

LA DEMANDA DE AIRE EN LOS SIFONES REGULABLES

Cristóbal Mateos Iguácel

Universidad Politécnica de Madrid, UPM

vereniko@gmail.com

Víctor Elviro García

CEDEX, Centro de Estudios Hidrográficos

victor.elviro@cedex.es

Dolores Cordero Page

CEDEX, Centro de Estudios Hidrográficos

dolores.cordero@cedex.es

Tamara Ramos del Rosario

CEDEX, Centro de Estudios Hidrográficos

tamara.ramos@cedex.es

1 Introducción

Se ha analizado en otros lugares [3] [4] [5] [6] [7] y [8], como la entrada de aire en el interior de un sifón podía conducir a que en lugar de ser un dispositivo de todo o nada tuviese una mayor flexibilidad. Se puede así conseguir que el caudal que se extraiga del embalse guarde una relación adecuada con el caudal entrante en el embalse y con el nivel del mismo.

El mecanismo de control de la entrada de aire puede adoptar variadas formas, dependiendo la elección de los fines a conseguir. Entre las distintas formas de control se considera que, en la mayoría de los casos, es especialmente ventajoso el que hemos denominado control de segundo orden. En éste, que se encuentra representado en la figura 1, la ventaja fundamental reside en que la tipología de sus leyes de desagüe, una muestra de las cuales se recoge en la figura 2, es cómoda de clasificar y de operar pudiéndose fácilmente escoger e imponer al sifón aquella de esas leyes de desagüe que, en cada etapa de la explotación, se considere la más adecuada.

Otra ventaja del control de segundo orden es que para poder calcular y trazar las citadas leyes de desagüe se necesita un conocimiento más somero de algunos aspectos de lo que sucede en el interior del sifón que el conocimiento que hace falta en otros sifones con aireación. Pues en realidad, a diferencia de lo que sucede en otros tipos de control, el cálculo de esas leyes parte de la existencia de una relación puramente hidráulica (y relativamente fácil de determinar) entre: nivel en el embalse, presión de aire dentro del sifón y caudal saliente. Limitándose la intervención del dispositivo de control a que la presión en el interior del sifón sea la adecuada a la ley de desagüe escogida y asignada en cada etapa de la explotación de la presa (objetivo que, claro está, puede haber cambiado de una ocasión a otra). Ello se consigue logrando la entrada de aire (en el interior del sifón) en la cuantía adecuada al fin pretendido pero sin que se haga necesario saber cuanto aire entra sino solo que en efecto y de forma automática se ha conseguido la presión de aire que en cada caso sea necesaria.

Por el contrario los otros tipos de control precisan (con matices) para su cuantificación de la estimación simultánea del flujo de agua y del flujo de aire. Es a estos últimos casos a los que se va a dirigir la atención en este trabajo. Ello se hace no solo por el interés de cuantificar la demanda de aire en esos casos especiales como herramienta para conocer el caudal líquido, sino también porque hay casos en los que la información sobre la cantidad de aire aportado puede ser relevante en algún aspecto como calados aguas abajo o protección frente al desgaste. Pero para una mejor comprensión de lo que seguirá se estima adecuado empezar por ver como se enfoca el caso del control de segundo orden y como en él se elude esa necesidad de saber la cuantía del aire entrante.

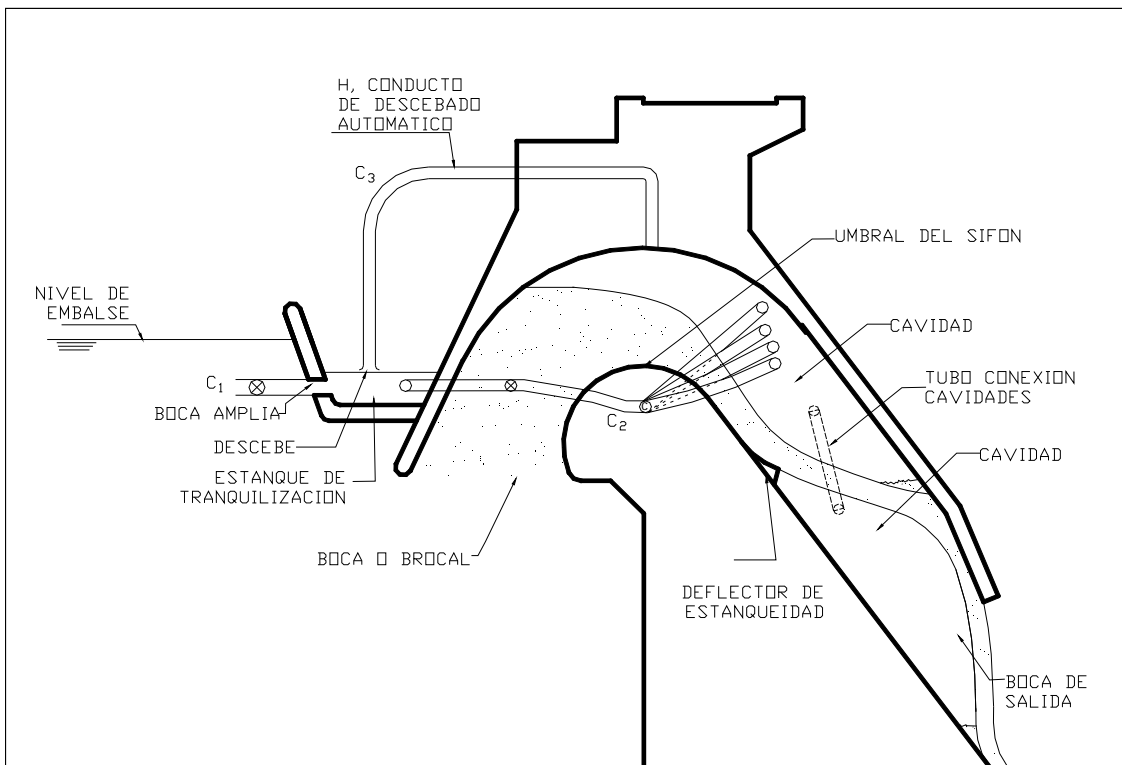


Figura 1 Sifón con control de segundo orden

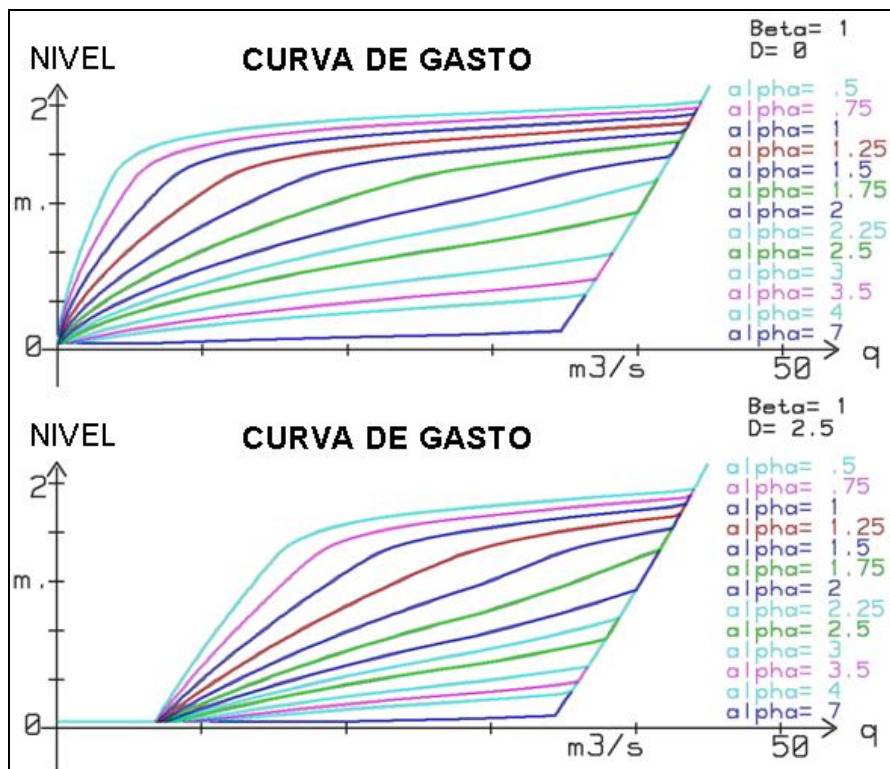


Figura 2 Curvas de Gasto

2 Funcionamiento del control de segundo orden

El elemento especial del control de segundo orden es el vaso anejo al sifón que cuando el nivel del embalse lo permite recibe agua de éste por medio de un conducto C1 (ver figura 1) que desemboca en la parte inferior del vaso. Asimismo el vaso comunica por su parte inferior con el interior del sifón por otro conducto C2. El conducto C2 tiene varias bocas de salida al sifón pudiéndose en la regulación optar y decidir cual de esas descargas va a ser la operativa. La entrada en mayor o menor grado de aire al sifón se produce por medio de un conducto C3 que termina en la parte alta de este y cuya boca de admisión de aire esta situada en el interior del vaso. Esta boca de admisión puede, según determinen las circunstancias del proceso de control, encontrarse anegada por ser alto el nivel que alcance el agua en el vaso y en tal caso no accede aire al sifón o bien puede suceder que el nivel que el agua alcance en el vaso sea inferior a la cota de la boca de aireación en cuyo caso se permite la entrada de aire al sifón (si éste lo demanda). Esta entrada de aire se verá tanto más facilitada cuanto mayor sea la distancia entre la boca de entrada de aire y el nivel del agua en el vaso. Los conductos C1 y C2 son los que, por medio de sendas válvulas, regulan el nivel del agua en el vaso y con ello condicionan la mayor o menor entrada de aire en el interior del sifón. Conviene aquí anticipar que, al menos en las situaciones de más interés, si entra aire al sifón el agua del vaso se encontrará bastante cercana de la boca de admisión de aire y por supuesto bajo ella. Es decir el nivel en el vaso en tal caso es conocido con un reducido margen de error (que además se puede acotar). Supuestos fijados en las posiciones (deducidas por consideraciones que luego se expondrán) que se hayan considerado adecuadas las reducciones de sección de las válvulas de C1 y C2 y una vez seleccionada la boca con la que C2 descarga al sifón se está en condiciones de deducir cual será la ley que relaciona (para esa posición) el nivel de embalse con el caudal que saldrá por el sifón.

Para ello conviene empezar por advertir que si el nivel de embalse ha alcanzado una cota ligeramente superior a la del umbral del sifón sucederán inicialmente varias cosas: a) la cota en el vaso de regulación será prácticamente la del embalse pues entra libremente desde éste (con mayor o menor celeridad según el caso) y no sale toda vez que la boca de descarga de agua del vaso al sifón está situada por encima del nivel de embalse de ese momento y todavía no hay depresión en el sifón. b) al haber cierre hidráulico en el sifón se irá sacando aire de él y habrá una depresión creciente en el sifón, lo que permitirá primero que se retire agua del vaso, luego que esta extracción vaya creciendo hasta que supere el caudal líquido entrante en el vaso de manera que paulatinamente se reduzca el nivel en dicho vaso y se produzca una entrada de aire al sifón que aminore la depresión. El equilibrio se alcanzará cuando por un lado la cantidad de agua que entra al vaso iguale a la que sale y por otro que eso se consiga con un nivel de agua en el vaso que sea lo suficientemente alto como para que la entrada de aire al sifón sea la que iguale al flujo de aire que sale arrastrado por el funcionamiento del sifón. Para cuando se alcanza el equilibrio se sabe así: 1) cual es el nivel que el agua alcanza en el vaso (levemente inferior a la cota de la boca de acceso del aire al sifón), 2) cuanta agua entra del embalse al vaso (comparando ese nivel con la cota de embalse), 3) que depresión hay en el interior del sifón (pues esta tiene que ser la precisa para que el flujo saliente del vaso iguale al entrante). Se tiene así una relación directa entre nivel de embalse y depresión reinante en las cámaras de aire dentro del sifón. Con esta depresión y el nivel de embalse se puede, (con un análisis exclusivamente hidráulico) calcular el caudal saliente por el sifón y en definitiva se puede considerando varios niveles de embalse, obtener la ley niveles de embalse - caudales líquidos salientes para esa situación del mecanismo de control. Leyes análogas se pueden obtener para las distintas situaciones en los órganos de regulación. Todo ello no solo se hace sin conocer cual es el flujo de aire, sino que además tampoco parece fácil determinarlo. Pues ni se puede estimar por el flujo de entrada de aire pues aunque se conoce la presión en ambos extremos no se conoce la resistencia al flujo por no conocerse (con la precisión que para este asunto haría falta) la cota del agua en el vaso, ni tampoco parece factible, sin un complemento experimental, saber cuanto aire es capaz de retirar el flujo del agua del sifón.

3 El flujo líquido y la demanda de aire en un sifón con un conducto fijo de aireación

Ciertamente si un sifón, como el de la figura 3, tiene un conducto que permita una entrada libre de aire en todo momento resultará que no será posible su cebado cuando el nivel de embalse supere solo en unos centímetros o decímetros el umbral del sifón y se pierda así la facultad más interesante de los sifones. Pero lo que se desea analizar aquí no es el mecanismo o proceso para llegar al cebado sino que, una vez conseguido este (por ejemplo cerrando momentáneamente la válvula de admisión de aire de la figura 3) saber estimar con una aproximación razonable cuales son los flujos de agua y aire que resultaran para un determinado nivel de embalse y una

determinada geometría y situación del conducto de admisión de aire y en particular una vez fijado el grado de apertura con el que se quiere que opere la válvula de admisión de aire de la figura 3.

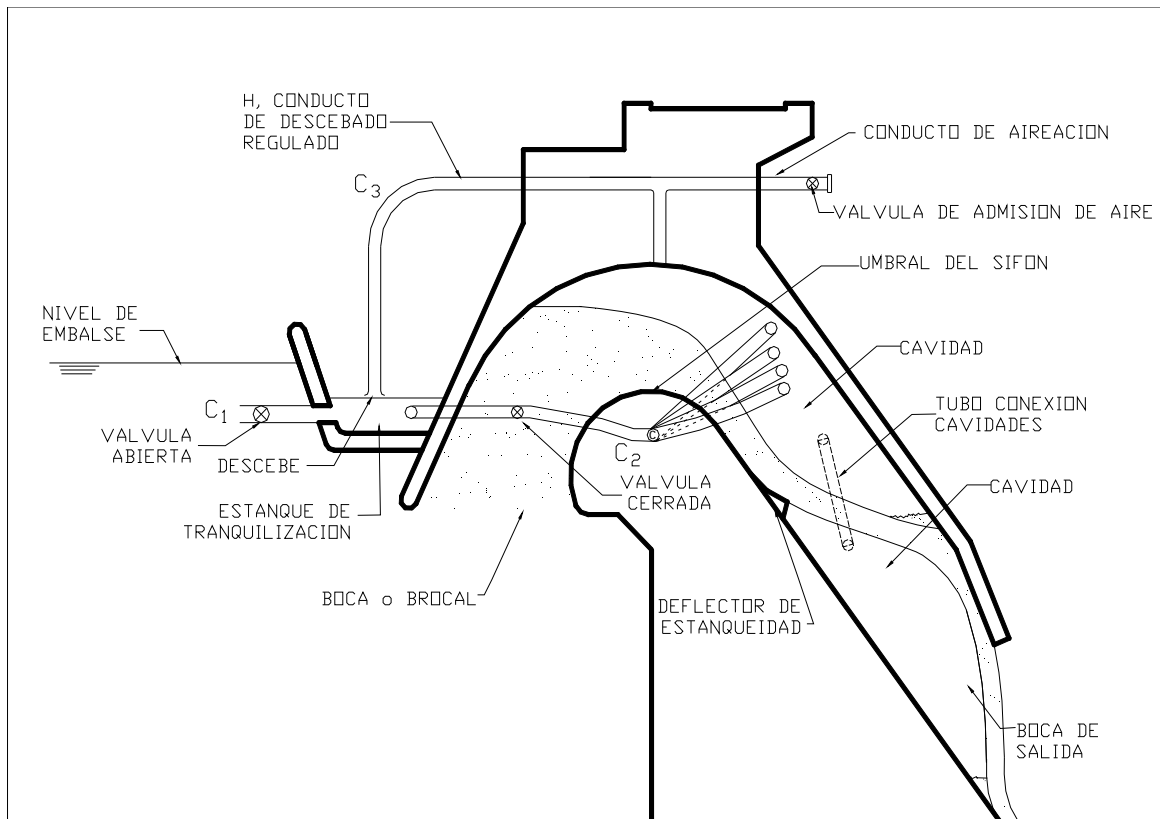


Figura 3 Sifón con conducto fijo de aireación

Para abordar el problema es conveniente empezar por observar el comportamiento de un sifón aireado pudiendo notarse, en función de la situación las dos zonas en que puede haber aire, tres tipos de funcionamiento:

a) Flujo con un caudal líquido reducido. Se considera como característico de este caso que por un lado la parte alta del sifón tiene una amplia cámara de aire y además la cámara de la parte inferior sobrepasa la sección de salida, ver figura 4.



Figura 4 Flujo con caudal líquido reducido

b) Flujo de salida llena (es decir descargando una mezcla agua aire más o menos homogénea) sin cámara inferior de aire (o con una cámara aislada de carácter vestigial) pero con cámara superior de tamaño todavía considerable, ver figura 5.



Figura 5 Flujo en el sifón con salida sección llena

c) Flujo cebado o casi totalmente cebado. En éste la cámara de aire superior también ha desaparecido o es muy reducida. A esta situación se llega bien porque el conducto de aireación permita poco paso de aire o bien porque aun siendo amplio las condiciones de velocidad y proximidad al contorno del flujo líquido mermen el flujo de aire, ver figura 6.



Figura 6 Flujo en el sifón casi totalmente cebado

Naturalmente hay situaciones intermedias o de transición entre a) y b) y asimismo entre b) y c) no siendo fácil la delimitación a priori de esas transiciones.

Lo que sigue se centrará en el caso más representativo y frecuente que es el b). El cual por otra parte, según se verá, es el que admite un planteamiento más general. Adicionalmente es de advertir que en los casos a) y c) la entrada de aire es reducida en términos absolutos, si bien en el caso a) puede ser más alta en términos relativos.

La gran diferencia de densidad entre el agua y el aire hace que, en las zonas en que por el mutuo contacto las velocidades de ambos fluidos sean similares, la inercia del aire sea despreciable en las ecuaciones de balance lo

que simplifica algunos planteamientos. Por otra parte el hecho de que el aire entrante esté a la presión atmosférica y que el saliente en forma de burbujas esté a una presión y temperatura similar permite tratarlo (a los efectos de la continuidad) como fluido incomprensible, todo ello sin perjuicio de que si se considera necesario se puedan hacer las correcciones que en segunda aproximación se estimen oportunas para un mayor afine de los resultados.

Hay pues para una situación dada que sea congruente con el supuesto b) tres magnitudes a cuantificar; flujo líquido, flujo de aire entrante al sifón y presión reinante en la cámara de aire superior. En la situación mencionada bastará con disponer entre ellas de tres relaciones independientes y razonablemente aproximadas para obtener los resultados apetecidos. Dada la complejidad del flujo dentro del sifón por lo general no será factible obtener esas tres relaciones como unas ecuaciones explícitas, pero tras una primera (o segunda) aproximación, si se podrán formular unas ecuaciones validas en un entorno de la situación analizada. A continuación se consideran por separado las tres ecuaciones y la forma de perfeccionarlas en el entorno de la solución.

La primera ecuación pretende relacionar el flujo entrante en el sifón con el nivel de embalse y la presión reinante en la cámara de aire superior (en realidad algo idéntico a lo planteado para sifones con regulación de segundo orden). Si la cota de energía del embalse sobre el umbral del sifón es H, las pérdidas de energía en la embocadura e inicio del sifón se denominan, P, y la depresión en la cámara de aire es D. El caudal líquido, Q_l , expresado en m^3/s es:

$$Q_l = C_d \cdot A \cdot \sqrt{(H - P + D)^3} \quad (1)$$

Donde H, D y P están expresadas en m.c.a., A es la anchura del sifón expresada en metros, y C_d es el coeficiente de desagüe habitual en un vertedero pudiéndose iniciar su estimación con el valor 2,1 aunque naturalmente en este caso las mejoras de su cuantificación se efectuarán estudiándolo como un flujo bidimensional con la geometría concreta de la parte superior del sifón y disponiendo de una energía específica $H-P+D$ sobre el umbral.

La segunda ecuación expresa el flujo de aire entrante y obviamente depende del conducto de acceso y de la depresión en el interior del sifón. Si como en el caso de la figura 3 se acepta que la pérdida de carga en el conducto de entrada de aire se va a concentrar en una válvula y se admite que el proceso de entrada es adiabático se puede concluir que:

$$Q_g = K \cdot (P_{at} - D)^{0.71} \cdot \sqrt{P_{at}^{0.29} - (P_{at} - D)^{0.29}} \quad (2)$$

Donde P_{at} es la presión absoluta del aire en el lugar donde se encuentre el sifón expresada también en m.c.a. y Q_g es el caudal de aire entrante expresado en m^3/s a la presión atmosférica ambiente P_{at} . Por su parte D mantiene el significado de la formula (1) y K es una constante función de la geometría y estado del conducto de entrada de aire.

Por lo que hace a la tercera relación, basta advertir que la descarga de la mezcla agua-aire se hace a la presión atmosférica y que la velocidad que lleva esta mezcla es sustancialmente la que la energía disponible le permite al agua. Por ello puede escribirse la formula:

$$Q_l + Q_g = S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H - P - P_2 + R)} \quad (3)$$

Donde S es la sección de la boca de salida en m^2 , P_2 recoge las pérdidas de energía en el resto del sifón en m.c.a. y por su parte R es el desnivel existente entre el umbral del sifón y su boca de salida.

4 Conclusión

La entrada controlada de aire en sifones constituye una herramienta para su regulación y así hacerlos viables como órganos ordinarios de desagüe en presas. Si la regulación se hace como en la figura 1 por medio de un dispositivo de control de segundo orden es factible conseguir que se pueda elegir para cada momento la ley de desagüe que se considera más conveniente con un mero ajuste (previo o en el momento) de los parámetros de control. Pero la estimación del caudal de aire que arrastra el agua deberá hacerse por vía experimental.

Por el contrario si el control de la entrada de aire es directo como en el sifón de la figura 3 se está en condiciones de efectuar para las situaciones más habituales un planteamiento más teórico que por medio de las ecuaciones (1),(2) y (3) permita estimar tanto el caudal de agua como el de aire. El precio de esta situación es por una parte

que el cálculo solo es adecuado si se ha llevado el sifón a una de las situaciones calculables (aminorado por que para las otras se tenga una acotación para el flujo de aire a valores reducidos) y por otra parte que se pierden las ventajas de autonomía e independencia que caracterizan al control de segundo orden.

5 Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia en el marco del proyecto “Mejora de la capacidad de desagüe de aliviaderos nuevos y existentes mediante aliviaderos en sifón y aliviaderos en laberinto”, 029/RN08/04.5.

6 Bibliografía

- [1] Mateos, C. (2005). “Aliviaderos en sifón”. 2ª Jornada Técnica Sobre Aliviaderos No-Convencionales, SEPREM, Madrid, España
- [2] Mateos, C., Elviro, V., Cordero, D. (2008). “Mejora de la capacidad de desagüe de presas existentes mediante aliviaderos en sifón” VIII Jornadas Españolas de Presas CNEGP-SPANCOLD, Córdoba, España.
- [3] Mateos, C. y Cordero, D. (2008). “Aliviaderos con sifones regulados”. Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia.
- [3] Mateos, C., Cordero, D., Elviro, V. (2009). “Regulatable siphon spillway”. 23rd International Congress on Large Dams, Brasilia, Brazil.
- [4] Mateos, C. Cordero, D., Elviro, V. (2009). “Prevention of cavitation in siphons”. 33rd IAHR Congress, Vancouver, Canada
- [5] Mateos, C. Cordero, D., Elviro, V., Ramos, T. (2010). “The limits of Regulation in Siphons”. The 78th ICOLD Annual Meeting, Hanoi, Vietnam
- [6] Mateos, C. Cordero, D., Elviro, V., Ramos, T. (2010). “Regulación de Segundo orden en sifones”. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay.
- [7] Mateos, C. Cordero, D., Elviro, V., Ramos, T. (2011). “Extension of Siphon Operation Range”. 34th IAHR Congress, Brisbane, Australia.