

OPERAÇÃO DE UM RESERVATÓRIO PARA CONTROLE DE CHEIAS¹

POR

J.Kelman^{2,3}, J.Damazio², M.V.F.Pereira², J.P.Costa⁴

RESUMO -- Este trabalho tem como objetivo fornecer a vazão defluente mínima, função do nível de armazenamento do reservatório, que garanta um risco pequeno para a ocorrência de uma situação de emergência. Entende-se por situação de emergência aquela em que a vazão defluente já é suficientemente elevada para causar danos a jusante (pontes, cidades, etc.). A metodologia adotada determina também o volume de espera para amortecimento de cheias. Previsões de vazões e a operação simultânea de diversos reservatórios não são levados em consideração: estes temas serão abordados em próximos artigos.

INTRODUÇÃO

A regra de operação de um reservatório, isto é, a decisão quanto à vazão defluente, depende de um grande número de fatores: mercado, armazenamento nos outros reservatórios, afluências previstas, etc.. Esta decisão deve naturalmente ser viável, isto é, pertencer a um conjunto definido pelas restrições impostas por razões econômicas, físicas ou ligadas à segurança. O objetivo deste trabalho é estabelecer restrições simples sobre a vazão defluente em função do volume do reservatório de forma a exercer um efeito moderador sobre as cheias.

Definições

Sejam

h - duração da estação de cheias (dias)
 $v(t)$ - volume (m^3) armazenado no reservatório no dia t

($t = 1, 2, \dots, h$); sem perda de generalidade adota-se um volume morto igual a zero.

¹Este artigo resulta das atividades de pesquisa do projeto 7139 - CEPEL, que recebe o apoio do DEOP - ELETROBRÁS

²Pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL)

³Professor visitante da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ)

⁴Aluno do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Professor colaborador do CESET - PR.

- $q(t,i)$ - vazão (m^3/dia) afluente ao reservatório durante o dia t para a i -ésima série. Entende-se por série a hidrografa do período de cheias de cada ano obtida a partir dos registros históricos ou gerada por algum modelo.
- $d(t)$ - vazão defluente durante o dia t . Esta é a variável sobre a qual se pretende impor restrições.
- d_M - vazão defluente máxima que não causa danos a jusante.
- v_M - volume máximo armazenável que não compromete a segurança da barragem caso ocorra a onda de cheia de projeto para os vertedores.

Exemplos de restrições

a) disponibilidade de água

considerando-se que $q(t,i)$ chega instantaneamente ao final do dia t , tem-se que $d(t) \leq v(t)$.

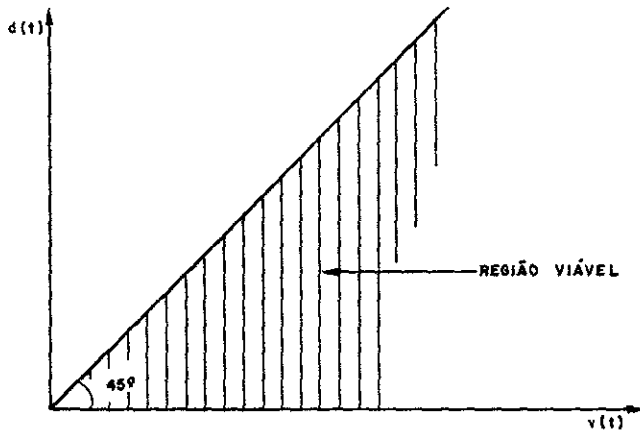


Figura 1. Restrição de Disponibilidade de Água

b) restrições de navegação

é comum haver uma vazão defluente mínima para satisfazer as necessidades de navegação.

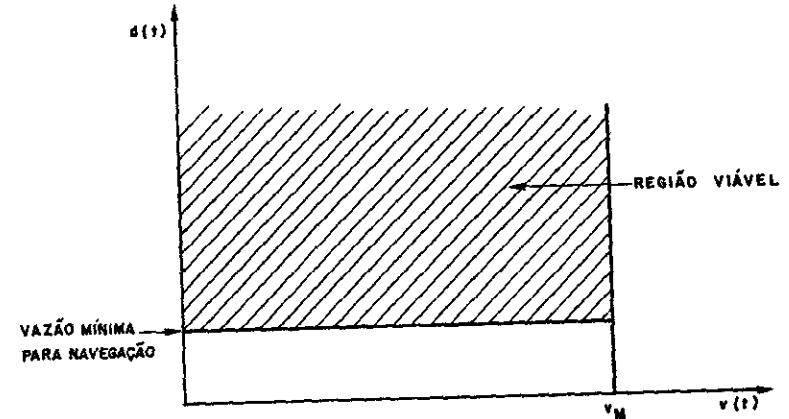


Figura 2. Restrições de Navegação

c) restrição para vazão máxima defluente

ocorrerá uma situação de emergência se a vazão defluente for maior do que d_M .

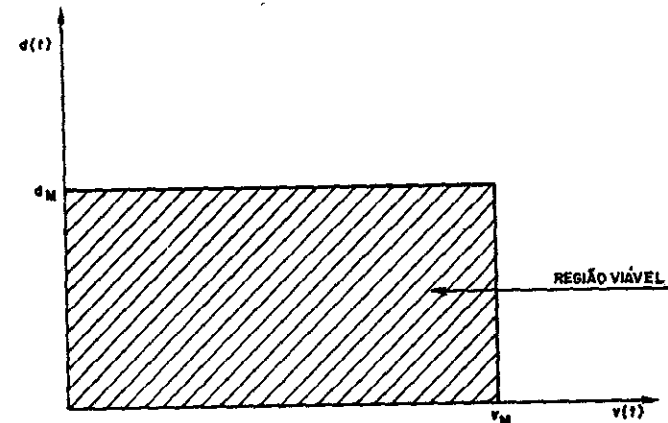


Figura 3. Restrição de Vazão Máxima

REGIÃO VIÁVEL PARA OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

A região viável para as restrições (a), (b) e (c) é a interseção das regiões viáveis nas figuras 1 a 3 e está representada na figura 4;

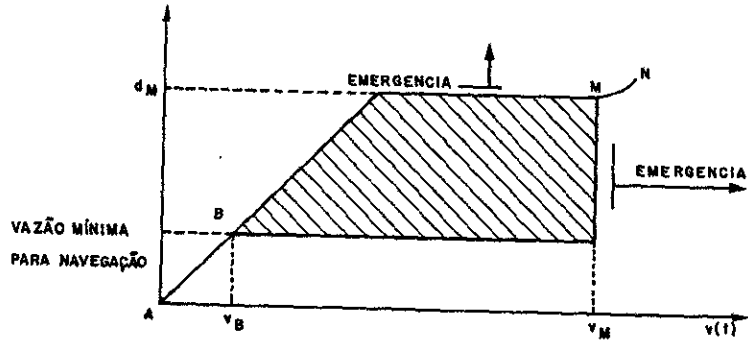


Figura 4. Região Viável

As curvas \overline{AB} e \overline{MN} fornecem regras para os casos extremos: quando $v(t) < v_B$ a restrição de vazão mínima para navegação será violada; o que se pode fazer é defluir todo o volume disponível. Para $v(t) > v_M$ a regra de operação é imposta pela segurança de barragem, representada na figura 4 pela curva \overline{MN} .

Qualquer decisão na área sombreada entre v_B e v_M é em princípio viável. Descreve-se a seguir como eliminar a parte desta região que conduz a risco de emergência acima de limites pré-fixados, por exemplo, $KL\overline{MH}$ na figura 5.

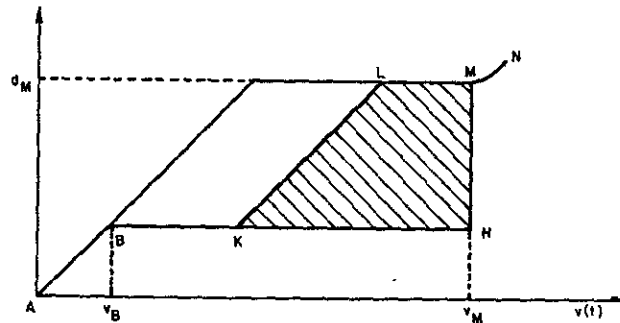


Figura 5. Região que Conduz a Risco de Limites Pré-Fixados

DETERMINAÇÃO DA REGIÃO KLMH

Conhecidas as regras de operação no período $(t+1, h)$ e o armazenamento inicial $v(t+1)$, é possível simular o comportamento do reservatório para cada série i . $c(t+1, i)$ é dito volume crítico para a série i se somente simulações com $v(t+1) > c(t+1, i)$ levarem a alguma emergência no período.

O volume defluente $d(t)$ que leva ao volume crítico $c(t+1, i)$ pode ser obtido da equação de continuidade:

$$d(t) = v(t) + q(t, i) - c(t+1, i) \quad (1)$$

Se $q(t, i)$ e $c(t+1, i)$ forem conhecidos, $d(t)$ é representado como uma reta a 45º da forma $d(t) = v(t) + b(t, i)$. A figura 6 apresenta um conjunto de retas correspondentes a uma amostra de 10 séries. Cada reta intercepta o eixo horizontal no ponto $b(t, i)$, definido como

$$b(t, i) = c(t+1, i) - q(t, i) \quad (2)$$

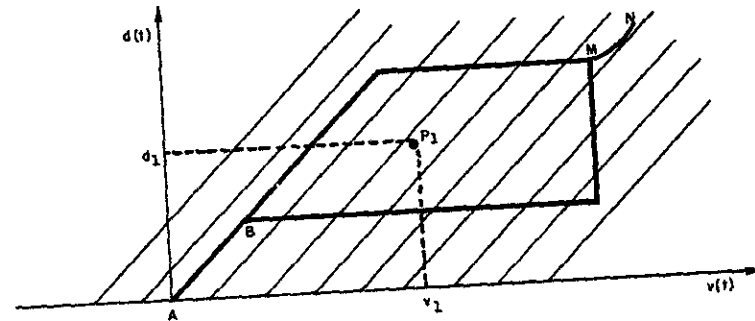


Figura 6. $d(t)$ para uma Amostra de 10 Séries

Para $v(t) = v_1$, o ponto P_1 define uma decisão viável d_1 . Existem quatro retas que se situam acima deste ponto, isto é, há quatro séries que exigem vazões defluentes maiores do que d_1 . Ou seja, adotando-se a decisão d_1 , cada uma destas séries levará a um volume no dia $(t+1)$ maior do que o correspondente volume crítico $(v(t+1) > c(t+1, i))$. Como por definição volumes em $t+1$ maiores do que o respectivo volume crítico ocasionam emergências entre $t+1$ e h , pode-se dizer que a decisão d_1 ocasiona emergências entre t e h para as quatro séries. Em consequência a probabilidade de emergência para o par $\{v_1, d_1\}$ pode ser estimada em 40%.

É fácil observar que todos os pontos viáveis situados sobre uma reta a 45° que passa por P_1 tem o mesmo risco.

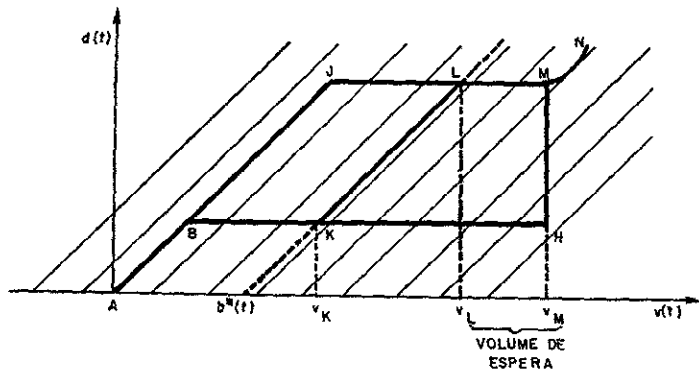


Figura 7. Determinação da região KLMH

Qualquer ponto localizado na região KLMH, definida na figura 7, está associado a uma decisão que leva a uma probabilidade de emergência maior que 40%. Por outro lado, os pontos na região BJKL estão associados a decisões com probabilidade de emergência menor que 40%. Note-se que na determinação da região KLMH, para um critério de risco qualquer, basta determinar algum ponto da reta definida por KL, por exemplo a sua intercessão com o eixo horizontal, $b^*(t)$.

Um conjunto de valores $\{b(t,i), i=1, \dots, n\}$ forma uma amostra da variável aleatória $B(t)$. É possível inferir a distribuição de probabilidade de $B(t)$ e portanto determinar $b^*(t)$ definido como:

$$P \{B(t) < b^*(t)\} = \alpha(t) \quad (3)$$

onde $\alpha(t)$ é o nível de risco pré-fixado. No exemplo acima, a região KLMH é definida para $\alpha(t) = 40\%$ com $n = 10$.

A diferença $v_M - v_L$ pode ser interpretada como volume de espera associado ao nível de risco $\alpha(t)$.

DETERMINAÇÃO DOS VOLUMES CRÍTICOS PARA O DIA t

A regra de operação para fins energéticos tem naturalmente uma grande influência nos resultados de controle de cheias. Por exemplo, devem haver poucas emergências em usinas que turbinem sem

pre que possível vazões elevadas e que portanto mantenham seus reservatórios relativamente vazios.

Com mencionado anteriormente, a vazão turbinada em cada usina depende de um grande número de fatores. Esta regra será aproximada como uma função do armazenamento e pode ser obtida a partir de um modelo de simulação da operação do sistema. A figura 8 mostra uma possível função para um sistema composto de um único reservatório com uma demanda constante de energia.

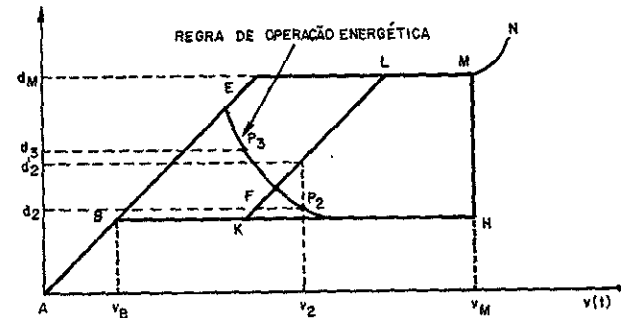


Figura 8. Regra de Operação Energética

O ponto P_2 situa-se na região associada a riscos superiores ao valor pré-fixado. Neste caso, prevalece a restrição para controle de cheias. Ou seja, a vazão defluente será d_2 ao invés de d_3 . Por outro lado, o ponto P_3 situa-se na região admissível e a decisão d_3 pode ser mantida. A figura 9 apresenta a regra de operação que incorpora as restrições discutidas anteriormente à regra de operação energética. Uma vez adotada esta regra, a probabilidade de emergência passa a ser uma função do armazenamento. As retas representadas são as mesmas da figura 6.

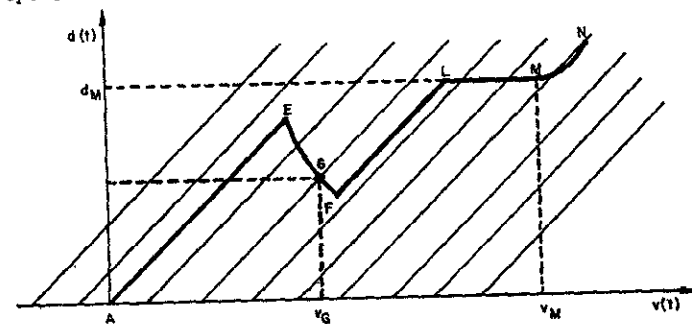


Figura 9. Regra que incorpora as Restrições à Regra de Operação Energética

O volume crítico de cada série, $c(t,i)$, é o correspondente à interseção-quando existir-da respectiva reta com a curva AEFLM. Por exemplo, v_G representa na figura 9 o volume crítico da série correspondente à quarta reta, isto é, $c(t,i) = v_G$. De fato, somente volumes superiores a v_G exigem vazões defluentes superiores à regra AEFL e, em consequência, levam a emergência entre t e h .

Existem dois tipos de não-interseção:

- a) a reta fica sempre acima de AEFLM-neste caso, a decisão dada pela curva é sempre inferior ao necessário. O volume crítico é portanto igual a zero.
- b) a reta fica sempre abaixo de AEFLM-neste caso, a decisão dada pela curva é sempre superior ao necessário. O volume crítico é portanto igual a v_M .

ALGORITMO

A cada dia t :

- a) conhecidos os volumes críticos para o dia $t+1$, $c(t+1,i)$, calcular

$$b(t,i) = c(t+1,i) - q(t,i), Vi.$$
- b) o conjunto de valores $\{b(t,i)\}$ forma uma amostra da variável aleatória $B(t)$. Calcular $b^*(t)$ tal que

$$P\{B(t) < b^*(t)\} = \alpha(t)$$
 onde $\alpha(t)$ é pré-fixado
- c) o volume de espera para o dia t é dado por $\max\{0, v_M - (b^*(t) + d_M)\}$
- d) definir a regra AEFLM como descrito na seção anterior
- e) calcular os volumes críticos para o dia t : $c(t,i)$ é o correspondente à interseção da reta definida por $b(t,i)$ com a regra AEFLM
- f) voltar para (a) e repetir o procedimento para $t-1$

O algoritmo recursivo apresentado exige o fornecimento da condição de fronteira $t=h$. Como não há expectativa de cheias além de h , adota-se

$$c(h,i) = v_M, Vi. \quad (4)$$

CRITÉRIOS DE RISCO

O nível de risco $\alpha(t)$ é arbitrário. Como o processo estocástico "ocorrência de vazões acima de d_M " pode ser aproximadamente modelado por um processo Poisson (Shen e Todorovic (1976)), é razoável impor um critério de risco tal que a ocorrência de emergência seja também um processo de Poisson. Neste caso, o tempo de espera entre emergências tem distribuição exponencial. Portanto,

$$\alpha(t) = 1 - e^{-\lambda(t-h)}$$

A figura 10 ilustra esta lei de controle para $h=212$ e $[\alpha(0)]^{-1}$ igual a 2, 10, 15, 25 e 50 anos. Denomina-se $[\alpha(0)]^{-1}$ período de retorno para o evento "emergência".

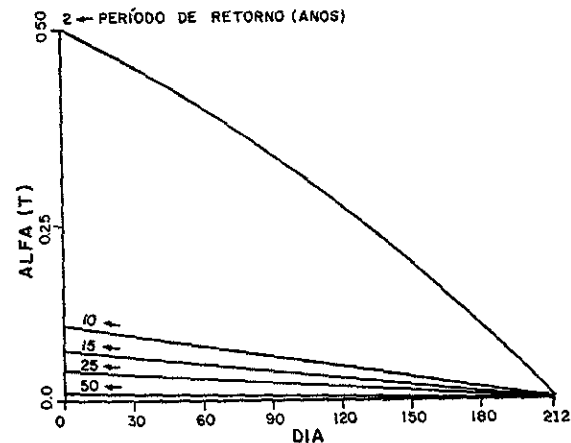


Figura 10. Lei de controle para diversos períodos de retorno

Nem sempre o risco meta $\alpha(t)$ é viável. Por exemplo, quando $\alpha(t)$ é muito pequeno, o volume de espera necessário pode ser maior do que o volume útil, o que constitui uma impossibilidade física. Além disto, o risco real é função das regras de operação energética efetivamente adotadas e varia com o estado de armazenamento, conforme anteriormente visto.

APLICAÇÃO

O método acima foi aplicado ao reservatório de Furnas, situa do no alto do Rio Grande, com área de drenagem de 52 300km². O volume total é de 20,861 x 10⁹m³ e o volume útil de 15,128 x 10⁹m³. Segundo CECCA(1977), vazões defluentes superiores a 4000m³/s causam danos à rodovia Passos-Pium-i.

Uma vazão de 758m³/s foi utilizada como regra de operação energética; segundo o Departamento de Operação Energética da ELETROBRÁS (DEOP) ela representa a vazão média turbinada em Furnas durante o período de cheias - 19 de outubro a 30 de abril - para os anos de 1977, 1978 e 1979. A restrição de vazão mínima para navegação, por volta de 250 m³/s, fica neste caso superada pela geração energética. As séries de vazões diárias q(t,i) - 10000 séries de 212 dias - foram obtidas pelo modelo proposto por Treiber e Plate (1975). Aos valores diários de b*(t), estimados pelo algoritmo, ajustou-se uma série de Fourier de forma a suavizar as oscilações provenientes de variação amostral.

A tabela 1 mostra para cada mês o volume de espera médio recomendado para períodos de retorno de 25 e 50 anos.

Período de Retorno (Anos)	VOLUMES DE ESPERA RECOMENDADOS							
	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	
25	0,000	0,000	0,136	0,292	0,200	0,023	0,000	Km ³
	0,00	0,00	0,90	1,93	1,32	0,16	0,00	% do volume útil
50	0,000	0,026	0,343	0,547	0,373	0,095	0,000	Km ³
	0,00	0,17	2,27	3,62	2,46	0,63	0,00	% do volume útil

Tabela 1. Volumes de espera recomendados (Vazão defluente inferior a 4000m³/s)

As figuras 11 e 12 mostram a evolução de v_L para os períodos de recorrência de 25 a 50 anos respectivamente.

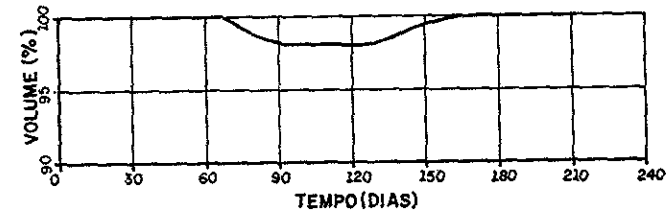


Figura 11. Evolução de v_L para período de recorrência de 25 anos

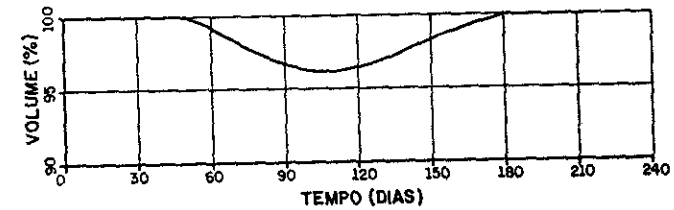


Figura 12. Evolução de v_L para período de recorrência de 50 anos

AGRADECIMENTOS

A série sintética de vazões diárias foi gentilmente cedida pelo Engenheiro Paulo R.D.J. Barbosa.

REFERÊNCIAS

CECCA, (1977) "Determinação de Volumes para Controle de Cheias nos Reservatórios do Rio Grande".

SHEN, H.W., e TODOROVIC, P. (1976), "Floods and Droughts", Stochastic Approaches to Water Resources, Volume II, Capítulo 16.

TREIBER, B., e PLATE, E.J. (1975), "A Stochastic Model for the Simulation of Daily Flows", Symposium and Workshop on the Application of Mathematical Models in Hydrology and Water Resources Systems.