

## Nota técnica

# Cálculo del diámetro más económico de la tubería de descarga de una planta de bombeo

Uriel Mancebo Del Castillo

UMAC, Consultores

*Se presenta un método para determinar el diámetro más económico en una planta de bombeo en el que se toman en cuenta los costos de suministro, instalación y operación del sistema, así como el de los dispositivos de alivio para atenuar los efectos causados por el flujo transitorio. También se hace énfasis en el caso más común que corresponde al de plantas de bombeo donde sólo se utilizan válvulas del tipo de seguridad, o bien, de las conocidas como aliviadoras de presión. Asimismo, se incluyen dos ejemplos para la mejor comprensión del método que se propone.*

**Palabras clave:** tubería de descarga, diámetro más económico, planta de bombeo, operación, administración, costos, válvulas de seguridad.

## Introducción

Para el diseño hidráulico de una planta de bombeo, es necesario seleccionar el diámetro más económico de la tubería de descarga, lo cual se lleva al cabo con base en la economía tanto de la inversión inicial como de la operación y el mantenimiento de esta última. La inversión inicial corresponde al costo de la tubería y comprende básicamente los conceptos de excavación, plantilla, rellenos compactados y a volteo, suministro e instalación tanto de la tubería como de las piezas especiales y de los dispositivos de alivio que, en su caso, sean necesarios para atenuar los efectos del flujo transitorio. El segundo concepto consiste en el costo de la energía eléctrica consumida por el bombeo.

El diámetro más económico de la tubería de descarga será aquél para el que resulte mínima la suma de las anualidades de los conceptos antes mencionados para un determinado periodo de diseño, según se muestra en la ilustración 1, donde  $C_t$  representa el costo anualizado de la tubería,  $C_b$  el de bombeo,  $C$  el total,  $C_{min}$  el mínimo y  $D_e$  el diámetro más económico. Como puede verse, al aumentar el diámetro aumenta el costo y sucede lo contrario cuando se reduce el diámetro.

## Costo de la tubería de descarga

De acuerdo con los conceptos anteriormente mencionados que integran el costo de la tubería de descarga, este se puede definir como sigue en forma anualizada:

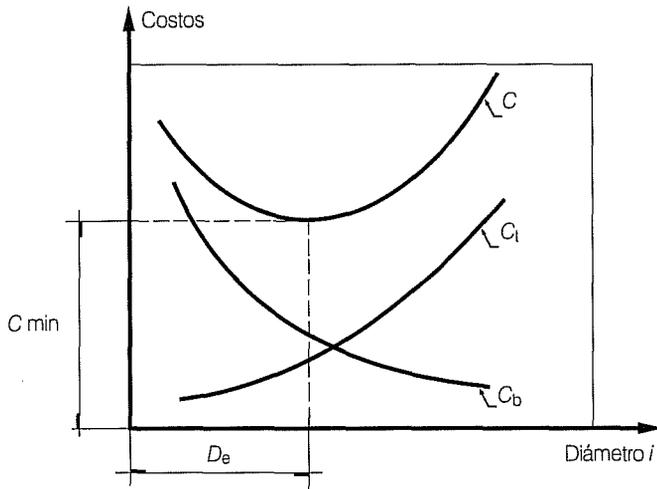
$$C_t = \left( \left( \sum_{j=1}^n C_j \right) L + Ca \right) f(i, N) \quad (1)$$

donde  $C_j$  es el costo por unidad de longitud de tubería correspondiente al concepto  $j$  (excavación, suministro, instalación, etc.),  $L$  la longitud de la tubería de descarga,  $Ca$  el costo de los dispositivos de alivio para atenuar el efecto del flujo transitorio,  $f(i, N)$  es la función de recuperación de capital que define el pago anual incluyendo tanto el capital principal como el interés necesario para amortizar la inversión en  $N$  años a una tasa de interés  $i$ . Esta función se expresa como:

$$f(1, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^{N-1}} \quad (2)$$

En el cuadro 1 se muestran diversos costos de tubería de asbesto cemento y PVC calculados por algunos fabricantes para 1995.

1. Diámetro más económico



1. Costos totales aproximados por metro lineal de tuberías. (Según precios proporcionados por fabricantes para 1995 en nuevos pesos)

Clase	mm	Pulg	Material	
			AC	PVC
A-5	50	2	17.22	20.03
	75	3	40.54	27.6
	100	4	45.64	29.71
	150	6	71.96	33.19
	200	8	84.81	55.88
ó	250	10	108.2	80.56
	300	12	135.47	116.48
Clase 5	350	14	196.12	157.07
	400	16	238.55	178.52
A-7	50	2	11.88	20.03
	75	3	17.22	27.6
	100	4	43.3	29.71
	150	6	47.05	40.75
	200	8	73.34	72.14
ó	250	10	89.37	28.88
	300	12	121.56	32.8
Clase 7	350	14	155.95	37.94
	400	16	223.29	42.9
A-10	50	2	11.88	20.03
	75	3	17.22	29.4
	100	4	46.46	34.15
	150	6	51.94	42.55
	200	8	88.17	78.08
ó	250	10	106.36	111.91
	300	12	153.54	32.8
Clase 10	350	14	204.42	37.94
	400	16	294.3	42.9

Observaciones: Se considera tubería de PVC serie métrica. El costo total está formado por: instalación-suministro y piezas especiales (el 30% de los costos corresponde a instalación y suministro).

Costo de bombeo

El costo de la energía eléctrica consumida por el bombeo, se puede obtener con base en la potencia al freno de los equipos que componen la planta, la cual se puede escribir como:

$$P = \frac{9.80 QH_b}{\eta} \quad (3)$$

donde  $P$  es la potencia al freno en  $kwh$ ,  $Q$  el gasto bombeado en  $m^3/seg.$ ,  $H_b$  la carga de bombeo en  $m.$ , y  $\eta$  la eficiencia total de operación.

De la ilustración 2 se deduce fácilmente que:

$$H_b = H_o + h_{ld} + h_{ls} \quad (4)$$

Siendo  $H_o$  el desnivel de la superficie libre entre los depósitos de succión y entrega, y  $h_{ls}$  y  $h_{ld}$  las pérdidas de carga en las tuberías de succión y descarga respectivamente. Sin embargo, si se considera que  $h_{ls} \ll h_{ld}$  y se desprecian las pérdidas locales en la tubería de descarga, con  $h_{ld} = h_f$  la ecuación anterior se reduce a:

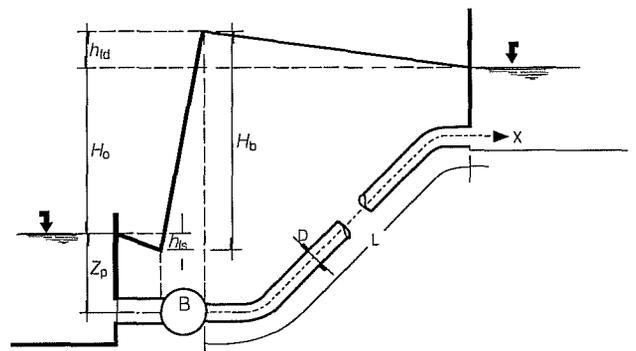
$$H_b = H_o + h_f \quad (5)$$

donde  $h_f$  son las pérdidas por fricción en la tubería de descarga que se calculan como:

$$H_f = \frac{KLQ^2}{D^m} \quad (6)$$

y los valores de  $K$  y  $m$  dependerán de la fórmula que se utilice. Así, para la fórmula de Manning se tendrá que  $m = 16/3$  y  $K = 10.3n^2$ .

2. Esquema de una planta de bombeo



Si se toma en cuenta lo anterior y se sustituye la ecuación (6) en la (5) se obtiene:

$$H_b = H_o + \frac{10.3n^2 L Q^2}{D^{16/3}} \quad (7)$$

y de esta ecuación y la (3) resulta:

$$P = \frac{9.80 Q}{\eta} \left( H_o + \frac{10.3 n^2 L Q^2}{D^{16/3}} \right) \quad (8)$$

luego si el costo por kwh de bombeo es  $C_k$ , el costo anual por este concepto será:

$$C_o = \frac{85,848 C_k Q}{\eta} \left( H_o + \frac{10.3 n^2 L Q^2}{D^{16/3}} \right) \quad (9)$$

### Costo total

De acuerdo con lo anterior el costo total anualizado se obtiene sumando miembro a miembro las ecuaciones (1) y (9) lo que da como resultado:

$$C = \left( \left( \sum_{j=1}^n C_j \right) L + Ca \right) f(i, N) + B \left( H_o + \frac{10.3 n^2 L Q^2}{D^{16/3}} \right) \quad (10)$$

donde:

$$B = \frac{85,848 C_k Q}{\eta} \quad (11)$$

Por otra parte, dado que el costo de los dispositivos de alivio es pequeño comparado con el costo de suministro e instalación de tubería, cuando tales dispositivos son válvulas del tipo de seguridad o aliviadoras de presión, la ecuación (10) para estos casos particulares se reduce a:

$$C = \left( \sum_{j=1}^n C_j \right) L f(i, N) + B \left( H_o + \frac{10.3 n^2 L Q^2}{D^{16/3}} \right) \quad (12)$$

o bien:

$$C_1 = \left( \sum_{j=1}^n C_j \right) f(i, N) + \frac{10.3 n^2 L Q^2}{D^{16/3}} \quad (13)$$

donde:

$$C_1 = \frac{C - B H_o}{L}$$

En consecuencia, el diámetro más económico será aquél que minimice cualquiera de las ecuaciones (12) o (13).

### Cálculo del diámetro más económico

Con el fin de conocer el valor inicial que sirva de partida para el cálculo del diámetro más económico, se sugiere la aplicación de la siguiente expresión, en la que se ha supuesto una velocidad más económica igual a 1.00 m/seg:

$$D_o = 1.13 \sqrt{Q} \quad (14)$$

donde:

$D_o$  Diámetro más económico, en m.

$Q$  Gasto, en m<sup>3</sup>/seg.

conocido el valor de  $D_o$ , el paso siguiente consistirá en la aplicación recursiva de cualquiera de las ecuaciones (12) o (13) para este diámetro y los comerciales inmediato inferior y superior, respectivamente, o bien, de los necesarios para definir una curva tal como la  $C$  que se muestra en la ilustración 1.

### Ejemplos

Determinar el diámetro económico para una planta de bombeo con las siguientes características

$$Q = 4 \text{ lps}$$

$$L = 3 \text{ 000 m}$$

$$\eta = 0.60$$

$$C_k = 0.27 \text{ nuevos pesos}$$

$$i = 12 \%$$

$$N = 15 \text{ años}$$

$$H_o = 60 \text{ m}$$

De la ecuación (14) se obtiene:

$$D_o = 1.13 \sqrt{0.004} = 0.071 \text{ m (3")}$$

y de las (2) y (11):

$$f(i, N) = \frac{(0.12) (1.12)^{15}}{(1.12)^{15} - 1} = 0.147$$

$$B = \frac{(85\ 848) (0.27) (0.004)}{0.60} = 154.52$$

Consecuentemente, según lo indicado en el cuadro 1, la tubería deberá ser de asbesto cemento clase A-7. Así, para  $D=0.050$  m (2") de acuerdo con la ecuación (13) resulta:

$$C_1 = (11.88) (0.147) +$$

$$\frac{(10.3) (154.52) (0.010)^2 (0.004)^2}{(0.050)^{5.33}} = 23.87$$

para  $D=0.075$  m (3"):

$$C_1 = (17.22) (0.147) +$$

$$\frac{(10.3) (154.52) (0.010)^2 (0.004)^2}{(0.075)^{5.33}} = 5.08$$

para  $D=0.100$  m (4"):

$$C_1 = (43.30) (0.147) +$$

$$\frac{(10.3) (154.52) (0.010)^2 (0.004)^2}{(0.100)^{5.33}} = 6.91$$

De acuerdo con los resultados obtenidos, puede afirmarse que en este caso particular el diámetro más económico es de 0.075 m (3"). Asimismo, en este ejemplo se ha planteado que la envolvente de cargas mínimas que se obtiene como consecuencia del golpe de ariete, no corta la línea de vaporización del agua y, en tales condiciones, la carga máxima puede ser limitada con la instalación de una válvula de seguridad.

Determinar el diámetro más económico para una planta de bombeo con las siguientes características:

$$Q = 95 \text{ lps}$$

$$L = 600 \text{ m}$$

$$\eta = 0.75$$

$$C_k = 0.27 \text{ nuevos pesos}$$

$$i = 12 \%$$

$$N = 15 \text{ años}$$

$$H_o = 30 \text{ m}$$

de la ecuación (14) resulta:

$$D_o = 1.13 \sqrt{0.095} = 0.348 \text{ m (14")}$$

y de la (11) y el ejemplo anterior:

$$B = \frac{(85\ 848) (0.27) (0.095)}{0.75} = 2\ 936$$

$$f(i, N) = 0.147$$

Como puede verse en el cuadro 1, para este caso la tubería deberá ser de PVC clase A-5. De la ecuación (13) para  $D=0.300$  m (12") resulta:

$$C_1 = (116.48) (0.147) +$$

$$\frac{(10.3) (2\ 936) (0.009)^2 (0.095)^2}{(0.300)^{5.33}} = 30.71$$

para  $D=0.350$  m (14"):

$$C_1 = (157.07) (0.147) +$$

$$\frac{(10.3) (2\ 936) (0.009)^2 (0.095)^2}{(0.350)^{5.33}} = 29.06$$

para  $D=0.400$  m (16"):

$$C_1 = (178.52) (0.147) + \frac{(10.3) (2\ 936) (0.009)^2 (0.095)^2}{(0.400)^{5.33}} = 29.17$$

Aquí, el diámetro más económico es de 0.350 m (14") y también se supone que resulta aplicable lo ya mencionado en el ejemplo anterior con relación a los efectos del golpe de ariete, sólo que en este caso la válvula deberá ser del tipo aliviadora de presión.

### Conclusiones

Los costos de tubería y de energía eléctrica así como el valor de la velocidad económica utilizados en este trabajo son sólo aproximados y corresponden a la

fecha en la que fue estimado el mismo, por lo que únicamente deberán ser tomados en cuenta como base para la elaboración de ejemplos.

Se considera que el método propuesto es particularmente útil para ser aplicado en el cálculo del diámetro más económico, principalmente cuando se trata de plantas de bombeo donde no se requiere de la construcción de estructuras como cámaras de aire o tanques unidireccionales, aunque su ámbito de aplicación es totalmente general.

Recibido: mayo, 1994  
Aceptado: noviembre, 1994

### Referencia

Mancebo del Castillo, Uriel. *Teoría del golpe de ariete y sus aplicaciones en ingeniería hidráulica*. Editorial Limusa. México 1987.

### Abstract

Mancebo, U. "Computation of the Most Economical Pipe Diameter for Pumping Plant Discharge". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol X. Num. 1, pages 49-53, January-April, 1995.

A method is presented to calculate the most economical diameter pipe for a pumping plant discharge when consideration is given to cost of supply, installation and operation of the system, as well as to the overflow devices which may be required to reduce the effects of supercritical flow. Emphasis is given to pumping plants where only safety or pressure relief values are used. Two examples are given.

**Key words:** pumping plant discharge, most economical diameter, pipe, operation, administration, pressure relief values.