

Efectos del golpe de ariete en plantas de bombeo con tubería de descarga descendente

Uriel Mancebo del Castillo

Facultad de Ingeniería, UNAM

En este trabajo se presentan las condiciones de frontera que sirven para simular los efectos del golpe de ariete asociados a un paro rápido de todos los equipos de bombeo en una planta con una tubería de descarga globalmente descendente, mediante la aplicación del método de las características. También se muestran los resultados del cálculo hidráulico efectuado para una de las plantas de este tipo existente en el acueducto que abastece de agua potable a Ciudad del Carmen, Campeche, con y sin la presencia de un tanque unidireccional que sirva para evitar el fenómeno de separación de columna de agua que se origina en este caso particular.

La disposición general más común de las partes constitutivas de una planta de bombeo se presenta cuando el cárcamo o el dispositivo de succión y los equipos se ubican en un nivel topográfico inferior al depósito de descarga, o al cárcamo situado en el extremo aguas abajo, de tal manera que el perfil de la tubería de descarga es globalmente ascendente y resulta un esquema semejante al indicado en la ilustración 1a.

Cuando en una planta del tipo descrito, falla el suministro de energía y el gasto proporcionado por los equipos de bombeo se reduce a cero, en un lapso muy pequeño comparado con el periodo de la tubería T , se originan oscilaciones de la carga piezométrica H en la sección $x = 0$ de la forma mostrada. La depresión instantánea adquiere un valor $\Delta H = aQ_0/gA$, las cargas mínima y máxima se alcanzan en los instantes $t = T$ y $t = 2T$ respectivamente y, con el transcurso del tiempo, la carga tiende a un valor de $H = Z_L$.

Sin embargo, cuando la disposición de los elementos que constituyen la planta es la que se indica en la ilustración 1b, donde el perfil de la tubería de descarga es globalmente descendente y la velocidad angular de las partes giratorias de los conjuntos bomba-motor alcanza un valor cercano a

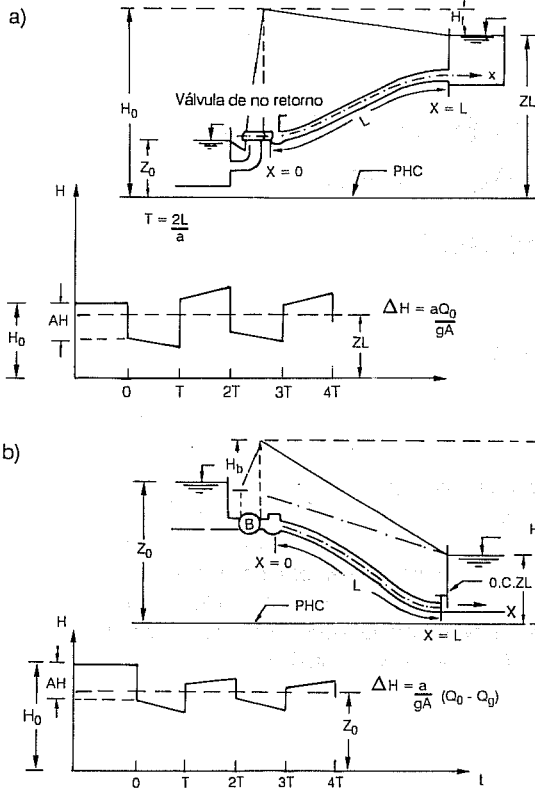
cero, también en un lapso pequeño comparado con el periodo T , en la sección $x = 0$, el gasto se reduce prácticamente en forma instantánea de un valor Q_0 a otro Q_g que corresponde a la operación de un sistema a presión sin bombeo y cuyo valor queda definido como:

$$Q_g = A \sqrt{\frac{2gD(Z_0 - Z_L)}{fL}} \quad (1)$$

En estas condiciones, la depresión en el instante $t = 0$ resulta ser $\Delta H = a/gA(Q_0 - Q_g)$, las cargas mínima y máxima se presentan en los instantes $t = T$ y $t = 2T$, respectivamente, y con el transcurso del tiempo, la carga tiende a un valor de $H = Z_0$.

Por otra parte, mientras en una planta de bombeo con una tubería de descarga globalmente ascendente, el gasto se reduce a cero en la totalidad de la misma en el instante $t = T/2$ y posteriormente alcanza un valor igual a $-Q_0$ en el instante $t = T$, en el caso de otra con una tubería globalmente descendente, el gasto tendrá un valor cercano a Q_g a lo largo de todo su desarrollo a partir del instante $t = T/2$ y existirá un proceso de vaciado en la misma mientras no se cierre el órgano de control ubicado en el extremo aguas abajo (véase ilustración 1b).

1. Golpe de ariete en sistemas de bombeo (a) ascendentes
(b) descendentes



Condiciones de frontera

De acuerdo con lo arriba mencionado, se puede aplicar el método de las características (Hanif, 1979; Mancebo del Castillo, 1987), con las condiciones de frontera que se proponen, para simular la evolución de la carga piezométrica en una planta de bombeo con una tubería de descarga globalmente descendente, donde la velocidad angular de las partes giratorias de los conjuntos bomba-motor alcanza un valor cercano a cero en forma casi instantánea:

En la sección \$x = 0\$:

$$v_P = v_g \quad (2)$$

y

$$h_P = 2\varepsilon(v_g - C_{na}) \quad (3)$$

En la sección \$x = L\$

$$h_P = h_L \quad (4)$$

y

$$v_P = C_{Pa} - \frac{h_L}{2\varepsilon} \quad (5)$$

En las ecuaciones anteriores:

$$C_{Pa} = V_A + \frac{h_A}{2\varepsilon} - F_a V_A |V_A| \quad ,$$

$$C_{na} = V_B - \frac{h_B}{2\varepsilon} - F_a V_B |V_B| \quad ,$$

$$F_a = \frac{f Q_0 \Delta t}{2 D A} \quad , \quad h_L = \frac{Z_L}{H_0} \quad \text{y} \quad 2\varepsilon = \frac{a Q_0}{g A H_0}$$

donde los subíndices \$B\$ y \$A\$ denotan los valores del gasto y la carga piezométrica adimensionales \$v\$ y \$h\$ respectivamente, calculadas en la segunda y penúltima de las secciones en las que ha sido dividida la tubería de descarga para la aplicación del método citado.

Por otra parte, si se considera la presencia de un tanque unidireccional ubicado inmediatamente aguas abajo del cárcamo de bombeo, tal como se muestra de manera esquemática en la ilustración 2, la condición de frontera en la sección \$x = 0\$ se puede expresar mediante las siguientes ecuaciones para \$H < Y\$:

$$v_P = C_{na} + \frac{h_P}{2\varepsilon} \quad (6)$$

$$v_{uP} = v_g - v_P \quad (7)$$

$$y_P = y + k_T(v_{uP} - v_u) \quad (8)$$

$$h_P = y_P + C_u v_u |v_u| \quad (9)$$

donde

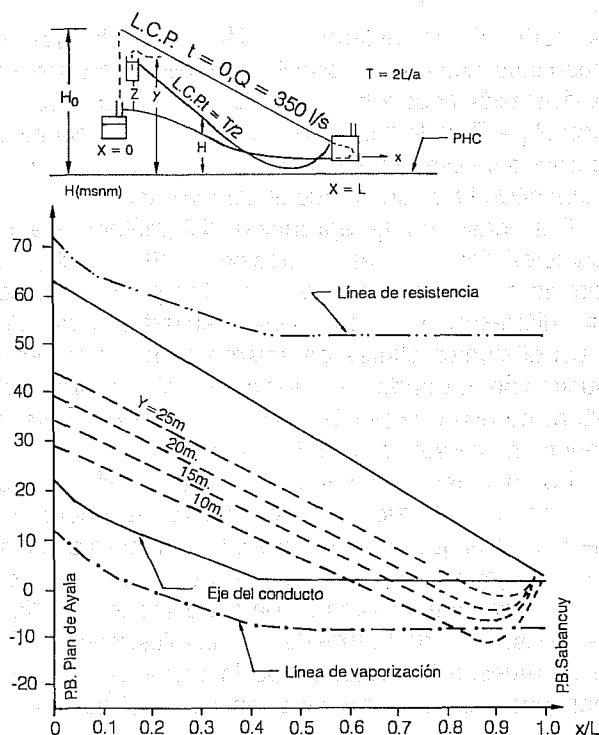
$$k_T = \frac{Q_0 \Delta t}{2 H_0 A_T} \quad \text{y} \quad C_u = \frac{k_0 V_0^2}{2 g H_0}$$

y para \$H > Y\$ con las ecuaciones (2), (3) y haciendo \$y_P = y\$ y \$v_{uP} = 0\$.

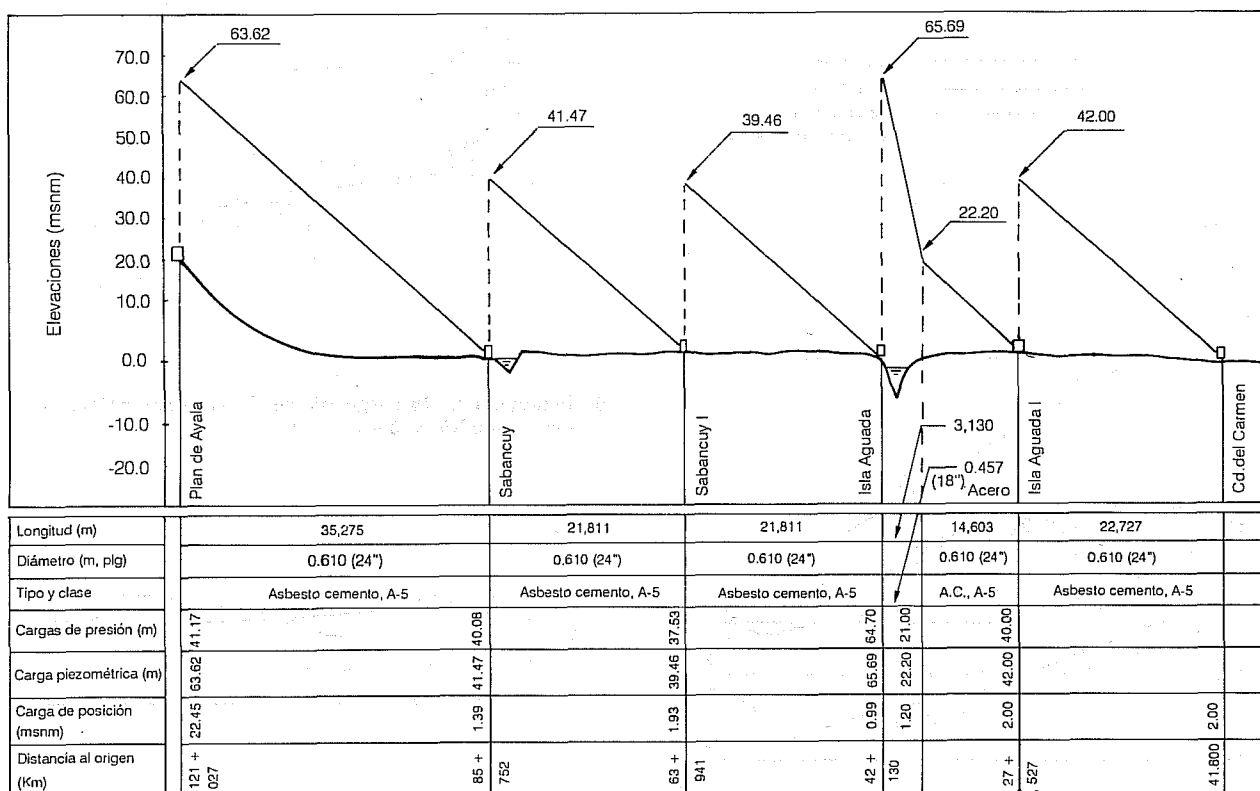
Como puede observarse, se dispone de un sistema lineal de 4 ecuaciones (6 a 9) con 4 incógnitas (\$v_P\$, \$h_P\$, \$y_P\$ y \$v_{uP}\$), cuya solución da como resultado:

$$h_P = \frac{y + C_u v_u |v_u| + k_T(v_g - v_u - C_{na})}{1 + \frac{k_T}{2\varepsilon}} \quad (10)$$

2. Líneas de carga piezométrica en el instante $t=T/2$ para diferentes alturas de un tanque unidireccional ubicado en la sección $x=0$, sin considerar el efecto de válvulas de aire-vacío



3. Líneas de carga piezométricas para un gasto de 350 l/s



Acueducto de Ciudad del Carmen, Campeche

Descripción general

El abastecimiento de agua potable a Ciudad del Carmen, Camp., actualmente se lleva a cabo con el agua que se extrae de un campo de pozos ubicado en la vecindad de la población denominada Chic-Bul y de algunos pozos localizados en la isla. A la fecha se obtiene un gasto de 220 l/s que es conducido desde la población antes mencionada hasta Ciudad del Carmen por medio de un acueducto de 609 mm de diámetro y 121 km de longitud, con 4 plantas de bombeo instaladas a lo largo de su trayectoria denominadas Plan de Ayala, Sabancuy, Isla Aguada y Ciudad del Carmen (véase ilustración 3).

Sin embargo, el objetivo a corto plazo es el de incrementar el gasto suministrado hasta 350 l/s, con base en el aprovechamiento óptimo de las fuentes de abastecimiento, del acueducto existente y de los equipos de bombeo en operación. De acuerdo con esto, se llevó a cabo un estudio sobre el equipamiento mínimo requerido por las plantas de bombeo actuales y la instalación de otras nuevas cuya ubicación quedó definida por la resistencia nominal mínima del acueducto (50 mca). En la ilustración 3 puede verse la ubicación de las plantas y

las líneas de cargas piezométricas para un gasto de 350 l/s.

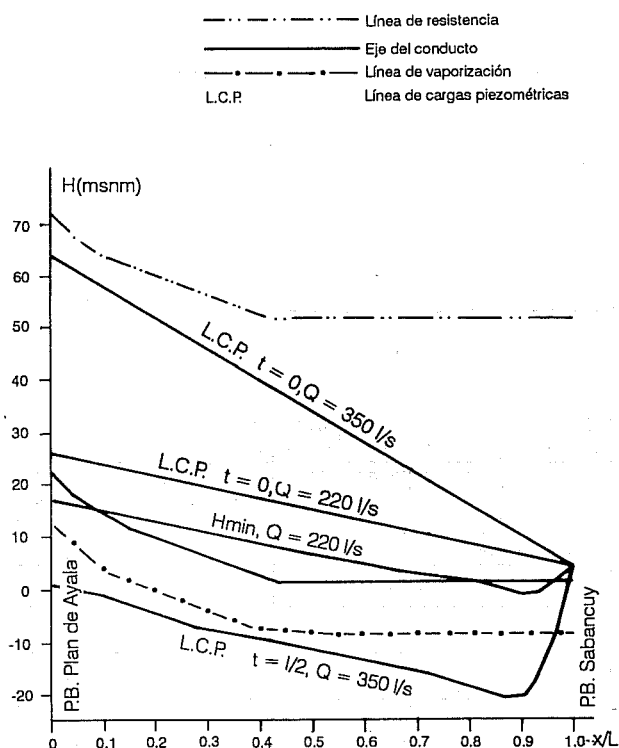
Cálculo hidráulico para la PB Plan de Ayala

Sin dispositivos de alivio para golpe de ariete

Con el fin de conocer el efecto de una falla en el suministro de energía a las plantas de bombeo, se realizó un cálculo hidráulico para obtener la evolución de la carga piezométrica en la tubería de descarga, sin considerar el efecto de las válvulas aire-vacío instaladas en la misma y con base en las ecuaciones (1) a (5). En el caso de la planta Plan de Ayala los resultados se muestran en la ilustración 4.

En dicha ilustración, para un gasto de 220 l/s la envolvente de cargas mínimas corta al perfil del eje en las secciones $x/L = 0.10, 0.80$ y 0.95 , pero en ningún caso adquiere valores cercanos al de vaporización del agua; no obstante, para un gasto de 350 l/s, la línea de cargas piezométricas correspondiente al instante $t = T/2$ permite predecir la probable presencia del fenómeno de separación de columna de agua, con el consecuente peligro de ruptura ocasionada por la magnitud de carga de presión que se genera posteriormente en el proceso

4. Líneas de carga piezométrica para gastos de 220 y 350 l/s, sin considerar el efecto de válvulas de aire-vacío



de reintegración de dicha columna.

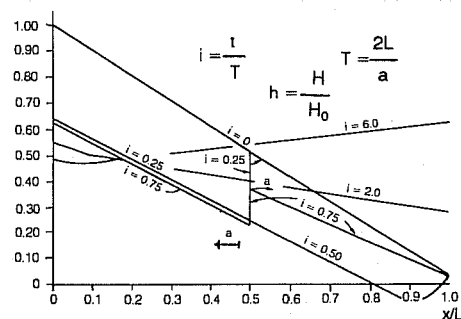
Con un tanque unidireccional

A partir de lo anterior es fácil deducir que es necesario instalar un dispositivo de alivio para atenuar la depresión asociada al golpe de ariete y, de acuerdo con el perfil de la tubería de descarga de la planta de bombeo en estudio, se consideró conveniente que tal dispositivo fuera un tanque unidireccional.

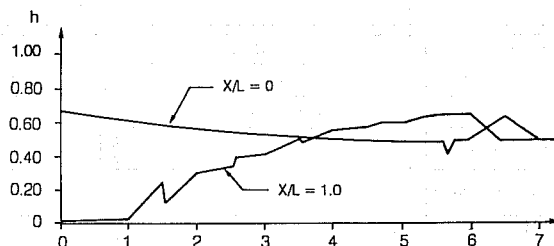
Con base en la aplicación del método de las características y las ecuaciones (6) a (9), se simuló el comportamiento de un tanque circular con un diámetro de 3 m. Los resultados obtenidos para diferentes alturas del mismo se muestran en la ilustración 2, donde se observa que si la altura es de 20 m no existe la posibilidad de que se presente un fenómeno de separación de columna agua.

Por otro lado, la carga de presión máxima que se genera en la tubería de descarga, dependerá del tiempo en el que se lleve a cabo la maniobra de cierre en el órgano de control, por lo que éste deberá ser lo suficientemente grande para no rebasar la línea de resistencia de la tubería. En las ilustraciones 5 y 6 se muestra la evolución de la carga piezométrica adimensional para una variación lineal del gasto en el

5. Evolución de la línea de cargas piezométricas adimensionales en la tubería de descarga



6. Evolución de la carga piezométrica adimensional en las secciones $X/L = 0$ y $X/L = 1.0$

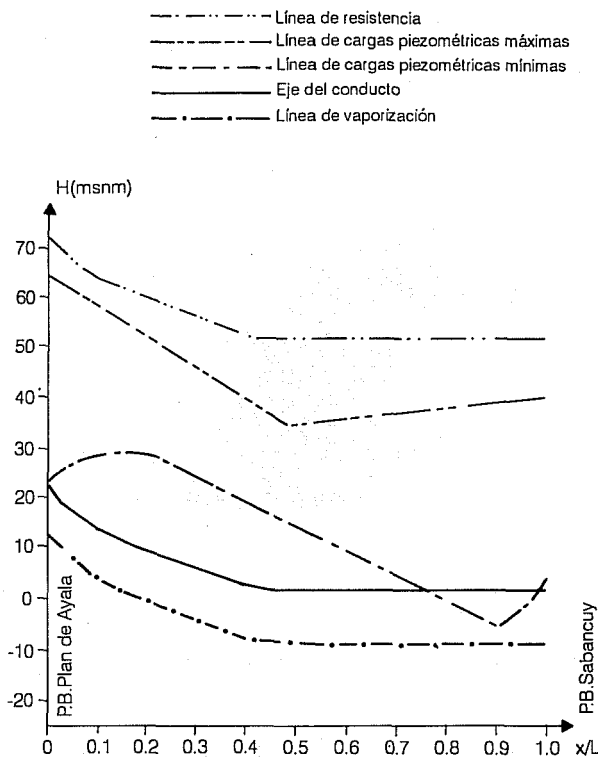


órgano de control, suponiendo que éste se reduce a cero en un tiempo igual a 5 periodos y puede verse que la carga máxima alcanzada es $h_{m\acute{a}x} = 0.62$, lo que conduce a un valor $H_{m\acute{a}x} = (0.62)(63.65) = 39.5$ m. Por último, en la ilustración 7 se muestran las envolventes de cargas extremas que se presentan en la tubería de descarga para las condiciones de flujo transitorio que han sido descritas.

Conclusiones

Ante la presencia de una falla en el suministro de energía a una planta de bombeo con una tubería de descarga globalmente descendente, el gasto se reduce de un valor Q_0 para el flujo permanente inicial a otro Q_g para el flujo permanente final,

7. Envolventes de cargas piezométricas extremas para un gasto de 350 l/s, sin considerar el efecto de válvulas de aire-vacío



que corresponde a la operación de un sistema a presión sin bombeo.

Cuando la planta de bombeo tiene una carga normal de operación relativamente pequeña en comparación con la de presión originada por la reducción del gasto, existe la posibilidad del fenómeno de separación de columna agua en la tubería de descarga y, para evitarlo, deberá contemplarse la instalación de un tanque unidireccional.

Notación

- A = Área de la tubería (m^2)
- A_T = Área del tanque (m^2)
- D = Diámetro de la tubería (m)
- H = Carga piezométrica (msnm)
- k_0 = Coeficiente
- L = Longitud (m)
- Q_0 = Gasto (m^3/s)
- Q_g = Gasto en un sistema sin bombeo (m^3/s)
- T = Periodo (s)
- Z_0 = Nivel de la superficie libre del agua en $x = 0$ (msnm)
- Z_L = Nivel de la superficie libre del agua en $x = L$ (msnm)
- a = Velocidad de onda (m/s)
- f = Coeficiente de fricción de Darcy
- g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)
- h_p = Carga piezométrica adimensional; $h_p = H_p/H_0$
- y_p = Altura adimensional; $y_p = Y_p/Y_0$
- v_p = Gasto adimensional; $v_p = Q_p/Q_0$
- v_{uP} = Gasto adimensional que entra o sale de un tanque unidireccional; $v_{uP} = Q_{uP}/Q_0$
- v_g = Gasto adimensional; $v_g = Q_g/Q_0$

Bibliografía

- M. Hanif Chaudry, *Applied Hydraulic Transients*, Ed. Van Nostrand Reinhold, 1979.
- Mancebo del Castillo, Uriel, *Teoría del golpe de ariete y sus aplicaciones en ingeniería hidráulica*, Ed. Limusa, México, 1987.