

## DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO EXPERIMENTAL EN EL LABORATORIO PARA EL ANÁLISIS DE TRANSITORIOS HIDRÁULICOS CON BOLSAS DE AIRE ATRAPADO

Vicente S. Fuertes Miquel<sup>1</sup>; Pedro L. Iglesias Rey<sup>1</sup>; Joaquín Izquierdo Sebastián<sup>1</sup>;  
F. Javier Matínez Solano<sup>1</sup>

**Resumen** – En las redes de distribución, cuando se produce la parada de la instalación, las tuberías de perfil irregular son propensas a admitir aire en los puntos altos, apareciendo de esta forma bolsas de aire atrapado. Ante un nuevo arranque de la instalación, estas bolsas de aire se comprimen fácilmente generando importantes picos de presión, los cuales pueden ocasionar incluso la rotura de la tubería. Los autores han desarrollado un modelo de carácter general que permite el análisis simultáneo de la evolución de varias bolsas de aire en una tubería de perfil irregular. En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un equipo experimental para el análisis de transitorios con bolsas de aire atrapado, el cual ha sido montado en los laboratorios de la Universidad Politécnica de Valencia. Los ensayos a realizar en dicho montaje fundamentalmente tienen un doble objetivo: validar el modelo teórico propuesto por los autores y determinar el valor del índice politrópico que mejor caracteriza el comportamiento de las bolsas de aire.

**Abstract** – Pipelines of irregular profile in water distribution networks are prone to admit air in, especially at high points, thus given rise to trapped air pockets. When compressed on the start-up of the installation those air pockets trigger peak pressures that may even break the pipe. The authors have developed a general model to simultaneously analyse the behaviour of several air pockets in a pipeline of irregular profile. In this work, the design and lab implementation of an experimental layout to analyse the transients caused by entrapped air are presented. The layout herein described has been physically built in the lab of the Polytechnic University of Valencia. The tests carried out in that installation are twofold: to validate the theoretical model proposed by the authors and to determine the value of the polytropic exponent that best characterizes the behaviour of entrapped air pockets.

**Palabras clave:** Transitorios hidráulicos, aire atrapado, bolsas de aire, equipo experimental, ensayos en laboratorio.

---

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Valencia – Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente – Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos – Camino de Vera S/N – CP 46022 – Valencia (España) – Tel: 34 963879890 – Fax: 34 963877991 E-mail: [vfuentes@gmmf.upv.es](mailto:vfuentes@gmmf.upv.es) ; [piglesia@gmmf.upv.es](mailto:piglesia@gmmf.upv.es) ; [jizquier@gmmf.upv.es](mailto:jizquier@gmmf.upv.es) ; [jmsolano@gmmf.upv.es](mailto:jmsolano@gmmf.upv.es)

## INTRODUCCIÓN

Las tuberías de perfil irregular que transportan agua a presión son muy propensas a admitir aire en los puntos altos, tan pronto se alcancen en los mismos presiones subatmosféricas inducidas por la parada de la instalación. Cuando ésta entre nuevamente en funcionamiento el aire, atrapado entre dos columnas de agua, puede verse sometido a picos de presión muy importantes que pueden ocasionar la rotura de la tubería.

Para evitar estos elevados picos de presión pueden contemplarse diferentes alternativas. La primera posibilitar que, a través de ventosas instaladas en los lugares adecuados, el aire escape a la atmósfera. La segunda controlar la fuente de energía, responsable del movimiento de la columna de agua que comprime la bolsa de aire. Esta cuestión se aborda, de manera específica, en Izquierdo *et al.* (1999). La tercera posibilidad, de más compleja implementación práctica, consiste en purgar completamente la tubería antes de que la instalación entre en funcionamiento, de manera que el aire no quede atrapado por ninguna columna de bloqueo.

Puesto que se trata de un problema de gran interés práctico, todos los libros estándar sobre transitorios hidráulicos lo contemplan. Chaudhry (1987) analiza la condición de contorno que permite incorporar las bolsas de aire atrapado en el estudio del transitorio que se genera al arrancar la instalación. Swaffield y Boldy (1993) y Wylie y Streeter (1993) analizan con detalle el llenado, a partir de un depósito, de una tubería ciega con aire atrapado en su extremo final. Este ejemplo, de escaso interés práctico, es el que utilizó Martin (1976) para obtener unas curvas de estimación de los picos de presión (Tullis, 1989; Abreu *et al.*, 1995). Esta conocida gráfica de Martin proporciona siempre valores superiores a los que en la práctica se alcanzan, debido a que en la realidad la columna de bloqueo se puede mover. Tampoco permite determinar los picos de presión en el caso de impulsiones, puesto que no contempla la bomba como fuente de energía. Tullis (1989), Thorley (1991), Betamio de Almeida y Koelle (1992) y, finalmente, Sharp (1996) describen, asimismo, el fenómeno, alertando de sus potenciales riesgos y recomendando la instalación de ventosas que posibiliten el escape del aire.

Los autores han venido dedicando a este problema una notable atención. En particular, en Fuertes (2001) se presenta un modelo general que permite el análisis simultáneo de la evolución de  $n$  bolsas de aire atrapado en una tubería de perfil irregular, problema previamente tratado por Martin (1976). Este modelo, de parámetros concentrados, presenta, como aspecto novedoso, la movilidad de las diferentes fronteras aire-agua. Consta de  $n+1$  ecuaciones integrales que identifican la posición de las fronteras,  $n$  ecuaciones algebraicas que siguen la evolución de las  $n$  bolsas de aire y  $n+1$  ecuaciones diferenciales ordinarias que caracterizan el movimiento de la columna de llenado y de las  $n$  columnas de bloqueo. Detalles de este sistema de  $3n+2$  ecuaciones, así como de su resolución práctica, se encuentran en Fuertes *et al.* (1997), Fuertes *et al.* (1998), Fuertes (2001). Además, se ha realizado un detallado análisis dimensional del problema (Fuertes *et al.*, 1999; Fuertes, 2001), con el objeto de identificar los parámetros más significativos del fenómeno estudiado.

El sistema se analiza siempre 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 el modelo elástico. Sin embargo, debe resaltarse que la precisión del modelo rígido es suficiente para el caso que nos

ocupa, tal y como se evidencia en Chaudhry (1989), Abreu *et al.* (1991), Cabrera *et al.* (1992), Abreu *et al.* (1999) y muchos otros trabajos.

Puesto que la verificación de los modelos de ordenador es una cuestión muy importante (Locker y Wang, 1992), se ha diseñado un equipo experimental para el análisis de transitorios hidráulicos con bolsas de aire atrapado, el cual se ha montado en los laboratorios de la Universidad Politécnica de Valencia. A pesar de la baja celeridad de la instalación (aproximadamente unos 170 m/s) debido a los materiales empleados, podemos seguir empleando el modelo rígido puesto que las presiones a las que se ve sometida la instalación no son muy elevadas.

El equipo experimental que se presenta a continuación ha sido diseñado para estudiar el llenado de una conducción de perfil irregular con bolsas de aire atrapado. Los ensayos a realizar tienen un doble objetivo: a) por un lado, validar los resultados teóricos que proporciona el modelo matemático propuesto por los autores y, b) por otro lado, determinar el valor del índice politrópico  $n$  que mejor caracteriza el comportamiento del aire.

## DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

La instalación montada en el laboratorio intenta simular una impulsión simple de perfil irregular (Figura 1). Dicho montaje está constituido por una bomba que eleva el agua desde un depósito de aspiración cuya lámina de agua se encuentra a una cota de 0,62 m hasta un depósito elevado a cota 2,22 m. Este último depósito dispone de un vertedero que recircula el agua hacia el depósito de aspiración, manteniendo constantes los niveles en ambos depósitos.



Figura 1. Vista general de la instalación estudiada.

El agua circula a través de una tubería de metacrilato de diámetro interior 18,8 mm, diámetro exterior 25 mm y longitud 6,90 m (desde la electroválvula hasta el depósito elevado). En el tramo comprendido entre la bomba y la electroválvula se disponen varias válvulas de regulación así como también un contador para medir el caudal en régimen permanente.

La impulsión se realiza mediante una pequeña bomba centrífuga de 0,6 Kw (Figura 2), la cual aspira de un depósito de 60 cm de alto, 100 cm ancho y 32 cm de profundidad (192 litros). Las oscilaciones en este depósito durante el transitorio son de tan solo 3 o 4 cm, por lo que puede suponerse que la bomba aspira de un depósito de altura constante. A la salida de la bomba se ha colocado un transductor que permite ensayar la bomba en régimen permanente. No obstante, la misma instalación también puede alimentarse desde un calderín de grandes dimensiones (300 litros) en comparación con el tamaño de la tubería, de manera que la presión en cabecera puede considerarse prácticamente constante (como si se tratara de un depósito) durante el corto tiempo que dura el llenado de la conducción.

Figura 2. Alimentación de la instalación mediante bomba.

El tramo comprendido entre la bomba y la electroválvula tiene una longitud de 1,72 m y un diámetro interior de 20 mm. Prácticamente todo él es de PVC excepto un pequeño tramo, el que enlaza la instalación de la parte posterior del panel con la electroválvula situada en la parte frontal, el cual es de plástico flexible reforzado con alambre en espiral. En el tramo de PVC se han intercalado varias válvulas de regulación y un contador de 13 mm de chorro único con un coeficiente de pérdidas  $K_{cont} = 14,4 \text{ mca}/(\text{l/s})^2$ , siendo  $h_{cont}(\text{mca}) = K_{cont} \cdot Q(\text{l/s})^2$ .

La válvula cuya apertura provoca el llenado de la conducción es una electroválvula Burkert de  $\frac{3}{4}$ " con un tiempo de apertura de 0,4 segundos (según los datos del fabricante). El coeficiente de pérdidas a válvula totalmente abierta obtenido tras el correspondiente ensayo en el laboratorio es  $K_{v,0} = 6,65 (\text{m}^3/\text{h})/(\text{bar})^{1/2}$ , lo que equivale a un coeficiente de pérdidas adimensional  $k_{válv} = 4,52$  (siendo  $h_{válv} = k_{válv} \cdot v^2/2g$ ). En la Figura 3 puede observarse esta electroválvula junto con dos de los transductores (para medir la presión), una válvula de purga (para permitir la entrada de aire a la

instalación y generar así las bolsas de aire atrapado) y una de las fotocélulas (para medir la posición de las columnas de agua).

A continuación de la electroválvula comienza la instalación de metacrilato totalmente transparente. Inicialmente se tiene un tramo horizontal de 0,31 m y luego comienza un perfil irregular con dos puntos altos y dos puntos bajos. Las longitudes de los cuatro tramos inclinados son 1,09, 1,79, 1,83 y 1,88 m, y las pendientes correspondientes son  $-0,663$ ,  $0,946$ ,  $-0,729$  y  $0,956$  radianes. Los cambios de dirección son posibles gracias a la utilización de tubo flexible de plástico reforzado con alambre en espiral.

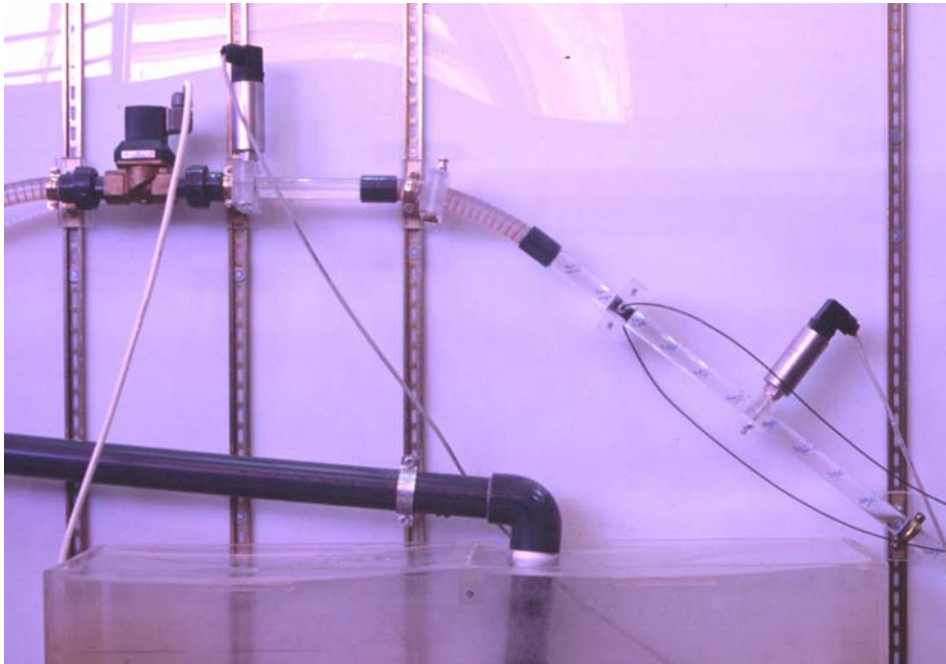


Figura 3. Detalle de la instalación.

El esquema de la Figura 4 muestra las características principales de la instalación objeto de estudio. En los puntos altos y bajos de la conducción se han instalado 4 válvulas de purga para controlar el tamaño de las bolsas de aire. El perfil de la instalación permite estudiar un máximo de 2 bolsas de aire (una atrapada justo en el tramo aguas abajo de la electroválvula y la otra en el punto más elevado de la conducción).

## INSTALACIÓN ALIMENTADA MEDIANTE BOMBA

prab0.02

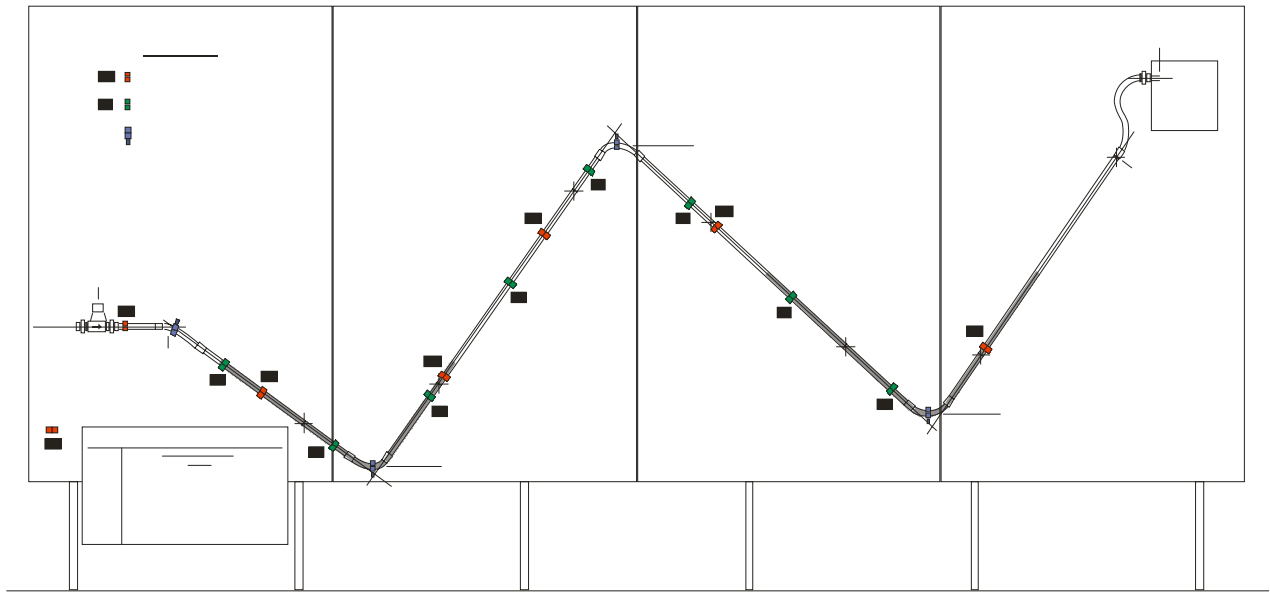


Figura 4. Esquema de la instalación estudiada.

Para analizar el transitorio con bolsas de aire atrapado, a lo largo de la conducción se han dispuesto 6 transductores para medir la presión (situados a 0,12, 0,8, 1,92, 2,68, 3,77 y 5,41 m de la electroválvula) y 8 fotocélulas capaces de detectar el paso de agua o aire (situadas a 0,6, 1,2, 1,8, 2,4, 3, 3,6, 4,2 y 4,8 m de la electroválvula).

El material elegido para el montaje de la tubería ha sido metacrilato transparente, con objeto de poder visualizar el movimiento de las columnas de agua. Este material no soporta presiones muy elevadas, lo cual limita las mediciones que pueden realizarse.

## CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Las magnitudes medidas durante el transitorio son:

- Presión a la salida de la bomba y en otros 6 puntos de la instalación.
- Paso de las fronteras aire-agua en 8 puntos de la instalación.

Para medir la presión se utilizan transductores de presión (Figura 5) con salida 4-20 mA, con un rango de medida comprendido entre 0 y 4 bar absolutos y una precisión nominal del 0,25% del fondo de escala. Dado el tipo de salida eléctrica de los mismos es necesario el uso de resistencias para convertir intensidades a tensiones por lo que posteriormente, y una vez instalados, se han calibrado individualmente con una balanza manométrica con el fin de compensar la tolerancia de las resistencias respecto a su valor nominal. La respuesta en frecuencia de estos transductores es de 2000 Hz, suficiente para poder seguir los transitorios que se pretenden analizar.

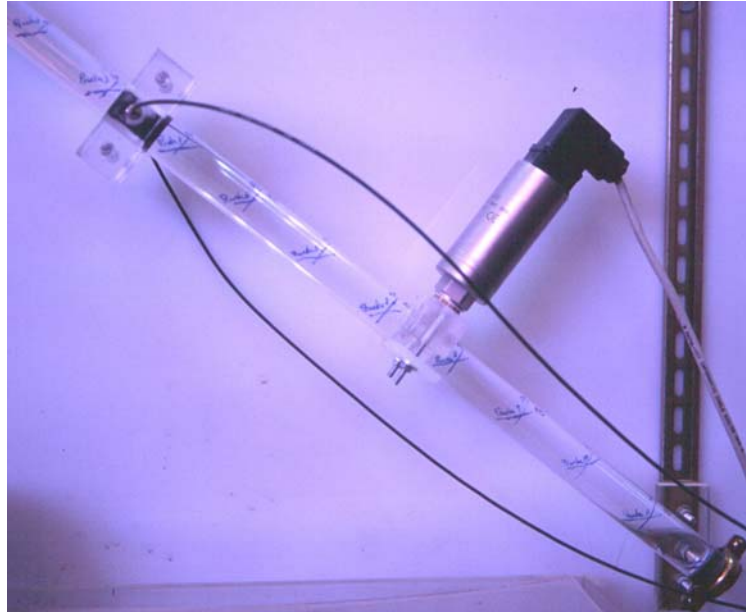


Figura 5. Transductor de presión junto a una fotocélula.

La posición de las interfases aire-agua se determina mediante 8 fotocélulas (Figura 6) distribuidas a lo largo de la conducción, las cuales son capaces de detectar el paso de agua o aire por el punto donde están colocadas. La posición de las fotocélulas se ha mantenido fija durante todos los ensayos. Sin embargo, el montaje permite que la posición de las mismas pueda alterarse con suma facilidad. La sensibilidad de las mismas es ajustable por lo que es posible regularla a un nivel tal que la presencia de agua en la tubería cortase el haz de luz emitido por el diodo y, sin embargo, cuando ésta estuviera vacía (en realidad, llena de aire) dicho haz se pudiese transmitir sin perturbación alguna.

El tipo de señal eléctrica que suministran las fotocélulas es digital, es decir, tiene únicamente dos estados posibles, circuito abierto o circuito cerrado. Bajo la presencia de agua la fotocélula proporciona un valor de salida que corresponde al 0 lógico, lo contrario que cuando la conducción esta llena de aire, estado al que corresponde un 1 lógico.

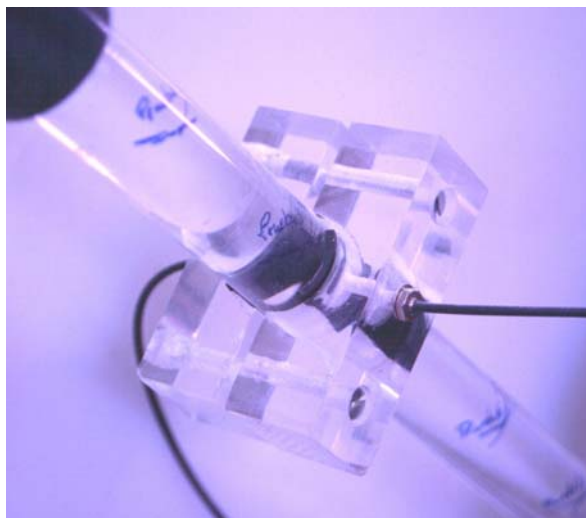


Figura 6. Sensor de la fotocélula.



La velocidad de respuesta de las fotocélulas es de tan solo 200 $\mu$ s. Para esta frecuencia de muestreo, el máximo error de posicionamiento de la frontera aire-agua es de 5 mm para una velocidad de 2 m/s. Teniendo en cuenta que la frontera no está perfectamente definida, especialmente cuando la columna de agua se mueve por los tramos descendentes, la exactitud conseguida es más que suficiente.

Un ordenador personal, con la tarjeta de adquisición de datos correspondiente, recoge las señales digitales procedentes de las 8 fotocélulas y las analógicas de los 7 transductores de presión. Se ha diseñado un programa de adquisición de datos con el software LabView<sup>®</sup> que muestrea los canales a una frecuencia de 350 Hz, es decir el tiempo entre muestras es ligeramente inferior a 0,003 segundos.

Dicha frecuencia es suficiente para medir con suficiente precisión el transitorio que se pretende analizar. En cualquier caso, y una vez comprobada la fácil reproducibilidad de cada ensayo, se realizaron tandas de medidas con una mayor frecuencia de muestreo que proporcionaron resultados muy similares.

## AJUSTE DEL MODELO

Como paso previo a la realización de mediciones y comparación con los resultados que proporciona el modelo matemático, hay que determinar algunas características importantes de la instalación. Concretamente, se han desarrollado diversos ensayos en régimen permanente que nos han permitido obtener:

- Caracterización de la fuente de alimentación (curva característica de la bomba).
- Factor de fricción de la tubería.
- Coeficiente de pérdidas de la electroválvula.
- Coeficiente de pérdidas localizadas del conjunto de elementos instalados entre la bomba y la electroválvula.

Para modelar la fuente de alimentación de la instalación (curva característica de la bomba), se han realizado diversas mediciones en régimen permanente, cuyos resultados pueden observarse en la gráfica de la Figura 7. Dicha curva característica se ajusta perfectamente a la parábola de dos parámetros:  $H_B(\text{mca}) = 38,68 - 19,76 \cdot Q(\text{l/s})^2$ .



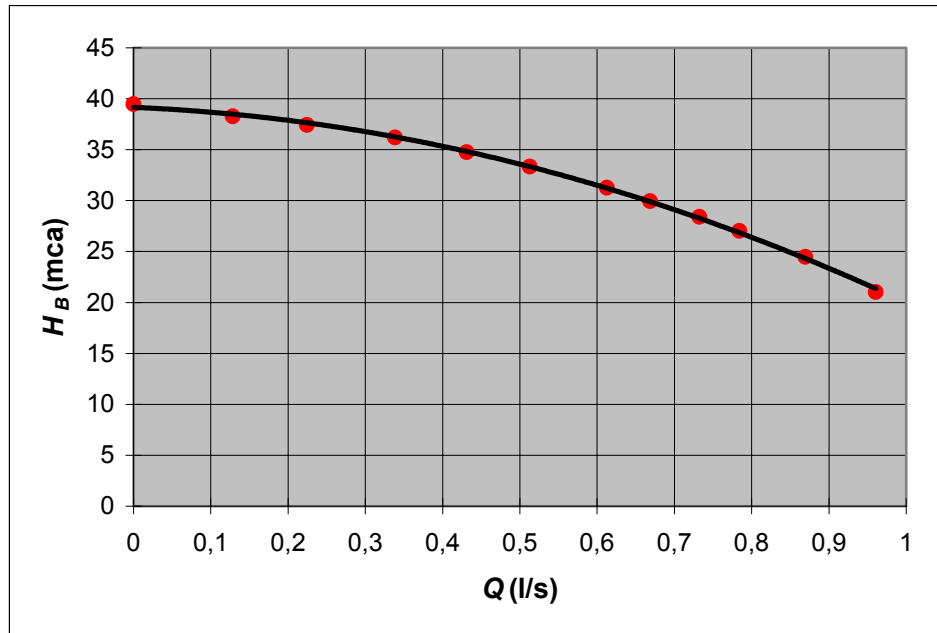


Figura 7. Curva característica da bomba.

En cuanto a las pérdidas por fricción de la instalación, después de diversos ensayos se concluye que el factor de fricción de la conducción es  $f = 0,02$ , lo que coincide prácticamente con el supuesto de una tubería lisa ( $\lambda = 0$ ).

Para determinar el coeficiente de pérdidas de la electroválvula cuya apertura origina el transitorio objeto de estudio se ha realizado el ensayo de la misma. A partir de los resultados obtenidos se concluye que el coeficiente de pérdidas adimensional es  $k_{válv} = 4,52$ , es decir, un coeficiente  $K_{v,0} = 6,65 \text{ (m}^3/\text{h)/(\bar{bar})}^{1/2}$ . Es importante resaltar que el fabricante proporciona un valor  $K_{v,0} = 8,3 \text{ (m}^3/\text{h)/(\bar{bar})}^{1/2}$ , un 25 % superior al obtenido en el ensayo. Este hecho pone de manifiesto la enorme importancia de una buena calibración.

Hay que subrayar también la importancia que tiene caracterizar correctamente la ley de apertura de la electroválvula. Inicialmente se asumió una apertura instantánea, según las instrucciones del fabricante. Sin embargo, con tal hipótesis el pico teórico era muy superior al medido. Tras diversas conversaciones con el suministrador, se llegó a la conclusión de que el tiempo real de apertura era muy pequeño (0,4 segundos), prácticamente instantáneo, pero no nulo. Una vez asumido este tiempo de apertura, con una ley de apertura lineal, los resultados calculados con el modelo coinciden mucho mejor con los valores medidos en el laboratorio.

Por último, en cuanto al coeficiente  $k$  de pérdidas menores ( $h = k \cdot v^2/2g$ ) para el tramo comprendido entre el depósito de aspiración y la electroválvula, se obtiene un valor de  $k = 22,33$ . Si a este valor se le resta el coeficiente de pérdidas correspondiente a la electroválvula,  $k_{válv} = 4,52$ , queda un valor de 17,81 para el contador y demás elementos.

Todos estos resultados (curva característica de la bomba, factor de fricción de las tuberías y coeficientes de pérdidas menores) constituyen parte de los datos de partida necesarios para que el modelo matemático propuesto calcule los transitorios con aire atrapado y puedan compararse los resultados que proporciona con los valores experimentales medidos en el laboratorio. Cuanto más se

aproximen a la realidad los datos de partida, más realista será la comparación de resultados y más fiables serán las conclusiones del estudio realizado.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha descrito brevemente el diseño e implementación de un equipo experimental para el análisis de transitorios hidráulicos con bolsas de aire atrapado, el cual ha sido montado en los laboratorios que el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente tiene en la Universidad Politécnica de Valencia.

En un principio, los objetivos fundamentales de este montaje experimental son dos: validar el modelo teórico desarrollado previamente por los autores y, además, determinar el valor del índice politrópico que mejor caracteriza el comportamiento de las bolsas de aire atrapado entre dos columnas de agua.

Se ha descrito con detalle la instalación del laboratorio, junto con sus principales elementos, en la cual se van a realizar todos los ensayos. Dicha instalación puede ser alimentada mediante una bomba con su curva característica correspondiente, es decir, con una altura en cabecera variable durante el transitorio. Pero, la misma instalación también puede alimentarse desde un calderín, de grandes dimensiones en comparación con el tamaño de la tubería, de manera que la presión en cabecera puede considerarse prácticamente constante (como si fuera un depósito) durante el corto tiempo que dura el llenado de la conducción.

Seguidamente se ha descrito todo el equipo de adquisición de datos. Básicamente, se realizan dos tipos de mediciones durante el transitorio: por un lado, se mide la presión en siete puntos distintos de la instalación mediante transductores colocados a tal efecto; por otro lado, se mide la localización de las interfases aire-agua mediante la utilización de ocho fotocélulas distribuidas a lo largo de la tubería.

Con objeto de poder realizar los ensayos en régimen transitorio y poder comparar los resultados medidos con los que proporciona el modelo propuesto, es necesario caracterizar previamente algunos de los elementos de la instalación, como son: la curva característica de la bomba, el factor de fricción de la tubería, el coeficiente de pérdidas de la electroválvula, el coeficiente de pérdidas localizadas de los diferentes accesorios instalados, etc. Todas estas características se han obtenido a partir de diversos ensayos en régimen permanente y constituyen el punto de partida para la realización de los ensayos.

Una vez ha sido diseñado e implementado el montaje descrito anteriormente, ya estamos en disposición de realizar diversos ensayos sobre una instalación de pequeñas dimensiones que simula una impulsión de perfil irregular. En dicho montaje pueden generarse hasta un máximo de dos bolsas de aire, lo que permite el estudio y análisis de transitorios hidráulicos con aire atrapado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J.M.; CABRERA, E.; GARCÍA-SERRA, J.; IZQUIERDO, J. (1991), "*Boundary between elastic and inelastic models in hydraulic transients with entrapped air*", Proceedings of the 9<sup>th</sup> Round Table on Hydraulic Transients with Water Column Separation, IAHR, Valencia, España, pág. 159-179.
- ABREU, J.M.; GUARGA, R.; IZQUIERDO, J. (Ed.) (1995), Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión, Ed. Grupo Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- ABREU, J.M.; CABRERA, E.; IZQUIERDO, J.; GARCÍA-SERRA, J. (1999), "*Flow modeling in pressurized systems revisited*", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125, N° 11, pág. 1154-1169.
- BETAMIO DE ALMEIDA, A.; KOELLE, E. (1992), Fluid transients in pipe networks, Ed. Computational Mechanics Publications, Southampton, Reino Unido.
- CABRERA, E.; ABREU, J.M.; PÉREZ, R.; VELA, A. (1992), "*Influence of liquid length variation in hydraulic transients*", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 118, N° 12, pág. 1639-1650.
- CHAUDHRY, M.H. (1987), Applied hydraulic transients, Ed. Van Nostrand Reinhold Company, New York, USA.
- CHAUDHRY, M.H. (1989), "*Application of lumped and distributed approaches for hydraulic transient analysis*", Proceedings of the International Congress on Cases and Accidents in Fluids Systems, ANAIS, Polytechnic University of Sao Paulo, Brasil.
- FUERTES, V.S.; IZQUIERDO, J.; IGLESIAS, P.L.; CABRERA, E.; GARCÍA-SERRA, J. (1997), "*Llenado de tuberías con aire atrapado*", Ingeniería del Agua, Vol. 4, N° 3, pág. 57-67.
- FUERTES, V.S.; CABRERA, E.; IZQUIERDO, J.; IGLESIAS, P.L.; GARCÍA-SERRA, J. (1998), "*Filling of pipelines with entrapped air*", Proceedings of the XIX Symposium on Hydraulic Machinery and Cavitation, IAHR, Singapur, pág. 673-685.
- FUERTES, V.S.; CABRERA, E.; IZQUIERDO, J.; IGLESIAS, P.L. (1999), "*Peak pressure evaluation in pipelines with entrapped air pockets*", Proceedings of the 3<sup>rd</sup> ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, San Francisco, USA.
- FUERTES, V.S. (2001), Transitorios hidráulicos con aire atrapado, Tesis para la obtención del grado de Doctor Ingeniero Industrial, Universidad Politécnica de Valencia.
- IZQUIERDO, J.; FUERTES, V.S.; CABRERA, E.; IGLESIAS, P.L.; GARCÍA-SERRA, J. (1999), "*Pipeline start-up with entrapped air*", Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 37, N° 5, pág. 579-590.

- LOCKER, F.A.; WANG, J.S. (1992), "*An experience with entrapped air in comparisons of analytical studies and field test of a system with column separation*", Proceedings of the International Conference on Unsteady Flow and Fluid Transients, Durham, Reino Unido, pág. 327-332.
- MARTIN, C.S. (1976), "*Entrapped air in pipelines*", Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Pressure Surges, BHRA, Londres, Reino Unido.
- SHARP, B.B.; SHARP, D.B. (1996), Water hammer: practical solutions, Ed. Halsted Press and John Wiley & Sons Inc., New York, USA.
- SWAFFIELD, J.A.; BOLDY, A.P (1993), Pressure surge in pipe and duct systems, Avebury Technical, Ashgate Publishing Limited, Reino Unido.
- THORLEY, A.R.D. (1991), Fluid transients in pipeline systems, Ed. D. & L. George Ltd., Londres, Reino Unido.
- TULLIS, J.P. (1989), Hydraulics of pipelines. Pumps, valves, cavitation and transients, Ed. 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.