

**X SIMPÓSIO
BRASILEIRO
DE RECURSOS
HÍDRICOS**



**I SIMPÓSIO
DE RECURSOS
HÍDRICOS DO
CONE SUL**

7a12 NOV 93

GRAMADO / RS

A N A I S 4

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

FLOOD CONTROL OPERATION SCHEDULING MODEL
USING CONTROLLABILITY CONDITIONS

VINICIUS FORAIN ROCHA
Engenheiro da ELETROBRÁS
Av.Mal.Floriano, 19/21º andar - cep 20080 - Rio de Janeiro - RJ

JORGE MACHADO DAMÁZIO
Pesquisador do CEPEL
Caixa Postal 2754 - cep 20001 - Rio de Janeiro - RJ

JERSON KELMAN
Prof. COPPE/UFRJ; Diretor da FUNDAÇÃO ESTADUAL DE RIOS E LAGOS
Rua São Cristóvão 138/3º andar - cep 20921 - Rio de Janeiro - RJ

RESUMO -- O modelo de programação da operação de controle de cheias apresentado neste trabalho foi desenvolvido a partir de uma abordagem estocástica das condições de controlabilidade, com a utilização do conceito de envoltória, no qual os espaços vazios necessários nos sistemas de reservatórios são associados a riscos de inundação, através do conceito de tempos de retorno. O modelo busca uma programação da operação que minimize o incremento no risco de inundação em relação a um risco meta. Ao final deste trabalho é apresentado um estudo de caso com um sistema de dez reservatórios localizados na bacia do rio Paraná.

ABSTRACT -- The scheduling model for flood control operation presented in this work was built using a stochastic approach and the concept of enveloped curves. These curves define empty spaces to be maintained in reservoirs systems, which are related to flood risks, through the concept of return periods. The model searches a scheduling operation in which the increment of flood risk in relation to a goal flood risk is minimized. Results of its application to a ten reservoirs system in the Paraná River basin are also presented in this work.

INTRODUÇÃO

Os problemas de controle de cheias em sistemas multireservatórios foram analisados teoricamente pela primeira vez em Marien [1984], que utilizando a teoria de grafos derivou as chamadas condições de controlabilidade para a análise determinística de sistemas com um único ponto de controle, ou seja, apenas uma seção fluvial sujeita a restrição de vazão. Damázio [1988] 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.

Em Rocha [1993], a partir desta abordagem estocástica das condições de controlabilidade, foi elaborado um modelo de programação da operação de reservatórios, onde foram definidos 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.

MODELO

Condições de Controlabilidade

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 de uma cheia devem atender e que se atendidos, dadas as restrições de vazão e as sequências de afluências aos reservatórios, garante-se a existência de pelo menos uma operação viável (Damázio[1988]).

Para o entendimento das condições de controlabilidade é necessária a noção de sistemas parciais (Marien [1984]). 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 de um ponto de controle P_x , se e somente o inteiro $x \in u$ e o conjunto de R_1, \dots, R_n em u , forma um só sistema de reservatórios, sendo o reservatório R_x o seu único exutório. A partir deste conceito, por exemplo, o sistema de reservatórios da figura 1 forma os seguintes sistemas parciais: $\{1\}, \{1,2\}, \{1,3\}, \{1,2,3\}, \{2\}, \{3\}$.

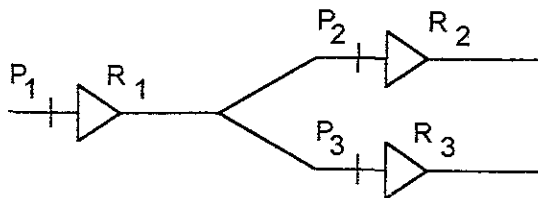


Figura I - Sistema com Três Reservatórios

A expressão das condições de controlabilidade para um sistema parcial u é dada pela seguinte expressão:

$$E_u(t) \geq V_u(t) \quad (1)$$

onde

$E_u(t)$ é o espaço vazio no sistema parcial u

$V_u(t)$ é o limite inferior que se deseja calcular

Damázio[1988] mostra que conhecida uma sequência de afluências ao sistema, os limites inferiores de espaços vazios, $V_u(t)$, podem ser obtidos por uma formulação recursiva, dada por:

$$V_u(t-1) = \max \left\{ 0, \max_{w \in W'(u)} \left[\sum_{z \in R(u,w)} V_z(t) \right] + \left(\sum_{i \in u} q_i(t) + \sum_{i \in UP(u)} m_i(t) - M_x(t) \right) \cdot \Delta t \right\} \quad (2)$$

onde

w e z são sistemas parciais

$W'(u)$ é a classe dos conjuntos de reservatórios a serem retirados de u (ver Damázio[1988])

$UP(u)$ é o conjunto de reservatórios que não pertencem a u e que estão localizados imediatamente à montante de qualquer reservatório de u

$q_i(t)$ é a afluição a R_i no período t

$m_i(t)$ é a restrição de vazão mínima em P_i no período t

$M_x(t)$ é a restrição de vazão máxima em P_x no período t

Δt é o intervalo de tempo do período t

Numa situação ideal, onde as séries de afluências aos reservatórios são previamente conhecidas, esta condição expressa em (1) fornece os volumes vazios necessários em 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 dos sistemas parciais.

Envoltória

Durante a programação da operação, a premissa de conhecimento prévio das afluências é impossível de ser alcançada. Em Damázio[1988] é sugerido que se utilize neste caso a técnica de geração de séries sintéticas de vazões, onde o conjunto infinito de possíveis séries de afluências 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 afluições aos reservatórios e aos sistemas parciais, para proteger os pontos de controle contra qualquer inundaçao "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 (1).

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 meta, TR , para esta proteção, que no caso das séries sintéticas de afluições, 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

$$NS = \left(1 - \frac{1}{TR}\right) \cdot N \quad (3)$$

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

$$EV_{u,TR}(t-1) = \max_{s=1, \dots, NS} [V_{u,s}(t-1)] \quad \forall t=t_0, \dots, T \quad (4)$$

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 ocorrência da série de afluições s (ver equação (2))

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

$$e_u(t) \geq EV_{u,TR}(t) \quad , t=t_0, \dots, T \quad (5)$$

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

$$e_u(t) < EV_{u,TR}(t) \quad , t=t_0, \dots, T \quad (6)$$

onde esta garantia não é válida (Kelman [1983]). Na figura II 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.

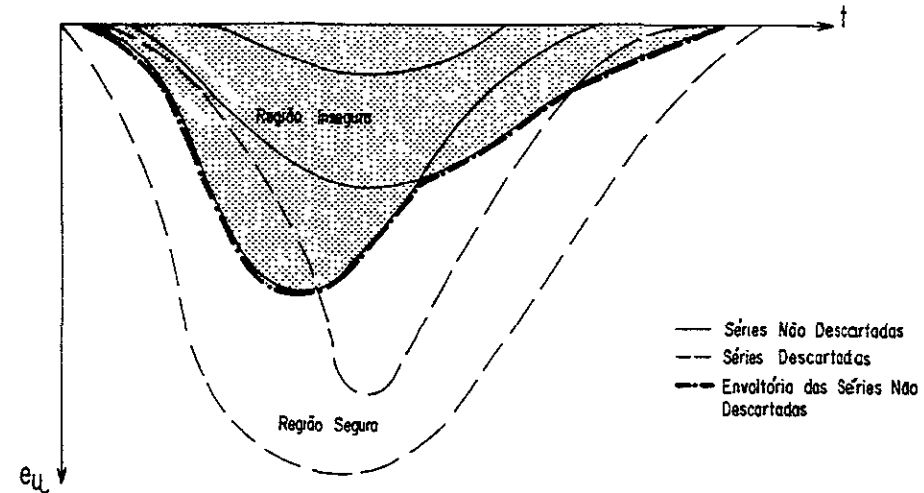


Figura II - Exemplo de Elaboração de Envoltória

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 inundaçao 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 .

Este conceito de risco de inundaçao num sistema parcial é fictício, pois na realidade a inundaçao sempre se refere a um ponto de controle P_x . Para se estimar num dado instante o risco de inundaçao em P_x a partir dos tempos de retorno das envoltórias, tem-se que verificar os estados de espaços vazios $e_u(t)$ de todos os sistemas parciais com exutório em P_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 TR_m , onde m é o número de sistemas parciais com exutório em P_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 afluições não descartadas. Dentre todos os tempos de retorno cujas regiões seguras no espaço TR_m são respeitadas pelo estado de volumes vazios disponíveis, o maior deles, dado por:

$$r^+ = \max\{r\} \quad (7)$$

sujeito a

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

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

$$h_{p_x}(t) = \frac{1}{r^+} \quad (8)$$

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 TR_m , 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 TR_{ms} , onde ms é o número de sistemas parciais existentes no sistema como um todo.

Operação com envoltórias

Em Damázio [1988], 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:

$$\sum_{i \in u} e_i(t) \geq EV_{u, TR}(t) \quad (9)$$

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 [1988] 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.

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 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 (7) e (8), pode-se afirmar que em pelo menos um sistema parcial, o espaço vazio disponível 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, deplecionando os reservatórios deste sistema.

A decisão de deplecionar um sistema parcial não encerra a definição da programação de defluências deste, 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 -- A cada passo o modelo verifica qual é o reservatório do sistema parcial sob maior risco que se encontra mais cheio em relação a sua capacidade e esvazia-o.

Opção Jusante -- Nesta opção o critério de escolha do reservatório a ser rebaixado é a sua proximidade ao ponto de controle do sistema parcial considerado.

Opção Risco -- Nesta opção, definido o sistema parcial sob maior risco, verifica-se 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.

ESTUDO DE CASO

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 Jupiá. O sistema considerado 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 no rio Tietê e Ilha Solteira e Jupiá no rio Paraná. A figura III ilustra a topologia destes reservatórios.

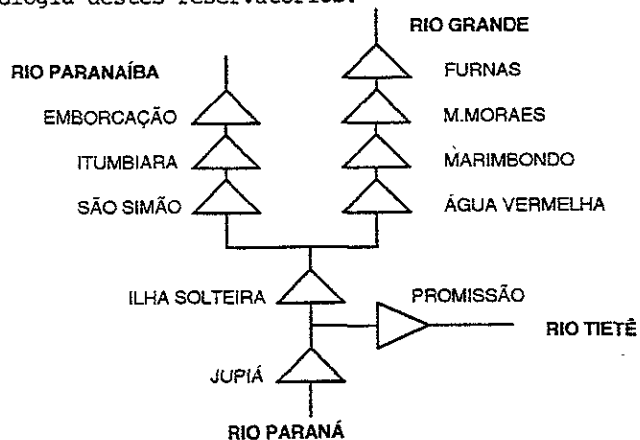


Figura III - Sistema de Reservatórios da Bacia do Rio Paraná até Jupiá

Nas simulações realizadas com 1000 séries de aflúências, o tempo de retorno meta para a proteção dos pontos de controle do sistema foi de 35 anos, o que indica, a princípio, que o número de inundações que deveriam ocorrer durante a operação com estas séries seria em média igual a 29. No entanto, conforme visto anteriormente, o alcance deste desempenho não é garantido num ambiente estocástico.

Tabela I - Resultado das simulações da operação com o modelo proposto

RESERVATÓRIO	Nº DE SÉRIES COM INUNDAÇÕES		
	OPÇÃO PARALELO	OPÇÃO JUSANTE	OPÇÃO RISCO
FURNAS	15	30	14
M. MORAES	13	20	12
MARIMBONDO	10	10	9
EMBORCAÇÃO	0	5	0
ITUMBIARA	18	40	19
SÃO SIMÃO	1	3	2
JUPIÁ	36	54	40
SISTEMA	37	80	41

Os resultados acima apresentados indicam que o desempenho do modelo proposto sob a opção Paralelo foi o que mais se aproximou do desempenho meta em termos de sistema, entretanto, sob a opção Risco também foi alcançado um desempenho satisfatório.

CONCLUSÃO

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. 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.

REFERÊNCIAS

DAMÁZIO, J.M. (1988), Condições de Controlabilidade de Sistemas de Reservatórios para Controle de Cheias e seu Uso na Operação com Múltiplos Usos, Tese de Doutorado - UFRJ.

KELMAN, J. (1983), Cheias e Aproveitamentos Hidrelétricos; Tese para concurso de professor titular, UFRJ.

MARIEN, J.L. (1984), Controllability Conditions for Reservoirs Flood Control Systems With Applications, Water Resources Research, V.20(1), 1477-1488.

ROCHA, V.F. (1993), Modelo de Programação da Operação de Reservatórios para o Controle de Cheias com a Utilização das Condições de Controlabilidade, Tese de Mestrado - UFRJ.