

## 6. DIMENSIONAMENTO DE ALBUFEIRAS

Emídio Gil Santos

### 6.1. INTRODUÇÃO

A variabilidade temporal dos recursos hídricos leva a recorrer ao armazenamento para adaptar as afluências às necessidades.

O armazenamento obtém-se em reservatórios que podem ser naturais ou artificiais. Quanto à localização, os reservatórios classificam-se em superficiais e subterrâneos.

Uma barragem cria um reservatório superficial artificial que usualmente se designa por albufeira. As utilizações do caudal regularizado ou do próprio volume armazenado numa albufeira são muito variadas. Citam-se as seguintes:

- abastecimento urbano e industrial;
- rega;
- produção de energia hidroelétrica;
- navegação;
- controle de cheias;
- controle da poluição por diluição;
- recreio e utilização paisagística;
- retenção de sedimentos;

- piscicultura.

## 6.2. DEFINIÇÕES

Na ausência duma terminologia reconhecidamente aceite, torna-se vantajosa a apresentação de algumas definições.

Recursos hídricos potenciais - são os que corresponderiam ao aproveitamento integral da água. Assim, numa bacia hidrográfica, os recursos hídricos potenciais superficiais são o escoamento médio anual (Quintela, 1987).

Recursos hídricos utilizáveis - são a fracção dos recursos potenciais que se podem utilizar devido a restrições físicas e económicas.

Recursos hídricos disponíveis - para uma determinada situação de infraestruturas hidráulicas são os que correspondem à utilização possível com uma dada garantia de fornecimento.

Garantia - define-se como a frequência com que um fornecimento é completamente assegurado. É muito corrente a utilização do critério empírico que define garantia como a relação entre o número de anos durante os quais o fornecimento de um dado volume é completamente satisfeito e o número total de anos do período de estudo.

Um critério probabilístico para definir garantia passa pela identificação da variável que se vai utilizar para estimar a função de distribuição de probabilidades de modo a ser possível promover inferência estatística. A.

variável que normalmente se utiliza para o fim anteriormente referido é o volume de armazenamento que assegura completamente o fornecimento.

O procedimento consiste em determinar um número razoável de volumes nestas condições e calcular a sua função de distribuição empírica de probabilidades ou alternativamente ajustar uma função de um dos modelos teóricos disponíveis, a partir da qual se estima o volume que proporciona a garantia de fornecimento desejada.

Regularização - redistribuição do escoamento natural num dado período de uma forma uniforme ou de acordo com um dado consumo. A regularização pode ser diária; semanal; mensal; anual; interanual. Nos períodos mais longos, anual e interanual, se as afluências se concentram sazonalmente e os consumos se localizam na época seca utiliza-se a designação de inversão para caracterizar esta situação.

Regularização específica - de uma albufeira é a relação entre o volume útil da albufeira e o escoamento anual médio.

Grau de utilização - de um curso de água é a relação entre o volume anual a fornecer com uma dada garantia e o escoamento anual médio.

### 6.3. CARACTERISTICAS E EFEITOS DAS ALBUFEIRAS

As albufeiras são sistemas complexos com interacções várias com as fronteiras que as delimitam e com os caudais afluentes e efluentes. Enunciam-se a seguir várias das interacções que se referiram e algumas das características:

- relação da área superficial e do volume de armazenamento com a cota de superfície livre

$$A = f_1(H)$$

$$S = f_2(H)$$

- evaporação;
- tipo e velocidade de sedimentação;
- erosão das margens;
- infiltração e reacções químicas com as margens;
- correntes de densidade (estratificação);
- correntes de mistura (convecção);
- correntes de circulação (efeito do vento);
- regime térmico;
- efeitos de congelamento;
- regimes de afluências e efluências;
- evacuação de cheias;
- qualidade da água (distribuições espaciais e temporais);
- efeitos na geomorfologia fluvial (erosão e sedimentação);

- efeitos em sismos;
- interacções e impactos ambientais.

#### 6.4. DIMENSIONAMENTO DO VOLUME DE UMA ALBUFEIRA

##### 6.4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O volume de armazenamento de que é necessário dispor para que os caudais numa dada secção dum curso de água satisfaçam um determinado consumo depende de três factores: a variabilidade dos caudais no rio, as características do consumo e a garantia pretendida.

A utilização de mais do que uma albufeira para satisfazer o consumo aumenta significativamente a dificuldade de análise do problema, pelo que apenas se refere a sua possibilidade.

Técnicas que recorrem a simplificações de modo a permitirem estimar o volume de armazenamento necessário são usualmente utilizadas para análises preliminares.

No dimensionamento de projecto uma análise mais de acordo com a realidade torna-se necessária, o que implica a eliminação da maior parte das simplificações anteriormente mencionadas.

As técnicas utilizadas podem classificar-se em três grupos (Yevjevich , 1981):

- métodos empíricos;

- métodos analíticos;
- métodos de simulação utilizando geração de séries sintéticas de dados.

O tratamento teórico do problema por meio de métodos analíticos não está actualmente suficientemente desenvolvido para considerar casos complexos de séries de caudais afluentes e efluentes.

Algoritmos orientados para a utilização do cálculo automático e recorrendo à simulação não necessitam de soluções analíticas, pelo que conhecem grande popularidade.

#### 6.4.2. DIAGRAMA DE RIPPL

A técnica da curva de volumes acumulados (Rippl, 1883) é o método mais antigo que se conhece para estimar o volume de armazenamento necessário para satisfazer um determinado consumo.

O procedimento é o seguinte (McMahon, 1978):

- (i) Para o local proposto para a construção da barragem constrói-se a curva de volumes acumulados dos escoamentos observados. Como regra geral, devem utilizar-se séries de escoamentos mensais.
- (ii) Sobrepe-se à curva dos escoamentos acumulados a recta dos consumos acumulados a partir dos pontos de tangência (início do consumo a partir de uma situação de reservatório cheio).

(iii) A maior distância entre a curva de volumes acumulados e a recta de consumos acumulados é o volume de armazenamento necessário.

O método descrito baseia-se nos seguintes pressupostos:

- (i) A albufeira está cheia no início do período e por consequência encontra-se igualmente cheia no início do período crítico.
- (ii) A utilização dos escoamentos observados implica implicitamente que sequências futuras de escoamento não conduzirão a situações mais desfavoráveis do que as verificadas no passado.

As limitações do método são as seguintes:

- (i) O consumo considera-se usualmente como constante. A sazonalidade dos consumos pode ser considerada, mas restrições no abastecimento função do armazenamento existente são praticamente impossíveis de ter em conta.
- (ii) Os volumes de armazenamento estimados pelo método aumentam com o aumento da extensão da série de escoamentos observados.
- (iii) Não é possível determinar o grau de garantia mas apenas verificar que, para o período dos valores observados, o volume estimado assegura completamente o fornecimento. Espera-se que situações mais desfavoráveis não se verifiquem no futuro de acordo com o referido nos pressupostos.

(iv) O método não considera as perdas por evaporação.

Um procedimento alternativo para ter em conta as perdas por evaporação foi introduzido por King (1920).

O método de Rippl apresenta a vantagem de ser simples e, na medida em que utiliza a série dos escoamentos observados, todos os parâmetros do escoamento como sazonalidade, autocorrelação, etc., são implicitamente considerados.

#### 6.4.3. SIMULAÇÃO

Na análise de simulação a variação do volume armazenado num reservatório finito estima-se a partir da equação da continuidade.

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - D_t - E_t - L_t$$

com a restrição

$$0 \leq S_{t+1} \leq C$$

onde é:

$S_{t+1}$  = armazenamento no fim do intervalo  $t$ ,

$S_t$  = armazenamento no princípio do intervalo  $t$ ,

$Q_t$  = afluência no intervalo  $t$ ,

$D_t$  = efluência no intervalo  $t$ ,

$E_t$  = perda por evaporação (balanço) no intervalo  $t$ ,

$L_t$  = outras perdas,

$C$  = volume útil.

O intervalo de tempo normalmente utilizado é o mês, mas outros podem ser considerados. A perda por evaporação (balanço) é a diferença entre a evaporação na futura albufeira e o défice de escoamento no local da albufeira proposta, dependendo da área da superfície livre no intervalo considerado.

Outras perdas não são usualmente consideradas, por serem comparativamente pequenas.

O processo de conduzir a simulação é o seguinte (McMahon, 1978):

- (i) Arbitrariamente escolhe-se uma albufeira com volume útil  $C$  e admite-se que se encontra inicialmente cheia, isto é,  $S_0 = C$ .
- (ii) Aplica-se a equação da continuidade no intervalo de tempo escolhido para a totalidade da série observada disponível.  $D_t$  pode ser constante ou variar de acordo com uma determinada lei.
- (iii) Representa-se graficamente  $S_t + 1$ , função de  $t$ .

- (iv) Estima-se a garantia de fornecimento dividindo o número de anos em que não se verificam restrições ao consumo pelo número total de anos.
- (v) Se a garantia não for aceitável arbitra-se um novo valor C e repete-se o procedimento.

É possível utilizar um valor de C para o qual o volume útil apenas se esvazia uma vez sem que se verifiquem restrições. Este volume é o calculado utilizando a curva dos escoamentos acumulados.

O método pressupõe as seguintes condições:

- (i) A albufeira encontra-se inicialmente cheia.
- (ii) A série observada de dados é representativa das situações futuras de escoamento.

Verificam-se as seguintes limitações:

- (i) A albufeira encontra-se inicialmente cheia. Esta limitação é comum à maioria dos métodos, e análises do problema sugerem que pelo menos 100 anos de dados são necessários antes que a condição inicial não influencie o resultado.
- (ii) A análise baseia-se na série observada, que pode não ser representativa da população.
- (iii) Séries de dados descontínuos não são facilmente utilizáveis, devido à dificuldade de determinar a condição inicial de armazenamento nos reinícios intermédios.

O procedimento integra as características da série observada (implicitamente, é simples e mostra claramente o comportamento do armazenamento. Pode aplicar-se a dados com uma duração qualquer do intervalo de tempo e não apresenta qualquer dificuldade para integrar a modelação de regras de operação, mesmo que complicadas.

#### 6.4.4. MÉTODOS BASEADOS NO ALCANCE

O alcance define-se a partir da curva acumulada dos resíduos da série observada. Os resíduos da série observada são os valores desta com média nula, o que é equivalente a determinar a série das afluências subtraídas dos consumos, considerando que o consumo é o escoamento médio anual.

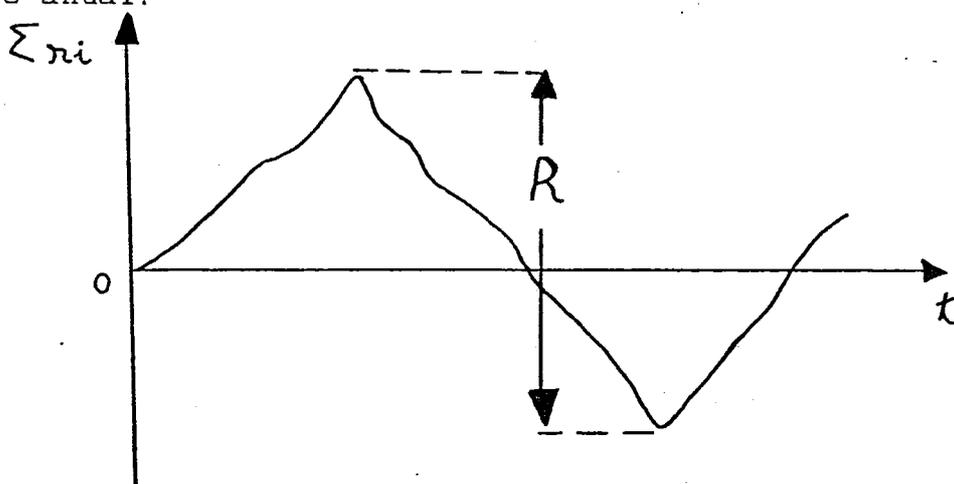


Fig. Curva de resíduos acumulados

Na figura anterior apresentou-se a curva dos resíduos acumulados em função do tempo. O alcance é a diferença entre o máximo do somatório positivo e o mínimo do somatório negativo.

Assim, o alcance fornece o valor do armazenamento necessário quando o consumo é igual ao escoamento médio anual. Esta situação é teórica, uma vez que apenas se verificaria com a condição de o armazenamento implicar perdas nulas, o que não corresponde à realidade.

Hurst (1951) propõe a seguinte relação entre o alcance e a extensão da série de dados:

$$R/s = (N/2)^k$$

onde é:

R = alcance de acordo com a definição anterior,

s = desvio-padrão da série de escoamentos,

N = número de anos da série de escoamentos.

k = expoente que Hurst estimou com o valor médio de 0.72 e o desvio-padrão de 0.09.

Para uma série temporal aleatória pura com uma distribuição de probabilidades arbitrária, Feller (1951) demonstrou que o valor de k tende para 0.5. O facto de séries verificadas no passado apresentarem valores de k superiores a 0.5 é conhecido como fenómeno de Hurst e levou ao aparecimento de sofisticados modelos de geração de séries sintéticas, que pretendem preservar este parâmetro.

Para um consumo D inferior ao escoamento médio, Hurst (1951) propõe a seguinte expressão

$$C/R = 0.94 - 0.96 [(X - D)/s]$$

onde é

C = volume útil necessário,

R = alcance,

D = consumo (constante),

s = desvio-padrão dos escoamentos,

X = escoamento médio.

#### 6.4.5. ALGORITMO DOS PICOS SUCESSIVOS

Thomas (Thomas and Burden, 1963) propôs o algoritmo dos picos sucessivos como um método que evita a necessidade de localizar o início do período crítico como sucede no método da curva de escoamentos acumulados.

Para uma série observada de escoamentos com N anos no local onde se pretende construir a barragem e para um determinado consumo D, o método permite encontrar o mínimo volume útil de armazenamento C que assegura completamente o fornecimento pretendido.

Para tanto, considera-se que os escoamentos e os consumos se repetem circularmente, necessitando a solução de utilizar dois ciclos de N anos.

O procedimento é o seguinte:

- (i) Calcula-se  $X_i - D_i$  para  $i = 1, 2, \dots, 2N$   
 e  $\sum_{i=1}^t (X_i - D_i)$  para  $t = 1, 2, \dots, 2N$
- (ii) Localiza-se o primeiro pico (máximo local)  $P_1$ .
- (iii) Localiza-se o pico seguinte,  $P_2$ , de valor superior ao anterior.
- (iv) Entre os dois picos localiza-se o mínimo (mínimo local),  $T_1$ , e calcula-se  $P_1 - T_1$ .
- (v) Começando com  $P_2$  encontra-se o próximo pico,  $P_3$ , superior a  $P_2$ .
- (vi) Encontra-se o mínimo,  $T_2$ , entre  $P_2$  e  $P_3$  e calcula-se  $P_2 - T_2$ .
- (vii) Continua-se para todos os picos sucessivos para os dois ciclos de  $N$  anos.
- (viii) A capacidade necessária para a albufeira é

$$C = \max (P_k - T_k)$$

#### 6.5. MÉTODO GAMA DE GOULD

Este método baseia-se no facto de os parâmetros da distribuição normal serem fáceis de calcular, sendo a distribuição Gama, no entanto, usualmente uma melhor aproximação da distribuição dos escoamentos anuais.

Assim o método utiliza a distribuição normal para efectuar os cálculos e depois uma correcção para aproximar o resultado ao da distribuição Gama.

O volume de armazenamento necessário C obtém-se da seguinte expressão:

$$\frac{C}{X} = \frac{Z_p^2}{4(1-D)} - C_v^2 - dC_v^2$$

onde é

X = escoamento anual médio,

$Z_p$  = variável normal reduzida, função de p,

D = consumo expresso em percentagem do escoamento anual médio,

$C_v$  = coeficiente de variação da série de escoamentos anuais,

d = coeficiente de correcção, função de p.

O volume útil C que se calcula é para uma garantia de (100 - p).

Os valores de  $Z_p$  e de d são os que a seguir se indicam

p (%)	Z <sub>p</sub>	d
0.5	3.30	Valor de d indefinido
1.0	2.33	1.5
2.0	2.05	1.1
3.0	1.88	0.9
4.0	1.75	0.8
5.0	1.64	0.6
7.5	1.44	0.4 } não recomendável a
10.0	1.28	0.3 } utilização do método

O procedimento descrito permite duma forma fácil calcular o volume necessário para uma dada garantia, admitindo que os escoamentos têm uma distribuição Gama.

## BIBLIOGRAFIA

- Feller, W. (1951) - "The asymptotic distribution of the range of sums of independent random variables". Anale of Mathematical Statistics.
- Hurst, H.E. (1951) - "Long term storage capacity of reservoirs". Transactions, ASCE, 116.
- King, C.W. (1920) - "Supply for towns in New South Wales". Transactions, The Institution of Engineers, Australia.
- McMahon, T.A. and Mein, R.G. (1978) - "Reservoir capacity and yield". Elsevier Scientific Publishing Company.
- Quintela, A.C. (1987) - "Aproveitamento de Recursos Hídricos". Hidráulica Aplicada I. Instituto Superior Técnico.
- Rippl, W. (1883) - "Capacity of storage reservoirs for water supply". Minutes of Proc., Institution of Civil Engineers, 71.
- Thomas, H.A. and Burden, R.P. (1963) - "Operations Research in water quality management". Harvard Water Resources Group.
- Yevjevich, V.M. (1981) - "Water storage capacities. Theory and design". C.S.U. course notes, Fort Collins.