Determinación del volumen mínimo de cárcamo y de tanques de regulación en sistemas de bombeo

Federico Alcaraz Lozano

Grupo Ingeniería Integral

Se analizan las variables que intervienen en el comportamiento de cárcamos de bombeo con un cierto número de bombas iguales. A continuación se desarrolla un método para determinar el volumen mínimo del cárcamo y la distribución de los electroniveles para un óptimo funcionamiento y se ilustra con un ejemplo. Por último, se hace una crítica del método y se generaliza para tanques de regulación y para el caso de varias bombas con tamaños diferentes.

Al trabajar en sistemas de bombeo, con frecuencia surge la pregunta: ¿cuál debe ser el volumen mínimo de un cárcamo de bombeo para obtener un funcionamiento racional, cuando el gasto es variable y a la vez lo suficientemente grande para que no convenga tener sólo una bomba y su alterna, sino varias de menor capacidad? Esta interrogante parece tener muchas respuestas y enfoques. En este trabajo se presenta una solución sencilla y probada, a partir de que se conoce el gasto mínimo y se ha decidido usar un cierto número (N) de bombas con un gasto Q_B cada una, número que debe estar en función del costo del equipo, de la eficiencia de las bombas disponibles y del costo de operación y mantenimiento.

Se llamará V al volumen total del cárcamo y se considerará un cierto volumen (V_f) de fondo. Para establecer ciertas bases se supone $V_f = 0.1V$, pero el procedimiento fácilmente se puede aplicar para otros valores, como se indica al final del ejemplo.

Si en el cárcamo el nivel del agua está bajando, significa que en ese momento el bombeo es mayor que el gasto influente y, por lo tanto, se deben parar algunas bombas. Si por el contrario, el nivel sube, se debe arrancar una o algunas de las bombas paradas. En función de esto deben disponerse los electroniveles de arranque (A_i) y paro (P_i) de cada bomba (véase ilustración 1).

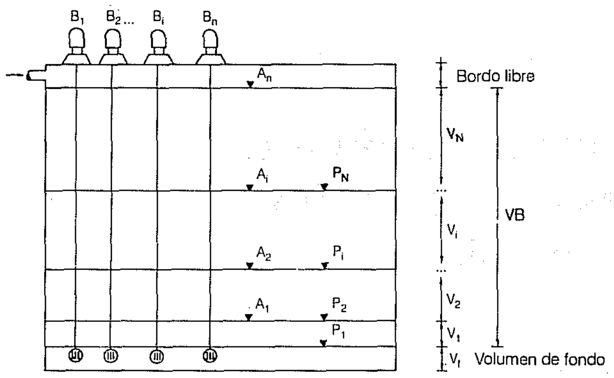
La suma de los gastos que manejan todas las bombas siempre debe ser mayor que el gasto máximo influente y es aconsejable tener una bomba adicional de repuesto para fines de operación y mantenimiento.

Si el gasto influente está entre $(i-1)Q_B$ e iQ_B, ocurre lo siguiente:

- El nivel del agua está en el volumen V_i mientras trabajan las bombas B_1, B_2... y B_i; cuando el nivel del agua llega a "P_i" detiene a B_i y dicho nivel sube. Al llegar a "A_i", vuelve a arrancar la bomba B_i y el nivel del agua baja nuevamente. Esta secuencia se mantiene hasta que el gasto influente aumente o disminuya, y entonces el control pasa a otra bomba.
- Como la bomba B_i está en ciclos de arranque y paro, es razonable suponer que en promedio, para muchas secuencias de ciclos, trabaja la mitad del tiempo. Todas las otras bombas tendrán menos arranques y paros, por lo tanto, para un máximo número de arranques por hora, la bomba crítica es la que está en operación. Si las bombas deben arrancar un máximo de M veces por hora, su tiempo (t) de trabajo en cada ciclo, cuando el nivel está en V_1 y sólo trabaja la bomba B_1, será:

$$t = \frac{3600}{2M} \text{ (segundos)} \qquad (1)$$

1. Disposición de electroniveles en el cárcamo



y el volumen será entonces

$$V_1 = t \cdot Q_B = \frac{3600}{2M} Q_B \qquad (2)$$

Cuando el nivel del agua está en el volumen inferior (V_1) solamente trabaja una bomba (B_1); cuando la bomba arranca, baja el nivel del agua hasta alcanzar el nivel de paro (P_1), entonces la bomba para y el agua sube hasta el nivel "A_1", donde la bomba arranca de nuevo.

Cuando el nivel del agua sube a A_2 entonces debe arrancar también la segunda bomba (B_2), hasta que el nivel sea abatido a P_2: como el gasto de bombas es el doble ($2Q_B$), entonces V_2 debe ser igual a $2V_1$:

$$V_2 = 2V_1 \qquad (3)$$

Siguiendo un razonamiento similar:

$$V_3 = 3V_1$$

$$V_i = iV_1$$

$$V_N = NV_1 \qquad (3)$$

Así, el volumen total V_B del cárcamo, disponible para bombeo, será:

$$V_B = V_1 + V_2 + V_3 + \cdots + V_i + V_N \qquad (4)$$

Sustituyendo (3) en (4):

$$V_B = V_1 + 2V_1 + 3V_1 + \cdots + iV_1 + NV_1$$

$$V_B = (1 + 2 + 3 + \cdots + N)V_1$$

$$V_B = \frac{N(N+1)}{2} V_1 \qquad (5)$$

y al sustituir (2) en (5):

$$V_B = \frac{900N(N+1)}{M} Q_B \qquad (6)$$

Si, para simplificar las expresiones, se supone $M = 5$, se puede escribir:

$$V_B = 180N(N+1)Q_B \qquad (7)$$

Como ya se había planteado considerar un volumen de fondo igual 0.1V, el volumen (V) del cárcamo será:

$$V = V_B + 0.1V$$

de donde:

$$V = \frac{V_B}{0.9} \qquad (8)$$

Sustituyendo (7) en (8) se obtiene:

$$V = \frac{180N(N+1)}{0.9} Q_B \qquad (9)$$

En esta ecuación, V puede estar en metros cúbicos y Q_B, en metros cúbicos por segundo; para disminuir el valor de las constantes se usan litros por segundo como unidades de Q_B, con lo que el volumen del cárcamo es:

$$V = \frac{180N(N+1)}{(1000)(0.9)} Q_B \qquad (10)$$

Para simplificar la notación, conviene establecer que:

$$K = \frac{180N(N+1)}{(1000)(0.9)} \qquad (11)$$

de donde:

$$V = KQ_B \qquad (12)$$

Donde V está en m^3 y Q_B en l/s.

En el cuadro 1 se dan valores de K, hasta 6 bombas. Como también es importante conocer los

1. Valores de K y K_i para M=5

K_i \ N	1	2	3	4	5	6
K_6						2.16
K_5					1.80	1.80
K_4				1.44	1.44	1.44
K_3			1.08	1.08	1.08	1.08
K_2		0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
K_1	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
K	0.40	1.20	2.40	4.00	6.00	8.40

niveles A_1, A_2, etc., se proporcionan además los valores Ki para obtener los volúmenes intermedios, según la expresión:

$$V_i = K_i Q_B \tag{13}$$

donde V está en m³ y Q_B en l/s.

Ejemplo: Si se tienen tres bombas, cada una con un gasto (Q_B) de 500 l/s:

Del cuadro 1 para N=3:

$$K_3 = 1.08$$
$$K_2 = 0.72$$
$$K_1 = 0.36$$
$$K = 2.40$$

El volumen total será:

$$V = KQ_B = 500x2.40 = 1200 \text{ m}^3$$

y los volúmenes parciales:

$$V_3 = (1.08)(500) = 540 \text{ m}^3$$

$$V_2 = (0.72)(500) = 360 \text{ m}^3$$

$$V_1 = (0.36)(500) = 180 \text{ m}^3$$

$$\sum_{i=1}^{3} V_i = 1080 \text{ m}^3$$

y el volumen de fondo:

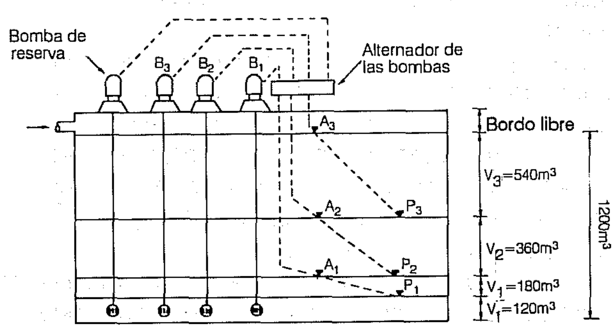
$$V_f = 0.1V = 120 \text{ m}^3$$

$$V = 1200 \text{ m}^3$$

La disposición final del cárcamo será como se muestra en la ilustración 2.

Si se requiere un volumen de fondo (V_f) diferente, simplemente este valor de V_f debe aumentarse a

2. Disposición final del cárcamo del ejemplo



la suma de los V_i. Por ejemplo, si se necesita un volumen de fondo de 200 m³ (por alguna razón, como la sumergencia o un volumen adicional para incendios, etc.) hay que sumar estos 200 m³ a la suma de V_i, y el volumen del cárcamo será:

$$V = \sum V_i + V_f = 1080 + 200 = 1280 \text{ m}^3$$

Ahora, bajo el supuesto de contar con bombas que trabajan con 10 arranques por hora, lo que significa que en promedio trabajan 3 minutos y paran otros 3, alternadamente. Al seguir el desarrollo anterior de la ecuación (6) a la (12), el valor de K cambia a:

$$K' = \frac{90N(N+1)}{(1000)(0.9)} = \frac{K}{2} \tag{14}$$

Los valores de K bajan a la mitad y se demuestra que son inversamente proporcionales a M, (véase cuadro 2).

Se puede notar que los cárcamos disminuyen al aumentar M. El autor considera que los valores de M deben conservarse en el rango de 5 a 10, porque menos de cinco conduce a cárcamos muy grandes y más de l0, a una operación forzada de las bombas, con poco tiempo entre los arranques. Esta condición es crítica, sobre todo en las bombas

2. Valores de K y K_i para M=10

K_i \ N	1	2	3	4	5	6
K_6						1.13
K_5					0.90	0.90
K_4				0.72	0.72	0.72
K_3			0.54	0.54	0.54	0.54
K_2		0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
K_1	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
K	0.20	0.60	1.20	2.00	3.00	4.20

grandes. Para valores intermedios de M se pueden interpolar linealmente las cifras mostradas en los cuadros 1 y 2.

Este procedimiento se puede aplicar también a los grandes tanques reguladores invirtiendo los volúmenes V_i y los niveles A_i y P_i (véase ilustración 3). De esta manera entre más baja el nivel, al aumentar la demanda, trabaja un mayor número de bombas, aunque se debe cuidar que A_N esté arriba de la clave del tubo de salida.

En este trabajo se ha considerado que todas las bombas son iguales, lo que es muy recomendable, pero si se desean bombas de tamaños diferentes, en cada caso particular, se puede aplicar la secuencia de cálculo presentada.

3. Disposición en un tanque regulador