Previsão dos Caudais de Cheia por Utilizar no Dimensionamento das Ensecadeiras (***)

ENG.º ADOLPHO SANTOS JR.

SUMÁRIO

Mencionam-se neste trabalho os três métodos de determinação do caudal de ponta das máximas cheias; recomenda-se que no dimensionamento das ensecadeiras seja adotado o método estatístico de previsão que se descreve com algum pormenor; e, finalmente, para exemplificar, aplica-se o método recomendado a um aproveitamento fictício.

I — INTRODUÇÃO

Três são os métodos de que se pode lançar mão para estimar os caudais de cheia por utilizar no dimensionamento das ensecadeiras: — um é empírico; outro, determinista; e o terceiro, estatístico.

O primeiro método consiste na aplicação de fórmulas puramente empíricas que pretendem determinar, para qualquer bacia hidrográfica, o valor do caudal de ponta da máxima cheia por considerar. Em geral as fórmulas empíricas determinam essa máxima descarga em função apenas da área da bacia; as restantes fórmulas dão o caudal de ponta, não só em função da área, como também de outras características geomorfológicas e hidrológicas da bacia.

Fórmulas empíricas existem, deduzidas das descargas máximas que foram observadas em cursos de água localizadas, entre outros, na Inglaterra e na Itália, na Áustria e nos Estados Unidos, e, até mesmo, na Índia. Tão numerosas são essas fórmulas, que, sem grande esfôrço de pesquisa, pode enumerar-se uma trintena delas, abrangendo quase todo o alfabeto: — Besson, Boston S.C.E., Burge, Burkli-Ziegler, Craig, Cramer, Creager, Dredge, Fanning, Forti, Fuller, Ganguillet, Giandotti, Grunski, Horton, Iszkowski, Jarvis, Kuichling, Lane, Lillie, McMath, Moyer, Myer, O'Connell, Pagliaro, Pettis, Possenti, Scimemi, Switzer-Miller, Talbot e Whistler.

Com tantas fórmulas entre as quais escolher, talvez possa parecer, aos menos avisados, que o problema aqui é o de "n'avoir que l'embarras du choix". Entretanto, a aplicação de qualquer fórmula empírica deve restringir-se ao campo e às condições que serviram de base à sua dedução. Por isso, o emprêgo destas fórmulas para determinação dos caudais de máxima cheia, em bacias diferentes daquelas para as quais foram estabelecidas, pode dar origem a grandes erros. É o que suficientemente demonstra a amplitude e a dispersão dos resultados obtidos com a aplicação das diversas fórmulas a uma mesma bacia. A não ser, pois, em casos excepcionais e à falta de melhor, o método empírico deve ser proscrito.

O segundo método baseia-se na relação entre chuvas e descargas. Racional e direto, simples e prático na aparência, de um ponto de vista mais explícito êsse método inclúi: — a determinação das equações diferenciais representativas da circulação atmosférica; a de-

---

(***) Trabalho apresentado no 4.º Seminário Brasileiro de Grandes Barragens (Rio de Janeiro, G.B., Out/1965.

terminação das condições de fronteira e dos condicionamentos iniciais do sistema; a solução dessas equações diferenciais; a determinação da relação funcional entre chuva e descarga, — tendo em conta todos os fatôres climáticos, fisiográficos e geomorfológicos, — e, finalmente, a determinação da descarga de ponta e o traçado do hidrograma da cheia resultante de uma chuva excepcional sôbre tôda a bacia.

Se, no atual estado dos conhecimentos científicos, fôsse possível a exata aplicação dêsse método tìpicamente determinista à moda laplaciana, poder-se-ia prever o comportamento futuro da atmosfera e as futuras cheias durante um período infinitamente longo.

Por não ser possível, mesmo com a aplicação das mais avançadas técnicas matemáticas, solucionar o problema da maneira explícita, recorrem os defensores dêsse processo de cálculo a alguns artifícios. Fazem-se certas hipóteses e, com base nessas suposições empíricas, traça-se o hidrograma-unidade; fazem-se transposições de chuvadas e tempestades intensas; e, depois, do hidrograma-unidade e da chuva que se escolheu, deduz-se, não só a máxima cheia provável, como também a máxima cheia possível.

Há quem piamente acredite nos resultados assim obtidos. Os mais entusiastas propugnadores dêsse método são o U.S. Army Corps of Engineers e o U.S. Bureau of Reclamation; já o Tennessee Valley Authority emprega o método com maior discrição. Cabe assinalar, porém, que mesmo os mais fervorosos adeptos do método determinista reconhecem as suas limitações; dentre estas basta referir que o método só tem possibilidade de dar resultados razoàvelmente precisos quando a área da bacia se situa entre 1.000 e .... 15.000 km².

O método estatístico faz abstração completa dos processos físicos causadores das cheias. Para aplicação do método, aceitam-se os valores registrados dos caudais máximos como observações de uma variável aleatória, e submetem-se êsses valores à análise estatística segundo técnicas eficientes. A crítica que geralmente se faz a êsse método baseia-se na alegação de que, mesmo em países onde os dados hidrométricos são abundantes, ainda assim não são suficientemente numerosos para a correta aplicação da análise estatística. Isso, é o que diz Creager. E é o que muitos repetem sem darem tento de que os métodos estaísticos preconizados pela moderna escola inglêsa, — que tanto deve ao eminente Sir Ronald Fisher, — levam em conta de maneira cientificamente precisa o fato de que, na prática, o técnico é quase sempre forçado a basear suas conclusões sôbre um número pequeno de observações.

II — ANÁLISE ESTATÍSTICA

A experiência tem demonstrado que duas funções de distribuição relativamente simples podem representar, com boa aproximação, a distribuição das máximas cheias anuais. Essas duas funções são a logarítmica-normal e a do tipo III de Pearson. Os parâmetros dessas distribuições deverão ser estimados pelos mais eficientes métodos, não só porque as séries hidrológicas disponíveis são em geral pouco extensas, como também porque se procura determinar, por extrapolação, as cheias que têm baixas probabilidades de ocorrência. O método de maior rigor aplicável ao problema é o da máxima verossimilhança de Fisher.

Para maior facilidade de generalização e de comparação dos resultados, deve-se operar sôbre as cheias reduzidas tomando-se a cheia média anual como unidade; vale dizer, é preferível operar com os números adimensionais que se obtêm dividindo cada cheia observada, em cada local de medição e em cada ano, pela cheia média anual do pôsto.

O estudo pormenorizado das cheias dos rios Paraíba, Tietê e Grande demonstra que as cheias estimadas com base na distribuição log-normal excedem sempre aquelas avaliadas segundo a distribuição do tipo III. Por isso, e por ser de aplicação mais fácil e direta, preferir-se-á a distribuição log-normal no prosseguimento dêste estudo.

Representando-se as cheias observadas por $x_i = \overline{Q_i}/Q$, e com $y_i = \log x_i$, vem a função de distribuição

$$f(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-(y-\mu)^2/2\sigma^2\right] \tag{1}$$

em que os parâmetros μ e σ são, respectivamente, a verdadeira média e o verdadeiro desvio padrão, ambos desconhecidos. Pelo método da máxima verossimilhança demonstra-se que estimativas eficientes dêsses parâmetros se obtêm de

$$\bar{y} = \Sigma y_i/n \tag{2}$$

$$s(y) = [(y_i-\bar{y})^2/(n-1)]^{1/2} \tag{3}$$

A cheia de qualquer probabilidade de ocorrência, p, deduz-se da equação

$$\hat{y} = \bar{y} + z.s(y) \tag{4}$$

obtendo-se z das tábuas da função de distribuição normal ou gaussiana de tal maneira que

$$p = (2\pi)^{-1/2} \int_z^\infty \exp(-0{,}5z^2).dz \tag{5}$$

O êrro padrão de $\bar{y}$ estima-se em $s(y).n^{-1/2}$ e o de s(y) em $s(y).(2n)^{-1/2}$. Dessas estimativas, e pela lei de propagação da variância aplicada à equação (4), vem o êrro padrão de $\hat{y}$

$$EP(\hat{y}) = s(y)\,[(1+0{,}5z^2)/n]^{1/2} \tag{6}$$

Delimita-se o intervalo de confiança, a qualquer nível que se deseje, mutiplicando os erros padrão por fatôres fornecidos pelas tábuas da função t de Student.

Cabem aqui algumas ponderações sôbre o conceito do período médio de retôrno de determinado caudal de cheia. Quando se fala em "cheia de T anos de recorrência", ou de "cheia milenar", por definição está-se a falar de eventos de baixa probabilidade de ocerrência. Ora, sabe-se serem grandes os erros de estima das probabilidades baixas. Além disso, a distribuição de que o período de retôrno é o valor médio é tão extrema variabilidade que o conceito de média perde muito de sua fôrça.

Tendo em mente êsses reparos, que foram resumidos de outros mais completos que se devem ao Professor Lloyd, considere-se a cheia Q com período médio de retôrno T, ou seja, com probabilidade $p = 1/T$ de ser igualadada ou ultrapassada num ano qualquer. Supondo, agora, que as máximas cheias anuais são hidrològicamente independentes entre si, as probabilidades de que a descarga Q ocorrerá em 1, 2, 3, ..., n,... anos obtêm-se de

$$p,\ p(1-p),\ p(1-p)^2,\ \ldots\ldots,\ p(1-p)^{n-1},\ldots$$

Por consequência, a probabilidade P de que a cheia Q ocorrerá durante um período que não excederá n anos vem do somatório dos primeiros n têrmos desta série, donde

$$P = 1-(1-p)^n \tag{7}$$

III — ASPECTOS ECONÔMICOS

Do ponto de vista econômico, a mínima vazão para a qual deverá ser dimensionado um sangradouro depende, em primeiro lugar, do custo médio anual de prover-se capacidade de descarga na estrutura, e, em segundo, da importância representativa dos prejuízos médios anuais que resultariam de capacidade insuficiente do descarregador. Êsse problema foi analisado por McCaig segundo o método esboçado por Foster com relação às perdas e danos decorrentes de inundações.

Ponde de lado os pormenores, pode dizer-se que o prejuízo médio anual se calcula segundo a fórmula

$$C_1 = M.p \tag{8}$$

na qual M é a importância representativa do prejuízo total médio, e p é a probabilidade da cheia Q ocorrer num ano qualquer, probabilidade essa que vem de

$$p = [\sqrt{2\pi}.s(Y)]^{-1} \int_Y^\infty \exp\ [-(Y-\overline{Y})^2/2s^2(Y)]\,.dY \tag{9}$$

onde $Y = \log Q$ e a distribuição é log-normal.

Estima-se o custo médio anual de prover-se capacidade segundo a fórmula

$$C_2 = r.q.Q \tag{10}$$

Nessa expressão: r é a fração decimal representativa dos custos de exploração do aproveitamento (remuneração do capital, reserva para depreciação, operação, manutenção, impostos, etc.); q é o custo incremental de prover-se capacidade de descarga; Q é o valor do caudal por utilizar no dimensionamento do orgão descarregador.

A despesa total anual vem de

$$C = C_1 + C_2 = M.p + r.q.Q. \tag{11}$$

Para determinar-se a mínima despesa anual, substitúi-se em (11) o valor de p segundo (9), diferencia-se, põe-se a derivada igual a zero e obtem-se

$$dC/dY = -M\,[\sqrt{2\pi}\,.\,s(Y)]^{-1} \exp\,[-(Y-\overline{Y})^2/2s^2(Y)] + rqQ\ \ln 10 = 0 \tag{12}$$

donde

$$M = 5{,}772s(Y)\ r.q.Q.\exp\,[(Y-\overline{Y})^2/2s^2(Y)] \tag{13}$$

IV — EXEMPLO DE CÁLCULO

Tem assimetria positiva a função de distribuição diferencial das máximas cheias anuais que foram observadas em diversos locais dos rios Grande, Paraíba e Tietê, durante períodos que varia entre 30 e 70 anos. Por outro lado, a densidade de probabilidade dos logaritmos dêsses caudais pode ser tida por simétrica para todos os efeitos práticos, pois essa distribuição só muito ligeiramente é enviesada à direita.

Aceitam-se como típicos dessas três importantes bacias o desvio padrão dos logaritmos das cheias reduzidas s(y) = 0,1450, e a média das mesmas variáveis $\bar{y}$ = -0,0200. Substituindo-se êsses valores na fórmula (4) vem

$$\hat{y} = 0{,}1450z - 0{,}0200 \tag{14}$$

que permite seja estimada a cheia de qualquer período de retôrno.

Para avaliar-se o limite de confiança da estimativa supõe-se, no caso, n = 35 anos e nível 0,05. Daí vem o fator t = 2,04 e, por conseguinte

$$t.EP(\hat{y}) = 0{,}05(1+0{,}5z^2)^{1/2} \tag{15}$$

Com base nas fórmulas (14) e (15) vem:

QUADRO I

T	p	z	$\hat{y}$	LC($\hat{y}$)	$Q/\overline{Q}$	LC($Q/\overline{Q}$)
2	0.500	0,000	—0,0200	0,0300	0,955	1,07
5	0,200	0,842	0,1021	0,1603	1,26	1,45
10	0,100	1,282	0,1659	0,2334	1,46	1,71
20	0,050	1,645	0,2185	0,2952	1,65	1,97
50	0,020	2,054	0,2778	0,3660	1,90	2,32
100	0,010	2,326	0,3173	0,4136	2,08	2,59

Utilizando-se as cheias reduzidas acima determinadas, e no caso particular em que a cheia anual média é $\overline{Q}$ = 3.340 m³/s, obtêm-se os seguintes caudais:

QUADRO II

Período de retôrno anos	Cheia estimada $m^3.s^{-1}$	Limite superior de 95% de confiança $m^3.s^{-1}$
2	3190	3570
5	4210	4840
10	4880	5710
20	5510	6580
50	6350	7750
100	6950	8650

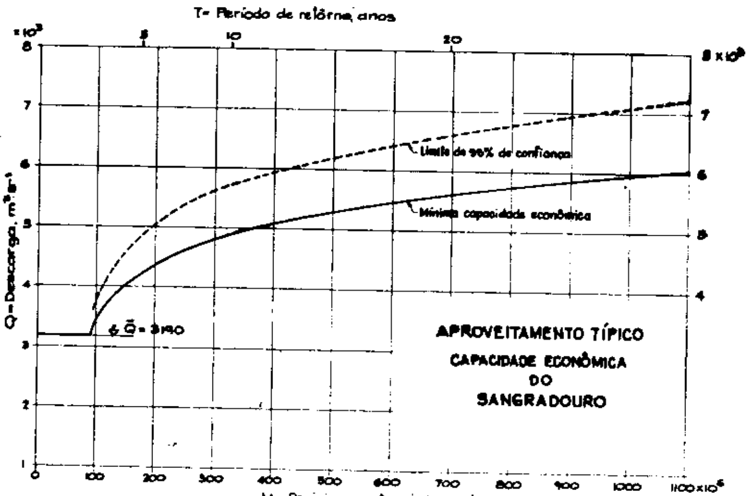
Para apreciar o problema no seu aspecto econômico supor-se-á:

$s(Y) = s(y) = 0{,}1450$; $\overline{Y} = (\log \overline{Q} + \bar{y}) = 3{,}5037$; $r = 0{,}175$ e $q =$ Cr$ 200.000 por m^3/s. Substituindo-se êsses valores na fórmula (13) vem:

$$M = 2{,}93 \times 10^4 \exp \left[23{,}78 (Y - 3{,}5037)^2 \right] Q \tag{16}$$

No desenho 1 encontra-se a representação gráfica da fórmula (16). No mesmo desenho indicam-se os limites de confiança e os períodos de retôrno do quadro II.

Para determinar-se a descarga por utilizar no dimensionamento das ensecadeiras, faz-se mister decidir qual o risco que se considera aceitável. Uma vez tomada essa decisão, pode-se fàcilmente chegar ao valor da capacidade de descarga com base na fórmula (7), ou nos dados do quadro II, ou, ainda, no desenho 1. Por exemplo.



Des. nº 1

1 — Se se considera aceitável a cheia que tem 50% de probabilidade de ocorrer dentro do prazo de 2 anos, entra-se na fórmula (7) com $P = 0{,}50$ e $n = 2$ e calcula-se $p = 0{,}293$. Das tábuas da função normal de distribuição, vê-se que a essa probabilidade corresponde $z = 0{,}545$. Dêsse valor resulta, através da fórmula (14), $\hat{y} = 0{,}0590$; daí vem $Q/\overline{Q} = \text{antilog } \hat{y} = 1{,}15$ e $Q = 3840 m^3.s^{-1}$, com limite superior a 95% de confiança igual a $4340 m^3.s^{-1}$.

2 — Se o galgamento da esecadeira pode resultar em perda de receita equivalente a um mês de produção de um grupo gerador de 130 MW, ou seja, Cr$ 854.000.000 (com FC = 0,60 e Cr$ 15 por kWh), e deseja-se segurar contra essa perda, o desenho 1 mostra que a cheia por utilizar seria $5800 m^3.s^{-1}$ e com limite de confiança de $6850 m^3.s^{-1}$.

Evidentemente, se existissem aproveitamentos a montante daquele que se estuda, forçoso é levar em conta os seus regimes de exploração, que podem resultar em tenuação ou agravamento das cheias calculadas.