

Parámetros significativos durante los procesos de vaciado en conducciones de agua

Sensitivity parameters during the emptying maneuvers in water pipelines

Coronado-Hernández, O.E.^a, Fuertes-Miquel, V.S.^b, Iglesias-Rey, P.L.^c, Mora-Meliá, D.^d

^aDoctorando en Ingeniería del Agua y Medioambiental, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España; Profesor Asistente, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena 131001, Colombia. Email: ocoronado@utb.edu.co

^bProfesor Titular, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España. Email: vfuertes@upv.es

^cProfesor Titular, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España. Email: piglesia@upv.es

^dProfesor Asistente, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Universidad de Talca, Curicó, Chile. Email: damora@utalca.cl

Recibido: 23/01/2018

Aceptado: 12/04/2018

Publicado: 31/07/2018

Citar como: Coronado-Hernández, O.E., Fuertes-Miquel, V.S., Iglesias-Rey, P.L., Mora-Meliá, D. 2018. Sensitivity parameters during the emptying maneuvers in water pipelines. *Ingeniería del agua*, 22(3), 141-152. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.9292>

RESUMEN

El proceso de vaciado en conducciones de agua genera depresiones por la expansión del aire en el interior de las tuberías y esto podría causar el colapso del sistema dependiendo de las condiciones de instalación y de la rigidez de la conducción. En este artículo se presenta el análisis de sensibilidad del modelo matemático desarrollado por los autores, analizando los principales parámetros hidráulicos y termodinámicos que intervienen en este proceso tales como: diámetro interior de la tubería, factor de fricción, pendiente longitudinal de la tubería, coeficiente politrópico, diámetro de la ventosa, tamaño de la bolsa de aire y tiempo de apertura. Este análisis se realizó para dos casos posibles: Caso No. 1, tubería con el extremo aguas arriba cerrado; y Caso No. 2, tubería con una ventosa instalada en el extremo aguas arriba. Los resultados muestran que para el Caso No. 1 los parámetros que más inciden en las depresiones son la pendiente longitudinal de la tubería, el coeficiente politrópico y el tamaño de la bolsa de aire; mientras que para el Caso No. 2, la mayoría de los parámetros influyen significativamente durante el proceso de vaciado.

Palabras clave | válvulas de aire; interfaz aire-agua; vaciado; análisis de sensibilidad; fenómenos transitorios; redes de abastecimiento de agua.

ABSTRACT

Emptying pipelines can be critical in many water pipelines because subatmospheric pressure troughs are reached due to the expansion of entrapped air, which could cause considerable damage to the system depending on both installation conditions and stiffness pipe. This paper shows the sensitivity analysis for the mathematical model proposed by the authors, where the main hydraulic and thermodynamic parameters are analyzed (internal pipe diameter, friction factor, pipe slope, polytropic coefficient, air valve diameter, air pocket size and time maneuvering of the drain valve). Two cases were analyzed: (i) a pipe with the upstream end closed, and (ii) a pipe with an air valve installed in the upstream end. The results show that in the Case No.1, pipe slope, polytropic coefficient and air pocket size parameters are very sensitive on the subatmospheric pressure troughs, and on the other hand in the Case No. 2, the majority of parameters are very sensitive during the emptying process.

Key words | air valves; air-water interface; draining; sensitivity analysis; transient flow; water distribution networks.

INTRODUCCIÓN

El análisis de los procesos de vaciado de agua en sistemas hidráulicos presurizados es complejo de calcular (Coronado-Hernández *et al.*, 2018, 2017a; Laanearu *et al.*, 2012) debido a que es necesario comprender el comportamiento hidráulico del agua (fase líquida) junto con el comportamiento termodinámico de la bolsa de aire atrapada en dicho sistema (fase gaseosa) (Fuertes, 2001). Esta es una operación que se realiza de manera periódica en las redes de abastecimiento de agua por labores de mantenimiento, limpieza o reparaciones, y que los ingenieros y planificadores deben considerar con el fin de evitar problemas estructurales por colapso en las líneas de tuberías y en sus dispositivos anexos (válvulas, juntas, sistemas de bombeo, etc.) debido a las depresiones que se alcanzan durante dicho fenómeno.

El aire se introduce en los sistemas hidráulicos (Ramezani *et al.*, 2016) a través de las válvulas de aire, por las juntas y las aberturas que hay en las tuberías instaladas, durante el fallo de los sistemas de bombeo, mediante la liberación de aire disuelto, por la formación de vórtices en la entrada de los grupos de bombeo, etc. Los puntos altos de los sistemas hidráulicos son vulnerables a acumular este volumen de aire que se ha introducido en la red (AWWA, 2001). Y las válvulas de aire instaladas junto con las maniobras en las válvulas de drenado deben ser adecuadas para garantizar que la cantidad admitida de aire sea similar al volumen de agua que se está drenando para, de esta forma, prevenir depresiones que podrían ocasionar el colapso del sistema (Coronado-Hernández *et al.*, 2017a).

Durante los últimos años, los fenómenos transitorios que se generan durante las maniobras de llenado de agua han sido estudiados con cierta profundidad (Izquierdo *et al.*, 1999; Martino *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2013a; Fuertes-Miquel *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2017). Sin embargo, el análisis de los fenómenos transitorios durante las operaciones de vaciado de los sistemas hidráulicos ha sido poco estudiado hasta el momento actual. Los autores han desarrollado un modelo matemático robusto que permite conocer dicho comportamiento (Coronado-Hernández *et al.*, 2017b; Fuertes-Miquel *et al.*, 2017), el cual ha sido validado en los laboratorios de la Universitat Politècnica de València (España), para el caso de una tubería simple; y de la Universidad de Lisboa (Portugal), para el caso de una conducción de perfil irregular.

En particular, este modelo matemático ha sido desarrollado para los dos casos presentados a continuación: Caso No. 1 (tubería con el extremo aguas arriba cerrado), que corresponde al caso en donde no se instalan ventosas o donde éstas han fallado debido a problemas de mantenimiento; y el Caso No. 2 (tubería con una ventosa instalada), que corresponde a la situación ideal debido a que la correcta instalación de la ventosa brinda fiabilidad al sistema durante el proceso de vaciado (Ramezani *et al.*, 2015; AWWA, 2001).

Para los dos casos mencionadas anteriormente, el modelo matemático simula la columna de agua empleando la ecuación de oscilación de masa (modelo inercial rígido) (Liou & Hunt, 1996; Izquierdo *et al.*, 1999) y la interfaz aire-agua (Zhou *et al.*, 2013a). Para el Caso No. 1, el comportamiento termodinámico de la bolsa de aire es simulado empleado un modelo politrópico (Zhou *et al.*, 2013b), con el cual es posible determinar cómo varía la presión absoluta de la bolsa de aire en función de la expansión de la bolsa de aire; mientras que para el Caso No. 2, se emplean para modelar el comportamiento termodinámico de la bolsa de aire la ecuación de continuidad (Fuertes-Miquel *et al.*, 2017), la ecuación de expansión-compresión politrópica (León *et al.*, 2010; Martins *et al.*, 2015) y la ecuación que modela el comportamiento de la ventosa (Wylie and Streeter, 1976), las cuales conllevan a conocer como varía la presión absoluta de la bolsa de aire en función de la expansión de la misma y de la cantidad neta de aire que entra al sistema por las válvulas de aire. Para ambos casos, el sistema de ecuaciones algebraicas-diferenciales es solucionado empleando métodos numéricos, para lo cual se empleó la librería de Simulink de Matlab®.

En cualquier caso, es imprescindible conocer la evolución del aire dentro de la tubería (coeficiente politrópico m para modelar el comportamiento del aire). Para los procesos isoterms, caracterizados porque la temperatura del aire no cambia durante el fenómeno transitorio, el valor es $m=1.0$ (Zhou *et al.*, 2013a; Coronado-Hernández *et al.*, 2017a). Esta hipótesis es válida para transitorios muy lentos. Para los procesos adiabáticos, caracterizados porque no hay intercambio de calor con el entorno, el valor es $m=1.4$ (Izquierdo *et al.*, 1999; Zhou *et al.*, 2013b). Esta hipótesis es válida para transitorios muy rápidos. Sin embargo, en las instalaciones reales suele producirse una situación intermedia (hay cambio de temperatura y hay transferencia de calor). En estos casos se suele adoptar un valor intermedio para el coeficiente politrópico, por ejemplo $m=1.2$ (Coronado-Hernández *et al.*, 2017b).

En conducciones reales se deberá verificar el riesgo de colapso por las depresiones que pueden ocurrir durante el vaciado de agua, analizando si la rigidez de la tubería (suministrada por el fabricante) es suficiente para resistir la depresión dependiendo de las condiciones de instalación de la conducción (el tipo de relleno, la clase de suelo y la profundidad de instalación), tal como se presenta en el trabajo desarrollado por los autores (Coronado-Hernández *et al.*, 2017b).

Con el objetivo de seguir profundizando en el análisis de los fenómenos transitorios generados durante el vaciado en los sistemas de abastecimiento de agua, en este trabajo se presenta el análisis de sensibilidad, para los dos casos mencionados, de los parámetros hidráulicos que intervienen en este proceso, tales como: diámetro de la tubería, pendiente longitudinal, tamaño de la bolsa de aire, diámetro de la ventosa, coeficiente politrópico, factor de fricción y tiempo de apertura de la válvula de vaciado. Como resultado de esta investigación, se conocerán los parámetros que mayor influencia tienen sobre el proceso de vaciado en los sistemas de abastecimiento de agua, en lo referente a la presión sub-atmosférica alcanzada en la bolsa de aire (depresión), que es la variable hidráulica más importante durante este proceso porque muestra si existe riesgo de colapso en el sistema. Cuando se presentan depresiones importantes, el sistema puede colapsar dependiendo de la clase de rigidez de la tubería y de las condiciones de instalación de la misma. En contraste, cuando se presentan pequeñas depresiones, no existirá riesgo de colapso.

MODELOS MATEMÁTICOS

En esta sección se presenta de manera resumida el modelo matemático para analizar el proceso de vaciado de agua en una tubería simple desarrollado por los autores (Fuertes-Miquel *et al.*, 2016). La Figura 1 muestra la configuración de una tubería simple para los dos casos analizados: Caso No. 1 (tubería simple con el extremo aguas arriba cerrado), el cual no tiene ventosas instaladas; y el Caso No. 2 (tubería simple con una ventosa instalada aguas arriba), en donde se utiliza esta ventosa para proporcionar fiabilidad al sistema durante el proceso de vaciado.

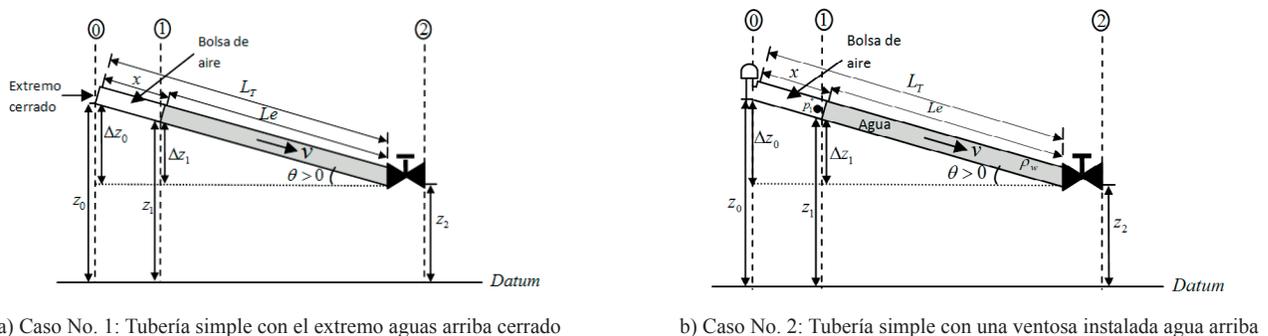


Figura 1 | Esquema de una bolsa de aire atrapada en una tubería simple durante el proceso de vaciado de agua.

Caso No. 1: Tubería simple con el extremo aguas arriba cerrado

El análisis del proceso de vaciado en una tubería simple con el extremo aguas arriba cerrado presenta una bolsa de aire atrapada dentro de la instalación (Figura 1a). Para modelar este caso, las siguientes suposiciones son consideradas:

- La fase de agua es modelada mediante un modelo inercial. Un factor de fricción constante es considerado para determinar las pérdidas de energía usando la ecuación de Darcy-Weisbach.
- La pendiente, el diámetro y la rugosidad de la tubería son constantes durante todo el transitorio.
- El modelo politrópico es empleado para modelar el comportamiento termodinámico de la bolsa de aire atrapada.
- La interfaz aire-agua es perpendicular a la dirección del flujo (flujo pistón). Esta hipótesis es válida dependiendo de la velocidad del agua durante el vaciado, del diámetro de la tubería y de la pendiente de la misma.

Bajo estas hipótesis, el problema es modelado por las siguientes ecuaciones:

Ecuaciones para la fase de agua

- Movimiento de la columna de agua

El modelo inercial elástico o golpe de ariete (Abreu *et al.*, 1999; Zhou *et al.*, 2013a,b) considera los efectos de la elasticidad del fluido y de la conducción. Las ecuaciones básicas que representan el movimiento unidimensional del fenómeno transitorio en una tubería se representan en su forma simplificada como:

$$\frac{gA}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial X} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial X} + f \frac{Q|Q|}{2DA} = 0 \quad (2)$$

Donde: H = altura piezométrica (variable dependiente); Q = caudal de agua (variable dependiente); X = distancia a lo largo de la conducción (variable independiente); t = tiempo (variable independiente); g = aceleración de la gravedad; A = área de la sección transversal de la tubería; a = aceleración de la onda; D = diámetro interno de la tubería; y f = factor de fricción en condiciones estáticas.

Cuando se presentan bolsas de aire atrapadas en sistemas presurizados, la elasticidad del fluido y de la conducción son despreciables comparadas con la elasticidad de la bolsa de aire, con lo que $a \rightarrow \infty$ o bien $\frac{\partial H}{\partial t} \rightarrow 0$, presentándose condiciones rígidas en el sistema.

Con estas simplificaciones, la ecuación de continuidad se reduce a:

$$\frac{\partial Q}{\partial X} = 0 \rightarrow Q = Q(t) \quad (3)$$

y la ecuación de energía (2) al integrarse y reemplazar por las variables presentadas en la Figura 1, se obtiene la ecuación del modelo rígido inercial dada por (Coronado-Hernández *et al.*, 2017; Fuertes-Miquel *et al.*, 2018):

$$\frac{dv}{dt} = \frac{(p_1^* - p_{atm}^*)}{\rho_w L_e} + g \left(\frac{\Delta z_1}{L_e} \right) - f \frac{v|v|}{2D} - \frac{KgA^2 v|v|}{L_e} \quad (4)$$

Donde: v = velocidad de la columna de vaciado del agua; p_1^* = presión absoluta en la bolsa de aire; p_{atm}^* = presión atmosférica; ρ_w = densidad del agua; L_e = longitud de la columna de vaciado; Δz_1 = desnivel de la tubería; y K = coeficiente de resistencia de la válvula de vaciado.

- Posición de la interfaz aire-agua:

Al considerar el modelo de flujo pistón, se tiene que:

$$\frac{dL_e}{dt} = -v \rightarrow L_e = L_0 - \int_0^t v dt \quad (5)$$

Donde: L_0 longitud inicial de la columna de agua.

Ecuación para la bolsa de aire

El comportamiento termodinámico de la bolsa de aire atrapada puede modelarse considerando su comportamiento energético. La primera ley de la termodinámica presenta que el cambio de la energía interna (E) es la sumatoria de la cantidad neta de calor (Q_c) suministrada por el sistema más el trabajo realizado por dicho sistema (W). Una simplificación de las relaciones termodinámicas se puede representar mediante un modelo politrópico (Martin, 1979; León *et al.*, 2010). El coeficiente politrópico (m) considera los efectos de transferencia de calor de las variables de la presión de la bolsa de aire (p_1^*) y del volumen de la bolsa de aire (V_a^*), mediante la siguiente relación:

$$\frac{dp_1^*}{dt} = -m \frac{p_1^*}{V_a} \frac{dV_a}{dt} + \frac{p_1^*}{V_a} \frac{m}{\rho_a} \frac{dm_a}{dt} \quad (6)$$

Donde ρ_a es la densidad de la bolsa de aire; y m_a es la masa de aire que entra al sistema.

Para el Caso No. 1 al no existir admisión de aire en el sistema, se tiene que $dm_a/dt=0$, por lo que al integrar el resto de la ecuación (6), se tiene que:

$$p_1^* x^m = p_{1,0}^* x_0^m \quad (7)$$

Donde x = tamaño de la bolsa de aire; x_0 = valor inicial de x ; y $p_{1,0}^*$ valor inicial de p_1^* .

En resumen, un sistema de ecuaciones algebraicas-diferenciales de 3×3 [ecuaciones (4), (5) y (7)] describen todo el problema. Este sistema debe ser solucionado con sus correspondientes condiciones iniciales y de frontera, para dar solución a las tres variables desconocidas (v , L_e y p_1^*).

Condiciones iniciales y de frontera

Cuando el sistema está en reposo ($t=0$), las condiciones iniciales están descritas por $v(0)=0$, $L_e=L_{e,0}$ y $p_1^*(0)=p_{atm}^*=101325$ Pa

La condición de contorno aguas arriba está dada por $p_{1,0}^*$ (condición inicial de la bolsa de aire) y la condición de contorno aguas abajo está dada por p_{atm}^* debido a que la válvula se encuentra descargando libremente a la atmósfera.

Término gravitatorio

El término gravitatorio ($\Delta z_1/L_e$) de la ecuación (4) es siempre constante y puede ser calculado por la siguiente ecuación:

$$\frac{z_1}{L_e} = \sin \theta \quad (8)$$

Caso No. 2: Tubería simple con ventosa instalada aguas arriba

El análisis del proceso de vaciado en una tubería simple con una ventosa instalada aguas arriba es presentado en la Figura 1b. Las suposiciones son las mismas a las consideradas en el Caso No. 1. Por tanto, las ecuaciones (4) y (5) son usadas para representar el comportamiento de la columna de agua. La bolsa de aire puede ser modelada considerando las siguientes ecuaciones:

Ecuaciones para la bolsa de aire

- Ecuación politrópica de expansión-compresión de la bolsa de aire (Martin, 1976; León *et al.*, 2016)

La ecuación (6) se emplea considerando que la válvula de aire introduce aire en el sistema.

- Ecuación de continuidad

La densidad del aire en el interior de la tubería (ρ_a) y la densidad del aire en la ventosa (ρ_{aCN}) son diferentes, con lo cual al aplicar la ecuación de continuidad en la bolsa de aire se puede demostrar (Coronado-Hernández *et al.*, 2017) que:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \frac{(\rho_{aCN} v_{aCN} A_{adm} - v A \rho_a)}{A(L_t - L_e)} \quad (9)$$

Donde ρ_{aCN} = densidad del aire en condiciones normales ($1.205 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), v_{aCN} = velocidad del aire en condiciones normales y A_{adm} = área de admisión de la ventosa.

- Ecuación característica de la ventosa

El flujo isentrópico en toberas es un modelo físico que permite representar adecuadamente la admisión de aire de una válvula de aire. Para condiciones subsónicas ($p_{atm}^* > p_1^* > 0.528 p_{atm}^*$), se tiene (Wylie and Streeter, 1993):

$$v_{aCN} = C_{adm} \sqrt{7 p_{atm}^* \rho_{atm} \left[\left(\frac{p_1^*}{p_{atm}^*} \right)^{1.4286} - \left(\frac{p_1^*}{p_{atm}^*} \right)^{1.714} \right]} \quad (10)$$

Donde C_{adm} = coeficiente de admisión de la ventosa.

Si se presentan condiciones sónicas ($p_1^* \leq 0.528 p_{atm}^*$), se tiene:

$$v_{aCN} = C_{adm} \frac{0.686}{\sqrt{RT}} p_{atm}^* \quad (11)$$

Donde R = constante del aire; y T = temperatura del aire.

En resumen, se tiene un sistema de ecuaciones algebraicas-diferenciales de 5×5 (ecuaciones (4), (5), (6), (9) y (10) ó (11)) que describen el problema planteado. Este sistema debe ser solucionado, con sus correspondientes condiciones iniciales y de frontera, para dar solución a las cinco variables desconocidas (v , L_e , p_1^* , ρ_a y v_{aCN}).

Condiciones iniciales y de frontera

En este caso, las condiciones iniciales está descritas por: $v(0)=0$, $L_e(0)=L_{e,0}$, $p_1^*(0)=p_{atm}^*=101325$ Pa, $\rho_a=1.205$ kg·m⁻³ y $v_{aCN}(0)=0$. Por otro lado, las condiciones de contorno son iguales a las del Caso No. 1.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En el presente trabajo se presenta el análisis de sensibilidad del modelo matemático desarrollado por los autores para una tubería simple de longitud $L_T=1000$ m y con una diferencia de elevación $\Delta z_1=100$ m (pendiente longitudinal del 10%). Los parámetros iniciales que se consideraron se presentan a continuación: factor de fricción $f=0.018$; diámetro interior de la tubería $D=0.40$ m; coeficiente politrópico $m=1.2$; coeficiente de resistencia de válvula de vaciado $K=4.5 \times 10^{-1}$ mca/(m³/s)² (equivalente a un DN 250); longitud inicial de la bolsa de aire $x_0=300$ m; diámetro de la ventosa = 50 mm; y coeficiente de admisión de aire en la ventosa $C_{adm}=0.50$. Para realizar el análisis de sensibilidad correspondiente, estos parámetros se variaron tal como se presenta en la Tabla 1. En todos los casos analizados se ha considerado la presión atmosférica como la presión absoluta inicial en la bolsa de aire $p_{1,0}^*=p_{atm}^*=10.33$ mca).

Tabla 1 | Rango de variación de los diferentes parámetros analizados

Parámetro	Unidad	Rango	
		De	A
Diámetro interior de tubería	(m)	0.2	0.6
Factor de fricción	(-)	0.010	0.026
Pendiente longitudinal	%	2	25
Coficiente politrópico	(-)	1.0	1.4
Diámetro de ventosa	(mm)	25	100
Tamaño de la bolsa de aire	(m)	150	550
Tiempo de apertura*	(s)	0	100

*Se ha realizado un incremento lineal para considerar diferentes tiempos de apertura.

A continuación, se presentan los resultados del análisis de sensibilidad para los dos casos antes mencionados (tubería sin ventosa y tubería con ventosa). En Coronado-Hernández *et al.* (2017b) y Fuertes-Miquel *et al.* (2018) puede observarse la evolución de las principales variables hidráulicas y termodinámicas en el tiempo.

Caso No. 1: Tubería simple con el extremo aguas arriba cerrado

Para el Caso No. 1 se ha resuelto el sistema de ecuaciones algebraicas-diferenciales de 3×3 , obteniendo los resultados que se presentan en la Figura 2. Al inicio del transitorio, la bolsa de aire se encuentra a presión atmosférica (10.33 mca), pero a medida que se expande la misma, la presión absoluta cae hasta alcanzar una presión absoluta mínima de 2.62 mca.

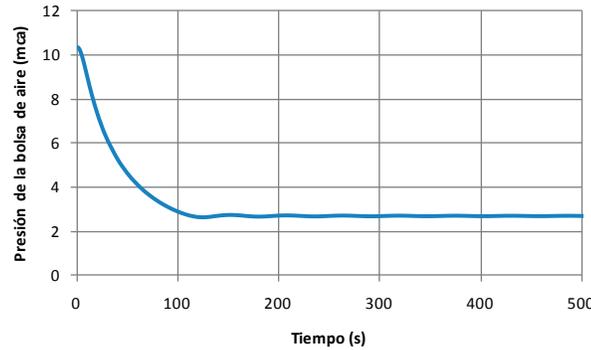


Figura 2 | Evolución de la presión absoluta en el tiempo para el Caso No. 1 (tubería con el extremo aguas arriba cerrado).

Para analizar la influencia de diferentes parámetros sobre la máxima depresión que alcanza el sistema, se han variado los valores del tamaño de la bolsa de aire, la pendiente longitudinal de la tubería, el diámetro de la tubería, el factor de fricción, el coeficiente politrópico y el tiempo de apertura de la válvula de vaciado. En la Figura 3 se presentan los resultados obtenidos de la presión absoluta mínima (depresión máxima) alcanzada durante el proceso de vaciado para cada uno de los sistemas analizados.

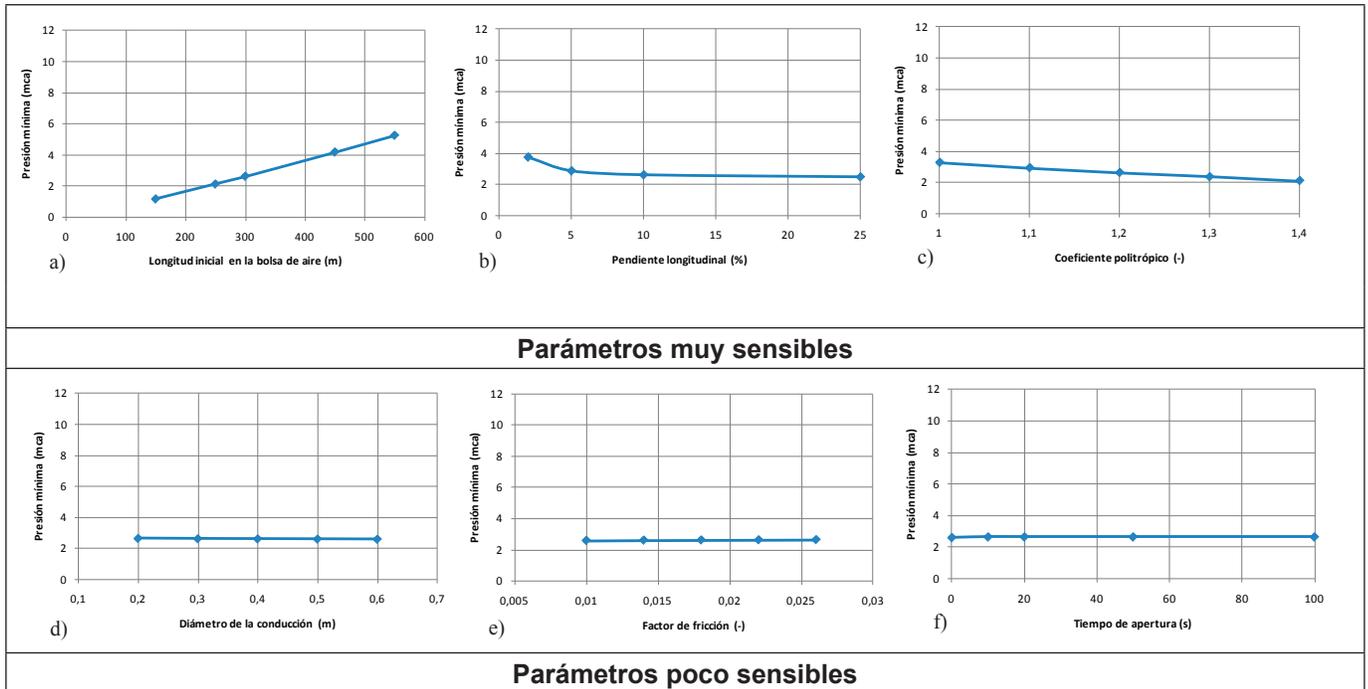


Figura 3 | Presiones absolutas mínimas (depresiones máximas) para el Caso No. 1 (tubería con el extremo aguas arriba cerrado).

Al realizar este análisis se observa que los parámetros que más inciden en el proceso de vaciado son el tamaño de la bolsa de aire y la pendiente longitudinal de la tubería, de los cuales se deduce lo siguiente:

- Al considerar pequeñas bolsas de aire se presentan mayores depresiones como resultado de la expansión de la misma. Para una bolsa de aire de 150 m de longitud, se alcanza una presión absoluta mínima de 1.16 mca; mientras que, para una bolsa de aire de 550 m de longitud, se obtiene un valor de 5.25 mca (ver Figura 3a). Mediante el modelo politrópico (Ecuación (7)) pueden obtenerse valores aproximados de la depresión máxima alcanzada en el sistema (ver Figura 4) en función de la relación x_0/L_t . La aproximación politrópica (Ecuación (7)) presenta valores ligeramente mayores a los obtenidos mediante el modelo matemático. Esta aproximación funciona muy bien considerando que el movimiento de la columna de agua es muy lento.

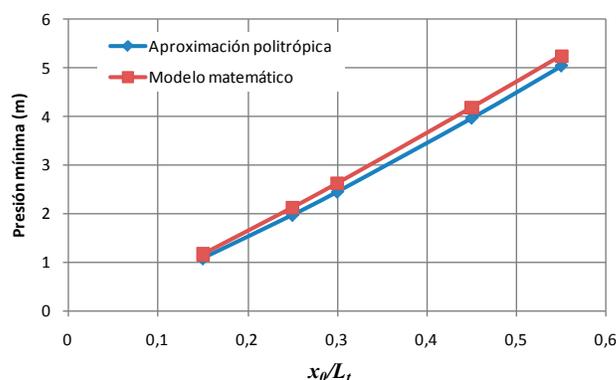


Figura 4 | Aproximación politrópica vs. modelo matemático propuesto para el Caso No. 1 (tubería con el extremo aguas arriba cerrado).

- La pendiente longitudinal de la conducción es otro parámetro importante durante el drenaje de sistemas presurizados. De acuerdo con la Figura 3b, se deduce que conducciones instaladas en terrenos montañosos y/o escarpados, presentarán mayores depresiones, como consecuencia del aumento del término gravitatorio ($\Delta z_0/L_e$). En el análisis de sensibilidad realizado, se muestra que para una pendiente longitudinal del 25% se presenta una presión absoluta mínima de 2.49 mca (terreno empinado); y para una pendiente longitudinal del 2% (terreno plano) la presión absoluta mínima alcanzada es de 3.74 mca. Basado en esta situación, los diseñadores deben considerar el efecto ocasionado por la pendiente longitudinal dada las depresiones alcanzadas durante el transitorio.
- El coeficiente politrópico es un parámetro que influye de manera importante durante el vaciado de agua cuando no existe admisión de aire en el sistema, tal como se aprecia en la Figura 3c. Al considerar una evolución isoterma ($m=1.0$) se presenta una presión absoluta mínima de 3.27 mca; mientras que para una evolución adiabática ($m=1.4$) se alcanzan mayores depresiones (2.10 mca).

Por otro lado, los parámetros del diámetro de la tubería, el factor de fricción y el tiempo de apertura de la válvula de vaciado son poco sensibles durante el proceso de vaciado (ver Figuras 3d, 3e y 3f). Para mayores valores del diámetro interno de la conducción se presentan depresiones ligeramente más altas; y para aumentos del factor de fricción, se presentan depresiones ligeramente más pequeñas. Con respecto al tiempo de apertura, la mayor depresión se obtiene para una apertura instantánea (0 s) con un valor de 2.62 mca y para aperturas graduales desde 10 a 100 s se obtiene prácticamente una presión absoluta mínima de 2.66 mca, mostrando de esta manera que la depresión alcanzada es independiente del tiempo de apertura de la válvula de vaciado. Todo ello puede observarse claramente en las gráficas de la Figura 2. Estos parámetros no intervienen de manera importante durante la simulación debido a que la columna de agua se mueve muy poco.

Al omitirse los parámetros poco sensibles del factor de fricción y del diámetro de la conducción durante el vaciado de agua, el término $f^v|v|/2D$ no tendría ninguna incidencia en la Ecuación (4). Sin embargo, esta simplificación no reduciría de ninguna manera el sistema de ecuaciones algebraicas-diferenciales de 3×3 , con lo cual resolución numérica sería la misma.

Caso No. 2: Tubería simple con una ventosa instalada aguas arriba

Para el Caso No. 2 se ha resuelto el sistema de ecuaciones algebraicas-diferenciales de 5×5 , obteniendo los resultados de la variación de la presión absoluta como se presenta en la Figura 5. El transitorio se inicia con la bolsa de aire a presión atmosférica (10.33 mca) y desciende hasta alcanzar una presión absoluta mínima de 4.75 mca, pero luego el caudal de aire admitido por la ventosa es superior a la cantidad de agua drenada, por lo que la presión comienza a subir hasta alcanzar nuevamente condiciones atmosféricas.

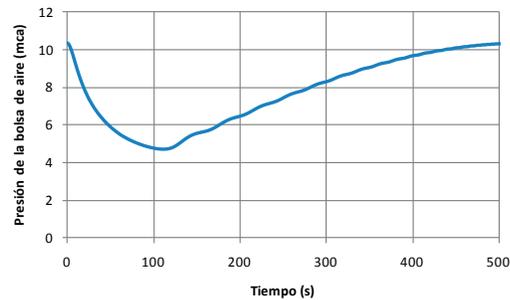


Figura 5 | Evolución de la presión absoluta en el tiempo para el Caso No. 2 (tubería con una ventosa instalada aguas arriba).

Para analizar la influencia de los parámetros sobre la depresión máxima, se han variado los parámetros de longitud inicial de la bolsa de aire, pendiente longitudinal de la tubería, diámetro de la tubería, factor de fricción, coeficiente politrópico, tiempo de apertura de la válvula de vaciado y tamaño de la ventosa. En la Figura 6 se presentan los resultados obtenidos de la presión absoluta mínima alcanzada durante el proceso de vaciado para todos los sistemas analizados.

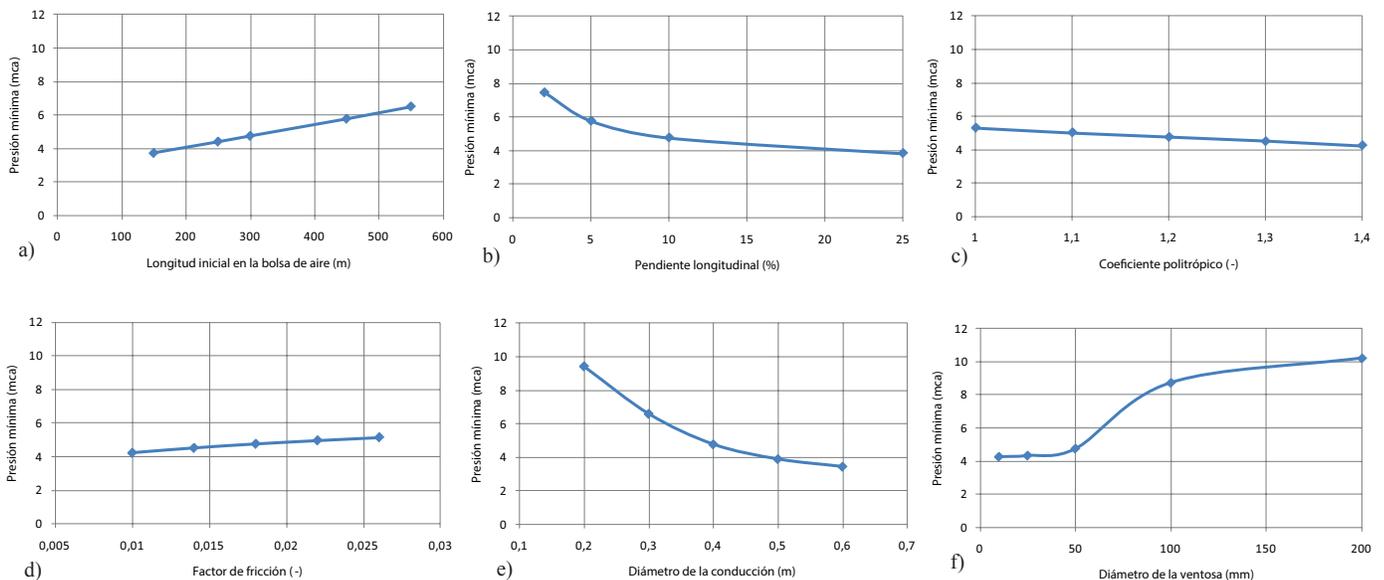


Figura 6 | Presiones absolutas mínimas (depresiones máximas) para el Caso No. 2 (tubería con una ventosa instalada aguas arriba).

En base a los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad, puede deducirse lo siguiente:

- La longitud inicial de la bolsa de aire es un parámetro que tiene gran influencia durante el proceso de vaciado con admisión de aire (ver Figura 6a). Para una bolsa de aire de 150 m se presenta una presión absoluta mínima de 3.73 mca, depresión mucho mayor comparada con la presión absoluta mínima de 6.50 mca que ocurre para una bolsa de 550 m de

longitud. La condición más desfavorable se presenta cuando la conducción se encuentra llena de agua completamente (Coronado-Hernández *et al.*, 2017).

- Con respecto a la pendiente longitudinal de la conducción (ver Figura 6b), se presenta la misma situación que para el Caso No. 1, es decir, para conducciones localizadas en terrenos con alta pendiente se presentarán depresiones mayores que para pendientes planas, debido al aumento del término gravitatorio. Por tanto, la pendiente longitudinal debe ser considerada al momento de proyectar los dispositivos de protección. Para pendientes longitudinales de la conducción de 2 y 25%, se obtienen unas presiones absolutas mínimas de 7.45 y 3.82 mca, respectivamente.
- En la Figura 6c se presenta la variación del coeficiente politrópico, en donde se muestra que una evolución isoterma ($m=1.0$) produce una presión absoluta mínima de 5.30 mca, lo que supone una depresión menor que la alcanzada con un evolución adiabática ($m=1.4$) de 4.25 mca.
- Al variar el factor de fricción (ver Figura 6d) entre 0.010 y 0.026 se presentan presiones absolutas mínimas entre 4.22 y 5.13 mca, mostrando que cuando la columna de agua está en movimiento el factor de fricción produce pérdidas ralentizando el transitorio produciendo menores depresiones.
- A medida que se aumenta el diámetro de la conducción (ver Figura 6e), se presentan mayores depresiones que pueden poner en riesgo a la instalación, debido a que se tiene un mayor volumen de agua que debe drenarse y que no puede ser reemplazado de manera idéntica por el aire que se debe introducir a través de la ventosa. Por ejemplo, para un diámetro de conducción de 0.2 m se obtiene una presión absoluta mínima de 9.40 mca; mientras que para un diámetro de 0.6 m, la presión mínima alcanzada es de 3.42 mca. Esto indica que el tamaño de la ventosa está claramente relacionado, aunque no solo (esto es importante), con el diámetro de la conducción.
- En la Figura 3f se presenta la variación del diámetro de la ventosa. Si la ventosa es muy pequeña se alcanzan grandes depresiones debido a que la ventosa no es capaz de introducir el aire necesario para reemplazar todo el volumen de agua drenado. Para una ventosa de 10 mm de diámetro se obtiene una presión absoluta mínima de 4.26 mca, indicando un mal funcionamiento de la misma porque ha sido mal dimensionada; mientras que para una ventosa de 200 mm de diámetro se alcanza una presión absoluta mínima de 10.21 mca (prácticamente no hay depresión). Esto indica que durante el proceso de vaciado se recomiendan grandes ventosas para la fase de admisión de aire con el objetivo de evitar depresiones en el sistema.
- Tanto el tiempo de apertura como el coeficiente de resistencia de la válvula de vaciado no afectan de manera importante al proceso de vaciado de agua debido a que, en este caso, la energía perdida en la válvula es mucho más pequeña que la energía perdida por fricción en la conducción. Así pues, las características de la válvula de vaciado no influyen sensiblemente en el proceso de vaciado de la conducción analizada. No obstante, con una válvula de vaciado muy cerrada (introduciendo grandes pérdidas en el sistema), la depresión alcanzada sería menor.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha realizado el análisis de sensibilidad de diferentes parámetros (diámetro interior de la tubería, factor de fricción, pendiente longitudinal de la tubería, coeficiente politrópico, tamaño de la ventosa, tamaño de la bolsa de aire y tiempo de apertura de la válvula de vaciado) que intervienen en el proceso de vaciado en sistemas de abastecimiento de agua aplicando el modelo matemático desarrollado por los autores.

En los procesos de vaciado de los sistemas de distribución de agua, las depresiones más importantes se presentan cuando no existen ventosas instaladas (Caso No. 1). Obviamente, cuando no hay ventosas y no se permite la entrada de aire en el sistema, existirá mayor riesgo de colapso por depresión en el sistema (tuberías y/o accesorios). Para evitar estos problemas, deberán instalarse ventosas de aire en los puntos altos de la instalación (Caso No. 2) y estas ventosas deberán estar correctamente dimensionadas.

Los principales resultados que se deducen del análisis de sensibilidad realizado en el presente trabajo son:

- Para el Caso No. 1 (tubería con el extremo aguas arriba cerrado), los parámetros que influyen de manera significativa en las depresiones alcanzadas durante el proceso de vaciado son la pendiente de la tubería (mayores depresiones en terrenos de pendiente elevada), el coeficiente politrópico y el tamaño de la bolsa de aire dentro de la instalación (mayores depresiones para pequeñas bolsas de aire). El resto de los parámetros analizados (diámetro de la tubería, factor de fricción y tiempo de apertura de la válvula de vaciado) no tienen una gran influencia en la depresión alcanzada.
- Por otro lado, cuando se instalan ventosas (Caso No. 2) permitiendo la admisión de aire durante el vaciado es muy importante seleccionar el tamaño adecuado de la ventosa para evitar grandes depresiones. Durante este proceso la mayoría de los parámetros inciden en la respuesta hidráulica del vaciado de agua.
- El dimensionado de las ventosas en su fase de admisión (esto es, para funcionar durante los procesos de vaciado) debe realizarse con sumo cuidado para evitar grandes depresiones que pueden ocasionar el colapso de la instalación.

El modelo propuesto por los autores no considera los efectos de la entrada de aire por la tubería de desagüe. No obstante, es poco probable que esta situación se presente en conducciones reales teniendo en cuenta que el diámetro de la conducción es mucho mayor que el diámetro de la tubería de desagüe. Adicionalmente, cuando se ha seleccionado una válvula de aire adecuada no se produce este fenómeno. En trabajos futuros se recomienda emplear modelos de CFD para analizar este comportamiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación del estudiante de doctorado Óscar E. Coronado-Hernández, realizada por la Fundación Centro de Estudios Interdisciplinarios Básicos y Aplicados (CEIBA) - Gobernación de Bolívar (Colombia).

REFERENCIAS

- AWWA. 2001. *Manual of water supply practices M51: air release, air-vacuum, and combination air valves*. American Water Works Association. Denver, USA, 2001.
- 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., Angulo-Hernández, F.N. 2017b. Emptying Operation of Water Supply Networks. *Water*, 10(1), 22. <https://doi.org/10.3390/w10010022>
- Coronado-Hernández, O.E., Fuertes-Miquel, V.S., Iglesias-Rey, P.L., Martínez-Solano, F.J. 2018. 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)
- Fuertes-Miquel, V.S., Coronado-Hernández, O.E., Iglesias-Rey, P.L., Mora-Meliá, D. 2018. Transient phenomenon during the emptying process of a single pipe with water-air interaction. *Journal of Hydraulic Research (pendiente de publicación)*.
- 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. 2001. *Hydraulic transients with entrapped air pockets*. Ph.D. Thesis, Department of Hydraulic Engineering, Polytechnic University of Valencia, Valencia, Spain.
- Izquierdo, J., Fuertes, V.S., Cabrera, E., Iglesias, P., García-Serra, J. 1999. Pipeline start-up with entrapped air. *Journal of Hydraulic Research*, 37, 579-590. <https://doi.org/10.1080/00221689909498518>

- Laanearu, J., Annus, I., Koppel, T., Bergant, A., Vučković, 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., Garcia, M. 2010. A robust two-equation model for transient-mixed flows. *Journal of Hydraulic Research*, 48, 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, 534-539. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:10\(534\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:10(534))
- Martins, S.C., Ramos, H.M., Almeida, A.B. 2015. Conceptual analogy for modelling entrapped air action in hydraulic systems. *Journal of Hydraulic Research*. 678-686. <https://doi.org/10.1080/00221686.2015.1077353>
- Martino, G., Fontana, N., Giugni, M. 2008. Transient flow caused by air expulsion through an orifice. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(9), 1395-1399. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:9\(1395\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:9(1395)).
- Ramezani, L., Karney, B., Malekpour, B.A. 2015. The Challenge of Air Valves: A Selective Critical Literature Review. *Journal of Water Resources and Planning Management*, 141(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000530](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000530)
- Ramezani, L., Karney, B., Malekpour, A. 2016. Encouraging Effective Air Management in Water Pipelines: A Critical Review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000695](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000695)
- Wang, L., Wang, F., Karney, B., Malekpour, A. 2017. Numerical investigation of rapid filling in bypass pipelines. *Journal of Hydraulic Research*, 55(5), 647-656. <https://doi.org/10.1080/00221686.2017.1300193>
- Wylie, E., Streeter, V. 1993. *Fluid transients in systems*; Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Zhou, L., Liu, D. 2013. Experimental investigation of entrapped air pocket in a partially full water pipe. *Journal of Hydraulic Research*, 51, 469-474, <https://doi.org/10.1080/00221686.2013.785985>
- Zhou, L., Liu, D., Karney, B. 2013. Investigation of Hydraulic Transients of Two Entrapped Air Pockets in a Water Pipeline. *Journal of Hydraulic Engineering* 139, 949-959. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000750](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000750)