

Maniobras de llenado y vaciado en grandes conducciones. Aplicación a una tubería de fundición DN400 en Massamagrell (Valencia, España)

Filling and emptying manoeuvres in large pipes. Application to a cast iron pipeline DN400 located in Massamagrell, Valencia, Spain

Romero, G.^a, Coronado-Hernández, O.E.^b, Fuertes-Miquel, V.S.^c, Ponz-Carcelén, R.^d

^aDepartamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València, Valencia, España.

^bFacultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena, Colombia.

^cDepartamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València, Valencia, España.

^dEmpresa Mixta Metropolitana S.A., EMIMET, Valencia, España.

E-mail: ^aguirogarc@gmail.com, ^bocoronado@unitecnologica.edu.co, ^cvfuentes@upv.es, ^drponz@emimet.es

Recibido: 06/08/2019

Aceptado: 08/01/2020

Publicado: 31/01/2020

Citar como: Romero, G., Coronado-Hernández, O.E., Fuertes-Miquel, V.S., Ponz-Carcelén, R. (2020). Filling and emptying manoeuvres in large pipes. Application to a cast iron pipeline DN400 located in Massamagrell, Valencia, Spain. *Ingeniería del agua*, 24(1), 15-29. <https://doi.org/10.4995/la.2020.12184>

RESUMEN

Debido a las bolsas de aire que hay en el interior de las tuberías durante los procesos de llenado y vaciado, se producen depresiones o sobrepresiones en el interior de las mismas, capaces de producir serios daños en las instalaciones. Para analizar todas las variables hidráulicas en las maniobras de llenado y vaciado, se opta por la aplicación de un modelo matemático, el cual es capaz de simular con exactitud el comportamiento de ambos fluidos, tanto la columna de agua como la bolsa de aire. El modelo propuesto por los autores ya ha sido validado en pequeñas instalaciones de laboratorio. En este trabajo, se pretende validar el modelo matemático en una instalación real de grandes dimensiones. Concretamente, se trata de una conducción de diámetro DN400, ubicada en Massamagrell (Valencia), donde se analizan las maniobras de llenado y de vaciado. Finalmente, se comparan los resultados que proporciona el modelo con las mediciones realizadas por la Empresa Mixta Metropolitana S.A. (EMIMET), obteniéndose una similitud muy aceptable.

Palabras clave | Vaciado de tuberías; llenado de tuberías; válvulas de aire; instalaciones reales; transitorios hidráulicos.

ABSTRACT

Air pockets inside hydraulic installations during filling and emptying processes can generate pressure surges and negative pressure, respectively. Serious damages can be occurred in pipelines. In order to analyse hydraulic variables in filling and emptying operations, the selection of a mathematical model is chosen, which is suitable of simulating accurately the behaviour of both fluids (water and air) in pressurized water systems. The mathematical model proposed by the authors has been validated in small laboratory facilities. The aim of this work is to validate the mathematical model in current pipeline installations with large both nominal diameter and length. The pipeline is a nominal diameter DN400, and is located in Massamagrell, Valencia, Spain. The filling and emptying manoeuvres in the selected pipeline are performed by the Empresa Mixta Metropolitana S.A. (EMIMET). A good agreement is obtained when a comparison of absolute pressure and water flow is carried out between the mathematical model and the measurements.

Key words | Emptying of pipes; filling of pipes; air valves; actual facilities; hydraulic transients.

INTRODUCCIÓN

La existencia de bolsas de aire en el interior de las tuberías durante la operación, interrupción y puesta en marcha de conducciones de diámetro importante en las redes de distribución, es un fenómeno que se produce habitualmente. El aire atrapado en el interior de una instalación origina cambios en la presión, produciendo en ocasiones graves daños a la estructura, como certifican numerosos estudios (Jönsson, 1985; Hope y Papworth, 1980). Cuando se produce el llenado de una tubería, el aire que se encuentra atrapado en el interior de la misma, poco a poco se va comprimiendo, originando un aumento de la presión en la bolsa de aire (Apollonio, 2016; Fuertes-Miquel, 2016; Trindade, 2013; Vasconcelos, 2008). Ocurre el fenómeno opuesto cuando se produce el vaciado, debido a que el aire que se encuentra en el interior se va expandiendo, causando una depresión que en ocasiones puede ser muy perjudicial para la instalación (Coronado-Hernández, 2018a,b; Fuertes, 2001).

La forma más habitual para evitar las presiones extremas, es la utilización de ventosas (o válvulas de aire) en el sistema. Las ventosas son los elementos que se encargan de controlar el flujo de aire, desde el interior del conducto hacia el exterior o viceversa. Las ventosas se utilizan para expulsar una cantidad de aire adecuada durante el proceso de llenado, las cuales se dimensionan correctamente cuando el caudal de llenado de la columna de agua es similar al caudal de salida del aire (AWWA, 2001; Balacco, 2015; Ramezani, 2016). Durante los procesos de vaciado, las ventosas permiten la entrada de aire a la tubería. De esta forma se suavizan los cambios bruscos de presión que puedan sufrir las bolsas de aire (Fuertes-Miquel, 2019a; Laanearu, 2012; Tijsseling, 2016). Es importante seleccionar un correcto tamaño de las válvulas de aire, debido a que, si el orificio de la ventosa no es el adecuado para cada instalación, cabe la posibilidad de que no cumpla con su objetivo de permitir el paso del aire y evitar sobrepresiones o depresiones en el interior. El sobredimensionamiento de las ventosas durante un proceso de llenado puede generar sobrepresiones incluso superiores a cuando no se utilizan estos dispositivos (Fuertes-Miquel, 2019b). Sin embargo, en los procesos de vaciado, el sobredimensionamiento de las ventosas siempre reducirá las depresiones ocurridas al interior de las tuberías.

Durante los procesos de llenado y vaciado, en el interior de la tubería se encuentran dos fluidos simultáneamente, uno en estado líquido (agua) y otro en estado gaseoso (aire). Obtener información de todos los fenómenos transitorios que ocurren a lo largo de dichos procesos es un análisis muy complejo. En el presente trabajo se va utilizar un modelo matemático, definido con anterioridad por los autores, el cual es capaz de representar en el tiempo las variables hidráulicas que estén implicadas en cada uno de los procesos estudiados. El modelo matemático permite predecir de manera adecuada el comportamiento de la velocidad del agua, la presión de la bolsa de aire, la densidad del aire, la velocidad de salida o de entrada del aire por la ventosa y la longitud de la columna de agua. Para la modelación de la columna de agua se suelen utilizar modelos elásticos o de columna rígida (Fuertes-Miquel, 2019b). No obstante, las aproximaciones usando modelos CFD (*Computational Fluid Dynamics*) también han sido empleadas para estudiar este comportamiento, necesitando en este caso largos tiempos de cálculo para la resolución numérica de las variables hidráulicas y termodinámicas (Besharat, 2018, 2019).

El modelo está compuesto por un conjunto de ecuaciones diferenciales, que describen el comportamiento de la columna de agua y de la bolsa de aire de cada conducto. El modelo matemático se puede definir, según una serie de premisas: se basa en la ecuación del modelo rígido para simular este tipo de transitorios, despreciando los efectos elásticos del sistema (Liou, 1996; Izquierdo, 1999; Chaudhry, 1989); se ha utilizado como hipótesis el modelo pistón, donde se considera que la interfase gas-líquido coincide con la sección recta de la tubería, esto es, una sección recta de la tubería está ocupada por aire o por agua, pero nunca por ambos fluidos al mismo tiempo; utiliza la ecuación del modelo politrópico para representar el comportamiento del aire (León, 2010; Martins, 2015); requiere la ecuación característica de la válvula de aire, para representar el comportamiento de la misma; se caracteriza por utilizar la ecuación de continuidad aplicada a la bolsa de aire para sus análisis.

En estudios anteriores, el modelo matemático desarrollado por los autores se ha validado mediante ensayos de laboratorio con y sin ventosas y también con varias bolsas de aire en perfiles irregulares (Coronado-Hernández, 2017). Las dimensiones de estas instalaciones son pequeñas, con diámetros nominales inferiores a 63 mm y longitudes menores a 7.3 m (Coronado-Hernández, 2017, 2019; Fuertes-Miquel, 2018a). En este trabajo se pretende validar el modelo para situaciones donde no se había analizado con anterioridad, para instalaciones reales de gran tamaño. En este sentido, para validar el modelo matemático desarrollado por los autores, la Empresa Mixta Metropolitana S.A. (EMIMET) ha realizado mediciones del caudal de agua y de la presión de la bolsa de aire al interior de dos conducciones durante procesos de llenado y vaciado.

Aplicación

Los fenómenos transitorios hidráulicos que se van a estudiar en este trabajo tienen lugar en una instalación real, ubicada entre los términos municipales de Museros y Massamagrell, en la provincia de Valencia (España). Se trata de una red de abastecimiento, con una tubería de fundición con diámetro nominal DN400.

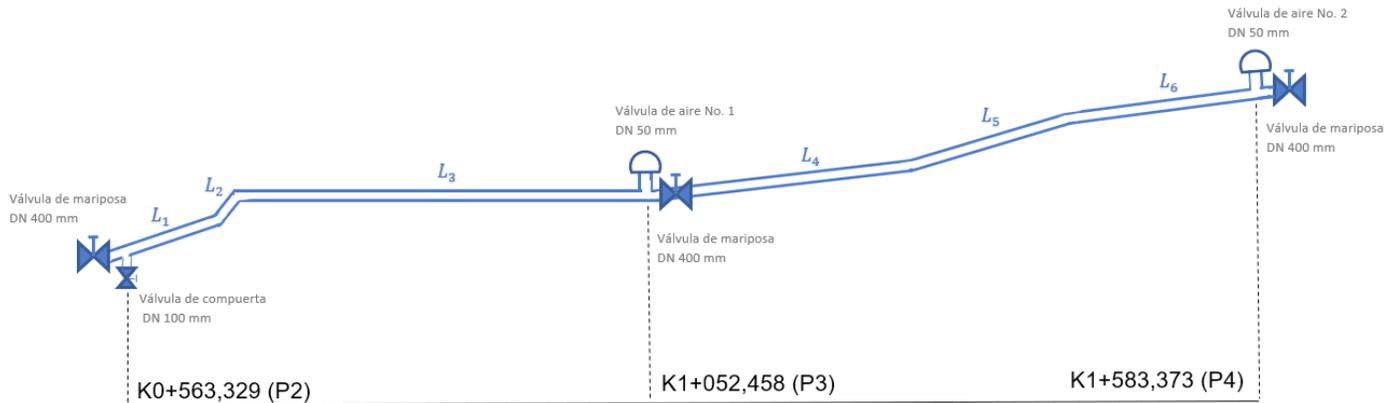


Figura 1 | Esquema de la instalación analizada.

El tramo de la red que se va a seleccionar para realizar las pruebas está comprendido entre la abscisa K0+563,329 (punto P2) y la abscisa K1+583,373 (punto P4). El tramo tiene una longitud total de 1020 metros, el cual está dividido en subtramos con menor longitud y con diferente pendiente en cada uno de ellos. La conducción posee un desnivel de 7.59 metros desde su punto más elevado (P4) hasta el punto inferior (P2). En la Figura 1 se muestra un esquema completo de la instalación descrita.

En los extremos de la conducción están instaladas unas válvulas de mariposa con un diámetro nominal idéntico al de la tubería DN400. Estos elementos son los encargados de aislar este tramo en concreto del resto de la red de abastecimiento. Por este motivo, durante las pruebas que se realizarán, estas válvulas permanecerán cerradas impidiendo el paso del agua. Hay una válvula de mariposa instalada en la abscisa K1+052,458, denominado punto P3, con una función similar a las otras dos válvulas descritas, pero con la diferencia de que esta en concreto debe permanecer abierta para permitir el flujo del agua y la correcta realización de los ensayos.

Para permitir evacuar el agua durante el proceso de vaciado, se requiere una válvula de compuerta de diámetro nominal DN100. Esta válvula posee un coeficiente resistente de $200 \text{ (m}^3/\text{h)/}(\text{bar})^{0.5}$ y se encuentra situada en el punto de menor cota, P2, para facilitar la salida del agua. A su vez, la instalación dispone de dos ventosas de diámetro nominal DN50, situadas en los puntos P3 y P4, justo antes de llegar a las válvulas de mariposa. Las ventosas están ubicadas en puntos estratégicos, pensado para facilitar la salida del aire en procesos de llenado y la entrada del aire durante los vaciados.

La medición del caudal y de la presión se realiza mediante unos registradores de datos (datalogger) ubicados en los puntos P2, P3 y P4 de la instalación. De este modo, se obtiene la evolución de caudal y presión durante las maniobras de llenado y vaciado.

Curvas características de las ventosas

A la hora de realizar análisis de los fenómenos transitorios es necesario conocer el coeficiente de cada uno de los elementos que participan en el proceso. Los coeficientes de las ventosas son facilitados por el fabricante, mediante las curvas de aireación, aun así, para obtener el parámetro ajustado de las válvulas DN50 que están ubicadas en la instalación, se va a utilizar la ecuación para caracterizar las ventosas (Wylie & Streeter, 1993). Esta técnica consiste en comparar la curva que nos proporciona el fabricante con los resultados obtenidos por la ecuación, intentando ajustarla lo máximo posible. Cuando ambas curvas sean idénticas o muy próximas entre ellas, se obtiene el coeficiente de aireación.

Esta técnica se realiza mediante el programa informático Excel, obteniendo una representación visual de las curvas. A continuación, se muestran las dos gráficas utilizadas para el análisis del coeficiente. La Figura 2 representa la curva del proceso de vaciado, de donde se obtiene un coeficiente de admisión (C_{adm}) de 0.75 una vez las curvas están ajustadas. La Figura 3 muestra la curva obtenida en el proceso de llenado, alcanzando un coeficiente de expulsión (C_{exp}) de 0.61.

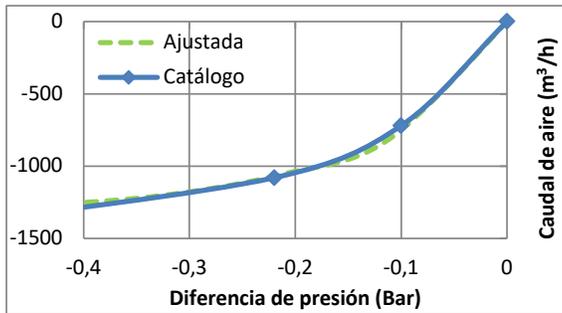


Figura 2 | Curva característica de la ventosa en fase de admisión.

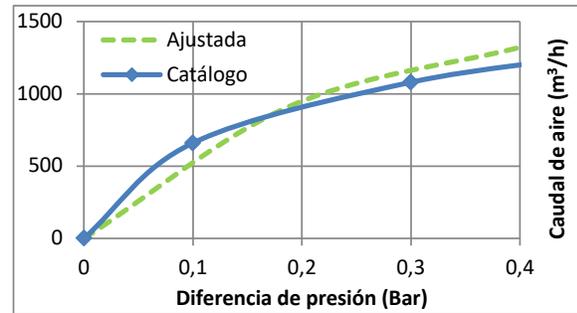


Figura 3 | Curva característica de la ventosa en fase de expulsión.

PROCESO DE VACIADO

Antes de empezar con las simulaciones, la tubería está completamente llena de agua, por lo tanto, el primer proceso que se debe realizar es el de vaciado. Este análisis abarca todo el tramo de la tubería, desde el punto P4 que empieza a vaciarse, hasta llegar a su otro extremo, el punto P2. En la siguiente tabla se aprecian las características geométricas de los diferentes tramos de la conducción. Se observa como al inicio del proceso, cuando la columna de agua fluya por los tramos superiores, la pendiente longitudinal es menor y por lo tanto se tratará de un tramo más horizontal, a diferencia de los dos últimos tramos, que tienen una pendiente más significativa ($>1.8\%$). Por el contrario, estos últimos tramos por donde pasa la columna de agua, son mucho más cortos en comparación con el resto.

Tabla 1 | Características geométricas del tramo P2-P4.

Tramo No.	Abscisas		Cota eje de tubería (m.s.n.m.)		Longitud (m)	Pendiente longitudinal (%)
	De	A	De	A		
1	K0+563,329 (P2)	K0+646,017	104,230	105,800	82.688	1.898
2	K0+646,017	K0+667,767	105,800	107,120	21.750	6.065
3	K0+667,767	K1+052,458 (P3)	107,120	107,440	384.691	0.083
4	K1+052,458 (P3)	K1+301,062	107,440	108,940	248.604	0.603
5	K1+301,062	K1+434,515	108,940	111,050	133.453	1.580
6	K1+434,515	K1+583,373 (P4)	111,050	111,820	148.858	0.517

Modelo matemático

La variación temporal de todas las variables hidráulicas, tanto de la columna de agua como de la bolsa de aire que se encuentra en el interior de la tubería, se obtiene a partir del modelo matemático desarrollado por los autores. Para el proceso de vaciado, las ecuaciones diferenciales que modelan el comportamiento del sistema son las descritas a continuación:

I. Columna de vaciado

- Ecuación del modelo rígido que caracteriza el movimiento de la columna de vaciado

$$\frac{dv}{dt} = \frac{p_1^* - p_{atm}^*}{\rho_w L_e} + g \left(\frac{\Delta z}{L_e} \right) - f \frac{v |v|}{2D} - \frac{R_v g A^2 v |v|}{L_e} \quad (1)$$

- Posición de la columna de vaciado

$$\frac{dL_e}{dt} = -v \quad \text{o} \quad L_e = L_0 - \int_0^t v dt \quad (2)$$

Estas dos ecuaciones describen el comportamiento de la columna de vaciado, donde: v es la velocidad de la columna de vaciado, p_1^* es la presión absoluta de la bolsa de aire, p_{atm}^* es la presión atmosférica, L_0 es la longitud inicial de la columna de vaciado, L_e es la longitud de la columna de vaciado, ρ_w es la densidad del agua, D es el diámetro de la tubería, g es la aceleración de la gravedad, $\Delta z/L_e$ es el término gravitatorio, f es el factor de fricción, R_v es el coeficiente de resistencia de la válvula de descarga y A es la sección transversal de la tubería.

II. Bolsa de aire

- Evolución de la bolsa de aire

$$\frac{dp_1^*}{dt} = \frac{p_1^* k}{(L_T - L_e)} \left(\frac{\rho_{aCN} v_{aCN} A_{adm}}{A \rho_a} - v \right) \quad (3)$$

- Ecuación de continuidad para la bolsa de aire

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \frac{\rho_{aCN} v_{aCN} A_{adm} - v A \rho_a}{(L_T - L_e) A} \quad (4)$$

- Ecuación característica de la válvula de aire durante el proceso de vaciado

$$v_{aCN} = C_{adm} \sqrt{7 p_{atm}^* \rho_{atm} \left[\left(\frac{p_1^*}{p_{atm}^*} \right)^{1.4286} - \left(\frac{p_1^*}{p_{atm}^*} \right)^{1.714} \right]} \quad (5)$$

o $Q_a = v_{aCN} A_{adm}$

Estas tres ecuaciones describen el comportamiento de la bolsa de aire, donde cada parámetro es: k el coeficiente politrópico, ρ_{aCN} la densidad del aire en condiciones normales, L_T la longitud total de la instalación, A_{adm} el área de sección transversal de la válvula de aire, ρ_a la densidad de la bolsa de aire, C_{adm} el coeficiente de admisión de la válvula de aire, Q_a el caudal de aire admitido por la válvula de aire y v_{aCN} la velocidad en condiciones normales de admisión de aire de la ventosa.

La pendiente del recorrido influye de forma notoria en la velocidad de la columna de agua. El término gravitatorio, $\Delta z/L_e$, que se encuentra en la ecuación (1), relaciona la posición de cada tramo con su respectiva pendiente. Según en qué posición se encuentre la columna de agua, el término se modificará a lo largo de todo el recorrido. La evolución del término gravitatorio se puede representar por las ecuaciones siguientes:

Si $L_T \geq L_e > L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5$ entonces:

$$\frac{\Delta z}{L_e} = \frac{L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3 + L_4 \sin \theta_4 + L_5 \sin \theta_5}{L_e} + \left(1 - \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5}{L_e} \right) \sin \theta_6 \quad (6)$$

Si $L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 \geq L_e > L_1 + L_2 + L_3 + L_4$ entonces:

$$\frac{\Delta z}{L_e} = \frac{L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3 + L_4 \sin \theta_4}{L_e} + \left(1 - \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}{L_e} \right) \sin \theta_5 \quad (7)$$

Si $L_1 + L_2 + L_3 + L_4 \geq L_e > L_1 + L_2 + L_3$ entonces:

$$\frac{\Delta z}{L_e} = \frac{L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3}{L_e} + \left(1 - \frac{L_1 + L_2 + L_3}{L_e} \right) \sin \theta_4 \quad (8)$$

Si $L_1+L_2+L_3 \geq L_e > L_1+L_2$ entonces:

$$\frac{\Delta z}{L_e} = \frac{L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2}{L_e} + \left(1 - \frac{L_1+L_2}{L_e}\right) \sin \theta_3 \quad (9)$$

Si $L_1+L_2 \geq L_e > L_1$ entonces:

$$\frac{\Delta z}{L_e} = \frac{L_1 \sin \theta_1}{L_e} + \left(1 - \frac{L_1}{L_e}\right) \sin \theta_2 \quad (10)$$

Finalmente, si $L_1 \geq L_e > 0$ se cumple:

$$\frac{\Delta z}{L_e} = \sin \theta_1 \quad (11)$$

Donde: L_i es la longitud del tramo i de la instalación, θ_i es la pendiente longitudinal del tramo i .

Condiciones iniciales y de contorno

Al inicio del proceso, las principales variables poseen unos valores significativos: $v(0)=0$; $L_e(0)=1019$ m; $p_1^*(0)=313195$ Pa; $\rho_a(0)=3.724$ (kg/m³); $v_{aCN}(0)=0$; $Q_a(0)=0$.

PROCESO DE LLENADO

Al iniciar el segundo análisis, la conducción se encuentra completamente vacía, debido al proceso que se ha realizado anteriormente. De este modo, no existen columnas de bloqueo en el interior de la tubería que afecten a las variables hidráulicas durante el llenado. Este fenómeno se produce gracias a la pendiente que posee la instalación, ya que, durante el vaciado, en todos los tramos la pendiente es negativa y permite que la columna de agua se vaya vaciando sin producirse un estancamiento.

A diferencia del caso anterior, el proceso de llenado no se va a realizar desde el primer punto del tramo (P2) hasta el último (P4), si no que el análisis se va a separar en dos etapas. Una primera simulación para el llenado de la tubería desde el punto P2 hasta el punto P3, lo que implica un tramo de 489 metros. Para este análisis, se cierra la válvula de mariposa instalada en el punto P3, aislando de este modo el tramo comprendido entre ambos puntos e impidiendo que el agua fluya más allá de su localización.

Por otro lado, la segunda simulación que se va a realizar abarca el tramo restante de la instalación, desde el punto P3 hasta el final de la conducción, el punto P4. Este trozo posee una longitud total de 531 metros. Esta segunda etapa del llenado se caracteriza por poseer tramos con menor pendiente longitudinal.

Modelo matemático

Del mismo modo que en el caso del vaciado, el modelo matemático permite llevar a cabo las simulaciones oportunas de este proceso y representar en todo momento las características de la columna de llenado y de la bolsa de aire. Para el análisis de las maniobras de llenado, las ecuaciones diferenciales que modelan el comportamiento del sistema son las siguientes:

I. Columna de llenado

- Ecuación del modelo rígido que caracteriza el movimiento de la columna de llenado impulsada por la fuente de energía (p_0^* es la presión aguas arriba de la conducción y p_1^* es la presión de la bolsa de aire)

$$\frac{dv}{dt} = \frac{p_0^* - p_1^*}{\rho_w L_e} - g \left(\frac{\Delta z}{L_e} \right) - f \frac{v |v|}{2D} - \frac{R_v g A^2 v |v|}{L_e} \quad (12)$$

- Posición de la columna de llenado

$$\frac{dL_e}{dt} = +v \quad \text{o} \quad L_e = L_0 + \int_0^t v \, dt \quad (13)$$

Donde: v es la velocidad de la columna de llenado, p_0^* es la presión absoluta aguas arriba de la conducción, p_1^* es la presión absoluta de la bolsa de aire, L_0 es la longitud inicial de la columna de llenado, L_e es la longitud de la columna de llenado, ρ_w es la densidad del agua, D es el diámetro de la tubería, g es la aceleración de la gravedad, $\Delta z/L_e$ es el término gravitatorio, f es el factor de fricción, R_v es el coeficiente de resistencia de la válvula y A es la sección transversal de la tubería.

II. Bolsa de aire

- Evolución de la bolsa de aire

$$\frac{dp_1^*}{dt} = \frac{p_1^* k}{(L_T - L_e)} \left(v - \frac{v_{aCN} A_{exp}}{A} \right) \quad (14)$$

- Ecuación de continuidad para la bolsa de aire

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \frac{-\rho_a v_{aCN} A_{exp} + v A \rho_a}{(L_T - L_e) A} \quad (15)$$

- Ecuación característica de la válvula de aire durante el proceso de llenado

$$v_{aCN} = C_{exp} p_1^* \sqrt{\frac{7}{RT} \left[\left(\frac{p_{atm}^*}{p_1^*} \right)^{1.4286} - \left(\frac{p_{atm}^*}{p_1^*} \right)^{1.714} \right]} \quad (16)$$

o $Q_e = v_{aCN} A_{exp}$

Siendo: k el coeficiente politrópico, L_T la longitud total de la instalación, A_{exp} el área de sección transversal de la válvula de aire, ρ_a la densidad de la bolsa de aire, C_{exp} el coeficiente de expulsión de la válvula de aire, Q_e el caudal de aire expulsado por la válvula de aire y v_{aCN} la velocidad en condiciones normales de expulsión de aire de la ventosa.

La evolución del término gravitatorio para el llenado de la instalación, $\Delta z/L_e$, representado en la ecuación (12), se puede definir de la siguiente forma:

Si $L_1 > L_e \geq 0$ se cumple:

$$\frac{\Delta z}{L_e} = \sin \theta_1 \quad (17)$$

Si $L_1 + L_2 > L_e \geq L_1$ entonces:

$$\frac{\Delta z}{L_e} = \frac{L_1 \sin \theta_1}{L_e} + \left(1 - \frac{L_1}{L_e} \right) \sin \theta_2 \quad (18)$$

Si $L_T > L_e \geq L_1 + L_2$ entonces:

$$\frac{\Delta z}{L_e} = \frac{L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2}{L_e} + \left(1 - \frac{L_1 + L_2}{L_e} \right) \sin \theta_3 \quad (19)$$

En este caso no es necesario representar un mayor número de ecuaciones para definir el término gravitatorio, debido a que el proceso de llenado se ha separado en dos partes, teniendo cada una de ellas tres tramos. Únicamente será necesario implementar las ecuaciones (17), (18) y (19) si se desea obtener el término durante todo el recorrido.

Condiciones iniciales y de contorno

Al realizarse dos procesos distintos, las condiciones iniciales serán diferentes en cada uno de ellos. Para el llenado del primer tramo (P2-P3), las variables tienen un valor: $v(0)=0$; $L_e(0)=1$ m; $p_1^*(0)=101325$ Pa; $\rho_a(0)=1.205$ (kg/m³); $v_{aCN}(0)=0$; $Q_a(0)=0$. Teniendo en cuenta la presión aguas arriba de la conducción, que para el primer llenado es: $p_0^*=389704$ Pa.

Para el segundo proceso de llenado (P3-P4), las condiciones iniciales son: $v(0)=0$; $L_e(0)=1$ m; $p_1^*(0)=101325$ Pa; $\rho_a(0)=1.205$ (kg/m³); $v_{aCN}(0)=0$; $Q_a(0)=0$. Con un valor de $p_0^*=358315$ Pa.

RESULTADOS

En el presente apartado se analizan los resultados obtenidos por el modelo matemático en cada uno de los estudios realizados. La resolución de las ecuaciones diferenciales se ha llevado a cabo mediante el programa informático Matlab, el cual es capaz de calcular la variación temporal de todas las variables hidráulicas del sistema. En primer lugar, se muestran las diferentes gráficas del proceso de vaciado, para su posterior análisis y discusión. A continuación, se exponen los resultados obtenidos para ambos procesos de llenado.

Para una correcta validación del modelo y para garantizar su futura utilización, los resultados proporcionados por el modelo se comparan con las mediciones experimentales efectuadas por la Empresa Mixta Metropolitana S.A. (EMIMET) en cada uno de los tramos.

Vaciado

Este primer proceso se ejecuta desde el punto P4 hasta el punto P2, lo que supone una longitud total de 1020 metros. La gran distancia que tiene que recorrer el agua, se ve reflejada en el tiempo de duración de la prueba, 4260 segundos. En la Figura 4 se muestra la evolución del caudal de agua que sale por la válvula de compuerta DN100. El desagüe está ubicado en el punto más bajo de la instalación (P2), lo que permite evacuar toda el agua del interior de la conducción.

En la Figura 4 se observa como la simulación hecha por el modelo matemático va en concordancia con la medición experimental durante todo el proceso de vaciado. La variación de la pendiente longitudinal en los diferentes tramos de la conducción también se ve reflejada en los cambios de pendiente del caudal que sale por la válvula de desagüe. Cuanto más horizontal sea el tramo, menor variación de caudal sufrirá durante el proceso y viceversa.

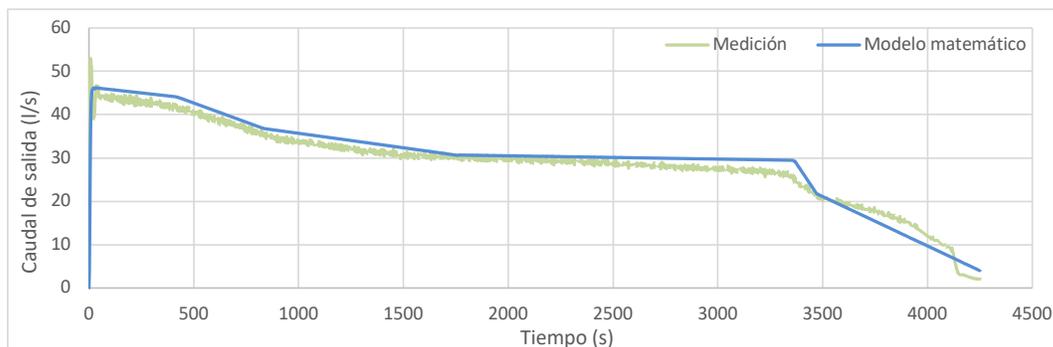


Figura 4 | Evolución temporal del caudal de salida. Comparación del modelo matemático y de la medición experimental.

La evolución temporal de la presión durante el proceso de vaciado se ve reflejada en la Figura 5, donde se observa una disminución considerable de la misma dentro de la tubería en los 5 primeros segundos. A partir de estos primeros instantes, la presión se mantiene prácticamente constante rondando el valor de la presión atmosférica.

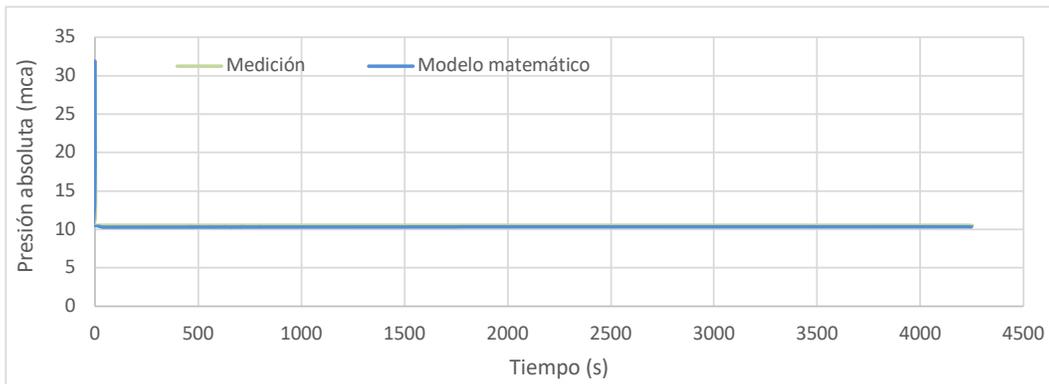


Figura 5 | Evolución temporal de la presión en el interior de la tubería. Comparación del modelo matemático y de la medición experimental.

Las únicas variables de las que se dispone información experimental son las dos mencionadas en las Figuras 4 y 5, el caudal de salida y la presión. Por este motivo, únicamente puede realizarse la comparación entre ensayos y modelo con ambos parámetros, siendo suficiente para verificar que los resultados del modelo coinciden razonablemente con las mediciones experimentales. En cualquier caso, el modelo matemático permite representar la evolución temporal de cualquier variable, lo cual facilita un análisis completo del proceso que se está realizando.

Las Figuras que se muestran a continuación representan la evolución de la posición de la columna de agua, junto con la velocidad de la columna de agua (Figura 6) y el caudal de entrada de aire en las ventosas 1 y 2 (Figura 7), durante toda la maniobra de vaciado de la conducción.

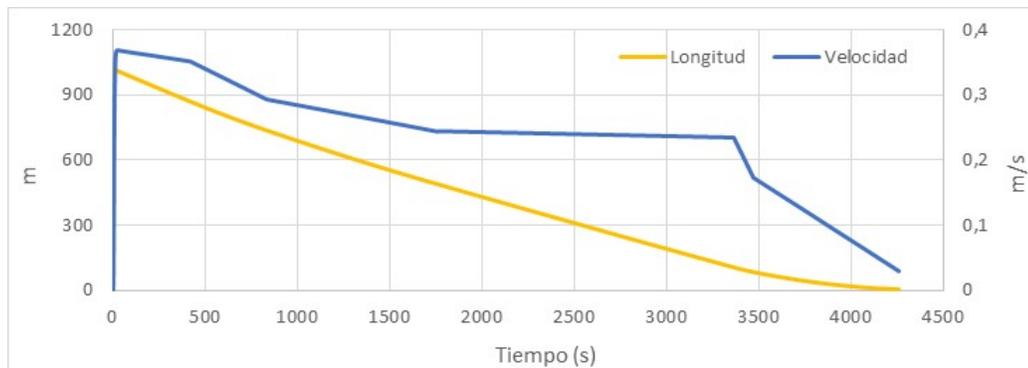


Figura 6 | Evolución temporal de la posición y de la velocidad de la columna de agua.

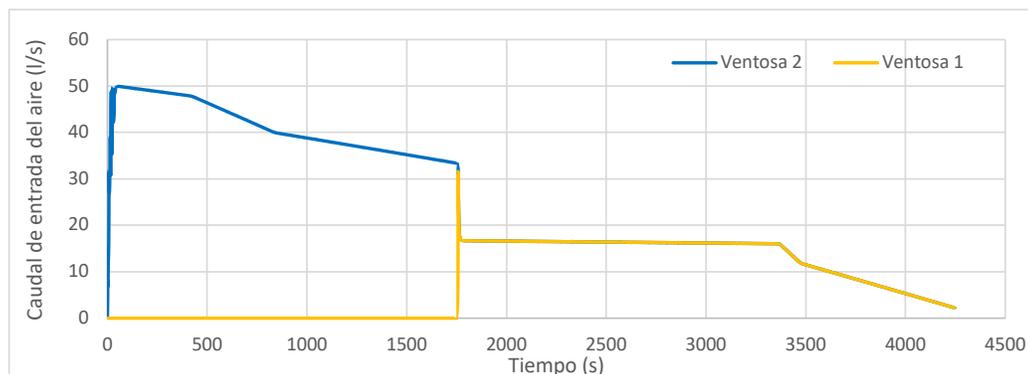


Figura 7 | Evolución del caudal de aire admitido por las ventosas.

La Figura 7 muestra como la ventosa No. 1 no empieza a actuar hasta que la columna de agua alcanza el punto P3, donde se encuentra dicha válvula de aire. Este hecho afecta también a la ventosa No. 2, debido a que el flujo de aire admitido se reduce considerablemente una vez comienza a actuar la ventosa No. 1.

Llenado P2-P3

El primer proceso de llenado que se va a analizar está comprendido entre los puntos P2 y P3, con una distancia de 489 metros y un tiempo de maniobra de 1560 segundos. Se aprecia como el tiempo de ejecución se ha disminuido considerablemente en comparación con el proceso de vaciado. Para este estudio, el tramo únicamente dispone de una ventosa ubicada en el punto P3, que estará actuando desde el comienzo del llenado y se cerrará cuando la columna de agua alcance su posición.

La siguiente Figura muestra la evolución del caudal de llenado, gracias a la apertura parcial de la primera válvula de mariposa DN400, ubicada en el punto P2, permitiendo de esta forma la entrada de agua al conducto. Durante los primeros instantes de la maniobra de llenado se aprecia como el caudal sufre mayores alteraciones. Transcurridos unos pocos segundos, el caudal de llenado se estabiliza en unos 40 l/s durante el resto del proceso.

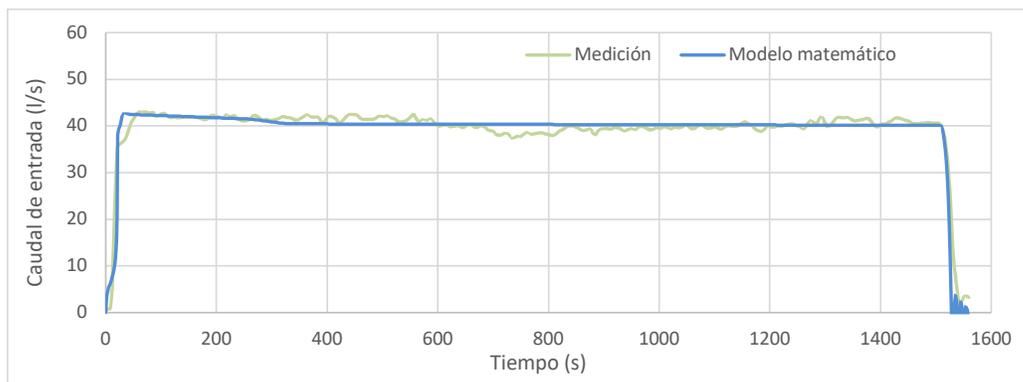


Figura 8 | Evolución temporal del caudal de llenado para el proceso de llenado entre los puntos P2-P3. Comparación entre el modelo matemático y la medición experimental.

La presión en el interior de la tubería se muestra en la Figura 9, donde se aprecia que prácticamente se mantiene constante hasta que la columna de agua alcanza la ventosa No. 1, ubicada en el punto P3, produciendo un aumento de presión de 10 a 38 mca. La simulación realizada por el modelo matemático se corresponde razonablemente bien con la medición realizada por la empresa de aguas, lo cual permite de nuevo la validación del modelo matemático propuesto.

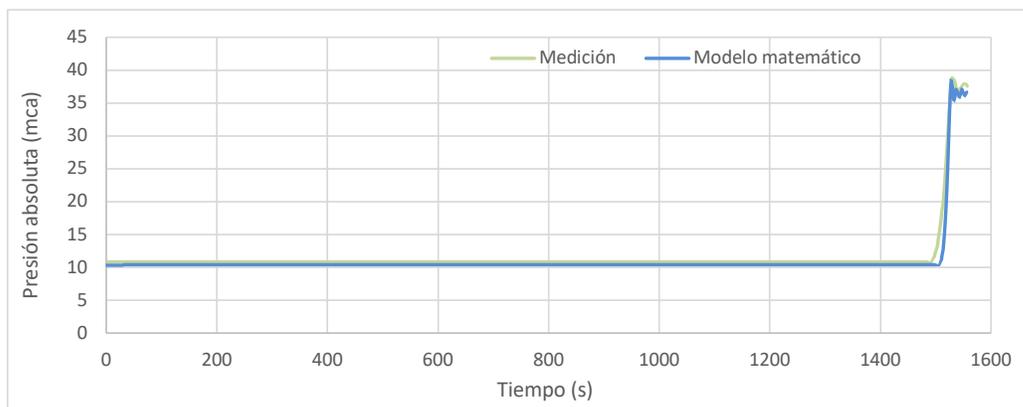


Figura 9 | Evolución temporal de la presión en el interior de la tubería para el proceso de llenado entre los puntos P2-P3. Comparación entre el modelo matemático y la medición experimental.

A continuación, en las Figuras 10 y 11 se muestra la evolución temporal de otras variables interesantes que proporciona el modelo y de las cuales no se tienen medidas experimentales: posición de la columna de agua, velocidad de la columna de agua y caudal de aire expulsado por la ventosa No. 1.

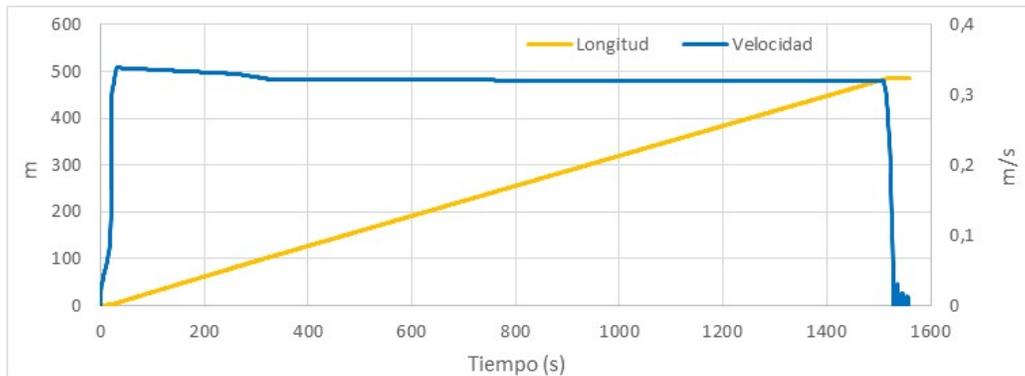


Figura 10 | Evolución de la posición y de la velocidad de la columna de agua.

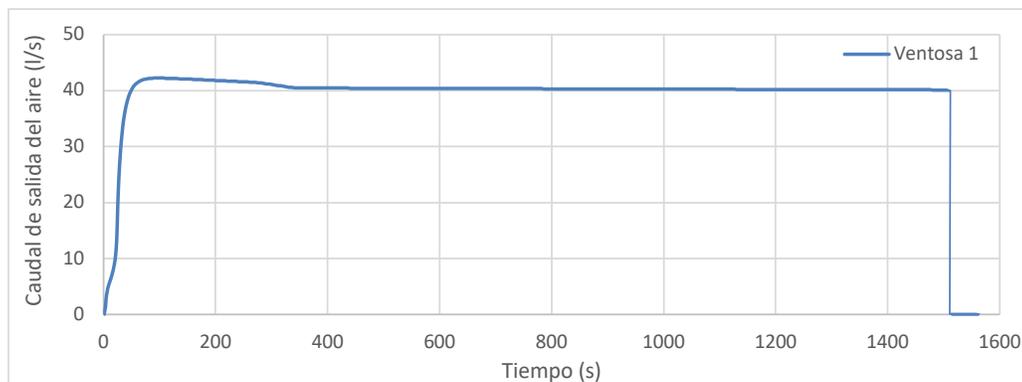


Figura 11 | Evolución temporal del caudal de aire expulsado por la ventosa No. 1.

Llenado P3-P4

El último proceso que se va a analizar es el llenado del segundo tramo de la instalación, entre los puntos P3 y P4. Del mismo modo que en el caso anterior, se dispone de una única ventosa ubicada en el extremo P4 que está en funcionamiento durante todo el proceso de llenado. La longitud total ahora es de 531 metros, con un tiempo de maniobra de 779 segundos. La entrada del agua se consigue gracias a la apertura parcial de la segunda válvula de mariposa DN400, situada en el punto P3. La Figura 12 muestra el caudal de llenado desde el instante inicial hasta el cierre de la ventosa No. 2.

Salvo ciertas irregularidades que se aprecia en los datos experimentales, el caudal de llenado proporcionado por el modelo matemático se ajusta razonablemente bien al caudal de llenado medido experimentalmente. El proceso de llenado se inicia con un caudal de unos 95 l/s y finaliza con unos 83 l/s, con una pendiente prácticamente constante, debido a la pendiente longitudinal de los tramos comprendidos en este segundo llenado.

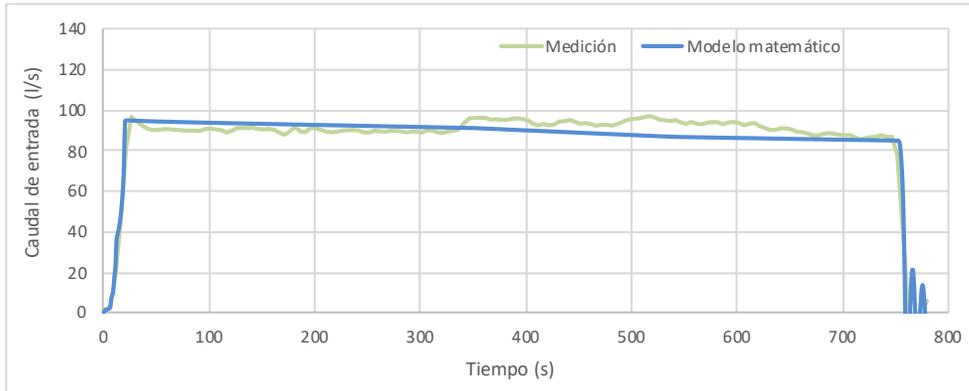


Figura 12 | Evolución temporal del caudal de llenado para el proceso de llenado entre los puntos P3-P4. Comparación entre el modelo matemático y la medición experimental.

De la misma forma que en el proceso de llenado P2-P3, la evolución de la presión a lo largo del tiempo se mantiene prácticamente constante hasta que la columna de agua alcanza la ventosa No. 2. Cuando ocurre este hecho, la ventosa se cierra bruscamente, lo que produce un aumento de la presión y una posterior oscilación de esta, hasta su estabilización, tal y como se observa en la Figura 13.

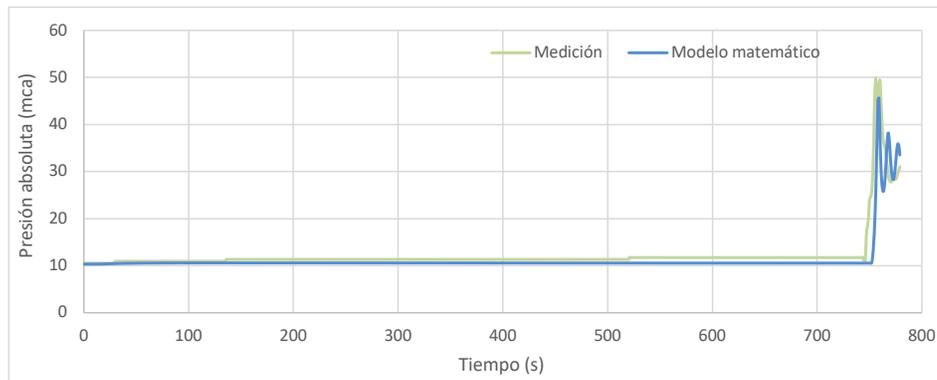


Figura 13 | Evolución temporal de la presión en el interior de la tubería para el proceso de llenado entre los puntos P3-P4. Comparación entre el modelo matemático y la medición experimental.

Para finalizar la presentación de resultados que proporciona el modelo matemático, se presenta también la evolución temporal de la posición, junto con la velocidad de la columna de agua (Figura 14) y el caudal de aire expulsado por la ventosa No. 2 (Figura 15).

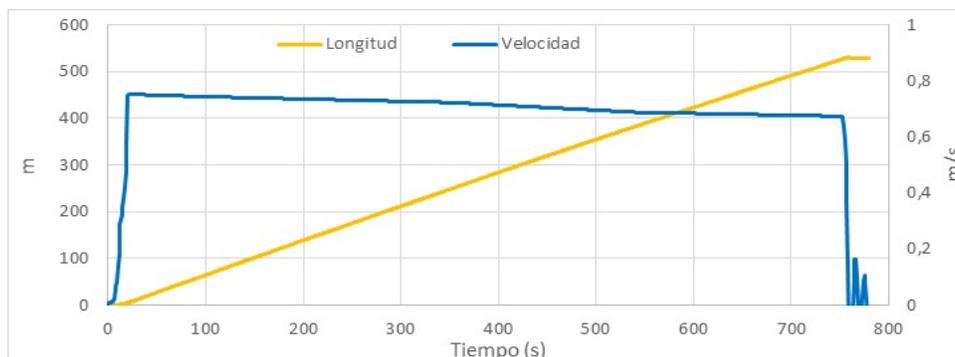


Figura 14 | Evolución de la posición de la columna de agua.

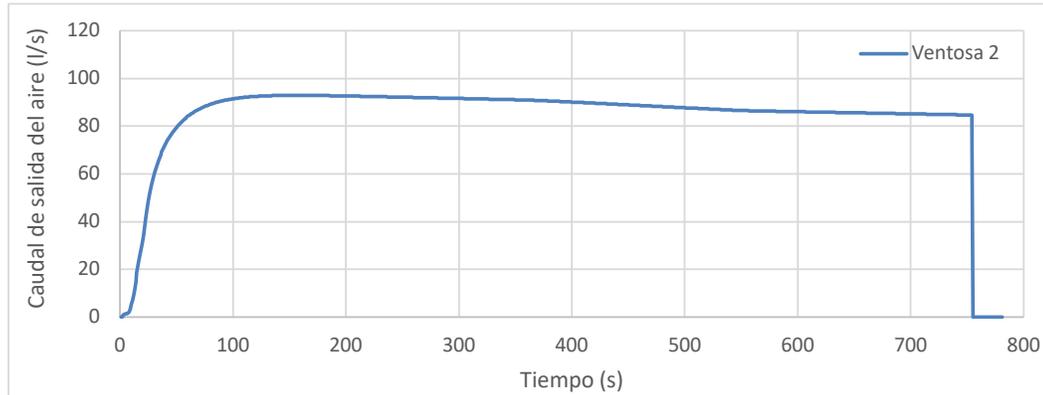


Figura 15 | Evolución temporal del caudal de aire expulsado por la ventosa No. 2.

CONCLUSIONES

La principal aportación de este trabajo se centra en las características de la instalación objeto de estudio, debido a que es bastante inusual realizar estudios de este tipo en conducciones de grandes dimensiones. En este caso, se trabaja sobre una tubería de diámetro nominal DN400 y con una longitud superior a 1 Km, teniendo en cuenta que las dimensiones de los elementos como las válvulas de mariposa, las válvulas de aire o la válvula de compuerta, que se encuentran a lo largo de su recorrido, son las apropiadas para tal caso. Este análisis abre las puertas a futuros ensayos en redes de abastecimiento a pueblos o ciudades, las cuales requieran una medición precisa de las variables hidráulicas (presión y densidad de las bolsas de aire, velocidad y longitud de las columnas de agua) o una comprobación de la funcionalidad de sus elementos (el caudal de aire expulsado o admitido por las ventosas y el caudal de agua saliente por la válvula de descarga).

El objetivo principal de este trabajo es la validación del modelo matemático desarrollado por los autores para estudiar los procesos de llenado y vaciado de conducciones a presión. A la vista de los resultados obtenidos a lo largo del estudio, se llega a la conclusión de que el modelo es totalmente válido para simular procesos en instalaciones reales de gran tamaño, tanto de llenado como de vaciado. Se aprecia una semejanza considerable entre los valores experimentales obtenidos por la Empresa Mixta Metropolitana S.A y los valores que proporciona el modelo matemático. La razonable similitud entre resultados del modelo y medidas experimentales queda reflejada en las diferentes gráficas comparativas que se han presentado en este trabajo, exceptuando pequeñas discrepancias, que pueden ser originadas por errores en los aparatos de medición o simplemente por fallos cometidos durante los ensayos de campo.

Las características geométricas de la instalación, las condiciones de contorno y las condiciones iniciales en las que se encuentra el sistema, son parámetros que influyen directamente en las variables hidráulicas y que pueden alterar de forma considerable los resultados. Un ejemplo de esta afirmación, se ve claramente reflejado en la Figura 4, donde la variación de la pendiente longitudinal de los diferentes tramos afecta de forma directa al caudal de salida por la válvula de vaciado.

Los coeficientes de expulsión y admisión de las válvulas de aire son parámetros que nos facilita el fabricante según el tamaño de las ventosas, pero hay que tener en cuenta a la hora de realizar las simulaciones que las curvas de aireación que nos proporcionan los fabricantes pueden no coincidir con la realidad. Por ese motivo, en este trabajo se ha realizado un análisis de ambos coeficientes (expulsión y admisión), tal y como muestran las Figuras 2 y 3, con la finalidad de obtener unos coeficientes que se ajusten a la realidad.

AGRADECIMIENTOS

Para la realización del presente proyecto, los autores agradecen a la Empresa Mixta Metropolitana S.A. (EMIMET) su colaboración proporcionando en todo momento la ayuda necesaria, junto con toda la información y los datos de sus mediciones para llevar a cabo la validación del modelo propuesto.

REFERENCIAS

- AWWA American Water Works Association 2001. *Manual of Water Supply Practices M51: Air-Release, Air-Vacuum, and Combination Air Valves*, American Water Works Association, Denver, CO, USA.
- Apollonio, C., Balacco, G., Fontana, N., Giugni, M., Marini, G., Piccinni, A.F. 2016. Hydraulic transients caused by air expulsion during rapid filling of undulating pipelines. *Water*, 8(1), 25, <https://doi.org/10.3390/w8010025>
- Balacco, G., Apollonio, C., Piccinni, A.F. 2015. Experimental analysis of air valve behaviour during hydraulic transients. *Journal of Applied Water Engineering Research*, 3(1), 3-11, <https://doi.org/10.1080/23249676.2015.1032374>
- Besharat, M., Coronado-Hernández, O.E., Fuertes-Miquel, V.S., Viseu, M.T., Ramos, H.M. 2018. Backflow air and pressure analysis in emptying pipeline containing entrapped air pocket. *Urban Water Journal*, 15(8), 769-779, <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1540711>
- Besharat, M., Coronado-Hernández, O.E., Fuertes-Miquel, V.S., Viseu, M.T., Ramos, H.M. 2019. Computational fluid dynamics for sub-atmospheric pressure analysis in pipe drainage. *Journal of Hydraulic Research*. <https://doi.org/10.1080/00221686.2019.1625819>
- Chaudhry, M.H. 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, Brasil.
- Coronado-Hernández, O.E., Fuertes-Miquel, V.S., Besharat, M., Ramos, H.M. 2017. Experimental and numerical analysis of a water emptying pipeline using different air valves, *Water*, 9(2), 98, <https://doi.org/10.3390/w9020098>
- Coronado-Hernández, O.E., Fuertes-Miquel, V.S., Besharat, M., Ramos, H.M. 2018a. Subatmospheric pressure in a water draining pipeline with an air pocket. *Urban Water Journal*, 15(4), pp. 346-352, <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1475578>
- Coronado-Hernández, O.E., Fuertes-Miquel, V.S., Iglesias-Rey, P.L., Martínez-Solano, F.J. 2018b. Rigid water column model for simulating the emptying process in a pipeline using pressurized air. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(4), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001446](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001446)
- Coronado-Hernández, O.E., Besharat, M., Fuertes-Miquel, V.S., Ramos, H.M. 2019. Effect of a commercial air valve on rapid filling of a single pipeline: numerical and experimental analysis. *Water*, 11(9), 1814, <https://doi.org/10.3390/w11091814>
- Fuertes-Miquel, V.S. 2001, Hydraulic transients with entrapped air pockets, PhD Thesis, Department of Hydraulic Engineering, Polytechnic University of Valencia, Editorial Universitat Politècnica de València.
- Fuertes-Miquel, V.S., López-Jiménez, P.A., Martínez-Solano, F.J., López-Patiño, G. 2016. Numerical modelling of pipelines with air pockets and air valves. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(12), 1052-1061, <https://doi.org/10.1139/cjce-2016-0209>
- Fuertes-Miquel, V.S., Coronado-Hernández, O.E., Iglesias-Rey, P.L., Mora-Meliá, D. 2019a. Transient phenomena during the emptying process of a single pipe with water-air interaction. *Journal of Hydraulic Research*, 57(3), 318-326, <https://doi.org/10.1080/00221686.2018.1492465>
- Fuertes-Miquel, V.S., Coronado-Hernández, O.E., Mora-Meliá, D., Iglesias-Rey, P.L. 2019b. Hydraulic modeling during filling and emptying processes in pressurized pipelines: a literature review. *Urban Water Journal*, 16(4), pp. 299-311, <https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1669188>

- Hope, P., Papworth, M.U. 1980. Fire main failures due to rapid priming of dry lines. *Proceedings of the 3rd International Conference on Pressure Surges*, BHRA, Canterbury, Inglaterra, pp. 381-390.
- Izquierdo, J., Fuertes, V.S., Cabrera, E., Iglesias, P.L., García-Serra, J. 1999. Pipeline startup with entrapped air. *Journal of Hydraulic Research*, 37(5), 579-590. <https://doi.org/10.1080/00221689909498518>
- Jönsson, L. 1985. Maximum transient pressures in a conduit with check valve and air entrainment. *Proceedings of the International Conference on Hydraulics of Pumping Stations*, Manchester, Inglaterra, pp. 55-76.
- Laanearu, J., Annus, I., Koppel, T., Bergant, A., Vučkovič, S., Hou, Q., Tijsseling, A.S., Anderson, A., van't Westende, J.M.C. 2012. Emptying of large-scale pipeline by pressurized air. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(12), 1090-1100. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000631](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000631)
- León, A., Ghidaoui, M., Schmidt, A., García, M. 2010. A robust two-equation model for transient-mixed flows. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), 44-56. <https://doi.org/10.1080/00221680903565911>
- Liou, C., Hunt, W.A. 1996. Filling of pipelines with undulating elevation profiles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(10), 534-539. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339429\(1996\)122:10\(534\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339429(1996)122:10(534))
- Malekpour, A., Karney, B.W., Nault, J. 2015. Physical understanding of sudden pressurization of pipe systems with entrapped air: energy auditing approach. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001067](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001067)
- Martins, S.C., Ramos, H.M., Almeida, A.B. 2015. Conceptual analogy for modelling entrapped air action in hydraulic systems. *Journal of Hydraulic Research*, 53(5), 678-686. <https://doi.org/10.1080/00221686.2015.1077353>
- Ramezani, L., Karney, B., Malekpour, A. 2016. The challenge of air valves: a selective critical literature review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000530](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000530)
- Tijsseling, A.S., Hou, Q., Bozkus, Z., Laanearu, J. 2016. Improved one-dimensional models for rapid emptying and filling of pipelines. *Journal of Pressure Vessel Technology*. 138(3), 031301. <https://doi.org/10.1115/1.4031508>
- Trindade, B.C., Vasconcelos, J.G. 2013. Modeling of water pipeline filling events accounting for air phase interactions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000757](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000757)
- Vasconcelos, J.G., Wright, S.J. 2008. Rapid flow startup in filled horizontal pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(7), 984-992. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:7\(984\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:7(984))
- Wylie, E., Streeter, V. 1993. *Fluid transients in systems*. Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.