

LLENADO DE TUBERÍAS CON AIRE ATRAPADO

Vicente S. Fuertes, Joaquín Izquierdo, Pedro L. Iglesias, Enrique Cabrera y Jorge García-Serra¹

RESUMEN: Las conducciones con perfil irregular presentan una serie de particularidades que no pueden ser ignoradas, como puede ser la posible cavitación en los puntos altos. Para evitar el colapso de la conducción se recurre a la instalación de ventosas, las cuales permiten la entrada de aire cuando la presión en el interior de la tubería es inferior a la atmosférica. Pero el aire introducido en la conducción debe ser expulsado cuando se vuelva a producir el llenado de la tubería, y ello debe hacerse de forma adecuada para evitar sobrepresiones indeseables. La presencia de ventosas no siempre ofrece la fiabilidad necesaria y puede llevar a situaciones más adversas de las que se pretendían evitar. Incluso sin ventosas, el aire puede entrar en la conducción a través de las juntas, válvulas, etc., durante las interrupciones temporales del suministro, situación muy común en sistemas de riego pero que debería evitarse en abastecimientos urbanos. El aire atrapado entre dos columnas de agua en una conducción a presión, con o sin ventosas, puede provocar importantes sobrepresiones cuando se proceda al arranque de la instalación. En el presente artículo se pretende estudiar y modelizar el problema del llenado de tuberías con aire atrapado para predecir el transitorio que se producirá y tratar de evaluar los peligrosos picos de presión que pueden generarse. No se contempla la presencia de ventosas por cuanto supone considerar las peores condiciones y, en consecuencia, la situación más desfavorable. Se utiliza el modelo rígido para analizar el comportamiento de n bolsas de aire atrapado en tuberías de perfil irregular y se aplica a un caso concreto, del cual se extraen interesantes conclusiones.

INTRODUCCIÓN

Las conducciones, con un perfil marcadamente irregular, que transportan agua a presión presentan una serie de singularidades que no pueden ser ignoradas por los ingenieros hidráulicos que las proyectan y/o mantienen. En caso contrario, su buen funcionamiento y fiabilidad no quedan plenamente garantizados. Los máximos relativos de estas tuberías son, ciertamente, puntos muy sensibles a las depresiones, especialmente durante los transitorios que se generan al parar la instalación. Para evitar tanto el posible colapso de la conducción como la potencial cavitación que toda depresión puede originar se recurre, por lo general, a la instalación de ventosas en estos puntos. Estas válvulas de aire, en su función de admisión, impiden que la presión en el interior de la tubería sea muy inferior a la atmosférica controlando, por tanto, de manera eficaz aquellos potenciales problemas.

Ocurre, sin embargo, que el aire voluntariamente admitido durante la parada de la instalación debe ser expulsado con ocasión del nuevo llenado cuando la instalación es rearmada. Y ello debe realizarse con la suficiente delicadeza como para que, durante este proceso, no aparezcan golpes de ariete indeseados. Estos pueden tener su origen en:

- El choque violento entre dos columnas de agua, antes separadas por una columna de aire atrapado que ha sido purgada de la conducción con excesiva rapidez.
- El choque de la columna de agua que avanza con la propia ventosa que, al presentar al movimiento y expulsión del aire una resistencia muy inferior a la que ofrecería a una columna análoga de agua, cierra bruscamente cuando el aire ya ha sido purgado en su totalidad.

Ambos hechos recomiendan seleccionar cuidadosamente la ventosa, sobre todo por lo que a su misión de expulsión de aire se refiere. Estas válvulas de aire, además de los problemas derivados de un comportamiento no adecuado a las necesidades de la instalación, incluyen elementos móviles que requieren de un adecuado mantenimiento preventivo que evite posibles agarrotamientos. La inaccesibilidad de muchos de los máximos relativos en los que se han instalado las ventosas dificulta, en ocasiones, este tipo de labores.

Por otro lado, la propia compresión de las posibles bolsas de aire al absorber la energía cinética de las columnas de agua en movimiento, en ausencia de ventosas, puede dar lugar a presiones muy elevadas que no soporte la tubería.

¹ Grupo Mecánica de Fluidos. Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. e-mail: vfuertes@gmf.upv.es

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol.4 Num.3 (septiembre 1997), páginas 53-63, recibido el 4 de julio de 1997 y aceptado para su publicación el 15 de septiembre de 1997. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

El aire atrapado entre dos columnas de agua en una conducción a presión constituye, con o sin presencia de ventosas de purga, un motivo de preocupación por las importantes sobrepresiones que pueden generarse con ocasión del arranque de la instalación. Por ello, el conocimiento físico del problema y la posibilidad de evaluar los picos que potencialmente pueden generarse presenta un indudable interés práctico. A esta cuestión dedicamos el presente trabajo.

EL PROBLEMA DEL AIRE ATRAPADO

La presencia de ventosas no siempre ofrece la fiabilidad que demandan determinados suministros de agua. Ya ha quedado dicho que una mala selección, un funcionamiento incorrecto o incluso, en el peor de los casos, su deficiente respuesta por la ausencia de mantenimiento, puede llevar a la instalación a situaciones más adversas de las inicialmente previstas.

Otro problema surge a la hora de modelizar, con la suficiente fiabilidad, la ventosa. De una parte, los fabricantes no ofrecen, las más de las veces, datos fiables de sus coeficientes estáticos de admisión y/o expulsión. De otra parte, la necesaria caracterización dinámica de las diferentes ventosas (en el mercado existen infinidad de artilugios que funcionan como tal) es cuestión sistemáticamente ignorada por quienes fabrican y/o comercializan estas válvulas de aire. Los valores de sus umbrales y tiempos de respuesta nadie los suministra y tan solo conocemos el trabajo de Blum (1994), una iniciativa promovida por el U.S. Bureau of Reclamation, en donde se lleva a cabo un intento serio para identificar dichos valores en una serie de ventosas diversas.

Por todo ello, y por cuanto supone considerar las peores condiciones, no se contempla la presencia de ventosas en los perfiles de tuberías que se analizan.

El aire se introduce en las conducciones a presión, bien a través de las ventosas, bien a través de las juntas de las tuberías cuando la presión en el interior de las mis-

mas alcanza un valor inferior al de la atmósfera. Y, con independencia de los problemas sanitarios que de estos hechos se pudieran derivar cuando se trata de un suministro de agua potable, su presencia puede originar presiones muy importantes capaces de reventar la tubería más robusta. La explicación del fenómeno es sencilla. Considérese una bolsa de aire atrapado entre dos columnas de agua una de las cuales comienza a moverse como consecuencia del rearme de la instalación. La segunda columna de agua, o columna de bloqueo, comenzará a moverse cuando la interfase aire, que viene moviéndose a instancias de la columna motriz, alcance la presión necesaria. Ocurre, sin embargo, que el aire (densidad en condiciones normales 1.25 Kg/m³) tiene una inercia despreciable frente al agua (densidad 1000 Kg/m³). En consecuencia, las respuestas a las sollicitaciones que vienen experimentando son del todo diferentes. El aire, como si de un muelle de muy baja constante elástica se tratara, se comprime hasta presiones importantísimas antes de conseguir un movimiento de la columna de bloqueo suficiente como para que pueda expansionar su volumen y, con ello, aliviar la enorme presión alcanzada. Y es esta diferencia de inercias la causa final de un problema que jamás se hubiera generado en ausencia de aire atrapado. El fenómeno que se estudia va inequívocamente ligado a interrupciones en el servicio del suministro. En una tubería de presión en servicio, aún no siendo del todo estanca, si la presión en su interior no se encuentra por debajo de la atmosférica, jamás podrá acceder aire a su interior. Pero al interrumpir el servicio, y como quiera que ninguna tubería es perfecta (siempre se fuga algo de agua a través de las válvulas, juntas, acometidas, etc.), y los usuarios mantienen abiertos sus puntos de consumo, se inicia un vaciado que da lugar a presiones manométricas negativas en los máximos relativos y, con ello, a la presencia de aire atrapado en su interior. En resumen, interrupción temporal en conducciones de perfil irregular genera siempre problemas de aire atrapado. Ello es bien conocido por los técnicos que gestionan abastecimientos que practican la tercermundista medida de la interrupción temporal del servicio, sobre todo si la topografía de la población en cuestión tiene un perfil ondulado. La entrada en presión de la red de distribución debe hacerse con un cuidado máximo (p.e. mediante la lenta apertura de válvulas que permita una expulsión lenta y controlada del aire a través de las ventosas de purga dispuestas) y, aún con todas estas precauciones, las roturas no son infrecuentes.

En las impulsiones de agua de riego las interrupciones son necesarias. Tras unas prolongadas lluvias de invierno los campos no precisan agua durante algunos meses. El nuevo arranque de la instalación debe, sin duda, contemplar la presencia de aire atrapado. Para acabar de relacionar los conceptos de perfil irregular más interrupción temporal de servicio con aire atrapado supongamos (Figura 1.a) una impulsión uniforme de agua de riego que trasiega agua desde un depósito

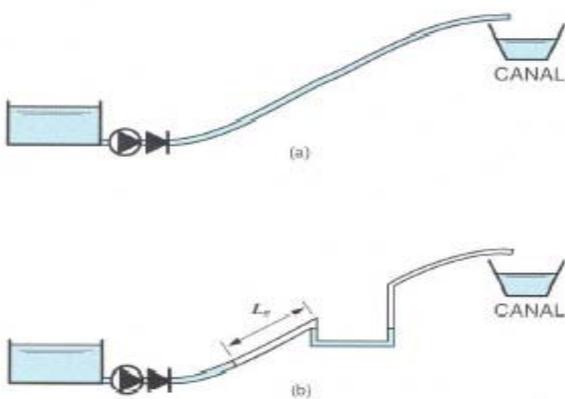


Figura 1: Impulsión de agua de riego: a) perfil uniforme, b) perfil irregular

inferior a un canal superior. La necesidad de construir una autopista, con un importante movimiento de tierras para así evitar un impacto ambiental acústico de cierta significación en la zona, obliga a considerar un nuevo perfil de la impulsión que, ahora, pasa a ser irregular (*Figura 1.b*). Una prolongada interrupción del riego y las fugas a través de las juntas de la tubería más vieja así como de la válvula de retención junto con la superior estanqueidad de la tubería nueva, posibilitan la presencia de una bolsa de aire atrapado de longitud L_a y el riesgo de presiones elevadas en ese tramo de la tubería cuando se proceda a rearmar la instalación. Debe destacarse que esa situación jamás se hubiera presentado con el perfil original uniforme.

La frecuencia e importancia de este problema ha originado que se le preste notable atención en la literatura técnica. Y así Gandenberger (1950) describe un buen número de casos de elevados picos de presión originados por la presencia de aire atrapado en tuberías. Martín (1976) en el que es, posiblemente, el artículo más referenciado en la literatura técnica relativo al problema que aquí se aborda, analiza los picos de presión de n bolsas de aire atrapadas en una conducción. Martín, sin embargo, no toma en consideración el movimiento de avance de las interfases aire-agua, de manera que su estudio se asemeja a la oscilación lineal de una serie de muelles unidos por masas rígidas y cuyo desplazamiento medio es nulo. Para el supuesto de aire bloqueado en el extremo final de una tubería proporciona unas gráficas adimensionales que se han venido utilizando para estimar el máximo pico de presión que el aire atrapado puede generar en una conducción, toda vez que se trata de las condiciones más desfavorables (Tullis, 1989, Wylie y Streeter, 1993). El propio Martín (1979) describe cómo puede ser admitido aire para evitar depresiones y, en consecuencia, importantes golpes de ariete subsiguientes en un bombeo de notable entidad pero con escasa pendiente. La relación entre el tamaño de la bolsa de aire y el valor del pico de presión que posteriormente se alcanza es estudiado, entre otros, por Koelle (1987). El tamaño de la bolsa de aire, tal cual veremos en el presente trabajo, condiciona de manera importante las máximas presiones que se alcanzan en la conducción. El problema del sobredimensionado de las ventosas, en su etapa de expulsión, y su notable influencia en los importantes transitorios que posteriormente se generan, es abordado tanto por Albertson y Andrews (1971) como por Hope y Papworth (1980). Este último, por ejemplo, describe el problema que se generó en una red contraincendios del hangar de un aeropuerto. Las tuberías, llenas de aire para evitar problemas derivados de la congelación del agua, soportaron unos picos de presión inasumibles durante su proceso de llenado, debido a la excesiva rapidez con que el aire se desalojó de la conducción. Thorley y Spurret (1990) presentan resultados experimentales de los picos de presión consecuencia de la apertura de una válvula localizada en el extremo final de una tubería que contiene una bolsa de aire. Es también noticiable, con relación al

problema del aire atrapado, el caso que presenta Jönsson (1985). En una impulsión de aguas residuales de escasa pendiente pero de notable entidad se constató que los picos de presión generados al parar las bombas eran, según las circunstancias, de muy diversa importancia. El análisis del problema reveló que los picos máximos se alcanzaban cuando los niveles en el depósito de aspiración se encontraban en sus valores mínimos, lo que facilitaba la aspiración de aire que, al detener los grupos actuaba, cual si de una bolsa atrapada se tratara, entre la columna de agua oscilante y la válvula de retención encargada de evitar su retroceso total.

El llenado de tuberías de perfil irregular, con el potencial peligro que supone la presencia de aire atrapado en la conducción, es una operación que debe llevarse a cabo con sumo tacto. E incluso sin la presencia de aire atrapado, esta cuestión debe ser estudiada con atención, tal cual se evidencia en un reciente, y excelente, artículo de Liou y Hunt (1996), por el potencial riesgo de cavitación en los puntos altos de la tubería. No se considera en este trabajo de Liou y Hunt la presencia de aire atrapado que es, en opinión de los autores del presente trabajo, la situación más desfavorable y así se hace constar en la discusión de dicho artículo (Cabrera *et al.*, 1997). A analizar y cuantificar este problema se dedica el resto del presente artículo.

ECUACIONES BÁSICAS. GENERALIZACIÓN A n BOLSAS DE AIRE

Se considera la conducción de perfil irregular, constituida por m tramos de pendiente constante, en la cual se tienen n bolsas de aire atrapado. La tubería es alimentada en su extremo de aguas arriba por una fuente de energía (depósito o estación de bombeo), y descarga a la atmósfera en su extremo de aguas abajo, tal y como se aprecia en la *Figura 2*.

En el origen de la tubería se ha instalado una válvula que definirá, en función de como se manibre, y conjuntamente con la fuente de suministro de energía dispuesta, las condiciones de contorno en ese extremo.

El sistema se analiza con el modelo rígido, lo que supone no considerar ni la elasticidad del fluido ni la de la propia tubería, que es lo que caracteriza al modelo elástico, más conocido por golpe de ariete. La precisión del modelo rígido, antaño referenciado como oscilación en masa, es más que suficiente para el caso que nos ocupa. A esta cuestión se han dedicado otros trabajos (por ejemplo, Abreu *et al.*, 1991, Cabrera *et al.*, 1992, y Abreu *et al.*, 1997). También Chaudhry (1989), y para el problema del aire atrapado, se plantea esta misma cuestión concluyendo que el modelo rígido aporta precisión suficiente.

La novedad que se introduce en la presente contribución, frente a otros trabajos que abordan el problema del aire atrapado, es la movilidad de las interfases (o fronteras) aire-agua de manera que sus avances en el tiempo quedan perfectamente definidos. Liou y Hunt (1996) también consideran la frontera móvil en el llenado de la tubería, como no podía ser de otro modo, pero ya se ha dicho que no contemplan la posibilidad de aire atrapado.

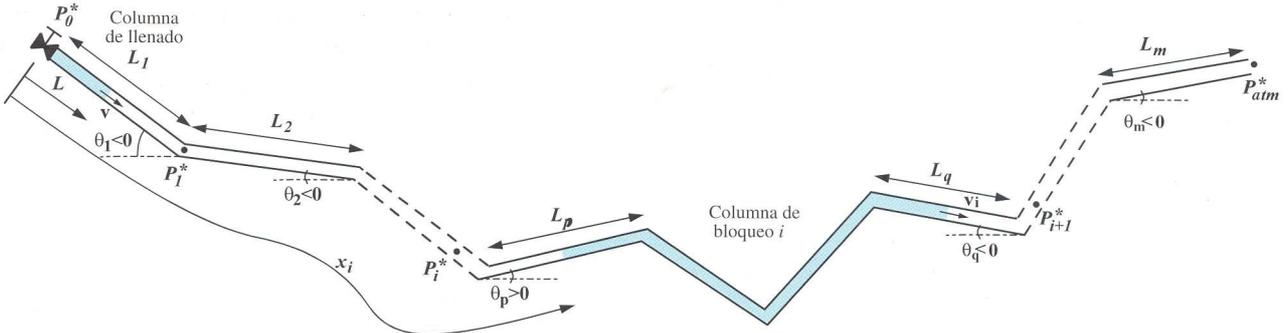


Figura 2: Tubería de perfil irregular con n bolsas de aire atrapado

Las hipótesis que presiden el desarrollo de este trabajo son:

- Análisis del transitorio hidráulico mediante la aplicación del modelo rígido.
- Interfases aire-agua perfectamente definidas y coincidentes con la sección recta de la tubería.
- El aire atrapado sigue una evolución politrópica de exponente 1.2 (Martin, 1976). Inicialmente todas las bolsas se encuentran a la presión atmosférica.
- El factor de fricción que caracteriza la ecuación de pérdidas de Darcy -Weisbach durante el transitorio es constante.

En estas condiciones, las ecuaciones básicas que modelizan el sistema son:

Columna de llenado (2 ecuaciones):

1. Ecuación del modelo rígido para la columna de llenado impulsada por la fuente de energía

$$\frac{dv}{dt} = \frac{p_0^* - p_1^*}{\rho L} - g \frac{\Delta z}{L} - \frac{fv|v|}{2D} \quad (1)$$

2. Posición de la columna de llenado

$$L = L_0 + \int_0^t v dt \quad (2)$$

en donde hemos denominado v = velocidad de la columna de llenado, t = tiempo, p_0^* = presión absoluta aguas arriba de la tubería, p_1^* = presión absoluta de la bolsa de aire 1, ρ = densidad del agua, L = longitud de la columna de llenado, g = aceleración de la gravedad, Δz = desnivel entre las secciones aguas arriba y aguas abajo de la columna de llenado, f = factor de fricción y D = diámetro de la tubería.

n columnas de bloqueo/bolsas de aire (3n ecuaciones):

3. Ecuación del modelo rígido para la columna de bloqueo i ($i = 1, 2, \dots, n$)

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{p_i^* - p_{i+1}^*}{\rho L_{b,i}} - g \frac{\Delta z_{b,i}}{L_{b,i}} - \frac{f v_i |v_i|}{2D} \quad (3)$$

donde, para la última columna de bloqueo ($i = n$), se deberá sustituir $p_{n+1}^* = p_{atm}^*$.

4. Evolución de la bolsa de aire i ($i = 1, 2, \dots, n$)

$$p_i^* \cdot (x_i - x_{i-1} - L_{b,i-1})^n = p_{i,0}^* (x_{i,0} - x_{i-1,0} - L_{b,i-1})^n = cte \quad (4)$$

donde, para la primera bolsa de aire ($i = 1$), se deberá sustituir $x_0 = 0$ y $L_{b,0} = L$.

5. Posición de la columna de bloqueo i ($i = 1, 2, \dots, n$)

$$x_i = x_{i,0} + \int_0^t v_i dt \quad (5)$$

siendo v_i = velocidad de la columna de bloqueo i , p_i^* = presión absoluta de la bolsa de aire i , $L_{b,i}$ = longitud de la columna de bloqueo i , $\Delta z_{b,i}$ = desnivel entre las secciones aguas arriba y aguas abajo de la columna de bloqueo i y x_i = posición (medida desde el origen) de la sección aguas arriba de la columna de bloqueo i .

Obsérvese (Figura 2) que las longitudes de los diferentes tramos se notan, sencillamente, con el subíndice correspondiente L_j ($j = 1, 2, \dots, m$) y las pendientes vienen dadas por el ángulo θ_j ($j = 1, 2, \dots, m$).

Así pues, se tiene un sistema de $2+3n$ ecuaciones. La resolución de dicho sistema, junto con las condiciones iniciales y las condiciones de contorno adecuadas, nos permite determinar: v, L, v_i, p_b, x_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

Condiciones iniciales ($t = 0$):

$$v(0) = 0, L(0) = L_0$$

$$v_i(0) = 0, p_i^*(0) = p_{i,0}^* \cdot x_{i,0} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

Condiciones de contorno:

a. La expresión de p_0^* depende de la condición de contorno aguas arriba de la instalación. En el caso de alimentar la instalación mediante bomba (Figura 3), se cumplirá:

$$H_D + \frac{p_{atm}^*}{\gamma} + H_B = \frac{p_0^*}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} - k \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

$$\frac{p_0^*}{\gamma} = H_D + \frac{p_{atm}^*}{\gamma} + H_B - (1 + K) \frac{v|v|}{2g} \quad (7)$$

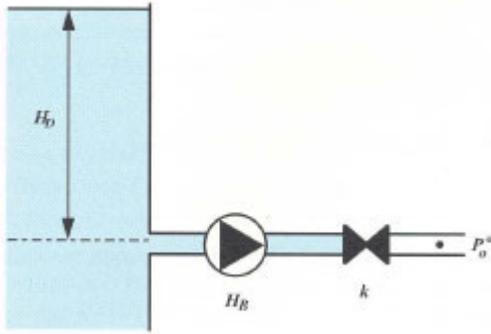


Figura 3: Condición de contorno aguas arriba

b. Condición de contorno aguas abajo: la conducción descarga directamente a la atmósfera y, por tanto, en el extremo final se tiene la presión atmosférica, $p_{n+1}^* = p_{atm}^*$ (ecuación correspondiente a la última columna de bloqueo, $i = n$).

En las ecuaciones (1) y (3), la expresión del término $\Delta z/L$ irá variando en función de donde se encuentre la columna de agua correspondiente. Denotamos con el subíndice p el tramo donde se encuentra el principio de la columna de agua y con el subíndice q el tramo donde se encuentra el final de la columna de agua (tramos $= 1, 2, \dots, m$).

a. Evolución de la columna de bloqueo i:

a. 1. hasta que la columna de bloqueo alcance el extremo final y comience a desaguar ($x_i + L_{b,i} < L_{total}$)

- principio y final de la columna de bloqueo i se encuentran en el mismo tramo ($q = p$)

$$\frac{\Delta z_{b,i}}{L_{b,i}} = \text{sen} \theta_p \quad (8)$$

- principio y final de la columna de bloqueo i se encuentran en tramos contiguos ($q = p+1$)

$$\frac{\Delta z_{b,i}}{L_{b,i}} = \frac{\left(\sum_{j=1}^{j=p} L_j \right) - x_i}{L_{b,i}} \text{sen} \theta_p + \left(1 + \frac{x_i - \left(\sum_{j=1}^{j=q-1} L_j \right)}{L_{b,i}} \right) \text{sen} \theta_q \quad (9)$$

- principio y final de la columna de bloqueo i se encuentran separados por uno o más tramos ($q > p+1$)

$$\frac{\Delta z_{b,i}}{L_{b,i}} = \frac{\left(\sum_{j=1}^{j=p} L_j \right) - x_i}{L_{b,i}} \text{sen} \theta_p + \frac{\sum_{j=p+1}^{j=q-1} L_j \text{sen} \theta_j}{L_{b,i}} + \left(1 + \frac{x_i - \left(\sum_{j=1}^{j=q-1} L_j \right)}{L_{b,i}} \right) \text{sen} \theta_q \quad (10)$$

a.2. cuando la columna de bloqueo alcance el extremo final y comience a desaguar ($x_i + L_{b,i} = L_{total}$)

- principio de la columna de bloqueo i se encuentra en el último tramo ($p = m$)

$$\frac{\Delta z_{b,i}}{L_{b,i}} = \text{sen} \theta_m \quad (11)$$

donde: $L_{b,i} = L_{total} - x_i \neq cte$

- principio de la columna de bloqueo i se encuentra en cualquier tramo distinto del último ($p < m$)

$$\frac{\Delta z_{b,i}}{L_{b,i}} = \frac{\left(\sum_{j=1}^{j=p} L_j \right) - x_i}{L_{total} - x_i} \text{sen} \theta_p + \frac{\sum_{j=p+1}^{j=m} L_j \text{sen} \theta_j}{L_{total} - x_i} \quad (12)$$

a.3. cuando la columna de bloqueo ha salido total-mente ($x_i = L_{total}$)

Se reduce el sistema de ecuaciones a resolver: desaparecen las 3 ecuaciones correspondientes a la columna de bloqueo / bolsa de aire i, y la presión de la última bolsa de aire pasa a ser la atmosférica, modificándose la ecuación correspondiente.

b. Evolución de la columna de llenado:

b.1) hasta que la columna de llenado alcance el extremo final y comience a desaguar ($L < L_{total}$)

- final de la columna de llenado se encuentra en el primer tramo ($q = 1$)

$$\frac{\Delta z}{L} = \text{sen} \theta_1 \quad (13)$$

- final de la columna de llenado se encuentra en cualquier tramo distinto del primero ($q > 1$)

$$\frac{\Delta z}{L} = \frac{\sum_{j=1}^{j=q-1} L_j \text{sen} \theta_j}{L} + \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^{j=q-1} L_j}{L} \right) \text{sen} \theta_q \quad (14)$$

b.2. cuando la columna de llenado alcance el extremo final y comience a desaguar ($L = L_{total}$)

$$\frac{\Delta z}{L} = \frac{\sum_{j=1}^{j=m} L_j \text{sen} \theta_j}{L_{total}} = \frac{z_d - z_0}{L_{total}} = cte \quad (15)$$

desaparecen todas las columnas de bloqueo y todas las bolsas de aire, de forma que queda una única ecuación:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{p_0^* - p_{atm}^*}{\rho L} - g \frac{\Delta z}{L} - \frac{f|v|}{2D} \quad (16)$$

hasta alcanzar el régimen permanente.

APLICACIÓN AL CASO DE DOS BOLSAS DE AIRE ATRAPADO

En Cabrera *et al.* (1997) se presenta la particularización más simple ($m = 2$ y $n = 1$), toda vez que en esta discusión sólo se trata de evidenciar que las condiciones de llenado más adversas son las que encuentran una bolsa de aire atrapado. Para los objetivos del presente artículo se va a suponer una instalación con cuatro tramos de pendiente constante ($m = 4$) y hasta dos bolsas de aire ($n = 2$), tal cual muestra la *Figura 4*.

En este supuesto, las ecuaciones son:

Columna de llenado (2 ecuaciones):

1. Ecuación del modelo rígido para la columna de llenado (con la condición de contorno aguas arriba)

$$\frac{dv}{dt} = \frac{g}{L} \left(H_D + \frac{P_{atm}^*}{\gamma} + H_B - (l+k) \frac{v|v|}{2g} \right) - \frac{p_1^*}{\rho L} - g \frac{\Delta z}{L} - \frac{f|v|}{2D} \quad (17)$$

2. Posición de la columna de llenado

$$L = L_0 + \int_0^t v dt \quad (18)$$

Columna de bloqueo / bolsa de aire 1 (3 ecuaciones)

3. Ecuación del modelo rígido para la columna de bloqueo 1

$$\frac{dv_1}{dt} = \frac{p_1^* - p_2^*}{\rho L_{b,1}} - g \frac{\Delta z_{b,1}}{L_{b,1}} - \frac{f v_1 |v_1|}{2D} \quad (19)$$

4. Evolución de la bolsa de aire 1

$$p_1^* \cdot (x_1 - L)^n = p_{1,0}^* \cdot (x_{1,0} - L_0)^n = cte \quad (20)$$

5. Posición de la columna de bloqueo 1

$$x_1 = x_{1,0} + \int_0^t v_1 dt \quad (21)$$

Columna de bloqueo /bolsa de aire 2 (3 ecuaciones):

6. Ecuación del modelo rígido para la columna de bloqueo 2 (con la condición de contorno aguas abajo)

$$\frac{dv_2}{dt} = \frac{p_2^* - p_{atm}^*}{\rho L_{b,2}} - g \frac{\Delta z_{b,2}}{L_{b,2}} - \frac{f v_2 |v_2|}{2D} \quad (22)$$

7. Evolución de la bolsa de aire 2

$$p_2^* \cdot (x_2 - x_1 - L_{b,1})^n = p_{2,0}^* \cdot (x_{2,0} - x_{1,0} - L_{b,1})^n = cte \quad (23)$$

8. Posición de la columna de bloqueo 2

$$x_2 = x_{2,0} + \int_0^t v_2 dt \quad (24)$$

Se tiene un sistema de 8 ecuaciones cuya resolución, junto con las condiciones iniciales $v(0) = 0, L(0) = L_0, v_1(0) = 0, p_1^*(0) = p_{atm}^*, x_1(0) = x_{1,0}, v_2(0) = 0, p_2^*(0) = p_{atm}^*$ y $x_2(0) = x_{2,0}$ nos permite determinar las 8 incógnitas del problema: $v, L, v_1, p_1^*, x_1, v_2, p_2^*, x_2$.

MÉTODOS DE RESOLUCIÓN

El caso más general que nos podemos plantear, n bolsas de aire atrapado en un sistema de m tramos de tubería de diferentes pendientes, consiste en resolver un sistema de $2+3n$ ecuaciones que determinan las tres incógnitas asociadas a cada una de las bolsas de aire (situación de la frontera de aguas arriba x_i , presión de la bolsa de aire atrapado p_i^* , y velocidad de la columna de bloqueo v_i) así como el comportamiento de la columna de llenado (longitud L y velocidad v).

Las ecuaciones integrales (2) y las de tipo (5), que representan las evoluciones de las fronteras móviles, pueden ser fácilmente escritas en forma diferencial con la condición inicial correspondiente como:

$$\frac{dL}{dt} = v, \quad L(0) = L_0 \quad (25)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = v_i, \quad x_i(0) = x_{i,0} \quad (26)$$

Por otra parte, las ecuaciones (4), que describen la evolución de las bolsas de aire, son relaciones algebraicas de las que se puede despejar fácilmente P_i^* , que queda en función de x_{i-1} y x_i . Observemos que mientras la longitud $L_{b,i}$ de la columna de bloqueo i -ésima se mantiene constante, p_i^* es claramente función de x_{i-1} y x_i y cuando la columna de bloqueo i -ésima comienza a desaguar $L_{b,i}$ es variable pero, de acuerdo con (11), su variación es función tan solo de x_i . Así que resulta $p_i^* = g_i(x_{i-1}, x_i)$ mientras la bolsa i -ésima esté confinada. Estas expresiones pueden ser sustituidas en las ecuaciones (1) y las de tipo (3). Así, se obtiene un sistema de $2(n+1)$ ecuaciones diferenciales

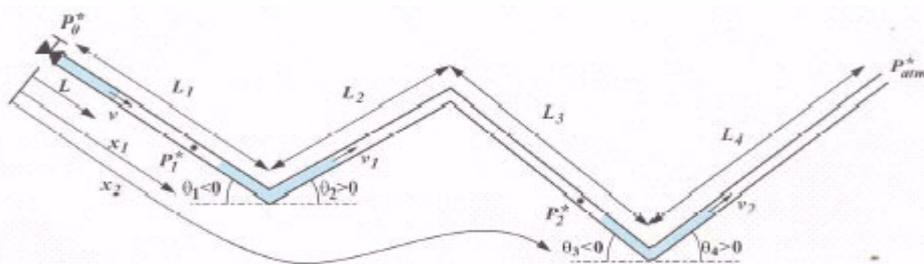


Figura 4: Tubería con dos bolsas de aire atrapado

ordinarias que, denotando $v_0 = v$ y $x_0 = L$, puede escribirse de manera compacta como:

$$\begin{aligned} v_i' &= f_i(v_i, x_{i-1}, x_i, x_{i+1}) & i &= 0, 1, \dots, n \\ x_i' &= v_i & i &= 0, 1, \dots, n \end{aligned} \quad (27)$$

En esta expresión hay que hacer $x_{-1} = 0$ y $x_{n+1} = 0$. Las funciones f_i se obtienen de (1) y (3) utilizando $p_i^* = g_i(x_{i-1}, x_i)$. La condición inicial es:

$$\begin{aligned} v_i(0) &= 0 & i &= 0, 1, \dots, n \\ x_i(0) &= x_{i,0} & i &= 0, 1, \dots, n \end{aligned} \quad (28)$$

Este problema de valor inicial es no lineal, ya que las funciones f_i lo son. Puede verse de manera sencilla que estas funciones verifican las hipótesis necesarias para garantizar la existencia de solución desde el punto de vista matemático (ver, por ejemplo, Coddington y Levinson, 1955). La solución numérica puede obtenerse mediante un método adecuado. Dos situaciones sugieren utilizar un método de paso adaptativo. Por un lado, en la fase inicial del fenómeno, especialmente si la fuente de energía aguas arriba es grande, y/o la bolsa de aire primera es de pequeña entidad, las variaciones pueden ser muy bruscas (precisamente uno de los objetivos del presente trabajo es la identificación del primer pico de presión, que puede ser muy pronunciado) por lo que la integración de las ecuaciones requiere un paso muy pequeño. Contrariamente, tras el primer pico de presión, la solución exhibe una variación suave y no requiere, por tanto, de un paso pequeño, produciéndose buenos resultados con valores de Δt mayores. Luego, otras variaciones de interés acontecen con las invasiones de las columnas líquidas (la de llenado y las de bloqueo) de nuevos tramos de la tubería. En estas circunstancias, el término gravitatorio correspondiente, aunque continuo, no es diferenciable (ver (8) a (15)) y provoca cambios representativos de tendencia en las magnitudes. En la fase final del desagüe de una columna líquida de blo-

queo se tiene el siguiente efecto. La longitud $L_{b,i}$ tiende a 0 (ver (11)), por lo que el término de presión en la ecuación (3) correspondiente, se hace muy grande, haciendo que la velocidad de dicha columna crezca de manera muy acusada. De nuevo, es preciso un paso Δt muy pequeño para capturar adecuadamente esa variación rápida. En la resolución de estas ecuaciones puede emplearse el método adaptativo de Runge-Kutta de quinto orden (ver, por ejemplo, Stoer y Bulirsch, 1980).

Finalmente, hay que observar que con el desagüe de cada columna de bloqueo las ecuaciones correspondientes a ella y a la bolsa de aire que la sigue desaparecen del sistema, que queda reducido en dos ecuaciones diferenciales. Cuando, eventualmente, todas las columnas de bloqueo han sido evacuadas solo quedan las ecuaciones (1) y (2) y cuando la columna de llenado ya ocupa toda la instalación, la única ecuación remanente es (1), que define el régimen permanente. En resumen, pues, la solución numérica del fenómeno supone la resolución de una sucesión de problemas de valor inicial con número decreciente de ecuaciones diferenciales. La condición inicial para cada problema es, obviamente, el estado final del sistema para el problema anterior trivializando las variables que dejan de tener significado físico.

APLICACIÓN DEL MODELO A UNA TUBERÍA DE PERFIL IRREGULAR CON CUATRO TRAMOS ($m = 4$)

Se va a utilizar el modelo presentado para estudiar una instalación con cuatro tramos de pendiente constante ($m = 4$) y un máximo de dos bolsas de aire ($n - 2$). Dicha instalación es alimentada mediante una bomba y descarga a la atmósfera en su extremo de aguas abajo, tal y como se observa en la Figura 5. Se trata de una impulsión con una longitud total de 3000 metros de diámetro 300 mm y un caudal en régimen permanente de 101.6 l/s ($v = 1.438$ m/s).

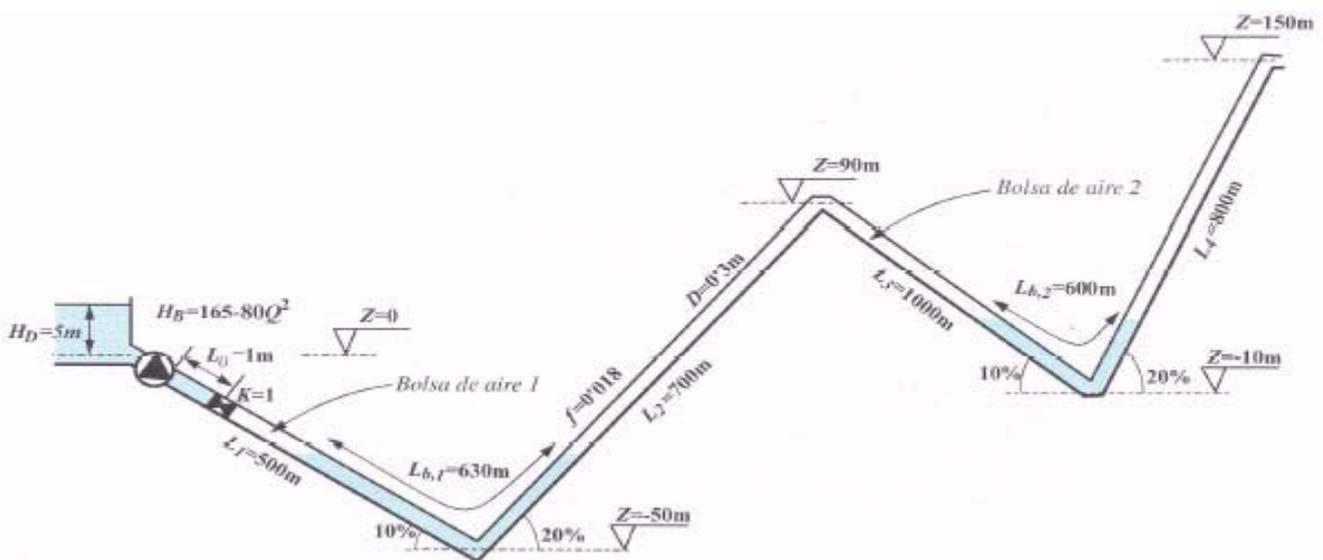


Figura 5: Instalación con cuatro tramos y dos bolsas de aire atrapado

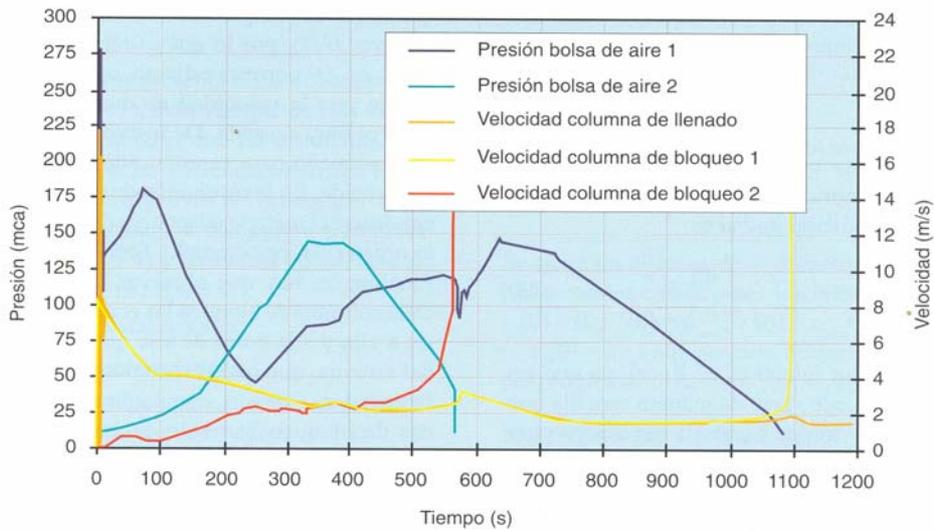


Figura 6: Evolución de la presión de las bolsas de aire p_1^* y p_2^* , velocidad de la columna de llenado v , y velocidad de las columnas de bloqueo v_1 y v_2 cuando hay dos bolsas de aire atrapado

Supongamos que tras una parada continuada de la instalación se acumula una cierta cantidad de aire dentro de la tubería lo que origina la presencia de bolsas de aire atrapado. Cuando se proceda a un nuevo arranque de la instalación, la conducción estará llena de agua tan solo parcialmente y el resto estará ocupado por aire. Se pretende estudiar cómo la presencia de este aire en la conducción provoca importantes picos de presión que pueden ser muy peligrosos para la integridad de la tubería.

En primer lugar se va a considerar la situación más cercana a la realidad. Durante el tiempo que la instalación permanece parada, se producen fugas de agua y se permite la entrada de aire el cual, obviamente, ocupa los puntos altos del perfil y da lugar a la presencia de dos bolsas de aire atrapado (Figura 5).

Para la condición de contorno de aguas arriba se ha supuesto que la válvula abre instantáneamente una vez la bomba ha adquirido la velocidad de régimen N_0 , de manera que H_B se modeliza mediante la curva nominal ($N = N_0$) altura-caudal de la bomba.

En este caso, las ecuaciones (17) a (24) son las que modelizan el sistema y su resolución lleva a los resultados mostrados en la Figura 6. La máxima presión que se alcanza es de 276.98 mca en el instante $t = 5.22$ segundos, y la máxima velocidad de la columna de llenado es de 18.25 m/s en el instante $t = 0.10$ segundos (ver Figura 7).

Tal y como se aprecia en los resultados obtenidos, cuando se procede a poner la instalación de nuevo en funcionamiento, inicialmente se comprime rápidamente la primera bolsa de aire y como consecuencia de ello se al-

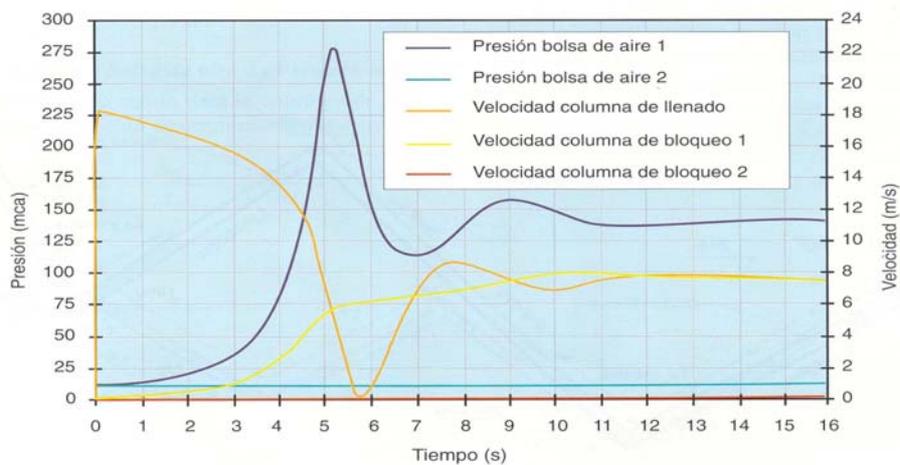


Figura 7: Evolución inicial de la presión de las bolsas de aire p_1^* y p_2^* , velocidad de la columna de llenado v , y velocidad de las columnas de bloqueo v_1 y v_2 cuando hay dos bolsas de aire atrapado

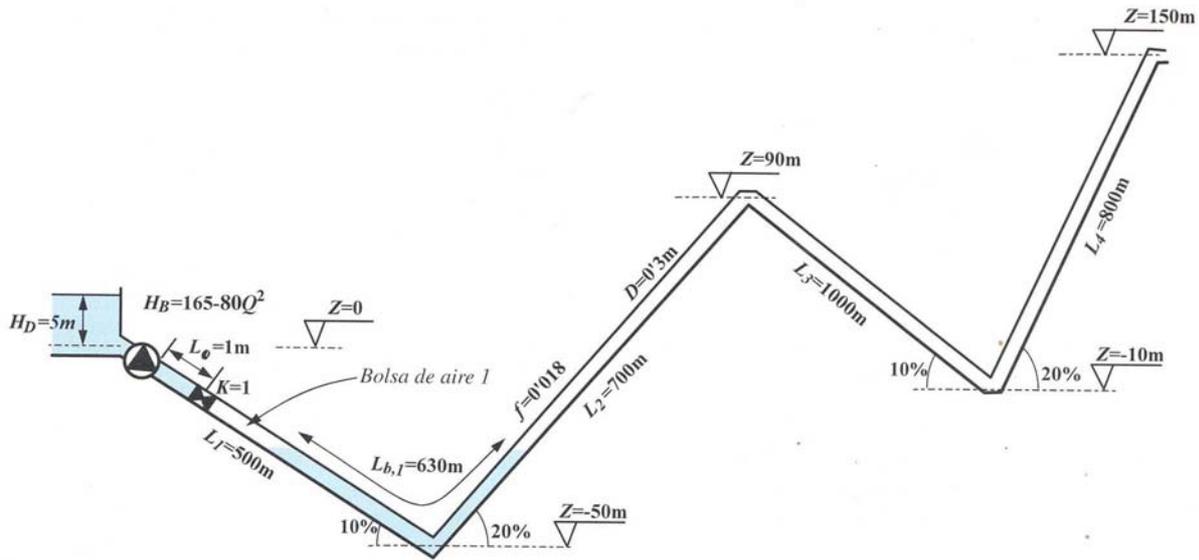


Figura 8: Instalación con una única bolsa de aire atrapado

canza el máximo pico de presión. Sin embargo, durante estos primeros instantes, la primera columna de bloqueo prácticamente ni se mueve hasta que la presión p_1^* alcanza valores importantes y la segunda bolsa de aire no comienza a comprimirse (y, en consecuencia, a aumentar p_2^*) hasta que el movimiento de la primera columna de bloqueo sea apreciable.

Así pues, y debido a la fácil compresibilidad del aire, hasta que la primera bolsa de aire no se comprime y alcanza presiones importantes, el resto de la instalación no comienza a moverse. Por todo ello, parece lógico pensar que la primera bolsa de aire y la primera columna de bloqueo son las realmente decisivas a la hora de determinar el máximo pico de presión que soportará la instalación. De hecho, si se modeliza la misma instalación

de la Figura 5 pero ahora con una única bolsa de aire localizada en el primer tramo (Figura 8), los resultados obtenidos, en cuanto al máximo pico de presión y al instante en que éste se alcanza, son exactamente los mismos: presión máxima = 276.98 mca en $t = 5.22$ segundos y velocidad máxima de la columna de llenado = 18.25 m/s en $t = 0.10$ segundos (los resultados coinciden con los mostrados en la Figura 7).

Para esta situación, las ecuaciones (17) a (21) son las que deben resolverse. Tan solo hay que modificar la presión de la segunda bolsa de aire p_2^* en la ecuación (19) y sustituirla por la presión atmosférica, puesto que ahora no hay una segunda bolsa de aire. La resolución de dicho sistema proporciona los resultados presentados en la Figura 9. Como puede verse, durante los primeros ins-

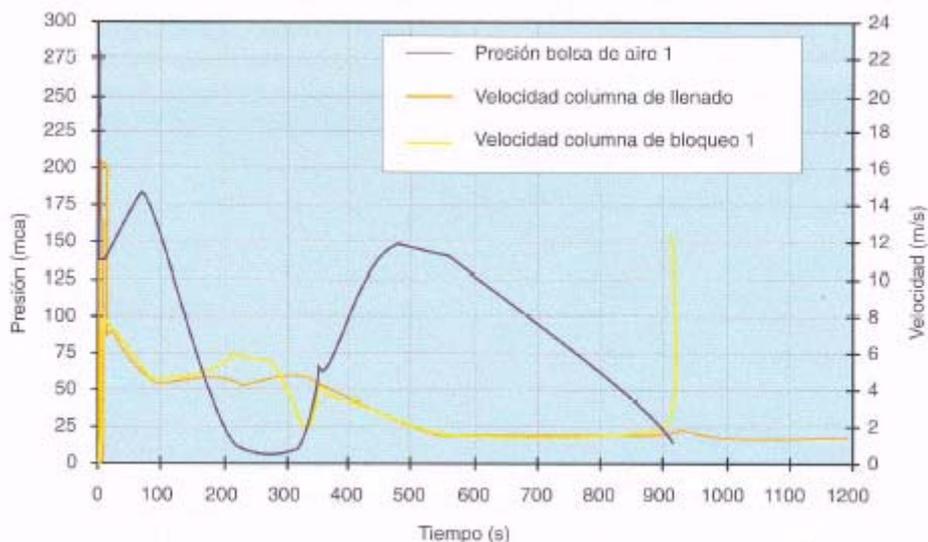


Figura 9: Evolución de la presión de la bolsa de aire p_1^* , velocidad de la columna de llenado v , y velocidad de la columna de bloqueo v_1 cuando hay una única bolsa de aire atrapado

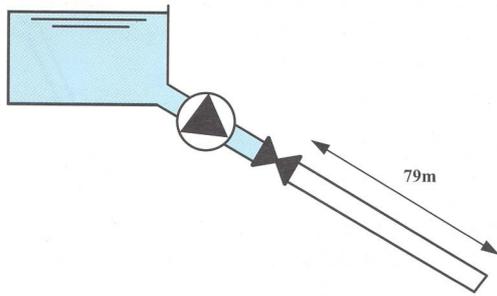


Figura 10: Instalación con la primera bolsa de aire taponada

tantes del transitorio, los resultados son prácticamente idénticos tanto si se consideran dos bolsas de aire atrapado como si se considera una única bolsa.

Pueden compararse los casos presentados con el que estudia Martin (1976). En su trabajo se estudian los picos de presión que se alcanzan en una conducción como consecuencia del aire atrapado pero sin considerar el movimiento de la columna de bloqueo, es decir, estudia la conducción como si la bolsa de aire estuviera completamente taponada y sin posibilidad de evacuar el aire almacenado en su interior. Se trata, obviamente, de la situación más desfavorable. Además, Martin proporciona unas gráficas adimensionales que permiten determinar el máximo pico de presión que se alcanzará.

Supongamos, para la instalación de la Figura 5, que la primera bolsa de aire se encuentra totalmente taponada (Figura 10).

En estas condiciones, los parámetros adimensionales definidos por Martin tomarán los valores:

$$\frac{f \nabla_0}{D^3} = 3.72 \quad ; \quad \frac{H_0^*}{H_b^*} = 16.5$$

donde f es el factor de fricción en la ecuación de pérdidas de Darcy-Weisbach, ∇_0 es el volumen inicial de la bolsa de aire atrapado, D es el diámetro de la conducción, H_0^* es la altura piezométrica aguas arriba de la instalación y H_b^* es la presión inicial del aire.

Entrando con estos dos valores en la gráfica proporcionada por Martin (Figura 11), donde se ha tenido que extrapolar puesto que en el artículo original el máximo valor de H_0^*/H_b^* es 7, se obtiene un valor $H_{max}^*/H_0^* = 5.8$ por lo que la máxima presión que se alcanzará será de 986 mca. Lógicamente, este valor es muy superior al que se obtiene cuando se permite el movimiento de las columnas de bloqueo (277 mca).

Para concluir el presente trabajo, se pretende resaltar la importancia que tiene el tamaño de la bolsa de aire en cuanto al máximo pico de presión se refiere. Se ha modelizado la instalación de la Figura 5 con diferentes tamaños para la primera bolsa de aire, que es la realmente decisiva, y los resultados obtenidos se muestran a continuación

$L_{b,l}$ (m)	$x_{l,0}$ (m)	$L_{bolsa\ aire}$ (m)	$p^*_{l,max}$ (mca)	$*t$ (s)
630	80	79	277.0	5.22
600	100	99	243.7	6.72
570	120	119	215.3	8.30
540	140	139	191.2	9.97

Tal y como se observa, cuanto menor es el tamaño de la bolsa de aire mayor es el pico de presión y menor el tiempo que tarda en alcanzarse dicho máximo. Así pues, las pequeñas bolsas de aire que se comprimen de manera importante y muy rápidamente son mucho más perjudiciales para la instalación que las bolsas de mayor tamaño, las cuales se comprimen en mucha menor medida y mucho más lentamente.

CONCLUSIÓN

Se ha presentado un modelo general que analiza el comportamiento de n bolsas de aire atrapado en tuberías de perfil irregular. Se evidencia que, al ser despreciable la inercia del aire frente a la del agua, los picos de presión que se alcanzan pueden tener gran entidad y, en consecuencia, ser los responsables de numerosas roturas.

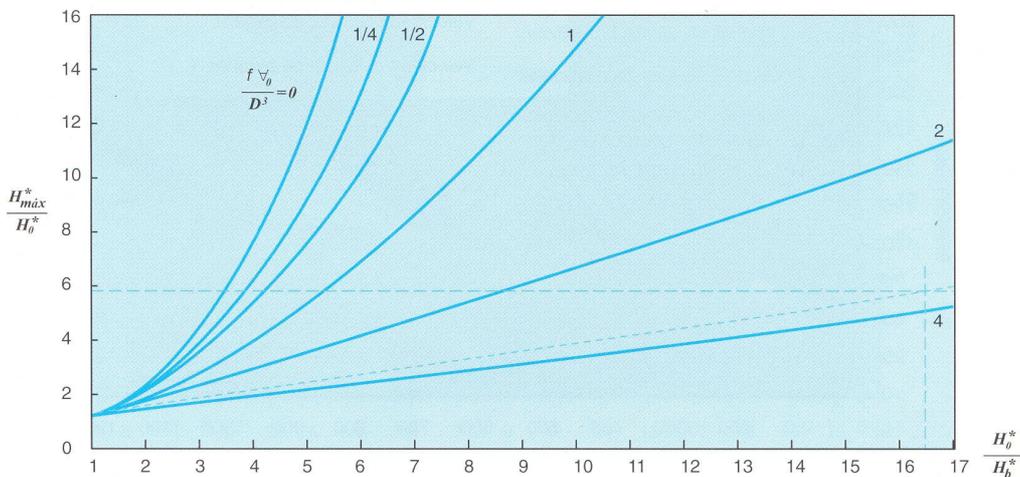


Figura 11: Curvas adimensionales de Martin

Desde una perspectiva formal es importante significar que:

- Las gráficas de Martin, al no contemplar el movimiento de la columna de bloqueo, mejoran de manera muy notable el pico de presión.
- El análisis del problema con $n = 1$ es el que presenta un mayor interés, toda vez que el máximo pico de presión de la primera bolsa apenas se ve condicionado por la existencia de posteriores columnas de bloqueo. Los autores están trabajando en la parametrización de este problema incluyendo en el mismo la presencia de ventosas que se pretenden simular dinámicamente.
- Habida cuenta que el pico de presión es inversamente proporcional al tamaño de la bolsa de aire son, desde la perspectiva del problema que analizamos, las interrupciones temporales de corta duración las más preocupantes.

Desde una perspectiva más aplicada debe ser subrayado:

- El llenado de tuberías con aire atrapado debe realizarse con cautela, ralentizando las maniobras o, lo que es lo mismo, laminando cuanto más mejor la fuerza motriz de la columna de llenado. En el caso analizado en este artículo, ello se conseguiría con una maniobra de apertura lenta de la válvula de cabecera, una vez la bomba ha alcanzado su velocidad de régimen.
- La presencia de ventosas no garantiza la seguridad de la instalación. Una selección incorrecta, un funcionamiento defectuoso (derivado, por ejemplo, de un mantenimiento insuficiente) o un emplazamiento que no permita la salida de toda la masa de aire atrapado, pueden ser la causa de un problema que se suponía resuelto.
- La posibilidad, cuando ello sea factible, de purgar todas las columnas de bloqueo de la tubería es la mejor solución al problema que hemos analizado en el que se ha supuesto interfase aire-agua coincidente con una sección recta de la tubería. Sin esta hipótesis y en el supuesto que la tubería se llenara en régimen de lámina libre, el aire existente podría redistribuirse configurando bolsas de aire atrapado. El purgado de las columnas de bloqueo consiguientes es del todo inviable en abastecimientos urbanos que, por esto y otros muchos motivos que no es el momento de enumerar, deben evitar las interrupciones temporales del servicio.

BIBLIOGRAFÍA

Abreu, J., Cabrera, E., García-Serra, J., Izquierdo, J. (1991), *Boundary between elastic and inelastic models in hydraulic transients with entrapped air pockets*, Proceedings of the 9th Round Table on Hydraulic Transients with Water Column Separation, Valencia, Spain.

Abreu, J., Cabrera, E., Izquierdo, J., García-Serra, J. (1997), *Flow modeling in pressurized systems revisited*, remitido al Journal of Hydraulic Division, ASCE, para su posible publicación.

Albertson, M.L., Andrews, J.S. (1971), *Transients caused by air release*, Control of flow in closed conduits (edited by J.P. Tullis), Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA.

Blum, L.J. (1994), Laboratory tests of air valve performance, U.S. Bureau of Reclamation, Denver Office, Hydraulic Branch, USA.

Cabrera, E., Abreu, J., Pérez, R., Vela, A. (1992), *On the influence of liquid length variation in hydraulic transients*, Journal of Hydraulic Engineering, December 1992.

Cabrera, E., Izquierdo, J., Abreu, J., Iglesias, P.L. (1997), Discussion del artículo *Filling of pipelines with undulating elevation profiles*, Liou, C.P. y Hunt, W.A., Journal of Hydraulic Engineering, October 1996. Aceptado para su publicación.

Chaudhry, H.M. (1989), *Application of lumped and distributed approaches for hydraulic transient analysis*, Proceedings of the International Congress on Cases and Accidents in Fluid Systems, ANAIS, Polytechnic University of Sao Paulo, Brazil.

Coddington, E.A., Levinson, N. (1955) Theory of ordinary differential equations, McGraw Hill, New York, USA.

Gandenberger, W. (1950) Grundlagen der graphischen ermittlung der druckschwankungen (Graphical analysis of pressure surges in water supply lines), R. Oldenbourg Verlag.

Hope, P., Papworth, M.U. (1980) *Fire main failures due to rapid priming of dry lines*, Proceedings of the Third International Conference on Pressure Surges, Canterbury, England.

Jönsson, L. (1985) *Maximum transients pressures in a conduit with check valve and air entrainment*, Proceedings of the International Conference on the Hydraulics of Pumping Stations, Manchester, England.

Koelle, E. (1987), *Critical volume of entrapped air in hydraulic circuits*, 8th International Round Table on Hydraulic Transients in Power Stations, Madeira, Portugal.

Liou, C.P., Hunt, A.W. (1996), *Filling of pipelines with undulating elevation profiles*, Journal of Hydraulic Engineering, October 1996.

Martin, C.S., (1976), *Entrapped air in pipelines*, Proceedings of the Second International Conference on Pressure Surges, London, England.

Martin, C.S. (1979) *Transients performance of air vacuum breaker*, Proceedings of the Fourth International Meeting on Water Column Separation, Cagliari, Italy.

Stoer, J., Bulirsch, R., (1980) Introduction to numerical analysis, Springer-Verlag, New York, USA.

Thorley, A.R.D., Spurrett, R.P. (1990), *Cavity dynamics and the risk of explosive combustion in pipelines*, Proceedings of the Sixth International Conference on Pressure Surges, Cambridge, England.

Tullis, J.P. (1989), Hydraulics of pipelines. Pumps, valves, cavitation and transients, John Wiley and Sons, Inc., USA.

Wylie, E.B., Streeter, V.L. (1993), Fluid transients in systems, Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.