

Modelo numérico del proceso de llenado de una conducción simple con válvula de aire

Numerical model of the water pipe filling with an air valve

Oscar E. Coronado-Hernández¹, Vicente S. Fuertes-Mique², Mohsen Besharat³, Helena M. Ramos³

© Autor correspondiente: ocoronado@utb.edu.co

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena 131001, Colombia

² Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España

³ CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa 1049-001, Portugal

RESUMEN: Los procesos de llenado de agua en conducciones generan sobrepresiones que deben considerarse para que las instalaciones no fallen durante su operación. Las maniobras de llenado con aire atrapado en conducciones de agua han sido estudiadas por distintos autores. No obstante, estas investigaciones no consideran el comportamiento de las válvulas de aire, las cuales actúan como dispositivos de protección reduciendo las sobrepresiones ocasionadas. En este trabajo se presenta el modelo matemático desarrollado para simular las variables hidráulicas y termodinámicas que intervienen durante el proceso de llenado de agua con válvulas de aire en tuberías simples. Para la validación del modelo matemático se ha utilizado una instalación con una longitud de 7.3 m y un diámetro nominal de 63 mm, y en donde se ha instalado una ventosa de referencia S050 (A.R.I.) en el punto más alto.

Palabras Clave: Llenado de tuberías, válvulas de aire, medidas experimentales, transitorios hidráulicos.

ABSTRACT: Water filling processes in pipes generate overpressures that must be considered so that the facilities do not fail during their operation. The filling manoeuvres with air trapped in water pipes have been studied by different authors. However, these investigations do not consider the behaviour of the air valves, which act as surge protection devices reducing the overpressures caused. This paper presents the mathematical model developed to simulate the hydraulic and thermodynamic variables that affect the process of filling water with air valves in simple pipes. A water pipe facility with a length of 7.3 m, a nominal diameter of 63 mm and an air valve installed at the highest point has been used to collect data for the validation of the mathematical model.

Keywords: water pipe filling, air valves, experimental measurements, hydraulic transients.

1. INTRODUCCIÓN

El aire que se introduce en las conducciones de agua genera sobrepresiones o depresiones por la compresión o la expansión de las bolsas de aire atrapadas, respectivamente [1]. El entendimiento de los cambios de volumen en las bolsas de aire es crucial para realizar maniobras fiables en la operación de las conducciones de agua. Estos cambios se deben a dos razones [2-4]: (i) la densidad del aire (1.205 kg/m^3 a una temperatura de 20°C) es 800 veces menor que la densidad del agua (1000 kg/m^3 a una temperatura de 20°C); y (ii) la elasticidad del aire es mucho mayor que la elasticidad del agua y de la tubería.

Recientemente, los autores [2] han estudiado de manera detallada el proceso de vaciado en conducciones de agua, en las cuales las bolsas de aire se expanden a medida que la columna de agua es drenada de la instalación, generando de esta manera depresiones que podrían ocasionar el colapso de los sistemas hidráulicos. Tanto el comportamiento del vaciado de agua sin válvulas de aire como la inclusión de estos dispositivos de protección han sido estudiados por los autores, con lo cual en la práctica la evolución de las variables hidráulicas y termodinámicas que intervienen durante este proceso pueden ser conocidas.

Por otro lado, el proceso de llenado en tuberías ha sido estudiado por distintos autores en los últimos años, llegando a entender como las bolsas de aire atrapadas se comprimen con facilidad generando así sobrepresiones que pueden poner en riesgo la instalación [5,6]. Sin embargo, en la literatura actual no se disponen de publicaciones suficientes para estudiar el proceso de llenado con válvulas de aire en conducciones presurizadas, lo cual es importante para planificar adecuadamente este tipo de operaciones en conducciones reales. La selección de una válvula de aire es importante para brindar fiabilidad a la instalación hidráulica debido a que debe expulsar una cantidad de aire suficiente evitando así las sobrepresiones [7,8].

En esta investigación, se presenta un modelo matemático desarrollado por los autores para estudiar el proceso de llenado con válvulas de aire en tuberías simples, el cual es un paso previo para entender el funcionamiento en conducciones de agua de perfil irregular. El modelo matemático considera la ecuación del modelo rígido, la interfaz aire-agua, el modelo politrópico, la ecuación de continuidad de la bolsa de aire y la ecuación característica de la válvula de aire. Para la validación del modelo matemático se ha utilizado un banco experimental localizado en el Instituto Superior

Técnico de la Universidad de Lisboa (Lisboa, Portugal) con una longitud total de 7.3 m , un diámetro nominal de 63 mm y con una válvula de aire de referencia S050 (A.R.I.) cuyo orificio de salida es de diámetro 3.175 mm , y cuya principal función es actuar como purgador. En cualquier caso, para una instalación de pequeñas dimensiones, esta válvula de aire puede usarse para expulsar y admitir pequeñas cantidades de aire durante las maniobras de llenado y vaciado. Se ha medido la presión absoluta de la bolsa de aire con un transductor. El modelo matemático logra captar adecuadamente la primera oscilación de este patrón, que es de vital importancia debido a que en estos primeros instantes se alcanza la máxima presión durante el fenómeno transitorio.

2. MODELO MATEMÁTICO

En esta sección se presenta el modelo matemático desarrollado por los autores para simular el proceso de llenado de agua con válvulas de aire en tuberías simples. El inicio de este proceso comienza con la apertura de una válvula de regulación que permite la entrada del flujo de agua debido a la presión disponible en la instalación (ya sea por gravedad o por bombeo). Posteriormente, existe un intercambio de energía cinética (suministrado por la columna de agua) a energía de compresión en la bolsa de aire, el cual produce un aumento en la presión al interior de la instalación. Este aumento debe ser controlado por una válvula de aire seleccionada adecuadamente que permita la liberación de un volumen de aire suficiente para evitar sobrepresiones que pongan en riesgo la instalación. La Figura 1 presenta el esquema de una tubería simple, en donde se pretende realizar un llenado con una válvula de aire.

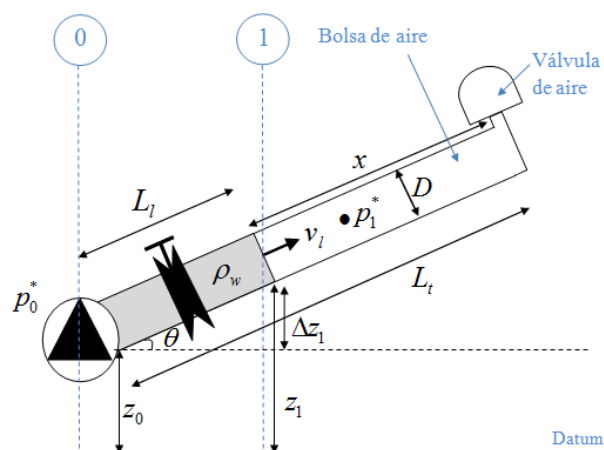


Figura 1. Esquema del proceso de llenado con una válvula de aire en una tubería simple.

Para la aplicación del modelo matemático se consideraron las siguientes suposiciones:

- El modelo rígido es empleado para simular la columna de agua debido a que la elasticidad del aire es mucho mayor que la elasticidad del agua y la tubería, lo que conlleva a resultados prácticamente iguales a cuando se emplea un modelo elástico, tal y como demuestran los trabajos de diversos autores [9-11].
- El modelo de flujo pistón se emplea para simular la interfaz aire-agua.
- Tanto el factor de fricción como el coeficiente politrópico son considerados constantes durante el fenómeno transitorio.

Basado en las suposiciones anteriores, el proceso de llenado con válvulas de aire en tuberías simples se puede modelar con las siguientes ecuaciones:

1. Ecuación del modelo rígido:

$$\frac{dv_l}{dt} = \frac{p_0^* - p_1^*}{\rho_w L_l} + g \frac{\Delta Z_l}{L_l} - f \frac{v_l |v_l|}{2D} - \frac{R_v g A^2 v_l |v_l|}{L_l} \quad (1)$$

donde v_l representa la velocidad de llenado del agua, p_0^* es la presión suministrada por una fuente de energía (gravedad o bombeo), p_1^* es la presión en la bolsa de aire, L_l es la longitud de la columna de llenado (agua), t es el tiempo, D es el diámetro interior de la tubería, R_v es el coeficiente de resistencia de válvula, Δz es la diferencia de elevación, f es el factor de fricción, ρ_w es la densidad del agua, g es la aceleración debido a la gravedad, y A es el área de la sección transversal de la tubería.

2. Interfaz aire-agua:

$$\frac{dL_l}{dt} = v_l \quad (2)$$

La posición inicial de L_l es determinada como $L_T - x_0$, en donde x_0 representa la longitud inicial de la bolsa de aire y L_T es la longitud total de la tubería.

3. Ecuación del modelo politrópico para la evolución de la bolsa de aire:

$$\frac{dp_1^*}{dt} = k \frac{p_1^*}{V_a} \left(\frac{dV_a}{dt} - \frac{1}{\rho_a} \frac{dm_a}{dt} \right) \quad (3)$$

donde k es el coeficiente politrópico, V_a es el volumen de la bolsa de aire, ρ_a es la densidad del aire y m_a es la masa de la bolsa de aire.

4. Ecuación de continuidad del aire:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \frac{v_l A \rho_a - \rho_a v_a A_{exp}}{A(L_T - L_l)} \quad (4)$$

donde v_a es la velocidad del aire, A_{exp} es el área del orificio de expulsión de la válvula de aire y ρ_a es la densidad del aire.

5. Ecuación característica de la válvula de aire para condiciones de flujo subsónico:

$$v_a = C_{exp} p_1^* \sqrt{\frac{7}{RT} \left[\left(\frac{p_{atm}^*}{p_1^*} \right)^{1.4286} - \left(\frac{p_{atm}^*}{p_1^*} \right)^{1.714} \right]} \quad (5)$$

donde C_{exp} es el coeficiente de expulsión de la válvula de aire, p_{atm}^* es la presión atmosférica (101325 Pa), T es la temperatura ambiente y R es la constante universal del aire.

La resolución del sistema de ecuaciones diferenciales-algebraicas 5x5 (ecuaciones (1) a (5)) describe el comportamiento hidráulico y termodinámico de las variables (v_l , L_l , p_1^* , ρ_a y v_a) que intervienen en el proceso de llenado de agua.

Las condiciones iniciales del sistema están dadas por $v_l(0) = 0$, $L_l(0) = L_r$, $p_1^*(0) = p_1$, $\rho_a(0) = 1.205 \text{ kg/m}^3$ y $v_a(0) = 0$. La condición de contorno está impuesta por la presión disponible en la alimentación (por gravedad o por bombeo) representada por p_0^* .

Para aplicar el modelo matemático propuesto debe considerarse el caudal máximo de aire que provoca el cierre dinámico de la válvula de aire, que es un valor que debe ser suministrado por los fabricantes; y también deben manejarse velocidades bajas en la columna de agua, recomendadas por la AWWA, con el fin de garantizar las condiciones subsónicas del aire en el interior de la conducción.

El modelo matemático es aplicable a tuberías con pendiente suficiente o velocidad del agua suficiente para producir que la interfaz aire-agua sea perpendicular con la sección transversal (modelo de flujo pistón).

3. VALIDACIÓN NUMÉRICA

3.1 Banco experimental e instrumentación

El modelo matemático propuesto por los autores fue validado con pruebas experimentales realizadas en el laboratorio de hidráulica del Instituto Superior Técnico de la Universidad de Lisboa (Lisboa, Portugal). Para todos los experimentos se introducirá una bolsa de aire en el punto alto de la instalación. Para suministrar distintas presiones

a la instalación se ha utilizado un calderín de 1 m³ de volumen, en donde se han empleado presiones manométricas iniciales (p_0) de 0.2, 0.5, 0.75 y 1.25 bar.

El proceso de llenado se realiza en una conducción de PVC de diámetro nominal DN63 con resistencia PN16. Hay instalado un transductor en el punto donde se localiza la válvula de aire para medir la presión de la bolsa de aire. La presión inicial de la bolsa de aire corresponde a la presión atmosférica. Se ha instalado una electroválvula (BV_1), la cual permanece cerrada antes de iniciar el experimento, y su apertura indica el inicio del fenómeno transitorio. La apertura de la electroválvula se produce en 0.2 s. La electroválvula BV_2 permanece cerrada durante todos los experimentos. La presión de la bolsa de aire es registrada con transductores de presión de referencia S-10 WIKA con un error de medición de 0.5% y una señal analógica con corriente eléctrica entre 4 y 20 mA. La presión máxima que puede registrar el transductor de presión instalado es de 25 bar. La señal es procesada con la aplicación Pico-scope. La conducción está compuesta por varios tramos de PVC con una longitud total de 7.3 m y un diámetro nominal DN63. La válvula de aire instalada es el modelo S050 (A.R.I.), con un orificio de diámetro 3.175 mm (Figura 3). La columna de bloqueo de agua no se comprime y actúa como una condición de borde en el sistema hidráulico. Los efectos de compresión de esta columna de agua son despreciables en comparación con la compresión de las bolsas de aire del sistema, en donde se presentan los cambios de presión.

3.1 Mediciones experimentales

Para validar el modelo matemático propuesto por los autores se realizaron 8 experimentos. Cada uno de los experimentos se repitió dos veces para confirmar la repetitividad de los ensayos. Se consideraron dos tamaños de bolsas de aire (0.96 y 1.36 m) y 4 presiones manométricas iniciales en el calderín (0.2, 0.5, 0.75 y 1.25 bar). En la Tabla 1 se presentan las características de los 8 experimentos realizados.

Tabla 1. Características de los experimentos realizados

Medición No.	p_0^* (Pa)	p_0 (bar)	x_0 (m)
1	120060	0.2	0.96
2	120060	0.2	1.36
3	150075	0.5	0.96
4	150075	0.5	1.36
5	175087	0.75	0.96
6	175087	0.75	1.36
7	225112	1.25	0.96
8	225112	1.25	1.36

3.2 Validación del modelo matemático

Con el fin de validar el modelo matemático propuesto, se realizan comparaciones entre la presión absoluta de la bolsa de aire calculada con el modelo y los resultados experimentales. Para todos los casos se utilizó un factor de fricción constante de 0.018. El sistema presentado en la Figura 2

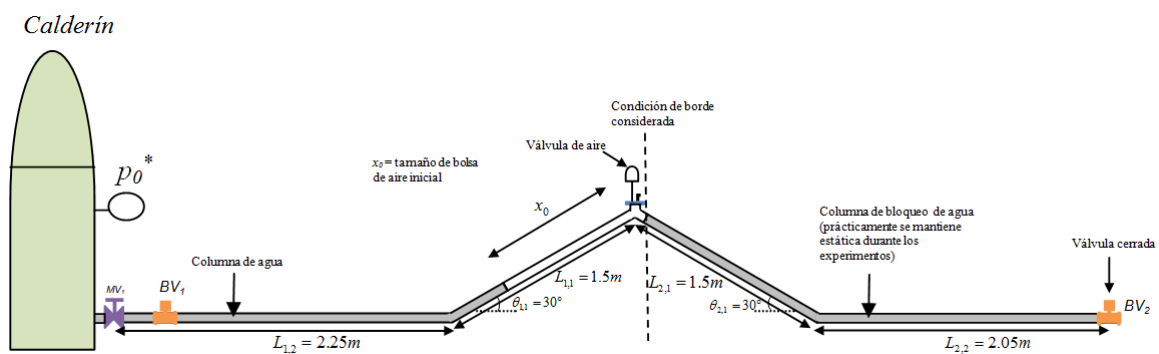


Figura 2. Banco experimental utilizado.



Figura 3. Válvula de aire A.R.I. (modelo S050) instalada en el punto alto.

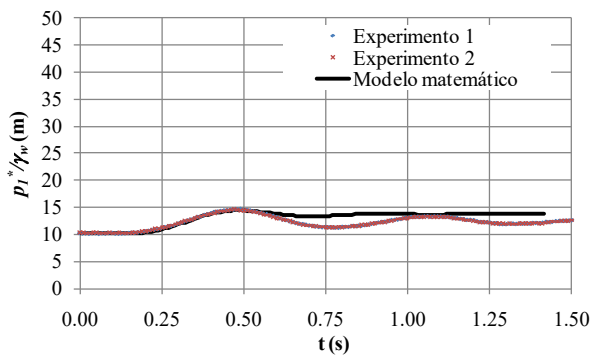
representa el caso de una tubería simple debido a que la columna de agua que se encuentra tras la válvula de aire se mantiene prácticamente estática y, por tanto, no fue considerada en la modelación matemática. Además, en todas las mediciones se localizó la posición inicial de la columna de agua en la tubería inclinada, con el objetivo de simular una tubería simple.

En la Figura 4 se presenta la comparación del modelo matemático propuesto con los datos experimentales para cuatro ensayos. Las comparaciones indican que el modelo propuesto logra simular adecuadamente la primera oscilación del patrón de la presión absoluta de la bolsa de aire debido a que tiene un comportamiento similar a las mediciones realizadas. No obstante, el modelo matemático no logra simular las siguientes oscilaciones debido a que el impacto de la columna de agua con la columna de bloqueo (asumida estática), genera un fenómeno complejo que no puede ser simulado con un modelo unidimensional porque la interfaz aire-agua no es perpendicular a la dirección principal de la tubería.

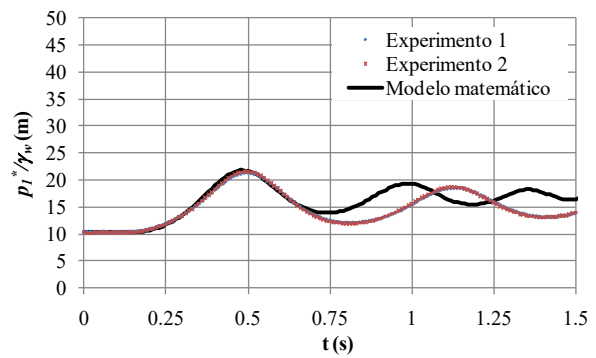
De acuerdo con los resultados, cuanto más pequeña sea la bolsa de aire, mayor será la presión absoluta alcanzada, tal como se deduce de acuerdo

con el modelo politrópico (véase ecuación (3)). No obstante, estas diferencias no son significativas debido a que las presiones que se manejan en el calderín son relativamente pequeñas. Por ejemplo, para las mediciones No. 3 y No. 4, con tamaños de bolsas de aire iniciales de 0.96 y 1.36 m, se alcanzan presiones máximas en las bolsas de aire muy similares, con un valor de 21.4 m. De igual manera, el comportamiento de la evolución de la presión absoluta es muy similar para ambas mediciones. Para el resto de las mediciones se pueden deducir estos mismos comportamientos.

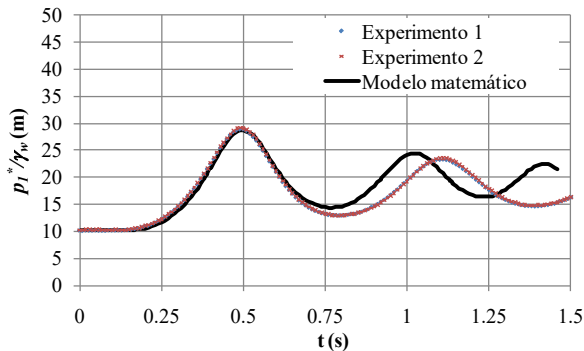
El parámetro que más influye en la variación de la presión de la bolsa de aire es la presión inicial del calderín. Cuanto mayor sea la presión en el calderín, mayor será la presión máxima alcanzada en la bolsa de aire. Así, para una presión manométrica en el calderín de 0.2 bar (mediciones No. 1 y No.2) se alcanza un valor máximo de presión de 15.0 m; y para una presión de 1.25 bar en el calderín, las presiones máximas alcanzadas para las mediciones No. 7 y No. 8 son de 46.9 y 44.9 m, respectivamente. El tiempo (t_{pico}) en donde se presentan los máximos valores de presión representa el instante donde se comprime más rápidamente la bolsa de aire. Para una presión manométrica en el calderín de 0.5



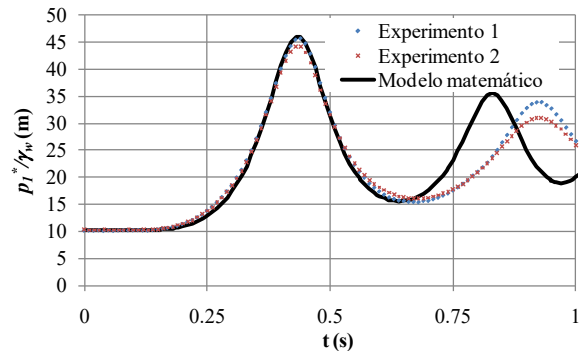
a) Medición No. 1



b) Medición No. 3



c) Medición No. 6



d) Medición No. 8

Figura 4. Comparación entre resultados del modelo y medidas experimentales para las mediciones No.1, No.3, No. 6 y No. 8.

bar, se alcanzan un tpico de 0.50 y 0.52 s para las mediciones No. 3 y No. 4, respectivamente; mientras que para una presión manométrica en el calderín de 0.75 bar se obtienen t_{pico} de 0.46 y 0.49 s para las mediciones No. 5 y No. 6, respectivamente.

Finalmente, se compararon las presiones máximas que se alcanzan cuando se utiliza la válvula de aire S050 (véase Figura 4) con los resultados cuando no se ha instalado la válvula de aire, con el fin de conocer el porcentaje de reducción de la presión absoluta de la bolsa de aire cuando se utiliza este dispositivo. En la Tabla 2 se presentan los resultados, donde se aprecia que la instalación de la válvula de aire S050 logra una disminución de las sobrepresiones máximas en porcentajes entre el 5 y el 9%. La válvula de aire S050 se utiliza típicamente en instalaciones para eliminar las burbujas de aire a altas presiones por tener un orificio de salida muy pequeño de 3.175 mm. Sin embargo, el fabricante comenta que puede ser empleada durante procesos de llenado de agua. Este orificio pequeño es el responsable de disminuir la presión máxima entre porcentajes del 5 al 9%.

Tabla 2. Comparación de presiones máximas alcanzadas utilizando la válvula de aire S050 y sin válvula de aire

Medición No.	Presión máxima sin válvula de aire	Presión máxima con válvula de aire S050	Porcentaje de reducción (%)
1	15.9	15.0	5
2	16.0	15.0	6
3	23.6	21.4	9
4	23.1	21.4	7
5	32.2	29.3	9
6	31.4	29.1	7
7	51.1	46.9	8
8	47.4	44.9	5

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un modelo matemático capaz de predecir el comportamiento hidráulico de la columna de agua y termodinámico de la bolsa de aire durante el proceso de llenado de agua con una válvula de aire en una tubería simple. El modelo matemático fue validado en un banco experimental con una conducción de PVC con una longitud de 7.3 m y un diámetro nominal DN63. Se realizó la medición de la presión de la bolsa de aire, mediante la cual se demostró que el

modelo matemático es capaz de predecir la primera oscilación del comportamiento de la presión, la cual es de vital importancia debido a que es en estos primeros instantes donde se presenta el mayor pico de presión. La válvula de aire instalada para expulsar el aire durante el llenado logra reducir las presiones máximas alcanzadas en comparación con los resultados obtenidos cuando no se instaló este dispositivo de protección. Futuras investigaciones pueden llevarse a cabo empleando modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (modelos CFD), en donde se logra captar cómo son las variaciones de presión absoluta a lo largo de la bolsa de aire.

REFERENCIAS

- [1] O.E. Coronado-Hernández, V.S. Fuertes-Miquel, M. Besharat y H.M. Ramos, "A parametric sensitivity analysis of numerically modelled piston-type filling and emptying of an inclined pipeline with an air valve", 13th International Conference on Pressure Surges, 2018.
- [2] O.E. Coronado-Hernández, V.S. Fuertes-Miquel, M. Besharat y H.M. Ramos, "Experimental and numerical analysis of a water emptying pipeline using different air valves", *Water*, 9(2), 98, doi:10.3390/w9020098, 2017.
- [3] V.S. Fuertes-Miquel, P.A. López-Jiménez, F.J. Martínez-Solano y G. López-Patiño, "Numerical modelling of pipelines with air pockets and air valves", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(12), pp. 1052-1061, doi:10.1139/cjce-2016-0209, 2016.
- [4] E. Wylie y V. Streeter, *Fluid transients in systems*. Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1993.
- [5] J. Izquierdo, V.S. Fuertes, E. Cabrera, P.L. Iglesias y J. García-Serra, "Pipeline start-up with entrapped air", *Journal of Hydraulic Research*, 37(5), pp. 579-590, doi:10.1080/00221689909498518, 1999.
- [6] S.C. Martins, H.M. Ramos y A.B. Almeida, "Conceptual analogy for modelling entrapped air action in hydraulic systems", *Journal of Hydraulic Research*, 53(5), pp. 678-686, doi:10.1080/00221686.2015.1077353, 2015.
- [7] AWWA, American Water Works Association, *Manual of water supply practices M51: air release, air-vacuum, and combination air valves*. Denver, USA, 2001.

[8] L. Ramezani, B. Karney y A. Malekpour, "The Challenge of Air Valves: A Selective Critical Literature Review", *Journal of Water Resources and Planning Management*, 141(10), doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000530, 2015.

[9] L. Zhou, D. Liu y B. Karney, "Phenomenon of White Mist in Pipelines Rapidly Filling with Water with Entrapped Air Pocket", *Journal of Hydraulic Engineering* 139(10), pp. 1041-1051, doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000765, 2013.

[10] A. Malekpour, B.W. Karney y J. Nault, "Physical Understanding of Sudden Pressurization of Pipe Systems with Entrapped Air: Energy Auditing Approach", *Journal of Hydraulic Engineering* 142(2), doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001067, 2016.

[11] V.S. Fuertes-Miquel, O.E. Coronado-Hernández, D. Mora-Meliá, y P.L. Iglesias-Rey, "Hydraulic modeling during filling and emptying processes in pressurized pipelines: a literature review", *Urban Water Journal*, doi:10.1080/1573062X.2019.1669188, 2019.