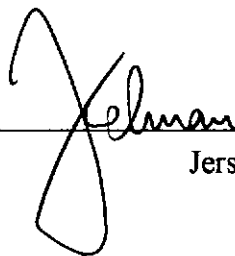


**MODELO DE PROGRAMAÇÃO DA OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS
PARA O CONTROLE DE CHEIAS COM A UTILIZAÇÃO
DAS CONDIÇÕES DE CONTROLABILIDADE**

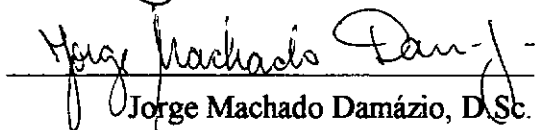
Vinicius Forain Rocha

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
CIVIL.

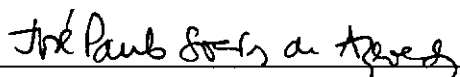
Aprovada por:



Jerson Kelman, Ph.D.
(Presidente)



Jorge Machado Damázio, D.Sc.



José Paulo Soares de Azevedo, Ph.D.



Paulo Roberto de Holanda Sales, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 1993

ROCHA, VINICIUS FORAIN

**Modelo de Programação da Operação
de Reservatórios para o Controle de
Cheias com a Utilização das Condições
de Controlabilidade (Rio de Janeiro)
1993**

**XI, 82 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
M.Sc., Engenharia Civil, 1993)**

**Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE**

**1. Modelo de Operação de Controle de
Cheias**

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

A Rosane

Aos meus pais José Paulo e Leda

Agradecimentos

Ao prof. Jerson Kelman, pela sugestão do tema e orientação desta tese.

A Jorge Machado Damázio, pelo apoio e dedicado acompanhamento ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores da COPPE/UFRJ pelos conhecimentos transmitidos.

A Alcides Lyra Lopes, pela revisão deste trabalho e pelo apoio prestado durante todo o curso de mestrado.

A ELETROBRÁS , nas pessoas de Celso Ferreira e Luiz Augusto Lattari Barreto, chefes do Departamento de Planejamento e Análise da Operação Energética, que possibilitaram o desenvolvimento do mestrado como parte de minhas funções.

Aos colegas do DOE/ELETROBRÁS, pela solidariedade, estímulo e valiosas contribuições.

A Hélvia Carvalho Pessanha , Mauro Carvalho de Barros e Osvaldo José da Silva Júnior pela eficiente colaboração na edição deste trabalho.

Finalmente, aos amigos e à família, pelo constante incentivo.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

**MODELO DE PROGRAMAÇÃO DA OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS
PARA O CONTROLE DE CHEIAS COM A UTILIZAÇÃO
DAS CONDIÇÕES DE CONTROLABILIDADE**

Vinicius Forain Rocha

ABRIL, 1993

Orientador: Prof. Jerson Kelman

Programa: Engenharia Civil

As condições de controlabilidade podem ser utilizadas na operação de sistemas de reservatórios, com um ou mais locais sujeitos a restrições de vazões máximas e mínimas, para determinar os volumes vazios necessários e suficientes para o controle de cheias.

No entanto, a determinação exata destes valores só é possível quando se tem o conhecimento de toda a sequência futura de afluições aos reservatórios, o que é impraticável num caso real. Desta forma, para a utilização das condições de controlabilidade na operação de controle de cheias, tornou-se necessária a adoção de uma abordagem estocástica para estas condições.

O modelo de programação da operação de reservatórios para o controle de cheias apresentado neste trabalho foi desenvolvido a partir desta abordagem, com a utilização do conceito de envoltória, no qual os espaços vazios necessários num sistema de reservatórios são associados a tempos de retorno (inverso dos riscos de inundação). Através de um conjunto de envoltórias, procura-se orientar a programação da operação para o controle de cheias. Definido um tempo de retorno meta para a proteção contra inundações dos locais com restrições de vazões máximas, o modelo procura programar uma operação que atenda aos espaços vazios dados pela envoltória definida para este tempo de retorno. Caso isto seja inviável, o modelo busca então satisfazer aos espaços vazios associados ao

maior tempo de retorno possível, de forma que o incremento no risco de inundação, em relação ao risco associado ao tempo de retorno meta, seja minimizado. O modelo proposto é descrito neste trabalho em três versões: PARALELO, JUSANTE e RISCO.

Finalmente foi feita uma aplicação deste modelo num sistema de dez reservatórios localizados na bacia do rio Paraná, na qual os três conjuntos de regras de operação de controle de cheias foram testados. Como atualmente este sistema já dispõe de regras operativas para o controle de cheias, durante as simulações realizadas foram também consideradas estas regras. Os resultados indicaram que o modelo proposto, sob a versão PARALELO alcançou o melhor desempenho dentre todas as regras testadas.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

**FLOOD CONTROL RESERVOIRS OPERATION SCHEDULING MODEL
USING CONTROLLABILITY CONDITIONS**

Vinicius Forain Rocha

APRIL, 1993

Thesis Supervisor: Jerson Kelman

Department: Civil Engineering

Controllability conditions can be used in the operation of reservoir systems with one or more river sections under maximum and minimum flow constraints, to determine the necessary and sufficient flood control reservoir empty volumes.

However, the strict determination of these values requires the knowledge of the complete sequence of future inflows to the reservoirs, what is impossible in a real case. Therefore, it is necessary to adopt a stochastic approach to make use of controllability conditions in the flood control operation problem.

In this work, a stochastic approach and the concept of enveloped curves were used in a scheduling model for flood control operation. The resulting empty spaces to be maintained in reservoir operation are related to return periods, which represent the inverse of flood risks. After the definition of a goal return period to the flood control operation, the proposed model searches a scheduling in which the resulting empty volumes satisfy the volume constraints given by the enveloped curve associated to the goal return period. If this operation is unfeasible, due to the violation of flow constraints, the model will determine the empty volumes which satisfy the highest possible return period, minimizing the flood risk increment. The proposed model is presented in three versions: PARALLEL, DOWNSTREAM and RISK.

The model was applied to a ten reservoirs system in the Paraná River basin. The flood control operation rules provided by the three versions of the proposed model were tested. This analysis also considered the flood control rules currently used in the operation of this reservoir system. The best performance was achieved using the PARALLEL version of the proposed model.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - CONDIÇÕES DE CONTROLABILIDADE	7
II.1 - Descrição Geral	7
II.2 - Condições de Controlabilidade para um Sistema de um Reservatório com um Ponto de Controle de Cheias e sem Restrições de Vazões Mínimas	8
II.3 - Condições de Controlabilidade para um Sistema Multireservatório com um Ponto de Controle de Cheias e sem Restrições de Vazões Mínimas	9
II.4 - Condições de Controlabilidade para um Sistema Multireservatório com Múltiplos Pontos de Controle de Cheias e sem Restrições de Vazões Mínimas	11
II.5 - Condições de Controlabilidade para um Sistema Multireservatório com Múltiplos Pontos de Controle de Cheias e com Restrições de Vazões Mínimas	12
II.6 - Consideração do Tempo de Viagem da Água nas Condições de Controlabilidade	14

CAPÍTULO III - MODELO DE PROGRAMAÇÃO DA OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS PARA O CONTROLE DE CHEIAS COM A UTILIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTROLABILIDADE	17
III.1 - Introdução	17
III.2 - Concepção	17
III.3 - Descrição	30
III.3.1 - Equação de Balanço de Massa	30
III.3.2 - Restrições Operativas	31
III.3.3 - Critérios Operativos	34
III.3.4 - Dados Básicos	40
CAPÍTULO IV - ESTUDO DE CASO - SISTEMA DE RESERVATÓRIOS DA BACIA DO RIO PARANÁ ATÉ JUPLÁ	46
IV.1 - Introdução	46
IV.2 - Descrição das Regras Atuais de Operação de Controle de Cheias	49
IV.3 - Simulações da Operação de Controle de Cheias	53
IV.3.1 - Resultados das Simulações da Operação com as Regras Atuais	60

IV.3.2 - Resultados das Simulações da Operação com o Modelo Proposto	63
IV.4 - Análise dos Resultados	73
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	78
BIBLIOGRAFIA	81

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Historicamente, a maioria dos grandes reservatórios d'água existentes nos rios brasileiros foram construídos pelo Setor Elétrico, para a finalidade principal e quase sempre exclusiva de geração de energia elétrica.

Nestas duas últimas décadas, apesar dos reservatórios continuarem a pertencer em sua maioria a empresas do Setor Elétrico, o desenvolvimento de outros setores usuários dos recursos hídricos fez com que houvesse uma reavaliação nos padrões de operação, sendo inseridos outros usos, como por exemplo, o controle de cheias, a navegação fluvial e a irrigação. A consideração destes usos no planejamento da operação dos reservatórios representa um direcionamento no sentido do uso múltiplo das águas.

A ocorrência em 1977 de uma grande cheia no rio Pardo, um dos principais tributários da bacia do rio Grande, localizado no estado de São Paulo, causou o rompimento das barragens das usinas hidrelétricas de Euclides da Cunha e Limoeiro. Este fato destacou a importância de se aprofundar os estudos de controle de cheias no planejamento da operação dos reservatórios do Setor Elétrico, pois o mesmo além de proporcionar uma proteção da região a jusante contra inundações também propicia uma segurança maior para as barragens.

Quase sempre os interesses dos usuários de um empreendimento de recursos hídricos apresentam pontos de conflito. Por exemplo, no caso do uso simultâneo de reservatórios para o controle de cheias e para a geração de energia elétrica, tem-se, no Setor Elétrico, o interesse em só deplecionar os reservatórios se for para produzir energia elétrica. Sempre que possível, a água em excesso deve ser armazenada para utilização em estiagens futuras e para maximização da queda. Porém, quando se trata de controle de cheias, o interesse é impor um limite superior para o volume armazenado no reservatório. A manutenção de um volume vazio visa o amortecimento de ondas de cheias, o que, conseqüentemente, protege contra inundações, populações e benfeitorias localizadas a jusante do reservatório. Por isso é preciso que existam critérios operativos que permitam resolver tais conflitos (Kelman [1]).

O Setor Elétrico brasileiro adota, como solução para este conflito, a fixação de volumes de espera em seus reservatórios que garantam a proteção a jusante para cheias com riscos de ocorrência iguais ou inferiores a um determinado risco meta. O critério para a definição deste risco meta baseia-se numa avaliação dos riscos energéticos associados à adoção dos volumes de espera. A partir de um elenco de alternativas de valores dos volumes de espera para vários riscos, escolhe-se aquele cujo incremento nos riscos de não atendimento aos interesses energéticos seja aceito pelo Setor.

Anualmente são realizados estudos no âmbito do Grupo Coordenador para a Operação Interligada - GCOI, sob a coordenação da ELETROBRÁS, para a determinação de volumes de espera para os reservatórios pertencentes às bacias hidrográficas onde estão localizados aproveitamentos hidrelétricos de mais de uma empresa. Estes estudos englobam a bacia do rio Paraná, incluindo os rios Grande, Paranaíba e Tietê; a bacia do rio Paraíba do Sul; a bacia do rio Iguaçu e a bacia do rio São Francisco (SCEN-GTHO [2]).

A primeira tarefa destes estudos é a escolha das seções fluviais a serem consideradas como pontos de controle. Exemplos destes são pontes, portos fluviais e seções imediatamente a montante de cidades ribeirinhas. A cada ponto de controle define-se um nível d'água, cuja ultrapassagem deseja-se evitar. Este nível é então associado à vazão através de uma curva COTA X DESCARGA. Os volumes de espera alocados em reservatórios para o controle de cheias devem ser suficientes para armazenar o volume d'água proveniente da diferença entre as vazões afluentes e a vazão associada à cota de inundação em cada seção considerada (restrição de vazão máxima).

Os estudos para determinação de volumes de espera para o controle de cheias, realizados pelo Setor Elétrico brasileiro, contemplam um grande número de restrições de vazões máximas nas seções dos rios. A tabela I.1 mostra a complexidade do problema, onde só na bacia do rio Paraná, até o reservatório de Jupia (rios Grande, Paranaíba, Tietê e Paraná), são consideradas 15 seções com restrição de vazão máxima.

Tabela I.1 - Restrições de Vazões Máximas a Jusante de Reservatórios do
Setor Elétrico
Fonte: SCEN-GTHO [3]

RIO	LOCAL DA RESTRIÇÃO	USINA A MONTANTE	VAZÃO (m ³ /s)
Grande	cidade	Camargos/Itutinga	1100
	balsas	Furnas	4000
	usina	Mascarenhas de Moraes	4400
	áreas urbanas	Jaguara	4500
	áreas ribeirinhas	Volta Grande	5000
	ponte rodoviária	Porto Colômbia	7000
	usina	Marimbondo	8000
Paranaíba	acesso a usina	Emborcação	5000
	cidade	Itumbiara	7000
	ponte rodoviária	São Simão	16000
Tietê	idades	Pirapora	480
	rodovia	Rasgão	600
	áreas ribeirinhas	Porto Góis	700
	idades	Barra Bonita	1800
Paraná	áreas ribeirinhas	Jupia	16000
Paranapanema	outra usina	Jurumirim	800
	pontes e usina	Xavantes	1800
Iguaçu	usina	Salto Santiago	19000
	outra usina	Salto Osório	17000
Jacui	usina	Ernestina	750
	usina	Jacuí	2400
Paraíba do Sul	cidade	Santa Branca	180
	cidade	Funil	800
	cidade	Santa Cecília	1100
	cidade	Santana	15
São Francisco	idades	Três Marias	4000
	idades	Sobradinho	8000
	áreas urbanas	Itaparica	8000
	áreas urbanas	Moxotó - Paulo Afonso IV	8000

A metodologia para o cálculo dos volumes de espera atualmente adotada pelo Setor Elétrico, através do GCOI, utiliza estudos de frequências de volumes afluentes máximos anuais para a determinação dos volumes vazios necessários a montante de cada ponto de controle isoladamente. A partir de alguns critérios baseados nas características dos reservatórios e nas áreas de drenagem chega-se a uma distribuição final dos volumes de espera para os reservatórios existentes na bacia.

A última tarefa consiste na determinação de regras operacionais, onde são definidas as prioridades e procedimentos para o enchimento dos volumes de espera, durante a ocorrência das cheias, e de esvaziamento, após a passagem destas. Estas regras são determinadas tendo como base a distribuição adotada de volumes de espera, as restrições operativas e a experiência do GCOI.

Os problemas de sistemas multireservatórios para controle de cheias foram analisados teoricamente pela primeira vez em Marien [4], que utilizando a teoria de grafos derivou as chamadas condições de controlabilidade para a análise determinística de sistemas com um único ponto de controle. Damázio [5] estendeu estes resultados de forma a considerar também sistemas com múltiplos pontos de controle, além de agregar às condições de controlabilidade a noção de envoltórias, permitindo um tratamento estocástico do problema.

Este trabalho tem como objetivo a elaboração formal de um modelo de operação, a partir desta abordagem estocástica das condições de controlabilidade. O seu principal produto será a definição de critérios para as regras operativas para o controle de cheias de um sistema multireservatório com múltiplos pontos de controle, onde as condições de controlabilidade são efetivamente consideradas. Na concepção deste modelo considerou-se que os sistemas de reservatórios são de uso conservativo a fim de possibilitar seu uso em sistemas de reservatórios do Setor Elétrico.

No capítulo II é apresentada uma introdução à teoria das condições de controlabilidade, onde poderá se observar sucintamente como se originou a sua formulação atual. Ainda neste capítulo constam uma revisão das formulações específicas para sistemas de reservatórios, com ou sem restrições de vazões mínimas e com um ou mais pontos de controle, e uma adaptação destas para o caso de defasamento temporal da água entre reservatórios.

No capítulo III, a partir da abordagem estocástica das condições de controlabilidade apresentada por Damázio [5], é estabelecido o objetivo da minimização do risco de rompimento das restrições de vazões máximas (risco de inundação) no sistema para o desenvolvimento de regras operativas de controle de cheias do modelo de operação ora proposto. Em seguida são descritos a formulação adotada para o balanço de massa dos reservatórios e o conjunto de restrições operativas considerado por este modelo, no qual estão presentes restrições importantes para a programação da operação, tais como as taxas máximas de variação das vazões. Tendo como base a equação de balanço de massa, as restrições operativas e o objetivo geral de minimização do risco de inundação no sistema, elaboram-se três algoritmos de operação com diferentes critérios operacionais de utilização dos volumes de espera do sistema. No final deste capítulo apresenta-se quais são os dados básicos necessários à execução do modelo.

O capítulo IV apresenta uma aplicação do modelo desenvolvido no capítulo III a um sistema de reservatórios de usinas hidrelétricas. O sistema escolhido foi o da bacia do rio Paraná, até o reservatório de Jupia. A figura I.1 mostra a localização dos reservatórios neste trecho da bacia. Este é considerado um sistema complexo para a execução de uma operação de controle de cheias, pois existe uma grande quantidade de restrições a serem atendidas em vários pontos de controle distribuídos pela bacia.

A fim de permitir uma comparação entre os três conjuntos de regras operativas do modelo proposto e as regras atualmente adotadas nesta bacia, consta no capítulo IV uma descrição sucinta destas últimas. Em seguida são apresentados os resultados de simulações com séries de afluências sintéticas realizadas com os quatro conjuntos de regras e uma avaliação do desempenho destas em relação ao desempenho planejado em termos de recorrência das inundações.

CAPÍTULO II

CONDIÇÕES DE CONTROLABILIDADE

II.1 - Descrição Geral

Seja um conjunto de n reservatórios $R_1, R_2, \dots, R_n$, cujas capacidades são $K_1, K_2, \dots, K_n$. Quando existir entre estes um reservatório R_x situado mais a jusante, de forma que toda água que afluí ao conjunto necessariamente tem que transitar por R_x para sair do conjunto, tem-se um sistema de reservatórios. Imediatamente a jusante de cada reservatório sempre existe um ponto de controle P_i , que pode estar sujeito tanto a uma restrição de vazão máxima, o que fará dele um ponto de controle de cheias, quanto a uma restrição de vazão mínima; e nenhum deles poderá ser considerado sem que exista um reservatório situado imediatamente a montante. Portanto, em casos reais onde esta última condição não é satisfeita, há a necessidade de se criar reservatórios fictícios. Por convenção adota-se uma ordem crescente para os reservatórios de jusante para montante, desta forma o reservatório mais a jusante do sistema é sempre o reservatório R_1 .

Em cada reservatório R_i define-se para um período t , entre os instantes $t-1$ e t , os seguintes parâmetros:

- $e_i(t)$ espaço vazio no instante t ;
- $r_i(t)$ vazão defluente no período t ;
- $q_i(t)$ vazão afluente incremental no período t ;
- $M_i(t)$ restrição de vazão máxima em P_i no período t ;
- $m_i(t)$ restrição de vazão mínima em P_i no período t .

Para cada par de reservatórios formado por R_i e R_j , existe um elemento c_{ij} de uma matriz de configuração C , cujos valores possíveis são 1, caso R_j esteja imediatamente a montante de R_i , e 0 em caso contrário.

Considerando-se a operação deste sistema de reservatórios durante a ocorrência de uma cheia entre os períodos t_0 e T , a existência de uma operação sem inundações é equivalente à existência de uma solução viável para:

$$e_i(t) = e_i(t-1) - \left(q_i(t) + \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot r_j(t) - r_i(t) \right) \cdot \Delta t \quad \begin{matrix} \text{para } t=t_0, \dots, T \text{ e} \\ i=1, \dots, n \end{matrix} \quad (\text{II.1})$$

$$0 \leq e_i(t) \leq K_i \quad \begin{matrix} \text{para } t=t_0, \dots, T \text{ e} \\ i=1, \dots, n \end{matrix} \quad (\text{II.2})$$

$$m_i(t) \leq r_i(t) \leq M_i(t) \quad \begin{matrix} \text{para } t=t_0, \dots, T \text{ e} \\ i=1, \dots, n \end{matrix} \quad (\text{II.3})$$

$$e_i(t_0-1) = E_i(t_0-1) \quad \text{para } i=1, \dots, n \quad (\text{II.4})$$

onde

Δt é o intervalo de tempo do período t

$E_i(t_0-1)$ é o espaço vazio alocado no instante de início da cheia

Por definição, as condições de controlabilidade são condições a que as capacidades dos reservatórios de um sistema e os espaços vazios neles alocados no instante de início da cheia devem atender e que se atendidos, dados $M_i(t)$, $m_i(t)$, $q_i(t) \forall t$ e $\forall i$, o conjunto de restrições (II.1), (II.2), (II.3) e (II.4) tem pelo menos uma solução viável (Damázio [5]).

Note que na equação (II.1) despreza-se os tempos de viagem da água entre os reservatórios e a atenuação do escoamento nos canais. Nos 4 itens seguintes, nos quais são apresentadas as condições de controlabilidade derivadas em Marien [4] e Damázio [5], adota-se esta simplificação. No item II.6, contudo, será mostrado como as condições até então apresentadas podem ser adaptadas para que os tempos de viagem possam ser considerados.

II.2 - Condições de Controlabilidade para um Sistema de um Reservatório com um Ponto de Controle de Cheias e sem Restrições de Vazões Mínimas.

Kelman [6] apresenta um método recursivo para o cálculo do volume vazio mínimo necessário num reservatório no início de cada período t para que sua vazão defluente seja mantida igual a $M_i(t)$, desde t até T , que pode ser expresso da seguinte forma:

$$V_i(t-1) = \max [0, V_i(t)] + (q_i(t) - M_i(t)) \cdot \Delta t \quad (\text{II.5})$$

Partindo-se de $V_i(T)=0$, através de uma solução recursiva da equação para $t=T, T-1, \dots, t_0$ pode-se obter toda a sequência de volumes necessários. As condições de controlabilidade para sistemas de um único reservatório podem ser então escritas por (a prova da necessidade é imediata através da definição de volumes vazios necessários, para a prova da suficiência, ver Damázio[5]):

$$E_i(t) \geq V_i(t) \quad \text{para } t=t_0, \dots, T \quad (\text{II.6})$$

e

$$K_i \geq \max_{t=t_0, \dots, T} [V_i(t)] \quad (\text{II.7})$$

Note que para a análise da operação de reservatórios, onde a capacidade do reservatório já é definida, tem maior interesse as condições de controlabilidade expressas em (II.6).

II.3 - Condições de Controlabilidade para um Sistema Multireservatório com um Ponto de Controle de Cheias e sem Restrições de Vazões Mínimas

Para a derivação destas condições é necessária a noção de sistemas parciais (Marien [4]). Seja I_n o conjunto de números inteiros ordenados de 1 a n, qualquer subconjunto $u \in I_n$ forma um sistema parcial de reservatórios do ponto de controle P_x , se e somente o inteiro $x \in u$ e o conjunto de R_i , $i \in u$, forma um só sistema de reservatórios, sendo R_x o seu único exutório. Denomina-se U_x o conjunto de sistemas parciais do ponto de controle P_x . Na figura II.1 é apresentado um exemplo de sistema de reservatórios onde pode-se observar que o conjunto U_1 é formado pelos sistemas parciais $\{1\}$, $\{1,2\}$, $\{1,3\}$ e $\{1,2,3\}$, todos situados imediatamente a montante do ponto de controle P_1 . Os outros pontos de controle, P_2 e P_3 , definem cada um apenas um único sistema parcial, respectivamente, $\{2\}$ e $\{3\}$. Note que $\{2,3\}$ não pode ser considerado um sistema parcial, pois não existe apenas um único exutório.

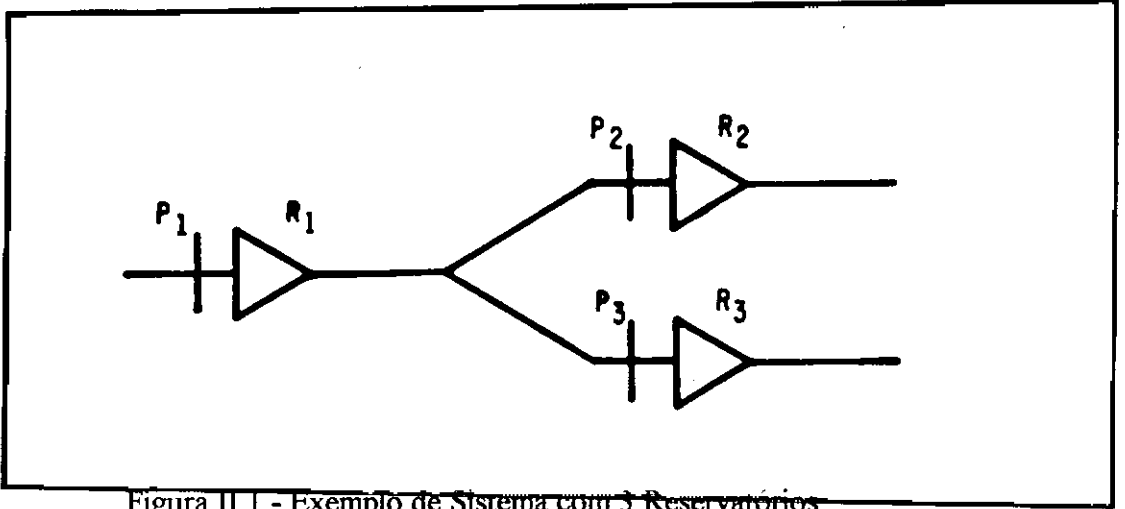


Figura II.1 - Exemplo de Sistema com 3 Reservatórios

Qualquer sistema parcial u pode ser representado por um sistema fictício de um único reservatório equivalente R_u de capacidade

$$K_u = \sum_{i \in u} K_i$$

com localização imediatamente a montante do ponto de controle de cheias de u , P_x . Durante a ocorrência da cheia considerada, este reservatório é submetido a sequência de afluições dadas por:

$$q_u(t) = \sum_{i \in u} q_i(t) \quad \text{para } t = t_0, \dots, T$$

Evidentemente, para que o sistema real seja controlável é necessário garantir a controlabilidade deste reservatório equivalente, cujas condições de controlabilidade (II.6) e (II.7) são dadas por:

$$E_u(t) = \sum_{i \in u} E_i(t) \geq V_u(t) \quad \text{para } t = t_0, \dots, T \quad (\text{II.8})$$

e

$$K_u \geq \max_{t=t_0, \dots, T} [V_u(t)] \quad (\text{II.9})$$

onde os valores de $V_u(t)$ são calculados pela recursão

$$V_u(t-1) = \max [0, V_u(t)] + (q_u(t) - M_1(t)) \cdot \Delta t \quad (\text{II.10})$$

aplicada de $t=T$ a $t=t_0$, partindo-se de $V_u(T)=0$ e onde $M_1(t)$ é a restrição de vazão máxima no ponto de controle de cheias de u , P_1 .

A união destas condições para todos os sistemas parciais $u \in U_1$ fornece claramente as condições necessárias para a controlabilidade do sistema como um todo. Através da teoria dos grafos (Szwarcfiter [7]), Damázio[5] prova que esta união também é suficiente.

II.4 - Condições de Controlabilidade para um Sistema Multireservatório com Múltiplos Pontos de Controle de Cheias e sem Restrições de Vazões Mínimas

Uma simples extensão das condições expressas no item anterior para sistemas com múltiplos pontos de controle, seria considerar, ao invés das condições descritas apenas para $u \in U_1$, as condições para $u \in U$, onde U é a união de todos os conjuntos U_x formados por sistemas parciais dos pontos de controle de cheias P_x do sistema.

Entretanto, Damázio [5] mostra que as condições resultantes desta união são necessárias, mas não suficientes para a existência de pelo menos uma operação viável. A razão física disto se deve ao fato de que, na solução recursiva da equação (II.10) para a determinação de $V_u(t-1)$, só são levados em consideração os volumes necessários futuramente no sistema parcial u . Como neste caso existem outros pontos de controle de cheias, os volumes vazios necessários futuramente em sistemas parciais (ou conjuntos de sistemas parciais) contidos no sistema parcial u , com pontos de controle situados a montante do ponto de controle de u , podem ser superiores aos necessários em u . Portanto, para se determinar $V_u(t-1)$, deve-se também considerar os volumes vazios necessários em parcelas de montante de u , que são obtidas retirando-se de u conjuntos de reservatórios de jusante. Por exemplo, no sistema formado pela figura II.1, para a determinação dos volumes necessários no sistema parcial $\{1,2,3\}$, caso P_2 e P_3 sejam pontos de controle de cheias, tem-se que levar em consideração também as necessidades futuras de volumes vazios dos sistemas parciais $\{2\}$ e $\{3\}$, pois estas podem ser superiores às de $\{1,2,3\}$. Sendo assim a sua expressão fica da seguinte forma:

$$V_u(t-1) = \max \left\{ 0, \max_{v \in S_0(u)} \left[\sum_{w \in R(u,v)} V_w(t) \right] \right\} + (q_u(t) - M_x(t)) \cdot \Delta t \quad (\text{II.11})$$

onde

v e w são sistemas parciais

$S_0(u)$ é a classe de sistemas parciais contidos em u , com o mesmo ponto de controle de u onde o próprio sistema parcial u é substituído pelo conjunto vazio

$R(u,v)$ é a classe de sistemas parciais remanescentes de u , quando é retirado de u os reservatórios pertencentes ao sistema parcial v

Com esta nova formulação para $V_u(t)$, as condições de controlabilidade expressas em (II.8) e (II.9) continuam válidas para todo $u \in U$ e $t=t_0, \dots, T$, caso as capacidades dos reservatórios sejam infinitas.

Em Damázio [5] alerta-se para o caso dos reservatórios com capacidades finitas, no qual estas condições são necessárias, mas não suficientes. A razão física desta vez é devido a não consideração na equação (II.11) das necessidades futuras em sistemas parciais cujos pontos de controle estão a jusante de u , pois, durante a ocorrência de uma cheia, quando u está contido em outros sistemas parciais, a limitação na capacidade dos reservatórios a jusante de u pode fazer com que seja necessário armazenar uma parcela das afluições em u . As condições de controlabilidade para o caso geral de capacidades finitas são bem mais numerosas (em princípio é preciso calcular volumes vazios necessários para todos os subconjuntos de reservatórios e não apenas para os subconjuntos que formam sistemas parciais). No entanto, Damázio [5] aponta que, em geral, as condições calculadas assumindo-se capacidades infinitas são também suficientes para o caso das capacidades serem finitas.

II.5 - Condições de Controlabilidade para um Sistema Multireservatório com Múltiplos Pontos de Controle de Cheias e com Restrições de Vazões Mínimas

Neste caso, como as defluências dos reservatórios estão limitadas em vazões mínimas, diferentes de 0 (zero), deve-se inserir na afluição aos reservatórios equivalentes uma parcela com o somatório das defluências mínimas dos reservatórios não pertencentes a u e que se localizam imediatamente a montante de qualquer reservatório R_i , $i \in u$. Damázio [5] mostra que para o cálculo dos volumes vazios necessários num sistema parcial u , no caso de um único ponto de controle de cheias P_x , é preciso incluir a

verificação das necessidades futuras de volumes vazios em todos os sistemas parciais $v \in U_x$, onde $v \subset u$, ou seja, em parcelas de jusante de u , que são obtidas retirando-se de u conjuntos de reservatórios de montante.

Conforme o item II.4, quando há mais de um ponto de controle de cheias, mas não existe nenhuma restrição de vazão mínima, é preciso se verificar os volumes vazios necessários em parcelas de montante de u . No caso geral, em que existem tanto restrições de vazões mínimas como múltiplos pontos de controle de cheias, além de verificar os volumes vazios necessários em parcelas de montante e de jusante de u , obtidas respectivamente pela retirada de u de conjuntos de reservatórios de jusante e de montante, é preciso se verificar também os volumes vazios necessários em parcelas intermediárias de u , obtidas pela retirada concomitante de u de conjuntos de reservatórios de jusante e de montante.

No sistema da figura II.2, por exemplo, para o cálculo dos volumes vazios necessários no sistema parcial $\{1,2,3\}$, além das necessidades futuras de volumes vazios neste sistema, devem ser verificadas também as dos seguintes sistemas parciais: parcelas de jusante - $\{1\}$, $\{1,2\}$; parcelas de montante - $\{2,3\}$, $\{3\}$; parcelas intermediárias - $\{2\}$.



Figura II.2 - Exemplo de Sistema com 3 Reservatórios

Desta forma a nova expressão para os volumes vazios necessários num sistema parcial u fica assim:

$$V_u(t-1) = \max \left\{ 0, \max_{w \in W'(u)} \left[\sum_{z \in R(u,w)} V_z(t) \right] \right\} + \left(q_u(t) + \sum_{i \in UP(u)} m_i(t) - M_x(t) \right) \cdot \Delta t \quad (II.12)$$

onde

- $UP(u)$ é o conjunto de reservatórios que não pertencem a u e que estão localizados imediatamente à montante de qualquer reservatório de u
 w e z são sistemas parciais
 $W'(u)$ é a classe dos conjuntos de reservatórios a serem retirados de u

As condições de controlabilidade expressas em (II.8) e (II.9) continuam válidas, sendo que $V_u(t)$ passa a ser definido por (II.12), para todo $u \in U$ e $t=t_0, \dots, T$, caso as capacidades dos reservatórios sejam infinitas. Da mesma forma que no item II.4, considera-se que as condições obtidas assumindo-se as capacidades dos reservatórios como infinitas, em geral, são também suficientes para o caso das capacidades serem finitas.

II.6 - Consideração do Tempo de Viagem da Água nas Condições de Controlabilidade

As condições de controlabilidade apresentadas nos itens anteriores são estritamente válidas apenas para sistemas de reservatórios com propagação instantânea do escoamento, na qual as defluências de cada reservatório atingem o reservatório de jusante no mesmo instante. No entanto, em sistemas reais, o intervalo de tempo entre o momento em que é liberada a defluência e a sua chegada ao reservatório de jusante pode ser significativo.

Seja l_{ij} o tempo de viagem da água pelos canais do sistema entre os reservatórios R_i e R_j e seja $l^+ = \max_j(l_{1j})$. Para cada reservatório R_j do sistema define-se então a "defasagem" γ_j dada por:

$$\gamma_j = l^+ - l_{1j}$$

Como na verdade o tempo de viagem l_{ij} e, por conseguinte, a defasagem γ_j são variáveis aleatórias, que variam com a intensidade das cheias, os valores adotados neste modelo são apenas estimativas compatíveis com situações de cheias nos sistemas considerados.

A operação do sistema durante a ocorrência de uma cheia, com a consideração do tempo de viagem da água entre os reservatórios, passa então a ser descrita por:

$$e_i(t+\gamma_i) = e_i(t+\gamma_i-1) - \left(q_i(t+\gamma_i) + \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot r_j(t+\gamma_i) - r_i(t+\gamma_i) \right) \cdot \Delta t \quad \begin{matrix} \text{para } t=t_0, \dots, T \\ \text{e} \\ i=1, \dots, n \end{matrix} \quad (\text{II.13})$$

$$0 \leq e_i(t+\gamma_i) \leq K_i \quad \begin{matrix} \text{para } t=t_0, \dots, T \\ \text{e} \\ i=1, \dots, n \end{matrix} \quad (\text{II.14})$$

$$m_i(t+\gamma_i) \leq r_i(t+\gamma_i) \leq M_i(t+\gamma_i) \quad \begin{matrix} \text{para } t=t_0, \dots, T \\ \text{e} \\ i=1, \dots, n \end{matrix} \quad (\text{II.15})$$

$$e_i(t_0+\gamma_i-1) = E_i(t_0+\gamma_i-1) \quad \text{para } i=1, \dots, n \quad (\text{II.16})$$

Definindo-se as grandezas defasadas no tempo para cada reservatório, tem-se:

$$e_i^*(t) = e(t+\gamma_i) \quad (\text{II.17})$$

$$q_i^*(t) = q_i(t+\gamma_i) \quad (\text{II.18})$$

$$r_i^*(t) = r_i(t+\gamma_i) \quad (\text{II.19})$$

$$m_i^*(t) = m_i(t+\gamma_i) \quad (\text{II.20})$$

$$M_i^*(t) = M_i(t+\gamma_i) \quad (\text{II.21})$$

$$E_i^*(t_0-1) = E_i(t_0-1+\gamma_i) \quad (\text{II.22})$$

Substituindo-se (II.17) a (II.22) nas equações (II.13) a (II.16) chega-se a uma descrição da operação idêntica a (II.1) a (II.4):

$$e^*_i(t) = e^*_i(t-1) - \left(q_i^*(t) + \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot r_j^*(t) - r_i^*(t) \right) \cdot \Delta t \quad \text{para } t=t_0, \dots, T, i=1, \dots, n \quad (\text{II.23})$$

$$0 \leq e^*_i(t) \leq K_i \quad \text{para } t=t_0, \dots, T, i=1, \dots, n \quad (\text{II.24})$$

$$m^*_i(t) \leq r^*_i(t) \leq M^*_i(t) \quad \text{para } t=t_0, \dots, T, i=1, \dots, n \quad (\text{II.25})$$

$$e^*_i(t_0-1) = E^*_i(t_0-1) \quad \text{para } i=1, \dots, n \quad (\text{II.26})$$

Pode-se pois concluir que a descrição da operação de sistemas nos quais o tempo de viagem da água pelos canais é significativo pode ser feita através das equações de sistemas com propagação instantânea, bastando que se tome o cuidado de se defasar no tempo as diversas grandezas. Em consequência, tomado este cuidado, as condições de controlabilidade apresentadas nos itens anteriores podem também ser aplicadas em sistemas com tempo de viagem. Assim, a expressão para o cálculo dos volumes vazios, antes descrita por (II.12) para um caso geral de sistema, passa a ser dada por:

$$V_u(t-1) = \max \left\{ 0, \max_{w \in W'(u)} \left[\sum_{z \in R(u,w)} V_z(t) \right] \right\} + \left(q_u(t) + \sum_{i \in UP(u)} m_i^*(t) - M_x^*(t) \right) \cdot \Delta t \quad (\text{II.27})$$

onde a afluência $q_u(t)$, correspondente ao reservatório equivalente de sistemas parciais, deve ser calculada como um somatório de afluências incrementais defasadas no tempo:

$$q_u(t) = \sum_{i \in u} q_i^*(t) = \sum_{i \in u} q_i(t + \gamma_i) \quad (\text{II.28})$$

Na expressão das condições de controlabilidade, os valores de $V_u(t)$ passam a fornecer limites mínimos para o somatório de volumes vazios alocados nos reservatórios em diferentes instantes no tempo:

$$E_u(t) = \sum_{i \in u} E_i^*(t) = \sum_{i \in u} E_i(t + \gamma_i) \geq V_u(t) \quad \text{para } t=t_0, \dots, T \text{ e } \forall u \in U \quad (\text{II.29})$$

CAPÍTULO III

MODELO DE PROGRAMAÇÃO DA OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS PARA O CONTROLE DE CHEIAS COM A UTILIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTROLABILIDADE

III.1 - Introdução

Neste capítulo procura-se caracterizar uma forma de utilização das condições de controlabilidade na programação da operação de controle de cheias de um sistema de reservatórios. A execução desta tarefa não é simples, pois, em primeiro lugar a teoria de condições de controlabilidade não tem como definir uma operação de reservatórios onde as afluições aos mesmos não são conhecidas previamente, e, além disso, possui uma caracterização própria na formulação das condições, onde os elementos condicionados são sistemas parciais, figura até então não reconhecida nos modelos de operação.

Para o desenvolvimento desta tarefa foi primeiro preciso uma fase de concepção, descrita no item III.2, na qual a partir da abordagem estocástica apresentada em Damázio [5] chegou-se a um critério de utilização das condições de controlabilidade. Posteriormente foi elaborado um modelo de operação baseado neste critério, cuja descrição consta do item III.3. Neste capítulo, a fim de facilitar o entendimento, até o item III.3.3 não foram considerados nas equações os defasamentos temporais da água, contudo, no item III.3.4, quando são apresentados os dados básicos necessários ao modelo, trata-se tanto do caso de sistemas de reservatórios com defasamentos nulos, como não nulos.

III.2 - Concepção

As condições de controlabilidade, conforme já visto no capítulo anterior, são determinadas para todos os sistemas parciais, definindo em cada um destes sistemas uma necessidade mínima de volumes vazios em qualquer instante de tempo para que se possa evitar inundações futuras nos pontos de controle. Para o caso geral estes volumes vazios mínimos são dados pela equação (II.12).

Numa situação ideal, onde as séries de aflúências aos reservatórios são previamente conhecidas, as condições de controlabilidade expressas em (II.8) fornecem os volumes vazios necessários nos reservatórios equivalentes de todos os sistemas parciais desde o início do período chuvoso até o seu final. Para a programação da operação hidráulica dos reservatórios restaria ainda o problema de se encontrar a distribuição espacial dos volumes vazios nos reservatórios da bacia que atenda a estes volumes vazios mínimos nos reservatórios equivalentes dos sistemas parciais.

Envoltória

Durante a programação da operação, a premissa de conhecimento prévio das aflúências é impossível de ser alcançada. Em Damázio [5] é sugerido que se utilize neste caso a técnica de geração de séries sintéticas de vazões, onde o conjunto infinito de possíveis séries de aflúências é substituído por um conjunto finito, porém numeroso, de séries obtidas sinteticamente através de um modelo multivariado de séries temporais.

Desta forma, no lugar da previsão perfeita tem-se um número N , de grande magnitude, de séries equiprováveis. Como o conjunto destas séries representa o universo de aflúências aos reservatórios e aos sistemas parciais, para proteger os pontos de controle contra qualquer inundação "possível", basta alocar como volume de espera em cada sistema parcial ao longo de toda a estação chuvosa a envoltória das N trajetórias de volumes vazios necessários, obtidas através de (II.8).

Entretanto, como em qualquer obra de defesa contra cheias, a proteção contra todas as inundações "possíveis" é geralmente anti-econômica. Portanto, costuma-se adotar no planejamento da operação de controle de cheias um tempo de retorno, TR , para esta proteção, que no caso das séries sintéticas de aflúências, permite que se escolha, usando algum índice de intensidade de cheia, $1/TR$ séries das N séries geradas para serem descartadas. Com as NS séries que permaneceram, onde

$$NS = \left(1 - \frac{1}{TR}\right) \cdot N$$

é elaborada, então, para cada sistema parcial, a envoltória dos volumes vazios necessários associada ao tempo de retorno TR:

$$EV_{u,TR}(t-1) = \max_{s=1,...,NS} [V_{u,s}(t-1)] \quad \forall u \in U \text{ e } t=t_0,...,T \quad (III.1)$$

onde

$V_{u,s}(t-1)$ é o volume vazio necessário no sistema u no instante (t-1), ou seja, no início do período t, para a ocorrência da série de afluições s (ver equação II.8).

A envoltória obtida para um sistema parcial u sempre permite a divisão do espaço de volumes vazios de seu reservatório equivalente, e_u , numa região segura, definida por

$$e_u(t) \geq EV_{u,TR}(t) \quad , t=t_0,...,T$$

onde sempre existirá, para as séries de afluições não descartadas, pelo menos uma opção para operação sem inundações; e numa região insegura, definida por

$$e_u(t) < EV_{u,TR}(t) \quad , t=t_0,...,T$$

onde esta garantia não é válida (Kelman [6]). Na figura III.1 é ilustrado como a envoltória define se o espaço vazio de um sistema parcial está numa região segura ou insegura sob o ponto de vista do controle de cheias.

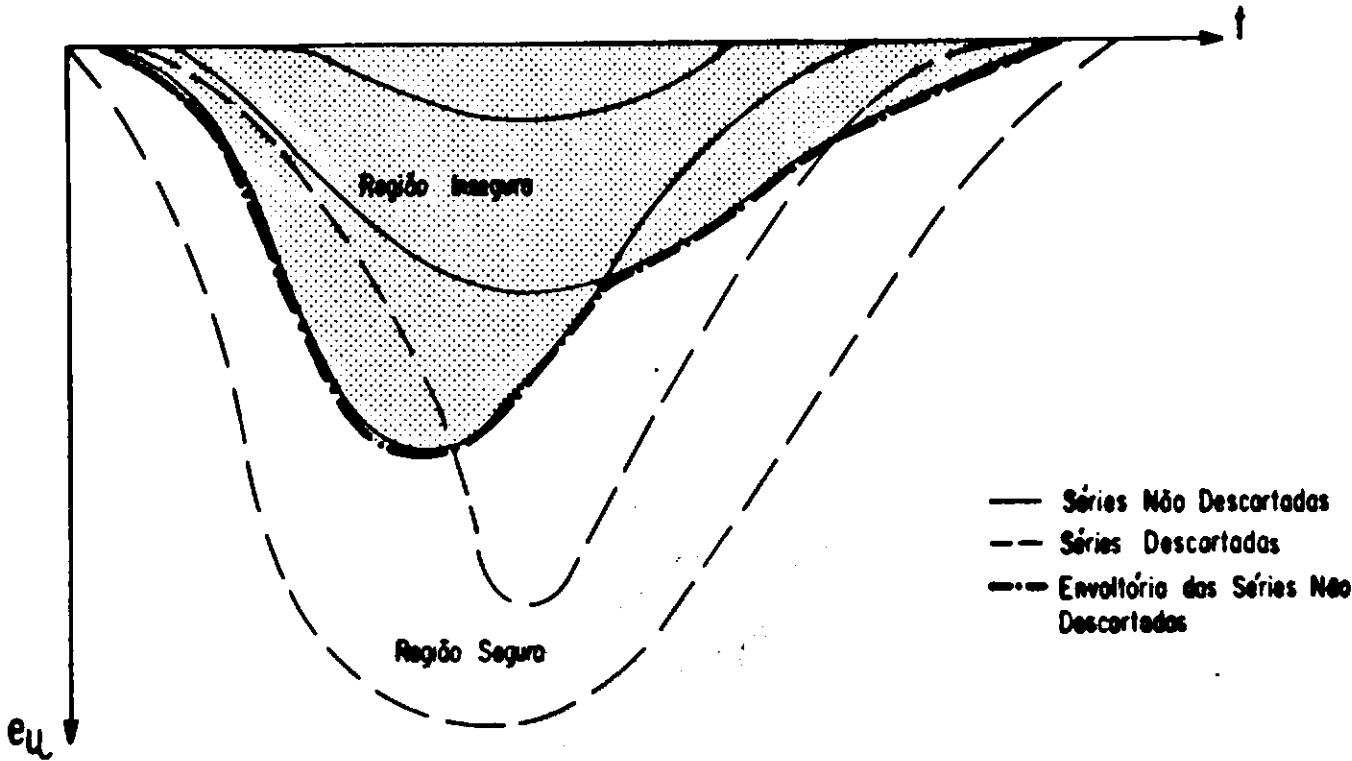


Figura III.1 - Exemplo de Elaboração de Envoltórias

Para o procedimento de descarte de séries, necessário à obtenção das envoltórias, Damázio [5] propõe que seja feito com base nas trajetórias do sistema parcial mais geral, ou seja, no sistema onde todos os reservatórios estão presentes. Para a escolha das séries a serem descartadas, em função dos reservatórios terem também como finalidade a produção de energia elétrica, Kelman [6] sugere que se utilize um critério que priorize a eliminação de séries mais molhadas, ou seja, séries que demandarão volumes vazios maiores. Desta forma, Kelman [6] propõe o descarte de séries que minimiza a função $D[EV_{u,TR}(t_0), \dots, EV_{u,TR}(T)]$, onde $D[.]$ pode ser dada por

$$D[EV_{u,TR}(t_0), \dots, EV_{u,TR}(T)] = \sum_{t=t_0}^T EV_{u,TR}$$

isto é, $D[.]$ é proporcional ao volume vazio médio, ou

$$D [EV_{u,TR}(t_0, \dots, EV_{u,TR}(T)] = \max_{t=t_0, \dots, T} [EV_{u,TR}(t)]$$

isto é, $D [.]$ é igual ao máximo volume vazio.

Assim como são obtidas envoltórias de volumes vazios associadas ao tempo de retorno TR , através do descarte de um número de séries igual a N/TR , pode-se gerar outras envoltórias a partir da utilização de outros tempos de retorno tr , ao invés de TR . Este procedimento permite a obtenção de um mapeamento em cada sistema parcial dos riscos de inundação em relação aos espaços vazios, que pode ser bastante útil durante o acompanhamento da operação de controle de cheias para avaliar eventuais desvios dos espaços vazios em relação às envoltórias associadas a TR (Costa et al [8]).

Este conceito de risco de inundação num sistema parcial é fictício, pois na realidade a inundação sempre se refere a um ponto de controle P_X . Para se estimar num dado instante o risco de inundação em P_X a partir dos tempos de retorno das envoltórias, tem-se que verificar os estados de espaços vazios $E_u(t)$ dos reservatórios equivalentes de todos os sistemas parciais $u \in U_X$. Utilizando-se o conceito de região segura, pode-se dizer que as regiões seguras definidas pelas envoltórias associadas a um determinado tempo de retorno, em todos estes sistemas parciais simultaneamente, formam uma região segura no espaço IR_m , onde m é o número de sistemas parciais $u \in U_X$, na qual há sempre a garantia de existência de pelo menos uma operação possível sem inundações no ponto de controle P_X com as séries de aflúncias não descartadas. Dentre todos os tempos de retorno cujas regiões seguras no espaço IR_m são respeitadas pelo estado de volumes vazios disponíveis, o maior deles, dado por

$$tr^+ = \max[tr] \quad (III.2)$$

sujeito a

$$E_u(t) \geq EV_{u,tr}(t) \quad \forall u \in U_X$$

fornece a melhor estimativa para o risco de inundação no ponto de controle através de

$$h_{P_X}(t) = \frac{1}{tr^+} \quad (III.3)$$

A extensão deste conceito de região segura para todo o sistema, ou seja, para todos os pontos de controle de cheias existentes no sistema, é simples. Se, para apenas um ponto de controle de cheias P_x , a região segura é formada no espaço IR_m , onde m é o número de sistemas parciais $u \in U_x$, para a definição da região segura no sistema como um todo, basta efetuar a união das regiões seguras associadas a cada ponto de controle de cheias, que nada mais é que formar uma região segura no espaço IR_{ms} , onde ms é o número de sistemas parciais existentes no sistema como um todo ($u \in U$).

A seguir é apresentado um exemplo prático de estimação do risco de inundação num sistema com um único ponto de controle de cheias a partir de envoltórias.

EXEMPLO 1 : Seja o sistema com dois reservatórios R_1 e R_2 , da figura III.2 onde a jusante de R_1 existe o ponto de controle de cheias P_1 .

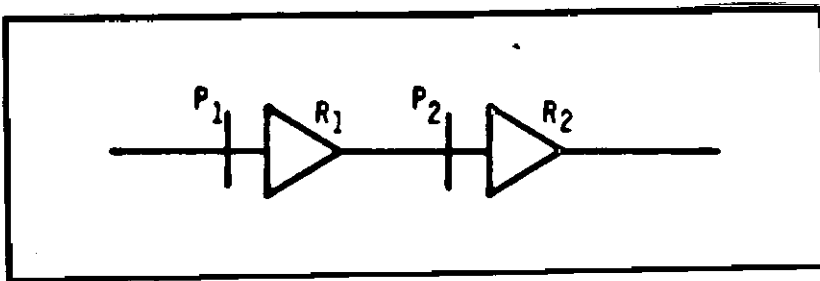


Figura III.2 - Sistema com 2 Reservatórios

Os sistemas parciais de P_1 , segundo a teoria das condições de controlabilidade, são:

$$\{1,2\} \text{ e } \{1\}$$

Sabendo-se que apenas as séries S_1, S_2, S_3 representam o universo de possíveis sequências de afluentes, foram obtidas a partir destas as trajetórias de volumes vazios para os dois sistemas parciais, conforme a figura III.3.

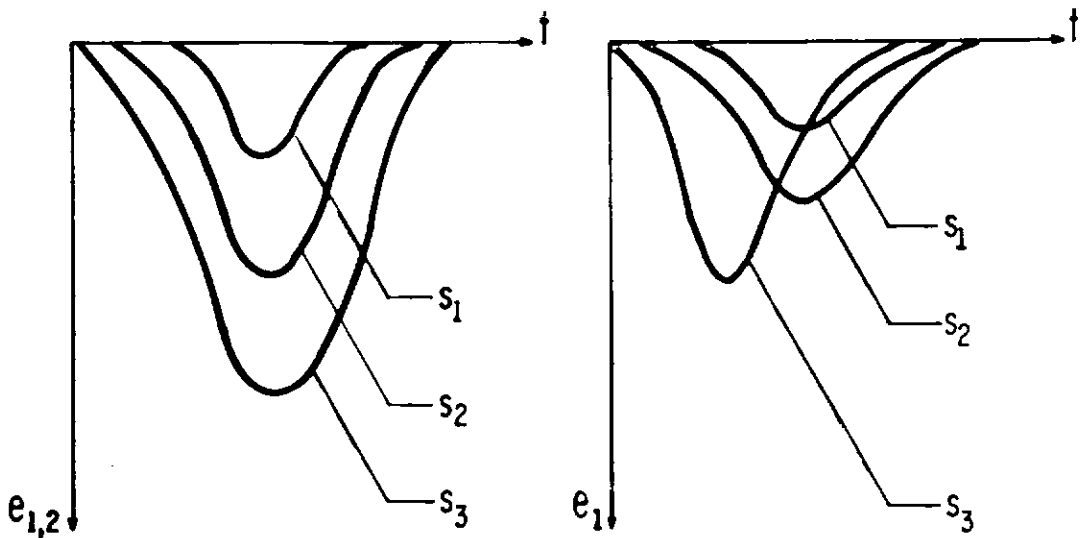


Figura III.3 - Trajetórias de Volumes Vazios das Séries S_1 , S_2 e S_3

A envoltória associada ao tempo de retorno infinito é obtida pela envoltória das trajetórias das três séries de afluências possíveis. Para a obtenção das envoltórias associadas aos tempos de retorno iguais a 3 e 1,5 anos, são necessários os descartes de uma e duas séries respectivamente. Adotando-se o sistema parcial $\{1,2\}$ como referência para a escolha das séries mais molhadas a serem descartadas, escolheu-se a série S_3 para obtenção da envoltória associada ao tempo de retorno igual a 3 anos e as séries S_2 e S_3 para a envoltória de tempo de retorno igual a 1,5 anos, resultando nos traçados apresentados na Figura III.4.

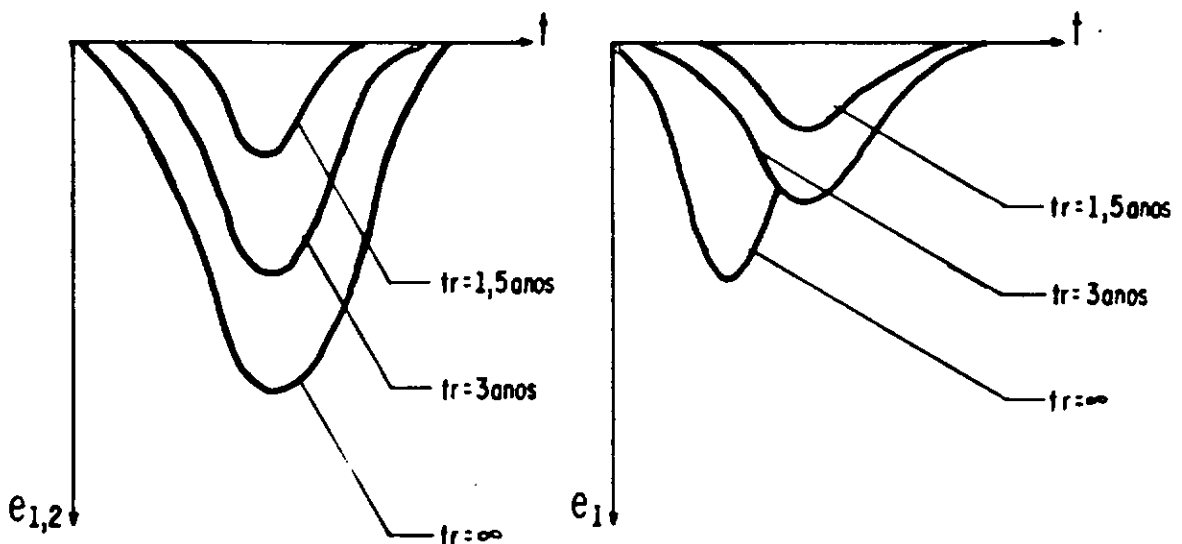


Figura III.4 - Envoltórias de Volumes Vazios

Se num dado instante t_1 , o estado de volumes vazios nos sistemas parciais $\{1,2\}$ e $\{1\}$ é dado por $E_{1,2}(t_1)$ e $E_1(t_1)$, conforme a figura III.5,

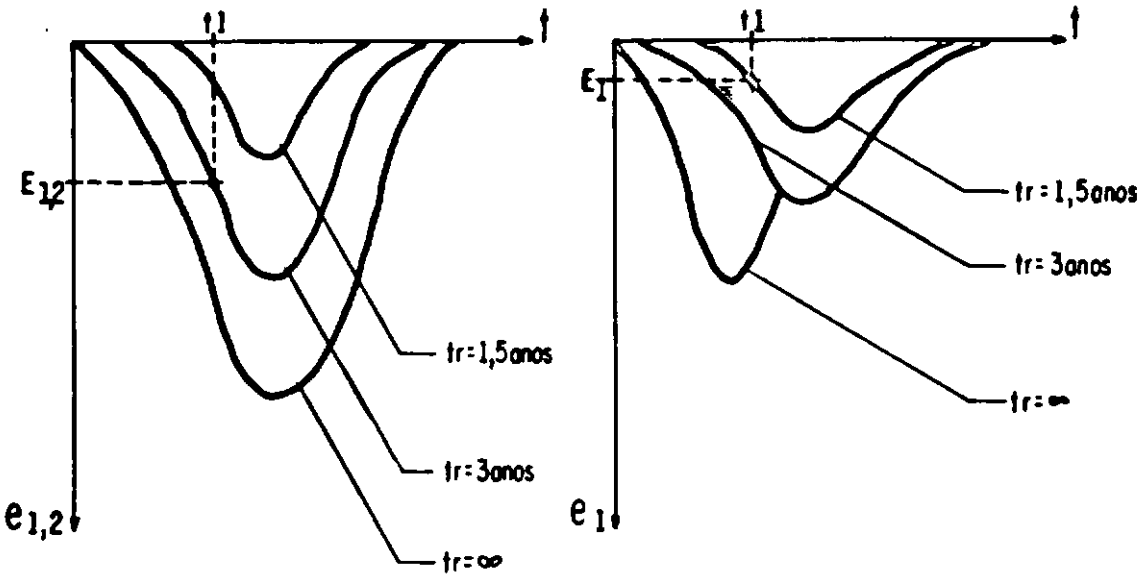


Figura III.5 - Estados de Volumes Vazios no Instante t_1

pode-se concluir que a envoltória de maior tempo de retorno que indica região segura simultaneamente para os estados de volumes vazios nos dois sistemas parciais é a de tempo de retorno igual a 1,5 anos. Note que a envoltória de tempo de retorno igual a 3 anos indica região segura para o volume vazio disponível no sistema parcial $\{1,2\}$ no instante t_1 , porém, como isto não ocorre também no sistema parcial $\{1\}$, a condição de indicação simultânea de região segura em todos os sistemas parciais referentes ao ponto de controle não é atendida. Portanto, o risco de inundação no ponto de controle P_1 , no instante t_1 , estimado através das envoltórias é dado por:

$$h_{P_1}(t_1) = \frac{1}{1,5} = 0,67$$

Entretanto, é importante observar que o risco de inundação, tanto nos sistemas parciais como nos pontos de controle, estimado através das envoltórias para um estado de volumes vazios num sistema de reservatórios, nem sempre é igual ao real. Durante a elaboração de uma envoltória, no processo de descarte de algumas séries, nem sempre a

eliminação de uma série representa uma alteração no traçado da envoltória. Isto ocorre quando séries mais molhadas para o sistema parcial mais geral, num dado instante, são escolhidas para serem descartadas, quando, no entanto, não fariam parte integral ou parcialmente da envoltória de alguns sistemas parciais caso não fossem descartadas. Em razão disto pode-se afirmar apenas que o risco de inundação, estimado através das envoltórias, é igual ou superior ao risco real de inundação.

Para se saber o risco de inundação real num ponto de controle através das condições de controlabilidade, dado um estado de volumes vazios no sistema de reservatórios situado a montante do ponto de controle, deve-se enumerar, em cada sistema parcial, as séries correspondentes às trajetórias de volumes vazios que apresentam valores superiores ao espaço vazio disponível no reservatório equivalente do sistema parcial neste instante. A razão entre o número de séries enumeradas como não protegidas em todos os sistemas parciais, eliminadas as coincidências para que cada série seja considerada apenas uma vez, e o número N de séries sintéticas de afluições, considerado como o universo de possíveis sequências, indicará o valor do risco real de inundação no ponto de controle. Vale ressaltar que antes do desenvolvimento da teoria das condições de controlabilidade, a única opção para determinação do risco de inundações num ponto de controle, em função do estado de volumes vazios disponíveis no sistema de reservatórios situados a montante deste, era baseada na realização de simulações, onde a razão entre o número de inundações ocorridas e o número de séries simuladas indica uma estimativa para o risco de inundação. Este procedimento tem como principal defeito o fato do resultado depender da regra utilizada na operação dos reservatórios.

No exemplo 1 apresentado anteriormente, o risco de inundação real no ponto de controle P_1 no instante t_1 , obtido através da contagem das séries não atendidas pelos volumes vazios disponíveis nos dois sistemas parciais, ou seja, a série S_3 no sistema parcial $\{1,2\}$ e a série S_2 no sistema parcial $\{1\}$, é igual a 0,67 (2 séries não atendidas para um total de 3 possíveis séries). Neste exemplo o risco de inundação no ponto de controle foi estimado através das envoltórias no seu valor real, o que nem sempre será verdade, pois, conforme já foi afirmado, esta estimativa fornece apenas um valor igual ou superior ao risco de inundação real. No exemplo 2, a seguir, pode ser observado que num outro instante, para um outro estado de volumes vazios no sistema de reservatórios do exemplo 1,

considerando-se o mesmo universo de seqüências de afluições, pode-se estimar o risco de inundação no ponto de controle P_1 num valor superior ao real.

EXEMPLO 2: Seja o sistema de reservatórios do exemplo 1, sujeito às mesmas séries de afluições S_1 , S_2 e S_3 . Se num dado instante t_2 , o estado de volumes vazios nos sistemas parciais $\{1,2\}$ e $\{1\}$ é dado por $E_{1,2}(t_2)$ e $E_1(t_2)$, conforme a figura III.6,

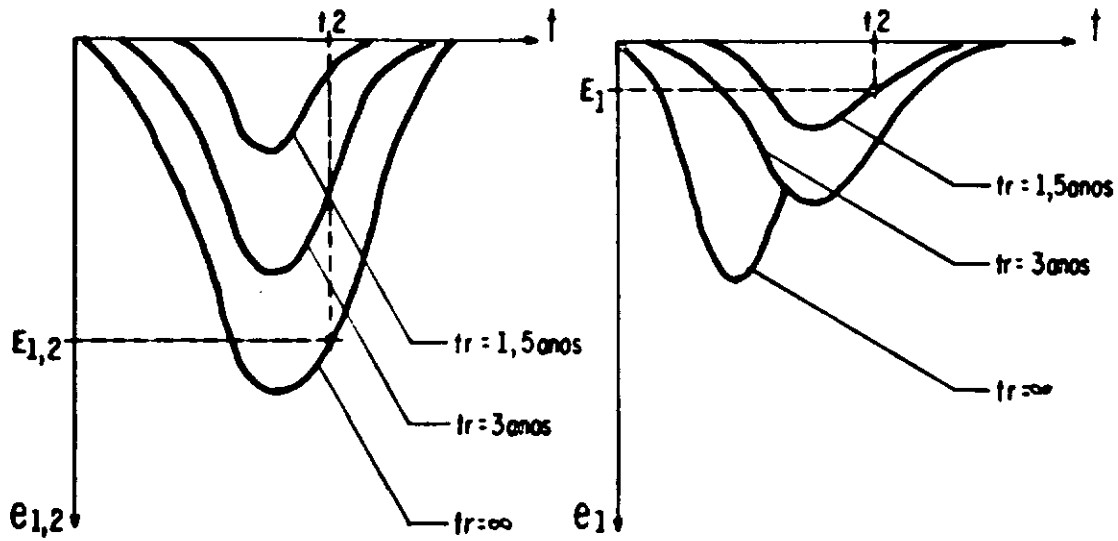


Figura III.6 - Estados de Volumes Vazios no Instante t_2

pode-se concluir que a envoltória de maior tempo de retorno que indica região segura simultaneamente para os estados de volumes vazios nos dois sistemas parciais é a de tempo de retorno igual a 1,5 anos, correspondendo a um risco de inundação de 0,67. Porém, observando-se as trajetórias de volumes vazios de S_1, S_2 e S_3 nos dois sistemas parciais, apresentadas no exemplo 1, pode-se verificar que os espaços vazios $E_{1,2}(t_2)$ e $E_1(t_2)$ não são atendidos apenas pela série de afluições S_2 , o que faz com que o risco de inundação real no ponto de controle P_1 seja apenas 0,33 (1 série não atendida num total de 3 séries possíveis).

Operação com envoltórias

Em Damázio [5], é apresentado um modelo de operação que utiliza o conceito de envoltória, onde apenas a envoltória associada a TR (tempo de retorno meta) é considerada, segundo as seguintes condições:

$$\sum_{i \in u} e_i(t) \geq EV_{u,TR}(t) \quad \forall u \in U$$

ou seja, no final de cada período deve-se ter alocado nos reservatórios de cada sistema parcial um total de espaços vazios maior ou igual ao indicado pela envoltória associada ao risco de inundação assumido no planejamento da operação de controle de cheias.

Idealmente esta operação deveria garantir a proteção das NS séries previamente escolhidas para serem atendidas, no entanto Damázio [5] mostra que isto não é inteiramente garantido. Este defeito é percebido na simulação de algumas destas NS séries durante a ocorrência de períodos de tempo cujas trajetórias destas séries não fizeram parte da determinação das envoltórias. Nestes períodos o atendimento simultâneo das envoltórias de todos os sistemas parciais e de todas as restrições de vazões máximas pode vir a ser impossível. Desta forma, o modelo de operação tem que optar por qual, ou, por quais sistemas parciais privilegiar na busca pela obediência à envoltória, relaxando as condições impostas aos demais sistemas parciais. Sabe-se que existe pelo menos uma solução viável como opção a ser seguida pela programação, que levaria a uma operação eficiente sob o ponto de vista do controle de cheias, porém, como a priori não se tem como conhecê-la, o modelo de operação pode optar por outras soluções, que no futuro causarão inundações que poderiam ser evitadas.

A fim de instruir a programação neste tipo de operação através do conceito de envoltória, Damázio [5] propõe a solução do seguinte problema:

$$Z_t = \min g [(r_i(t), e_i(t)), i=1, \dots, n] + A \sum_{u \in U} \delta_u(t) + B \sum_{i=1}^n p_i(t)$$

sujeito a

$$e_i(t) = e_i(t-1) - \left(q_i(t) - \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot r_j + r_i(t) \right) \cdot \Delta t \quad \text{para } i=1, \dots, n$$

$$0 \leq e_i(t) \leq K_i \quad \text{para } i=1, \dots, n$$

$$m_i(t) \leq r_i(t) \leq M_i(t) + p_i \quad \text{para } i=1, \dots, n$$

$$EV_u \leq \sum_{i \in u} e_i(t) + \delta_u(t), \delta_u(t) \geq 0, \forall u \in U$$

$$h_t [(r_i(t), e_i(t)), i=1, \dots, n] \geq D_t$$

onde $\delta_u(t)$, $\forall u \in U$ são variáveis de relaxação e $A \ll B$ são números grandes o suficiente para garantir $\delta_u(t)=0$, $u \in U$ e $p_i(t)=0$, $i=1, \dots, n$ na solução ótima se isto for viável e $p_i(t) \neq 0$ apenas em último caso. Com este tipo de operação teria-se sempre a minimização das relaxações nos sistemas com o intuito de evitar aquele defeito apresentado para a operação através de envoltórias.

O modelo ora proposto também baseia-se na operação através do conceito de envoltória, buscando garantir sempre que possível os volumes vazios mínimos definidos pela envoltória associada ao tempo de retorno meta, TR. Contudo, difere no que se refere a orientação da programação em situações onde algumas decisões de relaxações de condições de espaços vazios têm que ser tomadas. No lugar de buscar a minimização das invasões em volume das envoltórias associadas ao tempo de retorno TR, este modelo busca, através de uma heurística que será apresentada a seguir, reduzir o incremento do risco de inundação associado a estas invasões, de modo que a diferença entre o risco de inundação na bacia e o risco meta associado ao tempo de retorno TR seja reduzida.

Nesta busca são utilizados os mapeamentos dos riscos dados pelas envoltórias de vários tempos de retorno inferiores a TR, onde a redução no incremento do risco de

inundação no sistema pode ser entendida como a procura por um estado de espaços vazios nos reservatórios que satisfaça a envoltória associada ao menor risco de inundação possível no sistema como um todo.

Quando se associa um risco de inundação a um estado de espaços vazios no sistema, através das expressões (III.2) e (III.3), pode-se afirmar que em pelo menos um sistema parcial, o espaço vazio disponível no reservatório equivalente satisfaz na igualdade o volume definido pela envoltória associada a este risco, e que não existe nenhuma outra envoltória associada a um risco menor que seja satisfeita, pois, caso houvesse, o risco de inundação no sistema seria definido por este risco menor. Portanto, a determinação do risco de inundação no sistema como um todo pode ser sempre atribuída ao sistema parcial sob maior risco.

Em termos de algoritmo, então, para se reduzir o risco de inundação no sistema, basta reduzir o risco de inundação no sistema parcial sob maior risco. Isto será de grande importância para a solução do problema ao qual o modelo se propõe resolver, pois permite que se utilize um procedimento contínuo de redução de risco no sistema parcial sob maior risco.

Vale mencionar que uma outra alternativa, para a busca pela redução no incremento dos riscos de inundação, seria a substituição dos riscos estimados através das envoltórias pelos riscos reais de inundação no sistema, obtidos pela contagem das trajetórias. Contudo, esta alternativa, apesar de utilizar um valor de risco mais preciso, teria um forte obstáculo, que seria a necessidade de adoção de um procedimento de tentativa e erro para se procurar como o risco de inundação no sistema poderia ser reduzido.

Ainda na concepção do modelo proposto, vale ressaltar a importância de se manter os reservatórios o mais cheios possível, devido a finalidade conservativa dos mesmos, desde que esteja garantido o atendimento aos volumes vazios mínimos nos sistemas parciais, dados pelas envoltórias associadas a TR. Desta forma, as vazões defluentes dos reservatórios só não deverão ser iguais as mínimas caso a operação com estes valores resulte num estado de espaços vazios que não satisfaça às envoltórias associadas a TR.

III.3 - Descrição

III.3.1 - Equação de Balanço de Massa

No balanço de massa de um reservatório situado em um curso d'água existem diversos elementos a serem considerados, a saber, o volume d'água proveniente da região da bacia a montante do reservatório, o volume descarregado pelos órgãos extravasores, o volume precipitado sobre o espelho d'água, o volume evaporado sobre o mesmo, a troca de volume entre o corpo d'água e o solo e finalmente os estados de armazenamento no início e no final do intervalo de tempo considerado. Supondo-se um conhecimento perfeito de todos estes fatores ao longo de um período de tempo, ao se efetuar um somatório dos quatro primeiros, considerando como positivos os volumes afluentes ao reservatório e negativos os defluentes, obteria-se como resultado a diferença entre os estados de armazenamento inicial e final, ou seja, a soma dos volumes que afluem ao lago é igual a soma dos volumes que defluem destes a menos de uma variação no armazenamento do reservatório.

Como a hidrologia operacional tem dificuldades na quantificação do volume precipitado, do volume evaporado e do volume intercambiado com o solo, além dos seus respectivos valores poderem ser considerados, em geral, desprezíveis em relação aos demais, resolveu-se abandonar neste modelo de operação estes fatores, adotando-se apenas os três termos restantes. Esta simplificação está compatível com as condições de controlabilidade definidas no capítulo II, já que em sua formulação, na equação que representa o balanço hídrico nos reservatórios (equação II.1) apenas estes três termos são considerados.

Portanto, os parâmetros utilizados pelo modelo são apenas o volume afluente, que está expresso como a vazão afluente média no intervalo de tempo considerado, o volume de descarga, que é definido pela vazão defluente média no mesmo intervalo, e a variação de armazenamento do reservatório também no mesmo intervalo. A equação que serve de base para este modelo de operação nada mais é que a equação da continuidade, que para um reservatório R_i é dada por:

$$w_i(t) = w_i(t-1) + (q_{a_i}(t) - r_i(t)) \cdot \Delta t$$

onde

$w_i(t)$ é o armazenamento no instante t
 $qa_i(t)$ é a vazão afluyente total no período t

Note que o período t tem início e fim respectivamente nos instantes $t-1$ e t .

Em função deste modelo de operação ter como objetivo a busca de espaços vazios nos sistemas que satisfaçam as condições de controlabilidade para o controle de cheias, torna-se necessário reescrever esta equação substituindo os armazenamentos w_i no início e no final do período pelos seus espaços vazios complementares e_i , já que:

$$e_i(t) = K_i - w_i(t)$$

Além disto, a afluência total ao reservatório deve ser dividida em duas parcelas: $q_i(t)$, que é a vazão não regularizada que aflui ao reservatório sem transitar por nenhum outro a montante, e $\sum c_{ij} \cdot r_j(t)$, que é o somatório das vazões defluentes de reservatórios R_j localizados imediatamente a montante de R_i .

Com estas últimas considerações, a equação de balanço de massa utilizada neste modelo de operação, para cada reservatório R_i , tomou a seguinte forma final

$$e_i(t) = e_i(t-1) + \left(r_i(t) - q_i(t) - \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot r_j(t) \right) \cdot \Delta t \quad (\text{III.4})$$

Note que esta equação é idêntica a equação (II.1), que serviu de base para a definição das condições de controlabilidade.

III.3.2 - Restrições Operativas

No processo de programação da operação dos reservatórios devem ser também observadas as restrições a que os parâmetros presentes na equação de balanço de massa estão sujeitos. Enquanto que a operação de controle de cheias define um limite máximo para a vazão defluente dos reservatórios, $M_i(t)$ (restrição de vazão máxima - vazão associada

ao nível de inundação no ponto de controle de cheias), as demais finalidades operativas dos reservatórios, conflitantes com a operação de controle de cheias, definem as restrições de vazões mínimas, $m_i(t)$, e de espaços vazios máximos, $K_{\max i}$, nos reservatórios. Estas outras finalidades podem ser a geração de energia elétrica, a navegação fluvial e o abastecimento d'água entre outras.

Em geral o espaço vazio máximo, $K_{\max i}$, pode ser dado ou pela capacidade do reservatório, K_i , ou por um valor inferior a este, definido a partir da avaliação, através de simulação, dos impactos causados pelos deplecionamentos gerados pela operação de controle de cheias nos demais objetivos dos reservatórios.

$$0 \leq e_i(t) \leq K_{\max i} \quad \forall i, t=t_0, \dots, T \quad (\text{III.5})$$

A validade das restrições de vazões máxima e mínima se limita a situação onde $e_i(t)$ é diferente de zero e de $K_{\max i}$. Caso o espaço vazio $e_i(t)$ de qualquer reservatório atinja o valor nulo, a restrição de vazão máxima passa a não mais ser considerada, pois o reservatório deverá poder liberar todo o volume d'água que afluir a si, por questão de segurança da barragem. Caso o espaço vazio $e_i(t)$ de algum reservatório R_i chegar ao valor de $K_{\max i}$, é a restrição de vazão mínima que não poderá mais ser obedecida, sendo então relaxada.

$$r_i(t) \geq m_i(t) \quad \forall i, t=t_0, \dots, T \quad (\text{III.6})$$

sujeito a

$$e_i(t) < K_i$$

$$r_i(t) \leq M_i(t) \quad \forall i, t=t_0, \dots, T \quad (\text{III.7})$$

sujeito a

$$e_i(t) > 0$$

Na determinação das trajetórias de volumes vazios de cada sistema parcial através das condições de controlabilidade, as defluências dos reservatórios são consideradas ou pelo seu valor máximo, no caso do reservatório ser o mais a jusante do sistema parcial, ou pelo seu valor mínimo, no caso contrário. Portanto, a fim de garantir pelo menos o pleno armazenamento dos excedentes das cheias que foram utilizadas no cálculo das trajetórias, a programação da operação deveria poder requerer a qualquer momento qualquer valor de defluência que estivesse dentro da faixa operativa definida pelas restrições de vazões máxima e mínima.

No entanto, a experiência prática mostra que isto nem sempre é factível sem causar danos a todo o leito do rio a jusante do reservatório. Variações bruscas nas vazões podem provocar desbarrancamento de margens e alterações na batimetria do leito, que causam impactos negativos à fauna, flora e ainda a várias atividades econômicas, como por exemplo a navegação fluvial. Em razão disto é comum se observar na programação da operação de reservatórios a consideração de uma variação máxima das vazões defluentes de um período para outro. Desta forma este modelo teve que incorporar ainda esta restrição, que vale tanto para a redução quanto para o aumento das vazões. As restrições $m_i'(t)$ e $M_i'(t)$, dadas por (III.8) e (III.9), abaixo apresentadas, substituem as restrições $m_i(t)$ e $M_i(t)$ utilizadas nas expressões (III.6) e (III.7), respectivamente.

$$m_i'(t) = \max [m_i(t), (r_i(t-1) - dr_i)] \quad \forall i, t=t_0, \dots, T \quad (\text{III.8})$$

$$M_i'(t) = \min [M_i(t), (r_i(t-1) + dr_i)] \quad \forall i, t=t_0, \dots, T \quad (\text{III.9})$$

onde

dr_i é a variação máxima das vazões defluentes no reservatório R_i

Como esta restrição não é considerada na determinação das trajetórias de volumes vazios dos sistemas parciais, a sua adoção por este modelo faz com que a garantia de pleno armazenamento dos excedentes das cheias, que foram utilizadas na elaboração das trajetórias, passe a não ser mais verdadeira. Parte do espaço destinado ao armazenamento das vazões acima da restrição de vazão máxima será utilizado no armazenamento da diferença entre esta restrição e a vazão máxima definida pela taxa de variação. Obviamente

esta ocupação indevida só ocorrerá no início das cheias, até que as vazões defluentes atinjam a restrição de vazão máxima, pois a partir daí prevalecerá esta restrição. O efeito da utilização desta restrição pelo modelo durante a programação da operação poderá ser visto no capítulo IV.

III.3.3 - Critérios Operativos

Este modelo de programação da operação de controle de cheias foi definido no item III.2 pelo seu conceito principal, que se baseia na utilização das envoltórias obtidas pelas condições de controlabilidade para a definição de um mapeamento, nos sistemas parciais, dos riscos de inundação em termos de espaços vazios. Através deste mapeamento busca-se, dentro das restrições descritas nos itens III.3.1 e III.3.2, uma programação de operação onde o risco de inundação resultante no sistema como um todo seja, ou no máximo igual a um risco meta, associado ao tempo de retorno TR, ou, caso isto não seja viável, igual ao menor risco possível acima do meta.

Em situações onde os espaços vazios nos reservatórios levam a espaços vazios nos sistemas parciais superiores aos necessários para a proteção associada ao risco meta, o modelo de operação simplesmente programa as defluências mínimas, determinadas pela equação (III.8). Este tipo de operação, que caracteriza um estado de tranquilidade em termos de controle de cheias, é a ideal sob o ponto de vista do uso conservativo, pois armazena o máximo possível d'água, liberando apenas a vazão estritamente necessária às outras finalidades operativas dos reservatórios.

Apenas quando os espaços vazios nos sistemas parciais vão se aproximando das envoltórias associadas ao tempo de retorno meta é que as defluências programadas pelo modelo passam a crescer em relação às vazões mínimas.

Durante a ocorrência de seqüências de afluências superiores às vazões de restrição nos pontos de controle, o que caracteriza a situação de cheia, quase sempre não é possível a manutenção simultânea das restrições de defluências e dos volumes vazios metas. Portanto, torna-se necessária a ocupação destes volumes, que, obviamente, foram alocados com esta finalidade. Para cheias com recorrências inferiores ao tempo de retorno meta, esta ocupação em geral não é total, resultando numa operação de controle de cheias de sucesso.

No entanto, para cheias com recorrências superiores a TR, o volume alocado será insuficiente, o que fará com que a restrição de vazão máxima de algum reservatório seja rompida, causando uma inundação no ponto de controle a jusante deste.

A forma adotada neste modelo para programar as defluências dos reservatórios R_i , num período t , segue a heurística apresentada a seguir:

Algoritmo de Operação

1º PROCEDIMENTO: PROGRAMAÇÃO DE DEFLUÊNCIAS MÍNIMAS EM TODOS OS RESERVATÓRIOS

Em cada reservatório R_i do sistema, a partir do conhecimento dos espaços vazios conhecidos no início do período t e da previsão de afluências médias para o período t determina-se quais seriam os espaços vazios no final deste período, caso fossem liberadas apenas as defluências mínimas dos reservatórios.

$$E_i(t) = E_i(t-1) + \left(m_i'(t) - q_i(t) - \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot m_j'(t) \right) \cdot \Delta t \quad \forall i \quad (\text{III.10})$$

2º PROCEDIMENTO: VERIFICAÇÃO DO RISCO DE INUNDAÇÃO NO SISTEMA COMO UM TODO E INDICAÇÃO DO SISTEMA PARCIAL QUE ESTÁ SOB MAIOR RISCO

Os espaços vazios $E_i(t)$ calculados a partir de (III.10) são então somados em cada sistema parcial u ,

$$E_u(t) = \sum_{i \in u} E_i(t) \quad \forall u \in U$$

Através destes valores, as expressões (III.2) e (III.3), considerando-se $u \in U$, fornecem uma estimativa para o risco de inundação no sistema. Caso o valor resultante seja inferior ao risco meta, o modelo pára, propondo a programação de defluências mínimas em

todos os reservatórios neste período. Em caso contrário, o modelo verifica qual é o sistema parcial u que definiu o risco no sistema, ou seja, o sistema parcial que está sob maior risco, e segue para o próximo procedimento.

3° PROCEDIMENTO: PROGRAMAÇÃO DE NOVAS DEFLUÊNCIAS COM INCREMENTO Δr NO SISTEMA PARCIAL SOB MAIOR RISCO DE INUNDAÇÃO

Conforme já visto no item III.2, para a redução do risco estimado de inundação no sistema como um todo, basta reduzir o risco no sistema parcial sob maior risco. A fim de realizar este objetivo, a partir dos estados de volumes vazios alcançados nos reservatórios após a execução do 1° procedimento deste algoritmo, procura-se deplecionar o reservatório equivalente do sistema parcial sob maior risco indicado no 2° Procedimento.

Qualquer alteração na programação das vazões defluentes de reservatórios de um sistema parcial pode provocar uma elevação do risco de inundação de outros sistemas parciais, pois a operação resultante sempre reduz o espaço vazio de algum reservatório a jusante, exceto quando não existe mais nenhum reservatório a jusante do sistema parcial considerado. A elevação do risco de inundação em outros sistemas parciais pode fazer com que o sistema parcial sob maior risco passe a ser outro sistema, assim como, eventualmente, o novo risco no sistema como um todo pode ser superior ao risco de inundação anterior ao aumento da vazão defluente, o que está fora do objetivo deste modelo. Portanto, a fim de garantir uma redução contínua do risco de inundação no sistema, após o acréscimo de cada Δr na vazão defluente no exutório do sistema parcial considerado, retorna-se ao 2° Procedimento, a fim de verificar o impacto desta operação na variação dos riscos de inundação em todos os sistemas parciais. O incremento Δr , para tanto, deve ser o menor possível dentro das disponibilidades computacionais para a implementação do modelo.

A decisão de deplecionar um sistema parcial não encerra a definição da programação de defluências deste sistema, pois um sistema parcial pode possuir mais de um reservatório. Com certeza o reservatório mais a jusante terá sua defluência aumentada porque somente através dele o sistema parcial consegue esvaziar seu volume armazenado. No entanto, o deplecionamento pode-se dar em qualquer um dos reservatórios.

Para a escolha de qual reservatório esvaziar foram concebidas três opções, que originaram três diferentes versões para o modelo proposto. Procurou-se com isto abrir espaço para uma certa flexibilização da programação da operação, a fim de atender alguns outros critérios operativos sem, contudo, desvirtuar do objetivo principal, que é a busca pela minimização do incremento do risco de inundação no sistema em relação ao risco meta. As opções admitidas pelo modelo são denominadas de Paralelo, Jusante e Risco.

OPÇÃO PARALELO

Como já visto, este modelo foi concebido para a operação de controle de cheias em sistemas de reservatórios onde existe uma outra finalidade operacional de geração de energia elétrica. Se há necessidade de efetuar esvaziamentos para a adequação do espaço vazio de um sistema parcial, um critério para a escolha dos reservatórios que serão deplecionados pode ser o critério de eficiência energética. Entretanto, o estabelecimento de regras de operação energeticamente eficientes para sistemas de reservatórios é um problema bastante complexo.

Em geral, para sistemas de reservatórios em série existe uma tendência a priorizar o esvaziamento dos reservatórios de montante, mantendo-se ao máximo as quedas dos reservatórios de jusante, de forma a maximizar a valorização energética da água armazenada no sistema. Por outro lado, a alocação dos espaços vazios nos reservatórios de jusante pode permitir uma maior facilidade para se proceder o reenchimento dos reservatórios do sistema ao final da estação chuvosa, pois as afluências ao sistema podem ser sempre armazenadas, independentemente de onde foram originadas, quando existe espaço vazio disponível a jusante. A avaliação destes efeitos, assim como a análise de sistemas em paralelo, onde não existem tendências gerais, deve considerar, portanto, as curvas de perda de carga dos reservatórios do sistema e a análise probabilística das condições de reenchimento dos reservatórios.

Alguns modelos de operação energética (DEGE [9] e Cunha e Cotia [10]) utilizam a noção de faixas de prioridades de esvaziamento e enchimento para os reservatórios. Assim, se num instante é necessário o esvaziamento do sistema, a escolha do reservatório a ser deplecionado é definida verificando-se as faixas de prioridades de esvaziamento de todos os reservatórios do sistema. Em geral, a determinação destas faixas é

feita empiricamente através da realização de testes em modelos de simulação com diferentes alternativas.

Uma alternativa de definição de faixas é a implementação do critério de operação em paralelo, presente no modelo de operação energética atualmente utilizado nos estudos de planejamento da operação, descrito em SCEN [11]. A opção Paralelo do modelo proposto de operação de controle de cheias considera este tipo de operação como critério para a definição do reservatório a ser rebaixado no sistema parcial definido como sob maior risco. A cada passo o modelo com esta opção verifica qual o reservatório mais cheio em relação a sua capacidade e esvazia-o.

Na sequência, o modelo volta a definir o sistema parcial sob maior risco. Caso seja mantido o sistema parcial do passo anterior, continua-se a esvaziar aquele mesmo reservatório, a não ser que em função do esvaziamento deste, um outro reservatório passe a ser o percentualmente mais cheio do sistema. Se durante o processo iterativo um outro sistema parcial venha a ser definido como sob maior risco, passa-se então a verificar os armazenamentos de um outro conjunto de reservatórios.

OPÇÃO JUSANTE

Para a proteção contra inundações de um ponto de controle de cheias devem ser alocados volumes vazios nos reservatórios a montante destes, e sempre que possível, todo o volume vazio necessário deve estar localizado imediatamente a montante deste. Com este procedimento, qualquer que seja a distribuição espacial das vazões incrementais a montante, proporciona-se sempre a mesma proteção para o ponto de controle, o que não é verdade quando se tem volumes vazios alocados distantes do ponto a ser protegido.

A opção jusante deste modelo tem como critério de escolha do reservatório a ser rebaixado em um sistema parcial, a proximidade dos reservatórios ao ponto de controle deste sistema, sendo sempre escolhido o mais próximo, desde que atenda a restrição (III.5).

É importante notar que os critérios adotados nas duas opções até aqui apresentadas não provêm da verificação das necessidades de volumes vazios em sistemas parciais, ou seja, nestas opções não se utilizam as condições de controlabilidade.

OPÇÃO RISCO

A escolha do sistema parcial onde posteriormente será definido o reservatório a ser rebaixado é feita segundo um critério de risco, baseando-se nos riscos de inundação associados aos volumes vazios existentes nos sistemas parciais. A fim de manter também na escolha do reservatório a ser operado um critério de risco, criou-se mais esta opção.

No capítulo II foi visto que o sistema parcial tem como característica o fato dos reservatórios que o formam poderem formar outros sistemas, podendo inclusive existir sistemas parciais totalmente contidos em outros. O sistema parcial mais geral é um exemplo disto, pois tem incluso em si todos os sistemas parciais da bacia. Como também já foi visto que é possível se determinar o risco de inundação em todos os sistemas parciais, a decisão sobre qual reservatório rebaixar pode ser orientada através da verificação dos riscos nos sistemas parciais contidos no sistema parcial sob maior risco.

O modelo, sob esta opção, definido o sistema parcial sob maior risco no sistema, verifica entre os sistemas parciais contidos neste, aquele que está sob maior risco de inundação, o que denomina-se segundo estágio de verificação dos riscos. Em um terceiro estágio, no sistema parcial associado ao maior risco encontrado no estágio anterior, verifica-se qual é o sistema contido que está sob maior risco. E assim por diante em outros estágios, até que, ou se alcance um sistema parcial formado por apenas um reservatório, ou se atinja um sistema parcial cujos riscos de inundação de todos os sistemas inclusos nele sejam nulos.

Note que se o último estágio for alcançado pela segunda razão, não chega-se apenas a um único reservatório e sim a um conjunto deles. Neste caso, em função de todos os riscos associados aos sistemas parciais contidos serem nulos, não há mais nenhum critério de risco que possa auxiliar na decisão sobre qual reservatório esvaziar. No modelo considera-se então o critério utilizado na opção paralelo, que decide rebaixar o reservatório que estiver mais armazenado em relação a sua capacidade máxima.

Os critérios utilizados no modelo, tanto para a opção paralelo como para as opções jusante e risco procuram orientar a distribuição do volume vazio em um sistema parcial através da observação de algumas características desejáveis na operação de sistemas

de reservatórios. Entretanto, da forma que foi concebido este modelo de operação, cujo problema básico é a busca pela redução do risco máximo de inundação no sistema, a definição da distribuição dos volumes vazios nos sistemas parciais pode atender a outros critérios que vierem a ser interessantes para o planejamento da operação.

III.3.4 - Dados Básicos

A programação da operação dos reservatórios para um período t_1 implica na definição das defluências $r_i(t_1) \forall i$, e, conseqüentemente, na determinação dos espaços vazios ao final do período $e_i(t_1) \forall i$. Esta programação, conforme foi visto nos itens anteriores, é feita tendo como base as expressões de balanço de massa dos reservatórios, as expressões de restrições e as envoltórias de espaços vazios para os tempos de retorno iguais e inferiores ao tempo de retorno meta.

A programação de qualquer tipo de evento pressupõe que a sua execução anteceda a realização do evento, portanto, os parâmetros necessários à programação para um período t já devem ser conhecidos ou pelo menos estimados antes da realização deste período, ou seja, durante o período t_1-1 . Estes parâmetros são os seguintes:

Sistema sem Defasamento Temporal entre os Reservatórios ($\gamma_i = 0 \forall i$)

- espaços vazios no início do período t_1 , $e_i(t_1-1)$, $\forall i$
- vazões afluentes previstas para o período t_1 , $q_i(t_1)$, $\forall i$
- vazões defluentes do período t_1-1 , $r_i(t_1-1)$, $\forall i$, e
restrições de vazões máximas e mínimas para o período t_1 , $M_i(t_1)$ e $m_i(t_1)$, $\forall i$
(necessárias para a determinação das restrições de vazões máximas e mínimas, $M_i'(t_1)$ e $m_i'(t_1)$, decorrentes das variações máximas das vazões)
- envoltórias de espaços vazios nos sistemas parciais para o final do período t_1
 $EV_{u,TR}(t_1)$, $\forall u \in U$ e $1 < tr < TR$ (ver equações II.8 e II.12)

Conhecidos estes dados, como não há defasagem temporal no trânsito da água entre os reservatórios do sistema, os termos $r_i(t_1)$ e $e_i(t_1) \forall i$ são determinados através de uma única execução de uma das três versões do algoritmo de operação.

Sistema com Defasamento Temporal entre os Reservatórios ($\gamma_i \neq 0$ para pelo menos um R_i).

Seja γ^+ a maior defasagem existente entre os reservatórios do sistema. Para a obtenção da programação dos termos $r_i(t_1)$ e $e_i(t_1) \forall i$, é necessário se executar $\gamma^+ + 1$ vezes um dos algoritmos de operação. Na primeira execução, utilizando-se as equações de balanço de massa expressas em (II.13) (equações de balanço de massa com a consideração dos defasamentos temporais), com o período $t = t_1 - \gamma^+$, tem-se as seguintes equações:

$$e_i(t_1 - \gamma^+ + \gamma_i) = e_i(t_1 - \gamma^+ + \gamma_i - 1) - \left(q_i(t_1 - \gamma^+ + \gamma_i) + \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot r_j(t_1 - \gamma^+ + \gamma_j) - r_i(t_1 - \gamma^+ + \gamma_i) \right) \cdot \Delta t, \forall i$$

Destas equações, a única que tem presente os termos $r_i(t_1)$ e $e_i(t_1)$ é a referente ao reservatório com defasagem $\gamma_i = \gamma^+$. Portanto, após a execução do modelo com estas equações, apenas a programação deste reservatório estará definida. Para a determinação das programações para o período t_1 dos demais reservatórios são necessárias as execuções do modelo, através das equações (II.13) $\forall i$, com os períodos $t = t_1 - \gamma^+ + 1, t_1 - \gamma^+ + 2, \dots$, até $t = t_1$, obtendo-se para cada um destes períodos as programações dos reservatórios R_j de defasagem $\gamma_i = \gamma^+ - 1, \gamma^+ - 2, \dots$, até $\gamma_i = 0$.

Para estas execuções do modelo de operação são necessários os seguintes dados básicos:

- espaços vazios nos inícios dos períodos $t = t_1, \dots, t_1 + \gamma_i$, $e_i(t-1)$, $\forall i$
- vazões afluentes previstas para os períodos $t = t_1, \dots, t_1 + \gamma_i$, $q_i(t)$, $\forall i$

- vazões defluentes dos períodos $t = t_1, \dots, t_1 + \gamma_i$, $r_i(t-1)$, $\forall i$, e restrições de vazões máximas e mínimas para os períodos $t = t_1, \dots, t_1 + \gamma_i$, $M_i(t)$ e $m_i(t)$, $\forall i$, (necessárias para a determinação das restrições de vazões máximas e mínimas, $M_i'(t)$ e $m_i'(t)$, decorrentes das variações máximas das vazões)
- envoltórias de espaços vazios nos sistemas parciais para os finais dos períodos $t = t_1, \dots, t_1 + \gamma_x$, $EV_{u, tr}(t)$, $\forall u \in U$ e $1 < tr < TR$ (ver equações II.27 e II.29),
onde γ_x é a defasagem do reservatório mais a jusante do sistema parcial u .

No exemplo 3, apresenta-se quais são os dados necessários para a determinação da programação da operação dos reservatórios de um sistema no qual há defasamento temporal da água entre os reservatórios.

EXEMPLO 3: Seja um sistema com apenas dois reservatórios em série, R_1 e R_2 , com tempo de viagem da água $l_{12} = 2\Delta t$. Como este é o único tempo de viagem existente no sistema, $l^+ = 2$. Conseqüentemente $\gamma_1 = 2$, $\gamma_2 = 0$ e $\gamma^+ = 2$. Para a determinação de toda a programação de um período t_1 , com a obtenção dos termos $e_1(t_1)$, $e_2(t_1)$, $r_1(t_1)$ e $r_2(t_1)$, é necessário resolver-se o problema da programação 3 vezes ($\gamma^+ + 1 = 3$). As equações de balanço de massa e as expressões das restrições referentes a cada uma das programações estão descritas a seguir.

Para a 1ª programação ($t = t_1 - 2$):

$$e_1(t_1) = e_1(t_1 - 1) + [r_1(t_1) - q_1(t_1) - r_2(t_1 - 2)] \cdot \Delta t$$

$$0 \leq e_1(t_1) \leq K_{\max i}$$

$$m_1'(t_1) \leq r_1(t_1) \leq M_1'(t_1)$$

onde

$$m_1'(t_1) = \max [m_1(t_1), (r_1(t_1-1) - dr_1)]$$

$$M_1'(t_1) = \min [M_1(t_1), (r_1(t_1-1) + dr_1)]$$

Desta programação serão obtidos os termos $e_1(t_1)$ e $r_1(t_1)$. Note que as equações referentes ao balanço de massa do reservatório R_2 não são utilizadas nesta programação, pois todos os seus termos são relativos a períodos anteriores a t_1 , já verificados.

Para a 2ª programação ($t = t_1-1$):

$$e_1(t_1+1) = e_1(t_1) + [r_1(t_1+1) - q_1(t_1+1) - r_2(t_1-1)] \cdot \Delta t$$

$$0 \leq e_1(t_1+1) \leq K_{\max 1}$$

$$m_1'(t_1+1) \leq r_1(t_1+1) \leq M_1'(t_1+1)$$

onde

$$m_1'(t_1+1) = \max [m_1(t_1+1), (r_1(t_1) - dr_1)]$$

$$M_1'(t_1+1) = \min [M_1(t_1+1), (r_1(t_1) + dr_1)]$$

Desta programação serão obtidos termos $e_1(t_1+1)$ e $r_1(t_1+1)$, que apesar de não serem referentes ao período t_1 , serão necessários para a próxima programação. Assim como na programação anterior, não foi preciso se considerar a equação de balanço do reservatório R_2 .

Para a 3ª programação ($t = t_1$):

$$e_1(t_1+2) = e_1(t_1+1) + [r_1(t_1+2) - q_1(t_1+2) - r_2(t_1)] \cdot \Delta t$$

$$e_2(t_1) = e_2(t_1-1) + [r_2(t_1) - q_2(t_1)] \cdot \Delta t$$

$$0 \leq e_1(t_1+2) \leq K_{\max 1}$$

$$0 \leq e_2(t_1) \leq K_{\max 2}$$

$$m_1'(t_1+2) \leq r_1(t_1+2) \leq M_1'(t_1+2)$$

$$m_2'(t_1) \leq r_2(t_1) \leq M_2'(t_1)$$

onde

$$m_1'(t_1+2) = \max [m_1(t_1+2), (r_1(t_1+1) - dr_1)]$$

$$M_1'(t_1+2) = \min [M_1(t_1+2), (r_1(t_1+1) - dr_1)]$$

$$m_2'(t_1) = \max [m_2(t_1), (r_2(t_1-1) - dr_2)]$$

$$M_2'(t_1) = \min [M_2(t_1), (r_2(t_1-1) + dr_2)]$$

Note que, para a determinação desta programação são necessários os valores de $e_1(t_1+1)$ e $r_1(t_1+1)$, determinados pela programação anterior. Desta programação serão obtidos os termos $e_2(t_1)$, $r_2(t_1)$, $e_1(t_1+2)$ e $r_1(t_1+2)$, sendo que estes dois últimos, caso não se disponha de previsão perfeita, deverão ser revistos nas programações dos períodos t_1+1 e t_1+2 .

Na solução através de qualquer um dos algoritmos de operação do modelo proposto, além dos termos constantes ao longo do tempo, $K_{\max i}$ e dr_i para $i=1,2$, são necessários os dados básicos listados a seguir.

Para a programação de $e_1(t_1)$ e $r_1(t_1)$:

$$e_1(t_1-1), e_2(t_1-2), q_1(t_1), r_1(t_1-1) \text{ e } r_2(t_1-2), m_1(t_1), M_1(t_1) \text{ e } EV_{u, tr}(t_1) \quad \forall u \in U$$

Para a programação de $e_1(t_1+1)$ e $r_1(t_1+1)$:

$$e_2(t_1-1), q_1(t_1+1), r_2(t_1-1), m_1(t_1+1), M_1(t_1+1), EV_{u, tr}(t_1+1) \quad \forall u \in U, \\ e_1(t_1) \text{ e } r_1(t_1)$$

sendo estes dois últimos termos provenientes da programação anterior.

Para a programação de $e_2(t_1)$, $r_2(t_1)$ e, conseqüentemente, de $e_1(t_1+2)$ e $r_1(t_1+2)$:

$$e_2(t_1-1), q_1(t_1+2), q_2(t_1), r_2(t_1-1), m_1(t_1+2), M_1(t_1+2), m_2(t_1), M_2(t_1) \\ EV_{u, tr}(t_1+2) \quad \forall u \in U, e_1(t_1+1) \text{ e } r_1(t_1+1)$$

sendo estes dois últimos termos provenientes da programação anterior.

Vale ressaltar que todos os dados básicos aqui descritos se referem a programação da operação de todos os reservatórios de um sistema num período t , imediatamente posterior ao período de elaboração da programação. A programação da operação de alguns reservatórios para períodos após t é apenas uma consequência da execução da programação para o período t . No entanto, caso se dispusesse de previsão perfeita para as afluências até os períodos $t+\gamma_i \quad \forall i$, os termos e_i e r_i programados para períodos posteriores a t não precisariam ser revistos, conseqüentemente, o algoritmo de operação só precisava ser executado uma vez para cada período programado.

CAPÍTULO IV

ESTUDO DE CASO

SISTEMA DE RESERVATÓRIOS DA BACIA DO RIO PARANÁ ATÉ JUPIÁ

IV - Introdução

Para a realização de uma aplicação prática com o modelo de programação da operação de reservatórios proposto, escolheu-se a bacia do rio Paraná até o reservatório de Jupia, que drena partes das regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, envolvendo áreas do Distrito Federal e dos estados de Minas Gerais, Góias, São Paulo e Mato Grosso do Sul. No trecho em estudo, além do rio Paraná, destacam-se como principais tributários os rios Grande, Paranaíba e Tietê. A grande potencialidade hidráulica desta bacia fez com que diversos aproveitamentos hidrelétricos fossem instalados ao longo do seu curso principal e dos seus afluentes. Dentre estes aproveitamentos, vários foram concebidos com reservatórios de regularização plurianual, fazendo com que se concentrasse nesta bacia, até o reservatório de Jupia, cerca de 82 km^3 de volume útil disponível para a acumulação de água. Na tabela IV.1 estão listadas as principais características físicas destes reservatórios.

Conforme já visto no primeiro capítulo, há duas décadas os reservatórios pertencentes aos sistemas hidrelétricos brasileiros vem sendo utilizados para o controle de cheias em seções a jusante dos mesmos (pontos de controle). Dentro deste quadro destaca-se o sistema de reservatórios da bacia do rio Paraná devido à grande quantidade de pontos de controle de cheias existentes, bem como, de reservatórios envolvidos neste tipo de operação.

O sistema considerado no planejamento da operação de controle de cheias desta bacia é formado pelos reservatórios de Furnas, Mascarenhas de Moraes, Marimbondo e Água Vermelha no rio Grande; Emborcação, Itumbiara e São Simão no rio Paranaíba; Promissão e Três Irmãos no rio Tietê e Ilha Solteira e Jupia no rio Paraná. A figura IV.1 ilustra a topologia destes reservatórios.

Tabela IV.1 - Características Físicas dos Reservatórios Localizados na Bacia do Rio Paraná até Jupia

RIO	RESERVATÓRIO	ÁREA DE DRENAGEM (Km ²)	CAPACIDADE (Km ³)	RESTRIÇÃO DE VAZÃO MÁXIMA (m ³ /s)
GRANDE	CAMARGOS	6280	0,672	400
	ITUTINGA	6280	0,007	400
	FURNAS	50460	17,217	4000
	M.MORAES	59600	2,500	4400
	ESTREITO	61940	0,178	4500
	JAGUARA	62700	0,090	4500
	VOLTA GRANDE	68100	0,268	5000
	P.COLÔMBIA	78400	0,233	7000
	MARIMBONDO	116700	5,260	8000
	A.VERMELHA	139900	5,169	-
PARDO	CACONDE	2570	0,504	-
	E. DA CUNHA	4370	0,005	-
	LIMOEIRO	4450	0,016	-
PARANAÍBA	EMBORCAÇÃO	29300	12,521	5000
	ITUMBIARA	95000	12,454	7000
	C. DOURADA	98970	0,150	-
	SÃO SIMÃO	171000	5,540	16000
TIETÊ	BARRA BONITA	32330	2,566	1800
	BARIRI	35430	0,060	-
	IBITINGA	43500	0,056	-
	PROMISSÃO	57610	2,128	-
	N.AVANHANDAVA	62300	0,380	-
	TRÊS IRMÃOS	69900	3,440	-
PARANÁ	ILHA SOLTEIRA	375460	12,828	-
	JUPIÁ	471670	1,230	16000

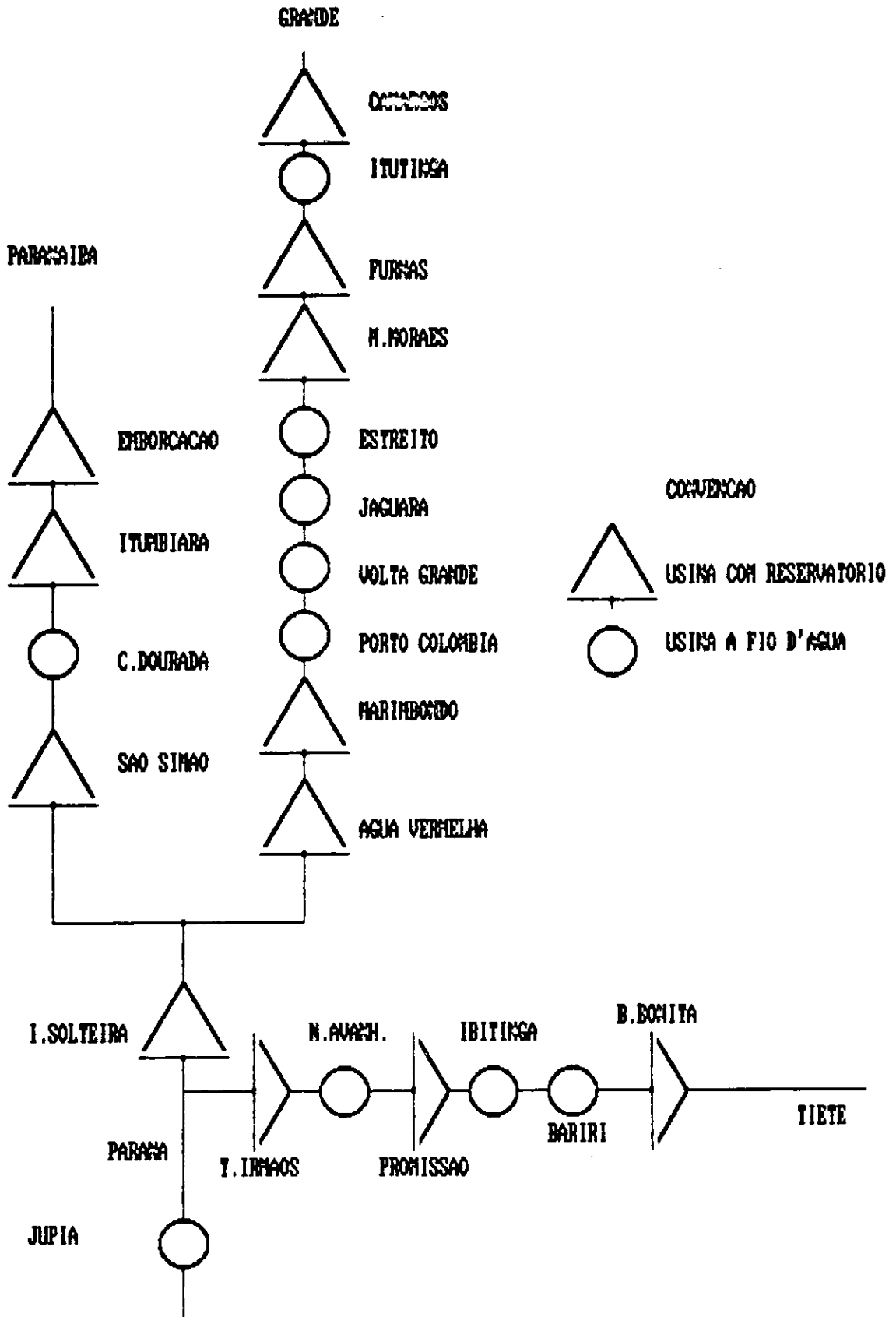


Figura IV.1 - Sistema de Reservatórios da Bacia do Rio Paraná até Jupia

A jusante de Jupia existe uma severa restrição de vazão máxima, cujo valor, considerado em condições naturais, ou seja, sem qualquer regularização, corresponde a um tempo de retorno da ordem de apenas 2 anos. Como este aproveitamento é a fio d'água, a capacidade de seu reservatório é insuficiente para a acumulação de cheias da magnitude das que ocorrem neste trecho. Desta forma, é necessário se alocar nos reservatórios de montante o volume vazio determinado para a proteção da restrição a jusante de Jupia. Na fase de planejamento da operação são estabelecidos os critérios para esta alocação, bem como são elaboradas as regras de operação, que consideram os reservatórios operando de forma integrada para o controle de cheias em seus próprios pontos de controle e no ponto de controle a jusante de Jupia. Este é um típico problema de controle de cheias em sistema multireservatório com múltiplos pontos de controle de cheias e com vazões mínimas. As vazões mínimas, neste caso, são definidas pela necessidade de geração de energia elétrica.

A realização deste estudo de caso visa avaliar o desempenho, em termos de proteção contra inundação, das regras do modelo de operação proposto. A fim de mostrar o estado das regras operativas atualmente adotadas nesta bacia, é feita também uma avaliação do desempenho das mesmas. Neste capítulo, inicialmente é apresentada uma descrição sucinta das regras atuais. Em seguida são mostradas as simulações da operação de controle de cheias no sistema de reservatórios desta bacia tanto com estas regras como com o modelo proposto. Nas simulações com este último foram consideradas as três opções apresentadas no capítulo III, as opções paralelo, jusante e risco. Após a apresentação dos resultados destas simulações, finalmente, faz-se uma análise do desempenho das várias regras utilizadas.

IV.2 - Descrição das Regras Atuais de Operação de Controle de Cheias

Os procedimentos atualmente adotados para o controle de cheias na bacia do rio Paraná, descritos em SCO [12], se referem a dois tipos de operação diferentes: operação normal e operação em emergência. A execução das regras de operação normal se dá em situações onde não há perspectivas de esgotamento dos volumes de espera alocados e, conseqüentemente, não há necessidade de se programar defluências nos reservatórios superiores às suas restrições de vazão máxima. Quando os estados de armazenamento dos reservatórios aliados a situação hidrológica na bacia indicam, através de diagramas de operação em emergência (Corps of Engineers 13)], que o esgotamento dos volumes de espera alocados é iminente, passa-se dos procedimentos de operação normal para os de

operação em emergência, nos quais as restrições de vazões máximas são relaxadas a fim de evitar a superação dos níveis máximos de armazenamento nos reservatórios, o que poderia provocar o galgamento e até mesmo o rompimento de barragens.

A descrição das regras atuais, que se segue, contempla apenas os procedimentos da operação normal, pois os da operação em emergência, apesar de serem importantes, não interferem no desempenho em relação à proteção contra inundações, já que só são utilizados quando as inundações nos pontos de controle são inevitáveis.

Para a operação integrada de controle de cheias a jusante de Jupia são considerados quatro subsistemas de reservatórios: subsistemas Paranaíba, formado pelos reservatórios de Emborcação, Itumbiara e São Simão; subsistema Grande, formado pelos reservatórios de Furnas, Mascarenhas de Moraes, Marimondo e Água Vermelha; subsistema Ilha Solteira/Três Irmãos, constituído pelos reservatórios de mesmos nomes; e subsistema Tietê, constituído apenas pelo reservatório de Promissão. Os volumes de espera determinados em cada reservatório para a proteção do ponto de controle a jusante de Jupia são totalizados por subsistema e divididos em três parcelas, denominadas 1º, 2º e 3º segmentos. No caso do subsistema Tietê, seu volume de espera total está contido integralmente no 3º segmento, e conseqüentemente o 1º e 2º segmentos apresentam valores nulos.

Os volumes de espera determinados para cada reservatório do sistema, visando a proteção do ponto de controle a jusante de Jupia, são considerados suficientes para a proteção dos próprios pontos de controle existentes a jusante desses reservatórios, com exceção dos existentes a jusante de Itumbiara e Mascarenhas de Moraes. Por esta razão, nestes dois reservatórios são consideradas ainda parcelas adicionais de volumes de espera, denominadas volumes de espera próprios, que se destinam apenas à proteção dos pontos de controle imediatamente a jusante destes reservatórios.

Vale mencionar que os reservatórios de Camargos e Barra Bonita não participam desta operação integrada de controle de cheias a jusante de Jupia por terem capacidades suficientes apenas para a proteção de pontos de controle de cheia situados imediatamente a jusante dos mesmos.

Seguindo as regras da operação normal desta bacia, os volumes de espera alocados nos reservatórios só podem ser ocupados em duas situações: se a afluência ao

sistema de reservatórios até Jupia for maior que a restrição de vazão máxima de Jupia, ou se a afluência a um reservatório for maior que a sua própria restrição de vazão máxima. Vale destacar, que no primeiro caso, só poderá ser ocupado o volume de espera alocado em cada reservatório para a proteção a jusante de Jupia, devendo ser preservados os volumes de espera próprios de Itumbiara e Mascarenhas de Moraes. Nos dois casos, a ocupação dos volumes de espera é feita programando-se defluências com valores iguais ou inferiores às suas restrições de vazões máximas, a não ser que o sistema entre na operação em emergência.

A forma de ocupação do volume de espera alocado para a proteção a jusante de Jupia é definida pela sequência descrita a seguir:

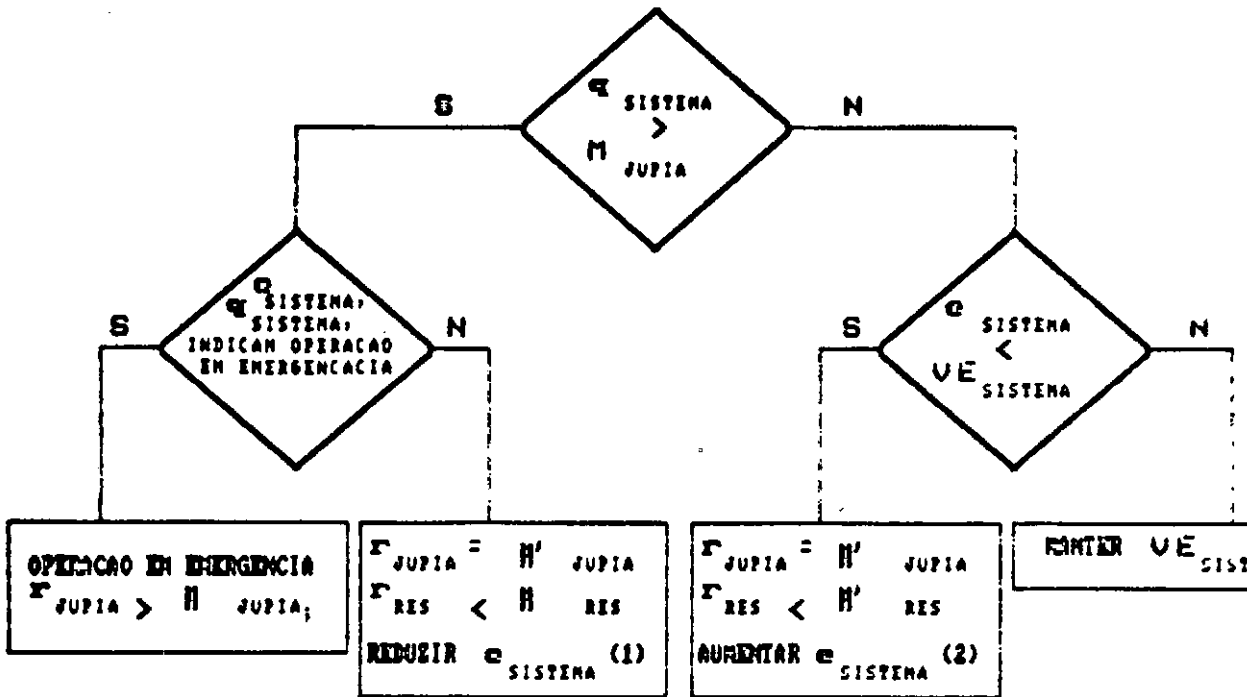
- 1ª etapa - 1º segmento dos subsistemas Paranaíba e Grande
- 2ª etapa - 1º segmento do subsistema Ilha Solteira/Três Irmãos
- 3ª etapa - 2º segmento dos subsistemas Paranaíba e Grande
- 4ª etapa - 2º segmento do subsistema Ilha Solteira/Três Irmãos
- 5ª etapa - 3º segmento dos subsistemas Paranaíba e Grande
- 6ª etapa - 3º segmento dos subsistemas Ilha Solteira/Três Irmãos e Tietê

Em cada uma destas etapas, a ocupação dos volumes de espera dos reservatórios pertencentes aos subsistemas considerados deve ser feita em paralelo, de forma que os percentuais de ocupação dos volumes de espera sejam mantidos iguais.

Após a ocorrência de uma cheia, quando a afluência ao sistema alcançar valores abaixo da restrição de vazão máxima em Jupia, deve-se manter a defluência do sistema igual a restrição de Jupia a fim de recuperar a alocação dos volumes de espera. Nesta situação a sequência de esvaziamento dos subsistemas deve seguir uma ordem inversa à da ocupação. Quando se iniciar a recuperação dos 1º segmentos dos subsistemas, pode-se gradativamente reduzir a defluência de Jupia para valores inferiores à restrição de vazão máxima.

Vale mencionar que todas estas operações estão sujeitas às restrições de taxas máximas de variação para as vazões defluentes dos reservatórios.

A seguir, na figura IV.2, é apresentado um fluxograma dos procedimentos para a operação integrada de controle de cheias.



- Q_{SISTEMA} = AFLUENCIA AO SISTEMA ATÉ JUPIÁ
 e_{SISTEMA} = ESPAÇO VAZIO TOTAL EM TODOS OS SUBSISTEMAS
 VE_{SISTEMA} = VOLUME DE ESPERA META PARA O SISTEMA
 r_{JUPIA} = DEFLUENCIA PROGRAMADA PARA JUPIÁ
 H_{JUPIA} = RESTRIÇÃO DE VAZÃO MÁXIMA DE JUPIÁ
 H'_{JUPIA} = RESTRIÇÃO DE VAZÃO MÁXIMA DE JUPIÁ (CONSIDERANDO A TAXA MÁXIMA DE VARIACÃO DAS VAZÕES)
 r_{RES} = DEFLUENCIA PROGRAMADA PARA OS DEMAIS RESERVATÓRIOS
 H'_{RES} = RESTRIÇÃO DE VAZÃO MÁXIMA DOS DEMAIS RESERVATÓRIOS (CONSIDERANDO AS TAXAS MÁXIMAS DE VARIACÃO DAS VAZÕES)
 (1) SEGUIR A SEQUÊNCIA DE OCUPAÇÃO DA 1ª ETAPA À 6ª ETAPA
 (2) SEGUIR A SEQUÊNCIA DE ESVAZIAMENTO DA 6ª ETAPA À 1ª ETAPA

Figura IV.2 - Fluxograma da Operação Integrada dos Reservatórios da Bacia do Rio Paraná até Jupiá

IV.3 - Simulações da Operação de Controle de Cheias

O sistema de reservatórios utilizado nestas simulações é o mesmo já apresentado neste capítulo como o considerado no planejamento da operação de controle de cheias desta bacia, a não ser pela presença do reservatório de Três Irmãos, que, em razão da indisponibilidade de séries de vazões neste local, teve de ser descartado desta aplicação. Portanto, para efeito das simulações com as regras atuais, o subsistema Ilha Solteira/Três Irmãos é composto apenas pelo reservatório de Ilha Solteira. Vale mencionar que até a estação chuvosa 1990/1991, quando o reservatório de Três Irmãos ainda não havia entrado em operação, esta era a configuração considerada do sistema.

A experiência adquirida nesta bacia ao longo das últimas décadas indica que o intervalo de decisão adequado para a programação da operação de reservatórios para o controle de cheias deve ser de um dia, o qual foi adotado nestas simulações.

Para a realização da programação da operação são necessárias as previsões de afluências incrementais aos reservatórios. Porém, como os processos de previsão são sempre sujeitos a erros, para que pudesse ser feita uma avaliação do desempenho das regras operativas isenta dos erros associados a previsão, considerou-se que dispõe-se, para cada período programado, da previsão perfeita das afluências. Para tanto foram utilizados dois blocos de 1000 séries sintéticas de vazões afluentes incrementais diárias a cada um dos 10 reservatórios do sistema considerado. Para a geração destas séries sintéticas de vazões diárias foi utilizado o modelo DIANA (Kelman et al [14]). Para a obtenção das envoltórias de volumes vazios necessários nos sistemas parciais, através da expressão (III.1), foi utilizado o primeiro bloco de séries sintéticas.

O tempo de retorno meta adotado em todas as simulações para a proteção contra inundações no sistema como um todo foi de 35 anos, o que representa a não proteção de 29 séries numa simulação com 1000 séries.

O valor de Δr adotado no terceiro procedimento dos algoritmos de operação, em função dos recursos computacionais disponíveis, foi de cerca de $115 \text{ m}^3/\text{s}$.

Os tempos de viagem da água, l_{ij} , entre todos os reservatórios deste sistema e o reservatório de Jupia estão listados na tabela IV.2. Estes valores foram considerados nesta

aplicação, tanto para efeito de determinação das envoltórias como para a realização das simulações.

Tabela IV.2 -Tempo de Viagem da Água Considerados nas Simulações

RESERVATÓRIO	TEMPO DE VIAGEM DA ÁGUA ATÉ JUPIA (dias)
FURNAS	2
M. MORAES	2
MARIMBONDO	1
A. VERMELHA	1
EMBORCAÇÃO	2
ITUMBIARA	1
SÃO SIMÃO	1
I. SOLTEIRA	0
PROMISSÃO	1
JUPIÁ	0

Vale ainda ressaltar, que nas simulações efetuadas com todos os conjuntos de regras, os volumes vazios necessários ao controle de cheias foram sempre os determinados pelas condições de controlabilidade, mesmo nas simulações com as regras atuais, que na realidade utilizam um outro método de cálculo, conforme já visto no primeiro capítulo. Como a execução de simulações com estas regras visava a realização de uma análise comparativa das regras operativas, foi necessário compatibilizar os métodos de cálculo dos volumes vazios.

A fim de possibilitar, posteriormente, uma ampla análise dos resultados destas simulações, além das restrições realmente existentes na bacia, que caracterizam o caso I de restrições adotadas nas simulações, foram considerados outros casos de restrições, onde nem sempre os limites adotados são factíveis para esta bacia. A seguir são descritas as restrições adotadas em todos os casos considerados nas simulações:

CASO I

As restrições de vazões mínimas, $m_i \forall i$, foram definidas pelos valores de vazão turbinada mínima para a geração de energia elétrica em cada reservatório.

As restrições de vazões máximas, $M_i \forall i$, foram definidas pelas vazões associadas aos níveis d'água máximos que não provocam danos em seções a jusante dos reservatórios. Os valores adotados são os atualmente utilizados na programação da operação de controle de cheias dos aproveitamentos da bacia do rio Paraná.

As variações máximas das vazões defluentes, $dr_i \forall i$, adotadas neste caso, também são as atualmente utilizadas na programação.

As capacidades máximas dos reservatórios para alocação de volumes vazios, $K_{\max i} \forall i$, foram definidas por suas próprias capacidades, K_i , ou seja, considerou-se que toda a faixa operativa dos reservatórios pode ser utilizada, se preciso for, para a operação de controle de cheias. Devido a pequena capacidade de Jupia para a magnitude de suas vazões afluentes, a sua capacidade máxima foi adotada como nula.

Tabela IV.3 - Restrições Adotadas nas Simulações - CASO I

RESERVATÓRIOS	m (m ³ /s)	M (m ³ /s)	dr (m ³ /s)	K _{max} (Km ³)
FURNAS	760	4000	2000	17,217
M. MORAES	830	4400	2000	2,500
MARIMBONDO	1390	8000	2000	5,260
A. VERMELHA	1580	∞	2000	5,169
EMBORCAÇÃO	360	5000	2500	12,521
ITUMBIARA	1120	7000	2500	12,454
SÃO SIMÃO	1710	16000	2500	5,540
I. SOLTEIRA	3890	∞	2000	12,828
PROMISSÃO	240	∞	1800	2,128
JUPIÁ	4330	16000	2000	0,000

CASO II

Idem caso I, com as variações máximas das vazões defluentes, $dr_i \forall_i$, iguais a zero.

Tabela IV.4 - Restrições Adotadas nas Simulações - CASO II

RESERVATÓRIOS	m (m ³ /s)	M (m ³ /s)	dr (m ³ /s)	K _{max} (Km ³)
FURNAS	760	4000	0	17,217
M. MORAES	830	4400	0	2,500
MARIMBONDO	1390	8000	0	5,260
A. VERMELHA	1580	∞	0	5,169
EMBORCAÇÃO	360	5000	0	12,521
ITUMBIARA	1120	7000	0	12,454
SÃO SIMÃO	1710	16000	0	5,540
I.SOLTEIRA	3890	∞	0	12,828
PROMISSÃO	240	∞	0	2,128
JUPIÁ	4330	16000	0	0,000

CASO III

Idem CASO II, com restrições de vazões mínimas, $m_i \forall_i$, iguais a zero.

Tabela IV-5 - Restrições Adotadas nas Simulações - CASO III

RESERVATÓRIOS	m (m ³ /s)	M (m ³ /s)	dr (m ³ /s)	K _{max} (Km ³)
FURNAS	0	4000	0	17,217
M. MORAES	0	4400	0	2,500
MARIMBONDO	0	8000	0	5,260
A. VERMELHA	0	∞	0	5,169
EMBORCAÇÃO	0	5000	0	12,521
ITUMBIARA	0	7000	0	12,454
SÃO SIMÃO	0	16000	0	5,540
I.SOLTEIRA	0	∞	0	12,828
PROMISSÃO	0	∞	0	2,128
JUPIÁ	0	16000	0	0,000

CASO IV

Idem CASO II, com restrições de vazões máximas, $M_i \forall i$, para todos os reservatórios, exceto Água Vermelha, I.Solteira e Promissão, definidas pelas vazões máximas anuais de recorrência igual a 10 anos.

Tabela IV.6 - Restrições Adotadas nas Simulações - CASO IV

RESERVATÓRIOS	m (m ³ /s)	M (m ³ /s)	dr (m ³ /s)	K _{max} (Km ³)
FURNAS	760	4535	0	17,217
M. MORAES	830	4732	0	2,500
MARIMBONDO	1390	8281	0	5,260
A. VERMELHA	1580	∞	0	5,169
EMBORCAÇÃO	360	3634	0	12,521
ITUMBIARA	1120	8297	0	12,454
SÃO SIMÃO	1710	10941	0	5,540
I.SOLTEIRA	3890	∞	0	12,828
PROMISSÃO	240	∞	0	2,128
JUPIÁ	4330	24124	0	0,000

CASO V

Idem CASO II, sem restrições de vazões máximas, M_i , para todos os reservatórios exceto Jupia.

Tabela IV.7 - Restrições Adotadas nas Simulações - CASO V

RESERVATÓRIOS	m (m ³ /s)	M (m ³ /s)	dr (m ³ /s)	K _{max} (Km ³)
FURNAS	760	∞	0	17,217
M. MORAES	830	∞	0	2,500
MARIMBONDO	1390	∞	0	5,260
A. VERMELHA	1580	∞	0	5,169
EMBORCAÇÃO	360	∞	0	12,521
ITUMBIARA	1120	∞	0	12,454
SÃO SIMÃO	1710	∞	0	5,540
I.SOLTEIRA	3890	∞	0	12,828
PROMISSÃO	240	∞	0	2,128
JUPIÁ	4330	16000	0	0,000

CASO VI

Idem CASO II, com as capacidades máximas para alocação de volumes vazios, $K_{max\ i}$, dos reservatórios de Furnas, Água Vermelha, Emborcação e São Simão, diferentes de K_i .

Tabela IV.8 - Restrições Adotadas nas Simulações - CASO VI

RESERVATÓRIOS	m (m ³ /s)	M (m ³ /s)	dr (m ³ /s)	K _{max} (Km ³)
FURNAS	760	4000	0	5,169
M. MORAES	830	4400	0	2,500
MARIMBONDO	1390	8000	0	5,260
A. VERMELHA	1580	∞	0	17,217
EMBORCAÇÃO	360	5000	0	5,540
ITUMBIARA	1120	7000	0	12,454
SÃO SIMÃO	1710	16000	0	12,521
I.SOLTEIRA	3890	∞	0	12,828
PROMISSÃO	240	∞	0	2,128
JUPIÁ	4330	16000	0	0,000

CASO VII

Idem CASO II, com as capacidades máximas para alocação de volumes vazios, K_{max} i, infinitas.

Tabela IV.9 - Restrições Adotadas nas Simulações - CASO VII

RESERVATÓRIOS	m (m ³ /s)	M (m ³ /s)	dr (m ³ /s)	K _{max} (Km ³)
FURNAS	760	4000	0	∞
M. MORAES	830	4400	0	∞
MARIMBONDO	1390	8000	0	∞
A. VERMELHA	1580	∞	0	∞
EMBORCAÇÃO	360	5000	0	∞
ITUMBIARA	1120	7000	0	∞
SÃO SIMÃO	1710	16000	0	∞
I.SOLTEIRA	3890	∞	0	∞
PROMISSÃO	240	∞	0	∞
JUPIÁ	4330	16000	0	∞

Os três primeiros casos de restrições (I, II, III) foram adotados em simulações com todas as quatro regras operativas consideradas nesta aplicação, enquanto os casos (IV e V) foram utilizados apenas nas simulações com o modelo proposto. Os demais casos (VI e VII) só foram adotados em simulações com uma das regras do modelo proposto. Em todas estas simulações foi utilizado o 1º bloco de séries sintéticas (1 a 1000). Com o 2º bloco (1001 a 2000) foram repetidas apenas as simulações realizadas com os casos II e III de restrições. O número total de simulações foi 28.

Nos resultados apresentados a seguir, da tabela IV.10 à tabela IV.37, são mostrados os números de séries com inundações nos pontos de controle existentes a jusante de cada reservatório e no sistema como um todo. A fim de permitir uma melhor avaliação da intensidade das inundações, foram também mostrados os números de inundações, cujas vazões máximas observadas ultrapassaram em 1% e 5% as restrições de vazões máximas de cada ponto de controle.

IV.3.1 -Resultados das Simulações da Operação com as Regras Atuais

Tabela IV.10 -Simulação da Operação com as Regras Atuais e Restrições do CASO I (séries: 1 a 1000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	30	30	29
M. MORAES	15	14	13
MARIMBONDO	8	8	8
EMBORCAÇÃO	12	12	10
ITUMBIARA	22	21	17
SÃO SIMÃO	2	1	0
JUPIÁ	37	35	32
SISTEMA	70	66	59

Tabela IV.11 -Simulação da Operação com as Regras Atuais e Restrições do CASO II (séries: 1 a 1000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	29	29	27
M. MORAES	11	11	11
MARIMBONDO	8	8	8
EMBORCAÇÃO	10	10	9
ITUMBIARA	16	16	13
SÃO SIMÃO	0	0	0
JUPIÁ	35	30	28
SISTEMA	60	55	51

Tabela IV.12 -Simulação da Operação com as Regras Atuais e Restrições do CASO II (séries: 1001 a 2000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	16	16	15
M. MORAES	6	6	6
MARIMBONDO	4	3	7
EMBORCAÇÃO	10	9	11
ITUMBIARA	11	11	0
SÃO SIMÃO	1	1	0
JUPIÁ	23	21	18
SISTEMA	44	42	36

Tabela IV.13 -Simulação da Operação com as Regras Atuais e Restrições do CASO III (séries: 1 a 1000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	26	26	25
M. MORAES	11	11	11
MARIMBONDO	10	9	9
EMBORCAÇÃO	10	10	9
ITUMBIARA	19	19	16
SÃO SIMÃO	1	0	0
JUPIÁ	35	31	26
SISTEMA	55	52	46

Tabela IV.14 -Simulação da Operação com as Regras Atuais e Restrições do CASO III (séries: 1001 a 2000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	14	14	14
M. MORAES	6	6	6
MARIMBONDO	6	4	4
EMBORCAÇÃO	10	10	9
ITUMBIARA	10	10	10
SÃO SIMÃO	1	1	0
JUPIÁ	20	19	19
SISTEMA	38	37	36

IV.3.2 -Resultados das Simulações da Operação com o Modelo Proposto

Tabela IV.15 -Simulação da Operação com Modelo Proposto (OPÇÃO PARALELO) e Restrições do CASO I (séries: 1 a 1000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	23	23	23
M. MORAES	17	16	13
MARIMBONDO	10	10	8
EMBORCAÇÃO	1	1	1
ITUMBIARA	21	21	20
SÃO SIMÃO	3	2	1
JUPIÁ	50	49	46
SISTEMA	57	56	54

Tabela IV.16 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO PARALELO) e Restrições do CASO II (séries: 1 a 1000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	15	15	14
M. MORAES	14	13	11
MARIMBONDO	10	10	9
EMBORCAÇÃO	0	0	0
ITUMBIARA	20	18	18
SÃO SIMÃO	2	1	0
JUPIÁ	36	36	36
SISTEMA	37	37	37

Tabela IV.17 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO PARALELO) e Restrições do CASO II (séries: 1001 a 2000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	9	9	7
M. MORAES	7	6	5
MARIMBONDO	3	3	2
EMBORCAÇÃO	3	3	3
ITUMBIARA	16	16	14
SÃO SIMÃO	2	2	2
JUPIÁ	38	38	37
SISTEMA	39	39	38

Tabela IV.18 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO PARALELO) e Restrições do CASO III (séries: 1 a 1000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	15	15	15
M. MORAES	14	14	13
MARIMBONDO	10	10	9
EMBORCAÇÃO	0	0	0
ITUMBIARA	21	21	19
SÃO SIMÃO	4	3	3
JUPIÁ	32	32	31
SISTEMA	33	33	32

Tabela IV.19 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO PARALELO) e Restrições do CASO III (séries: 1001 a 2000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	11	11	9
M. MORAES	8	8	7
MARIMBONDO	3	3	3
EMBORCAÇÃO	3	3	2
ITUMBIARA	16	16	15
SÃO SIMÃO	2	2	2
JUPIÁ	25	25	25
SISTEMA	37	37	36

Tabela IV.20 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO PARALELO) e Restrições do CASO IV.

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	28	25	19
M. MORAES	18	18	17
MARIMBONDO	16	16	14
EMBORCAÇÃO	14	14	14
ITUMBIARA	15	15	13
SÃO SIMÃO	24	24	22
JUPIÁ	33	31	29
SISTEMA	51	46	40

Tabela IV.21 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO PARALELO) e Restrições do CASO V (séries: 1 a 1000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
JUPIÁ	36	36	36
SISTEMA	36	36	36

Tabela IV.22 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO PARALELO) e Restrições do CASO VI (séries: 1 a 1000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	18	18	16
M. MORAES	14	13	12
MARIMBONDO	10	10	9
EMBORCAÇÃO	1	1	0
ITUMBIARA	23	23	21
SÃO SIMÃO	5	4	3
JUPIÁ	37	37	37
SISTEMA	40	40	40

Tabela IV.23 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO JUSANTE) e Restrições do CASO I (séries: 1 a 1000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	31	30	30
M. MORAES	20	20	18
MARIMBONDO	10	10	9
EMBORCAÇÃO	5	5	4
ITUMBIARA	41	40	34
SÃO SIMÃO	5	3	2
JUPIÁ	54	54	47
SISTEMA	82	80	70

Tabela IV.24 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO JUSANTE) e Restrições do CASO II (séries: 1 a 1000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	22	21	17
M. MORAES	16	15	13
MARIMBONDO	10	10	9
EMBORCAÇÃO	4	4	3
ITUMBIARA	28	27	26
SÃO SIMÃO	5	3	2
JUPIÁ	35	34	34
SISTEMA	50	48	45

Tabela IV.25 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO JUSANTE) e Restrições do CASO II (séries: 1001 a 2000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	22	22	19
M. MORAES	16	15	12
MARIMBONDO	4	4	4
EMBORCAÇÃO	13	13	9
ITUMBIARA	28	26	22
SÃO SIMÃO	2	2	2
JUPIÁ	36	36	33
SISTEMA	62	62	53

Tabela IV.26 - Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO JUSANTE) e Restrições do CASO III (séries: 1 a 1000).

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	22	21	19
M. MORAES	16	16	15
MARIMBONDO	10	10	10
EMBORCAÇÃO	4	4	3
ITUMBIARA	30	29	29
SÃO SIMÃO	5	3	2
JUPIÁ	32	32	30
SISTEMA	49	47	42

Tabela IV.27 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO JUSANTE) e Restrições do CASO III (séries: 1001 a 2000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	27	26	21
M. MORAES	18	18	15
MARIMBONDO	4	4	4
EMBORCAÇÃO	15	15	9
ITUMBIARA	30	30	23
SÃO SIMÃO	2	2	2
JUPIÁ	35	35	34
SISTEMA	64	64	53

Tabela IV.28 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO JUSANTE) e Restrições do CASO IV (séries: 1 a 1000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	32	28	22
M. MORAES	18	18	18
MARIMBONDO	16	16	13
EMBORCAÇÃO	16	15	14
ITUMBIARA	18	16	13
SÃO SIMÃO	29	28	24
JUPIÁ	32	30	29
SISTEMA	60	53	46

Tabela IV.29 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO JUSANTE) e Restrições do CASO V (séries: 1 a 1000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
JUPIÁ	29	29	29
SISTEMA	29	29	29

Tabela IV.30 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO JUSANTE) e Restrições do CASO VII (séries: 1 a 1000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	20	19	17
M. MORAES	18	15	13
MARIMBONDO	10	10	9
EMBORCAÇÃO	4	4	3
ITUMBIARA	29	28	26
SÃO SIMÃO	5	3	2
JUPIÁ	37	37	36
SISTEMA	50	47	45

Tabela IV.31 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO RISCO) e Restrições do CASO I (séries: 1 a 1000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	22	22	20
M. MORAES	15	15	12
MARIMBONDO	9	9	9
EMBORCAÇÃO	2	2	1
ITUMBIARA	21	21	19
SÃO SIMÃO	2	2	1
JUPIÁ	55	55	49
SISTEMA	62	62	55

Tabela IV.32 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO RISCO) e Restrições do CASO II (séries: 1 a 1000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	14	14	14
M. MORAES	13	12	10
MARIMBONDO	9	9	9
EMBORCAÇÃO	0	0	0
ITUMBIARA	20	19	18
SÃO SIMÃO	2	2	1
JUPIÁ	40	40	38
SISTEMA	41	41	39

Tabela IV.33 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO RISCO) e Restrições do CASO II (séries: 1001 a 2000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	12	12	10
M. MORAES	8	7	6
MARIMBONDO	3	3	2
EMBORCAÇÃO	3	3	3
ITUMBIARA	15	15	14
SÃO SIMÃO	2	2	2
JUPIÁ	41	41	36
SISTEMA	44	44	39

Tabela IV.34 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO RISCO) e Restrições do CASO III(séries: 1 a 1000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	15	15	14
M. MORAES	14	13	12
MARIMBONDO	10	10	9
EMBORCAÇÃO	0	0	0
ITUMBIARA	21	19	19
SÃO SIMÃO	3	1	1
JUPIÁ	36	34	34
SISTEMA	37	37	35

Tabela IV.35 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO RISCO) e Restrições do CASO III (séries: 1001 a 2000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	11	11	9
M. MORAES	9	9	8
MARIMBONDO	3	3	2
EMBORCAÇÃO	3	3	3
ITUMBIARA	17	17	15
SÃO SIMÃO	2	2	2
JUPIÁ	36	36	34
SISTEMA	38	38	36

Tabela IV.36 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO RISCO) e Restrições do CASO IV (séries: 1 a 1000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
FURNAS	17	17	16
M. MORAES	17	17	17
MARIMBONDO	17	17	14
EMBORCAÇÃO	12	12	12
ITUMBIARA	15	15	13
SÃO SIMÃO	25	24	22
JUPIÁ	35	34	30
SISTEMA	41	39	35

Tabela IV.37 -Simulação da Operação com o Modelo Proposto (OPÇÃO RISCO) e Restrições do CASO V (séries: 1 a 1000)

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	> 1,00 M	>1,01 M	>1,05 M
JUPIÁ	37	37	36
SISTEMA	37	37	36

IV.4 - Análise dos Resultados

A adoção do tempo de retorno meta de 35 anos, para a proteção dos pontos de controle do sistema, indica, a princípio, que o número de inundações que deveriam ocorrer durante a operação com 1000 séries de defluências, seria em média igual a 29. No entanto, conforme visto no capítulo III, o alcance deste desempenho não é garantido num ambiente estocástico. Desta forma, os resultados alcançados nas simulações realizadas mostram números de ocorrências de inundações quase sempre superiores a este valor.

A fim de facilitar a análise dos resultados apresenta-se a seguir as tabelas IV.38 e IV.39 com os resultados das simulações para todos os casos de restrições e para todas as regras operativas utilizadas. Nestas tabelas mostra-se apenas os números de séries com inundações no sistema nas quais as vazões máximas ocorridas ficaram 1% acima das restrições de vazões máximas.

Tabela IV.38 -Número de Inundações nas Simulações com o 1º Bloco de Séries Sintéticas (séries: 1 a 1000)

CASO DE RESTRIÇÕES	REGRAS ATUAIS	MODELO PROPOSTO		
		OPÇÃO PARALELO	OPÇÃO JUSANTE	OPÇÃO RISCO
I	66	56	80	62
II	55	37	48	41
III	52	33	47	37
IV	-	40	53	39
V	-	36	29	37
VI	-	40	-	-
VII	-	-	47	-

Tabela IV.39 -Número de Inundações nas Simulações com o 2º Bloco de Séries Sintéticas (séries: 1001 a 2000)

CASO DE RESTRIÇÕES	REGRAS ATUAIS	MODELO PROPOSTO		
		OPÇÃO PARALELO	OPÇÃO JUSANTE	OPÇÃO RISCO
II	42	39	62	44
III	37	37	64	38

Os resultados constantes destas tabelas indicam, numa avaliação global, que o desempenho do modelo proposto sob a opção PARALELO foi o que mais se aproximou do desempenho meta, de apenas 29 inundações. As regras do modelo proposto sob esta opção obtiveram o melhor desempenho dentre todos os conjuntos de regras consideradas com as restrições dos casos I, II e III. Nas simulações com estes dois últimos casos de restrições, mesmo quando as séries de afluições utilizadas foram as do 2º bloco (séries diferentes das que serviram de base para o cálculo das envoltórias), aquelas regras foram as que apresentaram melhor desempenho.

Entretanto, algumas observações sobre os resultados obtidos ainda merecem ser consideradas:

Dentre as demais regras operativas, aquelas que tiveram um desempenho global mais próximo do desempenho das regras presentes na opção PARALELO foram as regras da opção RISCO do modelo proposto.

Nas simulações onde foram consideradas as restrições de variações máximas das vazões (CASO I), os números de inundações ficaram muito acima dos obtidos em simulações sem estas restrições. Isto se deve a não consideração destas restrições na determinação das envoltórias obtidas pelas condições de controlabilidade.

No caso de adoção de restrições de vazões mínimas sem as variações máximas de vazões (CASO II), os resultados demonstram que os números de inundações ficaram acima dos obtidos nas simulações com a consideração de vazões mínimas nulas (CASO III). Desta vez, como ambos os casos foram considerados na determinação das envoltórias utilizadas, a única justificativa possível é a de que a adoção de vazões mínimas não nulas representa mais uma restrição para o problema da programação da operação, o que torna a sua solução mais difícil e, conseqüentemente, mais vulnerável a erros.

Em praticamente todos os resultados das simulações, o número de inundações observadas, no ponto de controle a jusante de Jupia, foi muito superior aos verificados nos demais pontos de controle. Contudo, nas simulações com as restrições do caso IV, no qual todas as restrições de vazões máximas adotadas têm aproximadamente 10 anos de tempo de retorno, observou-se que o número de inundações tornou-se mais uniforme ao longo dos pontos de controle de cheias da bacia. Desta forma, pode-se concluir que a heterogeneidade

das recorrências das restrições de vazões máximas consideradas contribui para dificultar o alcance de um desempenho uniforme ao longo da bacia.

Mesmo com a adoção do caso de restrições IV, apesar de se conseguir uma maior homogeneidade do controle de cheias ao longo do sistema, o número de inundações a jusante de Jupia continuou a ser quase sempre maior que a jusante dos demais pontos de controle de cheias. A razão para este fato parece provir de um defeito no processo de determinação das envoltórias. Conforme já visto no capítulo III, quando as envoltórias de espaços vazios dos sistemas parciais são elaboradas, adota-se como base para a escolha das séries a serem descartadas, apenas as trajetórias de volumes vazios do sistema parcial mais geral. Como este descarte de séries é estendido para os demais sistemas parciais, muitas vezes são retiradas destes, séries pouco expressivas em termos de cheias, fazendo com que outras séries mais molhadas sejam mantidas como protegidas. Desta forma, enquanto a envoltória no sistema parcial mais geral realmente protege um número de séries compatível com o tempo de retorno, as envoltórias associadas a este mesmo tempo de retorno, em outros sistemas parciais, geralmente protegem um número de séries maior.

Neste estudo de caso, como o exutório do sistema parcial mais geral é o reservatório de Jupia, pode-se atribuir àquele defeito o fato do maior número de inundações ocorrer quase sempre a jusante deste reservatório. No entanto, cabe esclarecer que durante a elaboração das envoltórias do sistema parcial mais geral, o número de séries protegidas é no mínimo igual ao número dado pelo tempo de retorno associado às envoltórias. Sendo assim, a constatação de que o número de inundações a jusante de Jupia é sempre maior que nos demais pontos de controle deve-se na verdade à adoção de uma proteção maior que a planejada nestes pontos.

Quando foram excluídas as restrições de vazões máximas de todos os reservatórios localizados a montantes de Jupia (CASO V), o número de inundações observadas na simulação com o modelo proposto sob a opção JUSANTE, saltou para apenas 29, que representa o desempenho ideal para o tempo de retorno adotado. As regras apresentadas nesta opção, conforme já visto em sua descrição (item 3.3.3), priorizam a alocação de volume vazios nos reservatórios mais a jusante do sistema parcial sob maior risco, o que parece recomendável pelo ponto de vista do controle de cheias. No entanto, quando são considerados vários pontos de controle de cheias, a utilização destas regras nem sempre proporciona a melhor alocação para os volumes vazios, o que pode ser percebido pelos resultados das simulações destas regras com as restrições dos casos I, II, III e IV, nos

quais foram levadas em contas as restrições de vazões máximas em todos os pontos de controle de cheias da bacia.

Ainda nas simulações com o CASO V de restrições, pode-se observar que as operações com as regras das opções PARALELO e RISCO do modelo proposto alcançaram desempenhos melhores que os obtidos com os casos de restrições I, II e IV.

A programação definida pelas regras operativas do modelo proposto sob a opção PARALELO, conforme a sua descrição no capítulo anterior, é dependente das capacidades $K_{\max i}$ dos reservatórios do sistema. Portanto, a fim de realizar uma análise de sensibilidade sobre o desempenho destas regras num sistema com capacidades diferentes das adotadas, foram executadas simulações com o CASO VI de restrições, no qual as capacidades máximas de alguns reservatórios foram trocadas. Os resultados das simulações mostraram uma queda no desempenho desta regras, passando das 37 inundações obtidas com o CASO II, para 40 inundações com o CASO VI, resultado este muito próximo do obtido pelas regras operativas da opção RISCO (41 inundações com o CASO II de restrições). Este fato indica que a obtenção do melhor desempenho global com a opção PARALELO não pode ser dissociado das capacidades máximas consideradas neste estudo de caso.

No capítulo II, quando foram apresentadas as condições de controlabilidade para um sistema multireservatório com múltiplos pontos de controle de cheias, foi relatado que a expressão (II.12), na qual são definidos os volumes vazios mínimos nos sistemas parciais, só garante a suficiência dos volumes calculados para sistemas com reservatórios de capacidade infinita. Como as capacidades adotadas para os reservatórios nestas simulações foram, nos seis primeiros casos de restrições, valores finitos, resolveu-se incluir o caso VII de restrições, no qual as capacidades máximas adotadas para os reservatórios são infinitas. Desta forma, pôde-se verificar se em alguma das séries, nas quais foram observadas inundações, estas ocorreram em razão dos volumes não serem infinitos. Durante as simulações com os demais casos de restrições foi observado que as únicas regras, onde os armazenamentos alcançaram valores nulos em pelo menos um reservatório, foram as regras do modelo proposto sob a opção JUSANTE, portanto o conjunto de restrições do caso VII foi apenas aplicado em simulações com estas regras. Os resultados indicam que, com adoção das capacidades infinitas, o número de inundações foi reduzido em apenas uma inundação (de 48 inundações no caso II para 47 no caso VII), o que significa, para esta

bacia, que o fato das capacidades não serem realmente infinitas não resulta num aumento significativo das inundações.

Os resultados obtidos nas simulações com o 2º bloco de séries sintéticas, apresentados na tabela IV.39, indicam uma queda no desempenho das regras do modelo proposto em relação às simulações realizadas com o 1º bloco de séries. Esta constatação pode ser justificada pelo fato das séries sintéticas do 1º bloco terem sido as utilizadas para a determinação dos volumes vazios necessários, o que faz com que a simulação executada com estas séries alcance um desempenho mais próximo do planejado.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O Setor Elétrico brasileiro é dotado de diversos sistemas multireservatórios, nos quais o objetivo do controle de cheias está presente sempre que é detectada a existência de pontos de controle em regiões a jusante dos reservatórios. Para o planejamento da operação de controle de cheias destes sistemas é preciso se determinar os volumes de espera necessários, o que, dependendo da topologia dos reservatórios e da quantidade de pontos de controle considerados, pode se tornar uma tarefa bastante complexa. Até então, nos estudos de planejamento da operação vêm-se adotando uma metodologia de cálculo de volumes de espera onde o problema da distribuição espacial destes nos reservatórios do sistema é definida por critérios baseados apenas nas características físicas dos reservatórios e em suas áreas de drenagem. Entretanto, através da teoria das condições de controlabilidade, desenvolvida por Marien[4] e estendida em Damázio[5], consegue-se dar um tratamento determinístico a este problema, o que faz desta teoria uma ferramenta essencial para os estudos de controle de cheias em sistemas multireservatórios.

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um modelo de programação da operação de controle de cheias para sistemas multireservatórios, no qual fossem definidos critérios e regras operativas que utilizassem as condições de controlabilidade para orientar a programação. A partir de uma abordagem estocástica destas condições, com a utilização do conceito de envoltória, no qual os espaços vazios são associados a riscos de inundação, definiu-se um critério operativo básico de minimização do risco de inundação no sistema.

A fim de complementar a construção do modelo foram necessárias ainda a formulação de uma equação de balanço de massa para os reservatórios, a definição das restrições operativas necessárias à programação da operação e a elaboração de critérios operativos para definir a forma de utilização dos volumes vazios (opções PARALELO, JUSANTE e RISCO). Desta forma, ao final do desenvolvimento deste modelo, chegou-se a uma metodologia de programação da operação para o controle de cheias aplicável, em princípio, a qualquer sistema de reservatórios, na qual as condições de controlabilidade são efetivamente utilizadas.

Vale mencionar ainda como um dos produtos deste trabalho, adaptação da formulação das condições de controlabilidade para sistemas com defasamento temporal da água entre seus reservatórios.

Os testes realizados com o modelo proposto num sistema complexo em termos de controle de cheias, formado por dez reservatórios localizados na bacia do rio Paraná, demonstraram que o seu desempenho foi satisfatório sob as opções PARALELO e RISCO, sendo que sob a primeira opção foi alcançado o melhor desempenho, enquanto que sob a opção JUSANTE o modelo não conseguiu atingir uma operação de controle de cheias eficiente. Os resultados destes testes também mostraram um melhor desempenho global do modelo proposto sobre as regras operativas atualmente adotadas nesta bacia.

Os resultados destes testes também permitiram as seguintes conclusões sobre o desempenho do modelo proposto na operação de controle de cheias em sistemas multireservatórios:

- A adoção de variações máximas das vazões e de restrições de vazões mínimas leva a uma operação com desempenho pior que a operação sem a consideração destas restrições.
- Quanto mais homogêneas são as recorrências das restrições de vazões máximas, mais uniforme é o desempenho da operação de controle de cheias ao longo de toda a bacia.
- O processo de elaboração das envoltórias utilizado por este modelo faz com que a operação de controle de cheias do reservatório mais a jusante tenha um desempenho pior que a operação dos demais reservatórios.
- Quando se tem apenas um ponto de controle de cheias num sistema multireservatório, o desempenho da operação do modelo proposto tende a se aproximar mais do desempenho meta, principalmente sob a opção JUSANTE.
- As capacidades dos reservatórios influenciam diretamente o desempenho da operação do modelo proposto sob a opção PARALELO.

Para o aprimoramento deste estudo, pode-se destacar como recomendável as seguintes investigações:

- Avaliação de novos procedimentos para a determinação das envoltórias, com novos critérios para a escolha das séries a serem descartadas.
- Avaliação de novas opções para a forma de utilização dos volumes vazios, que considerem critérios energéticos para a definição das faixas de prioridades de enchimento e esvaziamento.
- Estudos de simulação com a consideração dos possíveis erros nas previsões de afluências.
- Avaliação da possibilidade de inclusão das variações máximas das vazões no cálculo dos volumes vazios considerados nas condições de controlabilidade.

BIBLIOGRAFIA

- [1] KELMAN, J.; Dificuldades na Implantação de Obras de de Uso Múltiplo, Boletim informativo da ABRH, V.36, 1989.
- [2] SCEN-GTHO; Prevenção de Cheias nos Aproveitamentos dos Sistemas Interligados Brasileiros, Grupo Coordenador para Operação Interligada, 1992.
- [3] SCEN-GTHO; Análise de Restrições Operativas Hidráulicas dos Aproveitamentos Hidroelétricos do Sistema Interligado em Situações de Cheias, Grupo Coordenador para Operação Interligada, 1990.
- [4] MARIEN, J.L.; Controllability Conditions for Reservoirs Flood Control Systems With Applications, Water Resources Research, V.20(1), 1477-1488, 1984.
- [5] DAMÁZIO, J.M.; Condições de Controlabilidade de Sistemas de Reservatórios para Controle de Cheias e seu Uso na Operação com Múltiplos Usos, Tese de Doutorado - UFRJ, 1988.
- [6] KELMAN, J., Cheias e Aproveitamentos Hidrelétricos; Tese para concurso de professor titular, UFRJ, 1983.
- [7] SZWARCFITER, J.L., Grafos e Algoritmos Computacionais, Ed. Campus, 1984.
- [8] COSTA, F., S., DAMÁZIO, J.M., KELMAN, J.; Condições de Controlabilidade de Sistemas de Reservatórios para Controle de Cheias, Manual do usuário do programa CAEV1, Relatório Técnico CEPEL 272/90, CEPEL, 1990.
- [9] DEGE; Modelo Linear de Cálculo de Curvas de Controle de Reservatórios - MCCCCR, ELETROBRÁS

- [10] CUNHA, S.H.F.; COTIA, C.B.; Programa SIMULADIN - Manual do Sistema, Relatório Técnico CEPEL, 1984
- [11] SCEN; Modelos Utilizados para a Programação da Operação de Sistemas Hidrotérmicos, trabalho preparado para a IXª Reunião do SOMSE/CIER, Grupo Coordenador para Operação Interligada, 1978.
- [12] SCO; Controle de Cheias dos Reservatórios da Bacia do Rio Paraná, Instrução de Operação I.O.011, Grupo Coordenador para Operação Interligada, 1992.
- [13] CORPS OF ENGINEERS; Reservoir Regulation, U.S. Army, 1959.
- [14] KELMAN, J.; DAMÁZIO, J.M.; COSTA, J.P.; A Multivariate Synthetic Daily Streamflow Generator, Fourth International Hydrology Symposium, Colorado, State University, Fort Collins, Colorado, 1985.
- [15] COSTA, J.P.; Controle de Cheias em Reservatórios de Usinas Hidrelétricas, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, 1982.