VOLUME DE ESPERA PARA AMORTECIMENTO DE CHEIAS[1]

POR

J.M.Damazio[2], J.Kelman[2,3], M.V.F.Pereira[2], J.P.da Costa[2]

RESUMO -- Este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para o cálculo de volume de espera de um reservatório que resulta em risco de emergência idêntico a um valor pré-fixado. Entende-se como emergência a situação em que a vazão defluente é suficientemente elevada para causar danos à jusante. O cálculo é feito através de recursão sobre séries de vazões diárias. Ilustra-se a metodologia determinando-se volumes de espera para o reservatório de Furnas, para diversos períodos de recorrência.

INTRODUÇÃO

A operação de reservatórios projetados para fins conservativos é feita procurando-se manter o estoque de água tão elevado quanto possível. Entretanto é usual alocar uma parte do volume útil, chamada de volume de espera, destinada a encaixar os volumes afluentes durante cheias. Desta maneira o reservatório beneficia o vale a jusante tornando as inundações menos frequentes.

O método probabilístico usualmente adotado (Beard, 1963 e CECCA, 1977) para o cálculo de volume de espera utiliza uma relação entre volume afluente e duração, va(i), conforme figura 1, de forma tal que P(VA(i) > va(i))= p. VA(i) é o volume total afluente ao reservatório (variável aleatória) correspondente a uma cheia de duração de i dias e p é o inverso de tempo de recorrência selecionado. A distribuição de probabilidade de VA(i), Vi pode ser determinada de diversas maneiras. CECCA(1977), por exemplo, adota a hipótese de que os eventos extremos seguem a distribuição log Pearson III, e estima os parâmetros utilizando o conjunto de programas desenvolvidos pelo U.S. Army Corps of Engineers, 1972.

1)Este artigo resulta das atividades de pesquisa do projeto 7139 - CEPEL, que recebe o apoio do DEOP-ELETROBRÁS.
2)Pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL
3)Professor visitante da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ)

Encontro Brasil - Venezuela de Engenharia Civil, 2. Rio de Janeiro, 1981.
(10p.)

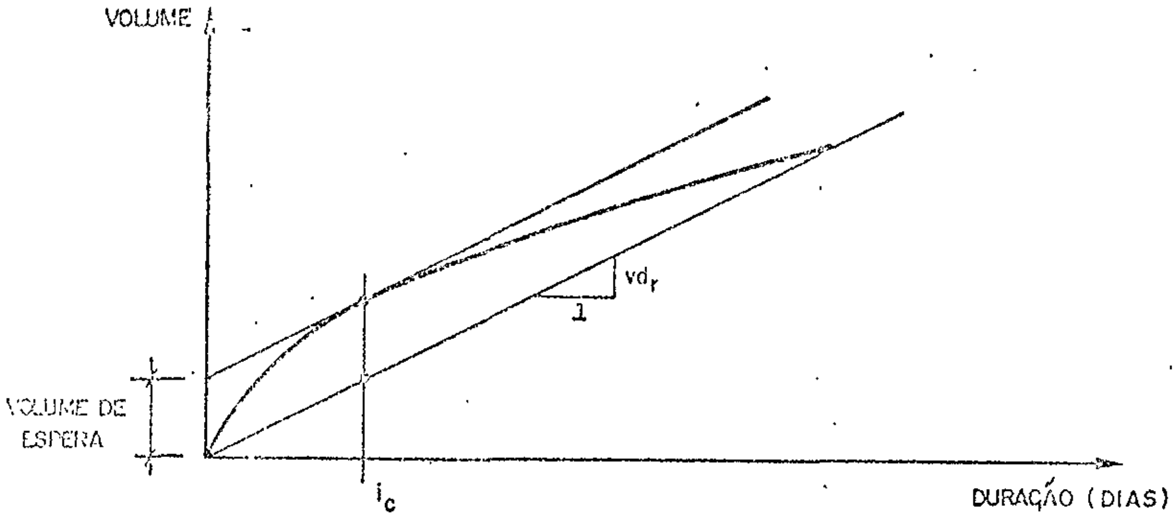

Figura 1. Curva Volume Afluente x Duração

Define-se $z(i) = va(i) - i.vd_r$ como "volume de espera condicionado a duração i", sendo vd_r o volume total descarregado, mantida durante um dia a máxima vazão que não causa danos a jusante (vazão de restrição). O método recomenda $z(i_c) = \max_i(z(i))$ para volume de espera e define i_c como duração crítica. No entanto, a probabilidade de que o volume de espera assim determinado não seja suficiente é dado por:

$$P(VA(1)>z(i_c)+vd_r \text{ ou } VA(2)>z(i_c)+2.vd_r \text{ ou } VA(i)>z(i_c)+i\ vd_r \text{ ou}\ldots) \geq$$
$$P(VA(i_c) > z(i_c) + i_c\ vd_r) = p$$

Portanto esta metodologia implica num risco maior do que o selecionado e de difícil determinação.

Uma metodologia para controle de cheias que estabelece defluências mínimas em função do volume armazenado que resultam em risco idêntico ao previamente selecionado foi descrita por Kelman et al (1980). Extensões para o caso de uma cascata e incerteza quanto à vazão de restrição no reservatório foram apresentadas respectivamente por Costa et al (1981) e Kelman et al (1981).

Apresenta-se a seguir um enfoque alternativo onde, ao invés de defluências mínimas, calcula-se o volume de espera que atende ao risco selecionado.

METODOLOGIA

Notação e Definições Preliminares

h - duração da estação de cheias (dias).

$v(t)$ - volume (m^3) armazenado no reservatório no início do dia t, ($t = 1, 2, \ldots, h$). Esta é a variável sobre a qual se pretende impor restrições. Sem perda de generalidade, adota-se um volume morto igual a zero.

v_M - volume útil do reservatório. É o volume máximo armazenado que não compromete a segurança da barragem caso ocorra a onda de cheia de projeto para os vertedores. Ocorrerá uma situação de emergência se $v(t) > v_M$.

$v_e(t)$ - volume de espera para o dia t. É desejável que $v(t) \leq v_M - v_e(t)$.

$q(t,i)$ - vazão (m^3/dia) afluente ao reservatório durante o dia t para a i-ésima série. Entende-se por série uma hidrógrafa obtida a partir dos registros históricos ou gerada por algum modelo.

$d(t)$ - vazão defluente (m^3/dia) do reservatório durante o dia t.

d_M - vazão defluente máxima (m^3/dia) que não causa danos a jusante. Somente em situações de emergência ($v(t) > v_M$) este valor é superado por $d(t)$.

Determinação do Volume de Espera para o Dia t

O volume de espera para o dia t, $v_e(t)$ tem por objetivo garantir que o risco de alguma emergência entre t e h seja igual a um valor pré-fixado, $\alpha(t)$.

Conhecidas as regras de operação do reservatório no período (t,h) e o armazenamento inicial $v(t)$, é possível simular a evolução do reservatório para cada série i. $c(t,i)$ é dito volume crítico para o dia t e para a série $\underline{i}$ se simulações desta série com $v(t) \leq c(t,i)$ não levarem a alguma emergência no período (t,h) e simulações com $v(t) > c(t,i)$ levarem a alguma emergência no mesmo período. Seja $S(c)$ o conjunto de séries cujos volumes críticos são menores que c. Isto é $S(c) = \{i | c(t,i) < c\}$. Pela definição de volume crítico todas as simulações com séries pertencentes a $S(c)$ a partir de $v(t) = c$, conduzirão a emergência entre t e h.

Um conjunto de valores $\{c(t,i), i = 1, 2, ...\}$ forma uma amostra da variável aleatória $C(t)$. É possível inferir a distribuição de probabilidades de $C(t)$ e portanto determinar $c_\alpha(t)$ definido como:

$$P[C(t) < c_\alpha(t)] = \alpha(t) \tag{1}$$

A figura 2 ilustra a determinação de $c_\alpha(t)$ a partir de um histograma de $c(t,i)$, $i = 1, 2, \ldots$. O volume de espera no dia t é dado por:

$$v_e(t) = v_M - c_\alpha(t) \tag{2}$$

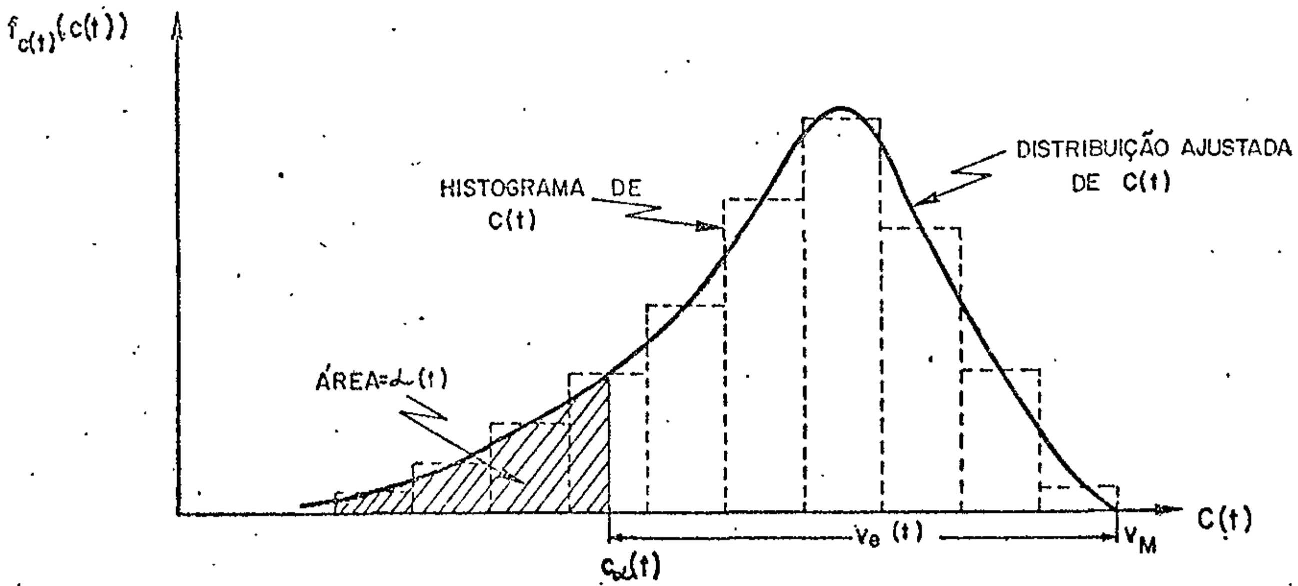

Figura 2. Determinação de $v_e(t)$

Determinação dos Volumes Críticos para o Dia t

Se $c(t+1, i)$ e $q(t,i)$ são conhecidos é possível derivar uma regra crítica no dia t para a série i. Esta regra fornecerá para todo $v(t)$ a vazão defluente, $d_c(t,i)$, que resultará num volume armazenado no dia $t+1$ igual a $c(t+1, i)$. Pela equação da continuidade a regra crítica é uma função linear de $v(t)$.

$$d_c(t,i) = v(t) + q(t,i) - c(t+1, i) \qquad (3)$$

Conhecido $v_e(t+1)$, pode-se derivar outra função linear de $v(t)$ que definirá as defluências $d_{v_e}(t,i)$ que resultarão num volume de amortecimento no dia $t+1$ igual a $v_e(t+1)$,

$$d_{v_e}(t,i) = v(t) + q(t,i) - (v_M - v_e(t+1)) \qquad (4)$$

A regra de operação efetivamente adotada pelo reservatório depende de um grande número de fatores. Para efeito do cálculo do volume de espera esta regra será aproximada como uma função do armazenamento.

A figura 3 mostra uma possível função para uma usina hidroelétrica com demanda constante de energia juntamente com as regras definidas pelas equações (3) e (4)

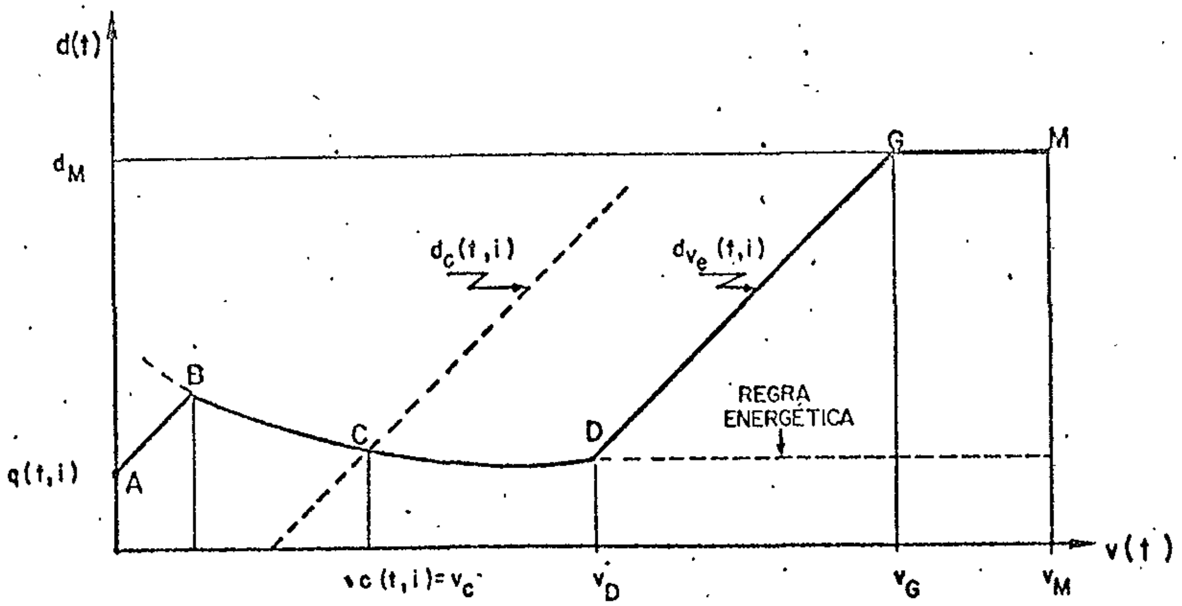

Figura 3 - Determinação do Volume Crítico

A curva ABDGM será utilizada como aproximação para a regra de operação efetivamente utilizada no dia t para a série i. Para $v(t) < v_B$ a vazão defluente é limitada pela disponibilidade de água (supõe-se $q(t, i)$ conhecido). Para $v_B < v(t) < v_D$ é sempre possível atender a demanda energética. Para $v_D < v(t) < v_G$ a regra energética conduzirá a $v(t + 1) > c_\alpha(t + 1)$. Neste caso opta-se por $d_{vc}(t, i)$ para atingir o volume de espera do dia t+1, $v_e(t + 1)$. Para $v(t) > v_G$ o limite de vazão defluente máxima, d_M, não permite que se atinja $v_e(t + 1)$.

O volume crítico, $c(t, i)$, é o correspondente à interseção (se existir) da regra crítica com a curva ABDGM. De fato, na figura 3 somente para volume superiores a v_c, d_c (t, i) é superior a regra ABDGM e portanto levam a emergência entre t e h.

Existem dois tipos de não-interseção:

a) A regra crítica fica sempre acima de ABDGM. Neste caso a vazão dada por ABDGM é sempre inferior a vazão crítica. O volume crítico é portanto igual a zero.

b) A regra crítica fica smpre abaixo de ABDGM. Neste caso, a decisão dada pela curva é sempre superior à necessária. O volume crítico é portanto igual a v_M.

O ALGORITMO

A figura 4 descreve os principais passos do algoritmo.

APLICAÇÃO

O método descrito foi aplicado ao reservatório de Furnas (v_M=17,217 x $10^9 m^3$, d_M = 4000 m^3/s, situado no alto Rio Grande cujo período chuvoso se estende de outubro a abril (h = 212 dias). A operação energética foi simplificada usando-se as médias mensais das vazões turbinas durante os períodos chuvosos do anos de 1977 e 1980 (tabela 1).

OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL
1120	849	551	576	607	857	747

Tabela 1. Regra de Operação Energética (m^3/s)

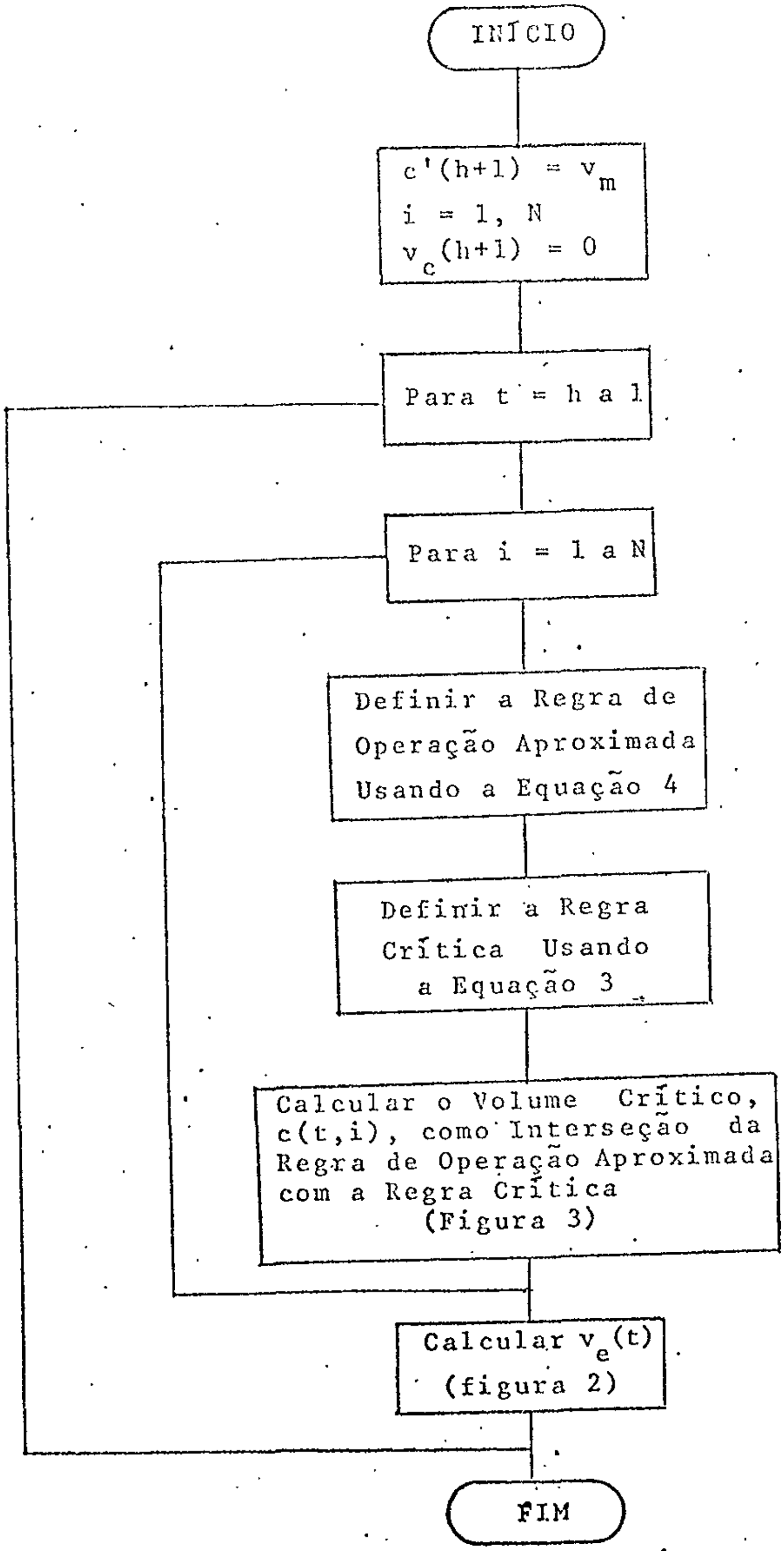

FIGURA 4 - O ALGORITMO

Como o processo estocástico "ocorrência de vazões maiores que 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 Poisson. A expressão (5) representará portanto o nível de risco pré-fixado.

$$\alpha(t) = 1 - e^{\lambda(t - h)(-1)} \qquad (5)$$

O período de retorno para uma emergência é dado em (5) por $\alpha(0)^{-1}$.

As séries de vazões diárias, q(t,i) (10000 séries de 212 dias) foram obtidas pelo modelo proposto por Kelman, 1977.

A figura 5 apresenta a evolução de $v_M - v_e(t)$ para os períodos de retorno 10, 25 e 50 anos.

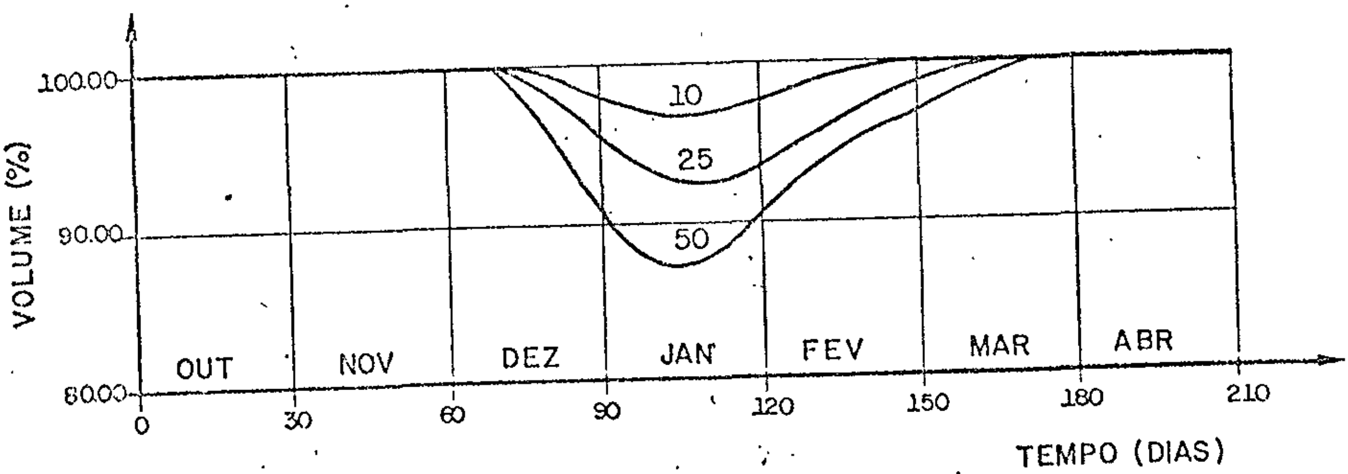

Figura 5 - Evolução de $v_M - v_e(t)$ para o reservatório de FURNAS ($\alpha(0)^{-1}$ = 10, 25, 50 anos)

CONCLUSÕES

A metodologia proposta tem as seguintes características:

- Prescinde da estimação de distribuições de probabilidades de eventos extremos, pois utiliza a totalidade da série de vazões e não apenas os máximos.

- Faz uso de um nível de risco decrescente com a aproximação do final da estação chuvosa, o que é compatível com a evidente redução do risco de que ainda ocorra alguma cheia.

- Recomenda volume de espera variável dia a dia permitindo que o reservatório possa se encher ao se aproximar o período de estiagem.

REFERÊNCIAS

BEARD, L. R., "Flood Control Operation of Reservoirs", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 89, No. HY1, Janeiro, 1963, pag. 1-23.

CECCA/02/77, "Determinação de Volumes para Controle de Cheias nos Reservatórios do Rio Grande", Novembro, 1977.

COSTA, J.P., DAMAZIO, J.M., PEREIRA, M.V.F., KELMAN J., "Uma Metodologia para Controle de Cheias", submetido ao VI SNPTEE, 1981.

KELMAN, J., "Stochastic Modeling of Hydrologic Intermitent Daily Processes", Hydrology Paper No. 89, Colorado State University, 1977.

KELMAN, J., DAMAZIO, J. M., PEREIRA, M.V.F., COSTA, J.P., "Operação de um Reservatório para Controle de Cheias", R. Hidrol. Rec. Hídricos, 2(2): 139-150, jul/dez. 1980.

KELMAN, J., DAMAZIO, J. M., PEREIRA, M.V.F., COSTA, J.P., "Flood Control Restrictions for a Hydroelectric Plant", submetido ao International Symposium ou Real-Time Operation of Hydrosystems, Waterloo, Ontário, Canadá, Junho 1981.

SHEN, H.W. e TODOROVIC, P., "Floods and Droughts", in Stochastic Approaches to Water Resources, cap. 16, Water Resources Publications, 1976.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, "Regional Frequency Computation", Hydrologic Engineering Center Computer Program 723-X6-L7350, Julho, 1972.