

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

MEJORA DE LA CAPACIDAD DE DESAGÜE DE PRESAS EXISTENTES MEDIANTE ALIVIADEROS EN SIFÓN

Cristóbal Mateos Iguácel ¹

Víctor Elviro García ²

M^a Dolores Cordero Page ³

RESUMEN: La mayoría de las presas españolas tienen más de treinta años, esto lleva a prestar atención a los criterios de seguridad cada vez más exigentes. La normativa vigente data de 1967 con la Instrucción de Grandes Presas, normativa que ha ido complementándose posteriormente. Considerando que la causa principal de rotura de presas es que una avenida supere la capacidad de evacuación de sus órganos de desagüe, este artículo se centra en mejorar la seguridad por medio de incrementar dicha capacidad de evacuación.

Las intervenciones en presas existentes deben tratar de respetar ciertos condicionantes y para realizar una evacuación complementaria hay soluciones que parecen más adecuadas que otras. Los nuevos aliviaderos convencionales tienen dificultad de implantación, los morning-glory necesitan obras bajo el agua o perjudicar la explotación, los aliviaderos laterales son sustituidos con ventaja por los laberintos, y por último los aliviaderos en sifón presentan características que los hacen muy adecuados.

Autores en orden alfabético inverso:

¹ Doctor Ing. Caminos. Catedrático E.T.S. Ing. Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica Madrid.

² Ing. Caminos. Consejero Técnico. Laboratorio de Hidráulica Centro de Estudios Hidrográficos. CEDEX.

³ Ing. Caminos. Directora de Programa. Laboratorio Hidráulica Centro de Estudios Hidrográficos. CEDEX. Profesora Asociada E.U.I.T. Obras Públicas, Universidad Politécnica Madrid.

Ponderando todas las circunstancias se promueve la investigación y el desarrollo experimental de los aliviaderos en sifón y concretamente, los aliviaderos en sifón regulados por aire.

1. NECESIDAD DE AMPLIACIÓN DE LA CAPACIDAD DE EVACUACIÓN

La mayoría de las presas españolas tienen más de treinta años, esto lleva a prestar una especial atención a los criterios de seguridad cada vez más exigentes.

La normativa vigente data de 1967 con la Instrucción de Grandes Presas, complementándose con la Directriz Básica de Planificación ante el Riesgo de Inundaciones de 1995, el Reglamento Técnico de 1996 y la Nueva Ley de Seguridad en fase de redacción.

La Instrucción denomina “avenida máxima” aquella cuyo período de recurrencia sea de 500 años. Las recomendaciones técnicas proponen mayores periodos de retorno, además la revisión con nuevas metodologías puede dar lugar a un aumento de los caudales estimados de entrada al embalse.

Considerando que la causa principal de rotura de presas es que una avenida supere la capacidad de evacuación de sus órganos de desagüe, este artículo se ha centrado en la mejora de la seguridad por medio de incrementar dicha capacidad de evacuación.

Las intervenciones en presas existentes deben tratar de respetar ciertos condicionantes:

- obras de adaptación y mejora sin perturbar la gestión habitual del embalse
- no rebajar la cota del umbral de embalse, pues representa una pérdida de capacidad
- no modificar la cota máxima de embalse pese a que se aumente el caudal de la avenida máxima a considerar pues supone demoras legales y mayores costes

Para esta evacuación complementaria hay soluciones que parecen más adecuadas que otras.

Los nuevos aliviaderos convencionales tienen dificultad de implantación, los morning-glory necesitan obras bajo el agua o perjudicar la explotación, los aliviaderos laterales son sustituidos con ventaja por los laberintos, y por último están los aliviaderos en sifón que presentan características que los hacen muy adecuados según se expone a continuación.

1.1. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS SIFONES CLÁSICOS

Las principales ventajas que presentan los aliviaderos en sifón son:

- al trabajar en depresión pueden situarse incluso por encima del nivel normal de embalse

- se adaptan a cualquier nivel máximo de explotación
- al circular en carga su conducto de descarga soporta cualquier condicionante en su trazado de salida
- posibilidad de construir el sifón sin obstaculizar la explotación de la presa
- construcción por módulos y fácil enlace con las estructuras de disipación de energía existentes
- se pueden proyectar de forma que entren en funcionamiento cuando la avenida supere el caudal de los aliviaderos ya existentes

Frente a estas ventajas los sifones también tienen dificultades, una de ellas es que su ley de desagüe tiene una evolución inicial mejor que las de los vertederos pero una rama final peor.

Los sifones presentan también la desventaja que, salvo medidas correctoras, la forma del desagüe pueda llevar a que por ellos salga más agua de la que entra en el embalse.

2. LA CONVENIENCIA DE SIFONES REGULADOS

Según lo anterior el principal inconveniente de los sifones es su rigidez. El funcionamiento del sifón puede pasar rápidamente de un caudal muy pequeño, similar a un vertedero convencional con funcionamiento en lámina libre donde el caudal depende de la altura de la lámina de agua y por tanto del nivel de embalse, al máximo caudal desaguado correspondiente al funcionamiento en carga y prácticamente independiente del nivel de agua en el embalse.

Esta rigidez de los sifones da pie a que el caudal evacuado cuando el sifón se ceba pueda ser superior al caudal de entrada de avenida en ese momento, hecho que está prohibido en muchas legislaciones. No obstante el carácter modular de este tipo de aliviaderos permite en algunos casos situar varios módulos con umbrales a distintas cotas para atenuar la brusquedad que el proceso de cebado provoca en la ley de crecimiento del caudal evacuado.

Ponderando todas las circunstancias parece interesante poder regular los aliviaderos en sifón y por ello se promueve la investigación y el desarrollo experimental de los aliviaderos en sifón y más concretamente, sobre los aliviaderos en sifón regulados por aire.

En la Referencia (1) se propuso realizar algunas modificaciones sobre la forma habitual de los sifones buscando dos objetivos, primero, que la curva de capacidad que relaciona el caudal de salida del sifón con el nivel de embalse sea creciente de forma gradual (y sin la brusquedad del diseño tradicional) según aumentan los niveles, y segundo, que el caudal de salida se pueda regular a voluntad si así se desea.

La ventaja de poder modificar la ley de evacuación de los sifones está en la posibilidad de poder ajustar, con carácter previo, la ley de caudales de salida para adaptarse a las normas de explotación y además poder, de una manera sencilla, aumentar o disminuir dicho caudal en casos de emergencia.

3. SIFONES REGULABLES

La idea fundamental de los sifones regulables es realizar una aportación de aire gradual, reduciendo la sección de aireación cuando aumenta el nivel en el embalse, pudiendo así fijar el caudal que se desea evacuar para cada nivel de embalse. La principal dificultad es que por una parte se quiere que para niveles bajos se inicie el cebado y por otra tener una aireación mayor cuanto más bajo sea el nivel de embalse, ambas cosas parecen en principio contradictorias, por ello es necesario realizarlas en un determinado orden. En primer lugar el cebado, y después el segundo objetivo, la aireación.

Además de los elementos propios de un sifón convencional: X, boca o brocal; A, umbral; B, deflector de estanqueidad; D, boca de salida o descarga del sifón; E, conducto de descebado; y los elementos prescindibles (M, estanque de tranquilización y J, tubo de conexión de cavidades), en los sifones regulados es necesario incorporar nuevos elementos al sifón convencional.

En el sifón que aquí se propone, figura 1, estos nuevos elementos son: R, conducto de descebado regulado; Q_i , conductos para regular el acceso del aire al sifón; P, conducto de succión; K, conducto de control de la succión; V, válvulas de ajuste; y M y N, dos estanques de tranquilización, uno con boca amplia de conexión con el embalse (S) y otro de boca reducida (T). Los conductos operan como sifones menores o secundarios, siendo sus cotas y el tamaño de sus secciones los que, convenientemente combinados logran los efectos que se pretenden.

El funcionamiento de los sifones regulados se puede describir en varias fases:

1. Lámina de agua en el umbral del sifón A
2. Inicio de la depresión
3. Depresión neta en sifón. Sin flujo en el conducto de succión
4. Cebado avanzado. Flujo en conducto de succión recién iniciado
5. Descenso máximo en el estanque grande N. Sección máxima para aireación (Fig. 2)
6. Una mayor elevación de embalse vuelve a anegar sucesivamente uno, dos, tres o cuatro de los conductos de aireación, exacerbando la depresión
7. Un mayor ascenso del nivel de embalse ocasiona el sellado completo de la aireación y el cebado total del sifón
8. Descenso del nivel del embalse que provoca la intervención de los descebes E y K que cortan los flujos del sifón y de la succión

El funcionamiento del sifón se inicia cuando, progresivamente, al ir aumentando el nivel en el embalse H se han ido anegando la boca de entrada del conducto de succión P y las bocas de entrada de los conductos Q_i de control del acceso de aire. Al progresar la avenida el nivel de agua en el embalse alcanza la cota del umbral A del sifón, en ese mismo momento el agua sella las

bocas E del conducto de descebado automático y de K boca del conducto del control de succión.

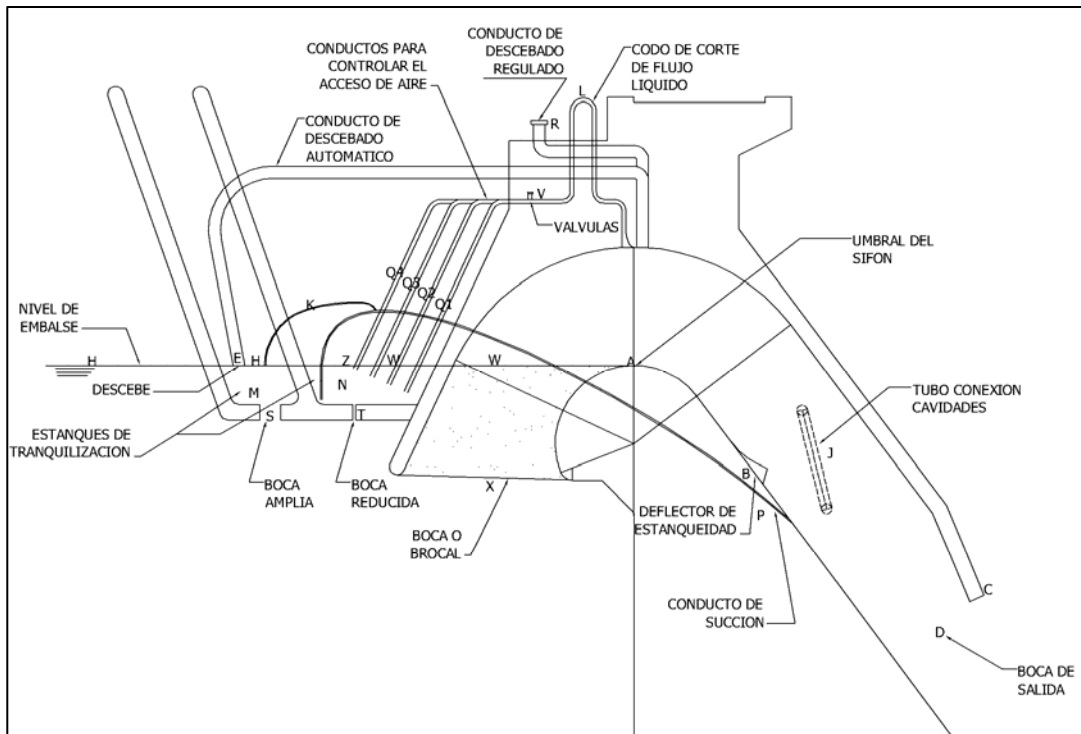


Fig. 1: Lámina de agua en el umbral del sifón

Al ir ascendiendo el nivel en el embalse empieza el vertido por el umbral del sifón iniciándose el arrastre al aire. En cuanto la lámina de agua tiene entidad suficiente se producen dos choques contra el techo y la solera del sifón dando lugar a dos cavidades F y G conectadas mediante el tubo J. El arrastre del aire hace que se reduzca la presión en dichas cavidades haciendo que paulatinamente el volumen de éstas disminuya. La depresión en la cavidad F hace que aumente la cota de la lámina de agua en el interior del sifón y, por tanto, el espesor de la lámina vertiente y el caudal evacuado. En el resto de los conductos, que funcionan como sifones secundarios, también se produce un ascenso del nivel en su interior ya que se encuentran sellados por el nivel del embalse en la boca de entrada y en contacto con la zona de baja presión en la salida (Fig. 2).

La depresión en el interior del sifón sigue aumentando hasta conseguir que la lámina de agua ascienda hasta por encima del punto más alto del conducto de succión produciendo un flujo sifónico que seguirá circulando aunque exista un descenso de niveles, siempre y cuando este descenso no cause el descebado por la boca del conducto K. Durante esta fase está circulando agua por el conducto de succión P, y dado que el estanque de tranquilización N tiene una boca reducida T de conexión con el embalse, el nivel en el estanque desciende hasta que la diferencia de cota entre el agua en el estanque Z y el nivel de embalse H provoque un flujo entrante en el estanque igual al de salida por el conducto P. Si el nivel en el estanque es reducido produce que los cuatro conductos Q_i permitan el flujo de aire hacia el sifón.

La entrada de aire en el interior del sifón origina una disminución de la lámina vertiente hasta que se equilibre con el aire que es arrastrado por el agua. Esta situación será estable mientras no varíe el nivel de agua en el embalse. Cuando la avenida se encuentre en la rama decreciente del hidrograma los caudales que son evacuados por el sifón son mayores que los entrantes al embalse por lo que el nivel de embalse descenderá y el sifón se descebará automáticamente, pudiendo volver a entrar en funcionamiento si la evolución de la avenida lo requiriere.

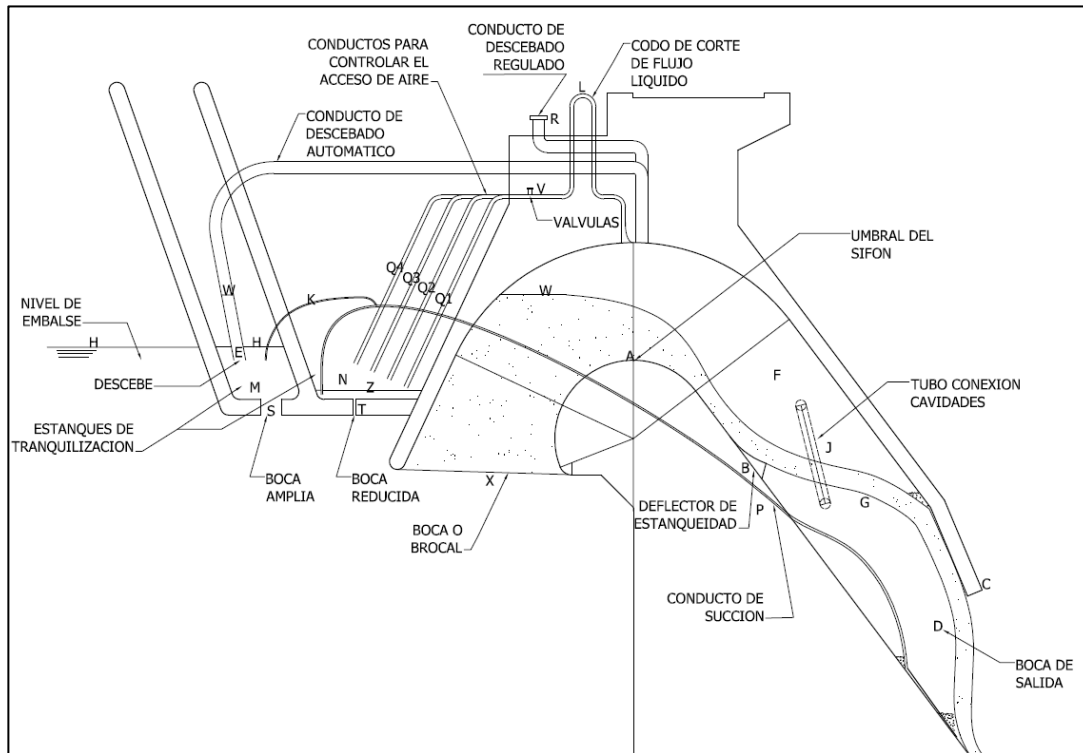


Fig. 2: Descenso máximo en el estanque grande

4. LÍMITES EN LA OPERACIÓN DE LOS SIFONES. OPTIMIZACIÓN

Los sifones, regulables o no, tienen un rango de niveles en los que se prevé su funcionamiento. En principio el nivel mínimo de funcionamiento coincide con su umbral que debe de situarse al nivel normal de embalse o más arriba (aunque excepcionalmente, sobre todo en los regulados, se pueda disponer otra cosa). El nivel máximo coincide en la práctica con el máximo nivel de embalse en avenidas, si bien es oportuno saber que sucede si se sobrepasa ese nivel. Por consideraciones de economía se suele pretender que el caudal unitario sea, dentro de lo razonable, lo mayor posible para el máximo nivel de explotación. Como se trata de hablar de máximos se omitirá a partir de ahora la consideración del efecto reductor de los mecanismos de regulación. El caudal para el nivel máximo depende naturalmente de la geometría del sifón y señaladamente de dos secciones: la sección de salida y la sección más alta a veces llamada garganta del sifón. La sección de salida se dispone para que sea la más reducida del conducto y actúe como sección de control. Una vez fijada esa sección el caudal máximo queda determinado. Pero en la práctica hay que proceder en el orden contrario, esto es, fijar el caudal máximo por las conside-

raciones de seguridad que se expondrán a continuación y una vez determinado éste ajustar la sección de salida para conseguir que en su momento se alcance exactamente ese caudal.

Es en la sección de garganta donde se centran las dificultades. Si es demasiado reducida el caudal saliente es escaso y si fuera demasiado amplia sus puntos más elevados presentarían una depresión inaceptable.

Es ésta depresión y más concretamente el riesgo de cavitación el que actúa como factor limitante en la capacidad de los sifones.

Se va a analizar aquí cuales son las dimensiones óptimas de la sección de garganta. Para concretar se admitirá que en el entorno de la garganta la directriz está formada por sendos arcos de círculo inferior y superior concéntricos tal y como refleja las figuras 1 y 2. Esta hipótesis además de ventajas constructivas y, como se verá, de comodidad de análisis presenta otras que en aras a la brevedad no se comentan.

En este enfoque para iniciar el estudio y dado el escaso desarrollo de la capa límite se admitirá el flujo como irrotacional y en el tramo entre arcos se aceptará la ley del remolino irrotacional, esto es:

$$V = \frac{K}{\rho} \quad [1]$$

donde ρ , es la distancia de un punto P_ρ , cualquiera de la garganta al centro común de las directrices; V , es la velocidad del agua en dicho punto y K es una constante (característica de cada flujo rotatorio irrotacional) que se fijará posteriormente de forma a conseguir el óptimo buscado.

La aplicación del teorema de Bernouilli indica

$$H_a + H = \rho - r + \frac{p}{\gamma} + \frac{K^2}{2g\rho^2} + P_e \quad [2]$$

donde H_a es la presión atmosférica en el embalse expresada en m.c.a. y tomando como cero la tensión de vapor del agua; H , es la cota del embalse respecto del umbral del sifón; r , es el radio de la directriz inferior; p , es la presión absoluta en el punto P_ρ ; γ es el peso específico del agua; g , es la aceleración de la gravedad y P_e , son las pérdidas de carga entre el embalse y la garganta expresadas en m.c.a.

Al riesgo de cavitación contribuyen cuatro cuestiones: la presión y velocidad en cada zona, el material del conducto y la aspereza o irregularidad de la superficie. Se aceptará que la desigualdad

$$\frac{p}{\gamma} - C \frac{V^2}{2g} \leq 0 \quad [3]$$

indica riesgo de cavitación cuando se cumple, y lo excluye si no se cumple. En la fórmula C es una constante que depende del material y estado del conducto. La fórmula en el presente caso se puede escribir aplicando [1] como

$$\frac{p}{\gamma} - C \frac{K^2}{2g\rho^2} \leq 0 \quad [4]$$

No es difícil comprobar que tanto en el punto más alto como en el punto más bajo de la garganta el riesgo de cavitación es siempre mayor que en los puntos próximos a ellos tanto de la propia garganta como de su entorno.

Por ello la imposición de la situación límite (es decir transformar la desigualdad [4] en igualdad) en ambos puntos marca la máxima actuación posible.

Llamando R al radio de la directriz superior y despejando p/γ en [2] tanto para $\rho=r$ como para $\rho=R$ y aplicando los valores así obtenidos a [4] entendida pues como igualdad resulta:

$$0 = H_a + H - P_e - \frac{K^2}{2gr^2} - C \frac{K^2}{2gr^2} \quad [5]$$

$$0 = H_a + H - P_e + r - R - \frac{K^2}{2gR^2} - C \frac{K^2}{2gR^2} \quad [6]$$

Y si se adopta

$$H_a + H - P_e = \bar{H} \quad 1 + C = \mu^2 \quad \mu K = K'$$

éstas últimas fórmulas pasan a ser

$$\bar{H} - \frac{K'^2}{2gr^2} = 0 \quad [5']$$

$$\bar{H} + r - R - \frac{K'^2}{2gR^2} = 0 \quad [6']$$

\bar{H} y μ son datos de la situación y condiciones generales del sifón mientras que K y por tanto K' se puede elegir libremente en busca de la optimización.

El sistema [5'] [6'] es resoluble obteniéndose:

$$r = \frac{K'}{\sqrt{2g\bar{H}}} \quad [7]$$

$$R = \frac{\bar{H} + \sqrt{\bar{H}^2 + 4K' \sqrt{\frac{\bar{H}}{2g}}}}{2} \quad [8]$$

Como por su parte el caudal unitario se puede obtener integrando [1], resulta valer:

$$q = K \ln \frac{R}{r} \quad [9]$$

o equivalentemente

$$\mu q = K' \ln \frac{R}{r} \quad [10]$$

Utilizando [7] y [8] el miembro de la derecha de [10] es tabulable en función de \bar{H} y K' , obteniéndose el gráfico (Fig. 3) en el que μq se simbolizan con q' con la que el dimensionamiento del sifón es inmediato. Es oportuno hacer notar que para dar un margen de seguridad conviene minorar el valor de \bar{H} y mayorar el de C . Naturalmente una vez estimado q se procederá a fijar la sección de salida para que el sifón pueda tener el comportamiento previsto.

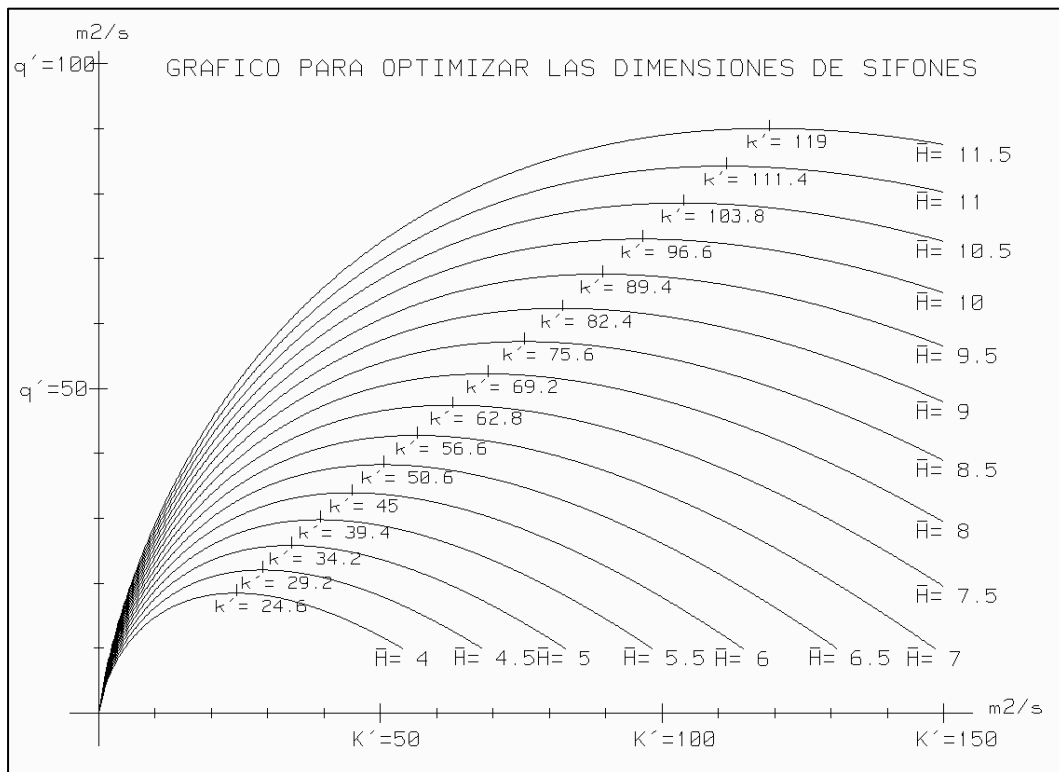


Fig. 3: Optimización del dimensionamiento de sifones

5. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS SIFONES REGULABLES

Los sifones regulados tienen una serie de ventajas e inconvenientes, aunque algunas ventajas que se pueden convertir en inconvenientes en algunas circunstancias y viceversa.

Entre las ventajas se pueden citar las siguientes:

- Gradual. Una vez cebado el sifón, la salida de caudales crece gradualmente con el nivel de embalse y en las fases ascendentes de la avenida nunca sale más caudal del que entra, salvo intervención humana.
- Adaptable. Dentro de ciertos límites se puede modificar con poco esfuerzo la ley de niveles – caudales evacuados.
- Regulable. Durante una avenida es factible ampliar o reducir, al menos por un tiempo, el caudal desaguado y ello dentro de amplios límites.

- Manejable. La potencia necesaria para su manejo es muy reducida, por lo que en situaciones límite, incluso el control manual puede hacerse en un tiempo muy breve.
- El sabotaje es poco eficaz, porque a diferencia de válvulas y compuertas, incluso la destrucción del sifón no provoca ningún efecto aguas abajo salvo que se produzca en una avenida, que es cuando la atención y protección al embalse es máxima.
- Al contrario que en una compuerta en la que si no pudiera ser maniobrada la avenida no se evacuaría según las previsiones, el sifón si no puede ser intervenido responde dando salida a la avenida según la ley que se fijó previamente.
- Fiabilidad. Es poco oneroso disponer dispositivos redundantes que aumenten la seguridad
- Acoplable. En las presas ya existentes es factible añadir por módulos sifones en coronación o cerca de ella sin que alteren en nada la explotación y manejo habitual del sifón. El conducto de descarga se adapta sin dificultad a cualquier topografía
- Libre. Sin más limitaciones que las inherentes a su fin pues no necesita alterar ningún condicionamiento preexistente

Entre los inconvenientes se pueden destacar:

- Desagüe en carga. Hay que evaluar muy bien la protección frente a flotantes y en su caso poner los medios para su evacuación.
- Riesgo de obstrucción en los conductos y pasos si no se protegen adecuadamente
- Mecanismo de regulación simple de manejo pero complejo de comprensión. Es conveniente que todo el personal que va a manejarlo disponga de un simulador para familiarizarse con el control y aprenda a reaccionar.
- Su funcionamiento en depresión requiere un buen acabado de superficies
- Sólo puede probarse su funcionamiento en caso de avenida, lo que por seguridad comporta la conveniencia de revisiones frecuentes. También es conveniente que se disponga varios módulos para que el eventual fallo de uno de ellos altere poco la eficiencia conjunta.
- Tienen limitado su caudal unitario máximo, esto puede hacerlos engorrosos en presas con cuencas muy grandes.

REFERENCIAS

1. Mateos, C. (2005) "Aliviaderos en sifón". 2ª Jornada Técnica sobre Aliviaderos No-Convencionales. SEPTEM. Madrid. España.
2. Mateos, C., Cordero, D. (2008) "Aliviaderos con sifones regulados". XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia.