

TÓPICOS DE INVESTIGAÇÃO EM CONTROLE DE CHEIAS

POR

J. Kelman¹

RESUMO - A utilização parcial dos reservatórios do sistema hidrelétrico brasileiro para controle de cheias é uma questão que envolve diversos desafios metodológicos. Neste artigo o problema é formulado e são discutidas as limitações de algumas soluções propostas. Procura-se enfatizar linhas de investigação que pareçam promissoras.

INTRODUÇÃO

Os vertedores de um aproveitamento hidrelétrico são em geral dimensionados para garantir a passagem de uma cheia com tempo de retorno de alguns milhares de anos, supondo o nível d'água por ocasião do início da cheia coincidente com o nível máximo normal operativo (NMNO - também uma variável de projeto).

Na falta de qualquer outra fonte de informação, o operador do reservatório deverá verter de acordo com as recomendações do projetista sempre que o NMNO for ultrapassado. Trata-se de garantir a segurança da barragem. Nesta situação, de emergência, é provável que a vazão defluente seja superior à capacidade da ca lha provocando transbordamentos que afetem a segurança da população de jusante. Quando previsões de afluências ao reservatório são disponíveis, o operador na grande maioria das vezes estará informado de que a cheia que se aproxima não tem a severidade da cheia de

¹ Pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica-CEPEL e Professor Visitante da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ).

projeto. Consequentemente ele poderá defluir de uma forma mais suave, mesmo para níveis acima do NMNO, para benefício da população de jusante (Grull 1981). Ou seja, mantendo-se a produção de energia elétrica como o único objetivo da operação, pode-se diminuir a frequência de cheias apenas incorporando as previsões hidrológicas à operação.

Uma proteção ainda maior pode ser obtida operando-se o reservatório com o duplo propósito de gerar energia e controlar cheias, que são infelizmente objetivos conflitantes: para gerar energia mantém-se o reservatório o mais cheio possível de forma a prover água e queda durante futuras estiagens; para controlar cheias mantém-se o reservatório vazio para garantir espaço capaz de laminar os grandes picos de descarga. Isto não significa que a construção de uma usina hidrelétrica aumente a frequência de cheias a jusante da barragem. Pelo contrário, a simples existência de um reservatório exerce em geral um efeito moderador sobre as cheias, mesmo que não operado explicitamente para este fim.

A operação de um reservatório de duplo objetivo é uma questão tão difícil de ser formulada como um problema de otimização. Isto porque os benefícios e/ou prejuízos associados com as duas metas não são comensuráveis. De um lado a expectativa de prejuízo econômico decorrente de alguma diminuição da produção energética pode ser estimada em unidades monetárias, imaginando-se que esta diminuição seja compensada pelo emprego de usinas termelétricas e/ou construção de novas usinas. Por outro lado o impacto social e os prejuízos causados por uma inundação são de difícil quantificação.

Alguns autores sugerem a composição de interesse distintos na operação de um reservatório através da definição de uma função objetivo, chamada de função utilidade, que resulta das preferências expressas pelo administrador entre alternativas conflitantes (veja por exemplo, Braga, 1979). As empresas de energia elétrica no Brasil, no entanto, tem preferido impor restrições de risco a operação dos reservatórios para fins energéticos. Os níveis d'água tem sido mantidos abaixo do NMNO, criando um "volume de espera" destina-

do a amortecer cheias. Está claro, ainda existirão situações em que a preocupação com a segurança da barragem fará com que a defluência seja superior ao limite crítico que causa danos a jusante. Atualmente procura-se calcular o volume de espera de tal forma que o tempo de retorno deste evento se situe na faixa de 25 a 50 anos.

Este artigo aponta alguns aspectos metodológicos presentemente sendo examinados no CEPREL, cujo desenvolvimento se faz necessário para a realização do cálculo de volume de espera sob uma grande diversidade de condições de contorno (cascata de reservatórios, previsão de afluência, e outros).

Definição do problema

As variáveis intervenientes no controle de cheias para um reservatório são vistas na figura 1. $q(t)$ é o volume afluente no dia t , $v(t)$ é o volume armazenado, $d(t)$ é o volume defluente (vertido ou turbinado) e $w(t)$ é o volume afluente na área incremental (não controlada). Ocorrerá uma cheia para a população de jusante sempre que $d(t) + w(t)$ ultrapassar o valor crítico u . Ocorrerá uma operação de emergência sempre que $v(t) > v_M$, sendo v_M o volume correspondente ao NMNO. Controlar cheias significa fazer sempre que possível $v(t) \leq v^*(t)$, onde $v_M - v^*(t)$ é o volume de espera para o dia t . $v^*(t)$ deve ser calculado de tal maneira que $P[d(t) + w(t) > u] \leq p$, onde p é o inverso do tempo de retorno selecionado.

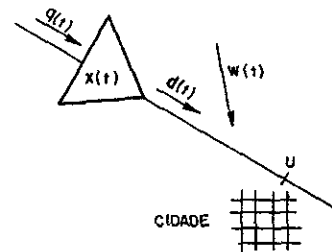


FIGURA 1 - Representação Esquemática das Variáveis Intervenientes no Controle de Cheias

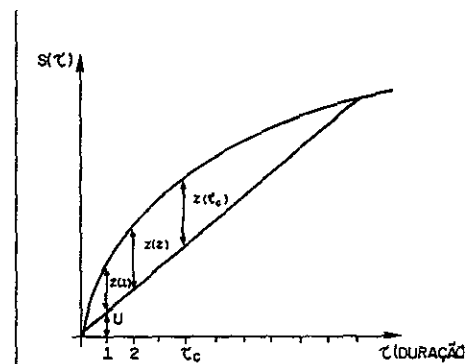


FIGURA 2 - Curva Volume x Duração para Determinação do Volume de Espera

Uma metodologia alternativa para o dimensionamento de volume de espera vem sendo desenvolvida no CEPEL. Ela emprega um algoritmo recursivo que utiliza como dados de entrada a função risco meta $\alpha(t)$ e também um conjunto de séries diárias sintéticas, geradas para o período de cheias. Para cada dia t o algoritmo considera uma política simplificada de operação correspondente ao período $(t+1, h)$ que inclui tanto a produção energética (em termos de volumes d'água a serem turbinados) quanto os volumes de espera já calculados para este período. Esta política simplificada permite que se determine o volume de espera para o dia t que por sua vez é um dos requisitos para a elaboração da política correspondente ao período (t, h) , e assim sucessivamente (Kelman et alii, 1980). Este método satisfaz aos requisitos a e b acima referidos e necessita para sua implementação de ser acoplado com algum modelo estocástico de vazões diárias.

Previsão de afluições

A disponibilidade de instrumentos de medição, tanto a montante quanto a jusante da barragem, permite que se trabalhe com as distribuições de probabilidades condicionadas de $q(t)$ e $w(t)$ ao invés das distribuições marginais. Ou seja, neste caso faz-se o uso de previsões de afluições. A eficácia de um processo de previsão pode ser medida pela dispersão (variância) da distribuição condicionada: um valor nulo significa conhecimento perfeito do futuro e uma variância igual à da distribuição marginal significa que o modelo de previsão não tem valor algum. Kelman et alii (1981) realizaram um estudo para o reservatório de Três Marias e cidade de Pirapora, em que foi verificado o efeito de diversas hipóteses quanto a eficácia de modelos de previsão de $w(t)$ nas funções $\{v^*(t), t=1, 2, \dots, h\}$. Como era de se esperar, a medida que o "modelo" de previsão melhorava, subiam os valores de $v^*(t)$. Isto é, um modelo de previsão permite que se mantenha em média os níveis mais elevados. Além disto verificou-se nos estudos de simulação que diversas cheias que redundariam em emergência, não fosse disponível o modelo de previsão, puderam ser controladas. Por outro lado os estudos mostraram também que algumas cheias moderadas, que seriam absorvidas caso não existisse

o modelo de previsão, redundaram em emergência. Este aparente paradoxo ocorre sempre que se introduz algum mecanismo de previsão sem que simultaneamente as metas de risco sejam alteradas. Neste caso específico o efeito foi de permitir que o reservatório enchesse excessivamente sempre que a situação hidrológica fosse relativamente "suave". Bastaria que nestas situações se mantivesse um volume de espera levemente superior ao recomendado para eliminar a maior parte destas emergências. O que equivale dizer que o modelo de previsão deve ser utilizado não somente para relaxar as restrições operativas como também para diminuir o risco meta, sempre que isto for possível. A maneira de conciliar estes dois benefícios é assunto que ainda carece de investigação.

Cascata de reservatórios

Numa cascata de reservatórios, a afluição a cada um deles não é a que se obteria em condições naturais e sim o resultado da defluência dos reservatórios de montante somada à afluição correspondente à área de drenagem incremental.

Costa et alii (1981) utilizaram o modelo de vazões diárias para sintetizar o processo estocástico $\{w_1(t), w_2(t), \dots, w_i(t)\dots\}$, onde $\{w_i(t)\}$ é a afluição incremental ao i -ésimo reservatório. Está claro que $\{w_1(t)\} = \{q_1(t)\}$ e que portanto para o reservatório de cabeceira o algoritmo concebido para o caso de reservatório único pode ser aplicado diretamente. Esta aplicação resulta em restrições operativas para o primeiro reservatório que quando incorporadas a um modelo de simulação fornecem os volumes defluentes $\{d_1(t)\}$. Definindo-se $q_2(t) = w_2(t) + d_1(t)$ obtém-se uma série de afluições ao segundo reservatório que já leva em consideração o controle de cheias exercido pelo primeiro. E assim sucessivamente.

Esta abordagem serve como uma primeira aproximação para a solução do controle de cheias com múltiplos reservatórios. Entretanto se entre o reservatório i e $i+1$ não houver benfeitoria alguma a ser protegida ($u_i = \infty$), a aplicação do esquema de Costa et alii (1981) atribuirá volume de espera nulo para o reservatório i . Con

sequentemente a proteção cidade situada a jusante de $i+1$ ficará unicamente dependente do volume de espera que se aloque para este reservatório. Intuitivamente se percebe que ao contrário, algum volume de espera deveria ser imposto ao reservatório i com o propósito de "ajudar" o reservatório $i+1$. Uma possível maneira de resolver esta questão seria atribuir alguma restrição fictícia para o i -ésimo reservatório (u_i^*) de maneira a minimizar o "impacto" do controle de cheias no sistema hidroelétrico. Este impacto pode ser medido pelo valor esperado de energia armazenada no sistema ao final do período úmido. Energia armazenada é obtida por uma função que mapeia um vetor cujos componentes são os volumes d'água armazenados nos diversos reservatórios num escalar que representa o equivalente energético de todo o estoque de água do sistema (Terry et alii, 1980).

Formalizando, minimizar o impacto do controle de cheias no sistema hidroelétrico equivale a encontrar \hat{u}^* que maximize a função $g(\hat{u}) = E[X(V_1(\hat{u}), V_2(\hat{u}), \dots, V_n(\hat{u}))]$ sujeito a $\hat{u}_i \leq u_i$, $i = 1, 2, \dots, n$, onde:

$\hat{u} = [\hat{u}_1, \hat{u}_2, \dots, \hat{u}_n]$ - é o vetor de defluências críticas fictícias para os n reservatórios.

$u = [u_1, u_2, \dots, u_n]$ - é o vetor de defluências críticas reais; quando não existe restrição para o i -ésimo reservatório $u_i = \infty$.

$V_i(\cdot)$ - é o volume armazenado no i -ésimo reservatório.

$X(\cdot)$ - é a energia armazenada no sistema.

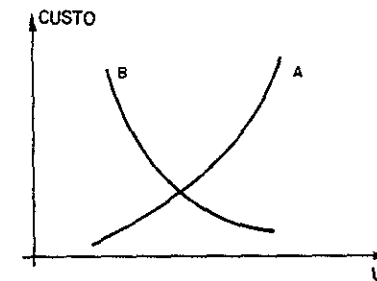
$E[\]$ - é o operador valor esperado.

A solução para este problema de otimização está presentemente sendo investigada.

Medidas alternativas

Existem outras medidas de proteção, além de manter volumes de espera nos reservatórios, que quando implementadas assegurem o mesmo risco de ocorrência de cheias. Por exemplo, construir

diques, retificar trecho de rio e desapropriar áreas a serem inundadas. Em geral estas medidas alternativas dão condições para que o nível d'água junto a uma cidade possa atingir uma cota mais elevada, com o conseqüente aumento do valor da defluência crítica u . Quanto maior for u , menor será o volume de espera dos reservatórios situados a montante da cidade, para o mesmo nível de risco. Pode-se conceber duas curvas de custo como função de u . Uma crescente que represente as despesas efetuadas localmente para proteção de cidade. Outra decrescente, que representa as despesas suplementares que deverão ser feitas em escala nacional ou regional para compensar o montante de energia elétrica que não será produzido devido à exigência de se manter um volume de espera.



Curva A - Custo da medida alternativa de caráter local.

Curva B - Custo energético do volume de espera.

FIGURA 3 - Custo de Controle de Cheias como Função da Defluência Crítica.

A determinação de curva A (figura 3) é tarefa relativamente simples uma vez que envolve apenas estimativas de obras de construção civil e talvez valores relativos a indenizações. A curva B, no entanto, é de elaboração mais complexa visto que a alocação de espaço do reservatório para amortecimento de cheias tem duas conseqüências: a curto prazo aumenta a expectativa de geração de energia elétrica por usinas térmicas (nuclear ou carvão) e portanto de gasto com combustível; a longo prazo acarreta uma an

toçipação do cronograma de construção de novas usinas hidroelétricas, que serão colocadas mais cedo em operação para compensar a diminuição da produção média de energia nos reservatórios parcialmente utilizados para controle de cheias.

É possível estabelecer uma função que associe a cada valor de energia armazenada ao final do período úmido um valor esperado de geração termoelétrica, por cada classe de usina térmica (Terry et alii, 1980). Conhecidos os preços de cada combustível, pode-se traduzir em unidades monetárias o efeito de curto prazo acima referido. Costa et alii (1981) executaram um cálculo deste tipo para determinar a relação entre custo de controle de cheias e o risco meta adotado. O efeito de longo prazo não foi ainda considerado, apesar de ser possível a utilização, para este fim, do custo marginal de expansão do sistema gerador (Carvalho e Rosenblatt, 1980).

AGRADECIMENTOS

As idéias apresentadas neste artigo resultam das atividades de um projeto de investigação sobre controle de cheias realizado com o apoio do DEOP - ELETROBRÁS, presentemente em andamento no CEPEL. Este projeto conta com a participação do autor e dos engenheiros Joari Paulo da Costa, Jorge Machado Damazio e Mário Veiga Ferraz Pereira.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, G.N. (1963), "The Use of the Gamma Distribution in Estimating Regulated Output from Strages", Civil Engineering Transactions, the Institute of Engineers, Australia, CE4(1).
- BEARD, L.R. (1963), "Flood Control Operation of Reservoirs", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, HY1.
- BRAGA, B.F.F.Jr. (1979), "An Evaluation of Streamflow Forecasting Models for Short-Range Multi-Objective Reservoir Operation", Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do Estado de

São Paulo.

- CARVALHO, M.A.P. e ROSENBLATT, J. (1980), "Análise do Comportamento dos Custos de Geração no Período 80-95", Nota Técnica nº 27 do Departamento de Estudos Energéticos da ELETROBRÁS.
- COSTA, J.P.; DAMAZIO, J.M.; PEREIRA, M.V.F.; KELMAN, J. (1981), "Uma Metodologia para Controle de Cheias", VI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Camboriu, Santa Catarina.
- GRULL, D. (1981), "Operação Hidráulica de Reservatórios: Enfoques Probabilísticos e Determinísticos de Condições de Contorno", R.Hidrol. Rec. Hídricos, V3, n1.
- KELMAN, J.; DAMAZIO, J.M.; PEREIRA, M.V.F.; COSTA, J.P. (1980), "Operação de um Reservatório para Controle de Cheias", R.Hidrol. Rec. Hídricos, V2, n2.
- KELMAN, J.; DAMAZIO, J.M.; PEREIRA, M.V.F.; COSTA, J.P. (1981) "Flood Control Restrictions for a Hydroelectric Plant", International Symposium on Real-Time Operation of Hydrosystems, University of Waterloo, Canada.
- MC MAHON, T.A.; MEIN, R.G. (1978), "Reservoir Capacity and Yield", Elsevier Scientific Publishing Company.
- TERRY, L.A. (1980), "Modelo a Sistema Equivalente - Descrição Geral", Relatório Técnico CEPEL nº 1705/80.

ABSTRACT

Some development of methodology is necessary for using the brazilian hydroelectric system's reservoirs for flood control. In this paper the problem is formulated and some approximated solutions discussed. It is also stressed the potential of some research approaches to the problem.