

Bombas ¿de velocidad constante o variable?, en estaciones de bombeo de aguas fluviales y/o residuales. Análisis de la solución óptima desde el punto de vista energético (*)

Por E. CABRERA; R. PEREZ GARCIA; A. VELA y P. IGLESIAS

U. D. Mec. de Fluidos. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia

Cada vez resulta más frecuente la instalación de estaciones de bombeo en sistemas de alcantarillado urbano. Ante la doble alternativa bombas de velocidad fija o variable, se presenta en este trabajo una metodología para llevar a cabo el cálculo del costo energético diario que cabe esperar de cada una de las soluciones analizadas. El resultado obtenido puede condicionar fuertemente la decisión que finalmente se adopte.

1. INTRODUCCION

Las estaciones de bombeo de sistemas de drenaje urbanos son cada vez más frecuentes y necesarias. Entre las circunstancias que motivan su implantación podemos destacar la necesidad de ganar una elevada cota geométrica en la cabecera de una depuradora, el vencer una pendiente adversa en una red de saneamiento o el tener que impulsar un vertido al mar a través de un emisario submarino.

La tecnología de esta clase de instalaciones ha evolucionado de manera notable y en la actualidad, con un adecuado mantenimiento, su concurso no genera excesivos problemas.

Los dos factores que condicionan en mayor medida el proyecto de una estación de bombeo son:

- a) La clase de aguas a elevar.
- b) La variabilidad del caudal a impulsar en el tiempo.

La calidad del agua afecta, sustancialmente, al tipo de bomba que debe ser instalada, al objeto de prever posibles obstrucciones o funcionamientos inadecuados. Por otra parte, la variabilidad del caudal nos va a condicionar poderosamente el tipo de regulación y modo de funcionamiento del sistema.

Es en este segundo aspecto en el que vamos a centrar nuestro trabajo, analizando con detalle las dos grandes alternativas que se presentan cuando tratamos de resolver el problema de la regulación bien con bombas de velocidad constante (BVC) o bien con turbomáquinas de velocidad variable (BVV). En el primer caso (BVC) la inversión en equipos industriales es menor, si bien el costo de la obra civil aumenta, al requerirse mayores volúmenes de trabajo en los depósitos de bombeo. De otra parte, las diferencias del costo energético, a la hora de impulsar los caudales con cada una de las soluciones pueden ser asimismo significativas correspondiendo el menor costo a la solución con BVV.

Finalmente, la capacidad de adaptarse a las distintas modulaciones diarias de los caudales entrantes con BVV, frente a la rigidez de la solución con BVC, puede suponer en determinados casos en los que la variabilidad estacional sea significativa otra ventaja adicional.

En el presente trabajo vamos a exponer la metodología a seguir para poder cuantificar el costo energético de cada alternativa, comparando la diferencia con el incremento de la inversión en equipamiento industrial requerida (la única desventaja de parte de las BVV), al objeto de poder tomar decisiones con pleno conocimiento de causa.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de julio de 1991.

2. ANALISIS DEL PROBLEMA CON BOMBAS DE VELOCIDAD CONSTANTE (BVC)

2.1. Dimensionado del pozo

Cuando se recurre a BVC la primera cuestión a resolver es fijar el número de bombas a emplear y de acuerdo con sus características, caudales de entrada y secuencia seguida en su regulación, dimensionar la capacidad del depósito de bombeo para que el número de arranques por hora no exceda de un valor máximo previamente establecido.

En el dimensionado del pozo de bombeo, para la secuencia de maniobras definida en la figura 1 (la más usual por cuanto da lugar al caudal más uniforme en la impulsión), una primera expresión muy simplificada permite establecer:

$$V_T = V_0 + n \left(\frac{T_m * Q}{4} \right) \quad (1)$$

La expresión (1) —ver referencia [1]—, determina la capacidad del depósito sin tomar en consideración la gran variabilidad del punto de funcionamiento del sistema con un desnivel de la instalación en permanente cambio. Un cálculo más afinado, [2], dimensiona los volúmenes parciales del pozo de bombeo del modo siguiente:

a) Nos situamos en el volumen de trabajo (i) si se verifica la relación

$$i Q(z_i) > Q_e \geq (i-1) Q(z_{i-1}) \quad (2)$$

pudiendo ocurrir, por desdoblamiento de (2), que se satisfaga, bien

$$i Q(z_{i-1}) > Q_e > (i-1) Q(z_i) \quad (2.1)$$

en cuyo caso funcionarán permanentemente (i-1) bombas arrancando y parando alternativamente la i-ésima, o bien:

$$i Q(z_i) > Q_e > i Q(z_{i-1}) \quad (2.2.1)$$

$$(i-1) Q(z_i) > Q_e > (i-1) Q(z_{i-1}) \quad (2.2.2)$$

en cuyo caso el nivel se estabilizará ya sea en la fase descendente (2.2.2), bien en la ascendente (2.2.1).

Si se da el supuesto (2.2) el período de oscilación de la bomba (i) es teóricamente infinito (no hay arranques ni paradas en el intervalo de tiempo considerado), en tanto que encontramos el caso más desfavorable cuando se da la relación (2.1). En este supuesto hay que determinar el volumen mínimo que de lugar a un número de arranques igual o inferior al máximo prefijado.

b) El cálculo del caudal de entrada más desfavorable de entre los que verifican (2.1), $Q_e = Q_{im}$, lo obtenemos a partir de:

$$\frac{1}{i^2} \ln \frac{i Q(z_i) - Q_e}{i Q(z_{i-1}) - Q_e} - \frac{1}{(i-1)^2} \ln \frac{(i-1) Q(z_i) - Q_e}{(i-1) Q(z_{i-1}) - Q_e} + \quad (3)$$

$$+ \frac{Q_e \Delta Q_i}{[i Q(z_i) - Q_e] [i Q(z_{i-1}) - Q_e]} - \frac{Q_e \Delta Q_i}{(i-1) [(i-1) Q(z_i) - Q_e] [(i-1) Q(z_{i-1}) - Q_e]} = 0$$

c) Una vez determinado Q_{im} , se obtiene el valor del volumen parcial con el concurso de la expresión:

$$V_i = T_m * \Delta z_i / (2B \left[- \frac{\Delta Q_i}{i(i-1)} + \frac{Q_{im}}{i^2} \ln \frac{i Q(z_i) - Q_{im}}{i Q(z_{i-1}) - Q_{im}} - \frac{Q_{im}}{(i-1)^2} \ln \frac{(i-1) Q(z_i) - Q_{im}}{(i-1) Q(z_{i-1}) - Q_{im}} \right]) \quad (4)$$

d) El volumen requerido por la estación de bombeo nos viene dado por la suma de todos los volúmenes parciales V_i más el volumen de seguridad V_0 .

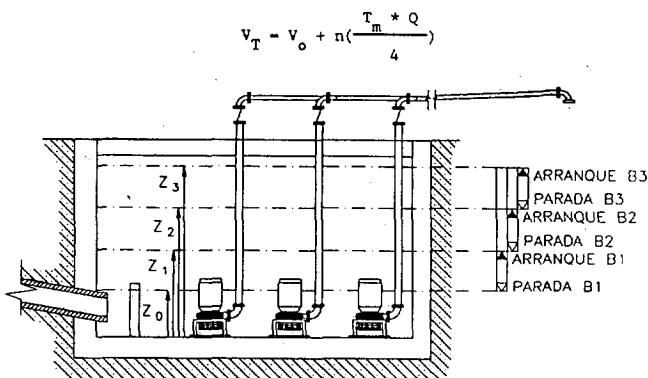


Figura 1. Instalación en estudio y secuencia de operación para BVC.

2.2 Cálculo del costo energético

Conocido el caudal entrante en un determinado período horario Q_{ej} , procede determinar en qué volumen de trabajo (i) nos situaremos, a partir de la relación (2). Una vez conocido el nivel de actuación, el cálculo energético lo llevamos a cabo del modo siguiente:

a) Si se cumple (2.2), resulta

$$W_j = i \frac{\gamma Q_{ej} H(Q_{ej}/i)}{\eta (Q_{ej}/i)} \quad (5)$$

válida para (2.2.1), o bien

$$W_j = (i-1) \frac{\gamma Q_{ej} H(Q_{ej}/(i-1))}{\eta (Q_{ej}/(i-1))} \quad (6)$$

en el caso de que se cumpla (2.2.2). El gasto horario será:

$$G_j = W_j \cdot P_j \quad (7)$$

b) En el supuesto de que Q_{ej} verifique (2.1), al estar inmersos en un proceso alternativo de arranques/paradas de la bomba (i), al tiempo que el nivel varía constantemente, el cálculo es más complejo obteniéndose (ver ref. [2]).

$$\tau_j = 2\gamma.S.B. \left[i \int_{Q(z_{i-1})}^{Q(z_i)} \frac{CQ - DQ^3}{(EQ+F)(iQ-Q_{ej})} dQ + (i-1) \int_{Q(z_{i-1})}^{Q(z_i)} \frac{CQ - DQ^3}{(EQ+F)(Q_{ej}-(i-1)Q)} dQ \right] \quad (8)$$

cuya solución resulta ser

$$\tau_j = 2\gamma.S.B. \left[\frac{Q_i^2 - Q_{i-1}^2}{2} [i M_{ij} - (i-1)M_{i-1,j}] + \Delta Q_{ij} [i N_{ij} - (i-1)N_{i-1,j}] = [i A_{ij} - (i-1)A_{i-1,j}] \frac{1}{E} \ln \frac{EQ_i + F}{EQ_{i-1} + F} + B_{ij} \ln \frac{iQ_i - Q_{ej}}{(i-1)Q_{i-1} - Q_{ej}} - B_{i-1,j} \ln \frac{Q_{ej} - (i-1)Q_i}{Q_{ej} - (i-1)Q_{i-1}} \right] \quad (9)$$

El período completo correspondiente al intervalo horario j , T_j , se determina sumando el

tiempo de vaciado (t_v) y el tiempo de llenado (t_{ll}). Suponiendo que el caudal entrante Q_{ej} nos sitúe en el volumen i, t_v se determinará por integración de:

$$-S \frac{dz}{dt} = iQ(z) - Q_{ej} \quad (10)$$

en tanto que el llenado del depósito, se obtendrá a partir de:

$$+S \frac{dz}{dt} = Q_e - (i-1)iQ(z) \quad (11)$$

Operando adecuadamente y tras sumar t_v y t_{ll} , obtenemos para el período horario en consideración:

$$T_j = 2\gamma.S.B. \left[-\frac{Q_i}{i(i-1)} + \frac{Q_{ej}}{i^2} \ln \frac{iQ(z_i) - Q_{ej}}{iQ(z_{i-1}) - Q_{ej}} - \frac{Q_{ej}}{(i-1)^2} \ln \frac{(i-1)Q(z_i) - Q_{ej}}{(i-1)Q(z_{i-1}) - Q_{ej}} \right] \quad (12)$$

Finalmente el costo energético de ese período horario resulta ser:

$$G_j = \frac{3600 \text{ (seg)}}{T_j} \tau_j \cdot P_j \quad (13)$$

debiendo cuidarse extremadamente la utilización de un sistema de unidades coherente.

3. ANALISIS DEL PROBLEMA CON BOMBAS DE VELOCIDAD VARIABLE (BVV)

Como cuestiones previas a resolver en este segundo supuesto encontramos las siguientes:

- ¿Cómo se lleva a cabo la regulación?
- ¿Cuántas bombas son de velocidad variable con relación al total instalado?

Si bien la metodología que proponemos es totalmente general, introduciendo las necesarias modificaciones correspondientes a cada supuesto analizado, vamos a centrarnos en el caso particular de n bombas instaladas con las (n-1) prime-

ras BVV y que la última que entrará en funcionamiento es una BVC.

Asimismo llevaremos a cabo la regulación de la velocidad en estrecha relación con la variación de nivel de agua en el pozo (los detectores de nivel son los sensores más precisos y sencillos).

Admitiremos que los volúmenes parciales correspondientes a cada nivel de actuación se distribuyen de manera que el intervalo de variación de la velocidad no sea amplio. Ya refiriéndonos al ejemplo que vamos a resolver, con tres bombas instaladas, y para un rango de variación de α prácticamente uniforme en los distintos volúmenes de maniobra, con 2BVV y 1BVC se obtiene un amplio primer nivel y los dos volúmenes siguientes son prácticamente nulos. Por ello se llega a una solución de compromiso de pequeña variación del rango de α y primer volumen muy superior a los siguientes. Entre dos volúmenes consecutivos se dispondrá un desnivel Δz de solape al objeto de evitar arranques y paradas consecutivas de una misma bomba cuando el nivel fluctúe ligeramente.

En definitiva se establece una relación biunívoca y directa entre el nivel de agua en el pozo y el caudal a bombear de manera que se satisfagan los pares de valores:

$$z_{\min} = z_0 \implies Q_b = Q_{e,\min} \text{ (1 bomba funcionando).}$$

$$z_{\max} < z_3 \implies Q_b = Q_{e,\max} \text{ (3 bombas funcionando).}$$

Por lo tanto, conocido el caudal de entrada sabremos el volumen del pozo que le corresponde, el número de bombas que deben funcionar, la velocidad a la que deben ser accionadas y en definitiva el caudal que impulsan que, como es lógico, debe ir siguiendo al caudal entrante.

El cálculo de la energía consumida se lleva a cabo, en intervalos de tiempo suficientemente pequeños (p.e. $\Delta t = 10$ seg.), aplicándose la expresión, para i bombas funcionando:

$$\Delta E = \Delta t \frac{Q_b \cdot H_b(Q_b, \alpha)}{\eta(Q_b, \alpha)} \quad i \quad (14)$$

con:

$$\left[\begin{array}{l} i \leq 2 \\ i Q_b = Q_e \end{array} \right]$$

o bien:

$$\Delta E = \Delta t \left[\frac{Q_b H_b(Q_b, \alpha)}{\eta(Q_b, \alpha)} (n-1) + \frac{Q'_b H'_b(Q'_b)}{\eta'(Q'_b)} \right] \quad (15)$$

con:

$$\left[\begin{array}{l} i=3 \\ 2 Q_b + Q'_b = Q_e \end{array} \right]$$

En la aplicación de las expresiones (14) y (15) se toma en consideración las leyes de la semejanza restringida aplicadas a las turbomáquinas que permiten establecer

$$\left. \begin{array}{l} H = c \alpha^2 - D Q^2 \\ \eta = E^*(Q/\alpha)^2 + F^*(Q/\alpha) \end{array} \right\} \quad (16)$$

Como es lógico la generalización para un valor genérico de n es inmediata, aunque nos hemos centrado en $n = 3$ para clarificar ideas y en correspondencia con el ejemplo que a continuación se desarrolla.

4. EJEMPLO

Tratamos de cuantificar el costo energético diario de un bombeo de aguas urbanas para las dos posibles soluciones a tomar en consideración: BVC o BVV.

4.1. DATOS DEL PROBLEMA

Los caudales horarios medios a elevar en (m^3 /seg) son:

$Q(1h) = 0'650$	$Q(7h) = 0'400$	$Q(13h) = 1'000$	$Q(19h) = 0'820$
$Q(2h) = 0'400$	$Q(8h) = 0'600$	$Q(14h) = 0'950$	$Q(20h) = 0'800$
$Q(3h) = 0'340$	$Q(9h) = 0'680$	$Q(15h) = 0'930$	$Q(21h) = 0'750$
$Q(4h) = 0'150$	$Q(10h) = 0'870$	$Q(16h) = 0'950$	$Q(22h) = 0'720$
$Q(5h) = 0'260$	$Q(11h) = 0'920$	$Q(17h) = 0'950$	$Q(23h) = 0'700$
$Q(6h) = 0'440$	$Q(12h) = 0'990$	$Q(18h) = 0'930$	$Q(24h) = 0'660$

que se corresponden con la gráfica de la Fig. 2

En cuanto al costo del Kwh, con un contrato de triple tarifa, queda establecido según:

$$p(23 \text{ h}) + p(6 \text{ h}) = 6 \text{ pts/Kwh}$$

$$p(7 \text{ h}) + p(12 \text{ h}) = 10 \text{ pts/Kwh}$$

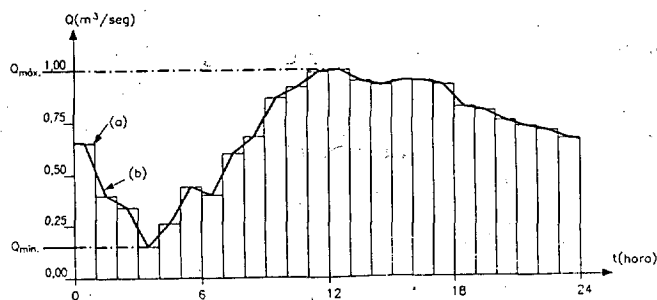


Figura 2. Evolución del caudal diario a bombear.
a) Caudales considerados bombas velocidad fija.
b) Caudales considerados bombas velocidad variable.

$$p(13 \text{ h}) + p(17 \text{ h}) = 15 \text{ pts/Kwh}$$

$$p(17 \text{ h}) + p(22 \text{ h}) = 10 \text{ pts/Kwh}$$

De otra parte la estación de bombeo debe cumplir con los requisitos especificados en la Fig. 3.

Para resolver el problema se recurre a tres bombas en paralelo, iguales, con tuberías de impulsión independientes, cuyas curvas características pasan por los puntos:

H(m)	12.5	12.0	11.8	8.0	6.0
Q(m³/seg)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4
η	0.0	0.5	0.6	0.8	0.7

que una vez ajustadas, por mínimos cuadrados, proporcionan:

$$H = 12.63 - 42.87 Q^2$$

$$\eta = -8.10 Q^2 + 5 Q$$

4.2 Solución del problema con bombas de velocidad fija

Si las tres bombas instaladas en paralelo tienen una velocidad N constante, los valores de Q_{im} (a partir de (3)), así como los volúmenes parciales de operación resultan ser:

$$Q_{1m} = 0.150 \text{ m}^3/\text{s} \quad V_1 = 67.06 \text{ m}^3 \quad z_1 = 0.50 + 0.67 = 1.17 \text{ mts} \quad Q(z_1) = 0.307 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{2m} = 0.477 \text{ m}^3/\text{s} \quad V_2 = 70.64 \text{ m}^3 \quad z_2 = 1.17 + 0.71 = 1.88 \text{ mts} \quad Q(z_2) = 0.323 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{3m} = 0.833 \text{ m}^3/\text{s} \quad V_3 = 74.16 \text{ m}^3 \quad z_3 = 1.88 + 0.74 = 2.62 \text{ mts} \quad Q(z_3) = 0.357 \text{ m}^3/\text{s}$$

en donde, claramente se observa la importante variación de caudal con el nivel del depósito, resultado en cada caso de intersectar la característica motriz del sistema con la resistente.

$$12.63 - 42.87 Q^2 = (7.5 - z) + K Q^2 = 7.5 - z + 24.21 Q^2$$

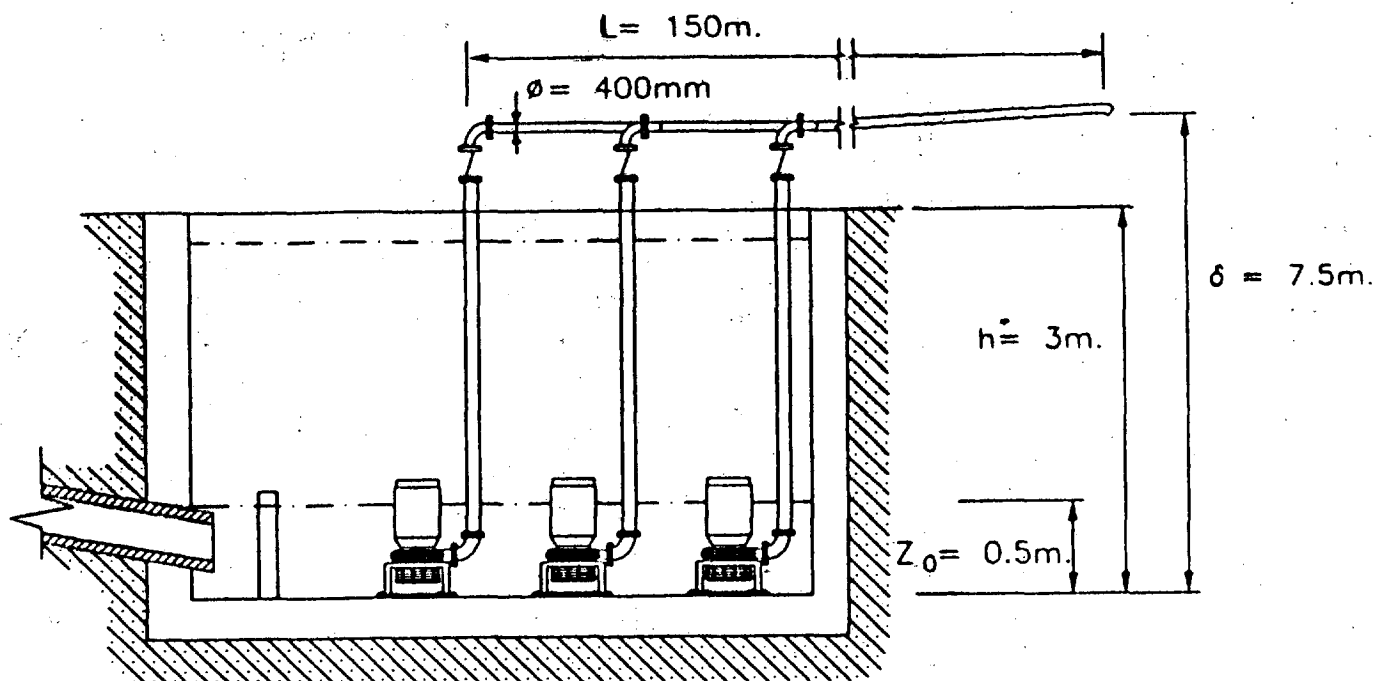


Figura 3. Estación de bombeo cuyo costo energético diario se desea evaluar.

BOMBAS EN ESTACIONES DE BOMBEO DE AGUAS FLUVIALES Y/O RESIDUALES

El resumen, por lo que al modo de operación del pozo se refiere es:

$$V_T = \sum_{i=0}^3 V_i = 50 + 67.061 + 70.644 + 74.156 = 261.86 \text{ m}^3$$

Volumen parcial	Caudal de func.	Caudal de oscilación	Caudal más desf.
	(m ³ /seg)	(m ³ /seg)	(Q _{im} - m ³ /seg)
0.3065 > Q > 0	0.2898 > Q > 0	0.1502	
0.6465 > Q > 0.3065	0.6131 > Q > 0.3233	0.4765	
1.0198 > Q > 0.6465	0.9698 > Q > 0.6798	0.8331	

y finalmente queremos destacar que el volumen total requerido por el pozo resulta ser:

por lo que habida cuenta de que el pozo de bombeo dispone de 300 m³ el volumen sobrante es igual a 38.14 m³, lo que supone dejar 0.38 mts de seguridad.

La simulación del funcionamiento de la estación de bombeo, así como el cálculo del costo energético de cada intervalo horario, es el que seguidamente detallamos.

Hora (h)	Nivel	(Seg.) Periodo Oscilación	Energía (Kwh)	Costo Energía (Pts.)
hora 4	1	900	16.82	101
hora 5	1	2041	29.19	175
hora 6	2	939	46.85	281
hora 7	2	1141	42.58	426
hora 8	2	2916	64.20	642
hora 9	3	12344	67.74	677
hora 10	3	961	88.13	881
hora 11	3	1318	93.32	933
hora 12	3	-	100.70	1007
hora 13	3	-	100.68	1510
hora 14	3	2120	96.59	1449
hora 15	3	1482	94.38	1416
hora 16	3	2120	96.59	1449
hora 17	3	2120	96.59	966
hora 18	3	1482	94.38	944
hora 19	3	902	83.00	830
hora 20	3	928	80.96	810
hora 21	3	1170	75.83	758
hora 22	3	1618	72.73	727
hora 23	3	2431	70.59	424
hora 24	3	-	67.13	403
hora 1	3	-	67.13	403
hora 2	2	1141	42.58	255
hora 3	2	3178	36.11	217

El costo energético diario total, con esta solución, se establece en 17.683 pts.

4.3. Solución con bombas de velocidad variable

Como quiera que una de las ventajas más significativa de los grupos de velocidad variable es la de requerir un volumen mucho menor que la de velocidad constante, trabajamos con una sección S - 50 m², aunque vamos a respetar escrupulosamente la altura del pozo de bombeo para obtener una comparación en condiciones idénticas.

Hemos visto cómo los 3 mts del pozo de bombeo se distribuyen para el caso de BVC (Fig. 4), del siguiente modo:

0.00 < z ≤ 0.50 mts Niveles correspondientes al volumen mínimo.

0.50 < z ≤ 2.62 mts Niveles de operación.

$$\begin{cases} 0.5 < z \leq 1.17 & (V_1) \\ 1.15 < z \leq 1.88 & (V_2) \\ 1.88 < z \leq 2.62 & (V_3) \end{cases}$$

2.62 < z ≤ 3.00 mts Niveles de alarma.

z = 3.00 mts Cota de desbordamiento.

Respetando los criterios ya expuestos la regulación con la solución 2BVV + 1BVC se llevará a cabo del modo siguiente:

Volumen 1	(1 BVV)	0.50 ≤ z ≤ 2.00
Solape		2.00 ≤ z ≤ 2.10
Volumen 2	(2 BVV)	2.10 ≤ z ≤ 2.35
Solape		2.35 ≤ z ≤ 2.45
Volumen 3	(2BVV + 1BVC)	2.45 ≤ z ≤ 2.70
Niveles de alarma		2.70 ≤ z ≤ 3.00

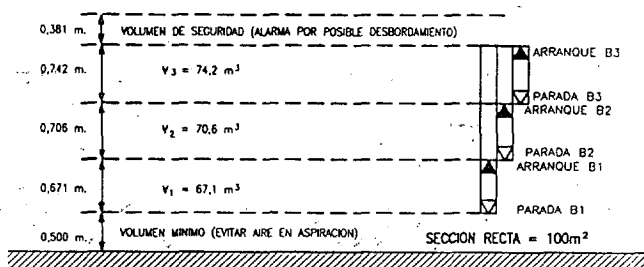


Figura 4. Regulación pozo bombeo BVC.

La Fig. 5 muestra con detalle todos estos aspectos así como el rango de variabilidad de α en cada volumen parcial y los caudales que se corresponden con la regulación adoptada. Debe observarse la relación directa y biunívoca $z + Q_b$.

Finalmente se presenta el comportamiento resumen de la solución 2 BVV + 1 BVC. Como dato más relevante destacamos un costo energético sensiblemente inferior al comportar diariamente 15.993 pts, lo que equivale a un ahorro diario de 1.690 pts. (10'57%). (Cuadro 1)

5. CONCLUSION

Hemos analizado desde una perspectiva fundamentalmente energética, el comportamiento de una estación de bombeo equipada con 3 BVC y con la solución alternativa 2 BVV + 1 BVC, tomando en consideración en todo momento las distintas prestaciones de las bombas con la variación de nivel tanto a la hora de evaluar los volúmenes requeridos por la solución 3 BVF como cuando determinamos el costo energético del bombeo. Las conclusiones más importantes son:

a) Con la solución 3 BVC los niveles de operación mínimos nos vienen impuestos por el número de arranques/paradas por hora permitidos así como por las características de la instalación (caudales entrantes, curvas de las bombas, etc). En el caso de 2 BVV + 1 BVC la regulación es a criterio del proyectista, y los niveles de operación pueden ser cambiados en cualquier momento, aunque se procura mantener dentro de un rango la variabilidad de α lo que se traduce en un primer volumen mucho mayor que los dos siguientes.

b) La capacidad total requerida por el pozo para la solución 3 BVC es importante, en tanto que para la solución 2 BVV + 1 BVC necesita un volumen mucho menor. La única exigencia que tenemos es la de conseguir una regulación con cambios de nivel no excesivamente bruscos. En el ejemplo presentado se ha trabajado con un volumen igual al 50% del exigido por la solución 3 BVC y los resultados obtenidos son totalmente correctos.

c) El consumo energético de la solución 2 BVV + 1 BVC es notablemente inferior (1690 pts/día,

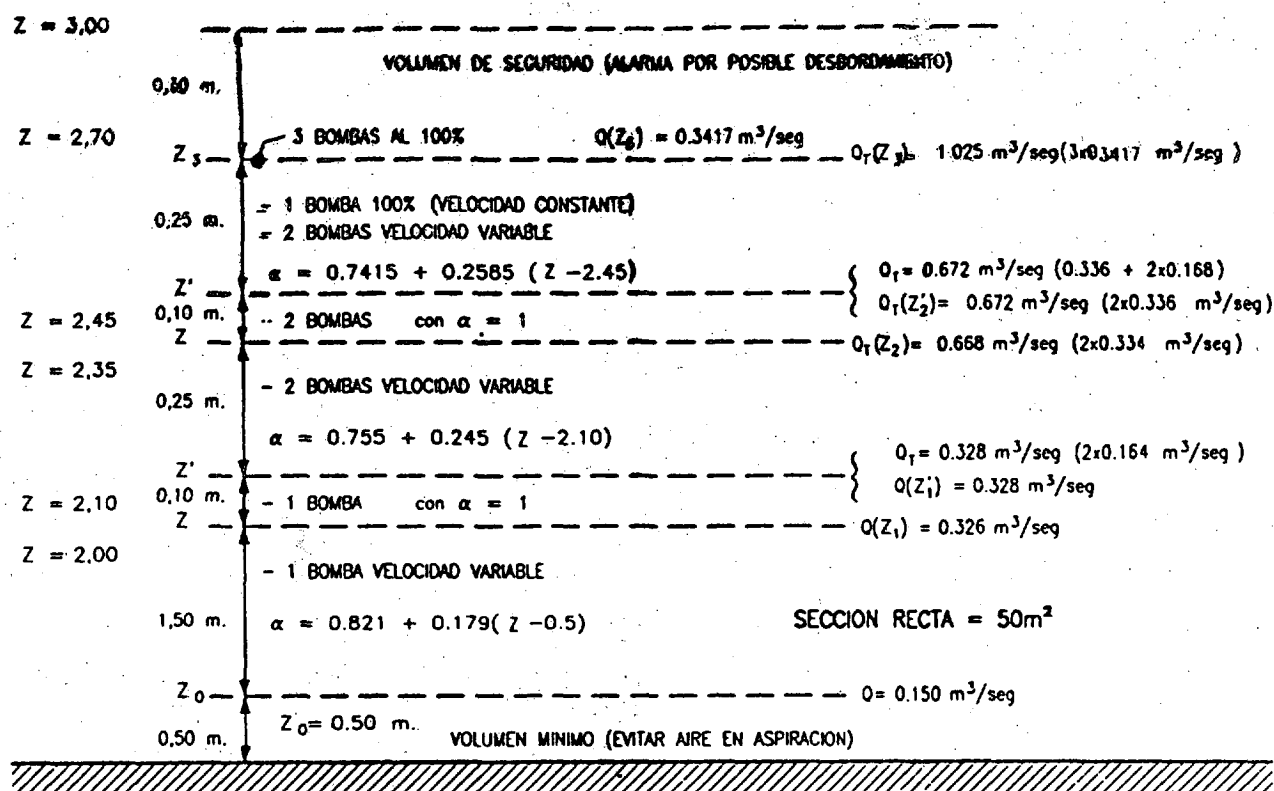


Figura 5. Regulación pozo bombeo BVV. (Diagrama no escalado).

TABLA 1

Hora Calc.	Cota Dep. (m)	Num. bombas	Caudal Sale (m ³ /s)	Volumen Saliente (m ³)	Caudal B.V.V. (m ³ /s)	Caudal B.V.C. (m ³ /s)	Rend. BVV	Rend. BVC	Pot. BVV (Kw)	Pot. BVC (Kw)	Trabajo Acum. (Kw.h)	Coste Energético (pts)
04:30:00	0.50	1	0.150	0.00	0.150	0.000	0.643	0.000	17.24	0.00	0.0	0.0
05:00:00	0.79	1	0.195	305.36	0.195	0.000	0.718	0.000	20.24	0.00	9.3	55.5
06:00:00	1.99	1	0.325	909.10	0.325	0.000	0.769	0.000	33.37	0.00	25.5	153.0
07:00:00	2.16	2	0.420	1477.41	0.210	0.000	0.752	0.000	17.57	0.00	34.7	208.0
08:00:00	2.21	2	0.498	1546.02	0.249	0.000	0.768	0.000	21.58	0.00	36.1	292.9
09:00:00	2.33	2	0.639	2101.75	0.320	0.000	0.769	0.000	31.16	0.00	54.3	543.1
10:00:00	2.51	3	0.774	2489.56	0.218	0.338	0.760	0.765	17.26	33.50	64.9	649.5
11:00:00	2.60	3	0.895	3065.94	0.278	0.339	0.772	0.764	23.86	33.49	76.3	762.6
12:00:00	2.64	3	0.954	3319.29	0.307	0.340	0.769	0.763	27.92	33.48	84.9	848.5
13:00:00	2.68	3	0.995	3535.75	0.327	0.341	0.766	0.763	31.01	33.48	93.5	935.2
14:00:00	2.66	3	0.975	3573.59	0.317	0.341	0.767	0.763	29.50	33.48	95.1	1190.1
15:00:00	2.63	3	0.940	3434.55	0.300	0.340	0.770	0.764	26.91	33.48	89.3	1339.5
16:00:00	2.63	3	0.940	3366.01	0.300	0.340	0.770	0.764	26.88	33.48	86.6	1298.8
17:00:00	2.64	3	0.950	3410.70	0.305	0.340	0.769	0.763	27.61	33.48	88.3	1325.1
18:00:00	2.63	3	0.940	3411.30	0.300	0.340	0.770	0.764	26.91	33.48	88.4	1102.9
19:00:00	2.58	3	0.876	3309.31	0.268	0.339	0.772	0.764	22.72	33.49	84.5	844.9
20:00:00	2.54	3	0.810	2994.21	0.236	0.338	0.767	0.765	19.05	33.50	73.9	739.1
21:00:00	2.51	3	0.775	2867.32	0.219	0.338	0.761	0.765	17.34	33.50	70.2	702.3
22:00:00	2.49	3	0.735	2709.88	0.199	0.337	0.749	0.765	15.57	33.50	66.2	661.6
23:00:00	2.47	3	0.710	2597.00	0.187	0.337	0.738	0.765	14.56	33.50	63.5	635.1
00:00:00	2.45	3	0.680	2511.55	0.172	0.336	0.722	0.765	13.45	33.51	66.7	493.9
01:00:00	2.34	2	0.655	2395.01	0.328	0.000	0.768	0.000	32.45	0.00	64.8	388.9
02:00:00	2.23	2	0.527	2235.96	0.264	0.000	0.771	0.000	23.30	0.00	59.8	358.6
03:00:00	2.12	2	0.370	1529.40	0.185	0.000	0.731	0.000	15.42	0.00	35.9	215.1
04:00:00	1.43	1	0.271	1199.07	0.271	0.000	0.769	0.000	27.04	0.00	30.2	181.3
04:30:00	0.61	1	0.168	395.54	0.168	0.000	0.679	0.000	18.40	0.00	11.2	67.2

lo que significa 618.850 pts/año), ya que de una parte los grupos trabajan con unos rendimientos algo más elevados, y de otra parte se deben vencer desniveles inferiores. Para una instalación como la proyectada, que comporta una potencia total de 100 Kw, de los cuales 66 Kw corresponden a las 2BVV, un variador de frecuencia y equipos auxiliares podría suponer una inversión de 3.000.000 pts, por lo que quedaría amortizada en unos 6 años, sin tomar en absoluto en consideración el menor costo de la obra civil al ahorrar 50 m³ en el pozo de bombeo. No cabe duda que sería la solución a recomendar.

d) El modo de operación de la instalación con 2BVV + 1BVC puede ser modificado en todo momento, por lo que puede adaptarse a cualquier nueva modulación de caudal de entrada, si ello fuera de interés. La instalación llevada a cabo con 3BVC es mucho más rígida.

La suma de todas las precedentes consideraciones se traduce en una cada vez mayor utilización de las BVV.

REFERENCIAS

1. GOLDSCHMIDT "Wet - wells volumes for multi-pumping sustems" Journal of the irrigation and drainage division. ASCE. September 1974 pp 371-385.
2. CABRERA, E; MARTINEZ, F; ESPERT, V; GARCIA-SERRA, J; "Dimensionado de estaciones de bombeo para impulsar caudales variables mediante asociación de bombas en paralelo". XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 31/8 al 4/9 1986. Sao Paulo. Brasil. Vol 4 pp 529-542.

LISTA DE SIMBOLOS

A_{ij} Parámetro dependiente de i y j (su valor viene dado tras la lista de símbolos, en la relación de valores auxiliares).

B	K+D
B _{ij}	Parámetro dependiente de i y j (ver relación de valores auxiliares).
BVC	Bomba de velocidad constante No.
BVV	Bomba de velocidad variable N.
C,D	Coefficientes de ajuste de las curvas altura-caudal.
E,F	Coefficientes de ajuste de las curvas rendimiento-caudal.
ΔE	Energía consumida en un intervalo Δt seg (ver expresión (14)).
G _j	Costo de la energía horaria (hora número j).
H	Hb = altura de la bomba.
Hb	Altura BVC en (15).
i	Número de orden del subvolumen genérico del pozo de bombeo (i = 1 + n).
j	Hora genérica considerada (j = 1 + 24).
K	Coefficiente resistente de la curva altura-caudal del sistema.
M _i	Parámetro dependiente de i (ver relación de valores auxiliares).
n	Número de bombas en paralelo instaladas.
N	Velocidad angular genérica (BVV).
No	Velocidad angular constante (BVC).
N _{ij}	Parámetro dependiente de i y j (ver relación de valores auxiliares).
P _j	Precio del Kwh en la hora número j.
Q	Qb = Caudal bombeado.
Q _b	Caudal BVC en (15).
Q _e	Caudal entrante en el pozo de bombeo.
Q _{ej}	Caudal entrante en el pozo de bombeo en la hora número j.
Q _{e, max}	Caudal máximo entrante en el pozo.
Q _{e, min}	Caudal mínimo entrante en el pozo.
Q _{im}	Caudal entrante más desfavorable en el volumen genérico i (da lugar al período mínimo T _m).
Q _i	Q(z).
Q(z)	Caudal bombeado correspondiente al nivel z del pozo.
Q(z _i)	Q(z _i) - Q(z _{i-1}).
R _{ij}	Parámetro auxiliar dependiente de i y j (ver relación valores auxiliares).
S	Sección recta del pozo de bombeo.
t	Tiempo.
T _j	Período genérico del volumen V _i en la hora j (T _j = t _v + t _{il}).
t _{il}	Tiempo llenado del volumen parcial V _i .
T _m	Mínimo período permitido en el ciclo de una bomba. Equivale a 3600 seg/(nº de arranques de la bomba permitidos por hora).
t _v	Tiempo de vaciado del volumen parcial V _i .
Δt	Intervalo de tiempo considerado para calcular el consumo energético en la solución con BVV (relación (14)).
V _o	Volumen mínimo para evitar la aspiración de aire por las bombas.
V _i	Volumen parcial genérico.
W _j	Potencia demandada en la solución BVC en la hora j.
T _{ij}	Parámetro dependiente de i y j (ver relación valores auxiliares).
z	Nivel genérico del pozo.
z _i	Nivel que limita superiormente el valor V _i .
z _{max}	Nivel máximo de funcionamiento.

z _o	z _{min} = Nivel que limita superiormente el volumen Vo. Nivel de funcionamiento mínimo.
Δz _i	Diferencia de niveles correspondientes a V _i (V _i = S. Δz _i).
α	N/N _o en BVV.
γ	Peso específico del agua (en SI 9.800 Nw/m³).
η	Rendimiento de la bomba.
η	Rendimiento BVC en (15).
τ _j	Energía consumida en la solución BVC en el período horario j.

VALORES AUXILIARES

$$R_{ij} = \frac{i^2(CE^2-DF^2) + D.E.Q_{ej}(iF-E Q_{ej})}{E^2 \cdot i^2}$$

$$T_{ij} = \frac{F.D.Q_{ej}(iF-E Q_{ej})}{E^2 \cdot i^2}$$

$$A_{ij} = \frac{R_{ij} F - E T_{ij}}{iF + E.Q_{ej}}$$

$$B_{ij} = \frac{R_{ij} Q_{ej} + i T_{ij}}{E.Q_{ej} + iF}$$

$$M_i = \frac{D}{i E} \quad N_{ij} = \frac{D (iF - E Q_{ej})}{E^2 i^2}$$

E. Cabrera



Ingeniero Industrial por la ETSII de Barcelona (1971) y licenciado en C. Físicas por la Universidad de Valencia (1974). Se doctoró en 1976 en la Universidad Politécnica de Valencia de la que es profesor desde 1972.

Catedrático de Ingeniería Hidráulica desde Septiembre de 1981 es autor de unas 15 publicaciones internacionales y alrededor de 40 nacionales. Su principal área de interés es la Hidráulica Urbana. En el período 1986-1990 ha sido Director del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia.