



# ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE BOMBEO SIFÓNICOS DE DRENAJE EN DIFERENTES CONDICIONES DE CARGA

Oscar E. Coronado Hernandez<sup>1</sup>, V.S. Fuertes-Miquel<sup>2</sup>, Francisco-José  
García-Mares<sup>3</sup>, G. Lopez-Patiño<sup>4</sup>

<sup>2,3,4</sup>Dpto. Ing. Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de Valencia  
/Camino de Vera, s/n. 46022. Valencia. España

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Bolívar / Parque Industrial y  
Tecnológico Carlos Vélez Pombo, Km 1, Vía Turbaco. Cartagena. Colombia

<sup>4</sup>[glpatin@upv.es](mailto:glpatin@upv.es)

## RESUMEN

Las redes urbanas de drenaje funcionan, cuando la orografía lo permite, por gravedad. Sin embargo, cuando el terreno presenta contrapendientes pronunciadas, puede ser necesario realizar bombeos en la red. En la disposición del sistema de bombeo es habitual que se generen sifones en las conducciones, con los consiguientes problemas que ello conlleva.

Este trabajo presenta como objetivo el análisis de la influencia que tienen determinados parámetros en el comportamiento de los sistemas de bombeo en redes de drenaje cuando hay sifones en la instalación.

Se va a analizar lo que sucede en la impulsión según el caudal de impulsión, la influencia que tiene el diámetro de la conducción del tramo descendente de sifón en el posible funcionamiento bifásico del sistema, y la influencia del desnivel geométrico en el funcionamiento del conjunto estación de bombeo-sifón.

### Palabras clave

Estación de bombeo, red de saneamiento, sifón

## 1. INTRODUCCIÓN

Las redes de drenaje funcionan, de forma general, en régimen de lámina libre por gravedad aprovechando el desnivel del terreno. Sin embargo, en algunos puntos de la red, de forma localizada, y debido a la orografía, no es posible el transporte del fluido por gravedad y es necesario realizar bombeos.

La ubicación de las cámaras de carga y descarga del sistema de bombeo están muy condicionadas por el trazado de la propia red, de tal forma que los desniveles geométricos que tiene que vencer el sistema de bombeo pueden resultar tanto positivos como negativos. En cualquiera de las situaciones es muy normal que se genere un sifón en el bombeo.

## SMART WATER:

## Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Si el desnivel es negativo, una vez vencido el sifón, se produce el vaciado de la cámara de carga sobre la descarga cuando las bombas están paradas, con el consiguiente arrastre de las mismas.

Por otro lado, el generarse un punto elevado, se va a acumular en la cresta el aire atrapado que pueda existir en la instalación. La salida del aire durante el llenado de la conducción puede provocar sobrepresiones en el bombeo [1] así como fluctuaciones en la pérdida de carga y por tanto en el funcionamiento del sistema [2]. Igualmente, la entrada de aire durante la parada de la bomba es un fenómeno ampliamente estudiado [3][4][5][6] que produce depresiones en las conducciones si la instalación no está correctamente diseñada.

En ambos problemas, para evitar problemas se disponen, en la cresta del sifón, válvulas de aireación [7][8] que permiten el vaciado del aire atrapado y la entrada de aire al generarse la depresión en la parada de bomba.

El fenómeno del aire atrapado se aborda para el transitorio hidráulico que se produce durante las maniobras de la bomba considerando que, en el régimen estacionario, el sistema de bombeo queda todo él funcionando en presión.

Sin embargo, el propio flujo bifásico puede propiciar que tales condiciones no se lleguen a alcanzar. La presencia de la válvula de aireación provoca que la conducción del tramo ascendente del sistema de bombeo se encuentre en presión mientras que la del tramo descendente este vacía. En realidad, hay dos sistemas hidráulicos independientes mientras que no se ceba la conducción descendente.

En ese trabajo se analiza el comportamiento en régimen quasi-estático del sistema de bombeo en condiciones de flujo bifásico durante cada una de las sucesivas fases de funcionamiento: arranque de la bomba a válvula cerrada, arranque de la bomba con válvula abierta, funcionamiento estable en modo bifásico, y funcionamiento estable con todas las conducciones en presión.

Se realiza un análisis de la influencia que tienen algunos parámetros en el comportamiento del sistema de bombeo en estas fases: caudal de diseño, caudal del tramo en lámina libre, diámetro de las conducciones, y desnivel geométrico.

## 2. METODOLOGÍA

El funcionamiento de un sistema de bombeo simple entre dos depósitos con una única conducción viene definido por la aplicación de la ecuación de la energía extendida, entre los puntos de aspiración y de impulsión de las bombas.

$$\frac{p_{in}}{\gamma} + \frac{v_{in}^2}{2g} + z_{in} + w_b - \sum h_f - \sum h_m = \frac{p_{out}}{\gamma} + \frac{v_{out}^2}{2g} + z_{out} \quad (1)$$

Donde  $w_b$  es la potencia específica del equipo de bombeo,  $h_f$  es la pérdida de carga en conducciones, y  $h_m$  es la pérdida de carga en elementos singulares.

Dicha potencia específica se puede ajustar a una función parabólica dependiente del caudal impulsado por la bomba en condiciones nominales.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

$$w_b = \frac{W_b}{\gamma Q_b} = \gamma Q_b h_b \frac{1}{\gamma Q_b} = h_b; \quad h_b = A + BQ_b + CQ_b^2 \quad (2)$$

En un sistema de bombeo sifónico puede existir flujo bifásico en el tramo descendente del sistema por lo que las pérdidas de carga en estas conducciones bien pueden ser las correspondientes a un flujo a presión, calculadas con la ecuación de Darcy-Weisbach (3) y/o las correspondientes a un flujo uniforme en lámina libre, calculadas por la ecuación de Manning (4).

$$\sum h_{f,p} = \sum f_i \frac{L_i v_i |v_i|}{D_i 2g} = \sum f_i \frac{L_i}{D_i} \frac{16 Q_i^2}{\pi^2 D_i^4 2g} \quad (3)$$

$$\sum h_{f,l} = z_{in,i} - z_{out,i} = \sum \left( n_i \frac{20,16}{D_i^{8/3}} \frac{\varphi^{2/3}}{(\varphi - \text{sen}\varphi)^{5/3}} \right)^2 Q_i^2 \quad (4)$$

Donde, n es el coeficiente de Manning,  $\varphi$  es el ángulo del sector circular ocupado por el agua en la conducción

Durante el proceso de arranque/parada de la bomba, su velocidad de giro difiere de las nominales según las leyes de afinidad/ semejanza, ecuación (5), de tal forma que el caudal y la altura que aporta el equipo no se corresponden con las de funcionamiento en condiciones de servicio.

$$\frac{Q_{b,N}}{Q_{b,N0}} = \frac{N}{N_0} = \alpha \quad \frac{h_{b,N}}{h_{b,N0}} = \left( \frac{N}{N_0} \right)^2 = \alpha^2 \quad (5)$$

El proceso de análisis del sistema de bombeo que se propone consiste en determinar las condiciones de funcionamiento del sistema.

Para recrear posibles situaciones se ha realizado un modelo a escala de un sistema de bombeo sifónico en el laboratorio, tal y como puede verse en la Figura 1. En dicho modelo se trabaja con agua limpia.



Figura 1. Instalación de laboratorio

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

El equipo de bombeo está dotado de un variador de frecuencia de tal forma que se puede trabajar con diferentes curvas de bombeo, y por tanto con diferentes caudales de impulsión.

Se dispone de una válvula de aireación en la cresta del sifón, que se puede mantener abierta o cerrada. Por último, se puede modificar la pendiente del tramo descendente del sistema de bombeo, de tal forma que se pueden simular diferentes alturas geométricas de bombeo.

Del análisis de situaciones, se distinguen diferentes fases en el funcionamiento del sistema sifónico de bombeo.

Fase 0. Sistema de bombeo parado.

Al pararse el equipo de bombeo, tras cualquier modo de funcionamiento, se cierra la válvula de retención. Su presencia impide el vaciado de las conducciones hacia el lado de la bomba y la cámara de carga.

Por el contrario, la válvula de aireación abierta permite que entre aire y se vacíe el tramo descendente, siguiendo un proceso de vaciado de la conducción. Como se ha indicado, la problemática de este proceso es un fenómeno bien estudiado y no se va a abordar en este trabajo.

De este modo, la situación de partida para cualquier nuevo arranque es que la instalación queda llena de agua desde la aspiración hasta la cresta del sifón, y llena de aire entre la cresta del sifón y la cámara de descarga.

Fase A. Arranque de la bomba a válvula cerrada

La bomba comienza a girar aportando menor altura que el desnivel geométrico entre el nivel de la cámara de aspiración y la posición de la ventosa. La válvula de retención permanece cerrada en esas condiciones.

La bomba trabaja contra el par resistente mecánico que ofrecen sus masas rotantes,  $T_r$ , pero no hay par resistente hidráulico. La bomba se acelera rápidamente.

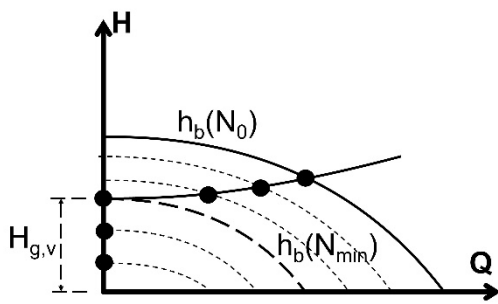


Figura 2. Fases A y B. Arranque de bomba a válvula cerrada, y válvula abierta

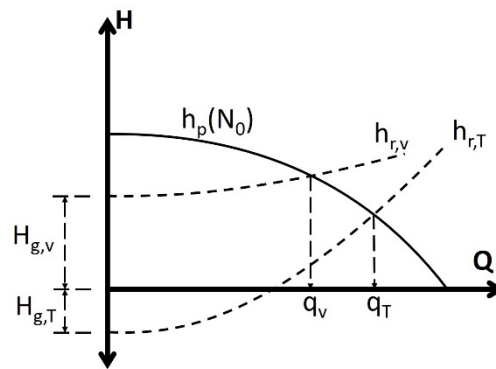


Figura 3. Condiciones de funcionamiento del sistema de bombeo

Fase B. Arranque de la bomba a válvula abierta.

La velocidad de la bomba aumenta hasta que se alcanza la velocidad mínima de apertura de la válvula de retención

## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

$$N_{min} = N_0 \sqrt{\frac{H_{g,v}}{A}} \quad (6)$$

A partir de este instante se comienza a impulsar caudal por la instalación. El caudal va a aumentar con el aumento de la velocidad de giro. Finalmente, la bomba alcanza su velocidad nominal,  $N_0$ . Durante esta fase, se transporta caudal por el tramo descendente del sistema de bombeo.

En el momento de alcanzarse la velocidad nominal de giro las condiciones de funcionamiento de la bomba son para vencer el desnivel geométrico  $H_{g,v}$ , en la Figura 3, y compensar las pérdidas de carga del tramo ascendente, impulsando el caudal  $q_v$  de la Figura 3. Por el tramo descendente, independiente del anterior, el transporte se realiza por gravedad.

Fase Ca. Estabilización del bombeo a desnivel máximo

El caudal que se transporta en lámina libre,  $q_m$ , es:

$$q_m = \frac{0,312}{n} \left( \frac{z_{in} - z_{out}}{L_m} \right)^{1/2} D^{8/3} \quad (7)$$

Si el caudal de funcionamiento del sistema de bombeo en el momento de alcanzarse su velocidad nominal de giro,  $q_v$ , es inferior al caudal  $q_m$ , la instalación se estabiliza para impulsar  $q_v$ . El tramo descendente no se ceba por completo y no se llega a impulsar el caudal máximo posible, tal y como puede observar en la Figura 4

Si el caudal de diseño se ha establecido en el valor de  $q_T$ , la instalación entrará en defecto al no alcanzarse a impulsar dicho valor.



Figura 4. Flujo en el tramo descendente

Si el caudal de diseño se ha establecido en el valor de  $q_v$ , la instalación está sobredimensionada puesto que, con un diseño adecuado, sería posible impulsar más caudal que ese. O lo que es lo mismo, se podría haber instalado un sistema más pequeño y económico.

Fase Cb. Estabilización del bombeo a desnivel mínimo.

Para que la instalación se estabilice funcionando toda ella en presión, el caudal en lámina libre,  $q_m$ , tiene que ser menor que  $q_v$  y que  $q_T$ .

## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

En tal caso, el tramo descendente del sistema de bombeo se va cebando poco a poco. La duración de esta fase depende mucho de la capacidad de evacuación del aire atrapado [6]. El funcionamiento de la instalación se estabilizará impulsando a un caudal  $q_T$  con las conducciones completamente cebadas.

La instalación estará bien dimensionada si se establece como condición de diseño de ésta el caudal  $q_T$ , pero estará mal dimensionada para cualquier otra situación.

### 3. RESULTADOS

El análisis propuesto se va a aplicar sobre una instalación en proyecto. Se trata de una renovación de una zona de la red de aguas residuales en un municipio de la provincia de Valencia.

La orografía favorece la circulación del sistema de drenaje por gravedad desde las acometidas hacia la estación depuradora de aguas residuales excepto en un pequeño tramo en el que se requiere de su bombeo. En la Figura 5 se representa un esquema del sistema de bombeo proyectado. La bomba arranca cuando el nivel del agua en la cámara de carga está a la cota 441 m. y para cuando se alcanza el nivel de 440 m. En la cresta del sifón se ha instalado una válvula de aireación.

La impulsión se produce en una cámara de descarga atmosférica. Se va a estudiar lo que sucede situando la cota de descarga en diferentes puntos de la instalación.

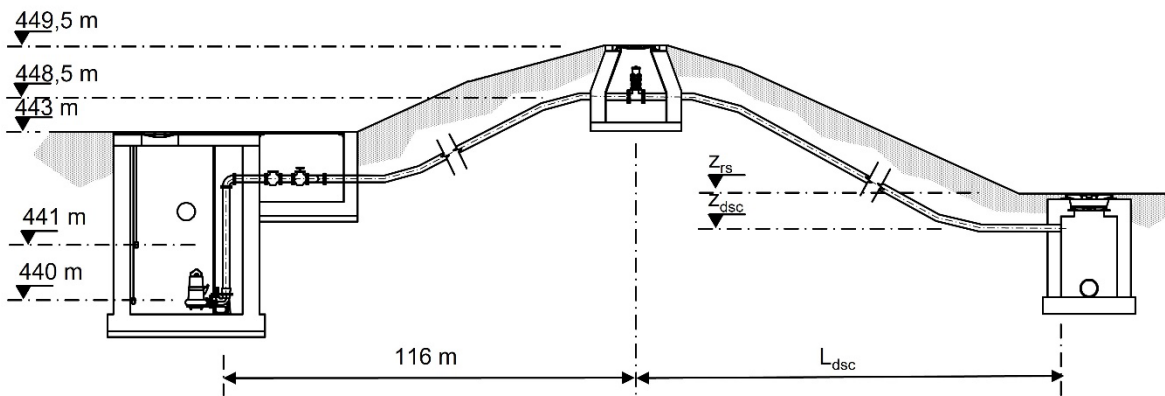


Figura 5. Esquema del sistema de bombeo

Las condiciones del sistema de bombeo proyectado son: caudal de diseño de la bomba igual al caudal máximo de aportación desde la red a la cámara de carga de 4,68 m<sup>3</sup>/h, y altura geométrica de bombeo de 7,5 m. hasta la cresta del sifón. Se ha dimensionado la conducción, tanto ascendente como descendente, con un diámetro nominal de 90 mm, interior de 79,2 mm. Se ha seleccionado un equipo de bombeo con bomba sumergible para las condiciones de diseño.

Los resultados de las diferentes alternativas propuestas se muestran en la Tabla 1. A efectos de cálculo, se va a considerar que el nivel del agua en la cámara de aspiración es el nivel medio entre el punto de arranque y parada de la bomba, y un coeficiente de Manning de 0,009 habitual es las conducciones de PVC en funcionamiento.

## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Tabla 1. Alternativas propuestas

| Alternativa | $Z_{dsc}$<br>(m) | $H_{g,T}$<br>(m) | $S_0$<br>(%) | $L_{dsc}$<br>(m) | $q_m$<br>(l/s) | $q_v$<br>(l/s) | $q_r$<br>(l/s) | Cebado |
|-------------|------------------|------------------|--------------|------------------|----------------|----------------|----------------|--------|
| I           | 442              | > 0              | 5,9          | 110              | 9,7            | 1,3            | 2,33           | NO     |
| II          | 440,5            | = 0              | 6,66         | 120              | 10,3           | 1,3            | 2,46           | NO     |
| III         | 439              | < 0              | 6,66         | 142,5            | 10,3           | 1,3            | 2,63           | NO     |
| IV          | 439              | < 0              | 7,9          | 120              | 11,3           | 1,3            | 2,64           | NO     |

En ninguna de las alternativas el sistema se llega a cebar en algún momento en el tramo descendente por lo que, efectivamente, la instalación se estabiliza en las condiciones de la Fase Ca indicadas anteriormente, tal y como ha sido diseñado.

No obstante, y como se ha indicado, la instalación está sobredimensionada. Para mejorarla se puede, por un lado, reducir el diámetro de la conducción del tramo descendente del sistema de bombeo. Por otro lado, se puede eliminar directamente ese tramo ubicando la cámara de descarga en la cresta del sifón.

La opción de reducir el diámetro del tramo descendente se puede usar si las aguas son sólo pluviales. Si, además, se bombea agua residual, esta posibilidad depende del tamaño del sólido que admita la bomba. En cualquier caso, el diámetro del tramo descendente, haciendo que el  $q_m$  coincida con el caudal de diseño del bombeo para las diferentes alternativas, es el indicado en la Tabla 2

Tabla 2. Diámetro teórico más adecuado del tramo descendente

| Alternativa | $q_d$<br>(l/s) | $q_m$<br>(l/s) | $S_0$<br>(%) | $\varnothing_t$<br>(mm) | $\varnothing_{comercial}$<br>(mm) |
|-------------|----------------|----------------|--------------|-------------------------|-----------------------------------|
| I           | 1,3            | 1,3            | 5,9          | 37.5                    | 50                                |
| II          | 1,3            | 1,3            | 6,66         | 36.5                    | 40                                |
| III         | 1,3            | 1,3            | 6,66         | 36.5                    | 40                                |
| IV          | 1,3            | 1,3            | 7,9          | 35                      | 40                                |

En todas las alternativas el diámetro resulta demasiado pequeño para el transporte de aguas residuales con sólidos en suspensión, como es el caso, pero si resultaría adecuado si sólo se transportaran aguas pluviales.

Resulta más apropiado la ubicación de la cámara de carga en la cresta del sifón, manteniendo las dimensiones proyectadas. Se elimina de este modo la necesidad de instalación de un tramo descendente que trabaje en flujo bifásico y los problemas que ello puede llevar asociados.

#### 4. CONCLUSIONES

Los sistemas de bombeo sifónicos necesitan de la instalación, en su cresta, de válvulas de aireación para evitar problemas de aire atrapado y arrastre de bombas. En la mayoría de las ocasiones se instalan ventosas, pero se comportan mejor las válvulas de aireación automatizadas según el funcionamiento de las bombas.

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Para que el sistema funcione de forma adecuada el diseño de la instalación se debe tener en cuenta el caudal  $q_m$  de lámina libre en relación con los caudales de impulsión,  $q_v$  y  $q_T$ .

Si  $q_m$  es mayor que  $q_v$ , la instalación está, en general, sobredimensionada, y la/s bomba/s funcionarán contra el desnivel de la cresta del sifón. El tramo descendente del bombeo funciona en lámina libre.

Si  $q_m$  es menor que  $q_v$  y  $q_T$ , entonces el bombeo debe diseñarse considerando el desnivel de la cámara de descarga y el caudal con todas las conducciones a presión.

El mejor diseño posible debe considerar que el caudal aportado a la cámara de carga, el de diseño, debe ser igual a  $q_m$  y este debería ser igual a  $q_T$ .

**Nomenclatura**

|           |   |
|-----------|---|
| $q_m$     | caudal máximo medio transportado en condiciones de lámina libre con flujo uniforme a tubería circular completamente llena |
| $q_v$     | caudal de funcionamiento del sistema de bombeo con desnivel hasta la cresta del sifón                                     |
| $q_T$     | caudal de funcionamiento con el sistema completamente cebado  |
| $H_{g,v}$ | Desnivel geométrico entre la cámara de carga y la cresta del sifón  |
| $H_{g,T}$ | Desnivel geométrico entre la cámara de carga y la de descarga   |

**REFERENCIAS**

- [1] F. Zhou, F. Hicks, P. Steffler, “Effects of trapped air during rapid filling of partially full pipes” Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering. Montreal, 2002, pp. 1-10
- [2] L. Zhou, H. Wang, B. Karney, D. Liu, P. Wang, and S. Guo, “Dynamic behavior of entrapped air pocket in a water filling pipeline” J. Hydraul. Eng., vol. 144, no. 8, Aug. 2018, doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001491.
- [3] Martin, C. S. “Entrapped air in pipelines”. Second International Conference on Pressure Surges. London: BHR, 1976, pp. F2/15-28
- [4] Abreu, J.M. et al., Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión, 1ra ed., Valencia: UPV, ISBN: 84-600-9146-5, 1995.
- [5] Oscar E. Coronado-Hernández, Vicente S. Fuertes-Miquel, Mohsen Besharat & Helena M. Ramos “Subatmospheric pressure in a water draining pipeline with an air pocket” Urban Water Journal, 15:4, 346-352. 2018, doi: 10.1080/1573062X.2018.1475578
- [6] Vicente S. Fuertes-Miquel, Oscar E. Coronado-Hernández, Daniel Mora-Meliá & Pedro L. Iglesias-Rey, “Hydraulic modeling during filling and emptying processes



**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

in pressurized pipelines: a literature review” Urban Water Journal, vol. 16, nº4. 2019, pp. 299-311, doi: 10.1080/1573062X.2019.1669188

- [7] R. R. Copeland, “Pointe Coupee pumping station siphon upper Pointe Coupee loop area, Louisiana”. Technical report HL-82-21. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. 1982.
- [8] R. R. Copeland “McGEE Creek pumping station siphon Pike County, Illinois”. Technical report HL-82-23. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station. 1982