

# DIMENSIÓNES ÓPTIMAS DE LOS DEPOSITOS SUPERIORES EN LOS APROVECHAMIENTOS DE ACUMULACIÓN POR BOMBEO (CENTRALES DE BOMBEO) EN RELACION CON SU COSTE Y CON LAS PERDIDAS POR EVAPORACION(\*)

Por ANTONIO GETE-ALONSO DE YLERA

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Jefe del Departamento de Ingeniería Civil de ENHER.

*En el presente artículo se trata —dentro del interés actual de todo lo referente a los aprovechamientos hidroeléctricos de acumulación por bombeo, para disposición de potencia y energía en "horas de punta"— de apreciar la influencia de las dimensiones de los depósitos superiores, en el coste de los mismos y en el de las pérdidas por evaporación, llegando a obtenerse unas primeras relaciones teóricas aproximadas.*

## CONSIDERACIONES PREVIAS

En la situación actual, de posible déficit de energía a corto, medio y largo plazo, se viene presentando una evolución de los aprovechamientos para producción de energía eléctrica, con el fin de disponer de los medios necesarios para poder atender las demandas del consumo.

Sin perjuicio de nuestro mantenido criterio de aprovechamiento al máximo de los recursos hidráulicos no utilizados, al tratarse de una fuente de energía autóctona (análogamente a lo que sucede en las Centrales Térmicas a base de carbón nacional), no dependiente de fluctuaciones o problemas en el ámbito internacional, hemos de reconocer el interés y tendencias actuales hacia la construcción de centrales nucleares.

Estas centrales deben tender, para su buen rendimiento, a una utilización de un máximo de horas anuales, lo que dará lugar a unos excedentes de energía en horas de valle que, a bajo coste, resultará conveniente aprovechar.

Las curvas de carga o demanda de una empresa, de un sector regional o de toda España, presentan unas variaciones importantes en las veinticuatro horas del día, de un día a otro, en diversos períodos de invierno, verano, etc., dando lugar a unas puntas acusadas, que es necesario cubrir con la correspondiente producción.

Sin extendernos en el amplio tema relativo a la mejor forma de cubrir dichas curvas de carga, vamos a aceptar —como sistema, aparentemente, que presenta las mayores ventajas— el empleo de las centrales de bombeo para cubrir las puntas de la demanda.

(\*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta revista hasta el 30 de septiembre de 1976.

En estas primeras bases, la energía sobrante, en horas de valle, de las centrales nucleares, vamos a suponer se utiliza para la elevación del agua a depósitos de acumulación superior, que permitan disponer de la energía suficiente en las "horas de punta".

Estos depósitos superiores de acumulación por bombeo permitirán, también, servir de reserva de la indisponibilidad de un grupo nuclear (dada la importancia que, actualmente, van adquiriendo estas unidades). También, permitirán, en muy pocos minutos, disponer de una importante potencia, capaz de suplir cualquier indisponibilidad de otras fuentes de energía eléctrica.

En la previsión actual de centrales nucleares, que contempla el Plan Eléctrico Nacional, no parece exajerado contar que, a largo plazo, aquéllas van a representar globalmente (con la inclusión, en porcentaje pequeño, de las centrales hidroeléctricas convencionales) de un 75 a un 80 por 100 de la energía eléctrica producida, dejando para las centrales de bombeo de un 25 a un 20 por 100 de la misma.

Esto dará lugar a cifras de gran consideración, en lo que se refiere a la potencia a instalar en centrales de bombeo (vamos a referirnos en este artículo a las de bombeo puro, sin aportación complementaria superior, de alguna importancia), por lo que todos los temas relativos a las mismas consideramos que deben, desde ahora, tomarse en mucha consideración.

Esto y otras causas está dando lugar a que las capacidades inicialmente previstas para los depósitos superiores vayan ampliándose progresivamente, pasando de cuatro o cinco horas de funcionamiento de la central de bombeo, a plena carga, a doce horas.

Sin meternos en el fondo de este asunto, de gran interés, por salirse fuera de los límites de este artículo, queremos constatar la importancia que presenta todo cuanto haga referencia a los depósitos superiores de las centrales de acumulación por bombeo, en el doble aspecto de su coste y de las pérdidas por evaporación (por el coste del agua elevada).

Muchos aspectos pueden considerarse a dicho respecto, y existen muy diversas facetas a tener en cuenta sobre los citados depósitos superiores (en los que no han de olvidarse los materiales más convenientes para los mismos, su forma adaptada al terreno, las pérdidas por filtración, etc.), pero nos vamos a limitar a efectuar un estudio convencional (dado que el tener en cuenta todas las variables deberá ser objeto de un detenido estudio en cada caso) para, en base a un caso particular, pero generalizado, ver la influencia de las dimensiones de los depósitos en su coste, con la inclusión de las pérdidas por evaporación.

## DATOS E HIPOTESIS

Vamos a partir de unos datos e hipótesis simplistas, para formarnos una idea global del asunto. Adoptaremos la nomenclatura que se indica, con los valores a aceptar en el caso particular estudiado:

$H$  = altura media elevación y turbinado del agua, en metros.

- $\underline{Q}$  = caudal de bombeo y turbinado útil (supuestos iguales), en  $\text{m}^3/\text{seg}$ .  
 $\rho_b$  = rendimiento global en la elevación (0,64).  
 $\rho_t$  = rendimiento global en el turbinado (0,78).  
 $N$  = número de horas de funcionamiento anual en bombeo y turbinado, en horas (1.500).  
 $c_b$  = precio de la energía consumida en bombeo, en ptas./kWh (0,75).  
 $c_t$  = precio de la energía producida en turbinado, en ptas./kWh (1,50).  
 $V_u$  = volumen o capacidad útil del depósito superior prevista, en  $\text{m}^3$ .  
 $n$  = número de horas de vertido del caudal  $Q$  previsto para bombeo (12).  
 $V = n \times 3.600 \times Q$ ;  $V = 43.200 Q$ , en el caso particular.  
 $D$  = diámetro interior del depósito, supuesto circular uniforme, en metros.  
 $S$  = superficie del agua en el depósito, en  $\text{m}^2$ .  
 $h_u$  = altura útil del depósito (la altura real, contando 3 m inferiores perdidos y 2 m de resguardo, sería de  $h_r = h_u + 5$ ), en metros.  
 $h_t$  = altura total de la presa de cierre del depósito, supuesta una cimentación media de 3 m ( $h_t = h_r + 3 = h_u + 8$ ), en metros.  
 Tipo de presa de cierre = gravedad de hormigón, con perfil triangular y suma de taludes de 0,80.  
 $E_v$  = evaporación media anual, en mm (1.500).

## CALCULOS PREVIOS

*Consumos y producciones de agua y energía.*

Volumen de agua empleado en la elevación (bombeo):

$$V_b = Q \times 3.600 \times N + \frac{E_v}{1.000} \times S, \text{ en } \text{m}^3$$

Volumen de agua utilizado en turbinación:

$$V_t = 3.600 \times N \times Q, \text{ en } \text{m}^3$$

Volumen de agua, perdido por evaporación:

$$V_e = \frac{E_v \times S}{1.000}, \text{ en } \text{m}^3$$

No vamos a tener en cuenta el valor o coste del agua perdida por evaporación, que pudiera utilizarse en otros aprovechamientos de agua abajo, que pudiera ser preciso conseguir de otras procedencias.

Energía útil consumida en la elevación:

$$E_b = \frac{1.000 Q \times H}{75 \times \rho_b} \times 0,736 \times N = \frac{736}{75} \times Q \times H \times \frac{1}{\rho_b} \times N, \text{ en kWh}$$

Energía complementaria (para compensar las pérdidas por evaporación) consumida en la elevación:

$$E_{ev,b} = \frac{1.000 \times \frac{E_v \times S}{1.000} \times H}{75 \times \rho_b} \times 0.736 \times \frac{1}{3.600} = \\ = 2,725 \times 10^{-6} \times E_v \times S \times H \times \frac{1}{\rho_b}, \text{ en kWh}$$

Energía producida en el turbinado:

$$E_t = \frac{1.000 Q \times H \times \rho_t}{75} \times 0.736 \times N = \frac{736}{75} \times Q \times H \times \rho_t \times N, \text{ en kWh}$$

Energía dejada de turbinar por las pérdidas por evaporación:

$$E_{ev,b} = \frac{368}{135} \times 10^{-6} \times E_v \times S \times H \times \rho_t, \text{ en kWh}$$

Coste de la obra del depósito superior.

Capacidad útil de agua:

$$V_u = S \times h_u = \frac{\pi D^2}{4} \times h_u, \text{ en m}^3$$

Longitud interior del muro de cierre:

$$\pi \times D, \text{ en m}$$

Volumen del muro de cierre (hormigón):

$$1/2 0,80 (h_u + 8)^2 \times \pi D = 0,40 \pi D (h_u + 8)^2, \text{ en m}^3$$

Volumen de la excavación:

$$\frac{0,80 (h_u + 8) + 0,80 (h_u + 5)}{2} \times 3 \times \pi D = 1,20 \times \pi \times D (2h_u + 13), \text{ en m}^3$$

Superficie del agua en el depósito:

$$S = \frac{\pi D^2}{4}, \text{ en m}^2$$

Se adopta la nomenclatura de precios siguiente, con los valores a aceptar en el caso particular estudiado:

$p_{hor}$  = en ptas./m<sup>3</sup> de obra de fábrica (1.500);

$p_{ex}$  = en ptas./m<sup>3</sup> de excavación (500);

$p_{imp}$  = en ptas./m<sup>2</sup> de impermeabilización del fondo del depósito (500).

*Coste de la obra.*

$$P_D = 0,40 \pi (h_u + 8)^2 \times D \times p_{hor} + 1,20 \pi (2h_u + 13) \times D \times p_{ex} +$$

$$+ \frac{\pi \times D^2}{4} \times p_{imp} = \pi \times D [0,40 (h_u + 8)^2 \times p_{hor} +$$

$$+ 1,20 (2h_u + 13) \times p_{ex} + 0,25 D \times p_{imp}], \text{ en ptas.}$$

Supuesta una capacidad útil del depósito, para  $n$  horas de bombeo a plena carga:

$$\frac{\pi D^2}{4} \times h_u = n \times 3.600 Q \quad ; \quad D = 120 \quad \left| \sqrt{\frac{n Q}{\pi h_u}}, \text{ en m} \right.$$

En el caso particular:

$$D = 240 \quad \left| \sqrt{\frac{3 Q}{\pi h_u}}, \text{ en m} \right.$$

$$P_D = \pi \times 120 \left| \sqrt{\frac{n Q}{\pi h_u}} \right| [0,40 (h_u + 8)^2 \times p_{hor} + 1,20 (2h_u + 13) \times p_{ex} +$$

$$+ 30 \left| \sqrt{\frac{n Q}{\pi h_u}} \times p_{imp} \right| = 120 \left| \sqrt{\frac{n \pi Q}{h_u}} \right| [0,40 (h_u + 8)^2 \times p_{hor} + 1,20 (2h_u + 13) \times p_{ex} +$$

$$+ \frac{30}{\pi} \left| \sqrt{\frac{n \pi Q}{h_u}} \times p_{imp} \right| = 24 \left| \sqrt{\frac{n \pi Q}{h_u}} \right| [2(h_u + 8)^2 \times p_{hor} + 6(2h_u + 13) \times p_{ex} +$$

$$+ \frac{150}{\pi} \left| \sqrt{\frac{n \pi Q}{h_u}} \times p_{imp} \right|], \text{ en ptas.}$$

En el caso particular:

$$P_D = 120.000 \sqrt{3 \pi Q h_u} \left[ 1,20 h_u + 21,6 + \frac{92,4}{h_u} + \frac{60}{\pi} \times \sqrt{\frac{3 \pi Q h_u}{h_u^2}} \right] \text{ en ptas.}$$

Acompañamos el gráfico 1, con un haz de curvas, de costes-caudales, para distintas alturas útiles del depósito superior.

*Repercusión anual del coste del depósito superior.*

En una hipótesis simplista, de interés del capital más amortización anual de  $r$ ,

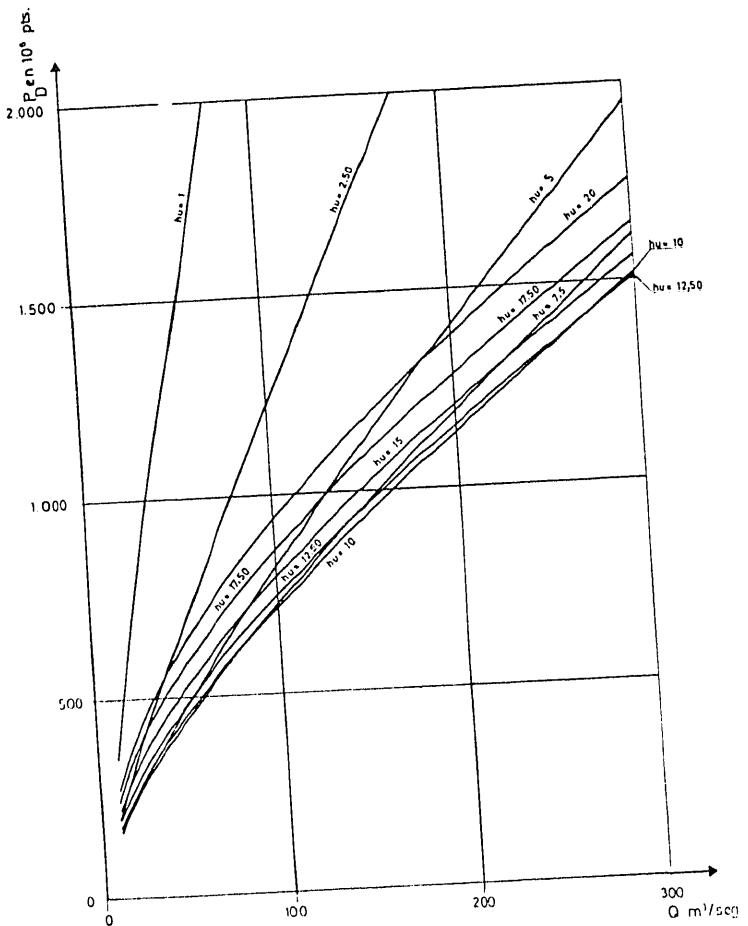


Gráfico 1.—Inversión en depósito superior.

en tanto por uno, la repercusión económica anual del valor del depósito superior en tanto por uno, la repercusión económica anual del valor del depósito superior será:

$$\begin{aligned}
 p_{10} = r \times \pi \times 120 \sqrt{\frac{n Q}{\pi h_u}} & \left[ 0,40 (h_u + 8)^2 \times p_{hor} + 1,20 (2 h_u + 13) \times p_{ex} + 30 \sqrt{\frac{n Q}{\pi h_u}} \times \right. \\
 & \left. \times p_{imp} \right] = 24 r \sqrt{\frac{n \pi Q}{h_u}} \left[ 2 (h_u + 8)^2 \times p_{hor} + \right. \\
 & \left. + 6 (2 h_u + 13) \times p_{ex} + \frac{150}{\pi} \sqrt{\frac{n \pi Q}{h_u}} \times p_{imp} \right], \text{ en ptas./año.}
 \end{aligned}$$

Para un porcentaje anual del 10 por 100, en el caso particular estudiado:

$$P_D = 12.000 \sqrt{3 \pi Q h_u} \left[ 1,20 h_u + 21,6 + \frac{92,4}{h_u} + \frac{60}{\pi} \times \sqrt{\frac{3 \pi Q h_u}{h_u^2}} \right], \text{ en ptas.}$$

Puede apreciarse la influencia de las dimensiones del depósito superior en el coste del mismo, con variaciones que podrían ser objeto de diversas consideraciones.

nes —que no hacemos para no alargar este estudio somero—. Se aprecia la existencia de unas zonas de valores mínimos, que más adelante volveremos a considerar y concretar, y que van entre los 5 y los 12,50 m de altura útil, al pasar el caudal de 10 a 300 m<sup>3</sup>/seg.

#### Coste de la energía perdida por evaporación.

Al considerar el valor de la energía producible que correspondiese a las pérdidas por evaporación, descontando el coste de la elevación correspondiente, resulta:

$$p_{ev,b} = p_{ev,t} - p_{ev,h} = \frac{368}{135} \times 10^{-6} \times E_v \times S \times H \left( \rho_l \times c_l - \frac{c_b}{\rho_b} \right), \text{ en ptas./año.}$$

Esto es real en cuanto se valorasen adecuadamente los precios de la energía marginal o sobrante empleada en el bombeo y el valor de la energía de punta como tal.

Para el caso particular estudiado:

$$p_{ev} = 2,725 \times 10^{-6} \times E_v \times S \times H \times \left( 0,78 \times 1,50 - \frac{0,75}{0,64} \right) \simeq 0$$

Por eso, nos vamos a limitar a considerar el coste de la energía consumida en la elevación, para compensar las pérdidas por evaporación en el depósito superior:

$$p_{ev,h} = \frac{368}{135} \times 10^{-6} \times E_v \times S \times H \times \frac{c_b}{\rho_b}, \text{ en ptas./año}$$

Siendo  $S = n \times 3.600 \times \frac{Q}{h_u}$  (con una capacidad útil del depósito superior para  $n$  horas de bombeo a plena carga):

$$\begin{aligned} p_{ev,h} &= \frac{368}{135} \times 10^{-6} \times E_v \times n \times 3.600 \times \frac{Q}{h_u} \times H \times \frac{c_b}{\rho_b} = \\ &= \frac{2944}{3} \times 10^{-5} \times n \times \frac{H}{h_u} \times Q \times E_v \times \frac{c_b}{\rho_b} = \\ &= \frac{736}{75} \times 10^{-3} \times Q \times H \times \frac{1}{\rho_b} \times \frac{n}{h_u} \times E_v \times c_b, \text{ en ptas./año} \end{aligned}$$

En otras formas:

$$p_{ev,b} = \frac{736}{75} \times 10^{-3} \times \frac{1}{\rho_b} \times E_v \times c_b \times \pi \times H \times \left( \frac{D}{120} \right)^2, \text{ en ptas./año}$$

$$p_{ev,b} = E_b \times 10^{-3} \times \frac{n}{N} \times \frac{E_v}{h_u} \times c_b, \text{ en ptas./año}$$

Para el caso particular estudiado:

$$p_{e\psi,b} = 207 \times H \times \frac{Q}{h_u} = 69\pi \times H \times \left( \frac{D}{240} \right)^2, \text{ en ptas./año}$$

Se incluye el gráfico 2, con un haz de rectas, de costes anuales de la energía consumida por la evaporación-caudales, para diversas alturas útiles del depósito superior y metro de altura de elevación.

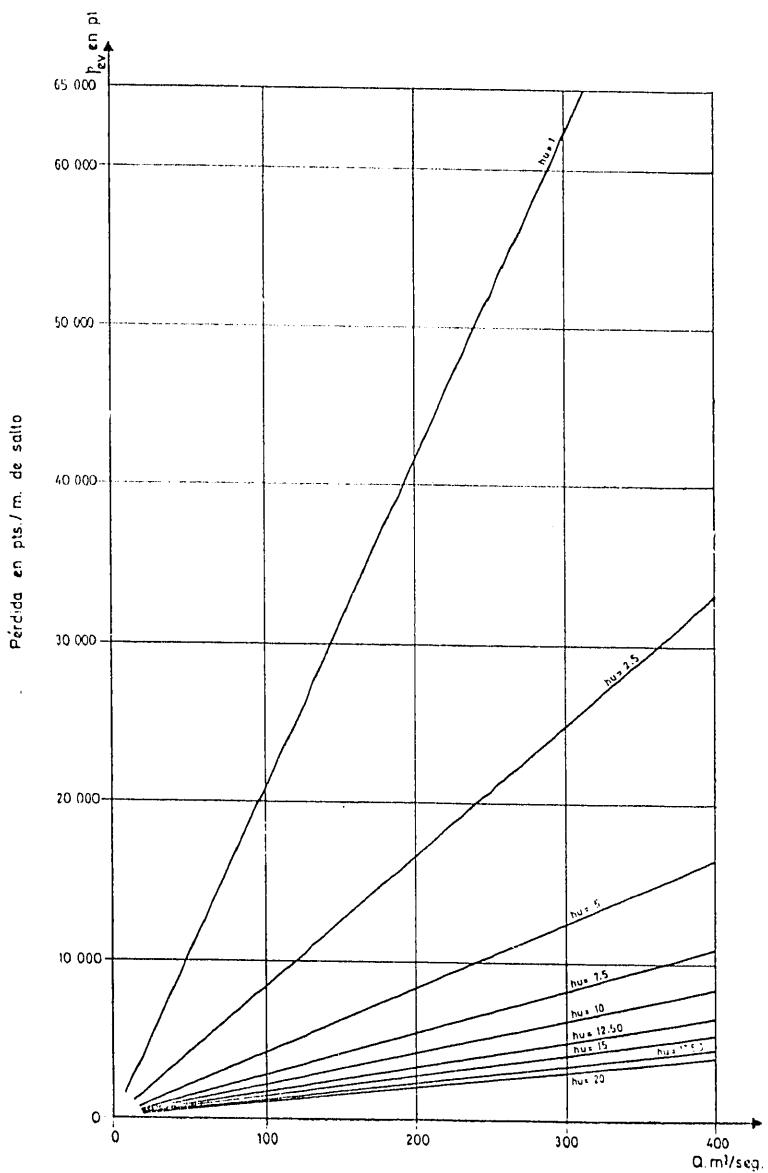


Gráfico 2.—Pérdidas anuales por evaporación.

Podemos apreciar el pequeño importe que representan las pérdidas por evaporación, en relación con la repercusión del coste del depósito superior, si bien puntualizaremos este extremo más adelante.

INCIDENCIA CONJUNTA DE LAS DIMENSIONES DEL DEPOSITO SUPERIOR EN SU COSTE Y EN LAS PERDIDAS POR EVAPORACION

En base a los datos e hipótesis y de acuerdo con los resultados anteriores, vamos a calcular el importe anual mínimo correspondiente al interés y amortización del coste del depósito superior más el coste de las pérdidas por evaporación:

$$\begin{aligned}
 p_c &= p_D + p_{cv} \\
 p_c &= r \times \pi \times 120 \sqrt{\frac{nQ}{\pi h_u}} \left[ 0,40(h_u + 8)^2 \times p_{hor} + 1,20(2h_u + 13) \times \right. \\
 &\quad \times p_{cv} + 30 \left. \sqrt{\frac{nQ}{\pi h_u}} \times p_{imp} \right] + \frac{368}{135} \times 10^{-6} \times E_v \times n \times 3.600 \times \frac{Q}{h_u} \times H \times \frac{c_b}{\rho_b} = \\
 &= 24r \sqrt{\frac{n\pi Q}{h_u}} \left[ 2(h_u + 8)^2 \times p_{hor} + 6(2h_u + 13) \times p_{cv} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{150}{\pi} \sqrt{\frac{n\pi Q}{h_u}} \times p_{imp} \right] + \frac{736}{75} \times 10^{-3} \times n \times \frac{c_b}{\rho_b} \times E_v \times \frac{Q}{h_u} \times H, \text{ en ptas./año}
 \end{aligned}$$

En el caso particular estudiado:

$$p_c = 12.000 \sqrt[3]{3\pi Q h_u} \left[ 1,20h_u + 21,6 + \frac{92,4}{h_u} + \frac{60}{\pi} \times \sqrt[3]{3\pi Q h_u} \right] + 207 \times H \times \frac{Q}{h_u}, \text{ en ptas./año}$$

Se han efectuado unas tablas, calculando (para diversas alturas de salto  $H$ ) los correspondientes importes anuales, en función del caudal máximo utilizado  $Q$  (igual en el bombeo que en el turbinado), y de la altura útil del depósito superior  $h_u$ , que no se acompañan para no alargar este artículo.

En la tabla 1 se recogen los valores de  $h_u$ , que dan los mínimos de  $p_c$  para las variaciones supuestas de  $Q$  y  $H$ .

Para los valores óptimos de  $h_u$ , que da la tabla 1, podemos hallar lo que representa la pérdida de evaporación anual:

$$p_{cv} = 207 \times H \times \frac{Q}{h_u}, \text{ en ptas./año}$$

En la tabla 2 se indican dichos valores de  $p_{cv}$ .

En la tabla 3 se indican, en tanto por mil, la importancia de las pérdidas por evaporación en relación con el coste global del depósito superior más pérdidas, para las dimensiones óptimas.

Por último, hemos considerado conveniente, en la tabla 4, calcular la relación:

$$\frac{D}{h_u} = \frac{240}{h_u} \times \sqrt{\frac{3Q}{\pi h_u}}$$

TABLA 1

VALORES OPTIMOS DE LA ALTURA UTIL DEL DEPOSITO SUPERIOR, EN EL ASPECTO GLOBAL DE SU COSTE Y DE LAS PERDIDAS POR EVAPORACION, EN M Y  $10^6$  PTAS.

$Q_{m^3/seg}$	$H_m$	50	100	150	200	250	300	400	500	750	1.000
10	$h_u$	5,81	5,82	5,83	5,84	5,85	5,86	5,88	5,90	5,94	5,99
	$p_c$	16,225	16,242	16,260	16,278	16,296	16,313	16,349	16,384	16,471	16,558
25	$h_u$	6,86	6,87	6,88	6,90	6,91	6,92	6,94	6,97	7,03	7,08
	$p_c$	28,800	28,838	28,875	28,913	28,950	28,988	29,063	29,137	29,322	29,505
50	$h_u$	7,84	7,85	7,86	7,88	7,89	7,91	7,94	7,97	8,04	8,11
	$p_c$	45,055	45,121	45,187	45,252	45,318	45,384	45,514	45,644	45,968	46,289
75	$h_u$	8,49	8,50	8,52	8,54	8,55	8,57	8,60	8,63	8,71	8,79
	$p_c$	58,850	58,932	59,023	59,114	59,205	59,296	59,477	59,657	60,104	60,548
100	$h_u$	8,99	9,01	9,03	9,05	9,07	9,08	9,11	9,15	9,23	9,32
	$p_c$	71,270	71,385	71,500	71,614	71,729	71,843	72,070	72,297	72,860	73,418
150	$h_u$	9,77	9,79	9,81	9,82	9,84	9,86	9,90	9,94	10,03	10,12
	$p_c$	93,656	93,815	93,974	94,132	94,290	94,447	94,762	95,075	95,852	96,623
200	$h_u$	10,36	10,38	10,40	10,42	10,44	10,46	10,50	10,54	10,64	10,74
	$p_c$	113,923	114,123	114,323	114,521	114,720	114,918	115,313	115,707	116,684	117,652
300	$h_u$	11,27	11,29	11,31	11,34	11,36	11,38	11,42	11,47	11,58	11,68
	$p_c$	150,574	150,850	151,125	151,399	151,673	151,946	152,491	153,033	154,381	155,716

TABLA 2

VALOR ANUAL DE LAS PERDIDAS POR EVAPORACION PARA LAS DIMENSIONES OPTIMAS DEL DEPOSITO SUPERIOR, EN M Y  $10^6$  PTAS.

$Q_{m^3/seg}$	$H_m$	50	100	150	200	250	300	400	500	750	1.000
10	$h_u$	5,81	5,82	5,83	5,84	5,85	5,86	5,88	5,90	5,94	5,99
	$p_{cv}$	17,814	35,567	53,259	70,890	88,462	105,973	140,816	175,424	261,364	345,576
25	$h_u$	6,86	6,87	6,88	6,90	6,91	6,92	6,94	6,97	7,03	7,08
	$p_{cv}$	37,719	75,328	112,827	150,000	187,229	224,350	298,271	371,234	552,098	730,932
50	$h_u$	7,84	7,85	7,86	7,88	7,89	7,91	7,94	7,97	8,04	8,11
	$p_{cv}$	66,008	131,847	197,519	262,690	327,947	392,541	521,411	649,310	965,485	1.276,202
75	$h_u$	8,49	8,50	8,52	8,54	8,55	8,57	8,60	8,63	8,71	8,79
	$p_{cv}$	91,431	182,647	273,327	363,583	453,947	543,466	722,093	899,479	1.336,825	1.766,212
100	$h_u$	8,99	9,01	9,03	9,05	9,07	9,08	9,11	9,15	9,23	9,32
	$p_{cv}$	115,128	229,745	343,854	457,459	570,562	683,921	908,891	1.131,148	1.682,015	2.221,030
150	$h_u$	9,77	9,79	9,81	9,82	9,84	9,86	9,90	9,94	10,03	10,12
	$p_{cv}$	158,905	317,160	474,771	632,383	788,872	944,726	1.254,545	1.561,871	2.321,785	3.068,182
200	$h_u$	10,36	10,38	10,40	10,42	10,44	10,46	10,50	10,54	10,64	10,74
	$p_{cv}$	199,807	398,844	597,115	794,626	991,379	1.187,380	1.577,143	1.963,947	2.918,233	3.854,749
300	$h_u$	11,27	11,29	11,31	11,34	11,36	11,38	11,42	11,47	11,58	11,68
	$p_{cv}$	275,510	550,044	823,607	1.095,238	1.366,637	1.637,083	2.175,131	2.707,062	4.022,021	5.316,781

TABLA 3

COSTE DE LAS PERDIDAS POR EVAPORACION, EN RELACION CON EL COSTE GLOBAL DEL DEPOSITO SUPERIOR  
MAS PERDIDAS PARA DIMENSIONES OPTIMAS, EN %

$Q_{m^3/s e g}$	$H_m$	50	100	150	200	250	300	400	500	750	1.000
10		1,10	2,19	3,28	4,35	5,43	6,50	8,61	10,71	15,87	20,87
25		1,31	2,61	3,91	5,19	6,47	7,74	10,26	12,74	18,83	24,77
50		1,47	2,92	4,37	5,81	7,24	8,65	11,46	14,23	21,00	27,57
75		1,55	3,10	4,63	6,15	7,67	9,17	12,14	15,08	22,24	29,17
100		1,62	3,22	4,81	6,39	7,95	9,52	12,61	15,65	23,09	30,25
150		1,70	3,38	5,05	6,72	8,37	10,00	13,24	16,43	24,22	31,75
200		1,75	3,49	5,22	6,94	8,64	10,33	13,68	16,97	25,01	32,76
300		1,83	3,65	5,45	7,23	9,01	10,77	14,26	17,69	26,05	34,14

TABLA 4

RELACION ENTRE EL DIAMETRO Y LA ALTURA UTIL DEL DEPOSITO SUPERIOR PARA VALORES  
OPTIMOS DE AQUELLA

$Q_{m^3/s e g}$	$H_m$	50	100	150	200	250	300	400	500	750	1.000
10		53	53	53	53	52	52	52	52	51	51
25		65	65	65	65	65	64	64	64	63	62
50		76	75	75	75	75	75	74	74	73	72
75		82	82	82	81	81	81	81	80	79	78
100		87	87	86	86	86	86	85	85	84	82
150		94	94	93	93	93	93	92	92	90	89
200		99	99	99	99	98	98	97	97	96	94
300		107	107	107	106	106	106	105	105	103	102

(diámetro/altura útil del depósito superior), para las situaciones óptimas de menor coste.

### RESUMEN ESQUEMATICO

Como resultados básicos de lo expuesto, pueden indicarse los siguientes, deducidos, fundamentalmente, del caso particular estudiado:

1. Existen, en cada caso —según caudal de bombeo y horas de utilización previstas—, unas dimensiones óptimas del depósito superior (altura y diámetro), que dan el mínimo de su coste, independientemente de otras consideraciones.

Al aumentar el caudal, resulta lógico se produzca aumento de la altura del depósito, que es del orden del 95 por 100 al pasar de 10 a 300 m<sup>3</sup>/seg.

Debido a la influencia de la evaporación, para un mismo caudal la altura del depósito aumenta ligeramente al aumentar la altura de elevación. Estos aumentos oscilan del 3 al 3,7 por 100, al pasar de 50 a 1.000 m (caudales de 10 a 3000 m<sup>3</sup>/seg), por lo que tienen muy poca importancia.

La relación diámetro-altura útil disminuye, muy ligeramente, para un mismo caudal al aumentar la altura de elevación (del 4,4 al 5,7 por 100, al pasar de 50 a 1.000 m y para caudales de 10 a 300 m<sup>3</sup>/seg.) y aumenta, apreciablemente, al aumentar el caudal (del orden del 100 por 100, al pasar de 10 a 300 m<sup>3</sup>/seg.).

2. El coste óptimo del depósito superior pasa de  $162 \times 10^6$  a  $1.503 \times 10^6$  pesetas, al pasar de  $Q = 10$  a  $Q = 300$  m<sup>3</sup>/seg.

3. El coste de las pérdidas anuales por evaporación aumentan con el caudal (del orden del 65 por 100 al pasar de 10 a 300 m<sup>3</sup>/seg.) y con la altura de elevación (del orden del 1.800 por 100 al pasar de 50 a 1.000 m).

4. El coste de las pérdidas anuales por evaporación, aumentan con el caudal (del orden del 1.444 por 100 al pasar de 10 a 300 m<sup>3</sup>/seg) y con la altura de elevación (del orden del 1.832 por 100 al pasar de 50 a 1.000 m).

5. En valores absolutos las pérdidas anuales por evaporación representan de 17.814 a 5.316.781 ptas., al pasar de  $Q = 10$  m<sup>3</sup>/seg y  $H = 50$  m, a  $Q = 300$  m<sup>3</sup>/seg y  $H = 1.000$  m.

En relación con el coste global anual del depósito superior más pérdidas por evaporación, éstas representan del 1,10 al 34,14 por 1.000, al pasar de  $Q = 10$  m<sup>3</sup> por segundo y  $H = 50$  m a  $Q = 300$  m<sup>3</sup>/seg. y  $H = 1.000$  m.

## CONCLUSIONES

Cuanto se acaba de exponer hace referencia a una consideración simplista del caso, con base principal en:

Depósito superior circular, con capacidad para doce horas.

Caudal igual en bombeo y turbinado.

1.500 h de funcionamiento al año.

1.500 mm de evaporación anual.

Rendimientos fijados del bombeo y turbinado.

Costes de las unidades de obra del depósito superior fijados.

Costes de la energía de bombeo y turbinado fijados.

Una variación en los mismos daría lugar, en cada caso particular, a otros valores, si bien consideramos que los resultados deducidos nos permiten tener una

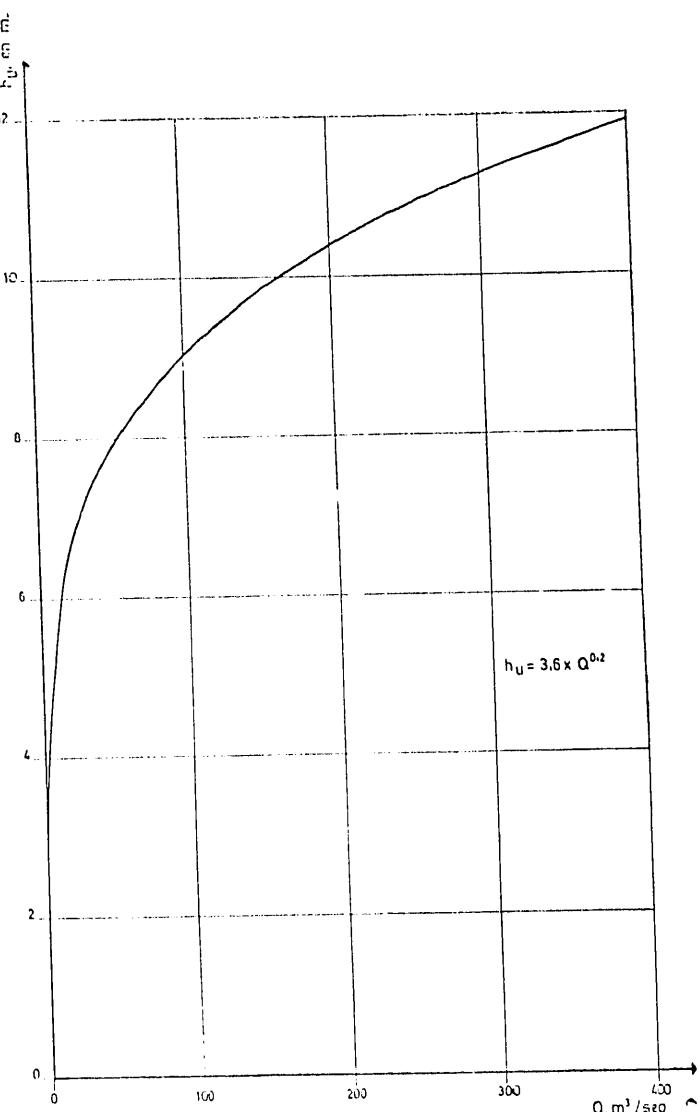


Gráfico 3.— Altura útil óptima para el depósito superior.

cierta idea de la influencia de distintas causas fundamentales en el coste del depósito superior y en el de las pérdidas por evaporación.

En consecuencia, llegamos a las conclusiones siguientes:

1. Existe, en cada caso, una altura útil óptima para el depósito superior, que da el mínimo coste para el mismo y para el de las pérdidas por evaporación.

La misma, aumentando con el caudal y la altura de elevación, varía (hasta los valores máximos de  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{seg}$  y  $H = 1.000 \text{ m}$  estudiados) de 5 a 12 m.

De una forma aproximada, podemos dar la altura útil en función del caudal por la expresión:

$$h_u = 3.60 \times Q^{0.2}, \text{ en metros}$$

Que representamos en el gráfico 3.

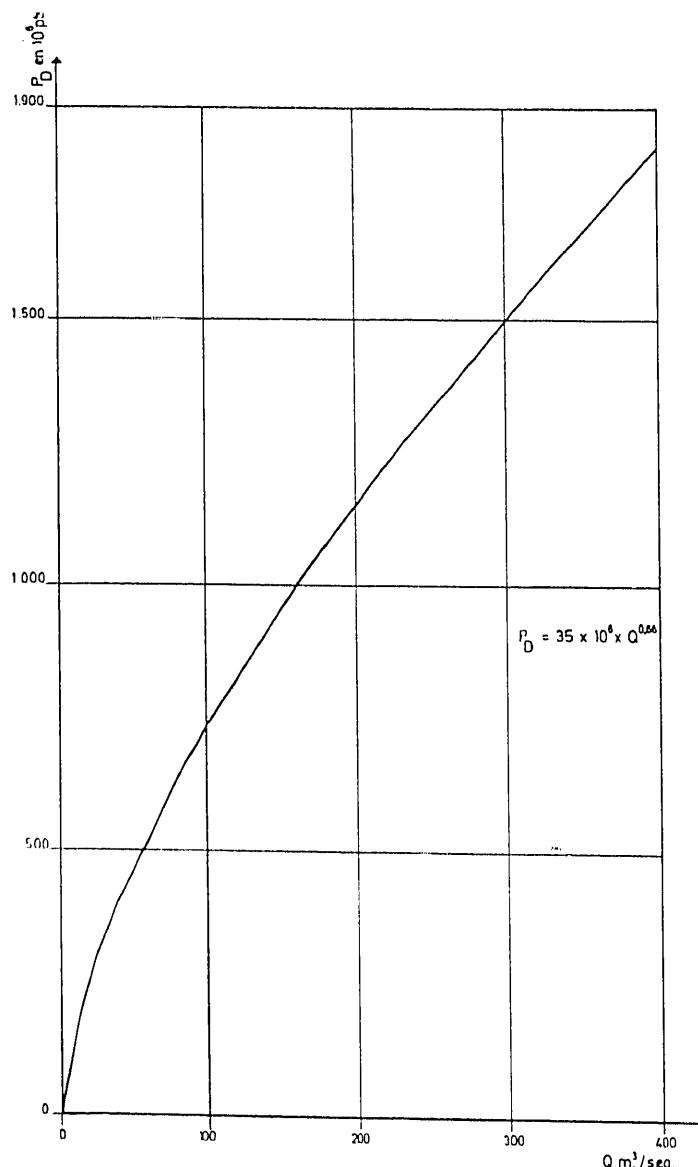


Gráfico 4. — Coste mínimo depósito superior para altura útil óptima.

2. El coste óptimo del depósito superior (supuesto totalmente artificial) podemos expresarlo de una forma aproximada con la fórmula:

$$P_D = 35 \times Q^{0.066}, \text{ en } 10^6 \text{ ptas.}$$

que representamos en el gráfico 4.

3. El coste de las pérdidas anuales por evaporación en el depósito superior, disminuyen al aumentar la altura útil del mismo y, para los valores óptimos de ésta, pueden calcularse por la expresión aproximada:

$$P_{ev} = 3.8 \times 10^{-2} \times E_v \times H \times Q^{0.8}, \text{ en ptas.}$$

$$P_{ev} = 57 \times H \times Q^{0.8}, \text{ en ptas. (para } E_v = 1.500 \text{ mm)}$$

que representamos en el gráfico 5.

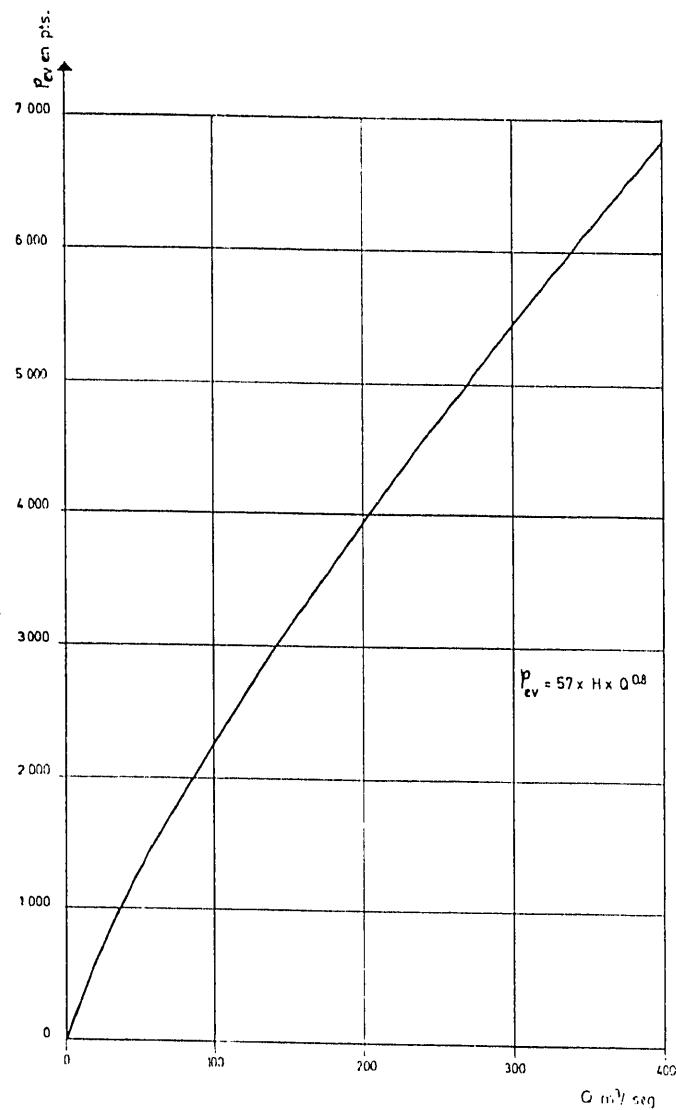
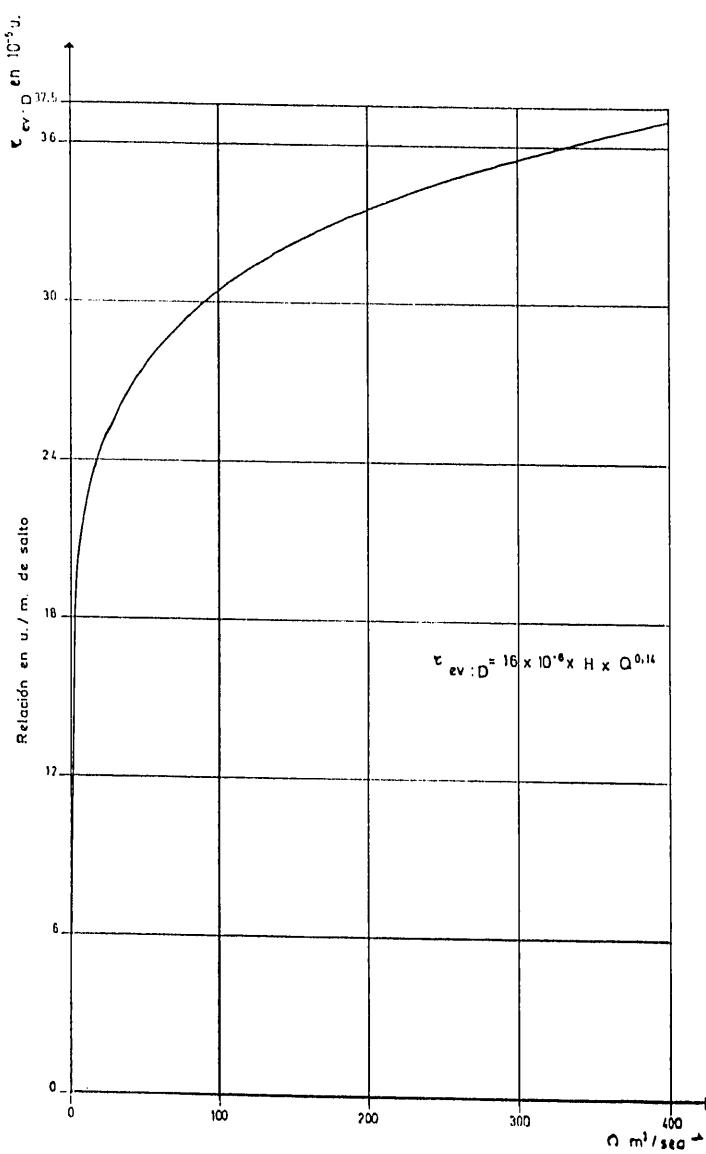


Gráfico 5.—Coste pérdidas anuales evaporación para altura útil óptima del depósito superior.



Gráfica 6.—Relación costes evaporación y depósito superior para altura útil óptima de éste.

4. La relación entre el coste de las pérdidas anuales por evaporación y el de la repercusión anual del coste del depósito superior (de valor mínimo), puede darse por la expresión:

$$r_{ev:D} = 16 \times 10^{-6} \times H \times Q^{0.14}$$

que representamos en el gráfico 6 (para  $H = 1$ ).

Se aprecia la pequeña importancia del caudal y la grande de la altura de elevación, que hace cada vez más interesante tener en cuenta las pérdidas por evaporación a medida que se trata de saltos de mayor altura.

En todo caso, será conveniente efectuar un estudio económico comparando dichas pérdidas con el coste de los productos o procedimientos para evitarlas o disminuirlas y, sobre todo, creemos debe haber una conciencia clara de la existencia e importancia relativa de la evaporación para, en caso conveniente, tomar las disposiciones oportunas.