

## MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO DE VENTOSAS DE ADMISIÓN DE AIRE EN CONDUCCIONES DE ABASTECIMIENTO

Pedro L. Iglesias Rey<sup>1</sup>; Vicente S. Fuertes Miquel; Joaquín Izquierdo Sebastián; P.  
Amparo López Jiménez

**Resumo** – A lo largo del presente trabajo se ha analizado el proceso de vaciado de una conducción a través de una válvula de descarga y disponiendo de una ventosa en la parte superior del conducto que permite la entrada de aire. Este proceso supone el desarrollo de un modelo complejo que puede reducirse en variables, pero cuya resolución para un caso general requiere el disponer de un modelo computacional.

Para simplificar los cálculos relacionados con los procesos de vaciado de las conducciones se propone una metodología simplificada basada en un comportamiento cuasi-estático de la columna de líquido en su vaciado.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la sencillez del método propuesto, así como se establecen los límites de validez de la simplificación realizada respecto del caso de considerar un modelo completo de comportamiento de sistema.

**Abstract** – In this paper it has been analyzed the process of emptied out of a pipe across a discharge valve and having an air valve in the upper part of the conduction for allowing the entrance of free air. This process requires the development of a complex model reduced in non dimensional variables, but whose resolution for a general situation needs a computational model.

In order to simplify the calculus of the emptied out of a pipe it has been proposed a simplified methodology based a quasi-static behavior of the water columns in its movement.

The results obtained show the easiness of the proposed method, and also are studied the application limits of the simplification made with respect to the consideration of the general model.

**Palavras-chave:** ventosas, admisión de aire, vaciado conducciones, aire atrapado.

---

<sup>1</sup> Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos – Universidad Politécnica de Valencia – Camino de Vera s/n – Apto 22012 – 46022 Valencia (España). Teléfono: +34.963.879.890. Fax: +34.963.877.981. Email: piglesia@gmmf.upv.es

## INTRODUCCIÓN

La presencia de las ventosas en las redes de abastecimiento de agua es una práctica habitual. Las diferentes funciones que pueden realizar hacen que su utilización sea sumamente amplia. La ventosas, como elemento automático, es un dispositivo eficaz y sencillo, que permite la admisión de aire atmosférico en la conducción en el punto de la tubería en que se encuentra instalada cuando la presión en la conducción se sitúa por debajo de la presión atmosférica, rompiéndose con ello el vacío parcial que se tenía. Posteriormente y si la presión aumenta hasta superar la presión exterior, el aire es expulsado, de manera que las columnas de líquido separadas por la interfase gas, vuelven a juntarse de nuevo.

Como es lógico, las ventosas se instalan en los puntos altos de las tuberías de perfil irregular, que es donde pueden presentarse problemas por bajas presiones. Si su funcionamiento es correcto son un elemento sumamente eficaz para la prevención de depresiones; pero una deficiente admisión puede dar lugar a la aparición de una inesperada depresión, con los grandes riesgos que ello comporta y, en el supuesto de que la salida del aire no se efectúe adecuadamente, puede aparecer el problema que entrañan las bolsas de aire entre dos columnas líquidas (Fuertes, 2004).

La correcta modelación de las ventosas, de manera que conocida la diferencia de presiones ( $p_i - p_{at}$ ) se conozca cuál es la masa de aire expulsada o admitida, resulta imprescindible para una adecuada modelación matemática del comportamiento de un proceso de llenado y vaciado de conducciones. Algunas de las expresiones teóricas para modelación de ventosas pueden seguirse en las obras clásicas (Chaudhry, 1987; Wylie y Streeter, 1991; Abreu y otros, 1995).

Existe en el mercado una gran cantidad de tipos y formas constructivas de ventosas. Es importante conocer las diferencias que hay entre unos y otros tipos ya que una elección inadecuada de la ventosa puede generar más problemas que los que puede llegar a resolver.

Las dos razones principales por las que una ventosa debe introducir aire dentro de una conducción son: por un lado, la ventilación y, por otro, el control de depresiones originadas durante un transitorio.

Las condiciones que debe tener una ventosa pensada para ventilar la conducción son las siguientes:

- Gran capacidad de expulsión de aire, para que éste salga rápidamente cuando se llena la instalación.
- Rápida capacidad de admisión de aire, para que éste entre rápidamente en la conducción cuando se está procediendo al drenaje de la misma.
- Baja capacidad de expulsión durante el funcionamiento normal de la ventosa. Debe expulsarse el aire que se libera en los puntos altos de la instalación al producirse una disminución de la presión en los mismos.

Por el contrario las condiciones que debe tener una ventosa diseñada para controlar las depresiones originadas por un transitorio son las siguientes:

- Gran capacidad de admisión de aire en los puntos críticos, para evitar la posible aparición de cavitación.

- Baja capacidad de expulsión, para evitar que la bolsa de aire que existe dentro de la conducción colapse de forma brusca, ya que esto generaría un transitorio de bastante importancia.

## ECUACIONES CARACTERÍSTICAS DEL VACIADO DE UNA CONDUCCIÓN.

Para poder analizar el vaciado de una conducción se considera una instalación característica como la indicada en la Figura 1. Algunas de las hipótesis sobre las que se realiza el análisis son las siguientes:

- Se admite que la tubería es de características uniformes (pendiente, diámetro, rugosidad).
- En el extremo aguas arriba de la conducción existe una válvula de descarga que se maniobra de forma prácticamente instantánea para generar el vaciado de la conducción. En todo momento se admite que la totalidad del volumen de agua contenido en el interior de la conducción se vacía por la válvula.
- En el extremo aguas arriba de la conducción existe una ventosa de admisión de aire que permite la entrada de aire para favorecer el vaciado de la conducción.

A la vista de la instalación descrita se plantean las ecuaciones características que permiten representar el comportamiento del sistema durante el proceso de vaciado. Estas ecuaciones son las que se describen a continuación.

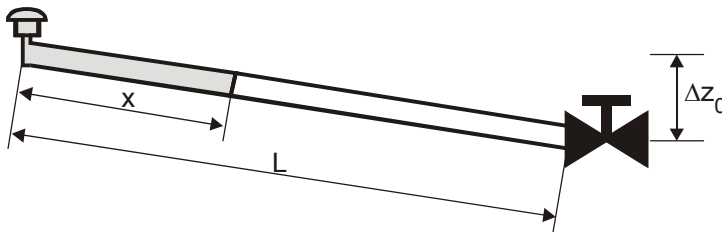


Figura 1. Esquema del vaciado de una conducción.

### Ecuación característica de la ventosa.

Esta ecuación representa la relación entre el caudal másico de aire que entra por la ventosa y la diferencia de presiones existente entre el exterior de la conducción y el interior de la misma. Existen muchos modelos de representación de la característica de una ventosa (Fuentes, 2001, pero el admitido de forma más general es el descrito en Iglesias y otros (2003). Este modelo propone que, tanto para admisión como para expulsión de aire el caudal de la ventosa es

$$Q_{Na} = C\sqrt{\Delta P \cdot P} \quad (1)$$

donde  $Q_{Na}$  es el caudal volumétrico admitido o expulsado por la ventosa medido en condiciones de referencia (normalmente 20°C y presión atmosférica);  $\Delta P$  es la diferencia de presiones entre la entrada y la salida de la ventosa; y  $P$  es la presión del aire en el punto situado aguas arriba del flujo de aire. Esta última presión  $P$  es la presión atmosférica  $P_{atm}$  en el caso de la admisión de aire en la ventosa y es la propia presión del aire en el interior de la tubería en el caso de la expulsión de aire.

En el caso concreto de la admisión del aire, puede considerarse el caudal de admisión medido en condiciones de referencia como una forma de expresar el caudal másico  $G$  admitido por la ventosa. Dicho caudal másico es el producto de la densidad del aire  $\rho$  y del caudal volumétrico de aire  $Q_a$  medido en las condiciones de presión  $P$  en el interior de la conducción. Con estas consideraciones la ecuación característica de la ventosa se puede escribir

$$\rho \cdot Q_a = C_v \sqrt{\Delta H} \quad (2)$$

En la expresión anterior  $C_v$  es un coeficiente característico de la ventosa que incluye el coeficiente  $C$  definido en (1) y  $\Delta H$  es la caída de presión en la ventosa expresada en altura de columna de agua.

La obtención experimental del coeficiente  $C_v$  de la ventosa no es sencilla y la información que ofrecen muchos de los fabricantes de ventosas es en no pocas ocasiones deficiente e imprecisa (Fuentes y otros, 2004). No obstante a modo de ejemplo en la Figura 2 se recoge la curva característica de una ventosa bidimensional.

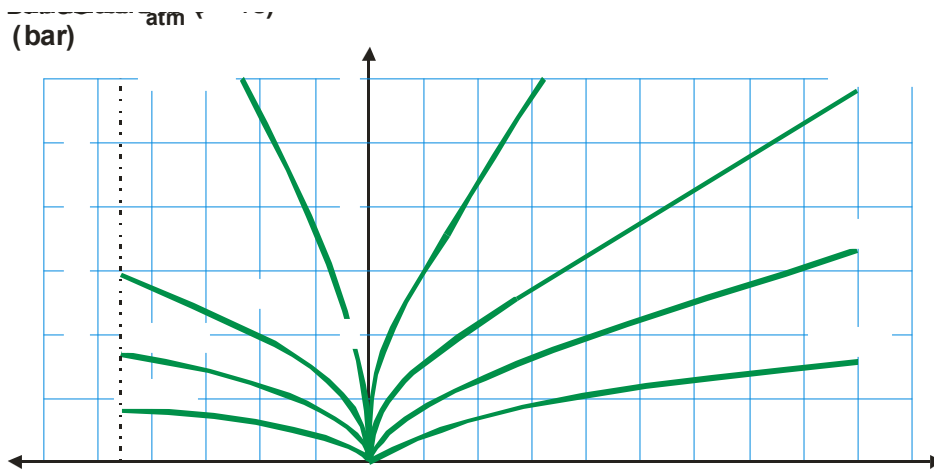


Figura 2. Curva característica de una ventosa.

Para la ventosa DN-150 de la figura anterior, admitiendo una ley de comportamiento como la representada mediante la expresión (2) basta con seleccionar un punto cualquiera de la curva para obtener el valor de  $C_v$ :

$$\left. \begin{array}{l} Q = 1'5 \text{ m}^3 / \text{s} \\ \Delta p = 0'1 \text{ bar} \rightarrow \Delta H = 1'019 \text{ mca} \\ \rho = 1'2 \text{ kg} / \text{m}^3 \end{array} \right\} \rightarrow C_v = \frac{\rho \cdot Q_a}{\sqrt{\Delta H}} = 1'78$$

### Ecuación de continuidad.

En planteamiento de la ecuación de continuidad permite establecer el movimiento tanto de la bolsa de aire como de la columna de agua durante el vaciado de la conducción. Así, en primer lugar se aplica la ecuación de continuidad el aire

$$\rho \cdot Q_a = \rho \cdot A \frac{dx}{dt} + A \cdot x \frac{d\rho}{dt} \quad (3)$$

donde A es la sección transversal de la conducción y x la posición de la frontera de separación entre el aire y el agua medido desde la posición de la ventosa. En este sentido hay que tener en cuenta que se ha optado por el denominado modelo pistón, que supone admitir una frontera fija perpendicular al eje de la tubería. El movimiento real de la frontera es sin duda uno de los problemas más complejos en este tipo de fenómeno. No obstante, el modelo utilizado es reconocido como el más adecuado por la mayoría es especialistas en este tema.

Por otra parte la ecuación de continuidad aplicada al volumen de agua en cada instante es

$$Q = A \frac{dx}{dt} \quad (4)$$

donde Q es el caudal volumétrico de aire que circula en cada instante por la tubería y que desagua a través de la válvula de descarga.

Uniendo las dos ecuaciones anteriores se puede escribir la ecuación que contempla conjuntamente la variación de densidad del aire con el caudal tanto de aire como de agua que circula por la conducción.

$$\rho(Q_a - Q) = A \cdot x \frac{d\rho}{dt} \quad (5)$$

### Ecuación de la energía

Es posible aplicar la ecuación de la energía (ecuación de Euler) entre el punto de entrada del aire y la descarga a la atmósfera realizada al final de la conducción. El planteamiento de dicha ecuación se realiza sobre la base de las siguientes hipótesis:

- La pendiente de la conducción se admite uniforme a lo largo de la totalidad de su longitud L. Dicha pendiente viene dada por el desnivel  $\Delta z_0$  existente entre los puntos extremos de la conducción.
- La presión de la bolsa de aire se admite uniforme en todo momento.
- La apertura de la válvula de descarga se admite se realiza de forma instantánea. Así pasa de una posición completamente cerrada a la posición final en la que su coeficiente de pérdidas K (relación entre la pérdida de carga  $\Delta H_v$  y el caudal Q en la misma) permanece constante.

$$\Delta H_v = K \cdot Q^2 \quad (6)$$

El planteamiento de la ecuación de la energía es

$$\Delta z_0 \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) = \Delta H + R \cdot Q^2 + K \cdot Q^2 + \frac{L-x}{gA} \frac{dQ}{dt} \quad (7)$$

donde el único término no definido de momento es la resistencia R de la conducción en el caso de emplear la expresión de Darcy

$$R = \frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 D^5 g} \quad (8)$$

### Ecuación de comportamiento del aire

Para representar el comportamiento del aire se admite que éste lo realiza como si de un gas perfecto se tratase. En ese caso, la relación entre la presión y la densidad del aire es

$$P^* = \rho R_g T \quad (9)$$

En la expresión anterior  $P^*$  es la presión absoluta del aire en la tubería,  $\rho$  la densidad del aire,  $R_g$  la constante característica del aire y  $T$  la temperatura del mismo que se admite constante durante el proceso de vaciado. Expresando la ecuación característica del gas en función de las variables definidas en el problema

$$\Delta H = \frac{P_{atm}^*}{\gamma} - \rho R_g' T \quad (10)$$

En esta expresión  $R_g'$  es la constante característica adaptada al hecho de que las presiones se han expresado en términos de altura de fluido.

### EL SISTEMA DE ECUACIONES. ADIMENSIONALIZACIÓN DEL MODELO.

El sistema de ecuaciones a resolver es

$$\begin{aligned} 1) \quad & \rho \cdot Q_a = C_v \sqrt{\Delta H} \\ 2) \quad & Q = A \frac{dx}{dt} \\ 3) \quad & \rho(Q_a - Q) = A \cdot x \frac{d\rho}{dt} \\ 4) \quad & \Delta z_0 \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) = \Delta H + R \cdot Q^2 + K \cdot Q^2 + \frac{L-x}{gA} \frac{dQ}{dt} \\ 5) \quad & \Delta H = H_{atm} - \rho R_g' T \end{aligned} \quad (11)$$

donde los valores iniciales de cada una de las cinco variables puestas en juego adoptan los siguientes valores:

- $Q=0$  (el caudal inicial de agua es nulo).
- $Q_a=0$  (el caudal inicial de aire es nulo).
- $x=0$  (la longitud inicial de la bolsa de aire es nula). Esta condición puede originar algunos problemas en el arranque del sistema, si bien se soluciona admitiendo que inicialmente existe una cantidad de aire suficientemente grande para evitar los problemas matemáticos y suficientemente pequeña para considerarlo despreciable respecto del volumen total de agua de la conducción.
- $\Delta H = 0$  (inicialmente se admite que inicialmente al agua en el interior de la conducción se encuentra a la presión atmosférica).
- $\rho=\rho_{atm}$  (Al iniciarse el proceso de vaciado de la conducción se admite que la densidad de la pequeña cantidad de aire en el interior del sistema se encuentra a presión atmosférica, siendo su densidad  $\rho_{atm}$ ).

Un análisis adecuado del sistema requiere expresar las ecuaciones anteriores en forma adimensional. Para ello se refieren todas las magnitudes a una magnitud de referencia que se caracteriza por llevar el subíndice 0:

$$r = \frac{\rho}{\rho_0} \quad q = \frac{Q}{Q_0} \quad \tau = \frac{t}{t_0} \quad s = \frac{x}{L} \quad h = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (12)$$

Con la definición de estos parámetros adimensionales cada una de las ecuaciones del sistema se puede escribir de la forma:

1. Ecuación característica de la ventosa.

$$r \cdot q_a = c_v \sqrt{h} \quad (13)$$

donde  $c_v$  es el coeficiente adimensional de la ventosa, definido como

$$c_v = \frac{C \cdot H_{atm}}{\rho_0 \cdot Q_0} \quad (14)$$

Se adopta como valor de referencia de la densidad el valor correspondiente a la presión atmosférica ( $\rho_0=\rho_{atm}$ ). De esta forma el coeficiente  $c_v$  se define como

$$c_v = \frac{C \cdot R'_g \cdot T}{Q_0} \quad (15)$$

2. Ecuación de continuidad en la columna de agua

$$q = \frac{A \cdot L}{Q_0 \cdot T_0} \frac{ds}{d\tau} \quad (16)$$

Si se define el tiempo de referencia  $T_0$  de la forma

$$T_0 = \frac{Q_0}{A \cdot L} \quad (17)$$

entonces la ecuación se expresa de la forma

$$q = \frac{ds}{d\tau} \quad (18)$$

3. Ecuación de continuidad aplicada a la bolsa de aire

$$r \cdot (q_a - q) = s \frac{dr}{d\tau} \quad (19)$$

4. Ecuación de la energía aplicada al movimiento de la columna de agua

$$(1-s) = \frac{H_{atm}}{\Delta z_0} h + \frac{R \cdot Q_0^2}{\Delta z_0} (1-s) q^2 + \frac{K \cdot Q_0^2}{\Delta z_0} q^2 + \frac{Q_0^2}{g A^2 \Delta z_0} (1-s) \frac{dq}{d\tau} \quad (20)$$

5. Ecuación de los gases perfectos

$$h = 1 - \rho \quad (21)$$

El sistema de ecuaciones en variables adimensionales requiere fijar como se define el caudal de referencia  $Q_0$ . Dicho caudal se define como aquel que circularía por la conducción con la única resistencia de la conducción y la válvula disponiendo tan solo del desnivel  $\Delta z_0$  como energía motriz. Dicho caudal se define como

$$\Delta z_0 = (R + K) \cdot Q_0^2 \rightarrow Q_0 = \sqrt{\frac{\Delta z_0}{R + K}} \quad (22)$$

Para completar la definición del sistema de ecuaciones en forma adimensional se establecen tres parámetros adimensionales:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{H_{atm}}{\Delta z_0} \\ \pi_2 &= \frac{R \cdot Q_0^2}{\Delta z_0} \rightarrow \frac{K \cdot Q_0^2}{\Delta z_0} = 1 - \pi_2 \\ \pi_3 &= \frac{Q_0^2}{g A^2 \Delta z_0} \end{aligned} \quad (23)$$

Finalmente el sistema de ecuaciones en variables adimensionales se escribe



$$\begin{aligned}
 1) \quad & r \cdot q_a = c_v \sqrt{h} \\
 2) \quad & q = \frac{ds}{d\tau} \\
 3) \quad & r \cdot (q_a - q) = s \frac{dr}{d\tau} \\
 4) \quad & (1-s) = \pi_1 \cdot h + \pi_2 (1-s) \cdot q^2 + (1-\pi_2) \cdot q^2 + \pi_3 (1-s) \frac{dq}{d\tau} \\
 5) \quad & h = 1 - r
 \end{aligned} \tag{24}$$

La resolución del sistema de ecuaciones anteriores permite obtener las variables características del sistema. A modo de ejemplo se recoge el caso de una simulación realizada para los valores siguientes de los parámetros adimensionales empleados:

$$c_v = 1 \quad \pi_1 = 1 \quad \pi_2 = 0'7 \quad \pi_3 = 10'091 \tag{25}$$

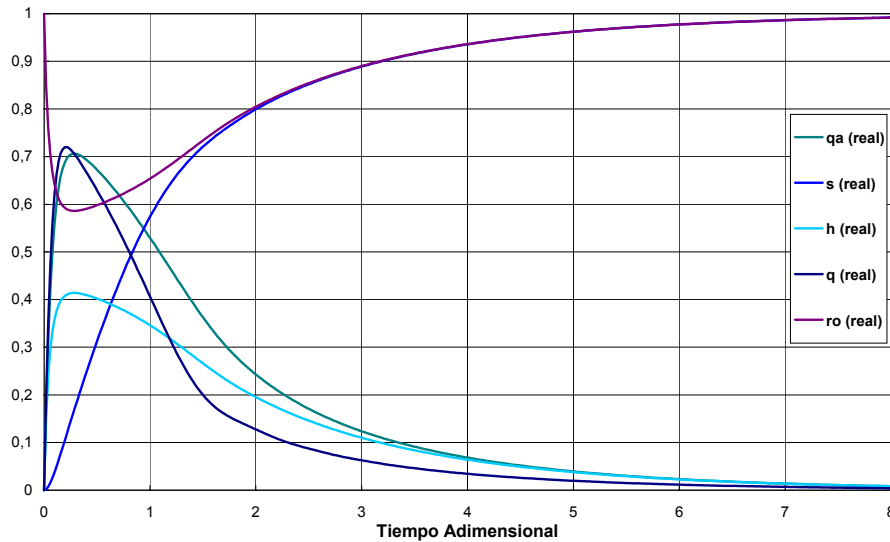


Figura 3. Resultados del modelo completo de vaciado de la conducción.

## DEFINICIÓN DEL MODELO SIMPLIFICADO.

El objeto del trabajo no es presentar un modelo detallado y complejo de modelación del proceso de vaciado de una conducción. Por el contrario, pretende abordarse una forma sencilla y sistemática de determinar para cada ventosa el caudal máximo de aspiración que se va a tener o bien fijar una caída máxima de presión y a partir de la misma determinar el tamaño de ventosa necesaria.

El modelo simplificado propuesto suponer admitir un modelo cuasi-estático de análisis (Iglesias, 2001). Dicho modelo supone despreciable la inercia de la columna en su movimiento. En el caso de que el vaciado de la conducción se realice de forma rápida los resultados obtenidos mediante el modelo elástico no serán adecuados. Al contrario, cuando más lento sea el proceso de vaciado menores serán las diferencias entre el modelo completo y el modelo simplificado.

En el caso analizar un vaciado de la conducción con los mismos parámetros que los recogidos en (25) los resultados obtenidos por el modelo simplificado serían los que se obtienen en la Figura 4. De forma comparativa pueden verse los resultados de ambos modelos en la Figura 5 y con un nivel más de detalle durante los primeros instantes de cálculo en la Figura 6.

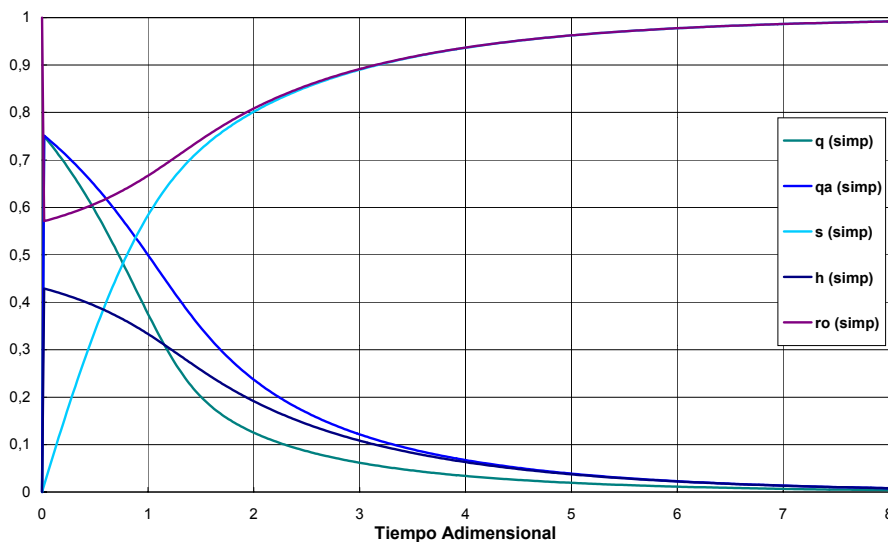


Figura 4. Resultados del modelo completo de vaciado de la conducción.

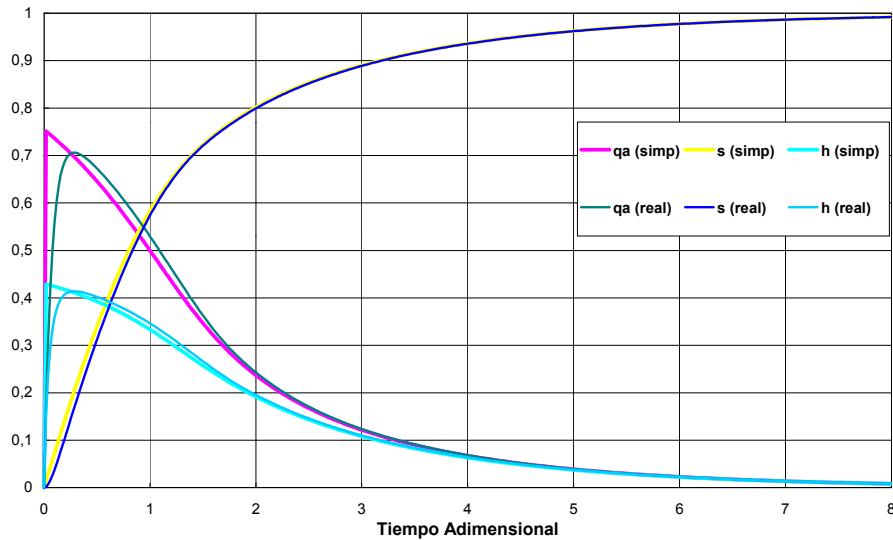


Figura 5. Comparación de las variables principales del modelo completo y el modelo simplificado.

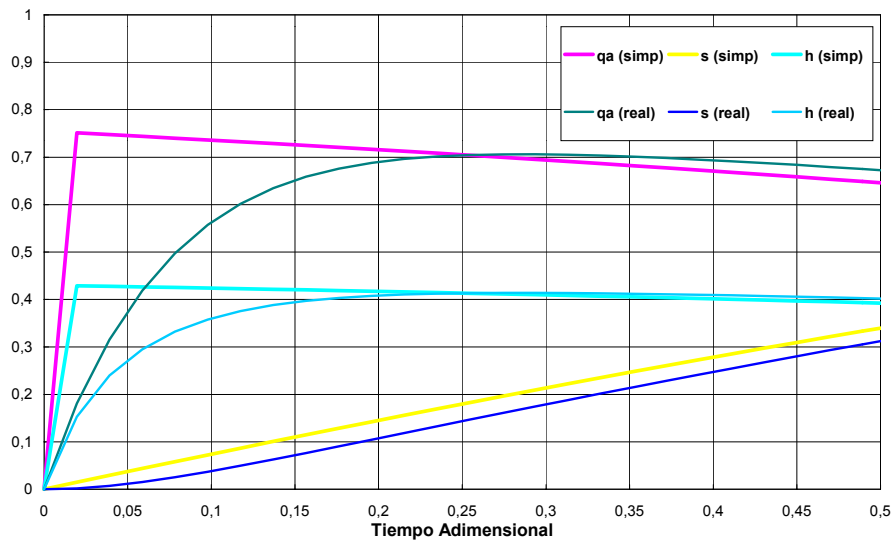


Figura 6. Detalle de la comparación entre modelos de la Figura 5.

Para generalizar el uso del modelo simplificado propuesto se presente obtener el comportamiento del sistema durante los instantes iniciales del fenómeno de vaciado. Es estos instantes es cuando se producen las mayores variaciones de la presión y del caudal en el interior de la conducción y donde se refleja de forma más clara la capacidad de admisión de la ventosa seleccionada.

Durante los instantes iniciales del transitorio el caudal de aire admitido a través de la ventosa es igual al caudal de agua en la conducción. Admitiendo que estas condiciones ocurren exactamente en el instante  $t=0$  es posible encontrar una relación entre diferentes parámetros característicos del sistema en el instante inicial. Estos parámetros relacionados en el instante inicial son los siguientes;

- La caída máxima de presión adimensional que se genera en el sistema. Dicha caída es el valor mínimo de la variable  $h$  definida en la expresión (12).
- El parámetro  $c_v$  que determina la capacidad de admisión de la ventosa.

- El parámetro  $\pi_1$  que determina el desnivel adimensional existente en la conducción.

Empleando entonces el sistema de ecuaciones (24) en las condiciones especificadas se obtiene la relación característica entre los parámetros definidos:

$$C_v^2 = \frac{(1-h)^2}{h} (1 - \pi_1 h) \quad (26)$$

La ecuación anterior permite emplearse en cualquiera de los sentidos siguientes:

- Determinar a partir del desnivel, caracterizado por  $\pi_1$ , y del tamaño de ventosa (parámetro  $c_v$ ) cuál es la máxima depresión que se genera en la conducción e implícitamente el máximo de admisión de la ventosa.
- Determinar a partir del desnivel y de la máxima depresión admisible el tamaño mínimo de ventosa requerido, representado por el valor mínimo del coeficiente adimensional  $c_v$ .
- Determinar para una ventosa dada y una depresión máxima admisible el desnivel necesario para que se produzca el vaciado de acuerdo a dichas condiciones.

Alguna de las soluciones de las situaciones anteriores requieren la resolución iterativa de la expresión (26). Por ello se recoge la misma de forma gráfica (Figura 7) y de forma tabulada (

Tabla 1), lo que permite un tratamiento más rápido y directo de la misma.

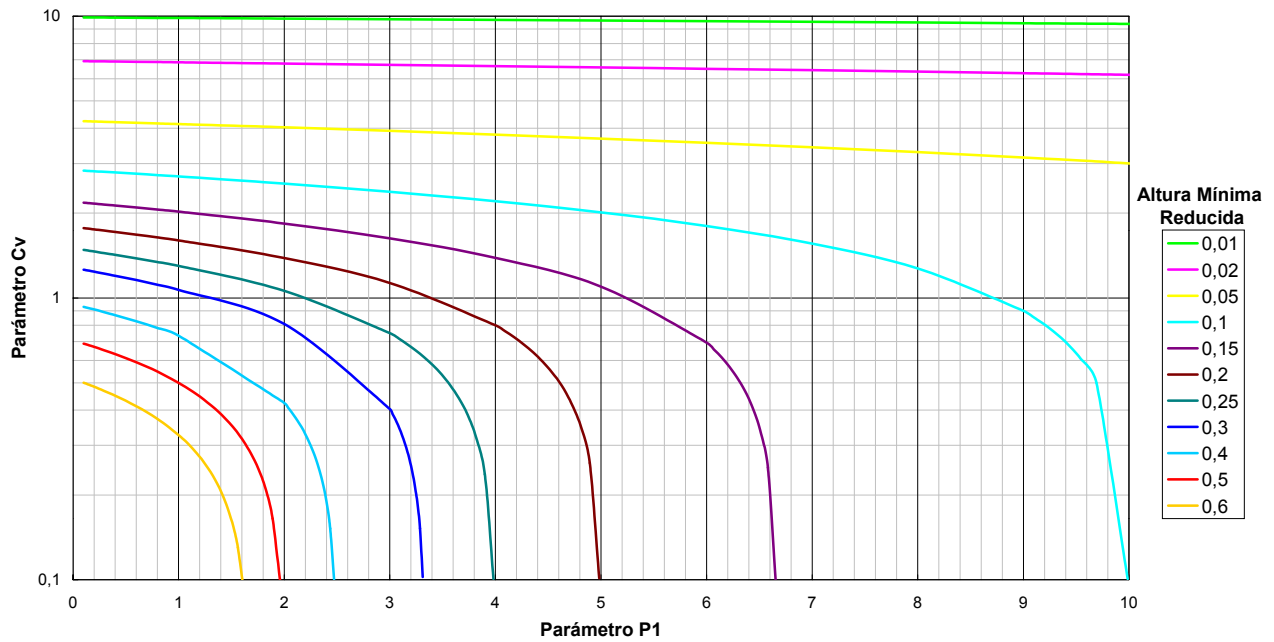


Figura 7. Tabla de depresiones máximas en el modelo simplificado.

Tabla 1. Valores del  $c_v$  en función de la depresión máxima admisible y del parámetro  $\pi_1$ .

$\pi_1$	Valores de la depresión máxima admisible reducida										
	0,01	0,02	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6
0,1	9,895	6,923	4,238	2,832	2,178	1,771	1,481	1,259	0,930	0,689	0,501
0,2	9,890	6,916	4,227	2,817	2,162	1,753	1,462	1,239	0,910	0,671	0,484
0,4	9,880	6,902	4,206	2,789	2,128	1,716	1,423	1,199	0,869	0,632	0,450
0,6	9,870	6,888	4,184	2,759	2,094	1,678	1,383	1,157	0,827	0,592	0,413
0,8	9,860	6,874	4,163	2,730	2,059	1,640	1,342	1,114	0,782	0,548	0,372
1	9,850	6,860	4,141	2,700	2,023	1,600	1,299	1,069	0,735	0,500	0,327
2	9,800	6,790	4,031	2,546	1,836	1,386	1,061	0,808	0,424	0,483	0,316
3	9,750	6,719	3,917	2,381	1,628	1,131	0,750	0,404	0,409	0,464	0,305
4	9,700	6,647	3,800	2,205	1,388	0,800	0,719	0,388	0,392	0,446	0,293
5	9,649	6,574	3,679	2,012	1,097	0,763	0,686	0,371	0,375	0,426	0,281
6	9,598	6,501	3,555	1,800	0,694	0,725	0,651	0,354	0,357	0,405	0,269
7	9,547	6,426	3,425	1,559	0,655	0,684	0,615	0,335	0,339	0,384	0,255
8	9,496	6,351	3,291	1,273	0,614	0,641	0,576	0,316	0,319	0,361	0,242
9	9,444	6,275	3,151	0,900	0,570	0,595	0,535	0,295	0,297	0,336	0,227
10	9,392	6,198	3,004	0,854	0,522	0,545	0,490	0,272	0,275	0,309	0,211
12	9,287	6,041	2,687	0,781	0,469	0,489	0,441	0,248	0,250	0,280	0,194
14	9,181	5,880	2,327	0,700	0,409	0,427	0,385	0,221	0,222	0,248	0,175
16	9,073	5,714	1,900	0,608	0,339	0,353	0,320	0,190	0,190	0,210	0,154
18	8,965	5,544	1,344	0,500	0,250	0,260	0,237	0,152	0,152	0,165	0,130
20	8,855	5,368	0,950	0,101	0,100	0,101	0,101	0,102	0,100	0,100	0,100

## CONCLUSIONES

Para verificar la validez del modelo simplificado de análisis del vaciado de conducciones se han realizado diferentes simulaciones estudiando la diferencia de los resultados obtenidos respecto del modelo completo. Sobre este estudio comparativo se ha analizado la influencia de los diferentes parámetros adimensionales que determinan el comportamiento del modelo. Del análisis de estos parámetros cabe destacar las siguientes conclusiones:

- El simplificado contempla los diferentes parámetros que influyen en el vaciado de una conducción: la capacidad de admisión de la ventosa; la resistencia tanto de la conducción como de la válvula de descarga; y el desnivel existente en la conducción que actúa como energía motriz del sistema.
- La metodología simplificada, admitiendo que los términos de inercia son despreciables, es admisible siempre que la variación del caudal durante el transitorio se realice de una forma pausada y lenta.
- El estudio de los límites de aplicación del modelo simplificado permite establecer que los valores de los parámetros  $c_v$ ,  $\pi_1$  y  $\pi_2$  no influyen en el límite de aplicación del modelo simplificado. El único parámetro que marca el límite de aplicación de ambos modelos es el parámetro  $\pi_3$  que recoge la influencia de la inercia del sistema.

La cuantificación del límite de aplicación de ambos modelos se ha realizado comparando el valor de los caudales máximos admitidos de aire durante el fenómeno transitorio mediante ambos modelos. De esta forma, se admite que el modelo simplificado es adecuado cuando las diferencias de ambos modelos en el caudal son inferiores al 5%. De acuerdo a este criterio en la

- Tabla 2 se recogen los valores máximos que puede adoptar el parámetro  $\pi_3$  para que los resultados obtenidos mediante el modelo simplificado sean válidos.

Tabla 2. Valores límite del parámetro  $\pi_3$  para mantener la validez del modelo simplificado.

$\pi_1$	$\pi_2$	Valores del parámetro $c_v$				
		0,1	0,5	1	5	10
0,1	0,2	0,061	0,065	0,068	0,068	0,068
	0,5	0,087	0,095	0,1	0,102	0,102
	0,7	0,122	0,135	0,145	0,152	0,152
	0,9	0,205	0,24	0,26	0,301	0,301
0,5	0,2	0,037	0,058	0,065	0,067	0,069
	0,5	0,045	0,075	0,086	0,096	0,101
	0,7	0,052	0,092	0,11	0,137	0,147
	0,9	0,062	0,119	0,157	0,234	0,271
1	0,2	0,036	0,059	0,065	0,031	0,039
	0,5	0,039	0,068	0,078	0,043	0,056
	0,7	0,04	0,076	0,091	0,059	0,081
	0,9	0,042	0,085	0,11	0,093	0,143

En definitiva, se dispone de una herramienta simplificada de cálculo del vaciado de conducciones, con una tabla en la que se puede determinar si los resultados obtenidos son válidos o no.

## AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo ha sido posible gracias el Ministerio de Ciencia y Tecnología de España, quién ha financiado el proyecto de investigación titulado *Desarrollo de una herramienta para modelación de sistemas de abastecimiento de agua utilizando sistemas de información geográfica y algoritmos genéticos (MAGIAS)*, cuyo detalle puede verse en Iglesias (2003).

El desarrollo de este trabajo ha sido posible gracias el Ministerio de Educación y Ciencia, quien a través del Programa Nacional de Movilidad de Profesores de Universidad e Investigadores Españoles y Extranjeros, ha permitido la estancia de D. Pedro L. Iglesias Rey en la Universidad Federal de Paraíba. Sin duda algunas de las conclusiones obtenidas en este trabajo provienen de los trabajos relacionados con dicha estancia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J.M., GUARGA, R. E IZQUIERDO, J. (Ed) (1995). Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión. Valencia (España).
- CHAUDHRY, M.H. (1987) Applied hydraulic transients. Ed. Von Nostrand Reinhold Company, New York (U.S.A.).

- FUERTES, V.S. (2001). “Transitorios con aire atrapado”. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.
- FUERTES, V.S.; ARREGUI, F.; CABRERA, E.; IGLESIAS, P.L. (2000). “Experimental setup for entrapped air pockets model validation”. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Pressure Surges. La Haya (Holanda). Abril, 2000.
- FUERTES, V.S.; CABRERA, E.; IZQUIERDO, J.; IGLESIAS, P.L. (1999). “Peak pressure evaluation in pipelines with entrapped pockets”. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference. San Francisco (EEUU).
- FUERTES, V.S., IGLESIAS, P.L., MARTÍNEZ, F.J., PÉREZ, R. (2003). “Caracterización hidráulica de las ventosas mediante ensayos estáticos”. Revista Tecnología del Agua. Editorial Elsevier Prensa, S.A., Vol. XXIII, pp. 52-59.
- IGLESIAS, P.L. (2001). “Modelo general de análisis de redes hidráulicas a presión en régimen transitorio”. Tesis Doctoral – Dpto. Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.
- IGLESIAS, P.L.; FUERTES, V.S.; IZQUIERDO, J.; MARTÍNEZ, F.J. (2003). “Elementos y dispositivos para el control de transitorios en sistemas de abastecimiento”. Cap 18. del libro Ingeniería Hidráulica en los Abastecimientos de Agua. Ed. GMMF – Universidad Politécnica de Valencia.
- IGLESIAS, P. L. (2003). “Desarrollo de una herramienta para modelación de sistemas de abastecimiento de agua utilizando sistemas de información geográfica y algoritmos genéticos (MAGIAS)”. Memoria del Proyecto de Investigación nº DPI2003-02676 del Ministerio de Ciencia y Tecnología (España).
- IZQUIERDO, J.; FUERTES, V.S.; CABRERA, E.; IGLESIAS, P.L.; GARCIA-SERRA, J. (1999). “Pipeline start-up with entrapped air”. Journal of Hydraulics Research. Vol 37. pp. 579-590.
- WYLIE, E.B. AND STREETER V.L. (1993). Fluid Transients in Systems. Prentice Hall. Englewood Cliffs. New York.