos baseados na análise de amplitudes e déficits. O tercei ro são os métodos baseados nas sequências de vazões mínimas.

2.1.2.1.

Métodos que Indicam a Variação do Volume no Tempo

Dentro do primeiro grupo está classificado o método do diagrama de massas, proposto por Rippl (1883). Na concepção original desta técnica, utilizava-se apenas os dados históricos, o que implicava na hipótese que a série observada é a mais se vera possível. Essa limitação foi sobrepujada pelo uso combina

do das técnicas de geração de séries sintéticas de vazões, que introduzem o caráter estocástico do problema. Essa técnica original ainda é utilizada, pela sua facilidade de aplicação, e por ser conceitualmente apropriada, uma vez que considera a correlação serial e outros parâmetros das vazões. Sua grande limitação é considerar as descargas do reservatório constantes. Pode-se considerar uma variação sazonal, mas é difícil incluir restrições em função do volume armazenado.

Uma variante desse método é o diagrama de massas dos resíduos (diferença entre vazão afluente e descarga) proposto por King (1920). Sua vantagem em relação ao método de Rippl era a apresentação gráfica.

Ainda dentro do primeiro grupo está a análise de simulação. Utiliza-se a equação da continuidade temporal, sujeita às restrições do reservatório. O valor da capacidade do reservatório deve ser escolhido *a priori*, verificando-se a probabilidade de insucesso para o volume escolhido. O processo de simulação possui um caráter estocástico quando se utiliza simultaneamente séries geradas estocasticamente. O processo considera a sazonalidade das vazões e as regras de operação podem ser função do volume armazenado.

Um outro método de análise da variação do volume com o tempo é o do reservatório semi-infinito, proposto por Hazen (1914). Talvez esse método tenha sido o primeiro a considerar a probabilidade de insucesso para um dado volume. O reservatório possui apenas um limite superior, sem possuir limite inferior. Entretanto, quando esse método é aplicado a um reservatório finito, causa uma superestimação do volume necessário para estar sujeito a uma dada probabilidade de insucesso.

2.1.2.2.

Métodos Baseados na Análise de Amplitudes e Déficits

A amplitude $\bar{e}$ é definida como sendo a soma dos máximos valores acumulados dos desvios da vazão afluente em relação à vazão média. É igual ao volume útil, se a descarga regularizada for a vazão média.

Dentro desta categoria, pode-se citar o método de Hurst (1951, 65) e o método dos picos sequenciais de Thomas e Burden (1963).

Hurst correlacionou a amplitude (R) com a extensão do período de dados (N), através da expressão:

$$R/S = (N/2)^{K_h} \quad (2.1)$$

S - é o desvio padrão dos dados

K_h - é um expoente, cujo valor médio é 0,72 e desvio-padrão - 0.09

Para se obter o volume do reservatório são utilizadas as expressões:

$$V = R \quad (2.2)$$

se a vazão regularizada é igual à vazão média ou

$$\log V/R = -0.08 - 1.05(\bar{Q} - B_0)/S \quad (2.3)$$

para vazão regularizada menor que a vazão média, onde B_0 é um parâmetro.

Joy (1970) verificou que a equação acima não é a de melhor aderência e os resultados experimentais apresentam grande dispersão em relação aos valores obtidos pela expressão. A probabilidade de insucesso está implícita em $1/N$.

O método dos picos sequenciais, proposto por Thomas e Burden (1963) é idêntico ao diagrama de massas dos resíduos. Neste método repete-se a série histórica duas vezes. Possui as mesmas limitações e vantagens do método de Rippl (1883).

2.1.2.3.

Métodos de Análise das Sequências de Vazões Míнимas

No terceiro grupo de métodos de período crítico, em que se utilizam as séries de vazões mínimas, encontram-se alguns métodos determinísticos, como o de Waitt (1945) e outros probabilísticos, que podem utilizar vazões anuais, mensais ou diárias.

O método determinístico de Waitt (1945) consiste em um algoritmo em que se escolhe as vazões mínimas médias para diversas durações. A seguir plotam-se os volumes afluentes de cada duração, em função da duração (figura 2.1). A maior distância vertical entre essa curva e uma reta que passa pela origem e cuja inclinação é a vazão regularizada é o volume crítico. O critério proposto consiste em se adicionar mais um volume equivalente a um ano de vazão regularizada.

Figura 2.1. - Dimensionamento de Reservatório pelo Método das Sequências de Vazões Mínimas

Dos métodos probabilísticos que utilizam as vazões anuais, citam-se os de Alexander (1962), Dincer (1966) e Gould (1964).

Alexander (1962) desenvolvendo o método de Waitt - (1945) construiu uma série de curvas de vazões de estiagem, para diversas probabilidades de ocorrência, deduzindo relações generalizadas de volume-vazão regularizada-probabilidade. Admite que as vazões médias anuais sigam uma distribuição gama de dois parâmetros. Admite também que as vazões médias anuais são independentes e que o reservatório está cheio no começo do período crítico. Além das limitações das hipóteses consideradas, não considera as variações sazonais das vazões, nem as perdas por evaporação. Sua vantagem é ser um método rápido, útil para uma avaliação preliminar, além de considerar as probabilidades de insucesso.

Dincer (1966) admite que as vazões médias anuais sejam independentes e distribuídas normalmente. Por hipótese, o período crítico é longo, de forma que as vazões tendam a uma distribuição normal. Esse método fornece resultados confiáveis para vazões regularizadas superiores a 50% da vazão média.

Gould (1964) deduziu um método, independentemente de Dincer (1966), mas sua única diferença em relação a esse método, é que aproxima a distribuição de vazões por uma Gama de um parâmetro.

Os métodos que utilizam as vazões médias mensais são utilizados para o dimensionamento de reservatórios pluri-anuais. São análogos aos métodos que utilizam vazões anuais, apenas que a distribuição de probabilidades dos afluxos é obtida empiricamente, através dos dados históricos. Pode-se utilizar séries superpostas ou séries independentes de vazões.

No método de Thompson (1950) utilizam-se sequências superpostas. Em uma série histórica de N meses, há $(N-n+1)$ sub-

sequências superpostas, com duração de n meses consecutivos. Pode-se dispor essas sequências em ordem decrescente de severidade, associando-se uma probabilidade a cada uma delas. Constrói-se um gráfico de vazões acumuladas em função da duração para cada probabilidade. Analogamente ao método de aproximação por vazões mínimas, obtém-se o volume do reservatório para diversas probabilidades. Em uma análise por simulação, o número de insucessos seria maior; entretanto, devido à sobreposição das sequências, o período crítico é considerado várias vezes, aumentando o número de falhas. A sub ou super-estimação do volume do reservatório dependerá, pois da extensão do período crítico.

O método de Stall (1962) não admite a sobreposição de sub-sequências. Uma vez determinada a mais severa, seus dados são excluídos da análise e assim, sucessivamente, para as outras sub-sequências.

Ambos os métodos ocasionam ora uma superestimação, ora uma sub-estimação dos volumes. Além disso, os erros que ocasionam essas falhas não são facilmente quantificáveis.

Os métodos que utilizam as vazões diárias são aplicados para o dimensionamento de reservatórios de regularização infra-anual. No método adotado pelo United States Geological Service (USGS), constrói-se curvas de frequência de vazões mínimas para diversas durações em um papel de probabilidade de extremos. Para uma dada probabilidade, tomam-se os valores das vazões mínimas para várias durações e plotam-se os volumes acumulados em função das durações, analogamente ao método de Waitt (1945). Neste tipo de método, é difícil considerar vazões regularizadas variáveis. Se se dispuser de curvas de frequência de vazões mínimas, o método torna-se rápido e simples.

Todos os métodos expostos, baseados em período crítico apresentam uma ou outra falha em suas hipóteses. Os métodos que não consideram a probabilidade de insucesso (Rippl, Hurst, Waitt) são desaconselhados para aplicação em projeto fi

nal. Dentre os demais, os métodos de Alexander e de Gould parecem ser adequados para uma avaliação preliminar. O método de simulação é uma técnica útil, que mostra claramente o comportamento dos volumes armazenados nos reservatórios para descargas regularizadas segundo uma política de operação qualquer.

2.1.3.

Métodos de Matrizes de Probabilidades

Os métodos de matrizes de probabilidades foram de desenvolvidos a partir da teoria de armazenamentos de Moran(1959). Na conceituação original de sua teoria, Moran considerou que o tempo e o volume são variáveis contínuas. Esse tipo de modelo foi utilizado por Gani (1955), Gani e Prabhu (1958, 59) e Gani e Pyke (1960, 62). São modelos de difícil aplicação, de interese apenas teórico.

Uma evolução desta teoria, tornando o método de a aplicação prática conduziu a técnicas que consideram o tempo como variável descontínua e os volumes como variáveis contínuas, Moran (1955) deduziu equações integrais, que relacionam afluxos, descargas e capacidade do reservatório, utilizando as funções probabilidades dos afluxos e dos armazenamentos. O modelo de Prabhu (1958) é o que possui maior potencial de aplicação, mas sua solução é muito complexa.

Existem ainda aqueles em que o tempo e os volumes são ambos variáveis discretas, proposto inicialmente por Moran (1954). Dentre estes métodos estão envolvidos os que utilizam matrizes de probabilidades e os métodos analíticos empíricos.

Dos métodos que utilizam matrizes de probabilidades citam-se o modelo mutuamente exclusivo de Moran (1954), o modelo simultâneo de Moran (1954) e o método de Gould (1961).

O modelo mutuamente exclusivo de Moran (1954) considera o tempo sub-dividido em uma estação úmida (onde são considerados todos os afluxos, sem que seja feita alguma descarga) seguido por uma estação seca (são efetuadas as descargas e não há afluxos). Escolhe-se um volume unitário arbitrário, de forma que os afluxos, as descargas e a capacidade de armazenamento sejam múltiplos deste valor. As equações que regem um modelo mutuamente exclusivo são do tipo:

$$V_{t+1} = 0 \quad \text{se} \quad V_t + V_{afl t} \leq V_d \quad (2.4)$$

$$V_{t+1} = V_t + V_{afl t} - V_d \quad \text{se} \quad V_d < V_t + V_{afl t} < V \quad (2.5)$$

$$V_{t+1} = V - V_d \quad \text{se} \quad V \leq V_t + V_{afl t} \quad (2.6)$$

onde:

V_t = armazenamento no início do período t

V_{t+1} = armazenamento no início do período $t+1$

V = capacidade do reservatório

$V_{afl t}$ = afluxo durante o período t

V_d = volume constante descarregado ao final de um período.

Para maior clareza, cita-se um exemplo extraído de McMahon (1978). Seja um reservatório com 2 unidades de capacidade e com uma vazão regularizada de 1 unidade, com vazões afluente distribuídas segundo o histograma da figura 2.2.

Figura 2.2. - Histograma dos Afluentes ao Reservatório

A matriz de transição de estados representada na tabela 2.1 indica as probabilidades do reservatório passar de um estado inicial a um final.

Tabela 2.1. - Matriz de Transição de Estados (modelo mutuamente exclusivo) - Estado Inicial (V_t)

Estado Final (V_{t+1})	VOL.	(VAZIO) 0	1	2 (CHEIO)
	(VAZIO) 0	$\frac{1}{5} + \frac{2}{5} = 0.6$	$\frac{1}{5} = 0.2$	
	1	$\frac{1}{5} + \frac{1}{5} = 0.4$	$\frac{2}{5} + \frac{1}{5} + \frac{1}{5} = 0.8$	
	(CHEIO) 2	0	0	
	Σ	1	1	

Supondo-se o reservatório vazio no início do primeiro ano, a distribuição de probabilidades de armazenamentos fica automaticamente fixada em:

Tabela 2.2. - Matriz de Probabilidades de Armazenamentos

ARMAZENAMENTO	PROBABILIDADE
0	1
1	0
2	—

Ao final do primeiro ano, a matriz de probabilidades de armazenamento será:

$$\begin{bmatrix} 0.6 & 0.2 \\ 0.4 & 0.8 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1.0 \\ 0.0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.6 \\ 0.4 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Matriz de Estado Estado
Transição Inicial Final

Ao final do segundo ano será modificada para:

$$\begin{bmatrix} 0.6 & 0.2 \\ 0.4 & 0.8 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.6 \\ 0.4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.44 \\ 0.56 \end{bmatrix} \text{ e assim sucessivamente}$$

até ... $\begin{bmatrix} 0.33 \\ 0.67 \end{bmatrix}$ (2.8)

Após um certo número de anos, a matriz de probabilidades de armazenamentos tende a valores constantes, independentemente da hipótese inicial adotada.

O modelo exclusivo de Moran (1954) superestima as probabilidades de esvaziamento e extravasamento, pelo fato de admitir que os afluxos sempre precedem as descargas. O reservatório nunca pode estar cheio, sendo o volume máximo possível, a capacidade do reservatório subtraída do volume regularizado em um período de cálculo.

O modelo simultâneo de Moran (1954) admite que as vazões afluentes e as descargas ocorram simultaneamente. As equações que regem o modelo são do tipo:

$$V_{t+1} = 0 \quad \text{se} \quad V_t + V_{afl t} \leq V_d \quad (2.9)$$

$$V_{t+1} = V_t + V_{afl t} - V_d \quad \text{se} \quad 0 \leq V_t + V_{afl t} - V_d \leq V \quad (2.10)$$

$$V_{t+1} = V \quad \text{se} \quad V_t + V_{afl t} - V_d \geq V \quad (2.11)$$

Para o exemplo anterior, a matriz de transição de probabilidades se modifica para:

TABELA 2.3. - MATRIZ DE TRANSIÇÃO DE ESTADOS (MODELO SIMULTÂNEO) ESTADO INICIAL (V_t)

Estado Final (V_{t+1})	VOLUMES	(VAZIO) 0	1	(CHEIO) 2
	(VAZIO) 0	$\frac{1}{5} + \frac{2}{5} = 0.6$	$\frac{1}{5} = 0.2$	0
	1	$\frac{1}{5} = 0.2$	$\frac{2}{5} = 0.4$	$\frac{1}{5} = 0.2$
	(CHEIO) 2	$\frac{1}{5} = 0.2$	$\frac{1}{5} + \frac{1}{5} = 0.4$	$\frac{2}{5} + \frac{1}{5} + \frac{1}{5} = 0.8$
	Σ	1	1	1

Analogamente ao que foi exposto anteriormente conclui-se que a matriz de probabilidades de armazenamentos finais será

$$\begin{bmatrix} 0.13 \\ 0.25 \\ 0.62 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{- vazio-volume} = 0.0 \\ \text{volume} = 1.0 \\ \text{cheio-volume} = 2.0 \end{array}$$

Este modelo é mais realista que o anterior.

Em ambos os modelos pode haver sub-estimação do volume obtido, pois as vazões são consideradas independentes. Uma vantagem desses modelos é que os resultados obtidos independem da condição inicial adotada.

Gould (1961) modificou o modelo simultâneo de Moran (1954) para considerar a sazonalidade e a correlação serial das vazões. A matriz de transição utiliza as vazões anuais, mas considera também as vazões mensais através de uma análise de simulação.

Neste método, consideram-se conhecidos o volume do reservatório e a vazão regularizada, determinando-se a probabilidade de insucesso. A determinação do volume do reservatório é feita por forma iterativa.

Divide-se o reservatório em um certo número de zonas e obtém-se a matriz de transição, fazendo variar a condição inicial. A matriz de probabilidades de fracassos é obtida, anotando-se em uma matriz, o número de meses em que o reservatório permanece vazio, em cada ano, e para cada condição inicial. Multiplica-se a matriz de probabilidades de armazenamentos (permanente) pela matriz de probabilidades de insucessos, obtendo-se a probabilidade de insucesso do reservatório para o volume considerado.

A vantagem do método de Gould (1961) é que não é necessário se admitir uma distribuição teórica de probabilidades das vazões. Além disso, podem-se considerar regras de operação complexas. Como os modelos de Moran (1954), não considera a correlação serial das vazões anuais.

Dentre os métodos analíticos empíricos que se utilizam dos conceitos de matriz de probabilidades de armazenamentos estão as equações empíricas de McMahon (1976) e o método de Hardison (1965). Estes métodos têm validade discutível para uma aplicação generalizada.

2.1.4.

Métodos que Utilizam Geração Estocástica de Dados

O terceiro grupo de métodos de determinação de volumes de reservatórios contém, basicamente, as mesmas técnicas expostas anteriormente. A diferença consiste em que estes utilizam uma série de dados de vazões geradas sinteticamente.

Estas técnicas requerem o uso de um modelo de geração de séries estocásticas, que produza séries de vazões com as mesmas propriedades estatísticas da série histórica.

O uso dessas técnicas produz como resultado uma curva de volumes associados às frequências de insucesso. Serão aqui citados brevemente alguns modelos de geração a título de ilustração.

Convém, rapidamente, que se exponha o conceito de uma série temporal, utilizado nos diversos métodos.

Uma série temporal é uma sequência de valores dispostos na ordem de sua ocorrência no tempo.

Do ponto de vista estocástico os dados de vazão (Q_t) podem ser considerados como consistindo em quatro componentes: tendência (T_t), sazonalidade (S_t), correlação (Cor_t) e aleatoriedade (E_t). Graficamente, pode-se representar esses componentes da forma seguinte.

Figura 2.3. Componentes Estatísticos de um Hidrograma

$$Q_t = T_t + S_t + Cor_t + E_t \quad (2.13)$$

Uma série temporal é estacionária (tendência nula) se suas propriedades estatísticas são invariantes com o tempo. Para eliminar o efeito de não estacionariedade dos dados de vazões, pode-se padronizá-los por:

$$Q'_t = \frac{Q_t - \bar{Q}}{S} \quad (2.13)$$

onde: Q_t são os valores de vazões observadas

$\bar{Q}$ é o valor médio das vazões

S é o desvio-padrão das vazões

Q'_t são os valores padronizados das vazões.

A persistência dos valores de uma série temporal é medida pelo coeficiente de correlação serial de um período com outro de alguns períodos anteriores. Alguns modelos adotam uma persistência de um período e são chamados de modelos de primeira ordem (lag-one). Outros adotam períodos de persistência maiores e são chamados de memória longa.

Hazen (1914) foi o primeiro pesquisador que utilizou dados sintéticos de vazões. Utilizou os dados de vazões anuais padronizados de 14 rios do noroeste dos EUA para construir uma série com 300 anos de dados.

Sudler (1927) propôs o primeiro modelo de geração realmente estocástico. Embaralhava 50 valores de vazões anuais e retirava-os sem reposição. Isto foi repetido 20 vezes, criando uma série de 1000 anos.

Barnes (1954) gerou uma série de 1000 anos, adotando uma distribuição normal aos dados de vazões anuais. Seu método difere dos anteriores por utilizar uma distribuição teórica de probabilidades.

Os modelos markovianos foram introduzidos por Markov, sendo Brittan (1961) quem propôs um modelo de geração de vazões anuais na forma:

$$Q_{i+1} = \bar{Q} + r (Q_i - \bar{Q}) + t_i \cdot S(1-r^2)^{1/2} \quad (2.14)$$

onde:

Q_i, Q_{i+1} = vazões geradas nos anos i e $i+1$
 $\bar{Q}$ = vazão média
 r = coeficiente de correlação
 t_i = variável pseudo-aleatória
 S = desvio-padrão das vazões

Este modelo adota que as vazões sejam normalmente distribuídas. Os valores da média, desvio-padrão e coeficiente de regressão da série gerada são mantidos iguais aos da série histórica.

Thomas e Fiering (1962) utilizaram um modelo idêntico ao anterior, onde as vazões são geradas em períodos mensais.

Esses modelos valem para vazões normalmente distribuídas. Para vazões com outras distribuições pode-se adotar três procedimentos: modificar os t_i (normais) por uma transformação apropriada; modificar os parâmetros das vazões e os algoritmos do modelo, de tal forma que as vazões geradas tenham a mesma distribuição que as teóricas; ou gerar vazões normalmente distribuídas e aplicar equações de normalização.

Thomas e Burden (1963) e Kirby (1972) propuseram uma transformação da variável normal reduzida t_i em outra, com distribuição gama (assimétrica).

Matalas (1967) apresentou equações de transformação de momentos, que preservam os momentos e os coeficientes de correlação. Admitiu que os logaritmos das vazões sejam normalmente distribuídos.

Beard (1972) propôs um método de normalização das vazões, válido para vazões anuais. Esse método não preserva os coeficientes de correlações seriais.

Uma evolução desses modelos markovianos de ordem 1, conduziu aos modelos de memória longa, onde se encontram o ARMA e o ARIMA. Podem ser citados ainda o Broken Line e o Fractional Gaussian Noise Model. Para um melhor conhecimento dos modelos ARIMA, pode-se referenciar o trabalho de Braga (1979).

2.2.

DIMENSIONAMENTO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE RESERVATÓRIOS MÚLTIPLOS

2.2.1.

Generalidades

Os modelos utilizados para o dimensionamento e operação de sistemas de reservatórios múltiplos são muito mais complexos do que aqueles aplicáveis a reservatórios únicos. Além da restrição de ser mantida uma continuidade temporal das vazões, é necessário também a manutenção de um balanceamento espacial das vazões.

Em geral, a água se encontra na natureza em locais afastados dos centros de consumo e distribuída no tempo de uma forma que não se adapta à demanda. Dessa forma, são necessários os reservatórios de regularização e de controle de cheias.

Nos sistemas simples, com apenas um reservatório, o objetivo primordial da análise da operação do reservatório é, numa fase de planejamento ou projeto, definir o volume necessário para atender a uma certa demanda, sujeito a uma certa probabilidade de fracasso. Numa fase de operação, procura-se otimizar o benefício líquido do sistema, atendendo-se à demanda de jusante e às restrições existentes.

Nos sistemas de reservatórios múltiplos, surgem duas novas decisões, que aumentam muito o grau de dificuldade do problema. Numa fase de planejamento, é necessário definir, primeiramente, quais os reservatórios propostos do sistema que devem ser construídos e, a seguir, definir qual a combinação de volumes individuais que traz o benefício líquido máximo. Numa fase de operação, é preciso definir a combinação de descargas e armazenamentos dos reservatórios já existentes em cada período, além da definição dos volumes que devem ser intercambiados entre os reservatórios, quando houver reversões.

A literatura existente é bem mais recente que a de métodos para dimensionamento e operação de reservatórios únicos. Entretanto, é também bastante extensa.

Uma análise das diversas metodologias existentes mostra que não existe uma classificação bem definida segundo um único critério, uma vez que a maioria dos métodos constitui-se de uma série de técnicas combinadas de formas diversas. Pode-se, entretanto, classificá-los segundo uma série de critérios distintos.

Os modelos de operação de sistemas de reservatórios podem ser ou não otimizantes. Nos modelos otimizantes, a solução final obtida atende a uma maximização do benefício líquido do sistema de uma forma direta. Os modelos não otimizantes, eventualmente, obtêm a política ótima através de um processo iterativo. Os modelos otimizantes são também utilizados conjuntamente com os modelos de simulação. Estes servem para definir uma política inicial de operação a ser otimizada, numa fase anterior à otimização. Na fase de otimização, servem para representar as equações de restrição do sistema. Posteriormente à otimização, geralmente feita com uma série não muito extensa de dados, servem para verificar a política de operação obtida, utilizando uma série de dados prolongada.

Os métodos otimizantes podem ser classificados quanto à forma das equações envolvidas, e quanto à separabilidade da função-objetivo. Diferenciam-se nesta classificação os modelos de programação linear, não linear, programação convexa e programação dinâmica.

A programação linear tem por peculiaridade a forma linear de todas as equações. A programação convexa é semelhante à programação linear, com a exceção de que permite o uso de uma equação exponencial como função objetivo, aproximada por um polígono (piecewise linearization). A programação dinâmica não

restringe o formato das equações.

As programações linear e convexa sofrem a restrição da hipótese simplificadora da forma das equações. A programação dinâmica sofre o problema do enorme esforço computacional exigido. Ao contrário da programação linear, que possui algoritmos padronizados, a programação dinâmica apresenta uma enorme diversidade de técnicas de solução, explicada pela diferente natureza dos problemas e pela tentativa de redução de memórias de cálculo e tempo computacional exigidos.

Quanto à abordagem estatística, os modelos podem ser classificados como estocásticos ou determinísticos.

Os modelos de simulação admitem que as vazões de um período futuro são conhecidas ou podem ser determinadas por um modelo de previsão. Os modelos estocásticos consideram os dados de vazões da série histórica como uma amostra do universo. Procuram a otimização do problema através da inferência da distribuição de probabilidades no universo. Nestes modelos podem ser introduzidas restrições probabilísticas, que permitem certas violações das equações de restrições com uma dada frequência, fixada segundo critérios exógenos e conhecida como nível de risco.

Dentro de uma classificação de racionalidade da determinação da política de otimização, os modelos otimizantes e os de simulação são ditos racionais. Os métodos empíricos são aqueles que apresentam uma política de operação pré-fixada, com base em critérios e experiência do operador.

Os modelos podem ser aplicáveis em uma ou diversas fases da vida do sistema de reservatórios. Existem os que são aplicados numa fase de planejamento preliminar, que possuem um caráter simplificado. Seu objetivo é proporcionar uma análise de sensibilidade dos elementos do sistema sobre o benefício líquido global. Outros são aplicados nas fases de projeto e de operação do sistema. O projeto de um sistema de reservatórios inclui

a determinação dos volumes dos reservatórios a serem construídos em cada local proposto. O projeto e a operação de um sistema são considerados ótimos, quando os benefícios líquidos, que são função das dimensões dos reservatórios e da política de operação são maximizados. A otimização está sujeita à imposição de diversas restrições, incluindo-se as de ordem hidrológica, econômica, social, institucional, política e legal (Trott e Yeh (1973)). Para se obter a solução ótima, o sistema deve ser operado mantendo uma estreita correlação entre a atuação do sistema simulado pelos modelos e o sistema real. Deve-se, pois utilizar, nesses modelos, procedimentos operacionais que sejam consistentes com uma forma factível de executá-los.

Uma outra classificação importante dos modelos de operação é quanto ao intervalo de operações adotado. Os modelos de longo prazo, que podem ter períodos de operação anual, trimestral ou mensal, por exemplo, têm por objetivo, fixar uma política de operação que garanta uma continuidade do atendimento à demanda de uma forma otimizada e forneça uma condição de contorno aos modelos de curto prazo, que podem possuir intervalos de operação semanal, diário ou horário.

Em função do período de operação, os modelos analisam o problema com diferentes níveis de detalhes. O modelo mensal, por exemplo, não considera os reservatórios de passagem e o tempo de trânsito da água. O modelo diário não considera a distribuição de vazões nas diversas turbinas existentes em uma usina hidrelétrica. O modelo horário, que em geral analisa um período de 24 horas, deve considerar a operação individual das turbinas e a curva de demandas de carga.

Os modelos podem ainda ser classificados quanto à dimensão do sistema em que se aplica. Assim, tem-se os modelos utilizados para reservatórios únicos; outros aplicáveis a sistema com um número restrito de reservatórios e, ainda, aqueles aplicados a grandes sistemas com um número relativamente elevado de reservatórios. O objetivo de todos os modelos seria re

solver o problema de operação de sistemas de reservatórios de qualquer dimensão. Entretanto, face à complexidade dessas técnicas, ficam restritas a sistemas com pequeno número de reservatórios. Sua vantagem, entretanto, é conseguir realizar uma solução de operação bastante refinada. Os modelos aplicáveis a grandes sistemas, devem assumir hipóteses simplificadoras que permitam uma eficiência de cálculo mínima.

Alguns modelos podem ser aplicados a sistemas com propósitos múltiplos de uso da água. Outros são melhor adaptados a sistemas com determinados propósitos. Assim, pode-se também classificar os modelos quanto ao número e tipos de propósitos do sistema em que podem ser utilizados.

Pode-se classificar também os modelos quanto ao número e tipos de funções objetivos. Tem-se, pois, os modelos com um único objetivo, que procuram maximizar o benefício do sistema e os modelos com objetivos múltiplos, quando o sistema atende a interesses de diversos grupos, com metas de geração antagônicas. Quanto à natureza da função objetivo, há os modelos em que se medem valores de natureza econômica, outros, em que os critérios de ponderação da função objetivo são baseados em fatores não comensuráveis e ainda, aqueles em que os critérios admitidos na função objetivo são mensuráveis, mas de natureza não econômica.

2.2.2.

Classificação dos Modelos

2.2.2.1

Modelos Empíricos e Modelos Racionais

A diferenciação básica entre os modelos ditos racionais e os empíricos se faz pelo critério adotado para a escolha da regra de operação do sistema.

Enquanto nos métodos racionais, a escolha da política de operação é feita com base na procura de uma maximização de uma função objetivo, nos empíricos os critérios de escolha são qualitativos e em geral, feitos por tentativas.

Os métodos racionais podem obter a política ótima por modelos otimizantes, por modelos de simulação ou por uma combinação de ambos. A regra de operação adotada não é fixa, mas varia ao longo do tempo, em função das vazões naturais, dos armazenamentos nos reservatórios, das demandas e quando possível, da previsão das vazões naturais futuras.

Os métodos empíricos utilizam regras resultantes da experiência de operação no passado ou da aplicação de modelos de simulação, a partir de uma análise de uma série de possíveis situações verificadas com as séries hidrológicas históricas. Portanto, as regras empíricas têm um caráter permanente no tempo, não envolvendo os conceitos de operação estocástica.

As regras de operação empíricas são apresentadas, em geral, como um plano de operação, que consiste em uma série de considerações e orientações para a operação. Consiste numa curva-guia ou curvas limites, em um determinado número de esquemas operativos e uma série de restrições de vazões efluentes, níveis d'água, etc.

A curva-guia ou curva limite é um diagrama de volume armazenado em função do tempo. Ela especifica os níveis máximos ou mínimos que devem ser mantidos nos reservatórios, para que não haja falha no suprimento ou nas restrições do sistema.

Durante as cheias e as estiagens, o nível do reservatório se desvia da curva-guia. Os esquemas de operação especificam as táticas ou procedimentos para fazer o armazenamento retornar aos níveis desejados da curva-guia. Esses esquemas representam assim, uma política de operação de curto-prazo, enquanto a curva-guia é um modelo de operação de longo prazo.

A operação de sistemas de reservatórios múltiplos através de métodos empíricos leva a um afastamento sensível da operação ótima. Considerando-se os reservatórios individuais, nota-se que não se leva em conta a variação estocástica dos afluxos, uma vez que se analisa apenas a série histórica, admitindo-se sua repetição cíclica. Além disso as curvas-guia procuram orientar a operação dos reservatórios do sistema isoladamente, sem uma preocupação com o aspecto global do problema.

O uso de regras empíricas foi discutido por Toebe e Rukvichai (1978), que analisaram o sistema da bacia do Rio Green, por Brito (1972), que apresenta uma metodologia de otimização do sistema Furnas para substituir um modelo empírico de curvas limites utilizado desde 1968 e por Araújo e Terry (1974), que analisaram uma alternativa das curvas-limites, obtidas por programação dinâmica determinística.

Os métodos racionais são aplicados pela maioria dos operadores, atualmente, sendo descritos em maiores detalhes nos itens subsequentes.

2.2.2.2.

Modelos para Planejamento e Projeto e Modelos de Operação em Tempo Real - (Longo-Prazo e Curto Prazo).

Os modelos utilizados para a definição da política de operação de sistemas de reservatórios são aplicados tanto na fase de planejamento do sistema e de projeto dos reservatórios com os chamados modelos de longo prazo, como numa fase posterior de operação em tempo real de um sistema existente, com os modelos de curto prazo.

Existem, na verdade, diferenças conceituais básicas na aplicação dos diversos métodos, que devem ser observadas, para uma boa confiabilidade dos resultados obtidos.

Uma observação interessante foi feita por Fults, Hancock e Logan (1976) em um artigo, onde afirmam que os operadores e planejadores utilizam as mesmas técnicas de otimização de operação de reservatórios. Entretanto, os planejadores estão interessados na performance de um acréscimo de volume dos reservatórios; os operadores precisam otimizar a operação de um sistema existente para atender à demanda da melhor forma, com os reservatórios disponíveis. Enquanto os planejadores querem saber as consequências de longo prazo, os operadores necessitam saber as consequências imediatas, ou seja os riscos das decisões tomadas na operação.

As vazões naturais afluentes aos reservatórios possuem, intrinsecamente, um caráter estocástico. A não consideração desse fenômeno pode invalidar o resultado chamado ótimo de qualquer metodologia existente. Nos modelos utilizados para planejamento ou projeto, essa consideração é feita de forma direta, pelos chamados métodos probabilísticos explícitos, ou de forma indireta, pelos métodos probabilísticos implícitos. Os primeiros consideram as distribuições teóricas de probabilidades dos afluxos e os segundos geram séries sintéticas de vazões de longos períodos. Os modelos utilizados na operação em tempo real, chamados de curto prazo, admitem que as vazões sejam variáveis determinísticas, de forma a viabilizar a execução dos modelos com um tempo reduzido de cálculo. Aparentemente, isto parece ser paradoxal com a afirmação anterior. Na verdade, essa deficiência é superada nos modelos de curto prazo, pela introdução de um modelo auxiliar de previsão do afluxo do intervalo seguinte de operação. Esses modelos de previsão podem ser do tipo estatístico, como o Shot Noise Model, ou modelos do tipo determinístico, que simulam o ciclo hidrológico, utilizando dados de chuvas observadas. Ao final de cada intervalo de tempo, os valores dos afluxos são reatualizados, substituindo-se os valores previstos pelos valores confirmados em observações.

Além das restrições existentes e explicitamente decla

radas nos modelos de otimização e de simulação, tais como equações de continuidade, armazenamentos máximos e mínimos, descargas máximas e mínimas, limitações de vazão por canais, condutos forçados ("penstocks") e equipamentos, restrições contratuais e obrigações institucionais, há uma restrição que não é declarada formalmente nos modelos, que é a garantia da continuidade da operação em intervalos futuros. Para isso, são necessárias decisões estratégicas baseadas na melhor informação possível e um modelo de decisão global, que envolve um modelo de longo prazo e um modelo de curto prazo. Geralmente o modelo de longo prazo examina o período de vários anos ou dos meses de um ano, com incrementos de tempo de uma semana, um mês ou uma estação. Este modelo, quando utilizado em operação deve ser atualizado a cada intervalo de tempo com os valores obtidos do modelo de curto prazo. O modelo de curto prazo examina o período compreendido no intervalo de tempo do modelo de longo prazo, com incrementos de tempo de um dia, ou mesmo uma hora, quando há geração de energia ou controle de cheias no sistema.

Algumas vezes, nos modelos de longo prazo pode-se trabalhar com agrupamentos de reservatórios ou, simplesmente, considerar um determinado reservatório como um ponto de controle do sistema, caso as dimensões dos reservatórios sejam pequenas face ao volume efluente por período e quando esses reservatórios não forem de importância significativa para a análise dos resultados. Nos modelos de curto prazo, de operação em tempo real, não é permitida a omissão de qualquer elemento do sistema uma vez que as instruções de decisão obtidas do modelo servirão para comandar as estruturas de controle individuais dos reservatórios.

Existem diferenças marcantes entre os modelos de longo prazo e os de curto prazo quanto à forma de obtenção dos dados e introdução nos modelos de operação. Os modelos de longo prazo utilizam uma série de dados históricos ou gerados, previamente preparados e armazenados em um arquivo. Os modelos de curto prazo operam a cada intervalo de tempo, com a introdução dos

dados de forma interativa. Na operação de longo prazo, os dados de vazões naturais do sistema são obtidos por instrumentos clássicos, do tipo limnógrafo ou régua limnimétrica. Na operação de curto prazo, onde são necessários dados de vazões e de precipitação, agiliza-se o processo de coleta e alimentação dos dados através da implantação de um sistema de telemetria, sem o que se compromete a eficiência da operação, especialmente nos casos de controle de cheias.

A eficiência da operação de curto prazo, em tempo real, pode ser medida como o intervalo de tempo decorrido entre o instante em que é detectada uma variação hidrológica do sistema e o instante em que é acionado um mecanismo de decisão e atuação sobre o sistema. Assim, esta eficiência estará condicionada ao perfeito funcionamento dos instrumentos de medição, à continuidade do sistema de transmissão, especialmente em períodos de instabilidade atmosférica, com possibilidade de uma cheia iminente, à rapidez de interpretação dos dados recebidos e da decisão a ser tomada e à eficácia do sistema de telecomando das obras hidráulicas de controle.

Em uma operação em tempo real, deve-se dispor junto ao sistema, de uma central de recebimento e análise das informações e retransmissão das decisões tomadas da operação. Para isso, é necessário que se possua um computador instalado nessa central de operações. Há também a possibilidade de se trabalhar com terminais acoplados a computadores situados fora do sistema. Qualquer que seja a metodologia para otimizar a operação em tempo real, obtêm-se apenas políticas próximas da ótima, uma vez que sempre são necessárias algumas simplificações para tornar o processo aplicável em tempo real, quer seja pela capacidade do computador instalado, quer seja pelo tempo de cálculo necessário para uma solução refinada. As diferenças significativas entre as diversas metodologias existentes estão na velocidade de convergência, nas necessidades computacionais e na existência de uma política factível.

Na operação de longo prazo, a eficiência é medida pela proximidade entre a política de operação obtida pelo modelo utilizado e a política ótima, que resultaria em um benefício líquido máximo. O tempo de solução do modelo é de caráter secundário, desde que o esforço computacional de memória e tempo de cálculo sejam exequíveis. A tendência observada nas metodologias empregadas mostra que embora nos modelos de longo prazo existam aplicações de métodos otimizantes por programação dinâmica, nos modelos de curto prazo essas metodologias são substituídas por uma combinação do uso da programação dinâmica com a linear, de forma a se reduzir o esforço computacional exigido.

Um caso peculiar de operações para controle de cheias mostra uma diferença acentuada entre os modelos de planejamento e os de operação em tempo real. Enquanto nos primeiros, considera-se apenas os custos advindos de um prejuízo causado por uma onda de cheia e seu reflexo na função objetivo, nos modelos de operação em tempo real, torna-se imperioso evitar qualquer tipo de dano que possa ser causado pela cheia.

O tema da operação em tempo real é bastante complexo e por si só merece um trabalho específico. A intenção aqui foi apenas formular algumas considerações básicas sobre o problema.

Dentro da literatura pesquisada encontram-se alguns métodos que foram aplicados (ou tem potencial) para o planejamento de sistemas de reservatórios, outros que foram aplicados em estudos de operação de longo prazo e ainda, aqueles que se adaptam às duas aplicações.

Os modelos que são aplicáveis para o dimensionamento de sistemas de reservatórios foram pesquisados, entre outros, por Young (1967), através de programação dinâmica, por Askew (1974, 75) que utilizou programação dinâmica com restrições probabilísticas, Nayak e Arora (1971) e Revelle et alii (1975) que utilizaram a regra de decisão linear e por Arunkumar e Chon

(1978), que desenvolveram um algoritmo específico para um estudo.

Das aplicações de modelos em operação de longo e curto prazo, destacam-se os trabalhos de Brito (1972) - programação dinâmica estocástica, aplicado nos reservatórios de Furnas, Jamieson (1972), Jamieson e Wilkinson (1972 a, b) e Jamieson, Smith e Wilkinson (1960) - análise de simulação, Sigvaldason (1976) - análise de simulação e algoritmo out. of. kilter, Fults, Hancock e Logan (1976), Becker e Yeh (1974), Becker, Yeh e Fults (1976) e Becker, Yeh e Chu (1979) - programação dinâmica incremental aplicada ao Central Valley System - Califórnia-EUA.

Outros modelos relatados na literatura são aplicáveis a planejamento e operação tais como os elaborados por Ambrosino (1979) para operação de curto prazo, Bonazountas e Camboulives (1967), que utilizaram uma combinação de programações linear, dinâmica e inteira mista, Ferrer (1976) com programação linear, Gundelach e Revelle (1975), com aplicação da regra de decisão linear, Hermann (1971) e Houck e Cohon (1978) com aplicação da programação estocástica linear, Heidari et alii (1971) com aplicação da programação dinâmica diferencial discreta, HEC (1974) com um modelo de simulação e Takeuchi e Moreau (1974) que combinaram programações linear e dinâmica.

2.2.2.3

Dimensões do Sistema Estudado

Os modelos de operação de reservatórios podem ser classificados quanto à dimensão do sistema em que podem ser aplicados.

À medida que aumenta o número de reservatórios do sistema, cresce também a dificuldade do problema, uma vez que a complexidade da determinação das descargas é função da relação espacial das vazões.

Os métodos aplicáveis ao dimensionamento de um reservatório único foram descritos em outro capítulo. Algumas das técnicas estudadas de modelos otimizantes são também aplicáveis a casos de reservatórios únicos, sendo que algumas delas também se aplicam na fase de operação do reservatório. Esses modelos são bastante refinados nas técnicas de otimização, uma vez que não sofrem o problema da dimensionalidade. Pode-se mesmo abordar o problema da otimização com uma abordagem estocástica explícita, como fez Askew (1974) no modelo utilizado de programação dinâmica com restrições probabilísticas. Outros autores utilizaram a programação dinâmica em reservatórios únicos, entre eles Young (1967), Erickson et alii (1969), Croley (1974), Russel (1972), Croley e Rao (1979) e Ambrosino et alii (1979). Hall et alii (1968) utilizaram uma combinação das programações dinâmica e linear a um reservatório do Central Valley Project, na Califórnia. Revelle e Kirby (1970) aplicaram a regra de decisão linear e Loucks (1968) aplicou uma programação estocástica linear.

Alguns modelos podem ser utilizados em sistemas com um número restrito de reservatórios. Em geral, esses modelos trazem problemas computacionais de tempo e espaço de memórias, quando se acrescentam reservatórios adicionais ao sistema. Os sistemas usuais tratados por essas técnicas possuem, geralmente, um total de reservatórios inferior a cinco. Para se poder analisar sistemas dessa grandeza admitem-se hipóteses simplificadoras, como a imposição de relações lineares entre as variáveis ou através do desenvolvimento de algoritmos especiais de cálculo.

Houck e Cohon (1978) utilizaram uma programação linear estocástica, método aplicável a sistemas com até 3 reservatórios. A regra de decisão linear, com restrições probabilísticas é aplicável a sistemas com até 4 reservatórios e foi utilizada por Rohde e Naparaxawong (1979), e Revelle e Gundelach (1975).

Os algoritmos para solução da programação dinâmica foram utilizados por Fults et alii (1976), Becker et alii (1976) e Fults e Hancock (1972), com a programação dinâmica incremental; por Heidari et alii (1971) com a programação dinâmica diferencial discreta; por Nopmongkol e Askew (1976) com a programação dinâmica incremental com níveis múltiplos.

Para a operação em tempo real desses sistemas, parece que a solução é o uso conjunto das programações dinâmica e linear, como foi feito por Becker e Yeh (1974) e Yeh et alii (1979).

Os modelos utilizados em grandes sistemas são aqueles que não limitam o número de reservatórios do sistema, impondo pequeno acréscimo de esforço computacional ao se incluir um novo reservatório ao sistema. Os modelos otimizantes são muito pouco utilizados, sendo a preferência dada aos modelos de simulação.

Bonazountas e Camboulives (1979) apresentam uma metodologia em que se separa um grande sistema em diversos sub-sistemas. Utilizam programação dinâmica discreta, programação linear e programação inteira mista associadas. Não existe ainda uma confirmação prática da aplicabilidade dessa técnica.

Murray e Yakowitz (1979) apresentam um algoritmo de programação dinâmica diferencial, que foi aplicado para a solução de um exemplo com 10 reservatórios. Impõe a hipótese de algumas relações lineares do sistema, para permitir uma solução adequada do problema.

Os modelos de simulação são os que têm aplicação prática mais confirmada. Citam-se os trabalhos de Sigvaldason (1976) que utilizou um modelo de simulação com o algoritmo de otimização out-of-kilter a um sistema com 48 reservatórios e o modelo HEC-5 do HEC (1976) descrito adiante.

2.2.2.4.

Propósitos dos Sistemas de Reservatórios

A água é distribuída na natureza de maneira não uniforme, tanto no aspecto espacial como no temporal. Para a utilização da água nas atividades humanas constroem-se os reservatórios. Os reservatórios regularizam o regime de vazões ao longo do tempo e acumulam a água para ser utilizada, que deve ser conduzida ao ponto de demanda de alguma forma.

Se se pudesse construir reservatórios infinitos, poder-se-ia utilizar a água ao longo do tempo, segundo um regime qualquer. Devido aos custos envolvidos e às interferências dos reservatórios com outros usos de interesse, limita-se os volumes dos reservatórios. Assim, se explica que um reservatório de regularização não seja dimensionado para a vazão média e sim, para uma fração da vazão média.

Quando se constrói um sistema de reservatórios múltiplos, ganha-se uma vantagem adicional, que é a regularização espacial das vazões. Assim, um volume de água vertido por um reservatório, pode ser armazenado em outro a jusante, para ser utilizado no futuro.

A presença de dois ou mais reservatórios em bacias hidrologicamente distintas permite uma complementaridade de operação através de derivações ou reversões de bacias, que propicia uma homogeneização dos regimes de vazões nas diversas bacias.

A caracterização de um propósito especial ou de propósitos múltiplos de um sistema de reservatórios leva à escolha

de determinados modelos. O propósito não é, evidentemente, o unico fator na adoção de um modelo, mas influi de forma interligada com outras características discutidas nos outros capítulos.

Assim, por exemplo, um sistema construído para o controle de cheias deve possuir um modelo de operação em tempo real, que leve em consideração o tempo de trânsito da onda nos rios. Vê-se, pois, que o propósito pode condicionar o tempo de cálculo adotado no modelo.

Um sistema com propósito de uso para recreação, de seus reservatórios necessita de um modelo, cuja função-objetivo leve em consideração parâmetros não econômicos.

Os modelos de simulação podem ser utilizados em sistemas com os mais diversos propósitos, uma vez que se pode escolher o tempo de cálculo adequado e a função objetivo é definida externamente aos modelos.

Os modelos otimizantes têm sido utilizados quando a definição da função objetivo é puramente econômica, como para o propósito de geração de energia e para sistemas com propósitos múltiplos de utilização, onde há propósitos complementares e propósitos antagônicos.

A maioria dos estudos na literatura abordam sistemas com propósitos de abastecimento, controle de cheias, geração de energia, melhoria da qualidade da água, recreação e aqueles com propósitos múltiplos, onde não existe um destaque principal para determinado uso. Os sistemas para abastecimento englobam a demanda urbana de água e o uso para irrigação.

Sistemas com propósitos de abastecimento foram estudados por Kirby e Revelle (1970), Joeres et alii (1971), Jamieson e Wilkinson (1972, 76), Askew (1974), Takeuchi e Moreau (1974) e Houck e Cohon (1978), entre outros. Alguns desses sistemas envolviam também outros propósitos secundários.

O controle de cheias foi estudado por Bonazountas e Camboulives (1979), Croley e Rao (1979). Toebes e Rukvichai (1978) Jamieson e Wilkinson (1976) e Kirby e Revelle (1970), entre outros.

Sistemas com propósitos de geração de energia foram estudados por Araújo e Terry (1974), Rohde e Naparaxawong (1979), Yeh et alii (1979), Becker e Yeh (1974) e outros.

A qualidade da água foi um dos propósitos analisados por Bonazountas e Camboulives (1979), Takeuchi e Moreau (1974) e Loucks (1968).

O uso da recreação foi considerado nos estudos de Croley e Rao (1979), Gundelach e Revelle (1975) e Toebes e Rukvichai (1978).

Os sistemas com propósitos múltiplos são citados em muitos artigos, destacando-se entre esses os de Arunkumar e Chon (1978), Erickson et alii (1969), Liu e Tedrow (1973), Sigvaldason (1976) e Rohde e Naparaxawong (1979).

A pesquisa bibliográfica de estudos aplicados a sistemas com propósitos semelhantes a um desejado orienta na escolha do tipo de modelo a se utilizar e propicia um conhecimento das funções objetivo utilizadas nesses casos, para avaliar a eficiência de operação dos sistemas.

2.2.2.5.

Modelos com Objetivos Simples e Múltiplos

A função objetivo a ser otimizada em um modelo de operação depende dos propósitos predominantes para um sistema particular e do interesse do grupo que recebe os benefícios do sistema.

As funções objetivo podem incluir valores de natureza econômica, critérios de ponderação baseados em fatores não

comensuráveis, que incluem parâmetros subjetivos do operador, ou ainda, critérios de natureza não econômica, como maximização de energia firme, minimização das variações de níveis dos reservatórios, etc.

As funções-objetivo aparecem sob duas formas análogas nos modelos otimizantes: maximização de um benefício ou minimização de custos. Por exemplo, para sistemas com geração de energia, a função objetivo aparece sob duas formas mais correntes: maximização da geração de energia elétrica ou minimização do gasto de energia potencial da água armazenada para satisfazer a todas as restrições.

Quando o sistema possui objetivos não comensuráveis ou objetivos múltiplos, por atender aos interesses de diversos grupos ou por não haver um objetivo predominante, necessita-se de uma programação de objetivos múltiplos, um pouco diferente do caso usual. Neste caso, o problema consiste em otimizar uma função objetivo que é um vetor, ao invés de uma quantidade escalar. Não é possível definir uma política única, sem a introdução de algum processo subjetivo, onde o operador toma as decisões com base em ponderações de pesos ou penalidades dos diversos objetivos.

Existem, basicamente, duas técnicas utilizadas. A primeira é a chamada "técnica de geração", onde se garantem limites inferiores das diversas funções-objetivo e otimiza-se uma em particular. A segunda consiste na preferência dos operadores formulada antes ou durante o processo de análise, quando é alimentado por informações parciais. Esta requer um esforço computacional menor que a primeira. Entretanto, a primeira parece ser mais compatível com o caráter de multiplicidade de objetivos.

Na primeira técnica, utiliza-se o método das restrições, o método das ponderações e o método das penalidades.

Em geral, a função objetivo pode ser expressa na forma:

$$\max \bar{F}(\bar{u}) = [F_1(\bar{u}), F_2(\bar{u}), \dots, F_p(\bar{u})] \quad (2.15)$$

sujeito a

$$g_i(\bar{u}) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.16)$$

$$u_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.17)$$

onde a barra denota um vetor, há p objetivos, m restrições ou relações entre variáveis e n variáveis de decisão. A função objetivo e as equações de restrição podem ou não ser lineares.

No método das restrições, escolhe-se um dos objetivos, por exemplo, $F_1(\bar{u})$, como uma função escalar a ser otimizada e substitui-se os outros objetivos como restrições do sistema, de tal forma que o problema pode ser expresso na nova forma.

$$\max F_1(\bar{u})$$

$$\text{sujeito a } F_k(\bar{u}) \geq L_k, \quad k = 2, 3, \dots, p \quad (2.18)$$

$$g_i(\bar{u}) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.19)$$

$$u_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.20)$$

onde L_k é um limite inferior da função objetivo k e é variado progressivamente de forma paramétrica para delinear um conjunto inferior de soluções. Teoricamente, se cada objetivo for parametrizado K vezes, o número de soluções escalares ótimas necessário pode chegar a K^{p-1} . Na prática, esse número pode chegar a se reduzir abaixo de $2K(p-1)$ (Becker e Yeh (1982)).

O método das ponderações conduz a uma série de problemas de otimizações escalares na forma:

$$\max [w_1 \cdot F_1(\bar{u}) + w_2 \cdot F_2(\bar{u}) + \dots + \bar{w}_p F_p(\bar{u})]$$

$$\text{sujeito a } g_i(\bar{u}) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.21)$$

$$u_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.22)$$

onde os valores de w variam para cada problema segundo critérios subjetivos.

No método das penalidades, introduz-se um custo subjetivo para os casos em que o sistema falha. A forma da função objetivo pode ser expressa por

$$\max \bar{F}(\bar{u}) - \sum C_{sj}(\bar{u}) \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\text{sujeito a } g_i(\bar{u}) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.23)$$

$$\bar{u} > 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.24)$$

$$\text{e } C_{sj}(\bar{u}) > 0 \text{ sempre que } g_i(\bar{u}) > 0 \quad (2.25)$$

A maioria dos estudos efetuados na literatura utilizam critérios econômicos na função objetivo. Podem-se citar os trabalhos de Bonazountas e Camboulives (1967), Erickson e alii (1969), Hermann(1971), Heidari et alii (1971), Aron e Scott (1971), Brito (1972), Jamieson e Wilkinson (1972), Liu e Tedrow (1973), Araújo (1974), Croley (1974), Takeuchi e Moreau (1974), Sobel (1975), Askew (1975), Jamieson et alii (1976), Rossman (1977), Arumkumar (1978), Houck e Cohon (1978), Gal (1979), Rohde (1979) e Yeh, Becker e Chu (1979).

Aqueles em que se classificam como critérios não comensuráveis são os que utilizam na função objetivo uma mistura de variáveis, multiplicadas por coeficientes de ponderação. Citam-se os trabalhos de Ferrer et alii (1976) e Sigvaldason (1976).

Os trabalhos que utilizaram funções objetivo com valores não econômicos foram aplicados na maioria dos casos a sistemas com propósito de geração de energia, tentando maximizar a energia gerada ou maximizar a energia potencial armazenada. Uma exceção é feita aos trabalhos de Kirby e Revelle (1970) e Gundelach e Revelle (1975) onde os critérios adotados foram maximização dos volumes armazenados e descargas, minimização da variação das descargas em relação à vazão meta e minimização da probabilidade de risco de fracasso. Os outros trabalhos foram apresentados por Fults e Hancock (1972), Jamieson (1972), Coló (1973), Becker e Yeh (1974), Becker et alii (1976), Fults, Hancock e Logan (1976), Ambrosino et alii (1979), Murray (1979) e Strobel (1979).

Dos modelos aplicados a estudos com múltiplos objetivos, citam-se os de Hall et al. (1968) e Ferrer et al. (1976) que utilizaram a técnica de coeficientes de ponderação, Askew (1974) que aplicou coeficientes de penalidade e Croley e Rao (1979) que aplicaram o método das restrições.

2.2.2.6.

Modelos Determinísticos e Modelos Estocásticos

Os modelos de operação de sistemas de reservatórios podem ser classificados quanto à abordagem estatística do problema.

Um dos fatores mais importantes que afetam o projeto e a operação de um sistema de reservatórios é a natureza estocástica das vazões e sua influência sobre os insucessos do sistema.

Sob um outro aspecto, o caráter probabilístico pode variar os benefícios do sistema. Assim, assumindo-se um enfoque determinístico, pode-se admitir que a um sistema não seja permitido falhar, o que impõe uma restrição severa às regras de operação, limitando bruscamente os benefícios líquidos que po

dem ser obtidos do mesmo. Em oposição, as falhas do sistema são permitidas livremente, sendo sua influência considerada apenas na função objetivo. Na prática, situa-se entre essas duas situações extremas: os sistemas são operados para maximizar os benefícios, mas existe uma aversão não econômica às falhas, originadas de uma combinação de considerações práticas e pressões socio-políticas sobre a entidade operadora. Para se considerar esse aspecto do problema, foram introduzidos os modelos com restrição probabilística.

Os modelos determinísticos admitem que as vazões afluentes aos reservatórios são conhecidas ou podem ser previstas com uma certa facilidade.

A estrutura dos modelos determinísticos é mais simples que a dos modelos estocásticos. Sua aplicação a sistemas com grande número de reservatórios se torna mais viável, por sua eficiência computacional. Muitas vezes, para se aproveitar dessa característica, os modelos determinísticos são utilizados como parte dos modelos estocásticos, como se verá adiante.

Uma aplicação dos modelos determinísticos muito usual é nos modelos de operação de curto prazo, em tempo real. Nestes modelos, deve-se contar com uma estrutura simples de cálculo. Além disso, os afluxos futuros podem ser previstos com certa confiabilidade. Num instante posterior da operação, o valor previsto é substituído pelo valor observado e as regras de operação são ajustadas. Os desvios são pequenos e os ajustes das regras de operação são simples.

Diversos autores utilizaram os modelos determinísticos em seus trabalhos. Erickson et alii (1969) e Ambrosino et alii (1979) utilizaram modelos de previsão de vazão. Becker e Yeh (1974), Becker et alii (1976), Yeh et alii (1979) e Jamieson e Wilkinson (1972) utilizaram o modelo determinístico para a operação em tempo real. Outros autores utilizaram os modelos determinísticos associados a modelos de simulação, como Toebes e

Rukvichai(1978), a modelos de programação linear, como Ferrer et alii (1976) e a modelos de programação dinâmica, como Araújo e Terry (1974), Fults e Hancock (1972), Heidari et alii (1971) e outros.

Os modelos de otimização, que abordam o problema sob o ponto de vista estocástico têm sido formulados segundo três linhas de estudos alternativos: a otimização estocástica explícita (OEE), e otimização implícita (OEI) e a otimização estocástica alternativa (OEA).

A otimização estocástica explícita (OEE) utiliza diretamente a distribuição de probabilidades dos afluxos. Os benefícios são calculados como função das probabilidades dos afluxos. A decisão ótima da operação é obtida pela aplicação de técnicas de otimização determinísticas às distribuições de probabilidades condicionais. Nesse método, economiza-se o tempo de simulação, necessário nos outros métodos. Entretanto, as formas das equações tornam-se muito complexas, inviabilizando sua aplicação a grandes sistemas. Foi utilizado por Loucks (1968), Askew (1974, 75), Gundelach e Revelle (1975), Rossman (1977), Houck e Cohon, Murray e Yakowitz (1979) e Bonazountas e Camboulives (1979).

A otimização estocástica implícita (OEI) utiliza uma série de vazões afluentes e faz uma otimização determinística para cada sequência. Os resultados dos cálculos das várias sequências são analisados por regressão múltipla, para definir as regras operacionais ótimas. Um método usual de OEI consiste em otimizar uma série observada de pequena extensão e utilizá-la em um modelo de simulação com valores de vazões geradas. Conclui-se pois, que nesta técnica são necessários como complementos um modelo de simulação e um modelo de geração de vazões. Foi utilizada esta técnica por Young (1967), Røefs e Bodin (1970), Askew et alii (1971), Askew (1974), Fults et alii (1976), Sigvaldason (1976) Croley e Rao (1979), Rohde e Naparaxawong (1979) e Silva e Hernandez (1979).

A otimização estocástica alternativa (OEA) foi proposta por Croley (1974). É uma combinação das duas técnicas anteriores. Envolve a transformação empírica da distribuição de probabilidades dos afluxos na de decisões ótimas de cada estágio, como na OEE. Entretanto no lugar de maximizar o benefício total esperado pela seleção de uma probabilidade de decisão em cada estágio, maximiza o benefício total para cada série de afluxos gerada, como na OEI, e determina a distribuição de probabilidades das decisões ótimas, em cada estágio.

As formas mais utilizadas na literatura são a otimização estocástica explícita e a implícita.

Nos problemas de otimização estocástica explícita deve-se considerar as restrições do sistema também associadas a um certo risco. Assim, esses problemas podem ser considerados como de objetivos múltiplos, em que se procura maximizar o benefício e a confiabilidade da performance do sistema.

Uma forma de solução é a imposição de restrições probabilísticas, quer seja na probabilidade de falha, quer seja no número de falhas que ocorram no sistema.

Podem-se citar dois tipos de modelos que introduzem as restrições probabilísticas. O primeiro, foi proposto por Revelle et alii (1969) e é um exemplo de programação linear. O outro proposto por Askew (1974) utiliza a programação dinâmica.

Na Regra de Decisão Linear proposta por Revelle et alii (1969) expressa-se a equação da continuidade dos reservatórios por:

$$V_t = V_{t-1} + V_{afl,t} - V_{ext,t} - V_{evap,t} - V_{d,t} \quad (2.26)$$

onde: V_t = volume armazenado no final do período t
 $V_{afl,t}$ = afluxo ao reservatório no período t
 $V_{evap,t}$ = perdas por evaporação e infiltração no período t .

$V_{d,t}$ = descarga regularizada no período t , em unidades de volume.

$V_{ext,t}$ = descarga extravasada no período t .

Como se pode determinar a distribuição de probabilidades dos afluxos, com base na série histórica, reescreve-se a equação da continuidade, impondo-se que para atender à vazão regularizada $Q_{d,t}$, o reservatório deve satisfazer à condição:

$$P(V_t - V_{t-1} + V_{d,t} + V_{ext,t} + V_{evap,t} \geq V_{afl,t}) \leq 1 - \alpha \quad (2.27)$$

onde P é a probabilidade de ocorrência

α é o nível de confiança imposto

ou, utilizando-se a função acumulada de probabilidades dos afluxos F_{Rt} , tem-se:

$$V_t - V_{t-1} + V_{d,t} + V_{ext,t} + V_{evap,t} \leq F_{Rt} (1 - \alpha) \quad (2.28)$$

que possui uma estrutura linear e pode ser resolvida por modelos de programação linear (Hermann(1971)).

No trabalho de Revelle e Gundelach (1975) são impostas mais três restrições básicas.

O reservatório deve ter uma dimensão suficiente para garantir um "free-board" (de volume) pelo menos igual a v_t , com uma confiabilidade α_1 no período t . Isto pode ser expresso por:

$$P(V - V_t \geq v_t) \geq \alpha_1 \quad (2.29)$$

onde: V é a capacidade do reservatório

Na regra de decisão linear a descarga $V_{d,t}$ é expressa por:

$$V_{d,t} = V_{t-1} + b_t \quad (2.30)$$

onde b_t é um parâmetro de decisão

O volume armazenado no final do período t pode ser expresso por

$$V_t = V_{afl,t} - b_t \quad (2.31)$$

(basta aplicar a equação da continuidade, considerando nulos $V_{ext,t}$ e $V_{evap,t}$).

Substituindo-se na equação de restrição do "free-board", tem-se

$$V + b_t \geq r_t^{\alpha_1} + v_t \quad t = 1, 2, \dots, N \quad (2.32)$$

onde $r_t^{\alpha_1}$ é o inverso da função de distribuição acumulada de $V_{afl,t}$ ao nível de confiança α_1

N é o número de períodos da análise.

A segunda restrição é a manutenção de um armazenamento mínimo, com nível de confiança α_2 . Pode ser expressa por:

$$P(V_t \geq V_{min}) \geq \alpha_2 \quad (2.33)$$

onde V_{min} = armazenamento mínimo no período t

A utilização das equações da regra de transformação linear modifica esta expressão para

$$b_t \leq r_t^{(1-\alpha_2)} - V_{min} \quad t=1, 2, \dots, N \quad (2.34)$$

Finalmente, a terceira restrição refere-se à manutenção de uma descarga mínima V_{dmin} , a um nível de confiança α_3 isto é:

$$P(V_{dt} \geq V_{dmin}) \geq \alpha_3 \quad (2.35)$$

que pode ser expressa, com as hipóteses da regra de decisão linear por:

$$b_t - b_{t-1} \geq V_{dmin} - r_{t-1}^{(1-\alpha_3)} \quad (2.36)$$

Portanto, todas as equações de restrição são lineares e podem ser resolvidas pelos algoritmos de programação linear.

O modelo proposto por Askew (1974) é uma analogia do modelo de Revelle et alii (1969), utilizando a programação dinâmica, daí ser chamado de modelo de programação dinâmica com restrições probabilísticas (PDRP).

Uma forma de se impor as restrições probabilísticas ao sistema, consiste em se atribuir penalidades hipotéticas, sempre que as restrições não forem respeitadas. Deve ser feita uma pesquisa iterativa, variando-se a penalidade hipotética, até que a política encontrada maximize os benefícios líquidos e fique sujeita às restrições de fracasso necessárias.

Essas restrições de fracasso podem ser expressas de várias formas, sendo, entretanto, difícil de se atribuir valores econômicos aos mesmos. Pode-se citar três exemplos de restrições: uma limitação da probabilidade de insucesso do sistema em um dado ano; uma probabilidade máxima de que o sistema não atenda à demanda em um ou vários anos da vida da obra; e um número máximo de vezes de insucesso do sistema durante sua vida útil.

A equação recursiva da função objetivo utilizada na programação dinâmica com restrições probabilísticas é:

$$f_i^*(V_i) = \max \sum_{j=1}^n P(q_j) \cdot \{F(Qdi) - C(Qmi) - W_1 + [1/(1+d)] \cdot f_{i-1}^*(V_{i-1})\} \quad (2.37)$$

$$e f_1(V_1) = \max \sum_{j=1}^n P(q_j) \cdot \{F(QD1) - C(Qm1) - W_1\} \quad (2.38)$$

onde $f_i^*(V_i)$ é o máximo benefício líquido esperado nos i anos restantes da vida do sistema.

$P(qj)$ é a probabilidade de ocorrência de um afluxo qj em um período, $j = 1, 2, \dots, n$, sendo n o número de elementos do sistema.

$F(Qd_i)$ é o benefício obtido por uma descarga real Qd_i .

$C(Qm_i)$ é o custo para liberar a descarga meta Qm_i .

Wl é uma penalidade hipotética por uma falha do sistema.

d é uma taxa de desconto.

Para $V_i + qj - Qm_i > V_{max} \rightarrow Qd_i = Qm_i; V_{i-1} = V_{max}; Wl=0$ (2.39)

$0 \leq V_i + qj - Qm_i \leq V_{max} \rightarrow Qd_i = Qm_i; V_{i-1} = V_i + qj - Qm_i; Wl=0$ (2.40)

$V_i + qj - Qm_i < 0 \rightarrow Qd_i = V_i + qj; V_{i-1} = 0; Wl=W$ (2.41)

e neste último diz-se que o sistema falhou.

A imposição da primeira restrição de uma probabilidade de fracasso no período inferior a um limite leva à expressão:

$$F_c(V_i) \leq \alpha_i \quad (2.42)$$

onde $F_c(V_i)$ é a probabilidade de fracasso no período.

α_i é o limite superior admitido para a probabilidade de fracasso

$$e \quad F_c(V_1) = \sum_{j=1}^n P(qj) \cdot F_l \quad (2.43)$$

A segunda restrição de uma probabilidade de insucessos nos i anos de vida do sistema ser limitado a um máximo pode ser expressa por:

$$F_o(V_N) \leq \beta \quad (2.44)$$

onde $F_o(V_N)$ é a probabilidade de ocorrer ao menos uma falha na vida do sistema (N anos). ($F_o(V_N) = 1 - F_N(V_N)$)

$F_N(V_i)$ é a probabilidade de não haver fracassos nos i anos restantes da vida da obra.

$$F_N(V_i) = \sum_{j=1}^n P(q_j) \cdot [F_2 + F_N(V_{i-1})] \quad (2.45)$$

$$F_N(V_1) = \sum_{j=1}^n P(q_j) \cdot F_2 \quad (2.46)$$

Finalmente, a terceira restrição pode ser imposta como :

$$F_A(V_N) \leq \gamma \quad (2.47)$$

onde $F_A(V_N)$ é o número esperado de falhas nos N anos restantes da vida do sistema

$$F_A(V_i) = \sum_{j=1}^n P(q_j) \cdot [F_3 + F_A(V_{i-1})] \quad (2.48)$$

com

$$F_A(V_1) = \sum_{j=1}^n P(q_j) \cdot F_3 \quad (2.49)$$

A definição dos parâmetros F_1 , F_2 e F_3 é feita paralelamente, dependendo do valor da descarga ótima no período $Q_{di}^*(V_i)$. Há três casos possíveis:

$$\text{Se } V_i + q_j - Q_{di}^*(V_i) > V_{\max} \rightarrow Q_{di} = Q_{di}^*(V_i); V_{i-1} = V_{\max}; F_1 = 0; F_2 = 1; F_3 = 0 \quad (2.50)$$

$$0 \leq V_i + q_j - Q_{di}^*(V_i) \leq V_{\max} \rightarrow Q_{di} = Q_{di}^*(V_i); V_{i-1} = V_i + q_j - Q_{di}^*(V_i); F_1 = 0; F_2 = 1; F_3 = 0 \quad (2.51)$$

$$V_i + q_j - Q_{di}^*(V_i) < 0 \rightarrow Q_{di} = V_i + q_j; V_{i-1} = 0; F_1 = 1; F_2 = 0; F_3 = 1 \quad (2.52)$$

O algoritmo apresentado é um meio eficiente de medir a resposta do sistema à imposição de penalidades hipotéticas às falhas.

Quando as restrições puderem ser expressas como função das variáveis do sistema no período atual, o processo de restrição probabilística pode ser aplicado da mesma forma como se a restrição fosse de terminística. Nos casos em que isto não for possível, as restrições podem ser impostas indiretamente com a ajuda das penalidades hipotéticas, cujos valores ótimos serão obtidos de forma iterativa.

Infelizmente, o preço pago pela flexibilidade e realismo da programação dinâmica com restrições probabilísticas é o tempo adicional de cálculo pelo computador para sua solução.

As aplicações da programação dinâmica com restrições probabilísticas efetuadas por Askew (1974a, 1974b) e por Rossman (1977) limitaram-se ao caso de um reservatório simples, pela limitação do esforço computacional exigido.

2.2.2.7.

Modelos Otimizantes e Modelos de Simulação

Os modelos otimizantes de operação de sistemas de reservatórios são métodos da análise de sistemas, que definem de forma direta o vetor de decisão ótimo.

Os principais métodos empregados nos modelos otimizantes são a programação linear e a programação dinâmica. Outros métodos (programação convexa) são utilizados em menor frequência.

A política ótima de operação obtida de um modelo otimizante do sistema não é, necessariamente, a política ótima para o sistema real, uma vez que os modelos possuem limita-

ções. Por exemplo, a estrutura do modelo, que por razões dos algoritmos são simplificadas, podem representar apenas parte dos fluxos, comportamento, efeitos e restrições do sistema. A função objetivo procura considerar os efeitos comensuráveis do sistema, enquanto não considera todos os outros. Finalmente, o intervalo de cálculo pode ser muito grande, por motivos computacionais, permitindo que sejam consideradas as regras de operação mais simples.

A definição das regras de operação, através das técnicas de otimização não é uma tarefa fácil. Há inúmeras dificuldades na definição dos objetivos e dos critérios de avaliação dos mesmos, somando-se a isto problemas de recursos computacionais, que é citado na literatura como um grande entrave para a solução de sistemas com um grande número de reservatórios.

A simulação da operação de sistemas de reservatórios consiste, simplesmente, no relacionamento dos volumes transportados e armazenados no sistema, ao longo do tempo e do espaço. A simulação não é otimizante, isto é, a determinação do vetor de decisões ótimo é feita por um processo iterativo. Este método é útil, se o número de políticas de operação possíveis é pequeno. Ao contrário dos métodos otimizantes, é aplicável a grandes sistemas e com formas das equações de restrição quaisquer.

Os modelos de simulação permitem analisar os efeitos da operação dos sistemas, sem considerar sua quantificação imediata. Permitem, ainda, utilizar intervalos de tempo pequenos e regras de operação suficientemente complexas, para aproximar o modelo do sistema real.

Entretanto, se o número de alternativas a serem pesquisadas for muito grande, a procura iterativa do ótimo global pode ser muito custosa. A maneira mais indicada para a determinação da política de operação de um sistema é o uso combinado dos modelos otimizantes e da simulação.

Alguns autores propõem o uso dos modelos de simulação como uma técnica preliminar para delimitar espaços de soluções possíveis, a serem analisados com maiores detalhes nos modelos otimizantes. Entretanto, podem também servir para analisar os resultados dos modelos otimizantes.

Durante as análises com modelos de otimização, os modelos de simulação são necessários para verificar a viabilidade prática das regras obtidas com hipóteses simplificadas.

Os modelos de simulação podem ser utilizados, também, na operação do sistema em tempo real, após a determinação da regra de operação pelos modelos otimizantes. A partir do conhecimento do estado atual do sistema, a simulação fornecerá com a política de operação e com as variáveis de entrada conhecidas, o estado final do sistema e as variáveis de saída.

No modelo de operação em tempo real, o modelo de simulação pode mesmo substituir os modelos otimizantes, durante períodos de estiagens severas, quando algumas restrições nos modelos otimizantes são difíceis de serem ajustadas para produzir uma solução factível.

Os modelos de simulação podem ser utilizados de forma determinística ou estocástica.

Uma forma de aplicação determinística é a operação em tempo real, quando a regra de operação já está determinada. Outra aplicação é na determinação da regra de operação. Inicialmente, admite-se uma regra inicial factível. A seguir vai se fazendo modificações nas regras de decisão, de forma a se atingir, de uma melhor maneira, o objetivo do sistema. Esse processo, em geral, consegue uma boa solução, porque embora o problema seja multidimensional, considera-se apenas uma sequência possível de vazões, que pode ser o período histórico ou o período crítico da série.

Numa abordagem probabilística, a simulação pode ser utilizada em uma otimização estocástica implícita. Neste caso, a simulação envolve não apenas os dados históricos, mas também considera um período de vazões geradas sinteticamente. Neste caso, a intuição do analista não é tão eficiente, e a menos que o objetivo do sistema seja muito simples, é necessário o uso combinado de uma técnica de otimização.

Os modelos de simulação utilizados para a operação de reservatórios podem considerar o ciclo da água, desde a sua transformação de chuva em vazão (Jamieson e Wilkinson - (1972)), na forma de modelos específicos ou generalizados (Stanford Watershed Model, SSARR), ou apenas o ciclo da água no sistema, admitindo-se conhecidas as vazões afluentes naturais nos diversos pontos de interesse. (HEC(1976)).

A elaboração de um modelo de simulação de operação de reservatórios, uma vez definido o sistema, requer bastante tempo, tanto humano, como de computador. Em geral, os modelos são válidos apenas para o sistema em que foram desenvolvidos, não podendo ser utilizados para sistemas com outras configurações. Nestes modelos específicos, alterações da configuração do sistema ou das regras de operação exigem alterações dos programas, que exigem muito esforço de desenvolvimento.

Nos capítulos seguintes, serão descritos dois modelos de simulação generalizados, um mais simples, proposto por Liu (1973) e outro mais complexo, elaborado pelo HEC(1976). A vantagem desses modelos é a sua possibilidade de aplicação a sistemas diversos com políticas de operação flexíveis.

Os modelos de simulação específicos foram utilizados por Askew et alii (1971) em uma otimização estocástica implícita, por Jamieson (1972) e Jamieson e Wilkinson (1972) numa operação de curto prazo em tempo real, por Takeuchi e Moreau (1974), para obter uma política inicial de um modelo de otimização de programação linear combinada com programação dinâmica,

por Silva e Hernandez (1979) e Sigvaldason (1976-79) associado a um modelo de previsão, por Rohde e Naparaxawong (1979) para verificar uma política obtida por regra de decisão linear e por Toebe e Rukvichai (1978) e Gole e Krishnamurthy (1979), na obtenção de regras heurísticas para controle de cheias, geração de energia e recreação.

Os modelos otimizantes nas formas de programação linear, convexa ou dinâmica serão descritos em maiores detalhes nos itens seguintes.

2.2.3.

Discussão de Alguns Modelos Otimizantes

2.2.3.1.

Programação Linear

A programação linear é uma técnica de otimização geral, que tem sido muito aplicada no gerenciamento de recursos hídricos. Sua aplicação está condicionada aos casos em que as relações entre as variáveis são lineares, tanto nas equações de restrição como na função objetivo.

A aplicação da programação linear em estudos de recursos hídricos varia de problemas relativamente simples de alocações diretas de recursos a situações complexas de gerenciamento e operação de sistemas de reservatórios.

Os modelos de programação linear fornecem solução para um sistema linear com número de variáveis (n) maior que o número de equações de restrição (m). Uma forma típica de um modelo de programação linear na forma vetorial é:

$$\text{Max } F = C^T \cdot V \quad (2.53)$$

$$\text{sujeito a} \quad M \cdot V \leq B \quad (2.54)$$

$$M \geq 0 \quad (2.55)$$

consistindo em n variáveis e m restrições além das impostas pela equação 2.55 e, onde, C é um vetor de dimensão n de benefícios (ou custos) e C^T é o vetor C transposto, V é um vetor de decisão, M é uma matriz $m \times n$, chamada de matriz tecnológica e B é um vetor de dimensão m , chamado de vetor de recursos (Hermann (1971)).

A programação linear, algumas vezes, é aplicada a sistemas onde as equações não são lineares, quer seja por efeitos de escala ou pela relação física entre as variáveis. Em alguns casos, a admissão da linearidade causa uma violação da estrutura real do sistema. Em algumas aplicações na literatura, a programação linear é utilizada conjuntamente com a programação dinâmica, especialmente em operações de curto prazo. Isto é explicado pela rapidez na obtenção de uma solução inicial, uma vez que existem algoritmos, como o Simplex, que são muito eficientes. Além disso, o resultado da política de operação obtida pela programação linear serve como entrada do modelo de programação dinâmica, que a um custo computacional maior, obtém uma solução mais próxima da real.

Uma combinação interessante de metodologia otimizante e não otimizante, é o uso integrado da programação linear com modelos de simulação. A programação linear pode ser empregada em fases preliminares dos estudos, identificando a sensibilidade das variáveis e delimitando um conjunto de respostas, onde o modelo de simulação localizará a solução ótima.

Uma aplicação da programação linear nos estudos de operação de reservatórios é o desenvolvimento da técnica da Regra de Decisão Linear, que será exposta a seguir.

Ferrer (1976) aplicou uma programação linear ao estudo de planejamento e operação de três reservatórios. Becker et al. (1976, 79), Becker e Yeh (1974), Bonazountas e Camboulives (1979) utilizaram a programação linear para definir uma política de operação, que posteriormente era aplicada como política

inicial em um modelo de programação dinâmica. Hall et al. (1968) utilizou a programação dinâmica para otimizar isoladamente a política de operação de dois reservatórios de um sistema, junto com a programação linear para otimizar o funcionamento conjunto.

Os algoritmos de otimização da operação de sistemas de reservatórios por programação linear com restrições probabilísticas foram bem desenvolvidos para o caso de reservatórios simples (Loucks (1968)). Entretanto, há dificuldade no desenvolvimento de algoritmos que garantam a solução ótima e sejam viáveis, na prática, para sistemas com múltiplos reservatórios. Um exemplo é o estudo feito por Houck e Cohon (1978), para sistemas com até três reservatórios. Para sistemas maiores, parece que apenas o uso de uma regra de decisão linear com restrições probabilísticas é aplicável, embora também nesse método há outras restrições que não foram ainda resolvidas.

2.2.3.2.

Regra de Decisão Linear

A regra de decisão linear (RDL) é uma metodologia específica, classificada dentro da programação linear. A primeira aplicação, encontrada na literatura, foi feita por Revelle et al. (1969), para formular a solução de um problema de dimensionamento e operação de reservatório com a programação linear com restrições probabilísticas. Naquele artigo, os autores procuravam o menor reservatório possível que pudesse atender a determinadas demandas, com uma alta confiabilidade.

A regra de decisão linear original propõe que a descarga de um reservatório seja definida no início de um período de operação, com base no conhecimento do estado atual do sistema.

A estrutura da regra de decisão linear impõe que:

$$V_{di} = V_{i-1} + b_i \quad (2.56)$$

onde V_{di} é a descarga do reservatório no período atual (volume)
 V_{i-1} é o armazenamento do reservatório no final do período anterior
 b_i é uma constante de decisão

Expressando-se a equação da continuidade do reservatório por:

$$V_i = V_{i-1} - V_{di} + V_{afl i} \quad (2.57)$$

onde $V_{afl i}$ é o afluxo ao reservatório no período i , pode-se introduzir a expressão (2.56) na expressão (2.57) e se obtêm:

$$V_i = V_{afl i} - b_i \quad (2.58)$$

Analogamente, para o período $i-1$; tem-se:

$$V_{i-1} = V_{afl i-1} - b_{i-1} \quad (2.59)$$

Associando-se as equações (2.58) e (2.59) em (2.57), obtêm-se:

$$Q_{di} = V_{afl i-1} + b_i - b_{i-1} \quad (2.60)$$

A descarga V_{di} obtida por esta regra é uma descarga-meta. A descarga V_{di} real poderá ser inferior, caso haja a violação de alguma restrição do sistema.

Esta regra tem a vantagem de proporcionar uma decisão no início de um período de operação, pois a descarga meta é função da vazão afluente ou do armazenamento no intervalo anterior. Assim, o operador sabe com antecedência, sem necessidade de previsão do afluxo futuro, a quantidade de água disponível. Além disso, como a descarga é proporcional ao afluxo anterior (ou armazenamento), maior quantidade de água será disponível

vel nas épocas das grandes vazões, propiciando simultaneamente, um maior volume de espera para os períodos futuros. Da mesma forma, nos períodos de estiagens, as descargas passam a ser menores, propiciando um mecanismo de segurança, na eventualidade que o período seco continue.

Dois tipos de função-objetivo foram utilizados nestes estudos; uma de minimização da capacidade do reservatório, para os estudos de dimensionamento e a outra de minimização dos desvios quadráticos entre as descargas realizadas e as vazões-meta. As restrições do sistema são impostas por três grupos de equações: garantia de um volume de espera mínimo, manutenção de um armazenamento mínimo e liberação de uma descarga mínima garantida.

Uma deficiência dessa regra original é que a regra de decisão fica condicionada totalmente pelo afluxo ou pelo armazenamento do período anterior. Parece razoável que uma correlação com os períodos anteriores pode trazer uma maior flexibilidade à operação. A nova forma proposta pode ser expressa na sua forma geral.

$$V_{di} = V_{i-1} + \alpha_i V_{afli} - \beta_{i-1} \cdot V_{afli-1} - \gamma_{i-2} V_{afli-2} - \dots + b_i \quad (2.61)$$

onde α_i , β_{i-1} , γ_{i-2} , etc. são constantes a serem determinadas e b_i é o parâmetro de decisão.

Essa expressão recai no caso original se $\alpha_i = \beta_{i-1} = \gamma_{i-2} = 0$. A nova forma perde a propriedade de se poder avaliar a descarga no período atual antes do conhecimento do afluxo no período ($\alpha_i V_{afli}$).

Aplicando-se a mesma expressão no intervalo anterior e a equação da continuidade, pode-se expressar o armazenamento anterior por:

$$V_{i-1} = (1 - \alpha_{i-1})V_{afli-1} + \beta_{i-2} \cdot V_{afli-2} + \gamma_{i-3} \cdot V_{afli-3} + \dots - b_{i-1} \quad (2.62)$$

E a descarga $\bar{e}$ obtida por:

$$V_{di} = \alpha_i V_{afli} + (1 - \alpha_{i-1} - \beta_{i-1})V_{afli-1} + (\beta_{i-2} - \gamma_{i-2})V_{afli-2} + \dots - b_{i-1} + b_i \quad (2.63)$$

Esta regra indica que as descargas crescem linearmente com os valores atuais e anteriores das vazões afluentes.

Definindo-se duas variáveis J_i e K_i como:

$$J = (1 - \alpha_i)V_{afli} + \beta_{i-1} V_{afli-1} + \gamma_{i-2} \cdot V_{afli-2} + \dots \quad (2.64)$$

$$\text{e } K_i = \alpha_i V_{afli} + (1 - \alpha_{i-1} - \beta_{i-1})V_{afli-1} + (\beta_{i-2} - \gamma_{i-2})V_{afli-2} + \dots \quad (2.65)$$

Pode-se reescrever as equações 2.62 e 2.63 como:

$$V_{i-1} = J_{i-1} - b_{i-1} \quad (2.66)$$

$$V_{di} = K_i - b_{i-1} + b_i \quad (2.67)$$

que permanecem com uma forma semelhante a da regra original.

Existem alguns algoritmos que permitem a resolução dos problemas com regra de decisão linear, de forma direta, sem o uso da programação linear. Foram propostos por Eastman e Revelle (1973) e por Gundelach e Revelle (1975).

A regra de decisão linear tem sido utilizada com o método de restrições probabilísticas, isto é, com otimização estocástica explícita para sistemas com um reservatório. Nayak e Arora (1971) e Gundelach e Revelle (1975) aplicaram esta técnica ao dimensionamento de um reservatório.

A regra de decisão linear pode ser expandida para a análise de sistemas de reservatórios múltiplos. A forma das equações são semelhantes às apresentadas anteriormente. - Rohde e Naparaxawong (1979) aplicaram a regra de decisão linear a um sistema com dois reservatórios, associada a uma simulação de longo prazo. Joeres et al. (1971) aplicaram a regra de decisão linear a um sistema com três reservatórios, através de uma análise estocástica implícita.

A regra de decisão linear é válida para sistemas de regularização intra-anual, uma vez que a correlação serial das vazões não é considerada. Apesar das vantagens dessa metodologia, possui várias hipóteses simplificadoras, que a tornam um método adequado para uma análise preliminar de sistemas de reservatórios múltiplos.

2.2.3.3.

Programação Convexa

A programação convexa é uma forma alterada da programação linear, admitindo uma função objetivo não linear.

Essa função objetivo é discretizada, aproximando-se a uma poligonal ("piecewise linearization").

O número de equações cresce muito com a discretização, sendo um processo lento, que exige grandes áreas de computador.

O ótimo global da função objetivo só pode ser garantido se essa possuir forma côncava ou convexa (minimização ou maximização).

Encontra-se, na literatura, algumas aplicações, entre elas as de Roefs e Bodin (1970), Frischtak (1973), Arunkumar e Chon (1978) e Chu e Yeh (1978). Takeuchi e Moreau (1974) fizeram uma aplicação conjunta com a programação dinâmica.

2.2.3.4.

Programação Dinâmica

A programação dinâmica é uma técnica matemática de otimização, utilizada para fazer uma sequência de decisões inter-relacionadas. Fornece um procedimento sistemático para determinar a combinação de decisões que maximizam ou minimizam uma certa função.

O princípio básico da técnica foi proposto por Bellman, daí ser conhecido por princípio da otimalidade de Bellman. Segundo este princípio, uma política ótima de decisões independe da política adotada nos estágios anteriores.

Ao contrário da programação linear, a programação dinâmica permite que a função objetivo e as equações de restrição tenham qualquer forma. Por este fato, torna-se de aplicação mais genérica. Entretanto, não pode ser obtida uma metodologia padronizada, como na programação linear. Para cada problema específico, precisam ser desenvolvidas equações adaptadas às condições do sistema.

Uma dificuldade da programação dinâmica consiste em reconhecer quando um problema pode ser solucionado por esta técnica. Além do conhecimento de algumas propriedades básicas necessárias, é preciso uma certa sensibilidade e um conhecimento aprofundado da estrutura geral dos problemas solúveis por programação dinâmica. Esse tipo de sensibilidade prática só pode ser obtido pela leitura de casos estudados por programação dinâmica.

Um problema clássico, que ajuda a compreender os conceitos básicos desta técnica é o chamado "problema do condutor da carruagem". (Hillier e Lieberman (1980)). Tendo que viajar através de território indígena e saindo de um lugar determinado para um outro local também fixo, deve escolher por quais estados deve passar. As rotas possíveis estão apresentadas na

figura 2.4., em que se numeram os estados de 1 a 10. São necessários quatro estágios para se viajar do ponto de embarque no estado 1 ao destino, no estado 10.

Os roteiros mais seguros são aqueles cujos custos de seguros pessoais são mais baratos. Assim, o custo de cada política foi baseado nos custos de seguro, que estão apresentados nos círculos da figura 2.4.

Figura 2.4. - Sistemas de rotas para o problema do caixeiro-viajante

Nota-se, inicialmente, que a seleção da rota mais barata em cada estágio sucessivo não conduz ao ótimo global. Assim, esta estratégia daria a rota $1 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 10$, com custo 13, como solução ótima. Mas, sacrificando-se um pouco em um estágio, pode-se obter uma solução melhor, como, por exemplo $1 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 10$, que proporciona um custo de 11.

Um método de solução possível é o da enumeração de todas as alternativas (18), que não é uma tarefa agradável. A programação dinâmica constitui-se num método que proporciona a solução com muito menos esforço, principalmente em problemas maiores.

Sejam as variáveis de decisão X_n ($n=1,2,3,4$), o estado ou destino imediato no estágio n . Assim, a rota selecionada seria $1 \rightarrow X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow X_4$, onde $X_4=10$. Seja $f_n(s, x_n)$, o custo total da melhor política para os estágios restantes, dado que o viajante esteja no estado s , pronto para iniciar o estágio n e escolha X_n como destino imediato. Dados s e n , seja X_n^* , o valor de X_n , que minimiza $f_n(s, X_n)$ e seja $f_n^*(s)$ o valor mínimo correspondente de $f_n(s, X_n)$. Assim, $f_n^*(s) = f_n(s, X_n^*)$. O objetivo é encontrar $f_1^*(1)$ e a política correspondente. A programação dinâmica obtém a solução, descobrindo sucessivamente $f_4^*(s)$, $f_3^*(s)$, $f_2^*(s)$ e então $f_1^*(s)$.

Quando o viajante possui apenas mais um estágio para ir, sua rota é totalmente determinada pelo seu destino final. Portanto, a solução imediata para o problema de um estágio é:

s	$f_4^*(s)$	X_4^*
8	3	10
9	4	10

Tabela 2.4. - Valores da função objetivo para o quarto estágio

Quando o viajante possui dois estágios a percorrer, a solução requer alguns cálculos. Assim, se ele estiver em 5, ele pode ir para 8 ou 9. Se escolher o estado 8, o custo adicional após atingir o estado é 3, como mostra a tabela anterior, sendo o custo total igual a 4. Analogamente, indo para 9, o custo total é 8. Portanto, $X_3^* = 8$, porque fornece $f_3^*(5)=4$. Procedendo-se analogamente para $s=6$ e $s=7$, têm-se:

Tabela 2.5. - Valores da função-objetivo para o terceiro estágio

$s \backslash X_3$	$f_3(s, X_3) = C_{DX_3} + f_4^*(X_3)$		$f_3^*(s)$	X_3^*
	8	9		
5	4	8	4	8
6	9	7	7	9
7	6	7	6	8

Analogamente, para os problemas de três e quatro estágios, o custo da política ótima é a soma do custo do próximo estágio mais o custo mínimo posterior. Os resultados são:

$s \backslash x_2$	$f_2(s, x_2) = C_s x_2 + f_3^*(x_2)$			$f_2^*(s)$	x_2^*
	5	6	7		
2	11	11	12	11	5 ou 6
3	7	9	10	7	5
4	8	8	11	8	5 ou 6

Tabela 2.6. - Valores da função objetivo para o segundo estágio

$s \backslash x_1$	$f_1(s, x_1) = C_s x_1 + f_2^*(x_1)$			$f_1^*(s)$	x_1^*
	2	3	4		
1	13	11	11	11	3 ou 4

Tabela 2.7. - Valores da função-objetivo para o primeiro estágio

Os resultados mostram que há mais de uma política ótima. Assim, os roteiros escolhidos poderiam ser $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 10$, $1 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 10$ ou $1 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 10$, com o custo $f_1^*(1) = 11$.

Os termos específicos deste problema-estágio, estado e política- fazem parte de uma terminologia geral da programação dinâmica, com uma interpretação análoga em outros problemas.

Existem algumas características básicas que definem os problemas de programação dinâmica. O problema pode ser dividido em estágios, contendo uma política de decisão em cada estágio. Em cada estágio, o sistema pode estar em diferentes condições possíveis, chamadas estados. O número de estados pode ser ou não finito. A política de decisão adotada em um estágio transforma o estado atual do sistema no estado associado a um próximo

mo estágio (podendo essa transformação ser feita até segundo uma distribuição de probabilidades). Uma vez conferido o estado a atual do sistema, a política ótima para os estágios restantes é independente da política adotada nos estágios anteriores (Princípio de Bellman). O método de solução se inicia pela definição da política ótima do último estágio, para cada um dos possíveis estados do sistema. Existe uma relação recursiva que identifica a política ótima para cada estado em um estágio em função da política adotada correspondente em um estágio posterior ou anterior.

No caso em que os estágios de um problema de programação dinâmica são caracterizados por intervalos de tempo, pode-se definir dois tipos de procedimentos de solução: a programação regressiva e a progressiva. Na primeira, parte-se do estágio final e caminha-se até o estágio inicial. Na outra, o processo é o inverso.

A programação dinâmica pode ser aplicada em otimizações determinísticas ou estocásticas. Na programação dinâmica determinística, o estado futuro do sistema é perfeitamente determinado, pelo conhecimento do estado atual do sistema. Na programação dinâmica estocástica, com essas informações, existe apenas uma probabilidade, de o estado do sistema no estágio seguinte atingir uma certa posição. Entretanto, com as informações do estágio atual, define-se completamente essa distribuição de probabilidades. Devido à estrutura probabilística, a relação recursiva entre a função-objetivo de um estágio e a do seguinte é relativamente mais complexa do que aquela da programação determinística.

A programação dinâmica considera apenas um número finito de estágios. Uma técnica mais geral, de um modelo de programação dinâmica estocástica, onde os estágios se sucedem indefinidamente, são os chamados processos de decisão markovianos.

Poucos trabalhos encontrados na literatura utilizam a programação dinâmica estocástica. O efeito estocástico do problema é introduzido com o auxílio de gerações de séries sintéticas, em uma análise chamada de otimização estocástica implícita (OEI).

A programação dinâmica tem sido utilizada na otimização de sistemas de recursos hídricos com muita frequência. Isso pode ser atribuído ao fato de que os fatores que caracterizam a maioria dos sistemas de recursos hídricos podem ser enquadrados dentro da formulação dinâmica. Pode-se adotar como estágios do problema, os reservatórios e como estados, os volumes úteis alternativos. O que é mais comum, entretanto, é considerar os estágios com uma sequência de intervalos de tempo e os estados sendo representados pelos volumes armazenados e as descargas efetuadas dos reservatórios.

Além disso, a programação dinâmica tem a vantagem de decompor problemas altamente complexos, com um grande número de variáveis, em uma série de sub-problemas com variáveis simples, resolvidos recursivamente. Uma outra vantagem importante é a possibilidade da consideração de funções não lineares, muito comuns neste tipo de problema.

A programação dinâmica é uma técnica muito útil para a tomada de uma sequência de decisões inter-relacionadas. Ela fornece enorme economia de cálculo, se comparada com a técnica de enumeração exaustiva, especialmente em grandes sistemas.

Entretanto, quando a programação dinâmica é aplicada a um sistema de reservatórios múltiplos, tem sua utilidade limitada pela chamada "praga da dimensionalidade", que é a necessidade de capacidades de memórias de computador e tempo de cálculo acima do limite máximo exequível.

Para se delinear uma breve noção da estrutura da programação dinâmica, expõe-se abaixo algumas expressões básicas para a resolução da otimização da operação de um sistema de reservatórios.

A maioria das formulações de programação dinâmica encontradas na literatura são específicas e dirigidas somente aos problemas de interesse imediato. Frequentemente, envolvem um número tão grande de símbolos para representar os diversos componentes do sistema, que se torna difícil entender a formulação do procedimento de cálculo. Consequentemente, a estrutura simples da programação dinâmica perde-se em uma malha de símbolos, equações e índices. Uma formulação simples e didática é apresentada por Nopmongkol e Askew (1976), através de uma notação matricial. A formulação matricial, junto com outras técnicas propostas pelos autores, permite a preparação de um modelo relativamente geral para solucionar uma ampla faixa de problemas de otimização determinística de recursos hídricos.

O equacionamento apresentado a seguir é válido para um sistema inversível, isto é, que possui o mesmo número de variáveis de estado e de decisão.

O comportamento dinâmico do sistema pode ser descrito por uma equação de transformação linear, que escrita em forma matricial apresenta a expressão:

$$X_{k+1} = AA \cdot X_k + BB \cdot U_k + Y_k \quad (2.68)$$

com $X_k \in \{X\}_k$, $U_k \in \{U\}_k$, $k = 1, 2, \dots, N$

onde:

k é um índice que especifica o estágio, geralmente um intervalo de tempo, variando de 1 a N .

X_k é um vetor coluna com dimensão n , onde n é o número de elementos do sistema. É chamado de vetor estado associado ao estágio k .

U_k é um vetor coluna com dimensão n , chamado vetor decisão ou vetor controle.

$\{X\}_k$ e $\{U\}_k$ são os domínios possíveis dos vetores estado e decisão, respectivamente, no estágio k .

Y_k é um vetor coluna com dimensão n chamado de vetor afluente ou vetor exógeno no estágio k .

AA, BB matrizes com dimensão $n \times n$, admitidas aqui como invariantes no tempo.

A forma dessas equações resulta da natureza física do sistema. O afluxo Y_k pode ser determinístico, estocástico ou uma combinação de ambos. A discussão feita aqui se restringe à consideração de afluxos determinísticos.

Uma função objetivo do sistema típica pode ser escrita na forma:

$$F = \sum_{k=1}^N R_k (X_k, U_k) \quad (2.69)$$

onde:

F é o valor da função objetivo

R_k é uma função escalar dos vetores estado e decisão, representando o retorno financeiro ou algum outro índice de eficiência, associado ao estágio k .

Define-se:

$$F_k^* (X_k) = \text{otim} \sum_{j=k}^N R_j (X_j, U_j) \quad (2.70)$$

onde:

$F_k^*(X_k)$ é o retorno ótimo que pode ser obtido nos estágios restantes, começando-se em qualquer estado X_k em qualquer estágio k , $k = 1, 2, \dots, N$.

A equação recursiva (regressiva) para a solução da programação dinâmica de (2.69) pode ser escrita como:

$$F_k^*(X_k) = \text{otim}[R_k(X_k, U_k) + F_{k+1}^*(X_{k+1})], X_k \in \{X\}_k \text{ e } U_k \in \{U\}_k \quad (2.71)$$

sujeita à equação (2.68) e às outras restrições relevantes do sistema. Define-se que $F_{N+1}^*(X_{N+1}) = 0$. (2.72)

Os vetores estado nos estágios inicial e final podem ser especificados, tal que:

$$X_1 = X_0 \quad \text{e} \quad X_{N+1} = X_f \quad (2.73)$$

Aparentemente, a solução do problema é simples. Entretanto, o número de variáveis intervenientes no processo e o tempo de cálculo exigido restringem sua aplicabilidade a casos práticos. Por este fato, diversos pesquisadores têm procurado desenvolver algoritmos de solução da programação dinâmica que superem esse problema. Dos processos desenvolvidos, podem-se citar a programação dinâmica incremental ou diferencial discreta, a programação incremental de níveis múltiplos, e a programação dinâmica diferencial, entre outras.

A primeira aplicação da programação dinâmica em recursos hídricos foi feita por Hall e Buras (1961), o que mostra ser uma técnica bastante recente.

Diversos autores, utilizaram a Programação dinâmica em seus trabalhos. Young (1967) aplicou a programação dinâmica determinística à otimização da operação de um reservatório, com o uso da técnica de Monte Carlo; Russel (1972) também aplicou a técnica a um caso de reservatório simples e Askeu (1974), e Rossman (1977) utilizaram restrições probabilísticas à operação de um reservatório.

Outros autores aplicaram a programação dinâmica tradicional à operação de sistemas de reservatórios múltiplos, entre eles Araujo e Terry (1974) com um modelo determinístico dos reservatórios de Furnas; Aron e Scott (1971) e Schweig

e Cole (1968), que estudaram a operação conjunta de reservatórios superficiais e subterrâneos; Askew (1975), que introduziu restrições probabilísticas; Croley (1974), que fez uma aplicação da programação dinâmica estocástica explícita; Erickson et al. (1969), que utilizaram um modelo determinístico combinado com um modelo de previsão; Hall et al. (1968) e Takeuchi e Moreau (1974) utilizaram uma combinação com a programação linear; Liu e Tedrow (1973) aplicaram a programação dinâmica com a técnica de procura padrão de Hooke; Jamieson e Wilkinson (1972) utilizaram a programação dinâmica associada com modelo de simulação para operação em tempo real e Brito (1972) que utilizou um artifício de agrupamento de reservatórios para obter uma solução por programação dinâmica, da operação do sistema Furnas.

Outros autores utilizaram os algoritmos da programação dinâmica incremental, diferencial discreta, incremental com níveis múltiplos e serão citados, quando forem analisadas estas técnicas.

2.2.4.

Discussão de Alguns Algoritmos de Solução da Programação Dinâmica

2.2.4.1.

Programação Dinâmica Incremental

A programação dinâmica incremental (PDI) também é conhecida como programação dinâmica de estado e programação dinâmica incremental por aproximações sucessivas.

É uma forma iterativa de resolução dos modelos de programação dinâmica para solucionar o problema da dimensionalidade.

Larson (1968) introduziu o conceito inicial da técnica, que vem sendo desenvolvida até hoje. A programação dinâmica incremental procura a solução ótima da operação de um

sistema de reservatórios, na vizinhança de uma política inicial adotada. Essa vizinhança é definida como "corredor" e possuía uma largura constante no método de Larson (1968). Durante a otimização, o intervalo de tempo era reduzido.

No trabalho de Fults e Hancock (1972), o critério da largura do corredor foi modificado tornando-o variável.

Jacobson e Mayne (1970) desenvolveram a programação dinâmica diferencial, que foi aplicada também por Murray e Yakowitz (1979). Heidari et al. (1971) desenvolveram uma versão discreta, que chamaram de programação dinâmica diferencial discreta (PDDD), que pode ser entendida como uma versão da programação dinâmica incremental.

Figura 2.5. - Algoritmo da Programação Dinâmica Incremental

Basicamente, o procedimento da programação dinâmica incremental começa por adotar uma trajetória de estados inicial $\bar{X}_k$ ($\bar{X}_k \in \{X\}_k$ e $k = 1, 2, \dots, N$) (Figura 2.5) que é uma sequência de vetores-estado admissíveis, associados a uma correspondente política inicial $\bar{U}_k$ ($\bar{U}_k \in \{U\}_k$, $k = 1, 2, \dots, N$), resultando num valor $\bar{F}$ da função objetivo. A equação recursiva

da programação dinâmica é resolvida, então, dentro de um espaço de soluções artificial, chamado de corredor, que consiste em valores incrementais discretos fixos das variáveis de estado ao redor da trajetória da política inicial. Se alguma dessas novas trajetórias resultar em um valor F da função objetivo melhor que o anterior, essa passa a ser a nova trajetória inicial na próxima iteração. O processo prossegue até que convirja o valor da função objetivo. À medida que se processam as iterações, vai-se diminuindo progressivamente a largura do corredor. Se a função objetivo for convexa, o processo converge lentamente para o ótimo global. Nos outros casos, pode convergir para um ótimo local. Todo o processo é repetido adotando-se outras políticas iniciais, para se reduzir a possibilidade de se obter um ótimo local.

Seja X_k um vetor estado inicial associado ao estágio k e considere-se um vetor incremento discreto com dimensão n , na forma hipercúbica com seu centro em X_k . Se o elemento tiver por exemplo, 3^n nós, numerados sequencialmente de forma sistemática, para um caso bi-dimensional (Figura 2.6) terá a forma de um retângulo com nove nós. A trajetória de estado inicial torna-se um caminho, que passa através dos $(N+1)$ centros desses elementos.

Figura 2.6. - Elementos e nós para o caso bi-dimensional

Os vetores estados que são analisados são os 3^{n-1} nós que estão ao redor do nó central, cada um diferindo

de $\bar{X}_k$ por um valor incremental em um ou mais dos seus elementos do vetor.

O problema reduz-se a um problema conhecido de se encontrar o melhor caminho, através de um pequeno número de nós, entre o primeiro e o último estágio.

Isto significa que, ao se passar de um estágio k para o $k+1$, fixa-se, temporariamente, X_k e X_{k+1} na equação (2.68). Para sistemas inversíveis, U_k permanece como única incôgnita e pode ser obtido por:

$$U_k = BB^{-1} (X_{k+1} - AA \cdot X_k - Y_k) \quad (2.74)$$

onde BB^{-1} é o inverso da matriz BB .

A solução da equação recursiva (2.71) torna-se muito simples. Para se caminhar do nó i do k -ésimo elemento para o nó j do $(k+1)$ -ésimo elemento, é necessário se adotar uma certa regra de operação U_k , obtida da equação (2.74). Verifica-se a admissibilidade de U_k , isto é, se $U_k \in \{U\}_k$. Se o valor for admissível, utiliza-se a equação (2.71) para se obter o valor do retorno, associado a tal movimento; se o valor for inadmissível, esse passo é desprezado.

Cada elemento pode ser composto de um maior número de nós. Entretanto, para reduzir o tempo de cálculo, é recomendável que se utilize o mínimo possível.

A programação dinâmica incremental soluciona o problema da dimensionalidade, pois o número de variáveis deixa de crescer exponencialmente com o número de reservatórios. Entretanto, sua aplicação ainda fica restrita à aplicação em sistemas com pequeno número de reservatórios, uma vez que o tempo de cálculo ainda cresce exponencialmente ($T \sim t \cdot 3^{2(n-1)}$).

A programação dinâmica incremental tem sido aplicada no Central Valley Project, da Califórnia em modelos de longo prazo e de curto prazo (estes associados a programação linear). Vários artigos relatam as experiências de aplicação, entre eles os de Fults e Hancock (1972), Becker e Yeh (1974), Becker et al. (1976), Fults et al. (1976) e Yeh e Becker (1979).

2.2.4.2.

Programação Dinâmica Incremental com Níveis Múltiplos

Para se aplicar a programação incremental a problemas com grande número de reservatórios, superando o problema de tempo de cálculo, foram propostas diversas técnicas de aproximações sucessivas. A dúvida sobre a confiabilidade em se ter alcançado um ótimo global e não um ótimo local permanece.

Uma proposta alternativa foi sugerida por Nopmongkol e Askew (1976), chamada de programação dinâmica incremental com níveis múltiplos (PDIM). Por esta técnica resolve-se um problema de grandes dimensões através de uma série de soluções de problemas de dimensões menores, através da programação dinâmica incremental.

Para melhor compreensão da técnica, considere-se um sistema (figura 2.7.) com n componentes inter-relacionados.

O comportamento dinâmico do sistema é representado pela equação (2.68). A função objetivo é definida pela equação (2.71).

Figura 2.7. - Comparação da decomposição convencional do sistema e pela PDIM - Configuração do Sistema

O procedimento usual nas análises de grandes sistemas era decompô-los em n subsistemas independentes com todas as ligações entre eles cortadas e substituídas por ligações entre os diversos subsistemas e um central, como está representado na figura 2.8.

Figura 2.8 - Separação Convencional do Sistema

A otimização é efetuada independentemente para cada subsistema, utilizando-se objetivos individuais. Os resultados são transmitidos ao subsistema central através de ligações artificiais, sob a forma de parâmetros do tipo Lagrangeano. É feita então uma otimização do subsistema central para se avaliar o quanto se aproximou de uma política ótima global. São feitos os ajustes necessários para satisfazer às restrições individuais e envia as informações de volta aos vários subsistema, para novo ciclo do processo, até se obter uma convergência da função objetivo global.

Por outro lado, a programação dinâmica incremental com níveis múltiplos não transforma o sistema original em outro, com hierarquia diferente mas o decompõe em dois subsistemas, um ativo e outro inativo.

No primeiro nível de iteração apenas um elemento é considerado como um subsistema ativo, permanecendo o restante inativo (Figura 2.9).

Figura 2.9. - Decomposição do sistema, no primeiro nível de PDIM

O subsistema ativo assume, temporariamente, toda a responsabilidade do sistema. Sua tarefa é otimizar a função objetivo do sistema, através do ajuste de seus próprios atributos, isto é, seu estado, satisfazendo a todas as equações de restrição do sistema. Quando não for possível melhorar a função objetivo por uma modificação da política de operação, este elemento é tornado inativo e um outro ativo. Este processo é repetido até que não haja melhora da função objetivo e todos os elementos já tenham sido considerados ativos ao menos uma vez.

No segundo nível, considera-se como subsistema ativo, dois elementos por vez (Figura 2.10)

Figura 2.10 - Decomposição do sistema, no segundo nível de PDIM

Uma pesquisa análoga a de primeiro nível é executada, sendo que um certo número de alternativas é eliminado em níveis inferiores. Não é necessário que se faça n níveis de iteração. O processo pode ser interrompido quando se atingir uma convergência pré-determinada.

A redução do tempo de cálculo é sensível. Para um sistema com quatro dimensões, a programação dinâmica incremental com níveis múltiplos soluciona o problema cinco vezes mais rápido que a incremental.

A elaboração de um programa global, para executar as iterações em todos os níveis pode trazer problemas de espaço de memória, sendo preferível elaborar um programa para cada nível.

O efeito da escolha da política inicial não influencia de forma sensível a velocidade de convergência do processo.

Com algumas modificações, pode ser aplicada a sistemas não inversíveis, isto é, em que o número de variáveis de decisão é maior do que o número de variáveis de estado, o que não seria fácil de executar pela programação dinâmica incremental em problemas de grandes dimensões. A aplicação em problemas estocásticos encontra sérias dificuldades. A alternativa é executar uma análise estocástica implícita.

2.2.5.

Modelos de Simulação

2.2.5.1.

Um Modelo de Simulação Simplificado

Um modelo de simulação da operação de um sistema de reservatórios envolve a solução da equação da continuidade para os diversos pontos de controle do sistema.

O modelo proposto por Liu (1973) apresenta uma representação matricial da interligação dos reservatórios e pontos de controle, que facilita a solução das equações da continuidade para um sistema com uma configuração qualquer.

Neste modelo, o autor utilizou o conceito dos níveis-índices introduzido por Beard (1967) e particularmente utilizado no modelo geral formulado pelo HEC (1976).

Um sistema de reservatórios pode ser representado por um diagrama esquemático, consistindo em uma série de nós interligados, representando os reservatórios e os pontos de controle.

No modelo proposto por Liu (1973) são consideradas quatro variáveis básicas em cada ponto de controle: a vazão afluente incremental (V_{afl_i}), uma vazão de derivação do reservatório (D_i), a vazão de descarga do reservatório (V_{di}) e o volume armazenado no reservatório (V_i).

Estas variáveis são inter-relacionadas pela equação da continuidade. No modelo de Liu, não se considera o efeito do tempo de trânsito da água entre dois pontos de controle. As vazões derivadas são consideradas como perdas do sistema, uma vez que não retornam a outros pontos de controle.

Para um sistema como o da figura 2.11, pode-se expressar a equação da continuidade por:

Figura 2.11 - Representação esquemática de um sistema de reservatórios

$$\sum_{i=1}^3 V_{i,t+1} = \sum_{i=1}^3 (V_{i,t} + V_{afli,t}) - (\sum_{i=1}^3 D_{i,t} + V_{d3,t}) \quad (2.75)$$

onde: $i = 1, 2, 3$ é o número do reservatório ou ponto de controle

t = intervalo de tempo considerado

As equações da continuidade para cada um dos pontos de controle são escritas como:

$$V_{1,t+1} = V_{af11,t} + V_{1,t} - (D_{1,t} + V_{d1,t}) \quad (2.76)$$

$$V_{2,t+1} = V_{af12,t} + V_{2,t} - (D_{2,t} + V_{d2,t}) \quad (2.77)$$

$$V_{3,t+1} = (V_{af13,t} + V_{3,t} + V_{d1,t} + V_{d2,t}) - (D_{3,t} + V_{d3,t}) \quad (2.78)$$

A soma das equações (2.76), (2.77) e (2.78) resulta na equação de continuidade do sistema (2.75).

As expressões acima, para um sistema com configuração qualquer podem ser apresentadas numa forma matricial:

$$A \cdot \vec{V}_{t+1} = A(\vec{V}_{af1t} + \vec{V}_t - \vec{D}_t) - \vec{V}_{d,t} \quad (2.79)$$

onde:

A é uma matriz de configuração do sistema, com dimensão $m \times m$.

m é o número total de pontos de controle no sistema.

Variáveis com setas são vetores colunas.

Um elemento $a_{i,j}$ é 1, se o ponto de controle j estiver a montante de i ou é o próprio i , caso contrário, o elemento é nulo.

O conjunto de equações de continuidade expresso por (2.79) é a base de um modelo de simulação, onde os armazenamentos são os estados do sistema e as derivações e as descargas são as variáveis de decisão.

As perdas por evaporação e infiltração podem ser facilmente consideradas, como uma fração dos armazenamentos.

No modelo de Liu, a operação é dividida em duas fases. Na primeira, calculam-se o volume de água disponível, o volume liberado e o volume armazenado no sistema. Na segunda fase, é feita uma distribuição dos armazenamentos pelos reservatórios, segundo um critério de prioridades.

Primeira Fase - Cálculo dos Volumes do Sistema

Em uma operação de regularização, procura-se armazenar o máximo volume de água possível, garantindo-se o atendimento à demanda.

Inicialmente, repõem-se nas equações (2.79) o valor da descarga pelo mínimo exigido $\vec{V}_{dmin\ t}$. A seguir, sabendo-se que a descarga real pode ser maior que V_{dmin} em algum ponto de controle, transforma-se a equação da continuidade por uma inequação, na forma:

$$A \vec{V}_{t+1} \leq A(\vec{V}_t + \vec{V}_{afl\ t} - \vec{D}_t) - \vec{V}_{dmint}, \text{ para todo } t \quad (2.80)$$

limitando-se os armazenamentos por:

$$\vec{V}_t \leq \vec{V}_{max,t} \quad \text{para todo } t \quad (2.81)$$

$$\vec{V}_t \geq \vec{V}_{min,t} \quad \text{para todo } t \quad (2.82)$$

As inequações (2.80), (2.81) e (2.82) formam o conjunto de funções de operação do sistema, para regularização. A violação da expressão (2.82) constitui uma falha do sistema, devendo-se reduzir as descargas e as derivações.

O algoritmo para a solução da primeira fase do modelo está descrito a seguir.

1. Calcula-se a quantidade de água disponível em cada ponto de controle antes das descargas e derivações.

$$VX_{i,t} = \sum_{k=1}^i a_{i,k} (V_{aflk,t} + V_{k,t}) \quad i=1, 2, \dots, M \quad (2.83)$$

onde

$VX_{i,t}$ é o volume disponível no sistema entre os reservatórios 1 e i

$a_{i,k}$ é um elemento da matriz de configuração do sistema.

2.

- a) Calcula-se a quantidade de água após as descargas e derivações necessárias (principais).

$$VX_{i,t} = VX_{i,t} - \sum_{k=1}^i a_{i,k} \cdot DP_{k,t} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2.84)$$

Se $VX_{i,t} < VP_{i,t}$ então faz-se $VX_{i,t} = VP_{i,t}$ e reduz-se a retirada $DP_{i,t}$ do valor da diferença entre $VX_{i,t}$ e $VP_{i,t}$.

onde: $VP_{i,t}$ é o armazenamento mínimo permissível e

$DP_{i,t}$ é a retirada de água necessária (principal)

- b) Repete-se o processo do item "a" para outras retiradas.
- c) Subtrai-se a descarga mínima para jusante, do armazenamento, registrando-se se houve falta de água

$$VX_{i,t} = VX_{i,t} - V_{dmini,t} \quad i=1, 2, \dots, M \quad (2.85)$$

3. Inicializa-se todos os armazenamentos no seu valor mínimo:

$$V_{i,t+1} = V_{\min i,t+1} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2.86)$$

4. Determina-se o armazenamento de todos os reservatórios por:

$$V_{i,t+1} = \min \left\{ V_{\max i,t+1}; \frac{1}{a_{ji}} \left[VX_{j,t} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^M a_{jk} \cdot V_{k,t+1} \right] \right\}, \quad j=i, 2, \dots, M \quad a_{ji} \neq 0 \quad (2.87)$$

Para exemplificar o processo, utiliza-se o sistema da figura 2.10. As funções de operação do sistema são:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{1,t+1} \\ V_{2,t+1} \\ V_{3,t+1} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{afl1,t} + V_{1,t} - D_{1,t} \\ V_{afl2,t} + V_{2,t} - D_{2,t} \\ V_{afl3,t} + V_{3,t} - D_{3,t} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{dmin1,t} \\ V_{dmin2,t} \\ V_{dmin3,t} \end{bmatrix} \quad (2.88)$$

$$V_{i,t+1} \leq V_{\max i,t+1} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2.89)$$

$$V_{i,t+1} \geq V_{\min i,t+1} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2.90)$$

Para o ponto de controle 3, $V_{3,t} = V_{\max 3,t} = V_{\min 3,t} = 0$, para todo t . Os passos 1 e 2 do algoritmo calculam o lado direito da equação (2.88), recebendo a notação $VX_{1,t}$, $VX_{2,t}$ e $VX_{3,t}$. As funções de operação estão representadas graficamente na figura 2.12.

O passo 3 indica que a operação é iniciada no ponto 0'. O passo 4 determina os armazenamentos finais segundo as equações:

$$V_1 = \min(V_{\max 1}, VX_1, VX_3 - V_{\min 2}) \text{ (pontos A, B ou C)} \quad (2.91)$$

$$V_2 = \min(V_{\max 2}, VX_2, VX_3 - V_1) \text{ (pontos D, E ou F)} \quad (2.92)$$

As regras de operação de um sistema de reservatórios fixam as descargas e os armazenamentos de cada elemento. Na figura 2.12, a regra de operação indicada pela linha $O' O''$ conduz à operação no ponto H, que mantém os armazenamentos em cada reservatório proporcionais a sua capacidade total. Por outro lado, a regra indicada pela curva $O' I J O''$, que leva à operação no ponto K indica uma preferência em se manter um armazenamento maior no reservatório 1.

Essas curvas de redistribuição dos armazenamentos podem ser obtidas admitindo-se coeficientes de ponderação aos armazenamentos.

$$V_j = w_j * V_{X_3} \quad j = 1, 2 \dots m \quad (2.93)$$

$$\text{onde } w_j \text{ é o fator de ponderação e } \sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad (2.94)$$

Esses fatores podem ser função dos afluxos, das capacidades dos reservatórios ou obtidos segundo o critério dos níveis-índices. Para cada nível de armazenamento total do sistema, pode haver coeficientes de ponderação diferentes, o que causa a formação das linhas de regra de operação com forma poligonal.

A redistribuição dos armazenamentos se inicia pela determinação dos fatores de ponderação para cada faixa de armazenamento total. Na figura 2.12., para a operação $O' I J O''$ são delimitados quatro sub-níveis de armazenamento total correspondentes aos pontos O', I, J e O'' . O armazenamento total em cada sub-nível é calculado como ST_1, ST_2, ST_3 ou ST_4 . O armazenamento total do sistema é comparado com os armazenamentos dos sub-níveis, para determinar o segmento que irá governar a regra de operação.

Algumas vezes a regra de operação adotada pode violar alguma restrição do sistema. Para a regra definida, na figura 2.12, pelas linhas $O' I' J' O''$, a operação conduz ao ponto

F_1 , que está fora da área de soluções factíveis. Neste caso, a operação pode ser mantida no ponto F , mantendo-se o armazenamento do sistema, podendo causar um déficit na descarga ou levá-lo ao ponto F_2 , que mantém a regra de operação, mas depleciona o reservatório 2 de uma quantidade adicional $\overline{FF}_2$.

Nesse modelo proposto por Liu (1973), não são consideradas as possibilidades de derivação de água entre os reservatórios. No seu algoritmo de redistribuição dos armazenamentos não se limita a quantidade de água que pode ser transportada de um reservatório a outro, em um intervalo de tempo, que se constitui numa limitação prática importante.

O modelo de Liu (1973) apresenta uma forma interessante de caracterizar o sistema através da matriz de transição, que permite uma simplificação analítica considerável na formulação das relações de interdependência e de continuidade de sistemas complexos. Os algoritmos de solução são simples e permitem visualizar a conceituação de um modelo de simulação generalizado, embora esse seja de aplicação restrita.

Um modelo de simulação generalizado, o HEC-5, será descrito com maior detalhe em capítulos subsequentes.

2.2.5.2.

A Técnica dos Níveis-Índices

Em um modelo de simulação é importante definir um critério de prioridades com que devem ser feitas as descargas dos reservatórios, que se constitui na base da regra de operação.

Beard propôs um método, que denominou de níveis-índices, através do qual é possível estabelecer uma escala de prioridades de armazenamentos e descarregamentos para os vários reservatórios do sistema.

Basicamente, o método consiste na associação de volumes acumulados no reservatório com um índice correspondente. A operação dos reservatórios do sistema é efetuada de tal forma a descarregar os volumes armazenados dos reservatórios que se encontram com um nível d'água associado a um índice superior aos demais. A combinação de valores dos níveis-índices dos diversos reservatórios vai determinar diferentes tipos de regras de operação.

Pode-se dividir o volume total de um reservatório em diversas faixas, cada uma sendo operada segundo um determinado critério. A figura 2.13 mostra, esquematicamente, uma divisão de um reservatório em quatro faixas:

Figura 2.13 - Corte Longitudinal Esquemático de um Reservatório

A zona inativa corresponde ao volume morto do reservatório, sendo destinada a garantir um volume para o acúmulo dos sedimentos afluentes ou para criar uma carga adicional às turbinas.

A zona de resguardo ("buffer zone") é o volume mínimo que deve ser mantido armazenado no reservatório para um funcionamento hidráulico eficiente das obras de descarga, para as vazões de regularização.

A zona de regularização ou volume útil do reservatório é responsável por garantir o suprimento das vazões de demanda, nos períodos de estiagens, quando a vazão natural é insuficiente para atender aos propósitos de uso da água. O topo da zona de regularização não precisa coincidir, necessariamente, com a crista do vertedor. Quando o reservatório possui o propósito de controle de cheias, pode existir um volume acima do volume útil, e abaixo da crista do vertedor denominado de espera, para conter as ondas de cheias afluentes.

A zona de controle de cheias é o volume alocado ao reservatório para a laminação das ondas de cheias através dos vertedores.

Nota-se, pela definição dessas zonas do reservatório, que deve existir um critério individual de descargas e armazenamentos para diversas posições do nível d'água. Através da técnica dos níveis-índices é possível ainda, subdividir essas zonas em algumas faixas com critérios de operação diferenciados.

Para ilustrar esta técnica, apresenta-se um exemplo de um sistema com quatro reservatórios cujos volumes correspondentes às diversas zonas são dados na tabela 2.8.:

Tabela 2.8. - Níveis-Índices Correspondentes aos Diferentes Armazenamentos no Reservatório

Nº DO RESERVATÓRIO	TOPO DA ZONA INATIVA ($10^6 m^3$)	TOPO DA ZONA RESGUARDO ($10^6 m^3$)	TOPO DA ZONA DE CONSERVAÇÃO ($10^6 m^3$)	TOPO DA ZONA DE CONTROLE DE CHEIAS ($10^6 m^3$)
1	10	50	500	1000
2	50	100	1000	2000
3	100	200	1500	5000
4	500	1000	2000	7000

Supõe-se uma operação de acordo com as seguintes regras:

1. Descarregar todo o armazenamento de controle de cheias, mantendo o mesmo grau de risco em todos os reservatórios;
2. Descarregar inicialmente o volume útil do reservatório 1;
3. Descarregar os volumes úteis dos reservatórios 2 e 3 paralelamente;
4. Descarregar a seguir o volume útil do reservatório 4.
5. Descarregar proporcionalmente o volume da zona de resguardo de todos os reservatórios.

Neste exemplo, bastam seis níveis-índices para que seja definida essa operação. O nível mínimo, nível 1, corresponde ao topo da zona inativa e o nível 6, ao topo da zona de controle de cheias.

Os níveis-índices atribuídos para o exemplo estão mostrados na tabela 2.9:

Tabela 2.9 - Níveis-índices dos reservatórios do sistema

NÍVEL	Res. 1	Res. 2	Res. 3	Res. 4
Topo da Zona de Controle Cheias	6	6	6	6
Topo da Zona de Regularização	5	5,4	5,4	5,4,3
Topo da Zona de Resguardo	4,3,2	3,2	3,2	2
Topo da Zona Inativa	1	1	1	1

O procedimento consiste em fazer os descarregamentos dos armazenamentos situados entre os níveis-índices maiores, caminhando-se sucessivamente, para os níveis inferiores. Os reservatórios com armazenamentos entre dois níveis-índices iguais deplecionam-se paralelamente procurando à medida do possível, manter o mesmo grau de risco.

No exemplo citado, os níveis-índices atribuídos conduzem à operação especificada, inicialmente. Na figura 2.14 está apresentado um diagrama esquemático, mostrando a evolu-

ção do deplecionamento nos diversos reservatórios. Nota-se, pois, que o reservatório 1 é o que possui a maior prioridade para efetuar os descarregamentos, enquanto o reservatório 4 é o que deve manter o armazenamento na zona de regularização por maior tempo.

Figura 2.14. - Diagrama de prioridades de esvaziamento dos reservatórios

A técnica dos níveis-índices conduz a uma forma simples de se escalonar as prioridades de operação nos modelos de simulação de sistemas complexos. Tem sido utilizada por Liu (1973), Sigvaldason (1976) e no modelo geral do HEC (1976).

2.2.6.

A Utilização da Hidrologia Sintética na Operação de Sistemas Complexos de Reservatórios

A utilização da geração de séries sintéticas de vazões é um capítulo especial nos estudos de operação de sistemas de reservatórios. Não é objetivo desse trabalho analisar

tais modelos, que, entretanto, merecem um estudo particular.

A hidrologia sintética pode ser utilizada na forma de modelos de geração, nos estudos de planejamento ou projeto de sistemas de reservatórios, ou na forma de modelos de previsão, com aplicação na operação em tempo real dos sistemas.

Já foi mencionado em outro capítulo a utilização dos dados gerados estocasticamente, no dimensionamento de reservatório único. A geração de vazões ou precipitações em sistemas de reservatórios múltiplos introduz a necessidade da consideração da correlação espacial das variáveis.

As variáveis geradas podem ser precipitação ou vazão. A geração de dados de precipitação exige o uso de um modelo de transformação chuva-vazão. Entretanto, possui a vantagem de não sofrer diretamente as influências causadas pela modificação nas bacias hidrográficas. Esses modelos são citados nos trabalhos de Braga (1972), Delleur et alii (1976), Jamieson e Wilkinson (1972) e Conejo (1976).

Os modelos de geração de vazões podem ser específicos a determinadas aplicações, como o utilizado por Sigvaldason e Benett (1979). Outros são mais conceituais e aplicam-se a casos mais gerais.

Uma escola de autores utilizam os modelos auto-regressivos, que se baseiam na manutenção de certos parâmetros estatísticos da série histórica e a estrutura de correlação das vazões. Incluem-se os modelos markovianos, utilizados por Ambrosino et alii (1979), Braga (1979) Croley e Rao (1979) e Delleur et alii (1976) e os modelos de média móvel (MA) e os modelos autoregressivos de média móvel (ARIMA), utilizados por Braga (1979) e Delleur et alii (1976).

Outros modelos baseiam-se na decomposição da série temporal de vazões em sequências de harmônicos, individua

lizando um componente aleatório, de caráter estacionário. Aplicado por Barreto e Guerreiro (1975) e Delleur et alii (1976).

Um terceiro grupo de modelos, também auto-regressivos de primeira ordem procuram uma aproximação com os modelos físicos. Um exemplo é o modelo Shot-Noise, apresentado por Weiss (1977).

O modelo Shot-Noise simula o hidrograma, através de saltos sucessivos na fase de ascensão e através de uma curva exponencial nos trechos de recessão. Os modelos Shot-Noise são mais realistas quanto à representatividade física do que os modelos gaussianos. São da mesma ordem de complexidade que esses e permitem a geração de vazões em sítios múltiplos, até em nível diário.

A utilização de métodos otimizantes de operação de reservatórios, com um enfoque estocástico exige uma análise minuciosa dos modelos de geração (otimização estocástica implícita). A falta de uma perfeita consideração do caráter estocástico das vazões pode causar uma deficiência nos estudos de operação, que inutiliza as vantagens trazidas pelos modelos otimizantes.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA PARA ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE RESERVATÓRIOS MÚLTIPLOS ATRAVÉS DE MODELOS DE SIMULAÇÃO

3.1.

NECESSIDADE DO USO DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO

Nos capítulos anteriores fez-se uma discussão dos modelos utilizados para a análise da operação de sistemas de reservatórios múltiplos.

Pelas descrições efetuadas, conclui-se que a complexidade de um sistema de reservatórios é um fator importante para a seleção de métodos e técnicas de análise de sua operação.

A complexidade do sistema é função da sua dimensão, da variabilidade dos dados hidrológicos, do intervalo de tempo de análise, e do número de propósitos e de objetivos a serem atendidos. O sistema mais simples pode ser constituído por um único reservatório, servindo a um único propósito. Um sistema complexo pode consistir em um grande número de reservatórios, com derivações entre eles e atendendo a propósitos de regularização, controle de cheias e outros.

Três métodos básicos são utilizados nos estudos de planejamento, projeto e operação de sistemas de reservatórios: os métodos simplificados, os métodos otimizantes e os métodos de simulação.

Os métodos simplificados, tais como as análises não sequenciais, são utilizados para cálculos manuais. Isso limita a complexidade do sistema que pode ser analisado, bem como a extensão da série hidrológica. Esses métodos sô têm aplicação prática para estimativas iniciais rápidas ou para uma análise de sensibilidade de resultados obtidos por técnicas mais elaboradas.

Os modelos de otimização, que são os algoritmos analíticos que analisam uma função objetivo do sistema, compreendem as programações linear, não linear e dinâmica. Geralmente, são utilizados para analisar a sensibilidade da função objetivo com os parâmetros e as políticas de operação. São necessárias várias hipóteses simplificadoras para a resolução dos problemas. Os modelos de otimização não pretendem resolver o problema real, na maioria das vezes, mas fornecer uma representação aproximada do mesmo, de forma que a solução obtida esteja próxima do ótimo teórico.

A experiência atual no projeto de sistemas de recursos hídricos tem mostrado que, para sistemas altamente complexos, os modelos de otimização servem para solucionar partes do sistema global ou fornecer uma versão simplificada do problema geral. As pesquisas nesta área têm se desenvolvido nos últimos anos e estão se tornando possível, progressivamente, o estudo de sistemas mais complexos. Entretanto, a estruturação desses modelos tem uma aplicação específica aos problemas analisados, o que dificulta uma difusão mais rápida destas técnicas.

A análise de sistemas tem sido utilizada com frequência no projeto e operação de sistemas de reservatórios, devido ao número de inter-relações de seus componentes. É necessário, pois, analisar essas interdependências, sem perder a possibilidade de um tratamento matemático.

Os modelos de simulação representam, pois, uma alternativa aos usos de modelos otimizantes e também um complemento destes. Os modelos de simulação são um conjunto de relações matemáticas, que descrevem a operação espacial e temporal do sistema. Podem considerar a natureza estocástica das chuvas e das vazões e manejar as equações não lineares de restrição e da função objetivo. Seu propósito é representar e operar o sistema na forma mais detalhada possível, para fornecer uma avaliação do desempenho do sistema real. Devido à complexidade das relações existentes na operação de um sistema de reservatórios, não se representa a operação sob uma forma analítica. Assim, não é

usual se executar uma análise de otimização dentro de um modelo de simulação. A solução ótima é obtida a partir de regras de o peração heurísticas, determinadas iterativamente e apoiadas na experiência e sensibilidade do engenheiro.

3.2.

ETAPAS DO ESTUDO

O procedimento para se efetuar uma análise de um sistema de reservatórios, utilizando um modelo de simulação pode ser dividido em algumas etapas, a saber:

- identificação do sistema;
- determinação dos objetivos do estudo e especificação dos critérios de avaliação dos objetivos;
- coleta e análise dos dados do sistema;
- formulação de um modelo de simulação (ou uso de um modelo existente), que seja matematicamente e quantitativamente representativo do sistema, da hidrologia e do critério operacional.
- calibração do modelo;
- organização e execução de simulações;
- análise e avaliação dos resultados da simulação quanto ao atendimento dos objetivos do estudo.

Na verdade, existe uma dependência entre as diversas etapas acima, devendo-se ter em mente, ao longo do processo essas inter-relações, para se obter um bom rendimento da análise.

3.2.1.

Identificação do Sistema

A identificação do sistema consiste em determinar as suas características geográficas, hidrológicas e físicas.

Os limites geográficos dos sistemas são as bacias hidrográficas. É necessário que sejam feitas as sub-divisões das bacias contribuintes aos diversos pontos de controle do estudo devendo-se considerar com atenção os casos de reversões de bacias e os casos de segmentação do sistema em subsistemas, por problemas de capacidade dos modelos.

As características físicas englobam a identificação das estruturas do sistema, das obras de ligação existentes e a

localização de trechos de rios com problemas de vazões mínimas ou de qualidade da água, áreas potenciais para barramentos e locais de demanda de água. É importante também que se analisem as características de obras ou reservatórios existentes, principalmente quando são operados por entidades diferentes.

A hidrologia do sistema fica caracterizada pelo conhecimento dos dados de precipitação, evaporação e vazão nos diversos locais de interesse do sistema.

3.2.2.

Determinação dos Objetivos do Estudo e Especificação dos Critérios de Avaliação dos Objetivos

A seleção dos objetivos do estudo depende do escopo do mesmo. Em estudos de planejamento quer-se determinar a melhor combinação de obras que proporcione o melhor atendimento à demanda. Numa fase de projeto, procura-se refinar a localização e as dimensões de estruturas específicas, indicadas na fase de planejamento. Na operação do sistema, a informação procurada é a de como se melhorar o seu desempenho, por exemplo, minimizando as flutuações de armazenamento nos reservatórios, mantendo constante o atendimento à demanda.

Para se medir o desempenho do sistema, quanto ao atendimento do seu objetivo são definidos alguns critérios quantitativos, expressos por uma função objetivo. Como já foi discutido em outro capítulo, os critérios adotados na função objetivo podem ser econômicos, como produto nacional bruto, renda regional, etc, ou não econômicos, como por exemplo, a área inundada de uma região. De qualquer forma, é importante que o critério adotado seja, sempre que possível, o mesmo, para as diversas alternativas do sistema, de forma a se poder comparar, facilmente, os ganhos ou perdas introduzidos por modificações no sistema ou na sua operação.

3.2.3.

Coleta e Análise dos Dados do Sistema

Para que a simulação da operação de um sistema de reservatórios seja representativa do sistema real, é necessário que se disponha de uma quantidade considerável de dados. A disponibilidade e qualidade dos dados irá influenciar diretamente o grau de precisão com que o modelo irá representar o sistema real, bem como influirá na escolha do modelo e no intervalo de cálculo.

Basicamente, são necessários três tipos de informações: dados de caracterização dos componentes; dados descrevendo a hidrologia e dados de especificação de critérios operacionais e demandas do sistema.

Esta fase de coleta de dados requer um alto gasto de tempo e equipe. Para agilizar o processo, é necessário que se defina o quanto antes, o intervalo de tempo utilizado, o período de dados disponível, a forma dos dados e a existência de pessoas e equipamentos para analisar esses dados. Esse exame irá ajudar a identificar áreas problemáticas, onde os dados não são disponíveis ou adequados.

O grau de especificação da caracterização dos componentes depende da fase de aplicação da simulação. Nas fases de planejamento, sempre é necessário fazer algumas hipóteses quanto às características dos componentes do sistema. Deve-se, entretanto, utilizar o máximo possível as informações existentes. Numa fase de projeto, pode-se dispor de algumas informações adicionais, como curvas cota-área-volume dos reservatórios, dimensões de canais de ligação, cotas de inundação etc. Ainda nesta fase, algumas simplificações devem ser feitas, como a utilização de equações teóricas para as obras de descarga, quando ainda não se dispõe dos resultados de modelos hidráulicos reduzidos. Para a operação do sistema, deve-se procurar obter todas as informações do sistema real. Existe, na verdade, algumas dificul-

dades de obtenção de dados nesta fase, pois muitas vezes existem algumas discrepâncias entre os detalhes de projetos e os realmente construídos. Uma consulta coordenada às equipes de projeto e de operação da entidade responsável pelo sistema pode superar essas dificuldades.

As informações hidrológicas são de interesse absoluto para o sucesso do estudo da simulação.

Nos estudos de planejamento e projeto depara-se multas vezes, com problemas na obtenção dos dados hidrológicos. A primeira dificuldade encontrada é a localização dos postos fluviométricos e pluviométricos, que não coincidem com os locais de interesse. Deve-se efetuar estudos de regionalização, através de adimensionalizações em função das características físicas das bacias, que permitam extrapolar os dados para os locais de interesse. Um outro aspecto a considerar é a extensão da série de dados observados disponível. As séries podem ter pequenas extensões ou o período de observações comum nos diversos postos é pequeno ou ainda as séries podem possuir lacunas de observação. Nestes casos há a necessidade, após uma análise de consistência dos dados, de se criar uma série histórica homogênea. Isto requer o uso de técnicas de correlação estatística ou a aplicação de modelos de simulação do ciclo hidrológico para completar essas séries.

Quando se considera o aspecto estocástico das vazões, necessita-se, nesta fase, de um modelo de geração de vazões sintéticas, para criar uma série gerada, que será utilizada em uma análise estocástica implícita (OEI).

Nos problemas de operação do sistema, necessita-se de um maior refinamento nos dados hidrológicos. É imprescindível que se faça uma análise cuidadosa das curvas-chaves existentes, para se fixar as capacidades máximas de transporte dos canais. Em operação em tempo real, exige-se até a existência de uma rede telemétrica de medições de vazões e precipitações no sistema,

para fornecer os dados de entrada do modelo de simulação, diretamente.

A especificação dos critérios operacionais e das demandas do sistema é efetuada, inicialmente, com base na experiência da entidade responsável pelo sistema, sendo alterada ao longo das análises. Na fase de operação do sistema, os critérios operacionais já estão mais definidos, podendo variar em função do estado do sistema e da situação hidrológica do mesmo.

Os critérios operacionais nos modelos de simulação são subjetivos, podendo estar associados a técnicas como a dos níveis-índices. Incluem também as limitações de descargas mínimas e máximas dos reservatórios, função das demandas e das capacidades dos canais. Entretanto, embora subjetivos, os critérios operacionais estão orientados pela procura da maximização da função-objetivo.

3.2.4.

Formulação de um Modelo de Simulação

Um modelo de simulação é formulado pela descrição matemática e quantitativa dos componentes de um sistema, da hidrologia, do critério operacional e das demandas do sistema.

Para se desenvolver um estudo de operação de reservatórios pode-se desenvolver um modelo particular para o sistema analisado ou utilizar um modelo geral, que já tenha sido testado e utilizado para modelar sistemas similares. A decisão de se desenvolver ou adaptar um programa dependerá dos objetivos da análise, da potencialidade do modelo existente, dos dados disponíveis e dos custos e tempos envolvidos.

Os modelos gerais necessitam de grande área de memória computacional, o que os inviabiliza quando não se dispõe de um computador de grande porte. Por seu caráter geral, esses modelos possuem capacidade de analisar uma série de variantes, que

muitas vezes não se encontram no sistema de interesse. Por outro lado, durante o processo de simulação, depara-se com inúmeras configurações potenciais e um número quase ilimitado de regras de operação possíveis. Neste caso, o modelo generalizado é vantajoso por ser bastante flexível para permitir modificações de configurações ou de políticas de operação, sem a necessidade de se alterar a estrutura do programa.

Algumas vezes, um modelo específico pode ser mais adequado, quando houver necessidade de adaptação do modelo geral para se ajustar a alguma característica peculiar do sistema. O tempo e os recursos gastos para se compreender a estrutura do modelo geral e introduzir modificações podem ser maiores que o total dispendido para o desenvolvimento de um novo modelo.

Entretanto, a escolha de um modelo generalizado, permite que se explore o conhecimento de sua estrutura, possibilitando que se faça modificações no mesmo, tornando o seu campo de aplicação cada vez maior.

Para a elaboração do modelo é necessário que se faça uma caracterização do sistema hidrológico, dos componentes do sistema de reservatórios e um procedimento geral para o desenvolvimento de regras de operação e consideração das demandas.

Entende-se que o modelo de simulação da operação de reservatórios analise o escoamento da água através da rede de canais e reservatórios do sistema. Uma forma mais geral do modelo analisaria também a transformação chuva-vazão.

Normalmente, as três informações hidrológicas básicas necessárias em estudos de simulação são os afluxos locais aos reservatórios e pontos de controle e a evaporação dos reservatórios.

As vazões são expressas em termos de sua magnitude, período de ocorrência e local de medição. Pode-se admitir que

os dados de vazão de um determinado local sejam função dos valores registrados em outro ponto do sistema, com base em uma análise de regionalização.

A evaporação deve ser considerada nos modelos de operação de longo prazo, quando se constitui em uma perda do volume armazenado. Seus valores são representados em termos de magnitude e período de ocorrência.

Os componentes do sistema são os reservatórios, os canais, os pontos de controle e, em alguns casos, as usinas hidrelétricas e as derivações.

As características físicas dos reservatórios são apresentadas por suas curvas cota-volume, cota-área e capacidades de descargas de extravasão ou de vazões regularizadas. Para a consideração de reservatórios com propósitos múltiplos devem ser especificadas as faixas dos volumes de armazenamentos para os diversos propósitos.

Os canais conduzem o escoamento natural e as descargas dos reservatórios para os diversos pontos de controle do sistema. Para sua descrição, duas características são importantes: a capacidade máxima de escoamento do canal e os parâmetros de amortecimento. A primeira característica é utilizada nos estudos de regularização, para limitar as vazões máximas a serem descarregadas nos pontos de controle. A segunda é utilizada nos estudos de controle de cheias, para avaliar o tempo de propagação das vazões e seu amortecimento ao longo dos canais.

As usinas hidrelétricas são caracterizadas pela descrição das variáveis que influem na geração de energia. Estas incluem a capacidade instalada, a carga efetiva, o fator de capacidade e diversas relações entre o armazenamento no reservatório, as vazões turbinadas e a eficiência.

As derivações são descritas, através da especifica-

ção dos locais de saída e entrada da água, dos critérios de a mortecimento utilizados para esse transporte e do critério de liberação dessas descargas, que pode ser função dos armazenamentos, dos afluxos ou de outra variável hidrológica.

As demandas do sistema estão associadas aos pontos de controle do sistema. Podem ser constantes ou variáveis ao longo do tempo. Podem ser especificadas com dois níveis de prioridade, um de vazões desejáveis e outro de vazões mínimas requeridas. A fixação do esquema de atendimento às demandas está ligada às regras de operação do sistema, cuja formulação será descrita no capítulo seguinte.

Além das caracterizações acima descritas é necessário um esquema de representação das interligações entre os diversos componentes do sistema, para que seja feita a representação espacial do sistema no modelo matemático.

A formulação de um modelo de simulação segundo as características descritas conduz a uma possibilidade de aplicação geral. Entretanto, outras caracterizações adicionais podem ser feitas, ampliando o campo de ação desses modelos, como por exemplo, a consideração de análises econômicas dos resultados das operações.

3.2.4.1.

Regras de Operação do Sistema

As regras de operação de um sistema de reservatórios devem ser especificadas para se estabelecer como o uso da água deve ser administrado através do sistema. Essas regras devem ser obtidas, de forma que as demandas sejam atendidas, otimizando a função objetivo.

A especificação das regras operacionais de um reservatório inclui o volume do armazenamento alocado em cada período de tempo, a identificação dos pontos de controle a jusante,

para os quais opera o reservatório e as prioridades admitidas no atendimento à demanda. Além dessas regras, podem ser impostas outras que regulem as derivações, mantenham as vazões mínimas e balanceiem o armazenamento entre os reservatórios.

As políticas de operação podem variar sazonalmente, em correspondência à flutuação das demandas e ao caráter estocástico das vazões naturais. Por exemplo, as regras de operação de base mensal são determinadas a partir do estado do sistema no mês atual.

Como os modelos de simulação, em geral, não contêm rotinas de otimização, devem ser processadas diversas simulações para se obter uma base de comparação. Para isso, podem ser utilizadas funções que avaliem o desempenho do sistema.

As funções-objetivo indicam, geralmente, que excessos de vazão oferecidos à demanda, proporcionam benefícios apenas moderados, enquanto que pequenos déficits no atendimento causam redução sensível do valor da função-objetivo. Costuma-se, então, definir um valor mínimo de vazão a ser atendida. Entretanto, em algumas épocas de estiagem é impossível atender a todos os pontos de controle. Deve-se pois atribuir uma escala de prioridades para racionalizar os suprimentos. A determinação dessas prioridades deve ser testada por simulações.

As regras de operação são definidas, em geral, considerando determinados estados-meta do sistema, que delimitam diversos tipos de ação a serem seguidos. O armazenamento do reservatório é, geralmente, dividido em diferentes zonas, cujos limites podem variar sazonalmente. Assim, se o reservatório armazenar acima do topo da zona de controle de cheias, o reservatório deve descarregar o máximo de água possível, sem causar inundação a jusante. O nível inferior, que é o topo da zona de regularização será o nível-meta a ser atingido pelo reservatório, de forma a manter um volume de espera para as cheias e garantir o atendimento da demanda nos períodos de estiagem.

É essencial que as regras de operação sejam formuladas com base em informações disponíveis no momento da decisão. Caso sejam utilizadas previsões de vazões, deve ser considerado seu grau de confiabilidade na obtenção das regras de operação.

Todas as restrições físicas ou legais devem ser consideradas, principalmente quando o sistema deve atender a objetivos múltiplos, como no caso de existir vários proprietários independentes dos componentes do sistema.

As regras de operação devem prever que as modificações na operação sejam contínuas, introduzindo zonas de transição ou previsão para as alterações necessárias.

As curvas-guia são desenvolvidas para fornecer uma orientação da política operacional dos reservatórios. Uma curva simples pode fixar a descarga de um próximo período apenas com base no armazenamento existente e no mês em questão. Uma curva mais complexa pode considerar também os armazenamentos nos outros reservatórios, os pontos de controle específicos a jusante e até uma previsão dos afluxos futuros.

A estimativa de uma regra de operação inicial, por exemplo, para regularização, requer a adoção de uma capacidade de armazenamento do reservatório e um esquema de descargas, que satisfaça às demandas de água a jusante. Para isso, pode-se fazer uma simulação inversa no período crítico, impondo-se que no final, o reservatório esteja com o armazenamento mínimo permitível. Faz-se um balanço hídrico, em cada intervalo de tempo, caminhando-se regressivamente até o início do período crítico, assegurando o fornecimento das vazões mínimas. Os armazenamentos no reservatório, durante a operação inversa, representam as mínimas quantidades de água necessárias. Se esses armazenamentos forem maiores que um permitível, então deve-se admitir uma redução na demanda ou a existência de falhas no atendimento. Quando se faz uma estimativa das regras de operações de reservatórios de um sistema integrado, as condições críticas de operação po

dem não ocorrer simultaneamente. Além disso, a regra de operação adotada para um reservatório pode influenciar no comportamento de outro. Se as estimativas iniciais das regras de operação forem deduzidas independentemente, então será necessário um refinamento substancial para se chegar a uma solução adequada.

Devido às complexas interdependências das regras de operação de um sistema, é necessário simular a operação conjunta dos reservatórios para se obter uma solução factível. As regras iniciais devem ser testadas com todos os dados históricos, para garantir que as metas de operação sejam atendidas, que a função objetivo seja maximizada e que seja garantida uma distribuição equitativa da água no sistema. Esse processo é iterativo, devendo-se fazer alterações nas regras iniciais.

O balanceamento dos armazenamentos pode ser considerado quantitativamente, atribuindo-se níveis-índices às diversas zonas, em que estão divididos os reservatórios. A técnica dos níveis-índices está discutida em maior detalhe em outro capítulo, já apresentado.

Nos sistemas de reservatórios com propósitos múltiplos, surgem conflitos inevitáveis na determinação das regras de operação. O problema pode ser resolvido, admitindo-se, inicialmente, regras independentes que vão sendo modificadas, de forma iterativa, para melhorar a operação global do sistema.

No desenvolvimento das curvas de balanceamento dos armazenamentos entre os reservatórios, deve-se verificar as possibilidades de atendimento à demanda de pontos de controle de jusante, aproveitando-se as flexibilidades obtidas da operação conjunta.

Para a introdução do efeito estocástico das vazões, é necessário que se simule uma série sintética de vazões geradas, para introduzir o grau de confiabilidade com que determinadas demandas são atendidas, em função das capacidades dos reservatórios.

3.2.5.

Calibração do Modelo

A calibração do modelo de simulação consiste em submeter alguns problemas testes, para verificar se o modelo se comporta realmente da maneira com que foi concebido.

Pode-se efetuar essa verificação de duas formas. Pode-se simular o sistema existente, com características, regras de operação e respostas conhecidas ou simular um pequeno sistema hipotético.

A primeira alternativa é mais interessante, pois o sistema existente é o de interesse na análise. Entretanto, para uma verificação do funcionamento do modelo, são feitas algumas simplificações. Essas relações funcionais consideradas de uma forma não real no modelo podem ter influência significativa na resposta do sistema. Por exemplo, para limitar o tempo de processamento pode-se solucionar apenas alguns pontos de controle do sistema. A inclusão dos demais pontos de controle pode, algumas vezes modificar o comportamento da operação.

Os cálculos manuais de um pequeno sistema hipotético têm a vantagem de explicitar os valores em cada passo do processo de cálculo. É muito útil para se ganhar o conhecimento do funcionamento do modelo. Entretanto, o sistema hipotético pode não utilizar algumas subrotinas do modelo completo, impedindo a detecção de possíveis erros nestes processos.

Mesmo para a utilização de modelos generalizados já existentes é necessário fazer sua calibração, quando se pretende utilizá-lo. Embora o programa possa ter sido utilizado com sucesso em outros sistemas, há a possibilidade de que o programa ainda contenha erros de processos de cálculos, que não foram utilizados nas aplicações anteriores. Um cuidado adicional deve ser considerado, devido a diferenças existentes entre computadores de diferentes marcas. Por exemplo, alguns computadores ini

cializam todos os registros de memória com zeros, enquanto outros utilizam os valores já armazenados na memória. Para evitar esses erros, é necessário, que na fase de formulação e calibração do modelo, se elabore uma série de exemplos, que utilizem os diversos processos de cálculo do programa, para que sejam testados em cada implantação do modelo em computador diferente daquele em que foi desenvolvido.

3.2.6.

Organização e Execução das Simulações

Devido ao caráter iterativo da solução de problemas de operação de reservatórios, através de modelos de simulação, em geral são efetuadas diversas simulações alternativas. Os modelos de simulação geram grandes quantidades de informação. As saídas impressas de estudos de grandes sistemas podem confundir o analista, pelo excesso de informações a serem verificadas e pela impossibilidade de armazená-las. Para superar esse problema, deve ser desenvolvida uma estratégia de controle eficiente para a organização e execução das simulações, de forma a se obter as informações desejadas no menor tempo possível e com o menor número de simulações. A elaboração de tabelas resumo com as informações necessárias é importante para racionalizar os trabalhos.

O primeiro passo na organização das simulações consiste em examinar o número de sistemas alternativos a serem analisados e seus componentes. Cada sistema consiste em uma matriz de variáveis, que representam sua configuração e a política de operação. É necessário que o modelo forneça as informações sobre essas variáveis de projeto e sobre os componentes, de forma a se caracterizar o desempenho do sistema com relação a sua função objetivo.

Para os processamentos iniciais das diversas alternativas, deve-se fazer uma verificação de todas as informações. Assim, deve-se verificar se os dados de entrada no modelo estão

corretos, quanto aos valores fornecidos das vazões, quanto à configuração do sistema e quanto ao critério operacional. Deve-se analisar se está sendo respeitado o balanço hídrico do sistema e de cada reservatório, em cada intervalo de tempo. A partir da solução apresentada pelo modelo, deve-se tentar reconstituir a configuração de interligações entre os diversos componentes do sistema. Deve-se analisar as descargas e derivações efetuadas e confrontá-las com o critério operacional desejado. Essa fase de verificação inicial é muito importante, pois os erros cometidos na introdução dos dados são frequentes. A simulação de sistemas complexos com modelos generalizados exige, algumas vezes, a introdução de componentes e relações fictícios para ajustar a configuração do sistema aos padrões do modelo. Deve-se pois, interpretar a saída do modelo, verificando se representa a realidade do sistema.

Em uma etapa seguinte, compara-se o desempenho do sistema para diversas alternativas de capacidades ou regras de operação dos reservatórios. Inicialmente, há uma gama muito grande de diferentes alternativas a serem comparadas. À medida que o estudo progride, os sistemas ou políticas inadequados são eliminados e as diferenças entre as alternativas se tornam menores. Nesse ponto, deve-se evitar gastar muito esforço na execução de muitas simulações, só para ver o que acontece. A melhor forma de ação é detectar quais são os pontos críticos do sistema e alterar as características desses pontos.

A organização das simulações deve contar com um esquema de numeração adequado das simulações, que facilite identificar as alterações introduzidas. Assim pode-se marcar cada processamento com a data de sua execução, numerando-o sequencialmente e identificando a alteração efetuada em relação ao processamento anterior. Pode-se, inclusive, criar arquivos em computador para armazenar as saídas anteriores, dispensando a necessidade de se guardar grandes volumes de listagens com saídas já ultrapassadas.

Em sistemas complexos, pode-se simular subsistemas do sistema global. Para isso é necessário que sejam identificados os processamentos correspondentes dos diversos subsistemas, para se comparar a compatibilidade das operações.

Uma outra alternativa para a simulação de sistemas complexos consiste em substituir um subsistema de reservatórios e pontos de controle por um único reservatório ou ponto de controle equivalentes. Uma vez obtida a regra de operação do sistema global, deve-se efetuar uma simulação do subsistema que foi agrupado, impondo-se os afluxos e as descargas obtidas da simulação global, para se obter as regras de operação dos reservatórios contidos nesse subsistema.

Pela falta de critérios analíticos de otimização, a simulação de um sistema de reservatórios exige uma análise crítica de cada processamento efetuado, para se familiarizar com o comportamento do sistema e depreender uma sensibilidade subjetiva da influência das diversas variáveis do problema. Uma análise crítica dos resultados e o conhecimento aprofundado do modelo de simulação permite uma economia de tempo e de processamentos para que se atinja uma configuração do sistema e uma política de operação que maximizem a função-objetivo.

3.2.7.

Análise e Avaliação dos Resultados

Os objetivos de um estudo de simulação de operação de reservatórios e os critérios de desempenho de um sistema são definidos durante os estágios iniciais do processo. Os critérios são utilizados para medir a eficiência de uma configuração do sistema ou de uma política de operação quanto aos objetivos do sistema.

Em geral, os critérios adotados estão associados aos estados do sistema, tais como as descargas mensais ou níveis dos reservatórios. Podem ser definidas funções-objetivo,

com valores monetários, que relacionam os estados do sistema com perdas e benefícios econômicos. Pode-se empregar medidas não econômicas, como coeficientes de penalidade às falhas do sistema.

De uma forma geral, os quatro objetivos mais comuns, almejados nos estudos de recursos hídricos são a renda nacional, ou a renda regional, a qualidade do meio ambiente e o bem estar social. Entretanto, esses objetivos têm um sentido muito amplo e precisam ser expressos em quantidades específicas mensuráveis, de forma que se possa comparar projetos ou planos alternativos. Definem-se, pois, alguns critérios para avaliação do desempenho do sistema. Quando não é possível se estabelecer critérios para medir a gama total ou possível de estados do sistema, são estabelecidas algumas metas específicas a serem atingidas. As comparações entre sistemas alternativos são feitas, contando-se o número de vezes que um nível meta não foi atingido ou através da atribuição dos coeficientes de penalidade.

Os objetivos referentes à renda nacional ou à regional têm sido medidos, em geral, por dois critérios. O primeiro, do mínimo custo, e o outro o do máximo benefício-líquido. A avaliação dos objetivos de qualidade do meio ambiente requer uma transformação, em termos quantitativos, se possível, do impacto benéfico ou maléfico do sistema no meio ambiente. O bem estar social pode ser medido através de critérios ligados à saúde ou à segurança, por exemplo.

Para se avaliar as consequências de uma falha no atendimento às demandas, pelo sistema, pode-se utilizar como medida de comparação entre sistemas alternativos, o número de déficits, os períodos dos déficits ou as magnitudes dos déficits.

O déficit é caracterizado por uma situação em que a vazão ou um estado do sistema qualquer é menor do que o exigido. Por exemplo, para as necessidades de abastecimento de água, recreação e navegação, o critério de avaliação utilizado pode

ser o número de períodos em que a vazão é menor que a requerida. Para a irrigação, o critério pode ser a duração do período de déficit.

Uma vez que se tenha compilado uma lista completa dos critérios essenciais de avaliação, cada critério deve ser relacionado com os estados hidrológicos que ocorrem no sistema. Para cada simulação efetuada, para uma configuração particular do sistema e uma política de operação, produz-se um conjunto de estados do sistema, para cada período de operação que associados aos critérios de avaliação definidos, determina-se o valor da função objetivo.

Os impactos sociais e econômicos causados pelo déficit de atendimento à demanda crescem significativamente com sua magnitude. Por isso, o comportamento do sistema durante os períodos críticos irá dominar a avaliação. Frequentemente, estuda-se apenas um período de teste para se desenvolver um esquema de operação ou configuração iniciais do sistema.

O período de teste é definido como o período compreendido entre o instante em que os reservatórios estão com armazenamentos no topo da zona de regularização e o seguinte em que volta a esta situação, após terem passado por um deplecionamento de seus armazenamentos que envolve, pois, o período crítico. Em sistemas com vários reservatórios, o período de teste não começa necessariamente com todos os reservatórios cheios até o nível inferior da zona de controle de cheias, porque é possível, devido ao esquema operacional, que alguns reservatórios comecem a esvaziar, enquanto outros ainda estão cheios.

Pode-se também conjugar aos estudos de simulação, análises de otimização, circunscritas aos períodos de teste.

As regras operacionais e as alocações de armazenamentos são estudadas durante o período de teste, de forma a melhorar o desempenho do sistema. Neste período é analisada a sen

sibilidade de cada componente e de cada regra de operação sobre o funcionamento do sistema. Quando se obtém uma configuração e regras de operação do sistema ótimos, faz-se uma simulação durante todo o período de dados disponíveis, para se confirmar ou se alterar a política ou a configuração obtidas pela análise do período crítico.

Se a série de dados históricos não for extensa ou para se introduzir níveis de confiança no atendimento à demanda, costuma-se utilizar sequências sintéticas para serem simuladas, para garantir o funcionamento do sistema em outras situações diferentes daquelas da série histórica.

Durante a análise do período de teste, analisa-se os valores das demandas acumuladas, do escoamento acumulado e do armazenamento disponível acima de cada ponto de abastecimento. Se não ocorre nenhum déficit, em qualquer período, pode-se aumentar a quantidade d'água mínima fornecida ou, no caso de dimensionamento, pode-se reduzir o volume dos reservatórios. Da mesma forma, se forem registrados déficits, a demanda deve ser diminuída ou deve-se aceitar o atendimento com um certo grau de risco.

Para sistemas com usinas de geração de energia deve-se salientar algumas análises adicionais. As demandas de energia flutuam rapidamente e, na maioria dos sistemas, a energia hidrelétrica é utilizada para atender as flutuações de pico de demanda, principalmente, em sistemas com utilização de energia térmica ou nuclear. Em consequência, pode haver déficits de energia, mesmo quando há água disponível, se as combinações de carga e vazão turbinada forem insuficientes para fornecer a demanda de pico.

É possível, através de um estudo de operação mensal, testar a relação entre a capacidade de geração de energia e as curvas de carga, utilizando as informações dos armazenamentos no sistema. Entretanto, é necessário um estudo de operação

de curto prazo para considerar as flutuações nas demandas diárias e até horárias.

Nos sistemas com propósito de controle de cheias, a análise dos resultados deve ser focalizada na simulação dos períodos em que ocorreram as maiores cheias na bacia. Uma outra alternativa é simular ondas de cheias, associadas a períodos de retorno e criar uma curva de danos causados por inundação relacionados aos mesmos períodos de retorno.

Para se analisar sistemas alternativos, deve-se inicialmente, fazer o cálculo das perdas para a condição básica do sistema, que pode ser o estado natural da bacia ou com a presença de algum reservatório existente. O critério de avaliação do sistema passa a ser a redução das perdas devida à introdução do sistema proposto. Para uma melhora do funcionamento do sistema pode-se alterar as dimensões dos reservatórios ou as políticas de operação. Uma outra alternativa a ser estudada nos sistemas para controle de cheias são as alterações das capacidades dos canais, a construção de diques e o controle de uso das áreas ribeirinhas, que podem reduzir sensivelmente as perdas por inundação.

Para todos os casos, a análise dos resultados da simulação deve ser feita, também, avaliando-se a sua proximidade com o sistema real. Uma boa adequabilidade dos resultados obtidos ao sistema real conduz a uma aproximação maior do ponto ótimo da função objetivo, dentro das hipóteses admitidas nos cálculos.

As discussões efetuadas nestes capítulos, sobre estudos de simulação de operação de reservatórios têm um caráter genérico, independente do modelo que está sendo utilizado. A descrição de um modelo geral de simulação da operação de reservatórios, o HEC-5, permitirá um enfoque mais particular dos conceitos aqui apresentados.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DE UM MODELO GENERALIZADO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE RE SERVATÓRIOS MÚLTIPLOS

4.1.

GENERALIDADES

Nos capítulos anteriores foram discutidas as vantagens do uso da técnica de simulação da operação de sistemas de reservatórios. Foi analisada também a conveniência de se possuir um modelo geral que possa ser aplicado a um sistema qualquer, com configuração complexa e para atendimento de diversos propósitos.

Foi apresentado um modelo simplificado, com o intuito de introduzir a concepção básica da formulação de um modelo de simulação de operação de reservatórios. Entretanto, seu campo de aplicação prático é bastante restrito.

O modelo aqui descrito, o HEC-5, foi desenvolvido para a aplicação em sistemas complexos de reservatórios. A origem do modelo consiste em uma versão inicial do programa, escrito para a operação de controle de cheias de um reservatório unico. O Hydrologic Engineering Center, que é um órgão do U.S. Army, Corps of Engineers vem desenvolvendo este modelo continuamente. Uma segunda versão do programa, denominada HEC-3, foi desenvolvida para a análise de um sistema de reservatórios com propósitos de regularização.

O modelo vem sendo desenvolvido para novas aplicações e considerações especiais. A versão aqui discutida data de 1976. Como as versões mais recentes incorporam os conceitos anteriores, decidiu-se por expor as características desse programa de 1976, e se descrever brevemente as inovações incorporadas ao modelo.

4.2.

PROPÓSITOS DO MODELO

O modelo HEC-5 foi desenvolvido com o intuito de auxiliar nos estudos de planejamento, para avaliar a influência de modificações propostas no sistema, quanto ao número e dimensão dos reservatórios, bem como quanto à regra de operação nos reservatórios existentes. O modelo auxilia, então, no dimensionamento dos volumes úteis e de controle de cheias dos diversos reservatórios que compõem um sistema.

O programa pode ser utilizado para simular a ocorrência de uma cheia observada na bacia, e avaliar os efeitos dos reservatórios existentes ou planejados na redução de danos causados pela cheia na bacia na condição natural ou atual.

O programa serve para definir as políticas de operação dos reservatórios de um sistema, fixando as descargas a serem feitas durante as épocas de cheias e estiagens. Essas aplicações podem ser feitas também a nível de operação em tempo real.

Os propósitos acima são obtidos pela simulação da operação sequencial de um sistema de reservatórios com qualquer configuração, utilizando-se pequenos intervalos de tempo de cálculo, para as simulações dos períodos de cheias históricas ou sintéticas e intervalos de cálculo maiores para estudar a regularização das vazões em longos períodos. A simulação das duas situações pode ser efetuada simultaneamente pelo modelo, que utiliza uma combinação dos dois intervalos de cálculo.

Especificamente, pode-se utilizar o modelo para:

- a) determinar os volumes úteis e de controle de cheias de cada reservatório de um sistema.
- b) estudar a influência de diversas configurações do sistema sobre a distribuição espacial e temporal do escoamento sobre a bacia.

- c) avaliar a política de operação de um sistema de reservatórios, tanto para o controle de cheias como para a regularização de vazões.
- d) calcular as perdas médias anuais causadas pelas enchentes, os custos de um sistema proposto e os benefícios líquidos do sistema, obtidos pela redução das enchentes.
- e) determinar curvas de produção de energia hidrelétrica a níveis horários para seguir as demandas, simultaneamente à obediência das demais restrições do sistema.
- f) fixar as obras e suas dimensões a serem construídas, e as alternativas não estruturais a serem adotadas, de forma a maximizar o benefício líquido do sistema.

4.3.

REQUISITOS DE "SOFTWARE" E "HARDWARE" DO PROGRAMA

O modelo HEC-5 foi desenvolvido, inicialmente, para ser implantado em um computador UNIVAC 1108, com espaço de memória de 65K palavras. Nesta versão, o programa pode simular a operação de sistemas com até 10 reservatórios, 15 pontos de controle, 11 derivações e 9 usinas hidrelétricas. Pode-se utilizar também um computador menor utilizando-se de forma adequada os arquivos intermediários que podem ser dispostos em forma de área em disco ou em fitas magnéticas. A versão preparada para o CDC-7600 permite a simulação da operação de sistemas com até 35 reservatórios, 55 pontos de controle, 20 derivações e 9 usinas hidrelétricas. Em ambas as versões, o número total de pontos de controle permitidos engloba o número de reservatórios, ou seja, pode-se utilizar até 5 pontos de controle adicionais na versão do UNIVAC e 20, na versão do CDC.

O programa possui cerca de 12.500 linhas, sendo que as instruções de comando efetivas são da ordem de 8100. Além do programa principal, que possui todos os comandos referentes aos critérios da operação e de chamadas de funções auxiliares, existem 27 subrotinas auxiliares.

Uma descrição sucinta das funções dessas subrotinas está a seguir apresentada:

- AREA : Calcula a probabilidade acumulada correspondente a uma variável normal reduzida.
- CDATE : Obtém a hora, dia e mês do ano, a partir de uma data inicial e do número sequencial do período.
- COMCOF : Calcula os coeficientes de propagação combinados, quando se estuda mais de um trecho, na propagação.
- CPCON : Obtém uma numeração interna dos pontos de controle.
- DEVATE : Calcula, de forma iterativa, a variável normal reduzida, em função da probabilidade acumulada.
- DIVCOR : Corrige os valores dos afluxos aos pontos de controle, somando ou subtraindo as derivações.
- ECON : Calcula as perdas médias do sistema, causadas por inundação.
- EVAP : Calcula as perdas por evaporação dos reservatórios.
- FILL : Determina a descarga máxima do reservatório para manter o escoamento em um ponto de controle de jusante dentro do canal, baseado na previsão das vazões e de sua propagação no canal.
- FLOW : Calcula as descargas necessárias para esvaziar o reservatório até o topo da zona de regularização.
- FRQPLT : Obtém os logaritmos das vazões e a variável normal reduzida correspondente à frequência da vazão, para a impressão do gráfico de distribuição de probabilidades das vazões.
- HYDEFF : Calcula a denominada eficiência hidrológica, representada pela redução dos danos de inundação, após a implantação das obras propostas.
- IN : Faz a leitura e consistência dos dados de entrada.
- INTPOL : Efetua interpolações lineares e logarítmicas.
- MUSKRT : Cálculo do amortecimento pelo método Muskingum.
- OUTPUT : Imprime os resultados da simulação em um arquivo intermediário.
- PDIVVY : Obtém a integral da curva de frequência de perdas.
- POWER1 : Utilizado para ler os cartões referentes à geração de

- energia, para calcular as vazões necessárias para a tender à demanda e para imprimir os resultados referentes à geração de energia.
- PPLT : Plota um gráfico de distribuições de probabilidades de vazões naturais ou regularizadas em papel de pro babilidades log-normal.
- PROF : Utilizado para plotar até quatro hidrogramas superpostos de um ponto de controle.
- PROUT : Subrotina de impressão dos resultados da simulação.
- ROUT : Faz o cálculo da propagação da onda nos canais por qualquer um dos métodos permitidos, após a de termina ção dos coeficientes por outras subrotinas.
- SCALE : Determina escalas gráficas para plotagem.
- STAGE : Obtém as vazões no ponto de controle, por interpolação da curva-chave fornecida.
- SUBCOF : Determina os coeficientes de propagação para um tre cho de canal.
- SUMPO : Imprime quadro-resumo de resultados (Valores médios, extremos, etc)
- SYSCOST : Calcula e imprime os custos do sistema.

O programa utiliza diversos arquivos de armazena mentos intermediários, além dos arquivos normais de entrada e saída, num total de sete.

O arquivo I7 armazena os dados de entrada refe rentes aos cartões T1 a ED, após sua leitura pela subrotina IN. O arquivo I8 armazena os dados a serem plotados. O arquivo I9 contém os dados para serem impressos na subrotina SUMPO. Os ar quivos I3 e I10 ocupam a mesma área de disco ou fita e arma zam os dados para a impressão dos gráficos. O arquivo IT1 arma zena as mensagens de erros, impressas posteriormente. O arqui vó I11 armazena os resultados dos cálculos das perdas médias a nuais. O arquivo IT2 contém todas as informações, de todos os pontos de controle, por período, para uma ou mais séries simu ladas simultaneamente, precedidas pelos dados de entrada e se guidas pelos resultados dos testes de erros. O arquivo IT3 con

têm informações análogas às de IT2, apenas que restritas a uma única série.

Os procedimentos de cálculo do programa são muito variáveis em função do sistema analisado. A figura 4.1. apresenta, de uma forma bastante geral e resumida, um diagrama de blocos do programa, mostrando a sequência das operações de cálculo.

A ordem de chamada das subrotinas é variável também, dependendo do tipo de simulação. Algumas delas são chamadas em mais de um local do programa principal e por diversas subrotinas. A figura 4.2 apresenta um diagrama de inter-relacionamentos lógicos das diversas subrotinas. As setas estão direcionadas de uma subrotina para aquelas que são chamadas.

Uma outra forma de mostrar o esquema lógico do programa está apresentada na figura 4.3, onde está indicada a hierarquia das chamadas das subrotinas, partindo-se do primeiro nível que é o do programa principal. Pode-se observar que o programa pode utilizar um encadeamento de até 7 chamadas de subrotinas.

A análise lógica do modelo é uma tarefa bastante difícil, para quem não está familiarizado com sua estrutura. Esta dificuldade é aumentada ainda mais pelo uso de alguns artifícios de programação, como a passagem de variáveis em "COMMON", o uso de variáveis temporárias com o mesmo "nome" para diversas variáveis principais, as impressões e leituras intermediárias sequenciais não formatadas e pelo grande número de instruções de decisão lógica ("IF") existentes.

O porte do modelo, face a suas dimensões e complexidades pode ser considerado de médio a grande. A intenção de introdução de modificações do programa pelo usuário deve ser bem avaliada, para se garantir a sua eficiência e o controle de sua influência no restante do programa.

Figura - 4.1 - Diagrama de Blocos do Modelo HEC-5

Figura - 4.2. - Inter-relacionamento Lógico das Subrotinas do Modelo HEC-5

Figura 4.3. - Ordem de Chamadas das Subrotinas do Modelo HEC-5

4.4.

CAPACIDADES E LIMITAÇÕES DO PROGRAMA

O modelo HEC-5, embora tenha um caráter geral, possui uma estrutura de resolução fixa. Quando se analisa um sistema qualquer, deve-se procurar ajustar as informações à estrutura do modelo. Algumas vezes, introduz-se reservatórios ou ligações fictícias para a adequação do sistema real ao modelo.

A seguir, serão feitas algumas considerações sobre como o modelo analisa a configuração do sistema, os reservatórios e pontos de controle e os critérios operacionais para diversos propósitos dos sistemas.

O modelo compõe um sistema por reservatórios e pontos de controle. Ponto de controle é definido como um local em que deve ser atendida uma certa demanda ou em que há uma certa restrição, mas que não possui volume de armazenamento.

As descargas são as vazões liberadas pelos descarregadores de fundo, turbinas ou vertedores para o canal a jusante de um reservatório. As derivações são as liberações de vazões para pontos situados fora do sistema ou para outros pontos de controle do mesmo, feitos através de canais ou túneis independentes dos canais naturais.

4.5.

REPRESENTAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA NO MODELO

4.5.1.

Características Gerais do Sistema

O modelo HEC-5 pode ser utilizado na operação de sistemas com qualquer configuração, desde que o número de componentes fique dentro dos limites das dimensões da versão do programa utilizado.

Os reservatórios são considerados também, no modelo, como pontos de controle.

O ponto de controle na extremidade de montante de cada tributário deve ser um reservatório. Caso se queira iniciar por um ponto de controle simples, introduz-se no modelo os dados referentes a um reservatório possuindo um volume nulo.

Os reservatórios que possuem volume de regularização podem ser operados para atender a suas próprias demandas (geração de energia ou vazão mínima) e para garantir as demandas de qualquer ponto de controle de jusante. Se o reservatório possuir um volume para controle de cheias, são operados também para minimizar enchentes nos pontos de controle de jusante, retendo as vazões que superem a capacidade do canal.

Quando se analisam sistemas alternativos de reservatórios, pode-se introduzir os dados no modelo referentes a todos os reservatórios, mesmo os alternativos. Os reservatórios podem ser eliminados, pela sua identificação no cartão - (J5) ou pela remoção de seus cartões de caracterização (RL-CH), tornando-se apenas um ponto de controle. Os pares de letras entre parênteses indicam o nome do cartão. Quando associados a um número, por exemplo, J5.7, indicam o campo especificado (no caso o 7º campo) do cartão em questão (no caso o J5).

Um reservatório de montante de um par de reservatórios em série, não pode ser operado para pontos de controle situados a jusante do segundo reservatório. Entretanto, quando o reservatório de jusante faz suas descargas, leva em consideração o armazenamento existente no reservatório de montante.

Os reservatórios dispostos em paralelo, que operam para um ponto de controle comum são mantidos em balanço, em relação a seus níveis-índices.

A numeração dos reservatórios e pontos de controle pode ser qualquer, pois o programa gera uma numeração interna própria.

As dimensões limites do sistema podem ser modificadas, alterando-se os cartões de DIMENSION e COMMON do programa, desde que não ultrapasse a capacidade de memória do computador em uso.

4.5.2.

Descrição dos Reservatórios

Os reservatórios são considerados também como pontos de controle. Portanto, as descrições dos pontos de controle cabem também aos reservatórios.

Cada reservatório deve possuir um armazenamento inicial e uma associação dos armazenamentos com os níveis-índices. Estas relações podem ser constantes ou variáveis ao longo do ano.

Os reservatórios operam para atender a suas próprias demandas e a de pontos de controle situados a jusante.

Para representar as capacidades de descargas dos reservatórios devem ser fornecidas tabelas que associem es

sas capacidades com os volumes armazenados. Uma limitação do programa é a não consideração de afogamentos a jusante do reservatório, que alteram a capacidade de descarga, especialmente dos descarregadores de fundo.

Para a consideração das perdas por evaporação e para os cálculos de custos, podem ser fornecidos dados adicionais com as áreas dos reservatórios, as elevações e os custos, associados aos volumes armazenados.

4.5.3.

Descrição dos Pontos de Controle

Os pontos de controle, além de serem locais de interesse de análise de demandas ou restrições, constituem os nós de uma rede que caracteriza a configuração do sistema.

Cada ponto de controle deve possuir um volume de armazenamento associado ao trecho do canal correspondente. Essa capacidade de armazenamento pode ser constante ou uma função das vazões escoadas.

Cada ponto de controle recebe um nome de identificação para ser impresso nos resultados da operação.

Os pontos de controle são associados a um próximo ponto de jusante, especificando-se os critérios de propagação de ondas no canal e o número do ponto de controle.

Podem ser fornecidos dados adicionais de cotas e armazenamentos no canal, em função das vazões transportadas.

4.6.

DADOS DE VAZÕES NECESSÁRIOS

Devido à estrutura do modelo, são utilizadas nos cálculos as vazões locais ou incrementais médias do período de análise. As vazões locais ou incrementais são aquelas geradas entre dois pontos de controle sucessivos de um canal.

As vazões locais podem ser calculadas a partir das vazões naturais ou a partir das vazões observadas nos pontos de controle e das descargas dos reservatórios, quando houver.

O programa permite que sejam calculadas as vazões locais, acumuladas e as naturais, sem que seja feita a simulação da operação. Os resultados obtidos podem ser impressos ou armazenados em arquivos, para utilização como dado de entrada em outros estudos.

Se forem fornecidos os valores de vazões no início ou final dos períodos de cálculo, o programa calcula, primeiramente, as médias dos extremos do período, para com esse valor proceder à simulação.

Quando não existirem dados de vazão em um ponto de controle, pode-se admiti-los como uma proporção dos valores fornecidos em outro local. Pode ser considerada, também, uma defasagem de tempo fixa entre valores calculados e os observados.

Os dados de vazões podem abranger um período mais extenso que o limite permitido pelo modelo, pois o programa gera, automaticamente, uma série de sequências encadeadas, simuladas também sequencialmente, que reconstitui todo o período de dados.

Quando se analisa o controle de cheias ou a

geração de energia, com dados diários ou horários, simultaneamente a uma simulação com dados mensais, esses períodos de dados são intercalados, com a introdução de cartões que indicam ao programa a mudança do intervalo de tempo de cálculo escolhido.

Os dados de vazões mensais podem ser lidos em cartões com 12 campos, facilitando o arquivo e a verificação desses dados. Todos os outros dados do programa são introduzidos em cartões com 10 campos, sendo que o primeiro campo possui apenas 6 colunas, uma vez que as duas primeiras são reservadas para a identificação do cartão.

4.7.

AMORTECIMENTO NOS RESERVATÓRIOS

As descargas efetuadas dos reservatórios são definidas com base na operação desejada e na equação da continuidade.

Sempre que as vazões desejadas para o descarregamento forem maiores que as capacidades dos órgãos de extravasão, o modelo utiliza um método iterativo de cálculo para definir a vazão.

Quando as descargas desejadas em um período puderem causar a elevação do nível d'água no reservatório, em períodos futuros, acima da zona de controle de cheias, o modelo utiliza um processo de amortecimento iterativo, aumentando as descargas até as capacidades de extravasão dos órgãos.

4.8.

CRITÉRIOS OPERACIONAIS DOS RESERVATÓRIOS

4.8.1.

Conceitos Gerais

Os reservatórios são operados para satisfazer a suas próprias restrições individuais, para manter vazões determinadas em pontos de controle de jusante e para manter os diversos armazenamentos dos reservatórios balanceados.

As vazões liberadas pelos reservatórios podem ser especificadas para qualquer reservatório e período de cálculo, desde que sejam inferiores às capacidades de descarga dos órgãos da barragem. O programa ajusta as descargas dos outros reservatórios, como necessário. De uma forma geral, o modelo pode determinar as descargas de todos os reservatórios.

A operação do sistema pode ser efetuada em um número inferior de períodos de tempo, daquele total fornecido nos dados de entrada.

Pode-se considerar que haja um período de previsão de vazões, sendo que os erros daí advindos podem ser avaliados, especificando-se o número de períodos de previsão e uma faixa de contigência correspondente.

Para a finalidade de impressão, as vazões acumuladas (abaixo dos reservatórios de montante) não incluem as descargas dos outros reservatórios de montante, se estes tiverem um volume para controle de cheias.

Um reservatório pode ser operado para atender às próprias demandas locais de energia.

Numa operação de regularização, pode-se especificar dois níveis de atendimento às demandas de pontos de con

trole de jusante. Pode-se especificar vazões mínimas desejadas e requeridas, em função do armazenamento existente nos reservatórios.

4.8.2.

Restrições de Operação Intrínsecas aos Reservatórios

Um primeiro critério operacional dos reservatórios são suas próprias restrições, e do ponto de controle as sociado, imediatamente a jusante, junto ao local da barragem.

As vazões são limitadas pela capacidade do canal, junto ao local da barragem. As variações das descargas e fetuadas em relação a um período anterior não devem exceder a uma certa proporção. As descargas são limitadas também pela capacidade dos órgãos de saída, em função do nível d'água armazenado no reservatório.

Em função do nível d'água armazenado no reservatório, o modelo assume um dos critérios seguintes. Se o nível d'água estiver entre o topo da zona de regularização e o topo da zona de controle de cheias, as descargas são feitas para tentar reduzir o nível d'água, limitadas pelas capacidades do canal junto ao local da barragem ou em pontos de controle de jusante.

Se o armazenamento estiver entre o topo da zona de resguardo e o topo da zona de regularização, as descargas são feitas iguais ou maiores que as mínimas desejadas. Se o nível d'água estiver entre o topo da zona inativa e o topo da zona de resguardo, são feitas apenas as descargas mínimas requeridas. Abaixo do topo da zona inativa, o reservatório não libera a água. Para reservatórios com usinas de geração de energia, as demandas de água são atendidas, mesmo que forem superiores às vazões mínimas desejadas.

Quando o nível d'água ultrapassa o topo da

zona de controle de cheias, o reservatório libera toda a água em excesso, limitado pela capacidade dos órgãos de controle. Se a capacidade de descarga for insuficiente, então faz-se um cálculo de amortecimento inverso para definir o nível d'água. As opções de entrada do modelo permitem que sejam feitas descargas de emergência antes do nível d'água atingir o topo da zona de controle de cheias, caso se utilize previsão de vazões.

As vazões descarregadas dos reservatórios podem ser previamente fixadas pelos cartões QA, CP, MR ou QM.

4.8.3.

Restrições de Operação Impostas por Pontos de Controle a Jusante dos Reservatórios

Uma condicionante adicional à operação de um reservatório são as restrições impostas por pontos de controle de jusante. Essas podem ser relacionadas à manutenção de uma vazão mínima ou à restrição de descarga por uma capacidade máxima do canal nos pontos de controle de jusante.

O reservatório pode operar para diversos pontos de controle de jusante, desde que não haja um reservatório intermediário com volume de controle de cheias.

Enquanto estiver disponível o volume para controle de cheias, não são liberadas descargas pelo reservatório, que possam contribuir para a inundação de um ou mais locais específicos a jusante, dentro de um número pré-determinado de períodos futuros. Esse número é o menor entre o número de períodos de previsão das vazões incrementais e o número de coeficientes da equação de propagação da onda de cheia utilizada.

Para as operações de controle de cheias, as descargas são feitas, procurando-se manter o canal funcionando a plena capacidade e, para as operações de regularização, procu

ram-se liberar as vazões mínimas desejadas ou requeridas. Na determinação das descargas dos reservatórios, as vazões locais de jusante são multiplicadas por um coeficiente que visa considerar a incerteza na previsão dessas vazões.

Existem casos típicos de operação, em que devem ser atendidos diversos propósitos, às vezes conflitantes. Pode-se estabelecer uma prioridade normal de operação e outra opcional.

Durante uma inundação existente, em locais a jusante de um reservatório, não se efetuam as descargas para geração de energia (prioridade normal). Opcionalmente, procura-se descarregar apenas a vazão necessária para a geração de energia primária de base.

As descargas para garantir vazões mínimas desajadas em locais a jusante de um reservatório não são atendi-das, se houver problema de inundação em algum ponto de controle. Entretanto, essas vazões podem ser liberadas, caso sejam prê-fixadas pelo operador.

As derivações efetuadas para pontos de controle de jusante são efetuadas até que o armazenamento atinja o topo da zona de resguardo ou até o topo da zona inativa, opcionalmente, caso não sejam feitas em função do armazenamento.

4.8.4.

Restrições de Operação para o Balanceamento de Armazenamentos

Os reservatórios devem ser operados também segundo uma prioridade prê-estabelecida de enchimentos e esvaziamentos.

Essas prioridades são estabelecidas com base na técnica dos níveis-índices, descrita em outro capítulo. Procura-se, em cada intervalo de operação, conduzir todos os reser

vatórios a um nível índice comum. Isto não impõe que todos os reservatórios fiquem com armazenamentos proporcionais a sua capacidade, uma vez que os níveis-índices podem forçar uma distribuição de armazenamentos qualquer.

Admitindo-se que não estejam sendo feitas descargas em um período, em um subsistema com dois reservatórios em operação paralela para um ponto de controle comum, opera-se primeiro aquele que possuir o maior nível-índice, para atender às condições de jusante. No caso de uma operação para controle de cheias, os demais reservatórios serão operados segundo a prioridade estabelecida pelos níveis-índices, para tentar preencher qualquer espaço restante no canal de jusante, sem causar inundação.

Se dois reservatórios estão em série, o reservatório de montante pode ser operado para os pontos de controle intermediários e para o reservatório de jusante. Neste caso, procura-se conduzir os dois reservatórios a um mesmo nível-índice.

4.8.4.1.

Solução Analítica para as Descargas com Balanceamento de Armazenamentos

Neste capítulo, são desenvolvidas as equações para a solução do problema de descarga de vazões regularizadas entre pares de reservatórios em série ou em paralelo, para atender à demanda de um ponto de controle de jusante, mantendo os armazenamentos em balanço.

Para a determinação das descargas, admite-se conhecida uma demanda de jusante e utilizam-se as equações da continuidade e as equações do armazenamento.

A figura 4.4 apresenta um reservatório dividido em zonas, que permitem calcular os níveis de balanceamento,

Figura 4.4. - Representação esquemática do zoneamento de um reservatório

onde: V_T é o volume total do armazenamento dentro de uma certa zona

V_Z é o volume existente dentro de uma zona.

O nível-índice do armazenamento existente pode ser calculado, adicionando-se ao nível-índice correspondente ao fundo da zona em que está o armazenamento, a relação que representa a proporção da zona que está ocupada.

$$\text{Nível-Índice} = \text{Nível Base} + V_Z/V_T \quad (4.1)$$

A equação da continuidade do reservatório pode ser escrita como:

$$V_Z = V_{Z0} + (Q_{afli} + Q_{loci} - Q_{di} + D_i) \cdot \Delta t \quad (4.2)$$

i = é o intervalo de tempo

V_Z = é o armazenamento contido na zona analisada no final do período.

V_{Z0} = é o valor do armazenamento S no início do período.

Q_{af1} = é o afluxo de montante no período, sem considerar a vazão local

Q_{loc} = vazão local afluyente no período

Q_d = vazão efluente no período

D = derivação efetuada no período. Pode ser negativa, se for um retorno ao reservatório.

Quando se consideram dois reservatórios em paralelo, operando para um ponto de controle de jusante comum, deve-se combinar as descargas Q_{d1} e Q_{d2} dos reservatórios para atender à demanda total QT do ponto de controle, como pode ser visto na figura abaixo.

Figura 4.5. - Representação esquemática de um sistema de dois reservatórios paralelos.

A demanda total QT é a quantidade de água obtida pelas descargas dos reservatórios. Se a vazão local da área intermediária existir, então deve ser subtraída da demanda, para se determinar QT .

Portanto, QT pode ser expressa por:

$$QT = Q_{d_1} + Q_{d_2} \quad (4.3)$$

Para manter os dois reservatórios balanceados os dois níveis-índices devem ser igualados:

$$\frac{V_{z_1}}{V_{T_1}} = \frac{V_{z_2}}{V_{T_2}} \quad (4.4)$$

Rearranjando-se a equação (4.4) e utilizando-se a equação (4.2) para expressar os armazenamentos, obtêm-se:

$$V_{T_2}(V_{Z0_1} + Q_{af1_1} + Q_{loc1} - Q_{d_1} + D_1) = V_{T_1}(V_{Z0_2} + Q_{af1_2} + Q_{loc2} - Q_{d_2} + D_2) \quad (4.5)$$

Utilizando-se a expressão (4.3) para obter Q_{d_2} em função de QT e Q_{d_1} , obtêm-se:

$$V_{T_2}(V_{Z0_1} + Q_{af1_1} + Q_{loc1} - Q_{d_1} + D_1) = V_{T_1}(V_{Z0_2} + Q_{af1_2} + Q_{loc2} - (QT - Q_{d_1}) + D_2) \quad (4.6)$$

$$Q_{d_1} = \frac{V_{T_2}(V_{Z0_1} + Q_{af1_1} + Q_{loc1} + D_1) - V_{T_1}(V_{Z0_2} + Q_{af1_2} + Q_{loc2} - QT + D_2)}{V_{T_1} + V_{T_2}} \quad (4.7)$$

Portanto, como todos os termos do lado direito da equação (4.7) são conhecidos, pode-se obter Q_{d_1} e Q_{d_2} diretamente.

Se o sistema analisado for constituído por dois reservatórios em série, que atendem à demanda de um ponto de controle de jusante, as descargas são feitas do reservatório 2 para o ponto de controle e do reservatório 1 para o reservatório 2, para balancear os armazenamentos, como pode ser visto na figura 4.6.

Figura 4.6. - Representação esquemática de um sistema de dois reservatórios em série

Portanto, nota-se que:

$$QT = Q_{d2} \quad (4.8)$$

e

$$Q_{af12} = Q_{d1} \quad (4.9)$$

A mesma observação para a fixação de QT em função de vazões locais é também válida.

Utilizando-se a equação (4.4) para igualar os níveis-índices e a equação (4.2), da continuidade, que são válidas para este caso, obtêm-se a equação (4.5). As equações (4.8) e (4.9) podem ser combinadas com a (4.5) e fornecem:

$$V_{T2}(V_{Z01} + Q_{af11} + Q_{loc1} - Q_{d1} + D_1) = V_{T1}(V_{Z02} + Q_{d1} + Q_{loc2} - QT + D_2) \quad (4.10)$$

$$Q_{d1} = \frac{V_{T2}(V_{Z01} + Q_{af1} + Q_{loc1} + D_1) - V_{T1}(V_{Z02} + Q_{loc2} - QT + D_2)}{VT_1 + VT_2} \quad (4.11)$$

Esta equação permite a obtenção direta de Q_{d1} e, conseqüentemente, com a expressão (4.7), de Q_{d2} .

Quando se consideram perdas por evaporação ou demandas para geração de energia, os cálculos não são diretos. Isto é devido ao fato de as perdas ou as demandas serem funções do armazenamento no final do período, o que exige um cálculo iterativo.

4.8.4.2.

Reservatórios Equivalentes

O conceito de reservatório equivalente é utilizado na determinação das prioridades de descargas entre subsistemas de reservatórios.

O reservatório equivalente é obtido somando-se os armazenamentos dos diversos reservatórios do subsistema, correspondentes a um determinado nível-índice. Por exemplo, considere-se uma situação em que há dois reservatórios em paralelo, a montante de um terceiro, como apresentado na figura 4.7.

Figura 4.7. - Representação esquemática de um sistema de três reservatórios

Apenas para exemplificar, supõe-se que as relações entre níveis-índices e armazenamentos sejam dadas pela tabela 4.1.

Tabela 4.1. - Níveis-índices dos reservatórios do sistema e do reservatório-equivalente

Nível Índice	VOLUMES ARMAZENADOS ACUMULADOS (10^6 m^3)			
	Res. 1	Res. 2	Res. 3	Res. Equivalente
5	40	20	8	68
4	30	15	6	51
3	20	10	4	34
2	10	5	2	17
1	0	0	0	0

Seja determinar as descargas dos reservatórios 1 e 2 no final de um intervalo, em que os volumes armazenados são 35, 12.5 e 3 nos reservatórios 1, 2 e 3, respectivamente. Para esses armazenamentos, o volume armazenado do reservatório equivalente é 50.5 e o nível equivalente é 3.97. Os níveis índices dos reservatórios 1, 2 e 3 são 4.5, 3.5 e 2.5, respectivamente. O critério utilizado no modelo é o de que as descargas sejam feitas de um reservatório de montante, se o seu nível for superior ao do reservatório 3 ou do equivalente. Portanto, nesse caso, as descargas seriam feitas do reservatório 1 e não seriam feitas do reservatório 2.

4.9.

PROPAGAÇÃO DAS DESCARGAS DOS RESERVATÓRIOS PELOS CANAIS

Para se atender à restrição de operação do reservatório pela capacidade do canal em um ponto de controle de jusante, é necessário que se conheça o comportamento da propagação das descargas pelo canal.

Quando se considera uma operação de regularização, em que os intervalos de cálculo são superiores aos tempos de translação das ondas entre o reservatório e o ponto de controle, o efeito do amortecimento e defasagem do hidrograma efluente do reservatório é desprezado.

Entretanto, em operação do tipo de controle de cheias, é importante que se conheça os parâmetros da propagação.

O modelo permite utilizar alguns métodos hidrológicos de propagação de ondas em canais, que podem ser traduzidos por uma equação linear de amortecimento do tipo:

$$Q_n = C_1 \cdot Q_{dn} + C_2 \cdot Q_{dn-1} + C_3 \cdot Q_{dn-2} \dots \quad (4.12)$$

onde:

Q_n é a ordenada de um hidrograma de descarga, em um ponto de controle a jusante do reservatório, no instante n .

$Q_{dn}, Q_{dn-1}, Q_{dn-2}$ são as ordenadas de um hidrograma de descarga de um reservatório, nos instantes $n, n-1, n-2$, etc.

C_1, C_2, C_3 , etc são coeficientes de propagação das descargas dos reservatórios.

Os coeficientes de propagação são determinados a partir das equações do método de propagação escolhido. Teoricamente, pode haver um número infinito de coeficientes; entretanto, a soma dos coeficientes tende a 1,0, podendo-se limitar o número de coeficientes, quando a soma estiver próxima de 1,0 a menos de uma precisão adotada.

Os métodos de propagação de ondas de cheias em canais incorporados ao modelo são o Puls Modificado, o Muskingum, o da Média Móvel Progressiva (Straddle-Stagger) e o "Working R e D". Quando o método é não linear, o programa determina um coeficiente K do Muskingum, baseado na inclinação da função de armazenamento x descarga, no final do período anterior.

No Anexo I, faz-se uma breve descrição das equações dos métodos hidrológicos de propagação de ondas de cheias em canais, que são utilizadas para a obtenção dos coeficientes da expressão linear do amortecimento.

4.10.

CONSIDERAÇÕES SOBRE DERIVAÇÕES DO SISTEMA

O modelo HEG-5 permite considerar interligações entre reservatórios ou pontos de controle, para transferência de vazões e, também, retiradas de vazões para demandas locais no sistema ou fora dele, com retorno total ou parcial das vazões após o seu uso.

Casos típicos de aplicações das derivações são as reversões de bacias hidrográficas através da interligação de reservatórios e as demandas de água utilizada para abastecimento público ou irrigação de áreas abastecidas pelos reservatórios.

As derivações podem ser efetuadas de qualquer reservatório ou ponto de controle, limitadas ao valor máximo permitido pelo programa. É permitida apenas uma derivação de cada ponto de controle. Quando há a necessidade de mais de uma retirada, pode-se englobá-las em uma equivalente ou criar pontos de controle fictícios, que coincidam com os locais em que se deseja efetuar as derivações.

As derivações podem retornar a qualquer ponto de controle, desde que situado a jusante, ou podem ser feitas para fora do sistema.

Os cartões que especificam os critérios da derivação (cartões DR, RD, QD) são preparados para os locais em que as derivações são "retiradas" do sistema.

As derivações podem ser consideradas constantes ao longo do tempo ou constantes para certos períodos, com repetição cíclica, podem ser função dos armazenamentos dos reservatórios, quando são limitadas pela capacidade máxima de derivação das estruturas ou ainda podem ser função dos afluxos aos reservatórios.

Em operações de controle de cheias, pode-se especificar que as derivações cresçam com o armazenamento até a capacidade máxima, sempre que o nível do reservatório estiver acima do topo da zona de conservação.

As derivações podem ser propagadas, utilizando-se qualquer método linear, e podem ser multiplicadas por uma constante, que representa a porcentagem da vazão que retorna ao sistema.

O programa apresenta uma restrição para os casos em que as derivações são função do desnível entre dois reservatórios, como é o caso das interligações que funcionam em regime de condutos forçados. Embora o programa mereça um desenvolvimento neste ponto, pode-se fazer algumas simplificações que sobrepujam o problema.

4.11.

OPERAÇÃO DE SISTEMAS COM GERAÇÃO DE ENERGIA

O modelo considera a geração de energia como uma operação de obras individuais (não considera sistemas de geração conjunto), baseada em uma capacidade nominal de potência instalada.

O programa determina a quantidade de água necessária para produzir uma certa energia com a carga disponível no período.

A demanda de energia pode ser especificada em milhares de kilowatts-horas para os doze meses do ano ou podem ser indicadas em função de um fator mensal. Podem ser ainda previamente especificadas para cada período de simulação, através do cartão PV. As distribuições das curvas de demandas diárias e horárias, são indicadas nos cartões PD e PH, respectivamente. É permitido se adotar um fator de sobrecarga de até 15%.

A cota do nível d'água a jusante da barragem é normalmente utilizada para a determinação da carga efetiva de geração. Essa influência é especificada através de uma curva de descargas, associando as vazões turbinadas e descarregadas pelos vertedores com a cota do nível d'água a jusante.

A eficiência da geração pode ser considerada constante. Se não for especificado um valor, é assumida uma eficiência de 0,86. A eficiência pode ser função do armazenamento do reservatório ou pode ser considerada através de um coeficiente de $\text{kw/m}^3/\text{s}$ turbinado para cada nível de armazenamento.

Pode-se considerar uma perda d'água por infiltração constante. Essa água não é considerada disponível para a geração de energia.

4.12.

ANÁLISE DE SEQUÊNCIAS DE CHEIAS

A denominada análise de sequências de cheias pode ser utilizada de algumas formas diferentes pelo modelo, em função do seu objetivo.

Uma primeira aplicação serve tanto para análises de operações de cheias como de regularização, onde o nome análise de sequências de cheias poderia ser melhor definido por análises de sequências múltiplas. Assim, para se fazer uma simulação durante um número de períodos que exceda o limite permitido pelo computador, pode-se dividir a série de dados de vazões, manualmente, em diversas sub-séries ou permitir que o programa faça automaticamente. Nesse caso, o programa prepara as sub-séries, mantendo um intervalo comum de 10 períodos. Esses intervalos não são operados na segunda série, mas servem apenas para garantir uma continuidade da propagação. Além desses 10 períodos são mantidos, também, em comum, um número de períodos igual ao número de intervalos de previsão de vazões futuras.

A opção da análise de sequências de cheias pode ser utilizada para operar o sistema em um período contínuo, com uma mistura de intervalos de cálculo. Por exemplo, pode-se simular uma operação a nível mensal, durante alguns anos e, logo após, executar uma simulação a nível diário ou horário, durante uma cheia e depois retornar à operação mensal.

A seleção das cheias utilizadas na operação do sistema é de suma importância na determinação das perdas médias anuais. As cheias selecionadas devem gerar picos de vazões nos pontos de controle onde há perdas por inundação, que representem toda a faixa da relação vazão-frequência-perdas, para as condições naturais ou básicas da bacia, assim como para as condições modificadas, pela introdução de reservatórios de controle de cheias ou pelo aumento das capacidades dos canais.

Mesmo quando se utiliza todas as cheias históricas, pode-se introduzir desvios no cálculo da perda média anual, se a maioria das cheias observadas estiver centrada em alguma parte da bacia e não sobre toda a área de estudo.

Uma possibilidade para essa análise é a geração de cheias proporcionais a uma cheia observada, onde se multiplicam os valores dos afluxos de uma certa condição, por coeficientes, que podem ser até 9. Em cada cheia estudada, os reservatórios podem iniciar nos mesmos níveis ou em níveis diferentes ou ainda utilizando o nível do último intervalo da cheia anterior. Dessa forma obtêm-se diversas cheias espalhadas pela curva de frequência das vazões, o que melhora os resultados, uma vez que a integração da curva de perdas-frequência é feita por integração em blocos retangulares para cada cheia, utilizando as probabilidades da curva de frequências das vazões para as condições naturais ou básicas da bacia.

4.13.

CÁLCULO DA PERDA MÉDIA ANUAL ESPERADA, POR INUNDAÇÕES

O modelo HEC-5 permite que sejam calculadas as perdas causadas por inundação em qualquer ponto de controle do sistema, que não seja um reservatório. Essas perdas são obtidas como valores médios anuais, sendo comparadas com os dados de custos anuais das obras, para se avaliar os benefícios líquidos advindos da redução das inundações.

O cálculo da perda média anual ou da perda causada por uma cheia específica pode ser feito para até 9 vazões diferentes, para alguns ou todos os pontos de controle do sistema. Para o cálculo da perda média anual, pode-se utilizar uma cheia histórica ou sintética e obter as demais pela multiplicação de coeficientes de majoração, de forma a se obter diversas vazões que estejam espalhadas ao longo da curva de frequências das vazões máximas naturais.

Para efeito de análise, as perdas médias anuais são calculadas para três condições da bacia: condição natural ou não controlada, que pode ser a condição atual da bacia com os reservatórios existentes; condição controlada, em que são incluídos no sistema todos os reservatórios propostos e medidias de melhorias dos canais, e uma condição de controle total nos locais com reservatórios, admitindo que seus volumes de controle de cheias são infinitos, isto é, apenas as vazões locais não são controladas.

Os dados de entrada e as opções de cálculo estão contidos nos cartões DA, DB, DF, DQ e DC. São fornecidos ao modelo os dados de custos das obras, a taxa de retorno do capital e os custos anuais de operação e manutenção.

O modelo admite que a perda causada por uma cheia é função do valor da vazão máxima e que este valor determina a frequência associada à cheia.

Frequentemente, os danos são expressos em função de cotas, mas é necessário que, fora do programa se convertam estas cotas em vazões, para se obter uma relação de vazões-perdas.

O modelo converte as relações de vazão-frequência e de perdas-frequência em uma relação de perdas-frequência, que é integrada para calcular a perda média anual esperada para as condições descritas anteriormente.

Se o valor da perda média anual para a condição básica do sistema já tiver sido calculado previamente, esse valor pode entrar como dado do modelo e o programa calculará apenas os danos para as outras condições e os comparará com esse valor fornecido.

O modelo admite para as vazões obtidas na condição controlada do sistema, a mesma curva de frequências das vazões naturais.

Se houver a proposição de alguma obra local de proteção, como um dique, pode-se fornecer ao modelo o valor da vazão de projeto e o modelo, automaticamente, reduz a zero as perdas causadas por vazões inferiores a esse limite.

A redução das perdas devida às obras propostas é baseada na diferença entre a perda média anual calculada para as condições básicas e para as condições modificadas. Uma comparação das perdas do sistema proposto com a situação de controle total indica o grau de eficiência do sistema proposto sobre o controle de cheias.

4.14.

AValiação DE CONFIGURAÇÕES ALTERNATIVAS DO SISTEMA

4.14.1.

Avaliação de Reservatórios Alternativos

Uma das aplicações do modelo de simulação - HEC-5 é a avaliação da melhor solução de configuração de reservatórios propostos em um sistema.

O procedimento recomendado é que se introduza os dados de todos os reservatórios, mesmo que alguns sejam alternativas excludentes de outros. O cartão J5 pode ser utilizado para eliminar reservatórios do sistema, exceto aqueles que trabalhem em série com um reservatório a montante, quando se deve remover os cartões RL-PE correspondentes.

Os custos dos reservatórios podem ser considerados função de seus volumes, considerados até o topo da zona de controle de cheias.

Pode-se, pois, fazer diversas simulações para os sistemas alternativos e se avaliar a melhor configuração e política de operação através da determinação do valor da função objetivo, obtida dos ganhos (redução de inundações, geração de energia, vazão aduzida) subtraídos dos custos dos reservatórios e de sua manutenção e operação.

4.14.2.

Avaliação de Alternativas de Melhorias dos Canais e Medidas Não-Estruturais.

A avaliação de obras de melhorias dos canais e de medidas não estruturais é aplicada nos sistemas propostos para controle de cheias.

Essas alternativas podem ser avaliadas na simulação de sistemas com ou sem reservatórios. A existência de diques ou melhorias do canal é refletida na mudança da capacidade do canal, e nos parâmetros de propagação de cheias.

O desempenho do sistema pode ser representado por uma função de perdas revisada. Os custos de alternativas que não contenham reservatórios podem ser dados em função da capacidade do canal. Para uma dada vazão de projeto, é obtido, por interpolação, o custo do capital aplicado no ponto de controle.

As perdas médias anuais, causadas por inundação, são calculadas da mesma forma descrita anteriormente em outro capítulo. Podem ser lidos dois cartões DC, com os custos das perdas por inundação, para representar as condições natural e regularizada.

Algumas alternativas não estruturais, como o zoneamento de áreas sujeitas a inundações, podem ser consideradas analogamente às alternativas estruturais, utilizando-se dois conjuntos de cartões DC. Entretanto, deve-se fornecer os limites superiores de vazões, que através dessas medidas, reduzem as perdas a zero.

4.15.

ANÁLISE DE SISTEMAS DE RESERVATÓRIOS PARA ATENDER A PROPÓSITOS MÚLTIPLOS

O modelo HEC-5 pode ser aplicado na análise da operação de sistemas com reservatórios múltiplos, para atender a diversos propósitos, como por exemplo, para garantir uma vazão firme e controlar cheias.

Hã dois procedimentos possíveis para solucionar esse problema através do modelo de simulação. O primeiro deles consiste em fazer dois estudos separados. Executa-se uma simulação, em base semanal ou mensal, para se verificar a garantia de vazão firme, por exemplo, para geração de energia ou outros propósitos, durante o período crítico. A seguir, faz-se uma simulação para atender ao controle de cheias, com intervalos horários, durante a ocorrência de uma cheia. Finalmente, combinam-se as soluções obtidas.

Uma outra forma consiste em se executar uma única simulação para atender aos dois propósitos, processando o modelo com intervalos mensais ou semanais, durante os períodos normais e com intervalos horários durante as cheias.

A desvantagem em se fazer estudos separados está na dificuldade em se combinar os resultados, especialmente quando se tem que examinar diferentes combinações de reservatórios, volumes e políticas de operação. Por outro lado, o estudo feito para cada propósito é mais simples e não é necessário utilizar todo o período de dados em cada análise.

A simulação conjunta permite que os estudos de sensibilidade possam ser rapidamente executados, sendo fácil a avaliação dos efeitos do uso conjunto do reservatório. O preço que se paga por isso são os longos e dispendiosos processamentos.

Um procedimento recomendável é executar os estudos separados, no início, para se familiarizar com o sistema e, a seguir, combiná-los para a execução da análise de sensibilidade.

Nesses estudos de propósitos múltiplos, de para-se sempre com interesses complementares e conflitantes. Por exemplo, em um reservatório que deva garantir uma vazão firme e controlar cheias, deseja-se manter o nível de armazenamento do reservatório o mais alto possível para evitar déficits no atendimento à demanda. Por outro lado, é desejável também que o nível do reservatório esteja o mais baixo possível para garantir um volume de espera, que retenha a onda de cheia.

Entretanto, deve-se lembrar também que esses mesmos usos podem não ser tão conflitantes quanto parecem. O uso do volume útil do reservatório para atender à demanda, faz com que seu nível se situe abaixo do topo do volume útil quando chega uma onda de cheia. Outra possibilidade é a não coincidência dos períodos de maior demanda com os períodos de cheias, o que permite variar o topo do volume útil ao longo do tempo, com certa flexibilidade.

Para sistemas com pequeno número de reservatórios, a estratégia para a determinação da melhor alternativa é simples, uma vez que todas as alternativas podem ser simuladas. Para sistemas complexos, deve-se escolher algumas alternativas, simulá-las e fazer uma análise dos resultados.

Um critério para essa análise é o de garantir que o custo marginal de um componente do sistema seja inferior ao benefício marginal por ele gerado.

Deve ser também garantida uma eficiência mínima do sistema, para não se construir e operar um sistema que transmita falsa sensação à comunidade. Nos casos em que essa

performance mínima não for garantida, é preferível investir o capital disponível em outra atividade.

4.16.

CONSIDERAÇÕES PARA A UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA

4.16.1.

Organização dos Dados de Entrada

Sendo o modelo HEC-5 de aplicação geral, a estrutura de montagem de entrada de dados é bastante flexível.

O grau de precisão e complexidade de uma operação de um sistema condiciona o maior ou menor número de informações de entrada. Existem alguns cartões obrigatórios em todas as simulações, sendo que a maioria do conjunto utilizado é opcional, variando para cada caso de aplicação.

A estrutura básica do modelo é formulada de montante para jusante. A simulação é executada na mesma ordem em que são dispostos os dados de entrada.

Cada ramal do sistema deve ser iniciado por um reservatório. Em sistemas com ramais paralelos, qualquer um dos afluentes pode ser operado primeiro. Em sistemas complexos, deve-se operar, inicialmente, o ramal que possuir derivações ou restrições de vazões mínimas.

Todos os reservatórios e pontos de controle a montante de qualquer local devem estar caracterizados antes de serem definidos os pontos de controle de jusante.

Todos os cartões de dados utilizam as duas primeiras colunas para identificação. Os dados são codificados em campos de 8 colunas, a menos das vazões, que também podem ser codificadas em campos de 6 colunas. Pode-se utilizar unidades métricas ou inglesas.

Os diversos tipos de cartões de dados existentes podem ser agrupados em algumas categorias. Uma descrição

mais detalhada dos cartões pode ser vista no Anexo II.1 A classificação das categorias pode ser apresentada como:

- cartões-título
- cartões de controle do job
- cartões de acompanhamento (trace) do job
- cartões de descrição dos reservatórios
- cartões de reservatórios com geração de energia
- cartões de descrição dos pontos de controle
- cartões referentes ao cálculo das perdas por inundação
- cartão de indicação de final de dados
- cartão de início de dados de vazão e evaporação
- cartões de especificação dos dados por período de simulação
- cartão de fim de job.

4.16.2.

Opções de Saídas Impressas das Simulações

O modelo HEC-5 permite uma grande flexibilidade no formato da impressão de saída. O volume de saída do programa pode ser controlado através dos cartões J2 e J8. O cartão J2 oferece alguns tipos de saídas padronizadas, enquanto o J8 permite que o usuário obtenha como saída, apenas as informações desejadas. Em cada período de simulação, podem ser apresentadas até 24 variáveis referentes a cada ponto de controle, o que muitas vezes não é o desejado; daí a possibilidade de escolha das saídas.

Além da saída normal, que está descrita no Anexo II.2, podem ser impressas informações intermediárias dos cálculos. Essas impressões servem para verificar o funcionamento do programa ou para testar alterações efetuadas no mesmo. Há diversos níveis de detalhamento, que podem ser pedidos para essas impressões auxiliares, especificadas no cartão J2. Os cartões TC e TP são utilizados para especificar os pontos de controle e os períodos a serem impressas as informações auxiliares. Deye-se ser cauteloso na fixação do grau de detalhamento dessas

informações, para se evitar uma listagem de saída extremamente volumosa.

Pode-se selecionar apenas algumas das impressões padronizadas existentes, ou ainda, escolher um formato próprio de saída. Uma descrição mais detalhada das opções de saídas está apresentada no Anexo II.2. De uma forma geral pode-se obter as seguintes saídas:

- impressão dos dados de entrada
- impressão de vazões locais calculadas e hidrogramas
- saída apresentada segundo a sequência de pontos de controle
- saída apresentada segundo os intervalos de operação
- impressão das descargas dos reservatórios e das vazões nos pontos de controle, por período de operação
- impressão projetada pelo usuário
- impressão de tabelas com resumos dos resultados da simulação
- impressão de valores médios das variáveis dos pontos de controle e reservatórios
- impressão de resumos de simulações de sequências múltiplas
- gráficos de distribuição de probabilidades de vazões
- quadro-resumo dos danos causados por inundação
- tabelas resumo com os custos do sistema
- tabela resumo com a performance econômica do sistema
- impressão de resumos das reduções de cotas e vazões
- impressão de mensagem de aviso de possíveis erros
- quadro com os códigos utilizados nas saídas.

4.16.2.1.

Notas sobre Verificações das Saídas do HEC-5

A etapa mais importante da simulação de operação de um sistema de reservatórios é a análise dos resultados. Entretanto, antes disso, é necessário que sejam feitas algumas análises de consistência das saídas, para se garantir que o modelo esteja representando, de forma adequada, o sistema real.

Citam-se aqui apenas algumas observações práticas, obtidas dos manuais de uso do modelo HEC-5 e também através da experiência adquirida com o uso do modelo HEC-5.

Para o primeiro processamento, deve-se verificar se os dados de entrada estão corretos, checando-se o resumo dos dados de entrada, impressos pelo programa.

Para verificar se a estrutura da configuração do sistema está correta, deve-se reconstituir as interligações entre os seus diversos elementos, através dos parâmetros RTFR, RTTO, DRTFR e DRTTO, que especificam os pontos iniciais dos transportes de água no sistema.

A seguir, deve-se verificar os parâmetros de propagação adotados e sua adequação aos limites possíveis. Deve-se confrontar os níveis-índices e os armazenamentos iniciais com a política de operação desejada.

A análise das curvas de descargas e armazenamentos é útil para se certificar que estão coerentes com as capacidades dos órgãos de descarga das barragens.

Através da listagem de saída, atesta-se que os reservatórios e pontos de controle estão operando e sendo operados por reservatórios e pontos de controle corretos, através de identificação das mensagens de SERVED BY e SERVING. Deve-se verificar se o balanço do volume de água que entra e sai do sistema, em cada intervalo de tempo está correto.

Quanto às derivações, deve-se controlar os locais e os critérios com que foram feitas e retornadas ao sistema.

Nos primeiros processamentos, verifica-se se todas as descargas dos reservatórios foram feitas segundo a política de operação desejada.

Para solucionar algumas dúvidas, pode-se especificar uma saída detalhada do programa, para alguns períodos e alguns pontos de controle, através dos cartões TC e TP, já apresentados anteriormente.

Em função do tipo de operação, se para regularização ou controle de cheias, deve-se seguir alguns passos específicos para se obter uma sensibilidade da operação. Por exemplo, para uma operação de controle de cheias, algumas observações importantes devem ser feitas, entre as quais citam-se as seguintes:

- observa-se a contribuição dos reservatórios à máxima vazão regularizada nos pontos de controle (Q BY RES). Se esta for pequena, o reservatório não pode mais reduzir os danos das inundações existentes.
- compara-se o volume da cheia liberada pelo reservatório (VOL FLOODS FROM RES) e o volume da cheia gerada na bacia intermediária do ponto de controle.

Observa-se o instante em que o reservatório provocou a inundação (PER FLOODS FROM RES) e se essa inundação começou antes de o reservatório de montante estar cheio. Para isso, vê-se o primeiro período em que o reservatório atingiu o topo da zona de controle de cheias (1ST PER EXCEEDED TOP F.C.)

- verifica-se se, em todos os reservatórios, o nível atingiu o topo da zona de controle de cheias. Se não, verifica-se se não é possível descarregar maior quantidade de água do reservatório que se encontra no nível mais elevado.
- compara-se a máxima descarga com a capacidade do canal e a vazão máxima afluente. Verifica-se se não é mais possível reter mais água no reservatório, caso a capacidade do canal seja inferior à vazão escoada.

Estas são algumas observações, citadas a título de exemplo. Para cada simulação, em função de seus propósitos, deve-se estruturar uma estratégia de verificação das saí

das, para auxiliar na detecção de incorreções e na sensibilidade para a otimização dos resultados.

4.17.

EXEMPLO-TESTE DO MODELO HEC-5

Para a implantação do modelo em um sistema computacional diferente daquele em que foi desenvolvido, é necessário que se faça sua aplicação a alguns exemplos-testes, de forma a verificar o funcionamento correto das diversas subrotinas envolvidas. O Manual do Usuário apresenta uma série com sete exemplos, para verificação do programa.

Apenas a título de ilustração da estrutura de uma possível saída do modelo, apresenta-se aqui o teste 1 do manual do usuário do HEC-5, onde procurou-se analisar os critérios operacionais adotados.

O problema envolve a operação de um único reservatório de controle de cheias, que procura minimizar inundações em dois pontos de controle de jusante.

As unidades adotadas no exemplo são as inglesas. As tabelas 4.2 a 4.4. apresentam a saída do modelo com os dados de entrada e os resultados da operação.

São simulados 10 intervalos com duração unitária de 6 horas. Os dados de entrada das vazões são locais (ou incrementais). É admitido um período de previsão dos afluxos de 07 intervalos. A variação das descargas entre dois intervalos sucessivos pode ser de 100% da capacidade de descarga do canal, que é de 21000 pés³/s (595,8 m³/s), junto ao reservatório (CP10), 25000 pés³/s (709,3 m³/s), junto ao ponto de controle 2 (CP2) e de 40000 pés³/s (1134,9 m³/s) no ponto de controle 1 (CP1).

O reservatório (CP10) foi dividido em 3 zonas, a saber: volume de resguardo, volume útil e volume de controle de cheias, cujos topos correspondem aos níveis-índices 1, 2 e 3, respectivamente. Na realidade foi alocado apenas o volume de controle de cheias com 50000 acre-pés (61,76 Hm³) uma vez que

Tabela 4.4 - Saída da simulação do teste

SINGLE RESERVOIR OPERATING FOR 2 CONTROL PTS
STRADDLE STAGGER ROUTING
EXAMPLE NO 1 FROM EXHIBIT 2

TEST 1

COMPUTATION INTERVAL IN HOURS= 6

***** FLOOD NUMBER 1 *****

UNITS OF OUTPUT

ALL FLOWS IN CFS OR CMS
EVAPORATION AND STORAGES IN ACRE FEET OR 1000 CU METERS
ELEVATIONS IN FEET OR METERS
POWER IN 1000 KWH EXCEPT WHEN IPER LE 24 HOURS-IN KWH

NFLRD= 1 NFLCON= 0
IFLRO= 1 IFLCON= 1
FLOWS MULTIPLIED BY 1.000

LOC	10	RESERVOIR A CP=10	SERVED BY		10	2	1	STARTING TIME=	
PER	CUM LOCAL Q		SERVING		10	2	1	HOUR=	1
1	0.	8020.	18000.	30000.	20000.	12000.	6000.	6, DAY=23, PMON=	1, YEAR=1960.
PER	NATURAL FLOW							AVG=	9700.000
1	0.	8020.	18000.	30000.	20000.	12000.	6000.	MAX=	30000.000
PER	INFLOW							MIN=	0.000
1	0.	8020.	18000.	30000.	20000.	12000.	6000.	AVG=	9700.000
PER	OUTFLOW							MAX=	30000.000
1	0.	6029.	0.	0.	0.	0.	21000.	MIN=	0.000
PER	CASE=LCC.TYP							AVG=	9700.000
1	0.03	1.05	1.04	1.03	1.02	1.01	0.01	MAX=	21000.000
PER	LEVEL							MIN=	0.000
1	2.000	2.020	2.0198	2.0496	2.0694	2.0813	2.0664	AVG=	5201.896
PER	EOP STORAGE							MAX=	21000.000
1	0.000	0.020	0.0198	0.0496	0.0694	0.0813	0.0664	MIN=	0.000
PER								AVG=	0.923
1	0.000	0.020	0.0198	0.0496	0.0694	0.0813	0.0664	MAX=	2.020
PER								MIN=	0.010
1	0.000	0.020	0.0198	0.0496	0.0694	0.0813	0.0664	AVG=	2.003
PER								MAX=	2.013
1	0.000	0.020	0.0198	0.0496	0.0694	0.0813	0.0664	MIN=	2.000

4.4 - Saída da simulação do teste continuação

1	0.	977.	9903.	24779.	34697.	40647.	33209.	32222.	32718.	22305.	AVG=	23145.777	MAX=	40647.141	MIN=	0.000

**** LGC 2 CONTROL POINT D=CP=2 SERVED BY 10																
PER	CUM LOCAL 0															
1	0.	2000.	7340.	11340.	16340.	27330.	24330.	12330.	15340.	16670.	AVG=	13302.000	MAX=	27330.000	MIN=	0.000
PER	NATURAL FLOW															
1	0.	2000.	10007.	20007.	35007.	49997.	44997.	24997.	22007.	19870.	AVG=	22868.667	MAX=	49996.667	MIN=	0.000
PER	REGULATED FLOW															
1	0.	2000.	9350.	13350.	18350.	27330.	24330.	19330.	23670.	25000.	AVG=	16270.913	MAX=	27330.000	MIN=	0.000
PER	0 SPACE AVAIL.															
1	25000.	23000.	15650.	11650.	6650.	-2330.	670.	5670.	1330.	0.	AVG=	8729.087	MAX=	25000.000	MIN=	-2330.000
PER	0 BY US RES/DIVS															
1	0.	0.	2010.	2010.	2010.	0.	0.	7000.	6330.	8330.	AVG=	2968.913	MAX=	8329.833	MIN=	0.000
PER	FLOOD BY RES															
1	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	AVG=	0.000	MAX=	0.000	MIN=	0.000

**** LGC 1 CONTROL POINT E CP 1 SERVED BY 10																
PER	CUM LOCAL 0															
1	0.	5030.	11120.	16220.	20009.	38330.	39330.	31830.	21599.	22449.	AVG=	20588.733	MAX=	39329.667	MIN=	0.000

os volumes útil e de resguardo são nulos. Isto define a política de operação básica do reservatório, que consiste em procurar esvaziá-lo o máximo possível, sem causar inundações a jusante e sem ultrapassar sua capacidade de descarga, que no exemplo é constante e igual a 21000 pés³/s (595,8 m³/s). O volume inicial armazenado foi fixado em zero, admitindo-se que o nível d'água estivesse no topo do volume útil.

Não existem restrições de vazões mínimas nos pontos de controle.

O método de propagação das vazões adotado foi o da média móvel progressiva com coeficientes 3/2 entre o reservatório (CP10) e o ponto de controle 2 (CP2), e 3/1 entre os pontos de controle 2 (CP2) e 1 (CP1). Portanto, as vazões nos pontos de controle 2 e 1 são obtidas pelas expressões:

$$Q(2,i) = Q_{1oc}(2,i) + 0.3333[Q(10, i-1)+Q(10, i-2)+Q(10, i-3)] \quad (4.30)$$

$$Q(1,i) = Q_{1oc}(1,i) + 0,111 Q(10, i-1)+0,222Q(10, i-2)+0,333Q(10, i-3)+0,222Q(10, i-4)+0,111Q(10, i-5) \quad (4.31)$$

onde:

$Q(k,i)$ = vazão no ponto de controle k, no intervalo i

$Q_{1oc}(k,i)$ = vazão local incremental, no ponto de controle k, no intervalo i.

A saída pedida limitou-se à impressão sequencial para cada ponto de controle.

O resultado da simulação mostra que no intervalo 1, a descarga do reservatório é igual a zero, porque tanto o volume armazenado como o afluxo são também nulos.

No intervalo 2, a descarga do reservatório foi fixada em $6029 \text{ p\acute{e}s}^3/\text{s}$ ($171,1 \text{ m}^3/\text{s}$), de forma que a parcela dessa vazão propagada até o intervalo 7 ($670 \text{ p\acute{e}s}^3/\text{s} = 0,111 \times 6029 \text{ p\acute{e}s}^3/\text{s}$) não causasse inundação no ponto de controle 1. A hipótese admitida é que nos intervalos 3 a 6 as descargas seriam nulas. Normalmente, o programa não admite diretamente uma vazão nula nos intervalos seguintes ao da operação considerada, mas considera a taxa de variação permissível da descarga, as necessidades de vazões mínimas e as descargas necessárias, se o reservatório está acima da zona de controle de cheias.

Nos intervalos 3 a 6, a descarga do reservatório é feita igual a zero, dada a imposição da operação do intervalo 2. Por outro lado, considerando-se que no intervalo 6 a vazão local do ponto de controle 2 é superior à capacidade do canal, isto exigiria que as descargas do reservatório fossem nulas nos intervalos 3 a 5.

No intervalo 7, não há nenhuma restrição de jusante e o reservatório descarrega o limite de sua capacidade, de $21000 \text{ p\acute{e}s}^3/\text{s}$ ($595,8 \text{ m}^3/\text{s}$).

No intervalo 8, a descarga do reservatório é limitada a $3989 \text{ p\acute{e}s}^3/\text{s}$ ($113,2 \text{ m}^3/\text{s}$), para que a capacidade do canal no ponto de controle 2, no intervalo 10 não fosse superada ($0,333 \times 21000 + 0,333 \times 3989 = 25000 - 19670$), admitindo-se que a descarga no intervalo 9 fosse nula.

No intervalo 10, a descarga do reservatório é igualada à sua capacidade máxima, uma vez que não há previsões das vazões além desse intervalo.

4.18.

EVOLUÇÕES RECENTES DO MODELO

O modelo HEC-5 vem sendo aplicado em diversos estudos de operação de sistemas de reservatórios múltiplos. Como já foi discutido anteriormente, o uso de modelos de simulação generalizados exigem, algumas vezes, uma certa adaptação, para seu emprego em casos particulares. Simultaneamente, o próprio - Hydrologic Engineering Center (HEC) vem implementando o modelo, procurando aperfeiçoá-lo.

Uma primeira modificação introduzida pelo HEC no modelo, foi realizada para torná-lo compatível com computadores de diversas capacidades de armazenamento. Os espaços de memória necessários são agora fixados, indiretamente, pelo usuário, em função do número de elementos do sistema (reservatórios, pontos de controle, derivações e usinas). Desta forma, se se de seja processar a simulação de um sistema com pequeno número de reservatórios em um computador de pequeno porte, não é mais preciso que se modifique diretamente os valores nas instruções de DIMENSION e COMMON do programa, bastando introduzir o número de elementos do sistema no cartão J7.

O desenvolvimento dos sistemas de computação tem conduzido a uma modificação nos procedimentos de processamentos de programas. A introdução de programas e dados através de cartões perfurados foi praticamente substituído pela introdução através de arquivos gravados em disco ou fitas magnéticas. As saídas dos programas, que anteriormente se constituíam unicamente em listagens impressas, hoje podem ser também apresentadas em terminais de vídeo, sob forma tabular ou em terminais gráficos.

Acompanhando essa evolução, o modelo HEC-5 foi transformado, para permitir seu acesso através de terminais sob forma interativa. Esses desenvolvimentos ainda não são disponíveis na versão de biblioteca do programa, mas já se encontram

implantados em alguns sistemas, como o de Salt Lake System e o Merrymack River Basin.

O programa original, HEC-5, foi subdividido em dois programas. O HEC5A lê os dados e processa a simulação hidrológica. Os resultados são impressos em arquivos, que são lidos pelo HEC5B, que por sua vez fornece as tabelas de saída e executa os cálculos econômicos. Esse procedimento é utilizado para o processamento em "batch" (sem intervenção intermediária do usuário). A saída pode ser obtida através da impressora do sistema ou através do acesso a um arquivo de saída pelo editor do sistema, onde se pode consultar os resultados no vídeo do terminal.

O "Boeing Computer System (BCS)" desenvolveu dois novos programas, para permitir uma saída interativa do programa. No lugar do programa HEC5B, foi desenvolvido o programa GENRAF, que reestrutura os resultados do HEC5A em um arquivo randômico em disco. O programa INTRAF é utilizado para acessar e mostrar ao usuário a saída pedida.

A figura 4.8 apresenta as alternativas possíveis de uso da nova versão.

Figura 4.8. - Esquema Funcional da nova versão do Modelo HEC5

O arquivo de entrada ARQ1 é submetido ao HEC5A que gera dois arquivos de saída, TAPE e H5OUT. O arquivo H5OUT é o arquivo normal de saída do HEC5A e contém uma listagem dos dados de entrada e um resumo desses dados. O arquivo TAPE é um arquivo sequencial binário, com os resultados da simulação. Há duas formas de se processar o arquivo TAPE.

O ramo esquerdo da figura 1 mostra o arquivo TAPE sendo processado pelo HEC5B, que gera a saída PROUT, que é uma execução normal em "batch". O ramo direito refere-se ao processamento interativo, utilizando o programa GENRAF. São criados os arquivos ARQ2 e RSOUT, este apresentando um resumo do conteúdo do arquivo ARQ2. O arquivo ARQ2 é do tipo randômico e fica disponível para ser utilizado na saída interativa.

O programa INTRAF permite que se acesse, através do terminal, as informações desejadas, através da escolha de uma das opções apresentadas numa lista na tela do vídeo (Menu).

Esse novo procedimento foi utilizado nos sistemas descritos, para a operação em tempo real. Por exemplo, uma das saídas do programa é um gráfico, que apresenta os hidrogramas das vazões afluentes e efluentes de um reservatório e um cotograma das elevações do reservatório. Através do terminal gráfico, pode-se alterar o hidrograma de saída do reservatório e resubmeter a nova informação para ser simulada. Desta forma, pode-se obter as consequências de modificações introduzidas na operação, de forma rápida, paralelamente à tomada de decisão para o sistema real.

O próprio HEC desenvolveu, em 1980, uma versão do modelo HEC5 para ser aplicada no National Hydropower Study. Nesta versão foi introduzida uma subrotina de otimização da regularização, onde a função objetivo é a maximização da geração de energia, utilizando todo o volume útil no período crítico. Existem algumas alternativas para se fazer as otimizações, mas basicamente, o programa otimiza a função objetivo nos períodos

críticos e simula o restante do período de dados, com as dimensões e políticas de operação definidas no período crítico.

Uma evolução do modelo foi desenvolvida também no decorrer do estudo aqui descrito, quando se pretendeu aplicar o modelo a um sistema com reversão de vazões, isto é, com a transposição de volumes d'água de jusante para montante de um sistema.

No exemplo de aplicação estudado, existem uma série de reversões para montante, onde inclusive, no sistema real, há uma usina reversível prevista. O modelo original não permitia que fossem feitas derivações de um ponto de controle de jusante para outro de montante. A modificação introduzida no modelo durante o desenvolvimento deste trabalho veio a ser introduzida posteriormente pelo próprio HEC em 1981, independentemente do conhecimento do trabalho aqui descrito.

O conceito de utilização de usinas reversíveis em sistemas complexos é simples, entretanto, é válida uma explicação sucinta, dada a sua importância operacional.

A necessidade de armazenamento por bombeamento de água provém da variação de demanda diária, semanal ou sazonal da energia. Em alguns sistemas, com unidades geradoras térmicas ou nucleares, existe uma geração de energia contínua, fora dos picos de demanda. É interessante, pois, utilizar essa energia excedente, para produzir energia a um custo relativamente baixo nos períodos de pico.

Como é difícil armazenar energia, na forma elétrica, pode-se transformá-la em energia de origem hidráulica, através do recalque e armazenamento da água em reservatórios elevados, que são utilizados para liberar essa água e gerar energia, quando necessário.

Um sistema de armazenamento por bombeamento requer o uso de unidades reversíveis, que ora funcionam como bombas, ora como turbinas. É necessária também uma topografia adequada, para se formarem os reservatórios superior e inferior. Além disso, é recomendável que exista uma alta queda, para minimizar o armazenamento necessário, os custos dos equipamentos e as dimensões do "penstock" e uma distância pequena entre os reservatórios. O reservatório inferior pode ser um existente, um lago ou um oceano. O reservatório superior, em geral, é um novo reservatório, embora se possa utilizar um lago existente.

A eficiência da conversão da energia hidráulica potencial, através de bombeamento e geração tem sido melhorada e, atualmente, situa-se em torno de 70 a 80%.

Na versão modificada neste estudo, a presença de uma reversão é simulada com a introdução de uma derivação negativa do reservatório de montante, retornando ao de jusante, com um valor positivo.

Na versão do HEC, introduz-se um reservatório fictício, a montante do reservatório superior, com volume nulo, capacidade de descarga ilimitada, sem operar para nenhum ponto de controle. A reversão é simulada através da derivação do reservatório inferior para o fictício.

Como o modelo opera o sistema, partindo dos reservatórios de montante para os de jusante, na versão do HEC, os volumes d'água bombeados do reservatório inferior, somente serão considerados na operação do reservatório superior, no intervalo seguinte.

Em ambas as versões, não foram criadas mensagens especiais para os casos de reversão. Deve-se, pois, ao analisar as saídas do programa, interpretar de forma coerente os resultados. Assim, onde se lê energia necessária deve-se entender como energia disponível e onde se lê energia gerada, deve-

se entender como energia utilizada para o bombeamento. E assim, sucessivamente, vale a mesma cautela para as outras mensagens.

CAPÍTULO 5

EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MODELO HEC5 A UM CASO DE ESTUDO

5.1.

Generalidades

Com a finalidade de ilustrar a aplicação do modelo HEC-5, apresenta-se aqui um caso estudado de um sistema de reservatórios múltiplos.

Escolheu-se um sistema que foi proposto pelo DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica, do Estado de São Paulo) para o abastecimento da região metropolitana de São Paulo, simultaneamente à geração de energia de ponta e controle de cheias. O sistema consiste em uma série de reservatórios, canais e túneis, que reverterem parte das águas da bacia do Rio Juquiã para São Paulo.

Paralelamente à aplicação prática do modelo ao problema existente, procurou-se explorar as capacidades do modelo, e a sensibilidade das operações, através de uma sequência de simulações adicionais, o que resultou em 54 processamentos. Normalmente, para uma aplicação em estudos práticos, o número de processamentos pode ser muito reduzido.

A bacia hidrográfica do Rio Juquiã, pela sua situação geográfica e pelo potencial hídrico disponível, apresenta possibilidades de um aproveitamento integrado, visando o abastecimento da Grande São Paulo, a geração hidrelétrica e o controle de cheias.

Diversos estudos foram efetuados, com vistas ao aproveitamento dos recursos hídricos da bacia do Rio Juquiã, remontando a 1952 o estudo do planejamento do aproveitamento do Rio Juquiã-Guaçu, para a Companhia Brasileira de Alumínio.

O exemplo estudado se restringiu ao estudo da operação mensal de um sistema proposto, para verificar a garantia de atendimento de uma vazão média de $65 \text{ m}^3/\text{s}$, para São Paulo, com as dimensões dos reservatórios pré-estabelecidas.

Não foram considerados, na análise, problemas relativos à geração de energia e o controle de cheias, embora a estrutura dos dados, da forma que foi montada, permite facilmente uma generalização do estudo, para incluir esses fatores.

5.2.

DESCRIÇÃO DA BACIA DO RIO JUQUIÃ

A bacia do Rio Juquiã é a principal sub-bacia do Rio Ribeira do Iguape. Apresenta um desenvolvimento paralelo à orla do mar, sendo limitada ao norte pelas bacias dos Rios Paranapanema, Sorocaba e Cotia, a leste pelas bacias dos Rios Guarapiranga e Preto, a oeste pelas bacias dos Rios Etã e Paranapanema e ao sul por diversas sub-bacias do Rio Ribeira do Iguape.

O Rio Juquiã deságua no Rio Ribeira do Iguape, cerca de 10 km a montante da cidade de Registro. Seus principais afluentes são os Rios São Lourenço, Ipiranga e Quilombo. A área da bacia é de 5280 km² e a extensão do curso d'água é de cerca de 230 km. Uma planta esquemática da bacia está apresentada na figura 5.1.

Na altura da cidade de Juquiã, onde a área da bacia é cerca de 83% da área total da bacia, a vazão média mensal é da ordem de 131 m³/s, e a mínima mensal de 55 m³/s. A vazão média específica, de 33 l/s.km² é bastante elevada. Em razão da variabilidade moderada das vazões, é possível regularizar vazões elevadas com reservatórios relativamente pequenos.

5.3.

DESCRIÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO

A figura 5.1. apresenta uma planta esquemática da bacia do Rio Juquiã com os reservatórios existentes e propos. São apresentados também os perfis longitudinais dos Rios Juquiã e São Lourenço, na figura 5.2.

No Rio Juquiã, a montante da confluência com o Rio São Lourenço, encontram-se os reservatórios da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), que não foram analisados diretamente no estudo.

A transferência de água para São Paulo seria feita por uma inversão do fluxo natural do Rio São Lourenço, de forma que a água alcançasse sua cabeceira e a seguir atingisse a bacia do Alto Tietê, no reservatório Guarapiranga. As principais obras do sistema são:

- Barragem de derivação (B2) no rio Juquiã
- Barragens de manutenção de nível B4 e B1 e estações elevatórias EE7 e EE4 no Rio São Lourenço
- Barragem de regularização LH1 no Rio São Lourenço e estação elevatória EE3.
- Barragem de manutenção de nível LH5 e estação elevatória EE5 no Rio São Lourencinho
- Barragem LH6, no Rio São Lourencinho, para manutenção de nível e criar o reservatório inferior da usina reversível UR-1. Estação elevatória EE-6, junto à barragem.
- Usina reversível UR-1 entre os reservatórios LH6 e GD3-GD4 - LH3
- Barragens GD3-GD4 e LH3, para formação do reservatório superior da usina reversível e para manutenção de nível, nos Ribeirões Braço Grande, Grande e São Lourencinho.

Figura 5.1 Sistema Juquiá – Localização esquemática dos reservatórios e dos postos pluviométricos

Figura 5.2 Sistema Juquiá – Perfil Longitudinal do sistema

Consultar o documento original depositado na Biblioteca Central da Poli.

SISTEMA JUQUIÁ

LOCALIZAÇÃO ESQUEMÁTICA
DOS RESERVATÓRIOS E DOS
POSTOS FLUVIOMÉTRICOS

FONTE: DAEE - RELATÓRIO INTERNO 1980

FIGURA 5.1

- Barragens GD2 e JR1, para a formação do reservatório de regularização de Rosas, no Ribeirão Grande e no Rio Juquiã, com a estação elevatória EE2.
- Barragem CH2, no Ribeirão Cachoeira, para manutenção de nível e elevatória EE1.
- Barragem EG3 no Rio Embú-Guaçu.
- Barragem SR5 no Ribeirão Santa Rita.

Os reservatórios são interligados por canais, com exceção das ligações LH6-GD3, CH2-EG3 e EG3-SR5, que são constituídas por túneis.

O reservatório formado pela barragem LH1 servirá para regularizar as vazões oriundas da própria bacia de drenagem, bem como daquelas oriundas da área entre as barragens B2 e LH1. Da mesma forma, o reservatório de Rosas servirá para regularizar as vazões recalçadas dos rios Juquiã e São Lourenço e as vazões da própria bacia.

A tabela 5.1. fornece algumas informações dos reservatórios do sistema.

Os reservatórios SR5 (Santa Rita) e EG3 (Embu-Guaçu) não foram considerados na análise por serem apenas reservatórios de passagem. A nível mensal, sua operação não influencia os resultados.

As restrições existentes no sistema consistem em manter uma vazão mínima a jusante de B2 igual a $15 \text{ m}^3/\text{s}$, para a cidade de Juquiã e $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ para as usinas da CBA.

A meta da operação é aduzir uma vazão média mensal de $65 \text{ m}^3/\text{s}$ para São Paulo.

Tabela 5.1. - Algumas Características dos Reservatórios do Sistema

Reservatório	Área Drenável (km ²)	Cota da Barragem	Vazão Max Vert (m ³ /s)	NA Max (m)	Vol. Max. (10 ⁶ m ³)	NA Normal (m)	Vol. Normal (10 ⁶ m ³)	NA Min. (m)	Vol. Min. (10 ⁶ m ³)
B2	4352	22,0	1500	19,5	65,0	17,0	20,0	14,5	0
B4	1442	24,5	900	22,6	—	22,0	—	—	—
B1	705	35,0	730	33,0	30,0	30,0	15,8	29,5	15,0
LH1	363	72,0	415	69,8	304,5	65,0	225,0	55,0	105,0
LH5	155	112,0	805	109,7	82,8	105,0	69,4	—	—
LH6	60	166,0	209	164,8	63,7	160,0	51,4	150,0	31,1
LH3-GD3-GD4	38	705,0	30	703,3	85,8	702,0	75,3	698,0	45,5
GD2-JR1	137	733,0	23	731,1	550,0	730,0	508,0	723,0	280,0
CH2	6	774,0	4	770,5	28,5	770,0	28,2	760,0	11,0

5.4

COLETA E ANÁLISE DOS DADOS HIDROLÓGICOS

Foram coletados e analisados os dados de vazões médias mensais de alguns postos da bacia, que estão mostrados na figura 5.1 e na tabela 5.2. Como os locais dos postos não coincidem com os locais dos barramentos e como o período comum de dados é pequeno, fez-se uma análise preliminar desses dados, para a geração de valores nos locais de interesse, em um período prolongado.

Foram analisados os resultados de medições de vazões e obtidas as curvas-chaves dos postos, sendo consequentemente obtidas as vazões a partir das leituras das réguas.

Para os postos situados ao longo dos Rios São Lourenço e São Lourencinho, efetuou-se uma análise regional dos dados, o que levou a uma expressão de geração de vazões na forma:

$$Q_i^j = \frac{A_{di} \times Q_{base}^j (a_i^j + b_i^j A_{di} / A_{dbase})}{A_{dbase}} \quad (5.1)$$

onde:

- Q_i^j = vazão média mensal do posto i, no mês j, j=1, ..., 12.
 A_{di} = área de drenagem do posto i
 Q_{base}^j = vazão média mensal de um posto base, no mês j
 a_i, b_i = coeficientes da análise de regressão
 A_{dbase} = área de drenagem do posto base.

A expressão 5.1. foi obtida a partir da hipótese que as vazões específicas são função da área de drenagem, imposta pelas expressões:

$$\frac{Q_i^j}{Q_{base}^j} = \alpha_i^j, \quad j = 1, \dots, 12 \quad (5.2)$$

Tabela 5.2 - Relação dos Postos Fluviométricos Existentes

Código	Nome	Entidade	Área km ²	Período	Bacia do Rio
4E-015	k73-BR116	CTH	236	71-	Juquiã*
4F-003	Barra do Açungui	CTH	2462	38-	Juquiã
4F-005	Bairro Iporanga	CTH	408	55-	Açungui
4F-007	Sítio Jaborandi	CTH	1719	61-	São Lourenço
4F-009	Açungui-km 179	CTH	644	61-71	Açungui*
4F-013	Açungui	CTH	645	59-62	Açungui*
4F-017	Pedra do Largo	CTH	560	63-	São Lourencinho
4F-018R	Juquiã	CTH	4369	69-	Juquiã*
4F-021	Porto da Goiaba	CTH	2586	71-	Juquiã*
4F-025	Capela do Porto	CTH	642	72-	Açungui*
4F-026	Faz. Praia Alta	CTH	359	71-	Itariri
4F-028	Ribeirão dos Lopes	CTH	2489	72-	Juquiã*
81.450.000	Juquitiba II	DNAEE	235	52-	São Lourenço
81.470.000	Juquitiba I	DNAEE	500	51-	Juquiã
81.491.000	Cach. do França	DNAEE	1080	52-58	Juquiã*
81.495.000	Usina Fumaça	DNAEE	1116	65-	Juquiã*
81.525.000	Abaixo Capela	DNAEE	642	53-	Açungui
81.530.000	Barra do Açungui	DNAEE	2489	51-	Juquiã
81.600.000	Pedro Barros	DNAEE	1223	37-	São Lourenço
81.630.000	Miracatu	DNAEE	1444	51-	São Lourenço
81.680.000	Juquiã	DNAEE	4369	37-	Juquiã
V8-353	Rosas	LIGHT	133	27-56	Juquiã
V8-356	França	LIGHT	981	13-52	Juquiã
V8-357	Vila Juquiã	LIGHT	4369	38-60	Juquiã

* Disponíveis apenas os dados de cotas.

$$\alpha_i^j = a_i^j + b_i^j \cdot \frac{A_{di}}{A_{dbase}} \quad (5.3)$$

onde

$\overline{q_i^j}$ = vazão média específica, de longo período, do posto i no mês j.

$\overline{q_{base}^j}$ = vazão média específica, de longo período, do posto base no mês j.

α_i^j = relação entre as vazões específicas de um posto i, no mês j, com a correspondente do posto base.

Foi elaborado um programa, em FORTRAN, que obtem os parâmetros a_i^j , b_i^j , α_i^j , a partir dos postos do Rio São Lourenço e gera as vazões nos locais de interesse. Foi gerado o período de vazões de 1938 a 1968.

Para a obtenção das vazões afluentes aos reservatórios de Rosas, Cachoeira e GD3-GD4-LH3, calculou-se as vazões específicas médias, com base nos dois postos existentes e extrapolou-se os resultados para os locais das barragens.

Dadas as características de reversões do sistema, algumas modificações tiveram que ser efetuadas nas vazões para a consideração correta dos afluxos aos reservatórios.

Assim, as vazões naturais correspondentes ao local de barramento LH3 foram descontadas das vazões dos reservatórios do Rio São Lourenço e adicionadas ao reservatório GD3-GD4-LH3. Das vazões obtidas para o barramento GD3, foram subtraídas as vazões de GD2 e estas somadas ao reservatório de Rosas (JR1).

Para essa análise preliminar, não foram considerados os dados de evaporação dos reservatórios.

5.5.

CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA ADOPTADA NO MODELO

Para a simulação de um sistema complexo de reservatórios pelo HEC-5, como o do exemplo estudado, são necessárias algumas simplificações e outras vezes certas distorções do sistema real, que devem ser cuidadosamente analisadas para a compreensão dos resultados obtidos e sua tradução para o sistema real.

A figura 5.3. apresenta uma configuração esquemática do Sistema dos reservatórios do Rio Juquiã. Como pode ser observado, o sistema é fechado, isto é, os volumes de água podem circular indefinidamente dentro do sistema. A solução deste sistema pelo HEC-5 só pode ser obtida de forma iterativa. O artifício utilizado, para a solução do problema, consistiu na interrupção do sistema entre o reservatório de Rosas (JR1) e os da CBA e entre os reservatórios da CBA e o reservatório B2. As vazões correspondentes à afluência do Rio Juquiã em B2 foram adicionadas às vazões naturais de B2, oriundas da bacia do Rio São Lourenço. Além disso, adicionou-se a vazão média de descarga de Rosas ao fluxo natural de B2.

As reversões indicadas, na figura 5.3, como arcos, são efetuadas, na realidade, pelos próprios canais de ligação entre os reservatórios.

A primeira configuração do sistema utilizada no modelo está representada na figura 5.4. Os reservatórios indicados por quadrados são considerados no modelo como simples pontos de controle, devido a sua pequena dimensão, face a uma operação mensal. Os reservatórios GD3-GD4-LH3, LH6 e São Paulo estão considerados como reservatórios, por serem os primeiros reservatórios de cada trecho. Os reservatórios da CBA foram subdivididos em CBA1 e CBA2, para representar sua situação em relação aos reservatórios GD3-GD4-LH3 e Rosas. Entretanto, o reservatório GD3-GD4-LH3 só libera água para a CBA nos casos em que

Figura 5.3 - Representação Esquemática do Sistema de Reservatórios do Rio Juquiá

Figura 5.4. - Configuração Inicial do Sistema Adotada no Modelo

o nível d'água ultrapassa uma cota de segurança. As descargas normais são efetuadas através do reservatório de Rosas.

A configuração do sistema no modelo foi sendo modificada ao longo do processo, de forma a se poder adaptar as regras de operação permitidas pelo HEC-5 ao caso real. A última configuração utilizada está apresentada na figura 5.5. No item seguinte, serão abordados mais detalhadamente os conceitos adotados para as diversas configurações, entretanto, vale observar aqui alguns detalhes. Nota-se, pela figura 5.5 que os reservatórios B1 e B4 não aparecem no sistema. Na configuração adotada, foram eliminados e representados apenas por B2. Foi elaborado um programa específico de operação dos reservatórios LH1, B1, B4, B2, para simular as derivações e descargas reais, a partir dos resultados obtidos em LH1 na versão completa.

Figura 5.5. - Configuração Final do Sistema Adotada no Modelo

Como foi exposto anteriormente, diversas configurações foram sendo adotadas ao longo do estudo. Como seria por demais prolongada a exposição de cada caso estudado, escolheu-se as configurações inicial e final para serem descritas e analisadas.

5.6.

DESCRIÇÃO E ANÁLISE CRÍTICA DE ALGUMAS SIMULAÇÕES EFETUADAS

Na configuração inicial adotada do sistema, considerou-se um total de 14 pontos de controle. Desse total, dois reservatórios são regularizadores, o LH1 e o JR1 (Rosas). Os demais são apenas pontos de controle do sistema.

Os pontos de controle 4 (Juquiã) e 15 (São Paulo) não têm função operativa, constituindo-se apenas em elementos de contorno do sistema.

A derivação ao reservatório São Paulo (PC15) é considerada como sendo feita deste reservatório para o de Cachoeira (PC3), uma vez que toda derivação deve sair de um ponto de controle de montante e retornar a um ponto de controle de jusante. O valor da derivação foi fixada em $-66 \text{ m}^3/\text{s}$, constante durante todo o tempo.

Analogamente, as derivações para o reservatório Cachoeira (PC3), do reservatório de Rosas (PC14) foram adotadas como constantes e iguais a $66 \text{ m}^3/\text{s}$, consideradas no modelo em valor negativo para representar uma derivação de Cachoeira (PC3) para Rosas (PC14). Esse valor foi admitido igual ao anterior, uma vez que os afluxos naturais ao reservatório Cachoeira são muito pequenos. Na figura 5.4, estão apresentados os valores médios obtidos da simulação do período 1938-1965. Nota-se, que no sistema real, a derivação média efetiva de Rosas para Cachoeira seria de $65,8 \text{ m}^3/\text{s}$, descontando-se a vazão de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ de contribuição natural à Cachoeira.

As derivações efetuadas do reservatório GD3 - GD4-LH3 para Rosas são feitas em função do armazenamento existente em Rosas no final do período anterior, de forma a tentar preencher o reservatório até o nível d'água máximo normal, considerando-se as derivações e as descargas que são efetuadas em um período médio de operação.

As derivações efetuadas dos reservatórios LH6 para GD3-GD4-LH3, LH5 para LH6, LH1 para LH5, B4 para B1, Aux 2 para B4 e B2 para Aux2, são iguais aos déficits dos afluxos no início do período. Os afluxos são calculados no início de cada período como a soma das descargas de pontos de controle de montante e vazões locais, subtraída da derivação efetuada para fora do reservatório. Essa política foi adotada, uma vez que as dimensões desses reservatórios são pequenas.

As derivações efetuadas de B1 para LH1 foram admitidas como função do armazenamento em LH1 e limitadas à menor vazão observada em B2. Seus valores diminuem, à medida que o volume armazenado se aproxima do máximo normal.

A presença do reservatório Aux.2 é dispensável. Sua introdução foi efetuada apenas para considerar a contribuição da bacia do Rio Juquiã, a montante da confluência com o Rio São Lourenço e as descargas regularizadas das usinas da CBA.

A imposição de vazão mínima foi adotada nos pontos de controle 14 e 5, ou seja Reservatório de Rosas e reservatório B2. O primeiro procura manter uma descarga mínima desejada de $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$, limitada por uma mínima requerida de $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$. O reservatório B2 deve atender a uma vazão mínima requerida ou desejada de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ para Juquiã.

Os níveis atribuídos aos reservatórios podem ser reais ou fictícios. O reservatório São Paulo possui uma dimensão fictícia qualquer, uma vez que sua capacidade de descarga foi igualada a zero, para qualquer nível de armazenamento, servindo como um acumulador infinito.

Para o reservatório de Rosas, impôs-se um volume grande fictício para o topo da zona de controle de cheias. Os topos das zonas de resguardo e de regularização foram igualados ao volume mínimo do reservatório real. Desta forma, como a política de operação é reduzir o armazenamento ao topo da zona de

regularização, no reservatório real haveria a tendência de se esvaziar até o volume mínimo, não restringindo as derivações e fetuadas de Rosas para Cachoeira.

Esse mesmo artifício foi adotado nos reservatórios GD3-GD4-LH3, LH6 e LH1, para não se limitar as derivações entre os reservatórios. Esta política de operação é um pouco diferente daquela utilizada por um reservatório de regularização comum, onde se procura manter uma oscilação do nível d'água dentro do volume útil.

As curvas de descargas máximas possíveis dos reservatórios foram elaboradas em função do volume armazenado, de tal forma que até o volume máximo normal, apenas a vazão mínima desejada de jusante fosse liberada. Acima desse valor, a capacidade de descarga foi fixada em função das capacidades dos extravasores das barragens. Com a política de operação adotada, procurou-se manter uma derivação constante de $66 \text{ m}^3/\text{s}$, para São Paulo. Teoricamente, a solução é possível, uma vez que o afluxo total ao sistema é de $134,80 \text{ m}^3/\text{s}$. Descontando-se a vazão mínima de $15 \text{ m}^3/\text{s}$, a ser garantida para Juquiã, restam $119,80 \text{ m}^3/\text{s}$ para a regularização. Portanto, a vazão de $66 \text{ m}^3/\text{s}$ representa 55% da vazão máxima regularizável.

O reservatório de Rosas, que possuía um armazenamento inicial de $257,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ (vol. mínimo), permaneceu com volumes armazenados entre $488,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ e $521,5 \times 10^6 \text{ m}^3$, o que mostra seu não aproveitamento como reservatório regularizador. O afluxo médio ao reservatório foi de $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$, o que implicou em armazenamentos com tendência de crescimento ao longo da série simulada. Esse resultado é explicado pela política de operação adotada, que procurou abastecer o reservatório de Rosas até seu nível máximo normal às custas de derivações dos reservatórios de jusante do sistema, permitindo assim que a sazonalidade dos afluxos fosse uniformizada por eles e não por seu próprio volume de armazenamento.

Por outro lado, o reservatório LHI, que partiu com um volume inicial elevado (fictício) de $504,5 \times 10^6 \text{ m}^3$, para suprir a derivação do primeiro intervalo e permanecer em seu volume mínimo, de $105 \times 10^6 \text{ m}^3$, manteve uma tendência constante de esvaziamento. O afluxo médio ao reservatório no período simulado foi de $-46,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Isto é explicado, pelo fato de o reservatório LHI ter que suprir com seu armazenamento as demandas das derivações exigidas por Rosas, uma vez que as contribuições naturais da bacia são insuficientes e por não se ter imposto derivações maiores da bacia de jusante de LHI para este reservatório. Isto levou o reservatório a um esvaziamento total no período simulado.

As vazões exigidas para as usinas da CBA foram atendidas dentro do esperado. As vazões exigidas em Juquiã foram muito superadas, uma vez que não se reverteu um volume adequado para montante.

Da simulação efetuada, nota-se a necessidade de duas medidas essenciais. A primeira consiste em reverter um volume maior de água para o reservatório LHI e desta forma aproveitar melhor o potencial hídrico da bacia de jusante e do Rio Juquiã, representada pela descarga do sistema CBA no reservatório Aux 2. A segunda consiste em reduzir a derivação para Rosas, aproveitando-se o potencial de sua própria bacia e tornar a derivação de GD3-GD4-LH3 para Rosas variável, fazendo com que esse reservatório absorva as oscilações sazonais das vazões.

As modificações que foram sendo introduzidas na configuração do sistema no modelo e na política de operação, foram sendo testadas em um período de simulação mais reduzido, abrangendo o período de 1952-1957, onde se nota um período crítico prolongado do sistema. Após as avaliações iniciais das modificações impostas, simulava-se o período completo disponível. Com isto, conseguiu-se uma redução sensível nos tempos de processamento, sem perda de informação para uma análise de sensibilidade da operação.

O resultado das modificações introduzidas consiste na última configuração adotada, apresentada na figura 5.5. Nesta versão, são considerados 12 pontos de controle, dos quais 9 são reservatórios. Desses reservatórios, apenas LHI e Rosas possuem capacidade de regularização.

O reservatório São Paulo é fictício, servindo apenas para acumular a água vertida por todo o sistema. Foi atribuído um grande volume a esse reservatório e fixada sua capacidade de descarga em zero, para qualquer nível de armazenamento.

O reservatório de Cachoeira foi considerado como tal, pois é o primeiro ponto de controle do ramo. Foi atribuída uma capacidade de descarga ilimitada, fazendo com que toda a vazão afluyente seja extravasada. No sistema real, deve-se interpretar a vazão vertida como sendo a vazão derivada para São Paulo.

O reservatório de Rosas foi posicionado de tal forma a derivar para o reservatório Cachoeira, descarregar para as usinas da CBA e receber a derivação de GD3-GD4-LH3. A derivação efetuada de Rosas foi admitida como constante e igual a $65 \text{ m}^3/\text{s}$. A capacidade de descarga para jusante é função do armazenamento. Abaixo do nível d'água mínimo, a capacidade de descarga é igual a zero e entre este nível e o nível normal é fixada em $25 \text{ m}^3/\text{s}$, que é a vazão desejada nas usinas da CBA. Acima do nível normal, a capacidade aumenta rapidamente, de tal forma a se evitar um enchimento do reservatório acima do nível máximo normal.

O nível d'água mínimo e o máximo normal do reservatório real foram admitidos como níveis mínimo e máximo da zona de controle de cheias, no modelo, de tal forma que a política adotada consiste em tentar esvaziar o reservatório nesta faixa, não criando restrições para a derivação e para a descarga.

O reservatório Aux.7 é um reservatório fictício, introduzido para permitir que houvesse derivação de GD3-GD4-LH3 para Rosas. Como o modelo não permite que seja feita mais de uma derivação por ponto de controle, não seria possível representar diretamente a derivação de GD3-GD4-LH3 para Rosas, uma vez que o primeiro reservatório já faz uma derivação de LH6 e Rosas já faz uma derivação para Cachoeira. O reservatório foi admitido com uma capacidade de descarga ilimitada, de forma a transmitir diretamente a Rosas, as vazões derivadas de GD3-GD4-LH3. A derivação efetuada de GD3-GD4-LH3 para Rosas é variável ao longo do ano, segundo a distribuição dada na figura 5.6, apresentando uma vazão média anual de $63.7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 5.6. - Variação Anual da Derivação de GD3-GD4-LH3 para Rosas

O reservatório GD3-GD4-LH3 tem pequenas dimensões. A derivação é feita de LH6, no mesmo valor do déficit do afluxo, causado pela derivação efetuada a Rosas (através do Aux 7).

Da mesma forma, os reservatórios LH6 e LH5 compensam os déficits dos afluxos, derivando a mesma quantidade do déficit, dos reservatórios LH5 e LH1, respectivamente.

O reservatório LH1 foi posicionado de tal forma a atender às demandas de derivação de LH5 e a receber as vazões da bacia de jusante, representada no modelo pelo reservatório B2. As descargas de B2 são nulas, até que o reservatório atinja o nível normal, a partir de onde a capacidade de descarga fica ilimitada, representando com isso que todo o volume de água que não pode ser reservado nos reservatórios a jusante de LH1, é bombeado para esse reservatório.

O reservatório LH1-fictício foi introduzido para corrigir as vazões locais afluentes a B2, que opera em paralelo aos reservatórios LH1, LH5 e LH6, no modelo, quando na prática está em série. Sua capacidade de descarga é nula, para qualquer armazenamento, de tal forma a não ter influência na operação.

O reservatório B2 representa, no modelo, o conjunto de reservatórios B2, B4 e B1, cuja operação será detalhada adiante. A diferença básica de sua operação com relação a da configuração inicial é que as vazões desejadas em Juquiã são consideradas através de uma derivação constante de B2 para o ponto final de $15 \text{ m}^3/\text{s}$. A capacidade de descarga foi imposta como ilimitada, de forma que todo o volume de água disponível fosse "vertido" para o reservatório LH1. Esse vertimento deve ser entendido no sistema real, como sendo a reversão.

Para o detalhamento da operação do sistema de reservatórios B2, B4, B1 e LH1 foi construído um modelo de simulação específico, que utiliza os resultados da saída anterior, como dados de entrada.

A figura 5.7 ilustra os valores médios dos dados de entrada e dos resultados desse modelo. Sucintamente, po

Figura 5.7. - Configuração do Sistema B2-B4-B1-LH1 adotada no modelo desenvolvido.

de-se dizer que a política adotada de operação procura reverter a máxima vazão possível dos reservatórios que estão mais próximos de LH1 para suprir a quantidade de derivação, imposta no modelo HEC-5, do sistema B2, B4 e B1 para LH1, resultando assim na minimização dos bombeamentos necessários.

Desta forma, o modelo inicia a operação, comparando a vazão revertida do sistema B1, B4, B2 com a vazão vertida de LH1. Se a derivação for menor que a vertida, o excesso de água é vertido por LH1 e os reservatórios B1, B4 e B2 são descar

regam para jusante. Caso contrário, a diferença é obtida pela reversão dos afluxos a B1. Se a vazão local de B1 é insuficiente, então o modelo procura suprir esta diferença com a reversão da vazão local de B4. Caso esta não seja também suficiente, o modelo requer a derivação das vazões locais de B2. Em todos os casos é feita uma verificação da garantia da vazão mínima em Juquiã.

Associando-se os resultados desse modelo específico com o do HEC-5, obtém-se o resultado da operação do sistema real completo, cujos valores médios são apresentados na figura - 5.3.

Vale observar que na versão final foram corrigidos os afluxos a Rosas. Na versão inicial o afluxo médio local, considerado no modelo, foi de $4,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Na realidade, o afluxo é igual a $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$. A diferença observada é explicada pela consideração, na versão inicial do modelo, do afluxo local a CH2 como parte do afluxo total a Rosas. Desta forma o afluxo total ao sistema se eleva a $135,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

O resultado da simulação mostrou que a vazão de $65 \text{ m}^3/\text{s}$ para São Paulo pode ser mantida pelo sistema. Da mesma forma foram garantidas as vazões de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ para as usinas da CBA e $15,0 \text{ m}^3/\text{s}$ para a cidade de Juquiã, sendo inclusive superados todos os limites impostos.

O reservatório de Rosas, nesta nova configuração, foi melhor aproveitado. O volume armazenado mínimo situou-se em torno de 14% do volume útil. Os volumes armazenados médios oscilaram entre 43% e 99% do volume útil (Figura 5.8), estando os maiores armazenamentos localizados nos meses de março e abril, antes do início dos meses de estiagem e os menores volumes estão nos meses de setembro a dezembro, permitindo um volume de reserva para as cheias desses meses. Nos 28 anos simulados, hou

ve 35 meses em que o volume armazenado situou-se acima do nível normal, concentrados nos meses de Janeiro a Abril. Isto mostra a necessidade de o reservatório ser mais deplecionado neste período, quer seja através de um acréscimo da vazão regularizada para São Paulo, ou por uma redução das vazões aduzidas a Rosas neste período ou ainda por uma combinação das duas alternativas.

Figura 5.8. - Variação Anual do volume armazenado no reservatório de Rosas

O reservatório LHI manteve seu volume de armazenamento sempre acima do nível máximo normal. Isto evidencia que seu efeito regularizador não foi aproveitado. Isto é explicado pela política de operação adotada, que retira do reservatório LHI uma quantidade de água que é variável ao longo do ano, em função da derivação exigida por Rosas, que é inferior ao potencial hídrico da bacia, a jusante de LHI.

Portanto, para a manutenção da vazão regularizada de $65 \text{ m}^3/\text{s}$ para São Paulo seria possível reduzir as dimensões do reservatório LHI ou Rosas. Ou de outra forma, pode-se aumentar a vazão regularizada, através do uso do volume útil de LHI.

Como a vazão média descarregada para Juquiã é de $71,4 \text{ m}^3/\text{s}$, bastante superior ao mínimo exigido de $15 \text{ m}^3/\text{s}$, poderia se imaginar em uma expansão da vazão regularizada, aumentando-se os volumes dos reservatórios. Aparentemente, é mais interessante aumentar o volume de regularização de B2, uma vez que o afluxo de sua bacia é grande, reduzindo a necessidade de sobremotorização das elevatórias em B4, B1 e LHI, uma vez que o regime de vazões se tornaria mais regular. Outras alternativas poderiam ser propostas, como a elevação das barragens LHI ou de Rosas. Uma análise preliminar foi efetuada, admitindo-se que a área de inundação dos reservatórios crescesse 30%. Para o reservatório B2, isto representa um acréscimo de $95 \times 10^6 \text{ m}^3$ no volume do reservatório, através da elevação da barragem, passando de 10 m para 12m de altura. Para o reservatório LHI, o acréscimo de volume é de $395 \times 10^6 \text{ m}^3$ e a barragem se eleva de 44m para 59m. Para o reservatório de Rosas, o acréscimo do volume é de $250 \times 10^6 \text{ m}^3$ e a barragem se eleva de 38m para 45m de altura. Como pode se observar, o reservatório B2 sofre um acréscimo de área inundada razoável para uma pequena elevação da barragem. Além disso, o volume não cresce significativamente, e o acréscimo de altura da barragem fica limitado, pela interferência com grandes trechos de uma rodovia principal existente. Uma decisão entre as duas outras alternativas poderia ser tomada com base em algumas simulações adicionais, e submetidas a uma análise econômica.

A aplicação do modelo HEC-5 a este exemplo prático mostrou a necessidade de se adaptar a configuração do sistema no modelo e as regras operacionais adotadas, de forma a se conseguir uma boa aproximação do sistema real. O exemplo apresentado exigiu um maior tempo de análise que levaria um sistema convencional do reservatório, pela dificuldade na consideração de políticas verossímeis das reversões.

A adaptação da configuração real do sistema para uma configuração fictícia no modelo exige uma interpretação dos resultados apresentados nas simulações, para traduzi-los às variáveis de interesse do sistema real.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Aparentemente, o estudo da operação de sistemas de reservatórios é um capítulo da engenharia bastante simples, pois envolve, basicamente, a consideração da equação da continuidade aplicada aos reservatórios. Entretanto, numa análise mais profunda, vislumbra-se a necessidade de conhecimentos relativos à modelagem de simulação, à análise de sistemas, através de algoritmos de otimização, à hidrologia sintética, através de modelos de geração ou previsão de vazões, à meteorologia, para previsão em tempo real, e às implicações de ordem física, social, econômica, política e ambiental da operação de um sistema de reservatórios.

Numa primeira classificação geral, dividiu-se os métodos utilizados para análises de reservatórios simples e de sistemas complexos de reservatórios. Essa distinção é justificada pelas características e pelo grau de dificuldade desses problemas.

Dos modelos de dimensionamento de reservatórios simples, o diagrama de massas de Rippl, proposto em 1883 é o mais conhecido e largamente utilizado. Contrapondo-se a sua vantagem de ser extremamente simples, existe a restrição da consideração das vazões regularizadas constantes, ou seja, sua independência em relação ao volume armazenado no reservatório. Sua limitação, na versão original do método, é a consideração do dimensionamento sob um enfoque determinístico. Entretanto, hoje, essa limitação é facilmente superável, quando se associa esse método com o uso de processos estocásticos de geração de vazões.

A análise da operação de um sistema de reservatórios, através de um processo de simulação, pode ser considerada uma extensão do método de Rippl, em que se faz um balanceamento de volumes, mas com maior flexibilidade na utilização da vazão regularizada. Pode-se considerar qualquer regra de operação e com o uso de séries sintéticas, permite uma solução esto

cástica do problema.

Ambos os processos necessitam de séries completas de vazões, o que muitas vezes dificulta sua aplicação.

Os métodos de análise de sequências de vazões mínimas são processos rápidos e simples, que são indicados para uma análise preliminar do dimensionamento de um reservatório. Além disso, conseguem exprimir os volumes obtidos dos reservatórios, em função de probabilidades de sucesso de sua operação.

Os métodos de Moran e Gould, baseados em matrizes de probabilidades de transferência de estados, são mais indicados para uma análise mais refinada do dimensionamento. Apresentam diversas vantagens em relação aos outros métodos, uma vez que os volumes obtidos são independentes da condição inicial de operação imposta, podem utilizar séries históricas com falhas, não necessitam admitir uma distribuição de probabilidades teórica dos afluxos, além de poderem considerar regras de operação complexas. Sua aplicação exige o uso de computadores, devido ao volume de cálculos necessários. O processo admite conhecido o volume dos reservatórios, o que exige um tratamento iterativo no dimensionamento. Por admitirem independência serial das vazões afluentes, é necessário corrigir os volumes obtidos, quando a correlação serial das vazões for diferente de zero.

As metodologias de estudo de sistemas de reservatórios múltiplos podem ser classificadas em métodos otimizantes e não otimizantes, embora, muitas vezes, se utilize de forma conjunta as duas metodologias.

Nos modelos otimizantes, a solução final obtida atende a uma maximização de benefícios líquidos de uma forma direta. Nos modelos não otimizantes, ou de simulação, a solução final é obtida de forma iterativa. Os modelos otimizantes exigem uma formulação matemática dos algoritmos bastante complexa. Os modelos de simulação exigem uma sensibilidade maior do opera

dor para a obtenção de uma solução ótima.

A forma mais simples dos modelos otimizantes é a programação linear. Em oposição à sua facilidade de aplicação, está a restrição na consideração de funções não lineares do sistema. A programação linear tem sido utilizada em sistemas complexos associada à programação dinâmica.

A programação dinâmica tem a vantagem de decompor problemas altamente complexos, com grande número de variáveis, em uma série de sub-problemas com variáveis simples resolvidos recursivamente, sem restrições quanto à forma das equações. Entretanto, esta técnica exige capacidades de memória de computador elevada, conhecida como a praga da dimensionalidade. Essa restrição é quem dá origem aos diversos algoritmos existentes para a solução da programação dinâmica. Dentre os algoritmos de solução da programação dinâmica, o processo de aproximações sucessivas, utilizado no método de programação incremental tem sido aplicado com certo sucesso, associado a modelos de programação linear. O número de variáveis deixa de crescer exponencialmente com o número de reservatórios, embora o processo ainda fique restrito à aplicação em sistemas com pequeno número de reservatórios, pela exigência de longos tempos de processamento. Uma extensão dessa técnica, representada pelo algoritmo de programação incremental com níveis múltiplos, traz uma redução nos tempos de cálculo, permitindo a aplicação em sistemas maiores. Nas duas metodologias, não se pode garantir que o processo converja para o ótimo global, sendo necessárias diversas imposições de uma política inicial de operação. A programação dinâmica diferencial procura superar essas restrições, mas exige algumas linearizações de certas funções do sistema. Pode ser considerado, em alguns casos, como uma solução alternativa aos processos de aproximações sucessivas.

A aplicação de modelos estocásticos à operação de um sistema de reservatórios sofre diversas restrições. Embora os modelos ditos estocásticos explícitos abordem o problema

de uma forma direta, possuem uma estrutura muito mais complexa que os modelos determinísticos. Os métodos de restrições probabilísticas, na forma linear, como proposto por Revelle et alii (1969), ou na forma dinâmica de Askew (1974), sofrem restrições quanto ao número de reservatórios do sistema, sendo aplicados, em geral, apenas a reservatórios únicos.

A tendência da maioria dos pesquisadores é a de adotar modelos estocásticos implícitos, em que se aplicam os modelos determinísticos a séries geradas estocasticamente e se analisa os resultados por regressão múltipla, para se definir as regras de operação ótimas. Esta parece ser a melhor solução indicada quando o sistema possui diversos reservatórios.

Os modelos de simulação podem ser utilizados para definir uma política de operação factível, que será utilizada em um modelo otimizante ou pode servir para avaliar a política obtida por um modelo otimizante em uma série temporal mais extensa que a utilizada para a otimização. É claro, que podem também ser utilizados independentemente, para dimensionamento ou operação de sistemas de reservatórios.

Numa operação em tempo real, os modelos de simulação podem até substituir os modelos de otimização, durante alguns períodos, quando algumas restrições do modelo otimizante são difíceis de serem ajustadas para produzir uma solução factível.

Os modelos de simulação podem ser específicos para um sistema ou podem ser preparados para um uso generalizado. A concepção do modelo HEC-5, aqui discutido, foi voltada de forma a permitir a consideração de qualquer configuração de sistema. Entretanto, em alguns casos especiais, (como o do exemplo de aplicação, em que há derivações de jusante para montante) são necessárias algumas modificações no modelo ou na estrutura dos dados de entrada. O modelo HEC-5 permite a análise de sistemas alternativos, sem necessitar modificações substan

ciais nos dados de entrada, o que proporciona uma economia no tempo de aplicação.

O modelo admite algumas regras de operação gerais, cuja flexibilidade é ainda favorecida pela técnica dos níveis-índices, permitindo-se adotar diversas prioridades de operação. Apresenta, em alguns casos, algumas restrições à adoção de regras complexas, o que favorece, então, nestes casos, a decisão por se desenvolver um modelo específico.

O fornecimento dos resultados das simulações pode possuir graus de precisão compatíveis com os objetivos do estudo, evitando, desta forma, volumes de saída exagerados para o grau de informação desejada.

Pela dificuldade na modificação do programa, é necessário, na maioria das vezes, a adoção de configurações fictícias do sistema real no modelo, de forma a torná-lo representativo. Para essas adaptações é necessário que o usuário esteja acostumado a trabalhar com o modelo e a interpretar seus resultados, o que exige uma certa experiência adquirida com simulações de sistemas mais simples.

Pela inexistência de uma metodologia geral para o estudo de operação de reservatórios, é necessário que se aprofunde no conhecimento das diversas técnicas, explorando seus conceitos, potencialidades e restrições de uso, de forma a se poder discernir, num caso específico, por aquela que garanta o resultado mais confiável e eficiente.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

O estudo da operação de sistemas de reservatôrios abrange um campo vasto de conhecimentos, que exige uma dedicação à pesquisa de assuntos diversos e complexos.

O presente trabalho procurou desenvolver uma pequena contribuição ao estudo da operação de reservatôrios, descrevendo e classificando diversas metodologias utilizadas para o dimensionamento e a operação de reservatôrios simples ou de sistemas com diversos reservatôrios.

A passagem da análise de uma operação de um reservatôrio único, para a de um sistema com múltiplos reservatórios, acresce radicalmente a complexidade do problema. Enquanto, no primeiro caso, existe uma dependência temporal entre as tomadas de decisão da operação do reservatôrio, no outro existe também uma dependência espacial entre elas, que torna sua solução mais difícil.

Para o dimensionamento de um sistema de reservatôrios múltiplos é necessária, inicialmente, uma definição de quais reservatôrios devem ser construídos e a seguir, a fixação da combinação de volumes individuais que traz o melhor benefício líquido. Na fase de operação, é preciso decidir pela combinação de descargas e armazenamentos dos reservatôrios e os volumes que devem ser intercambiados entre os mesmos, quando houver reversões.

As metodologias utilizadas em sistemas de reservatôrios múltiplos podem ser também aplicadas a reservatôrios simples.

A extensa e variada bibliografia sobre o asunto revela a inexistência de um algoritmo geral para a solução do problema. A escolha do método depende das característi-

cas do sistema, da disponibilidade de dados, dos objetivos do estudo e das restrições existentes no sistema.

Os modelos de otimização têm sido desenvolvidos e aplicados com sucesso nos últimos 10 anos. Entretanto, ainda existe uma defasagem entre o desenvolvimento teórico e as aplicações práticas. A política ótima obtida de um modelo de otimização nem sempre é a política ótima para o sistema real, uma vez que os modelos admitem uma série de hipóteses simplificadoras, que podem afastar o sistema real do sistema otimizado no modelo.

O objetivo de um estudo de operação de um sistema de reservatórios condiciona também a escolha do método a ser empregado. Numa fase de planejamento de um sistema, o enfoque principal consiste em se analisar o efeito de cada elemento adicional introduzido, na performance do sistema. Na operação do sistema real, objetiva-se otimizar a operação de um conjunto de obras já definidas. Os planejadores necessitam conhecer as consequências de longo prazo de uma certa sequência de eventos e decisões, enquanto os operadores estão preocupados em analisar os riscos imediatos de uma decisão, uma vez que as consequências são irreversíveis após a decisão de uma operação. Embora as ferramentas matemáticas sejam as mesmas, seu uso é um tanto distinto nos dois casos.

Na aplicação de metodologias de otimização em planejamento de sistemas de reservatórios, pode-se adotar processos estocásticos, que consideram, mais realisticamente, o comportamento das vazões. Na operação em tempo real, o processo pode possuir um caráter determinístico, uma vez que os aflúxos futuros ao sistema podem ser previstos com boa confiabilidade. Entretanto, para que isto ocorra, é necessário que o sistema disponha de uma rede telemétrica de medição das variáveis hidrológicas, que seja eficiente e um modelo de previsão bem calibrado. Portanto, o caráter estocástico está implícito no modelo de previsão utilizado.

A negligência no estudo estocástico das vazões pode anular os benefícios obtidos pelos algoritmos de otimização. Desta forma, a hidrologia sintética assume um papel primordial nos estudos de operação de reservatórios, quer seja através dos modelos de geração, para os modelos de planejamento, quer seja através dos modelos de previsão, para os modelos de operação em tempo real. A hidrologia sintética teve considerável progresso nos últimos anos, exigindo um estudo particular aprofundado para seu conhecimento.

Os modelos de simulação constituem-se em alternativas e complementos dos modelos otimizantes. Sua desvantagem reside na necessidade de se executar diversos processamentos para se atingir uma política ótima. Além disso, não há a garantia do atingimento da solução ótima, pois esta depende da regra de operação imposta por quem utiliza o modelo. Por outro lado, permite representar, matematicamente, o sistema real mais facilmente que os modelos otimizantes. Sua flexibilidade estrutural proporciona a possibilidade de adoção de regras complexas.

A elaboração de um modelo de simulação de operação de sistemas de reservatórios requer bastante tempo, tanto humano como de computador. Em geral, os modelos são válidos apenas para os sistemas em que foram desenvolvidos, não sendo aplicáveis a outros casos. Nestes modelos específicos, algumas alterações do sistema ou das regras de operação exigem retificações profundas nos programas, que demandam muito esforço de desenvolvimento. Deve-se, pois, procurar elaborar programas flexíveis, que possuam um certo grau de generalização para as eventuais modificações necessárias. A decisão da escolha entre um modelo generalizado e um modelo específico deve ser bem ponderada, pois disto dependerão a eficiência e o tempo do estudo.

Embora os modelos generalizados possam considerar diversas configurações e regras de operação de sistemas de reservatórios, algumas vezes são necessários ajustes nestes modelos ou transformações fictícias dos sistemas reais para adap-

tação de seu uso em casos específicos.

A utilização de modelos de simulação para avaliar a operação de um sistema de reservatórios requer uma sistemática bem organizada, de forma a tornar o processo viável e capaz de fornecer informações precisas. Para esta finalidade, deve-se cuidar que o modelo utilizado seja inicialmente validado, que os dados sejam representativos do sistema e que se estabeleça um critério de avaliação dos resultados que sirva para analisar as saídas do modelo e subsidiar os testes de sensibilidade da eficiência do sistema às alterações introduzidas. Outro ponto importante é a organização dos processamentos efetuados, uma vez que os volumes de saídas dos modelos podem ser vultosos, principalmente, quando o número de alternativas estudadas é grande.

O modelo HEC-5, aqui analisado, é exemplo de um modelo de simulação generalizado, aplicável a sistemas de reservatórios complexos. É aplicável ao dimensionamento e à operação de sistemas, a nível de planejamento e em tempo real. Sua estrutura permite a análise de operações de controle de cheias e de regularização. É útil para avaliar as perdas causadas por inundação numa região e os benefícios advindos de modificações introduzidas no sistema existente ou natural. Sua capacidade em analisar a operação de usinas hidrelétricas de um sistema de reservatórios permite sua aplicação em estudos energéticos.

A forma de programação do modelo é bastante complexa, exigindo um esforço razoável, caso se deseje introduzir modificações nos seus processos de cálculo. O programa exige um computador de certo porte que, em alguns casos, poderá condicionar sua utilização. Face aos modelos otimizantes aplicáveis a sistemas de mesmo porte, pode ser considerado bastante mais simples.

Não se pode afirmar que exista uma metodologia geral para o estudo da operação de reservatórios, que seja a mais eficiente. Cada caso estudado requer o uso de uma técnica ou uma combinação de diversas técnicas.

O aprimoramento da operação de um sistema de reservatórios múltiplos exige a elaboração de modelos de operação com intervalos de tempo de decisão reduzidos. Assim, os resultados de um modelo a nível mensal servirão de condição de contorno aos modelos diários e seus resultados aos modelos horários, chamados de tempo real. Da mesma forma, deve-se preocupar de forma crescente com a qualidade e a eficiência da obtenção dos dados.

Os resultados fornecidos pelos modelos devem ser interpretados como um indicativo da operação ótima. Entretanto, a sensibilidade dos operadores deverá censurar as decisões que considerar incorretas, uma vez que os resultados dos modelos são fruto de uma concepção de ótimo, que pode, em alguns casos, não corresponder à realidade.

As análises de operação de sistemas de reservatórios constituem-se em responsabilidade extrema dos operadores perante a sociedade. Na fase de planejamento das obras, assume-se um compromisso em se utilizar os recursos públicos de uma forma racional e eficiente. Na fase de operação do sistema existente, deve-se garantir o atingimento dos objetivos propostos, que envolvem inclusive, muitas vezes, a segurança de populações, que depositam toda a confiança nas entidades operadoras.

Anexo I

EQUAÇÕES DOS MÉTODOS DE PROPAGAÇÃO DE CHEIAS EM CANAIS, UTILIZANDO O MODELO HEC-5

O modelo HEC-5 permite utilizar diversos métodos hidrológicos de cálculo do amortecimento de ondas de cheias em canais. Todas as expressões conceituais desses métodos são traduzidas a uma equação geral do tipo:

$$Q_n = C_1 \cdot Q_{dn} + C_2 \cdot Q_{dn-1} + C_3 \cdot Q_{dn-2} \dots \quad (I.1)$$

onde:

Q_n é a ordenada de um hidrograma de descarga, em um ponto de controle a jusante de um trecho, no instante n

$Q_{dn}, Q_{dn-1}, Q_{dn-2}$, etc são as ordenadas de um hidrograma de descarga de um reservatório nos instantes $n, n-1, n-2$, respectivamente

C_1, C_2, C_3 , são coeficientes de propagação das vazões.

Os coeficientes $C_1, C_2, C_3, \dots$ podem ser obtidos por um dos métodos a seguir descritos.

Anexo I.1

MÉTODO DE MUSKINGUM

Neste método, a vazão de saída de um trecho de uma canal é uma função linear dos armazenamentos em prisma e em cunha no trecho. A equação básica de propagação é:

$$Q_n = C_1 \cdot I_n + C_2 \cdot I_{n-1} + C_3 \cdot I_{n-2} \dots \quad (I.2)$$

onde

Q_n é a ordenada do hidrograma de saída do trecho, no instante n

I_n, I_{n-1} , etc são as ordenadas do hidrograma na entrada do trecho, nos instantes $n, n-1$, etc.

$C_1, C_2, C_3, \dots$ são os coeficientes de propagação das vazões

A determinação dos coeficientes $C_1, C_2, C_3, \dots$ etc é feita pelas expressões:

$$C_1 = (\Delta t - 2Kx) / (2K(1-x) + \Delta t) \quad (I.3)$$

$$CC = ((2K(1-x) + \Delta t) - 2\Delta t) / (2K(1-x) + \Delta t) \quad (I.4)$$

$$C_2 = C_1 \cdot CC + (\Delta t + 2Kx) / (2K(1-x) + \Delta t) \quad (I.5)$$

$$C_i = C_{i-1} * CC \text{ para } i > 2 \quad (I.6)$$

onde:

Δt = intervalo de tempo de cálculo

K = parâmetro de propagação do Muskingum, em unidades de tempo

x = parâmetro adimensional do Muskingum, variando entre 0 e 0.5.

Para evitar coeficientes negativos, na equação I.2, o parâmetro K deve estar no intervalo

$$\Delta t / [2(1-x)] \leq K \leq \Delta t / [2x] \quad (I.7)$$

Anexo I.2

MÉTODO DA MÉDIA MÓVEL PROGRESSIVA

Este método utiliza a equação I.1 com os coeficientes dados pelas expressões:

$$NCOEF = STAG + (STRAD+1) / 2 \quad (I.8)$$

$$MM = NCOEF - STRAD \quad (I.9)$$

$$C_i = 0 \text{ para } 1 \leq i \leq MM \quad (I.10)$$

$$C_i = 1/STRAD \text{ para } (MM+1) \leq i \leq NCOEF \quad (I.11)$$

onde:

NCOEF é o número de coeficientes da equação I.1.

STRAD é o número de ordenadas do hidrograma de entrada a serem computadas na média (straddled)

STAG é o número de ordenadas de que o valor médio deve ser de fasado (staggered) a partir do centro das ordenadas que foram utilizadas para obter o valor médio.

Anexo I.3.

MÉTODO DE PULS MODIFICADO

Neste método a vazão de saída do trecho é função apenas do armazenamento. As equações utilizadas são:

$$STRI(1) = (V(1)/\Delta t + Q(1))/2 \quad (I.12)$$

$$STRI(2) = (V(2)/\Delta t + Q(2))/2 \quad (I.13)$$

$$STRI(2) = STRI(1) + Q_{af1} - Q(1) \quad (I.14)$$

$$Q(2) = f(STRI(2)) \quad (I.15)$$

onde:

STRI(1), STRI(2) são função do armazenamento e da vazão de saída.

V(1) e V(2) são os volumes armazenados no trecho, no início e fim de intervalo.

Q_{af1} vazão afluente média no intervalo

Q(1), Q(2) vazão de saída no início e fim do intervalo

Anexo I.4

MÉTODO DO "WORKING R e D"

Utiliza uma relação não linear de armazenamento x vazão de saída, como o método de Puls Modificado e permite o

uso do armazenamento em cunha do método de Muskingum. Para a propagação sem consideração do volume armazenado na cunha ($x=0$, no Muskingum) produz resultados idênticos ao do Puls Modificado.

Define um volume de armazenamento de trabalho e uma descarga de trabalho por:

$$VR(2)/\Delta t = VR(1)/\Delta t + Qaf1 - QD(1) \quad (I.16)$$

$$QD(2) = f(VR(2)/\Delta t) \quad (I.17)$$

onde:

$VR(1), VR(2)$ = armazenamentos de trabalho, no início e fim do intervalo.

$Qaf1$ = afluxo médio no intervalo

$QD(1), QD(2)$ = descargas de trabalho, no início e fim do intervalo.

A relação funcional, descrita na equação I.17 é análoga à indicada do armazenamento-vazão de saída do método de Puls Modificado. A vazão de saída do trecho é obtida por:

$$Q(2) = QD(2) - x(1-x) \cdot (I(2) - QD(2)) \quad (I.18)$$

onde:

x = parâmetro adimensional do Muskingum

$Q(2)$ = vazão de saída do trecho, no final do intervalo

$I(2)$ = vazão de entrada do trecho, no final do intervalo

Anexo II

ESTRUTURA DE ENTRADA E SAÍDA DO MODELO HEC-5

Anexo II.1

ORGANIZAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA DO MODELO HEC-5

A estrutura da montagem dos dados necessários ao modelo HEC-5 é relativamente simples. O manual do usuário descreve com maiores detalhes as características dos diversos cartões de dados. Procura-se aqui descrever de uma forma súcinta as diversas categorias de cartões de dados descritas no capítulo 4, não se pretendendo ser específico a nível de manual.

De uma forma geral, pode-se dizer que há duas categorias principais de cartões: os permanentes e os opcionais. Os primeiros são utilizados em todas as simulações e os últimos apenas quando se deseja certas opções de cálculo.

Todos os cartões de dados utilizam as duas primeiras colunas para identificação. Os dados são codificados em campos de 8 colunas, a menos das vazões, que também podem ser codificadas em campos de 6 colunas. Pode-se utilizar unidades métricas ou inglesas.

Os diversos tipos de cartões podem ser classificados na forma:

a) Cartões Título T1, T2, T3

Para cada "job" são necessários três cartões títulos, lidos em formato alfanumérico, contendo informações gerais da simulação, que são impressas na saída do processamento.

b) Cartões de Job - J1 a J8

Estes cartões são utilizados para especificar informações do "job", tais como número de períodos de simulação, intervalo de cálculo, tipos de vazões utilizadas, opção de impressão, taxa de retorno, dados de evaporação, etc. Os cartões - J3 a J8 são opcionais, sendo utilizados somente quando se for utilizar uma das opções por eles oferecidas. O cartão J5 é utilizado para eliminar reservatórios do sistema.

c) Cartões de Acompanhamento (TRACE) do "Job" - TP e TC

Estes cartões são opcionais e são utilizados para indicar os pontos de controle e os intervalos de tempo em que se deseja uma saída detalhada, com os cálculos intermediários.

d) Cartões de Descrição dos Reservatórios - RL, RO, RS, RQ, RA , RE, RD, R\$, R1, R2 e R3

Estes cartões são utilizados para descrever as características de cada reservatório. Os primeiros quatro cartões são indispensáveis e especificam as relações entre níveis - índices e volumes armazenados, que podem ser constantes ou variáveis ao longo do ano (RL), indicam os pontos de controle operados pelos reservatórios (RO) e descrevem a curva de volumes armazenados (RS) versus a capacidade máxima de descarga (RQ).

Os cartões opcionais são utilizados para as áreas dos reservatórios (RA) em função dos volumes armazenados - (RS) ou das cotas do nível d'água (RE); indicam os critérios para as derivações (RD), os custos do reservatório (R\$) em função dos volumes (RS). O cartão R1 descreve os níveis iniciais para as diversas sequências (cheias múltiplas). O cartão R2 indica a taxa de variação máxima das vazões, por período, e o coeficiente que multiplica as taxas de evaporação dadas no cartão J6. O cartão R3 especifica as taxas de evaporação mensal para o reservato

rio, ao invés de utilizar os valores médios dado em J6.

e) Cartões de Geração de Energia P1, PR, PD, PH, PQ, PT, PP, PS, PE e PV

Estes cartões são utilizados apenas nos casos de reservatórios com usinas hidrelétricas. Para essas simulações, apenas os cartões P1 e PR são indispensáveis. Os demais são opcionais.

O cartão P1 descreve as características gerais da geração, como capacidade nominal instalada da usina, fator de sobrecarga, eficiência da geração e indicações se há influência de remanso de jusante, se a potência gerada é função da vazão ou da queda, etc. O cartão PR especifica as demandas de energia mensais. Os cartões PD e PH descrevem as demandas de energia diárias e horárias, respectivamente, se houver. Os cartões PQ e PT descrevem as vazões e cotas correspondentes, na saída do canal de restituição. Os cartões PP, PS e PE descrevem a capacidade de geração de ponta (PP), a eficiência da geração (PE) relacionadas com alguns valores de armazenamentos (PS) ou descargas. Os cartões PV servem para pré- fixar as demandas de energia nos intervalos simulados.

f) Cartões de Descrição dos Pontos de Controle CP, ID, RT, DR, QS, SQ, QD, EL, C\$, CC e QM

Os três primeiros cartões (CP, ID, RT) são indispensáveis para descrever cada ponto de controle do sistema. O cartão CP especifica as vazões máximas e mínimas desejadas no ponto de controle, se as vazões são lidas ou obtidas por correlação, e indica os custos de operação e manutenção e a taxa de desconto correspondente. O cartão ID fornece um nome ao ponto de controle e especifica se foi optado pela impressão de hidrogramas ou não. O cartão RD especifica a ligação do ponto de controle com o de jusante e fixa os parâmetros de propagação. O cartão DR es

especifica os critérios com que são feitas e propagadas as derivações. Os cartões QS e SR descrevem uma curva de vazões (QS) em função do armazenamento no canal (SQ), para ser utilizado nos métodos de propagação não lineares. O cartão QD especifica as vazões de derivações correspondentes às vazões no canal indicadas no cartão QS ou aos períodos especificados no cartão J1. O cartão EL contém as cotas ou lâminas correspondentes às vazões do cartão QS. O cartão C\$ especifica os custos associados ao ponto de controle, das obras de proteção à inundação, como diques, barragens, retificações, etc, correspondentes às vazões de projeto especificadas no cartão QS. O cartão CC permite montar uma relação entre a capacidade do canal e os afluxos. O cartão QM é utilizado para indicar a variação das vazões mínimas desejadas, ao longo do ano.

g) Cartões Referentes ao Cálculo das Perdas por Inundação - DA, DB, DF, DQ e DC

Estes cartões são opcionais, sendo utilizados nas operações de controle de cheias, para calcular as perdas causadas por uma cheia ou uma série de cheias ou para obter o valor da perda média anual em um ponto de controle ou em todo o sistema.

A avaliação é feita para as condições naturais ou atuais da bacia, para a condição de existência de obras propostas e para uma situação de controle total das cheias pelos reservatórios.

As perdas são consideradas como função única das vazões de pico. O programa considera diversos tipos de perdas, onde seus valores crescem com as vazões de pico.

O cartão DA especifica o número de tipos ou categorias consideradas nas perdas e os valores das perdas anuais esperadas para a condição natural ou básica. O cartão DB introduz os valores das perdas para os diversos tipos, para o sistema

existente. O cartão DF mostra as probabilidades acumuladas correspondentes aos valores dos cartões DA e DC. O cartão DA apresenta as vazões e os cartões DC apresentam os valores das perdas associadas. Pode-se ter tantos grupos de cartões DC quanto for o número de tipos de perdas consideradas.

h) Cartão de Indicação de Final de Dados - ED

O cartão ED é um cartão indispensável e indica o final dos dados de controle.

i) Cartão de Início de Dados de Vazão e Evaporação - BF e FC

O cartão BF indica o formato dos cartões de dados de vazão, a data inicial dos dados, e os fatores de ajuste das vazões lidas. O cartão FC é opcional e indica o número de múltiplos (máximo de 9) a serem aplicados nas vazões de pico.

j) Cartões de Especificação dos Dados por Período de Simulação-
IN, QA, NQ, MR, EV e PV

Os cartões IN contêm as vazões locais ou naturais de cada ponto de controle. Os cartões QA especificam as vazões que devem ser liberadas pelos reservatórios em cada período. Os cartões NQ apresentam as vazões nos período correspondentes à condição natural da bacia. Os cartões MR especificam as vazões mínimas desejadas a serem descarregadas nos diversos intervalos de tempo. Os cartões EV indicam a evaporação em cada período de simulação. Os cartões PV contêm as demandas de energia em cada intervalo. Esses cartões são opcionais e podem ser utilizados para determinados pontos de controle.

k) Cartão de Fim de Job-EJ

O cartão EJ serve para separar dois jobs que são processados sequencialmente ou para encerrar um job. Pode ser utilizado também para separar dois conjuntos de car

tões IN-EJ, dentro de um mesmo processamento.

Anexo II.2

OPÇÕES DE SAÍDAS IMPRESSAS DAS SIMULAÇÕES DO MODELO HEC-5

O controle das saídas é feito pelos cartões - J2 e J8. O cartão J2 oferece opções de algumas saídas padronizadas, enquanto o J8 permite que o usuário obtenha como saída, apenas as informações desejadas.

Além da saída normal, descrita adiante, podem ser solicitadas impressões auxiliares, para acompanhamento dos cálculos intermediários.

A seguir estão descritas todas as informações que podem ser obtidas através das impressões padronizadas. Pode-se selecionar apenas algumas delas ou ainda escolher um formato próprio de saída. As saídas podem ser divididas nas seguintes categorias:

a) Impressão dos Dados de Entrada

O programa imprime a imagem-cartão dos dados de controle (cartões T1-EJ) e uma listagem de seus valores com os títulos correspondentes. Os dados de vazões são listados, apenas se for pedido pelo usuário.

b) Vazão Local Incremental e Impressão de Hidrogramas

O programa pode calcular as vazões locais incrementais pela subtração dos valores do hidrograma de jusante dos valores do hidrograma de montante amortecido. Se for pedida a impressão, o programa apresenta os valores das vazões calculadas pela subtração e numa segunda vez, esses valores ajustados para corrigir valores negativos ou nulos e manter constantes os volumes dos hidrogramas. ("Incremental Local Flows Computed").

Para cada ponto de controle, podem ser impressos até quatro hidrogramas correspondentes a: Vazão regularizada (R), vazão não regularizada (N), vazão acumulada local (L) e vazão incremental (I).

c) Saída apresentada segundo a sequência dos pontos de controle

Esta opção de saída imprime os resultados por ponto de controle, para todos os períodos. No início da impressão existe um cabeçalho, informando o número da sequência, as unidades e, no caso de cheias, o fator de multiplicação das vazões de pico.

A seguir, para cada ponto de controle são impressas as informações: RC - Identificação do ponto de controle: é impresso o número e o nome do ponto de controle e a identificação dos pontos que têm ligação com este. Por exemplo, para um reservatório, a impressão poderia ser:

*** LOC 6 RESERVATÓRIO A - SERVED BY 4, -5, 6
SERVING 6, 15, 18

significando que a montante do reservatório 6 há os pontos de controle 4 e 5, sendo que 5 não opera para 6 e que a jusante estão os pontos de controle 15 e 18, operados por 6.

- (R, C)	- CUM LOCAL FLOW - vazão local incremental
- (R, C) ¹	- NATURAL FLOW - vazão natural, sem reservatórios
- R ¹	- POWER REQUIRED - demanda de energia
- R ¹	- POWER GENERATED - energia gerada
- R ¹	- POWER SHORTAGE - diferença entre a demanda e a energia gerada.
- (R, C) ¹	- MIN DESIRED Q - vazão mínima desejada no ponto de controle
- (R, C) ¹	- SHORTAGE- valor do déficit da vazão regularizada em relação à vazão mínima desejada.

- (R, C)¹ - MIN REQUIRED Q - vazão mínima exigida no ponto de controle.
- (R, C)¹ - SHORTAGE - déficit da vazão regularizada, em relação à vazão mínima exigida.
- (R, C)¹ - DIVERSION - soma algébrica das derivações retiradas ou devolvidas ao ponto de controle.
- R - INFLOW - Afluxo ao reservatório. Soma das vazões locais, com as descargas dos reservatórios de montante, subtraindo-se as derivações.
- C¹ - CHANNEL CAPACITY - capacidade do canal, impressa quando for variável.
- C - REGULATED FLOW - vazão simulada no ponto de controle, correspondente à soma das vazões locais com as descargas dos reservatórios de montante e à subtração das derivações.
- R - OUTFLOW - vazão média de saída do reservatório.
- R - CASE=LOC.TYP - critério adotado para a descarga do reservatório. O número à esquerda do ponto indica o ponto de controle de jusante que condicionou a descarga (LOC) e o número à direita do ponto (TYP) indica o intervalo de tempo em que a vazão descarregada violaria a restrição de jusante. Por exemplo, 9.03 indica que a descarga foi feita para garantir as restrições do ponto 9, 3 intervalos adiante do simulado.

R, C - A presença de letras R e C identifica que a saída é impressa para reservatórios e pontos de controle, respectivamente.

1 - A saída será omitida se o dado de entrada for omitido.

As demais informações têm a mesma definição indicada anteriormente e são as seguintes: INFLOW, OUTFLOW, EOP STORAGE, ELEV, CASE=LOC.TYP, LEVEL e EQ.LEVEL.

e) Descargas dos Reservatórios e Vazões Regularizadas nos Pontos de Controle por período.

São apresentadas uma (para pontos de controle simples) ou duas (para reservatórios) tabelas com as informações:

- RES NO/C.P. NO - número de identificação do reservatório ou ponto de controle.
- CHAN CAP - capacidade do canal
- MIN DES Q - vazão mínima desejada no ponto de controle
- MIN REQ Q - vazão mínima exigida no ponto de controle
- OUTFLOW/REGULATED FLOW - vazões descarregadas pelos reservatórios ou regularizadas nos pontos de controle, para todos os períodos de tempo.
- SUM,MAX,MIN,MPER e AVG - somatória, valor máximo, valor mínimo, período de máximo e valor médio das descargas ou vazões regularizadas.

f) Saída projetada pelo usuário

Podem ser projetadas tabelas de saída pelo usuário, onde em cada coluna é impressa uma variável e nas linhas, são indicados seus valores para todos os períodos. Podem ser solicitadas também, tabelas-resumo dos resultados.

g) Tabelas com resumos de resultados da simulação de uma sequência simples (ou cheia única)

Essas tabelas fornecem, para cada ponto de controle, os seguintes resumos:

- MAX REG Q - vazão máxima regularizada;
- MAX NAT - vazão máxima natural ou não regularizada;
- MAX UNC - vazão máxima local não regularizada;
- Q BYRES - diferença entre MAX REG Q e MAX UNC, que mostra a redução remanescente possível no pico das vazões se os reservatórios tivessem volumes de controle de cheias ilimitados;
- NO FLOODS/TOTAL - número de períodos em que a vazão regularizada foi superior à capacidade do canal
- VOL FLOODS/TOTAL - volume das enchentes (excesso de vazão multiplicado pelo tempo);
- NO FLOODS/FROM RES - número de períodos em que as descargas dos reservatórios contribuíram para as enchentes no ponto de controle;
- VOL FLOODS/FROM RES - volume de enchentes causado pelos reservatórios;
- PER FLOODS/FROM RES - primeiro e último períodos em que ocorre enchente causada pelo reservatório;
- CH CAP - capacidade do canal.

Para os reservatórios, são impressas as seguintes informações:

- STOR 1 - volume inicial armazenado;
- MAX STG - armazenamento máximo durante uma cheia;
- MAX LEVEL - nível máximo atingido pelo reservatório;
- 1STPER & LAST PER - primeiro e último períodos, em que o reservatório esteve acima do topo da zona de controle de cheias;
- MAX INFLOW - afluxo máximo;
- MAX REL - descarga máxima do reservatório; e
- CHAN CAP - capacidade do canal, a jusante da barragem.

h) Resumo de valores médios das variáveis de pontos de controle e reservatórios.

Para os pontos de controle com reservatórios, são im

pressos os seguintes valores médios; CUMLOCA-(Vazão Local), NATURAL-(vazão natural), INFLOW, OUTFLOW, CASE-LOC, LEVEL e EOP - STOR.

Para os pontos de controle simples, os valores médios das seguintes variáveis são impressos: CUM LOCA, NATURAL, REGULATE (vazão regularizada), Q SPACE, Q BY US e FLOOD BY.

i) Resumo de simulações com sequências múltiplas

Estas tabelas são um resumo das tabelas apresentadas para cada sequência simulada.

Para cada ponto de controle, são apresentados os valores das vazões máximas regularizadas (MAX REG Q), vazões máximas naturais (MAX NAT Q), vazões máximas locais (MAX LOCAL Q) e descarga dos reservatórios de montante (Q BY RES). Juntamente a esses valores, são indicados os períodos de sua ocorrência.

Para os reservatórios, são enumerados os armazenamentos mínimos e máximos (MIN STG e MAX STG), os níveis mínimos e máximos (MIN LEVEL e MAX LEVEL), vazão descarregada máxima (MAX REL) e o número da sequência e período de ocorrência. São também impressos a capacidade do canal (CHAN CAP), o armazenamento inicial (STOR 1) e os armazenamentos mínimo e máximos do sistema - (MIN SYSTEM STG e MAX SYSTEM STG).

j) Frequência da Cheia e Dados de Danos

Esta saída é uma compilação dos dados de vazão - danos-frequência das cheias simuladas.

São impressas duas tabelas semelhantes para as condições naturais ou básicas e para as condições regularizadas, onde são apresentadas nas colunas: FREQ - frequência da vazão de pico, PEAK - vazão de pico, SUM - somatória dos danos dos diversos tipos e TYPE1, TYPE2, etc., danos associados à frequência

para os diversos tipos. Nas linhas estão associados os valores às diversas frequências calculadas. São apresentados os resumos dos danos para as condições básicas e modificadas.

São impressas também três tabelas com as mesmas variáveis anteriores, apenas que são utilizadas as vazões e frequências dos dados de entrada. Essas tabelas referem-se às condições naturais, regularizadas e com controle total. São impressos os resumos das reduções dos danos possíveis com o sistema proposto e com o controle total, sendo apresentados também os danos residuais, impossíveis de serem eliminados.

k) Gráficos de Distribuição de Probabilidades das Vazões de Cheias

O programa está preparado para imprimir um gráfico com as distribuições de probabilidades das vazões máximas naturais e das vazões máximas calculadas após a implantação das obras no sistema. Neste gráfico está indicada, também, a capacidade do canal e um quadro resumo com os valores das perdas médias anuais esperadas para as duas condições.

l) Quadro-resumo dos danos

O programa imprime um resumo dos danos, para cada ponto de controle do sistema, para as condições naturais ou básicas da bacia, para a condição de regularização e para a condição de controle total das cheias pelos reservatórios.

m) Resumo dos Custos do Sistema

São impressos, para cada ponto de controle, os custos das obras, especificando os custos de capital e os custos de operação e manutenção.

n) Tabela resumo da performance econômica do sistema

Esta tabela imprime os diversos custos e perdas do sistema, e indica o valor do benefício líquido advindo da implantação das obras.

o) Resumo das reduções de cota e vazão

O programa imprime os valores das reduções de vazão e cota da lâmina d'água em função dos custos e volumes das obras.

p) Verificação de possíveis erros

Quando existe alguma violação de restrição no sistema, o programa imprime uma mensagem de aviso, identificando a restrição violada, como por exemplo, a não garantia de vazões mínimas ou inundações provocadas pelos reservatórios, etc.

Para auxiliar a verificação, os pontos de controle, em que houve a violação e dados auxiliares, como período, nível do reservatório a montante, descarga efetuada pelo reservatório, etc, são destacados na saída do programa.

g) Definição dos tipos de operação

Em todas as simulações são impressos no final da listagem, os códigos utilizados na saída para identificar o critério de operação adotado (CASE).

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA CITADA

- ALMEIDA, José Ernani et alii. Aplicação da Programação Dinâmica Estocástica na Determinação de Decisões Ótimas de Operação Para um Sistema Hidro-Termo-Elétrico. III Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 1970, v.II, p 1-15.
- AMBROSINO, G. et alii. Real Time Predictor Versus Synthetic Hydrology for Sequential Reservoir Management. Water Resources Research, 1979, v15, nº 4, p. 885-890.
- ARAUJO, A. R. e TERRY, L. A. Operação de Sistema Hidrotérmico Usando Programação Dinâmica Determinística. Revista Brasileira de Energia Elétrica, JUL/DEZ, 1974, nº 29.
- ARON, G. e SCOTT, Verne H.. Dynamic Programming for Conjunctive Water Use. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, May, 1971, v. 97, p. 705-721.
- ARUNKUMAR, S. e CHON, K. On Optimal Regulation Policies for Certain Multi-Reservoir System. Operations Research, jul/ aug, 1978, v.26, nº 4, p. 551-562.
- ASKEW, Arthur, J, et alii. Use of Monte Carlo Techniques in the Design and Operation of a Multipurpose Reservoir System. Water Resources Research, 1971, v.7, nº 4, p. 819-826.
- ASKEW, Arthur, J. Optimum Reservoir Operating Policies and the Imposition of a Reliability Constraint. Water Resources Research, 1974, v.10, nº 1, p. 51-56.
- ASKEW, Arthur.J. Use of Risk Premiums in Chance-Constrained Dynamic Programming. Water Resources Research, 1975, v.11, nº 6, p. 862-866.
- BARRETO, L.A.L. e GUERREIRO, P. Modelagem Hidrológica para Estudos de Operação a Longo Prazo de Sistemas Hidrelétricos. Revista Brasileira de Energia Elétrica, 1975, nº 30.
- BARRETO, L.A.L. et alii. Prevenção e Controle de Cheias em um Sistema de Reservatórios em Cascata ou em Paralelo. III Simpósio Brasileiro de Hidrologia, Brasília, 1979, v.2.
- BEARD, L.R. Use of Interrelated Records to Simulate Streamflows. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1965, v.91, p.13-22.

- BECKER, L. e YEH, W.W.G. Optimization of Real Time Operation of a Multiple Reservoir System. Water Resources Research , 1974, v.10, nº 6, p. 1107-1112.
- BECKER, L e YEH, W.W.G. Timing and Sizing of Complex Water Resources Systems. Journal of the Hydraulics Division, ASCE , 1974, vol 100.
- BECKER, et alii. Operations Models for Central Valley Project. Journal of the Water Resources, Planning and Management Division, ASCE, Apr. 1976, vol. 102.
- BECKER, L. et alii. Real Time Hourly Reservoir Operation. - Journal of the Water Resources, Planning and Management Division, ASCE, Sep. 1979, v. 105, p. 187-203.
- BEIGHTLER, C.S. e MEIER, W.L. Jr. An Optimization Method for Branching Multi-stage Water Resources Systems. Water Resources Research, 1967, v.3, nº 3, p. 645-652.
- BELLMAN, R. Dynamic Programming - Princeton University Press, 1957.
- BODIN, L.D. e ROEFS, T.G. Multireservoir Operation Studies. Water Resources Research, 1970, v.6, nº 2, p. 410-420.
- BONA ZOUNTAS, M e CAMBOULIVES, J.M. Multi-Decision Analysis for Large-Scale River Basin Reservoir Systems. III World Congress on Water Resources, México, 1979, v.4. p.1584.
- BRAGA Jr, B.P.F. An Evaluation of Streamflow Forecasting Models for Short-Range Multi-Objective Reservoir Operation. Tese de PHD- Stanford University, 1979, 105 p.
- BRITO, S.S. Modelos de Otimização Econômica no Planejamento da Operação do Sistema Furnas. Revista Brasileira de Energia Elétrica, OUT/DEZ, 1972, nº 22, p. 3-15.
- BURAS, N. e HALL, W. The Dynamic Programming Approach to Water Resources Development. Journal of Geophysical Research, 1961 v.66, nº 2, p.510-520.
- BURAS, N. Dynamic Programming in Water Resources Development Advances in Hydrosience, Academic Press, 1966, v.3.
- BUTCHER, W.S. et alii. Optimization of the Operation of a Multi-Purpose Reservoir by Dynamic Programming. Water Resources Research, 1968, v.4, nº 3, p.471-477.

- BUTCHER, W.S. Stochastic Dynamic Programming for Optimum Reservoir Operations. Water Resources Bulletin, 1971, v.7, nº 1, p.115-123.
- CHU, W.S. e YEH, W.W-G. A Non-Linear Programming Algorithm for Real Time Hourly Reservoir Operation. Water Resources Bulletin, 1978, v.14, nº 5, p.1048-1063.
- COHON, J.L. e MARKS, D.H. A Review and Evaluation of Multi-Objective Programming Techniques. Water Resources Research, - 1975, v.11, nº 2, p. 208-220.
- COHON, J.L. e HOUCK, M. H. Sequential Explicitly Stochastic Linear Programming Models: A Proposed Method for Design and Management of Multipurpose Reservoir Systems. Water Resources Research, 1978, v.14, nº 2, p.161-169.
- COLE, J.A. e SCHWEIG, Z. Optimal Control of Linked Reservoirs. Water Resources Research, 1968, v.4. nº 3, p. 479-497.
- COLÔ, A. A Otimização da Operação de Reservatórios em um Sistema Hidrelétrico. Revista Brasileira de Energia Elétrica, abril/junho 1973, nº 24.
- CROLEY II, T.E. Sequential Deterministic Optimization in Reservoir Operation. Journal of the Hydraulics Division, - ASCE, 1974, v.100.
- CROLEY II, T.E. Sequential Stochastic Optimization for Reservoir System. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1974 v.100, p. 201-219.
- CROLEY II, T.E. e RAO, K.N.R. Multiobjective Risks in Reservoir Operation. Water Resources Research, 1979, v.15, nº 4, p. 807-814.
- DELLEUR, J.W. Les Processus du Type "ARIMA" pour la Prévision et la simulation en hydrométéorologie. La Houille Blanche, 1978, nº 6.
- DELLEUR, J.W. et alii. An Evaluation of the Practicality and Complexity of Some Rainfall and Runoff Time Series Models. Water Resources Research, 1976, v.12, nº 5.
- DJORDJEVIC, B. e OPRICOVIC, S. Optimal Long-Term Control of a Multipurpose Reservoir With Indirect Users. Water Resources Research, 1976, v. 2, nº 6 p.1286-1290.

- DUDLEY, N.J. e BURT, O.R. Stochastic Reservoir Management and System Design for Irrigation. Water Resources Research, - 1973, v.9, nº 3, p.507-522.
- EASTMAN, J. e REVELLE, C.S. The Linear Decision Rule In Reservoir Management and Design: 3. Direct Capacity Determination and Intraseason Constraints. Water Resources Research, 1973 v.9, nº 1, p. 29-42.
- EISEL, L.M. Chance Constrained Reservoir Model. Water Resources Research, 1972, v.8 nº 2, p. 339-347.
- ERICKSON, L.E et alii. A Non-Linear Model of a Water Reservoir System With Multiple Uses and its Optimization by Combined Use of Dynamic Programming and Pattern Search Techniques. Water Resources Bulletin, 1969, v.5, nº 3, p.18-36.
- FERRER, P. et alii. Modelo Generalizado de Operacion Simulada de Sistemas Hidráulicos. VII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, 1976, p.253-264.
- FIERING, M.B. Multivariate Techniques for Synthetic Hydrology. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1964, v.90, p. 43 -60.
- FITCH, W.N. et alii. The optimization of the Operations of a Multipurpose Water Resource System. Water Resources Bulletin 1970, v.6, nº4, p. 498-518.
- FRISCHTAK, R.M. Repartição Ótima de um volume de Água Disponível por Reservatórios Interligados. Revista Brasileira de Energia Elétrica, 1973, nº 26.
- FULTS, D.M e HANCOCK, L.F. Optimum Operations Model for Shasta-Trinity System. Journal of the Hydraulics Division, ASCE , 1972, v.98, p. 1497-1514.
- FULTS, D.M. et alii. A Practical Monthly Optimum Operations Model. Journal of the Water Resources, Planning and Management Division, ASCE, 1976, v.102.
- GAL, S. Optimal Management of a Multireservoir Water Supply System. Water Resources Research, 1979, v.15, nº 4, p. 737 -749.
- GUNDELACH, J. e REVELLE, C. Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design: 4. A Rule that Minimizes Output Variance. Water Resources Research, 1975. v.11, nº 2, p.197-203.

- GUNDELACH, J. e REVELLE, C. Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design:5. A General Algorithm. Water Resources Research, 1975, v.11,nº2,p.204-207.
- HALL, W.A. Optimum Design of a Multipurpose Reservoir. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1964, v.90.
- HALL, W.A. et alii. Optimization of the Operation of a Multiple Purpose Reservoir by Dynamic Programming. Water Resources Research, 1968, v.4, p.471-477.
- HARBOE, R.C. et alii. Optimal Policy for Reservoir Operation. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1970, V.96, p. 2297-2308.
- HEIDARI, M. et alii. Discrete Differential Dynamic Programming Approach 1971, v.7, nº 2, p. 273-282.
- HERMANN, R.M. e PERKINS, F.E. Stochastic Linear Models for Multi-Reservoir Systems. Hydrodynamics Laboratory. Dep. of Civil Eng. MIT. Report nº 30,1970, 154 p.
- HERMANN, R.M. Dimensionamento e Operação de Sistemas com Reservatórios Múltiplos. Tese de Livre Docência - Escola Politécnica da USP Dep. Eng. Hidráulica, 1971, 105 p.
- HILLIER, F.S. e LIEBERMAN, G.J. Introduction to Operations Research. Holden-Day, Inc. San Francisco - 3rd Edition, 1980 829 p.
- HOUCK, M.H. e COHON, J.L. Sequential Explicitly Stochastic Linear Programming Models: A Proposed Method for Design and Management of Multipurpose Reservoir Systems. Water Resources Research, 1978, v.14, nº 2, p.16.
- HOWARD, R.A. Dynamic Programming and Markov Process. MIT Press, 1960, p.32-43.
- HEC - Hydrologic Engineering Center. HEC-5C. A Simulation Model for System Formulation and Evaluation. Technical Paper nº 41, 1974.
- HEC - Hydrologic Engineering Center - HEC-5C - Simulation of Flood Control and Conservation Systems- Users Manual, 1976.
- HEC - Hydrologic Engineering Center - Reservoir Systems Analysis for Conservation. Hydrologic Engineering Methods for Water Resources Development, v.9, 1977.

- JACOBY e LOUCKS - Combined Use of Optimization and Simulation Models in River Basin Planning. Water Resources Research, - 1972, v.8, p. 1401-1413.
- JAMIESON, D.G. Operating a Multi-purpose Reservoir System for Water Supply and Flood Alleviation. Water Resources Research 1972, v.8, nº4, p.899-903.
- JAMIESON, D.G. e WILKINSON, J.C. A Short Term Control Strategy for Multi-purpose Reservoir Systems. Water Resources Research 1972, v.8, nº4, p.911-920.
- JAMIESON, D.G. e WILKINSON, J.C. River Dee Research Program: A Short-Term Control Strategy for Multipurpose Reservoir Systems. Water Resources Research, 1972, v.8, nº4, p.911-920.
- JAMIESON, D.G. et alii. Evaluation of Short-Term Operational Policies for a Multipurpose Reservoir System. Journal of Hydrology, 1976, v.28, nº214, p.191-213.
- JOERES, E. et alii. The Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design:1. Development of the Stochastic Model. Water Resources Research, 1969, v.5, nº4, p.767-777.
- JOERES, E. et alii. Operating Rules for Joint Operation of Raw Water Sources. Water Resources Research, 1971, v.7, nº2, p.225-235.
- KERR, J.A. Multireservoir Analysis Techniques in Water Quantity Studies. Water Resources Bulletin, 1972, v.8, nº5, p.871-880.
- KERR, J.A. Modelos Matemáticos no Planejamento de Recursos Hídricos, COPPE-UFRJ-CNPQ, 1977, p.398-430.
- KERR, J.A. Analysis of Complex Reservoir Systems. III World Congress on Water Resources, México, 1979, v.3, p.1461.
- KIRBY, W. e REVELLE, C. Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design: 2. Performance Optimization - Water Resources Research, 1970, v.6, nº4, p. 1033-1044.
- KLEMES, V. Optimization of Multipurpose Systems, 17th Congress of the IAHR, Fed.Rep.of Germany, 1979, v.6, p.438-443.
- KRISHNAMURTHY, K. e GOLE, C.V. Multiobjective Analysis of Reservoir Operation for Optimizing Water Resources Development Benefits. III World Congress on Water Resources, México, 1979, p.2275-2284.

- LECLERC, G. e MARKS, D.H. Determination of the Discharge Policy for Existing Reservoir Networks under Differing Objectives. Water Resources Research, 1973, v.9, n° 5, p.1155-1165.
- LIU, C-S. River Systems Transition Function and Operation Study. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1973, V.99, p. 889-900.
- LIU, C-S e TEDROW, A.C. Multilake River System Operation Rules. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1973, v.99, p.1369-1381.
- LOUCKS, D.P. Computer Models for Reservoir Regulation. Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, 1968, v.94, p. 657-669.
- LOUCKS, D.P. Some Comments on "Linear Decision Rules and Chance Constraints. "Water Resources Research, 1970, v.6, n° 2, p. 668-671.
- LOUCKS, D.P. e FALKSON, L.M. A Comparison of Some Dynamic, Linear and Policy Iteration Methods for Reservoir Operation. Water Resources Bulletin, 1970, v.6, n° 3, p.384-400.
- McMAHON, T.A. e MEIN, R.G. Reservoir Capacity and Yield. Developments in Water Science, Elsevier, New York, 1978, n° 9, 215 p.
- MEREDITH, D.D. Optimal Operation of Multiple Reservoir System. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 1975, v.101.
- MURRAY, D.M. e YAKOWITZ, S.Y. Constrained Differential Dynamic Programming and its Application to Multireservoir Control. Water Resources Research, 1979, v.15, n° 15, p.1017-1027.
- NAYAK, S.C. e ARORA, S.R. Optimal Capacities for a Multireservoir System Using the Linear Decision Rule. Water Resources Research, 1971, v.7, n° 3, p.485-498.
- NOPMONGCOL, P e ASKEW, A.J. Multi-Level Incremental Dynamic Programming. Water Resources Research, 1976. v.12, n°6, p. 1291-1297.
- REVELLE, C.S. et alii. The Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design: 1- Development of the Stochastic Model. Water Resources Research, 1969, v.5, n°4, p.767-777.
- ROEFS, T. e BODIN, L.D. Multireservoir Operation Studies. Water Resources Research, 1970, v.6, n° 2, p. 410-420.

- ROHDE, F.G. e NAPARAXAWONG, K. Modified Standard Operation Rules for Reservoirs. III World Congress on Water Resources, México, 1979, v.4, p.1735.
- ROSSMAN, L.A. Reliability - Constrained Dynamic Programming and Randomized Release-Rules in Reservoir Management. Water Resources Research, 1977, v.13, nº 2, p.247-255.
- RUSSEL, C. B. An Optimal Policy for Operating a Multi-Purpose Reservoir Operations Research, 1972, v.20, nº 6, p.1181-1189
- SOMA - Secretaria de Obras e do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Departamento de Águas e Energia Elétrica. Avaliação Preliminar do Aproveitamento dos Potenciais Hídricos da Bacia do Rio Juquiã Relatório nº 001-1079-R.67, 1979.
- SIGVALDASON, O.T. A Simulation Model for Operating a Multipurpose Multireservoir System. Water Resources Research, 1976, v.12, nº 2, p. 263-278.
- SIGVALDASON, O.T. e BENETT, W.D. Late Winter-Spring Forecasting and Operation of Multipurpose Multireservoir Systems in Canada, III World Congress on Water Resources, México, 1979, v.5, p.2001-2025.
- SILVA, J.B. e HERNANDEZ, V. Operation Strategy for Multipurpose Reservoirs Under Flood Condition. III World Congress on Water Resources, México, 1979, v.IV, p.1890-1901.
- SILVEIRA, L.N.L. e ZAHED, K.F. Aplicação de um Modelo de Operação de Reservatórios a um Caso de Reversão de Bacias. IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Fortaleza, 1981, v.2, p.367-374.
- SOBEL, M.J. Reservoir Management Models. Water Resources Research, 1975, v.11, nº 6, p.767-776.
- STROBEL, O.M. Dimensionamento e Operação de Reservatórios Através de Métodos de Restrições Probabilísticas e Regra de Decisão Linear. Dissertação de Mestrado, EPUSP, 1979, 163 p.
- SU, S.Y e DEININGER, R.A. Modeling the Regulation of Lake Superior Under Uncertainty of Future Water Supplies. Water Resources Research, 1974, v.10, nº1, p.11-25.
- TAKEUCHI, K e MOREAU, D.H. Optimal Control of Multiunit Interbasin Water Resource Systems. Water Resources Research, 1974, v.10, nº3, p.407-414.

- TOEBES, G.H. e RUKVICHAI, C. Reservoir System Operating Policy. Case Study. Journal of Water Resources, Planning and Management Division, ASCE, 1978, v.104
- TROTT, W.J e YEH, W.W.-G. Optimization of Multi-Reservoir Systems. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1973, v.99.
- VENETIS, C. Conditional Probabilities of Failures in Reservoir Operation for the Moran-Gould Model. Water Resources Research, 1969, v.5, nº 2, p.514-518.
- WEISS, G. Shot Noise Models for the Generation of Synthetic Streamflow Data. Water Resources Research, 1977, V.13, nº 1, p.101-108.
- WILKINSON, J.C. A Long-Term Control Strategy for a Multipurpose Reservoir System. Water Resources Research, 1972, v.8, nº 4, p. 904-909.
- YEH, W.G. e BECKER, L. Large Scale Water Resources Management. Apostila do Curso Ministrado em São Paulo, 1982.
- YEH, W.G. et alii. Real-Time Hourly Reservoir Operation- Journal of the Water Resources, Planning and Management Division ASCE, 1979, v.105, p.187-203.
- YOUNG, G.F.Jr. Finding Reservoir Operating Rules. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, v.93, p.297-321.
- ZAHED, K.F. e SILVEIRA, L.N.L. Avaliação Preliminar do Comportamento de um Sistema de Reservatórios para o Abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo. IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Fortaleza, 1981. v.2, p.458-467.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHAM, Computer Use for River Regulation. Journal of Hydraulics Division, ASCE, Feb. 1975.
- ARROW, K.J. et alii. Optimal Inventory Policy. Econometrica, 1950, 19, 250.
- ASKEW, Arthur J. et alii. Optimal Design and Operation of Reservoir Systems. Proceedings IAHS-UNESCO-WMO Symposium - Warsaw, 1971. IAHS Publication nº 101.
- ASKEW, Arthur J. Comments on "Reliability-Constrained Dynamic Programming and Randomized Release Rules in Reservoir Management by L. Rossmann". Water Resources Research, Feb. 1978 vol. 14, nº 1, p.150-160.
- BARRETO, L.A.L. Otimização Implícita Estocástica para Operação de Reservatórios. Tese M. Sc, COPPE, U.F.R.J., Jun. 1974.
- BEARD, L.R. Status of Water Resources Systems Analysis. Seminar at Hydrologic Engineering Center, Davis, Califórnia, 1972.
- BEARD, L. R. Flood Control Operation of Reservoirs. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 1963, v.89, p.1-23.
- BECKER, L. e YEH, W.W.G. Optimization of Real Time Daily Operation of a Multiple Reservoir System. Proceedings 2nd Symposium on Water Resources Systems, 1976, p. 409-423.
- BEIGHTLER, C.S. e MEIER, W.L. Optimization Methods of Branching Multistage Water Resources Systems - A Reply to a Comment by D.P. Loucks. Water Resources Research, 1968, v.4, nº 6, p. 1385-1386.
- BEIGHTLER, C.S. e MEIER, W.L. Optimization Methods of Branching Multi-Stage Water Resources Systems. A Reply to a Comment by E.F. Broter. Water Resources Research, 1969, v.5, nº1, p. 319-320.
- BELLMAN, R. Some Applications of the Theory of Dynamic Programming. Journal of Operations Research Soc. Am., 1954, v. 2, p. 275.
- BELLMORE, M. et alii. Generalized Penalty-Function Concepts in Mathematical Optimization. Operational Research, 1970, v.18, nº 2, p.229-252.

- BERG, P.H. Integrated Operation of Reservoirs. Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE, mar. 1967, vol.93.
- BERLINSKI, D. On Systems Analysis. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1976.
- BHAUMIK, G. et alii. Network Flow Modeling of Multi-reservoir Distribution Systems Technical Report, Univ. of Texas, June 1974, CRWR 107, p.151.
- BLEE, C.E. Multiple-Purpose Reservoir Operation of Tennessee River System. Civil Engineering, 1945, v.15, p.220.
- BOGARDI, I. et alii. Operation Control of the Tisza River System. Int. Conference on Applied Numerical Modelling, Southampton, 1977, paper 2.9, p.155-162.
- BOGLE, M.G.V. e O'SULLIVAN, M.J. Stochastic Optimization of a Water Supply System. Water Resources Research, 1979, v.15, n° 4, p.778-786.
- BOWER, Blair T. et alii. Operating Procedures: Their Role in the Design of Water Resource Systems by Simulation Analysis, 1962, cap. 11, p.443-458.
- BRADFORD, B.H. Real Time Control of a Large Scale Combined Sewer System. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, Aug. 1974.
- BRADFORD, B.H. Optimal Storage Control in a Combined Sewer System. Journal of Water Resources, Planning and Management Division, ASCE, 1977, v.103.
- BRANDSTELTER, A. et alii. A Mathematical Model for Optimum Design and Control of Metropolitan Wastewater Management Systems. Water Resources Bulletin, 1973, v.9, n°6, p.1188-1200.
- BRAS, R.L. e KITAMIDIS, P.K. Real Time Forecasting of River Flows. Cambridge, MA., MIT, Laboratory for Water Resources and Hydrology, Jun. 1978, Rep n° 235.
- BRATER, E.F. A Comment on "Optimization Methods for Branching Multi-stage Water Resources Systems". Water Resources Research 1969, v.5, n°1, p.317-318.
- BREE, D.W.Jr. Studies on Operations Planning and Control in Water Distributions Systems. Final Report, Palo Alto California, Aug. 1975.

- BURAS, N. et alii. Operation of a Reservoir Collecting Water from a Small Watershed. Water Resources Research, 1976, v. 12, nº 5.
- BURT, Oscar R. Comment on "Optimization Methods for Branching Multi-stage Water Resources Systems". Water Resources Research, 1970, v.6, nº 1, p. 345-346.
- BUTCHER, W.S. Discussion of "Finding Reservoir Operating Rules by Young Jr". Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1968, v.94, p.1570.
- BUTCHER, W.S. Discussion on "Stochastic Dynamic Programming for Optimum Reservoir Operation by. W.S. Butcher". Water Resources Bulletin. Jan. 1971, v.7, nº 6, p.1266.
- CARMO, Fº, A.A. Um Modelo de Simulação e Operação de um Sistema de Irrigação com Reservatórios em Rios Intermitentes. Tese M.Sc, COPPE, UFRJ, Dez. 1978.
- CASELTON, W.F. e RUSSEL, S.O. Reservoir Operation With Imperfect Flow Forecasts. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Feb. 1971, vol.97, p.323-331.
- CASELTON, W.F. e RUSSEL, S.O. Long Term Operation of Storage Hydro Project. Journal of the Water Resources, Planning and Management Division, ASCE, Apr. 1976, v. 102.
- C.D. SCHULTZ & Co. Ltd. Summary and Priorities for Implementing Policies and Studies Pertaining to the Water Basins of the Cantareira System. Relatório nº 5161, Jan. 1971.
- CESUR, Centro de Sistemas Urbanos e Regionais da Universidade Técnica de Lisboa. Análise de Sistemas e Gerência de Reservatórios. Coimbra, Portugal, 1979.
- CHOW, V.T. e RIVERA, C.G. Application of Discrete Differencial Dynamic Programming in Water Resources Planning. University of Illinois, Water Resources Center, Hydrosystems Laboratory, Urban, 1974.
- CNEC - Consórcio Nacional de Engenheiros Consultores-Conceituação do Modelo de Simulação do Sistema Juqueri. Relatório - 5027, OUT/1969.
- CNEC - Consórcio Nacional de Engenheiros Consultores-Operação do Sistema Cantareira - Relatório 5088, s/data.

- CNEC - Consórcio Nacional de Engenheiros Consultores - Operação do Sistema Cantareira - Etapa Final - Anexos I a VI. Relatórios 5127 a 5131, s/data.
- COLORNI, A e FRONZA, G. Reservoir Management in a Reliability Programming. Water Resources Research, 1976, v.12, nº 1, p. 85-88.
- CYPSEK, J.J. Computer Search for Economical Operation of a Hydrothermal Electric System. Trans. American Institute of Electrical Engineering, 1954.
- DAVIS, D.R. Comment on "Bayesian Generation of Synthetic Streamflows by G.J. Vicens et alii". Water Resources Research, 1977, v.13, nº 1, p. 853-854.
- DELLEUR, J.W. e TAO, P.C. Seasonal and Nonseasonal ARMA Models in Hydrology. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1976 v.102, p. 1541-1559.
- DEMOYER, R. et alii. Dynamic Computer Simulation and Control Methods for Water Distribution Systems. Final Report. General Electric Company, Feb. 1973.
- DIACON, A. et alii. Daily Optimization of Power Generation in Cascade Hydrosystems. III World Congress on Water Resources México, 1979, v.2, p.705.
- DJORDJEVIC, B e OPRICOVIC, S. Optimal Design and Long-Term Control of Multipurpose Water Resources Systems. 17th Congress of the IAHS, Fed. Rep. of Germany, 1977, v.6, p. 482-486.
- DORFMAN, R. Mathematical Models: The Multi-Structure Approach. Design of Water Resources Systems, A. Maass, Harvard Univ. Press, 1962.
- DRACUP, J.A. et alii. Application of Systems Analysis Techniques to Water Resources. Environmental Dynamics Inc., 1972.
- DREYFUS, S.E. e LAW, A.M. The Art and Theory of Dynamic Programming. New York Academic Press - Mathematics in Science and Engineering Series, 1977, v. 130.
- DURBIN, E.P. et alii. The Out-of-Kilter Algorithm: A Primer Rand Corporation, Santa Monica, California, DEC-1967.
- DVORETZKY, A. et alii. The Inventory Problem. Econometrica, - 1952.

- EISEL, L. M. Comments on "The Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design by Charles Revelle et alii". Water Resources Research, 1970, v.6, nº 4, p. 1239-1241.
- FALLSIDE, F. et alii. The Development of Modelling and Simulation Techniques Applied to a Computer-Based Telecontrol Water Supply System. Modeling and Simulation of Water Resources Systems, Amsterdam, 1975, p. 617-640.
- FENG, C.J. e MARIN, T.L. Optimal Operation of Flood Control Systems. Urbana, Univ. of Illinois. Water Resources Center Report nº 122, vol. II, 1977.
- FIERING, M.B. Reservoir Planning and Operation.. Stochastic - Approaches to Water Resources, H.W.Shem, 1976, v. II p. 17/1 - 17/21.
- FRONZA, G. et alii. Reservoir Operation under Conflicting Objectives. Water Resources Research, 1977, v.13, nº2, p. 296-302.
- FURNAS. Planejamento Ótimo Econômico da Operação do Sistema Hidrotérmico de Furnas D.P.E.O - 79, 1972.
- GABLINGER, M e LOUCKS, D.P. Markov Models for Flow Regulation. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1970, v.96, p.165-181.
- GARCIA, L.E. et alii. Long-Memory Monthly Streamflow Simulation by a Broken Line Model. Water Resources Research, 1972 v.8, p.1100-1105.
- GESSFORD, Jr. e KARLIN, S. Studies in the Mathematical Theory of Inventory and Production. Stanford Univ. Press, 1958, - Chapter 2.
- GRAYMAN, W.M e EAGLESON, P.S. Evaluation of Radar and Rainage Systems for Flood Forecasting. Dep. of Civil Eng. MIT, 1971.
- GUITRON, A. Hydroelectrical Model for Optimal Operation of a Single Multipurpose Reservoir. III World Congress on Water Resources, México, 1979, v.2, p.859.
- HALL, W.A. e SHEPARD, R.W. Optimum Operations for Planning of a Complex Water Resources System. Water Resources Center, - Univ. of California, Technical Report 122, 1967, 75p.
- HALL, W.A. e DRACUP, J.A. Water Resources Systems Engineering. McGraw-Hill, 1970.

- HAMDAN, A.S. e MEREDITH, D.D. Screening Model for Conjunctive Use Water Systems. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1975, v. 101.
- HARBOE, R. Testing Optimal Reservoir Operation Policies Through Simulation With Historical Streamflow Records. 17th Congress of the International Association for Hydraulic Research - IAHR, Fed. Rep. of Germany, 1977, v.6, p. 491-496.
- HELLSTROM, D.I. Dynamic Operating Rule for a Series of Power-Flood Control Reservoirs. S.M. Thesis, MIT, Dep. of Civil Eng.
- HIPEL, K.W. et alii. Stochastic Modelling of the Effects of Reservoir Operation. Journal of Hydrology, 1977, v.32, p.97-113.
- HIPEL, K.W. et alii. Advances in Box-Jenkins Modeling - 1 Model Construction. Water Resources Research, 1977, vol 13, n° 3.
- HUFSCHMIDT, M.M. e FIERING, M.B. Simulation Techniques for Design of Water Resources Systems. Harvard Univ. Press, 1966, 212 p.
- HUGHES, H.C. Flood Control Release Optimization Using Methods from Calculus. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1971, v.97, p.691-704.
- HURST, H.E. Long-Term Storage Capacity of Reservoirs, Transactions, ASCE, 1951.
- JACKSON, B.B. The Use of Streamflow Models in Planning. Water Resources Research, 1975, v.11, p. 54-63.
- JACKSON, R. Reservoir Operation for Recreational Use. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1973, v.99.
- JAMES, L.D. Nonstructural Measures for Flood Control. Water Resources Research, 1965, v.1, p. 9-24.
- JAMES, L.D. Economic Derivation of Reservoir Operating Rules. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1968, v. 94, p. 1217-1230.
- JAMES, L.D. e LEE, R.R. Economics of Water Resources Planning. Mc Graw-Hill Publishing Co.Ltd., 1971.
- KASHYAP, R.L. e RAO, A.R. Real Time Recursive Prediction of River Flows. Automatica, 1973, v.9, n° 2, p. 175-183.

- KEENEY, R.L. e WOOD, E.F. An Illustrative Example of the Use of Multiattribute Utility Theory for Water Resource Planning. Water Resources Research, 1977, v.13, n° 4.
- KISIEL, C.C. Time Series Analysis of Hydrologic Data. Advances in Hydrosience, Academic Press, 1969, v. 5.
- KLEMES, V. Comment on "Conditional Probabilities of Failures in Reservoir Operation for the Moran-Gould Model". Water Resources Research, 1969, v.5, n° 6, p. 1427-1430.
- KLEMES, V. Optimum Runoff Forecast for a Flood Control Reservoir. Symposium on River Mechanics, Bangkok, 1973, v. II, paper B-24, p. 277-289.
- KLEMES, V. Fallacies of Stochastic Optimization of Reservoir Operation Policies. 17 th Congress of the IAHR, Fed.Rep. of Germany, 1977, v. 6.
- KLEMES, V. Discrete Representation of Storage for Stochastic Reservoir Optimization. Water Resources Research, 1977, v. 13, n° 1, p. 149-158.
- KOLEV, N. e NIKOLOVA, N. On the Optimum Management of Multi purpose Reservoir. 15 th Congress of the IAHR, Istambul, - 1973, v.4, paper D-23, p. 189-196.
- LARSON, R.E. e KECKLER, W.G. Applications of Dynamic Programming to the Control of Water Resources Systems. Automatica, 1969, v.5, p. 15-26.
- LASDON, L.S. Optimization Theory for Large Systems, Macmillan, New York, 1970.
- LEIPOLD, T. Calibration of Mathematical Models for Reservoir Operation on Existing Reservoir. Desterr. Wasserwirtschaft , 1977, v. 29, p. 148-153.
- LLOYD, E.H. Stochastic Reservoir Theory. Advances in Hydro science, Academic Press, 1967, v. 4.
- LOUCKS, D.P. Management Models for Water Resource Systems. - Technical Report n° 1, Water Resources Center, Cornell Univ. Ithaca, N.Y., 1967.
- LOUCKS, D.P. A Comment on "Optimization Methods for Branching Multi-stage Water Resource Systems. Water Resources Research 1968, v. 4, n° 2, p. 447-450.

- MAASS, A. et alii, Design of Water Resources Systems. Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass.
- MANDELBROT, B.B. A Fast Fractional Gaussian Noise Generator. Water Resources Research, 1971, v.7, p. 543-553.
- MANNOS, M. An Application of Linear Programming to Efficiency in Operation for a System of Dams. Econometrica, 1955, v.33, nº 3, p.335-336.
- MATALAS, N.C. Mathematical Assessment of Synthetic Hydrology. Water Resources Research, 1967, v.3, p. 937-945.
- MANER, P.A. e THORN, D. Improved Dynamic Programming Procedures and Their Application to Water Resource Systems. Water Resources Research, 1974, v.10, nº 2, p. 183-190.
- MECHIN, Y. e NORMAND, D. Exemples d'Application de la Gestion Optimale des Reservoir à Buts Multiples. La Houille Blanche 1977, nº 213, p. 259-263.
- MEJIA, J.M. et alii. Evaluating Multireservoir Operating Rules. Water Resources Research, 1974, v.10, nº6, p.1090-1098.
- MEYER, Z.J. Optimum Release Strategies for Systems of Flood Protection Reservoirs. Proceedings of 16 th Congress of IAHR; Istambul, 1973, v.4, p.205.
- MILLER, B.L. e WAGNER, H. M. Chance Constrained Programming with Joint Constraints. Operations Research, 1965, v. 13, nº 6, p. 930-945.
- MITCHELL, T.B. Reservoir Yield Using TPM Method. Journal of the Hydraulics Division ASCE, 1977, v. 103.
- MOREAU, D.H. e PYATT, E.E. Weekly and Monthly Flows in Synthetic Hydrology, Water Resources Research, 1970, v.6, p. 53-61.
- NAYAK, S.C. e ARORA, S.R. Linear Decision Rule: A Note on Control Volume Being Constant. Water Resources Research, 1974 v.10, nº4, p. 637-642.
- NOBOA, R.A.C. Generacion Sintetica de Caudales Medias Mensuales para Simulacion de Operacion de Reservorios en Secuencia. IPH-RGS, Dissertação de Mestrado, 1978, Porto Alegre, RS.
- OKUMA, T. et alii. General Control of a Group of Reservoirs by Application of Simulation Technique. Proceedings 13 th. Congress of IAHR, Kyoto, 1969, paper A46, v.1, p. 421-428.

- PAFFORD, R.J. Operation of Missouri River Main Stern Reservoirs. Proceedings ASCE, 1957, paper 1370.
- PAINE, K. et alii. Daily Streamflow Simulation. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1969, v. 95, p. 1163-1180.
- PENTLAND, R.L. e ERYUZLU, N.E. A Dynamic Programming Algorithm for the Operation of the Great Lakes. Engineering Institute of Canada, Region 2. Technical Conference, Saskatoon, Saskatchewan. Canadá, 1969.
- PLATE, E.J. e SCHULTZ, G.A. Flood Control Policies Developed by Simulation. Proceedings 2nd International Symposium of Hydrology, Water Resources Publications, 1973, Fort Collins, Col.
- QUIMPO, R.G. Stochastic Analysis of Daily River Flows. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1968, v.94, p. 43-58.
- RAO, H.S. e BREE, D.W. Jr. Extended Period Simulation of Water Systems. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1977, v. 103.
- REZENDE, B.S. Operação de Reservatórios com Vistas à Geração de Energia Elétrica. Seminário de Hidrologia e Recursos Hídricos, 1977, Rio de Janeiro, p. 374-394.
- REZENDE, B.S. Metodologia de Estudo da Compatibilidade de Utilização Conjunta de um Reservatório para Geração de Energia Elétrica e Amortecimento de Cheias. IPH-RGS. Dissertação de Mestrado, 1978.
- ROEFS, T. Reservoir Management: The State of the Art. IBM - Washington Scientific Center, 1968, Publ. 320-3502, July.
- ROEFS, T. e GUITROW, A.R. Stochastic Reservoir Models: Relative Computational Effort. Water Resources Research, 1975, v. 11, nº6, p. 801-804.
- RUSSELL, S.O. Reservoir Operation With Imperfect Flow Forecasts. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1971, v.97, p.323-331.
- RUSSEL, S.O. Use of Decision Theory in Reservoir Operation. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1974, v.100, p. 809-817.
- RUTTER, E.J. Flood Control Operation of Tennessee Valley Authority Reservoirs. Transactions, ASCE, 1951, v.116, p.671-707.

- SCHULTZ, G.H. e PLATE, E.J. Developing Optimal Operating Rules for Flood Protection Reservoirs. IFAC Symposium on Control of Water Resources Systems. Inst.Fed. of Automat. Contr, - Haifa, Israel, 1973.
- SCHULTZ, G.H. General Report. 17th Congress of the IAHR, Fed. Rep. of Germany, 1977, v.6, p.453-459.
- SCHULTZ, G.H. Theory of Reservoir Operation, 1977, p.221-229.
- SIGVALDASON et alii. Early Experience in Using a Simulation Model for Operating The Trent River System. Proceedings of the 2nd Canadian Hydrotechnical Conference, Burlington, On tario, 1975.
- SIGVALDASON, O.T. et alii, The Trent River System: An Improved Operational Strategy. Proceedings of the 2nd World Congress on Water Resources, New Delhi, India, 1975.
- SNIEDOVICH, M. DAVIS, D.R. Comments on "Chance Constrained Dynamic Programming and Optimization of Water Resource Systems by A. Askew". Water Resources Research, 1975, v.11, n^o 6, p. 1037-1038.
- SOBEL, M.J. Chebyshev Optimal Waste Discharges. Operational Research, 1971, v.19, n^o 2, p. 308-322.
- STEINETZ, C. et alii. Honey Hill: A Systems Analysis for Planning the Multiple Use of Controlled Water Areas. Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, 1971. Report 71-9.
- SU, S.Y. Optimal Operating Policies for Multipurpose, Multi-reservoir Systems. Ph.D. Dissertation, Univ. of Michigan . Ann Arbor, 1971.
- SU, S.Y. Discussion on "Stochastic Dynamic Programming for Optimal Reservoir Operation - W.S. Butcher". Water Resources Bulletin, 1971, v.7, n^o 3, p.607-608.
- SZOLLOSI-NAGY, A. e WOOD, E.F. An Adaptive Algorithm for Analyzing Short-Term Structural and Parameter Changes in Hydrologic Prediction Models. Water Resources Research, 1978, v. 14, n^o 4.
- TART, J.S. Value of Telemetering and Recording. Journal of the American Water Works Association, 1973, Feb, p. 123-127.

- TENNESSEE VALLEY AUTHORITY. Development of a Comprehensive Tennessee Valley Authority Water Reservoir Management Program: Project Status. International Institute for Applied Systems Analysis Conference, Austria, 1974.
- TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD. Systems Simulation for Management of a Total Water Resources, State of Texas, Austin , 1970, May, Rep. 118.
- THOMAS, H.A. e WATERMEYER, P. Mathematical Models: A Stochastic Sequential Approach. Design of Water Resources Systems, A. Maass, ed., Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass., 1962.
- VALDES, B. e ITURBE; I.R. Bayesian Generation of Synthetic - Streamflow 2. Multivariate Case. Water Resources Research, 1977, v. 13, n° 2, p.291-295.
- VEMURI, V. Multiple Objective Optimization in Water Resource Systems. Water Resources Research, 1974, v.10, n° 1, p.44.
- VERHARGHE, R. On the Determination of Stochastic Reservoir Strategies Incorporating Short and Long Term Information in Real Time. Ph.D. Thesis, MIT. Dep. of Civil Eng., Cambridge , 1977.
- WEST, M.J.H. Flood Control in Reservoirs and Storage Pounds - a Discussion-Journal of Hydrology, 1974, v.23, n° 1/2, p. 67.
- WHITTLE, P. Optimization under Constraints. John Wiley, New York, 1971.
- WINDSOR, J.S. A Programming Model for Design of Multireservoir Flood Control Systems. Water Resources Research, 1975, v.11, n° 1-
- YEH, W. W-G. e TROTT, W.J. Optimization of Water Resources Development: Optimization of Capacity Specification for Components of Regional, Complex, Integrated Multi-Purpose Water Resource Systems. UCLA - Eng. Report - 7245, 1972.
- YEH, W.W-G et alii. Optimization of Real-Time Daily Operation of a Multiple Reservoir System. UCLA Eng. Report 7628, 1976.
- YEH. W. W-G. A Real-Time Optimization Model for Reservoir Operation. Proceedings International Conference on Water Resources Engineering, Asian Institut of Technology, 1978, V. 11, p. 1227.

- YOUNG, G.K. e PISANO, W.C. Operational Hydrology Using Residuals. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1968. v. 94, p. 909-923.
- YOUNG, G.K. e WHITEHEAD, P. G. A Recursive Approach to Time Series Analysis for Multivariable Systems. G.C. Vanstrenkiste Ed., Amsterdam, 1975.
- YOUNG., G.K. e JETTMAR, R.O. Modeling Monthly Hydrologic Persistence. Water Resources Research, 1976, v.12, n° 5.