

FLUJO VARIADO EN SIFONES LARGOS

Luis Torrent Rodríguez
Dr. Ingeniero de Camino, Canales y Puertos

El autor analiza los fenómenos transitorios de oscilación del flujo a la salida de largos sifones, como consecuencia de variaciones del caudal de aportación, así como sus posibles repercusiones en la circulación de los tramos de canal anterior y posterior a la instalación. Partiendo del cálculo del régimen transitorio y posterior a la instalación. Partiendo del cálculo de régimen transitorio en un sifón existente, se hacen recomendaciones para lograr que las oscilaciones sean mínimas, lo que tiene especial aplicación al caso de dos o más sifones intercalados en una conducción a lámina libre, por el riesgo de que se produzcan resonancias del flujo.

This paper analyzes the transitory phenomena of flow oscillation in the discharge of long siphons consequently to variations in the incoming volumes, together with their potential repercussions on the water circulation in the channel sections before and after the siphon. Starting from the calculation of the trasitory state in an existing siphon, advices are given to secure minimal oscillations, which has a particular interest in the instance of two or more siphons intercalate in a channel, owing to the risk of generating flow resonances.

1. Planteamiento

Cuando la traza de un canal tiene que salvar una depresión del terreno importante por su longitud y su desnivel, son varias las soluciones que el proyectista puede adoptar: en primer lugar, modificar el trazado de la conducción, dando un rodeo al obstáculo. Si esto no es posible o resulta antieconómico, quedan tres opciones: el terraplén, el acueducto y el sifón.

La primera tiene obvios inconvenientes si la altura del terraplén es grande, pues exige una amplia zona de derrame en el valle, con expropiaciones costosas y difíciles, y crea una barrera para las aguas que puedan circular por la depresión, agravando los daños en caso de inundaciones.

La opción segunda es la más adecuada desde el punto de vista ingenieril, estético y de continuidad hidráulica; pero el coste de los acueductos puede llegar a ser prohibitivo si se requieren pilas

muy altas o grandes luces para encajar la ubicación de los apoyos entre las instalaciones existentes en el valle, y también puede tener inconvenientes ambientales, paisajísticos, etc.

Queda como último recurso, atravesar la depresión mediante tuberías en carga, adaptadas al perfil del valle, que pueden estar situadas sobre el terreno, parcialmente enterradas o en zanja, lo que permite una cierta flexibilidad en el trazado, minimiza el impacto ambiental y puede reducir los costes de la obra de cruce. Pero, desde una perspectiva puramente hidráulica, un largo sifón intercalado en una conducción a lámina libre supone una discontinuidad del régimen de circulación que puede dar lugar a fenómenos oscilatorios de considerable amplitud durante periodos consecutivos a variaciones del caudal circulante.

El análisis de estos fenómenos transitorios es el objeto de este estudio, en el que se establecerán los condicionantes que contribuyen a incrementar o disminuir la amplitud de las oscilaciones en estas instalaciones. El análisis se refiere a sifones de gran longitud, pues los de pequeñas di-

Recibido en ROP: abril 1994

mensionos (cruces de caminos, vías férreas, etc) en los que el desnivel se mide en centímetros, las perturbaciones que introducen en el régimen hidráulico son de tan escasa entidad que no merecen mayor consideración.

2. Resguardos y Caudales parciales

Al proyectar cualquier conducto siempre se toma un margen de seguridad, no sólo por la incertidumbre de las fórmulas hidráulicas adoptadas, sino también para prever el envejecimiento de la obra, que producirá un incremento de la rugosidad de los paramentos y hará disminuir la capacidad de transporte desde un valor inicial hasta un límite al que se llega de forma casi asintótica. Existen diversas expresiones para adecuar los parámetros hidráulicos de un conducto al efecto de envejecimiento: por ejemplo, la fórmula de Scobey referida a tuberías de fundición, de la que se deduce una duplicación de la rugosidad cada 14 años. En tuberías de otros materiales el efecto es notablemente menor; por el contrario, si hay corrosión la rugosidad puede duplicarse en el primer año de servicio.

El envejecimiento de los paramentos de un canal produce una disminución del resguardo con el tiempo: el calado de régimen irá poco a poco aumentando, acercándose al límite que debe haber previsto el proyectista. En un sifón el envejecimiento es más lento, pero también reduce su capacidad de transporte. El margen de seguridad que se adopta en el desnivel entre la entrada y la salida debe ser tal que permita la circulación del caudal de diseño cuando la conducción ya haya perdido hidráulidad, lo que implica un "exceso" de gradiente en la primera época de funcionamiento.

Por consiguiente, incluso cuando circule el caudal máximo, el nivel del agua en las inmediaciones de la entrada al sifón estará por debajo del teórico del régimen, y cuando el caudal sea menor que el máximo, el escalón será mucho mayor, pues al "resguardo de envejecimiento" se añadirá el de pérdidas de carga, proporcional a la diferencia de los cuadrados del caudal.

Por todo ello, a la entrada de los largos sifones se pueden crear rápidas cuyo flujo, a lámina libre, desciende por la rama de entrada y se va acelerando hasta que se encuentra con el nivel de carga que corresponde al caudal de transporte. Si

la diferencia de cota es grande, como sucederá cuando circulen caudales pequeños, la velocidad en la "rápida" llegará a un límite, al igualarse las pérdidas de carga del flujo con la pendiente geométrica del tramo inicial de la tubería.

En el canal anterior al sifón el régimen será variado a partir de una sección de control que se formará en el propio canal, en la embocadura del conducto a presión o al comienzo de éste, según sea la disposición de la cabecera, la pendiente y el caudal. Durante los fenómenos transitorios por variación del caudal, la sección crítica cambiará de posición o desaparecerá temporalmente, hasta que, una vez amortiguadas las oscilaciones en el sifón, quede fija en el lugar que corresponda al caudal de régimen.

3. El remanso de entrada

Cuando está interrumpida la circulación por el canal, la masa de agua contenida en la tubería permanecerá en reposo, a una cota igual en ambas ramas del sifón, inferior a la de la solera del canal posterior, cota que se alcanzará tras una serie de oscilaciones de parada. Al reanudarse el servicio, el nivel del agua comenzará a ascender en la rama de entrada, creando un gradiente cada vez mayor que irá acelerando la masa. En el tramo de salida, el plano de agua ascenderá hasta llegar al fondo del canal, por el que empezará a correr con flujo creciente. Mientras tanto, el nivel en la entrada seguirá subiendo y no se parará cuando llegue a la cota que corresponde al régimen estable, porque todavía el flujo de salida será menor que el de entrada. Se producirá, pues, un gradiente mayor que el necesario, por lo que, posteriormente, el caudal sobrepasará al de régimen.

Si este último fuera el máximo de diseño -o cercano al máximo- en el tramo de canal anterior al sifón se produciría una sobreelevación creando un remanso que puede reducir apreciablemente el resguardo de la obra. Esto mismo sucederá aunque no se parta de una situación de reposo, sino de una circulación a pequeño caudal, que se incrementa rápidamente.

Es evidente que este proceso se vería paliado si la variación del flujo se produjera paulatinamente durante la fase de cambio, abriendo poco a poco la compuerta de cabecera del canal; pero si la distancia entre el sifón y el órgano de regulación no es muy corta, la gradación del flujo lograda en

las cercanías de la compuerta quedará muy atenuada por el incremento de velocidad que experimenta la corriente al ir aumentando su calado. La onda de crecida, con un frente cada vez más abrupto, se presentará a la entrada del sifón, produciendo un cambio de caudal equivalente, en la práctica, a una variación brusca. Por el contrario, la onda de vaciado o de reducción del caudal fluyente se atenuará en el tramo de canal comprendido entre la compuerta y el sifón, disminuyendo los fenómenos oscilatorios subsiguientes.

4. La salida del sifón

Como consecuencia de un cambio de caudal, en el cauce posterior al sifón se producirán oscilaciones del flujo de salida, que se irán amortiguando al paso del tiempo, pero que pueden crear problemas circunstanciales si, aguas abajo, existen automatismos controlados por el nivel, como partidores, aliviaderos, etc. A una variación del caudal de entrada de uno a dos, el de salida puede fluctuar entre uno y tres y descender luego a un medio, lo que conlleva importantes variaciones del calado. Cuando se pasa de un caudal parcial al máximo de diseño, el remanso de la entrada del sifón, al que antes se ha hecho referencia, dará lugar a un flujo de salida mayor que dicho caudal máximo, que es preciso evaluar porque puede reducir peligrosamente el resguardo del canal.

En una interrupción del servicio, desde el momento en que deja de llegar el agua a la cabecera del sifón hasta que deja de salir por su extremidad inferior, transcurre un tiempo que es, prácticamente, una constante de la instalación. El desfase es función de la pendiente geométrica de la rama inicial del sifón, pero es independiente del caudal que circulaba antes de la interrupción. La inercia de la masa de agua en movimiento hará que el nivel libre, en el tramo de entrada, descienda por debajo de la solera del canal posterior, en el cual irá disminuyendo el caudal poco a poco, hasta que cesa de manar.

En ese momento, el plano de agua está más alto en la rama de salida que en la de entrada, por lo que se iniciará un retroceso de la masa que acabará creando una desnivelación en sentido contrario; y así, tras una serie de oscilaciones "confinadas", de amplitud cada vez menor, quedarán enrasadas las aguas en las dos ramas del sifón, a un nivel tanto más bajo cuanto mayor fue-

ra el caudal que circulaba antes de la interrupción del servicio.

5. Método de cálculo

Para evaluar las fluctuaciones del flujo y de los niveles consecutivos a variaciones del caudal en el sifón, se parte de las ecuaciones dinámicas y de continuidad, de forma análoga al caso de las oscilaciones de masa en las chimeneas de equilibrio que protegen una galería de presión. La sección de la chimenea es, ahora, la superficie horizontal de la rama de entrada al sifón; no existen pérdidas de carga en la inserción de la chimenea en el conducto, puesto que no hay discontinuidad de una a otra; y la longitud de la conducción varía durante las oscilaciones de masa, alargándose en los ascensos y acortándose en los descensos.

Esta variación habría que tenerla en cuenta en un cálculo riguroso del proceso oscilatorio, pues también afecta a las pérdidas de carga, proporcionalmente. Ello supone una complicación suplementaria en la determinación de los parámetros del cálculo, a la par que una cierta incertidumbre para fijar cuál es, realmente, la longitud en cada intervalo de integración: si se considera como tal la distancia entre la superficie libre, supuesta horizontal, y el extremo del sifón, o se supone que, hasta cierta profundidad, no hay tal plano horizontal, pues está afectado por las perturbaciones que crea el flujo que vierte por el tramo de entrada, en régimen rápido, con expulsión del aire que ha emulsionado en su recorrido. Con mayor rigor, habría que considerar si ese chorro que cae sobre la masa de agua que se mueve lentamente, le transmite una parte de su energía cinética o si toda ella se disipa en turbulencias superficiales, bolsadas de aire, etc.

La influencia de estas circunstancias en sifones de gran longitud, es tan pequeña que queda englobada en la incertidumbre de los coeficientes de cálculo de las pérdidas de carga. Así, en un ejemplo que se ha analizado (si bien, de forma muy simplificada) teniendo en cuenta variaciones de longitud o suponiéndola constante, la diferencia del máximo ascenso fue del 0,5% de la amplitud de la oscilación, menor que la que se obtendría si la rugosidad del conducto fuera de 0,45 mm en lugar de 0,5 mm con que se realizó el cálculo. No se pretende en este estudio llegar a aco-taciones de milímetros, ni siquiera de decímetros, sino analizar el proceso de las oscilaciones del

flujo y de los niveles y tratar de disminuir las posibles consecuencias negativas de estas fluctuaciones en la conducción a lámina libre.

6. Notaciones y fórmulas

Empleando la notación habitual de las chimeneas de equilibrio, los parámetros de cálculo son:

- L (m): longitud del sifón, supuesta constante.
- g (ms⁻²): aceleración de la gravedad.
- w_i (ms⁻¹): velocidad del flujo en presión, en cada instante.
- w_r (ms⁻¹): velocidad del flujo en régimen estable
- p: coeficiente de pérdidas de carga (pérdida de carga para W=1)
- F (m²): sección normal de la conducción.
- F (m²): superficie horizontal de la chimenea.
- Q_r (m³s⁻¹): caudal de régimen.
- z_i (m): desnivel entre el plano de agua en la chimenea y el de salida.
- Δt (s): intervalo de integración.

Las fórmulas de cálculo de la oscilaciones de masa, son:

$$w_{i+1} = \frac{\left(\frac{L}{g\Delta t} - \frac{f\Delta t}{4f}\right)w_i + Z_i + \frac{Q\Delta t}{2F}}{\frac{L}{g\Delta t} + \frac{f\Delta t}{4F} + p|w_i|}$$

$$\Delta Z_{i+1} = \frac{Q_r\Delta t}{F} - \frac{f\Delta t}{2F}(w_i + w_{i+1}) - \Delta h_i$$

El término Δh_i (incremento de calado en el canal posterior), no se tiene en cuenta en el cálculo habitual de chimeneas, porque la conducción desemboca en un embalse, cuyo nivel es constante o casi constante durante el tiempo de oscilación. En régimen uniforme del sifón,

$$h = pw_r^2 - Z$$

Si la oscilación tiene lugar dentro de un tramo de tubería de pendiente tgα, la sección de chimenea a considerar es

$$F = f \cos ec\alpha$$

El caudal de salida del sifón es, en cada instante, Q_s = fw_i

7. Simplificaciones

Quando, en una oscilación, el nivel libre a la entrada alcanza al canal anterior, se produce en él un remanso cuyo cálculo mediante la conocida fórmula

$$A\alpha = \frac{h_2 + \frac{v_2^2}{2g} - h_1 - \frac{v_1^2}{2g}}{i_f - \frac{i_1 + i_2}{2}}$$

complica notablemente el proceso operatorio. Pero se puede hallar el volumen de agua que se almacena a la entrada del sifón para cada incremento de altura y sustituir la curva real de volúmenes por otra más sencilla, incluso rectilínea, asimilando así el remanso a un depósito de gran extensión.

En el canal posterior, habría que calcular el régimen variado que se crea por el continuo cambio del caudal de salida.

Para tener una estimación suficiente del proceso oscilatorio, se puede prescindir de este cálculo, lo que equivale a suponer que a la salida del sifón, el agua vierte a nivel fijo. La cota de descenso del nivel, en una interrupción del servicio, permite conocer, aproximadamente, la situación de equilibrio final, que será la de partida cuando se reanude la aportación. Además, si todo el descenso tuviera lugar en un tramo de tubería de igual pendiente, α, se puede hallar el desnivel directamente, sin necesidad de calcularlo por incrementos finitos, ya que las ecuaciones cinética y de continuidad son, en este caso, integrables.

Utilizando los valores relativos p_0 y z_0 que Calame y Gaden enunciaron para las chimeneas de equilibrio

$$z_0 = \frac{z}{w_0 \sqrt{\frac{Lf}{Fg}}} = \frac{z}{w_0 \sqrt{\frac{L \text{sen} \alpha}{g}}}$$

$$p_0 = \frac{pw_0^2}{w_0 \sqrt{\frac{Lf}{Fg}}} = \frac{pw_0}{w_0 \sqrt{\frac{L \text{sen} \alpha}{g}}}$$

el máximo descenso se obtiene de la ecuación

$$1 - 2p_0 z_0 = e^{-2p_0(z_0 + p_0)}$$

que, llamando $x = 2p_0 z_0$, se puede escribir

$$1 - x = e^{-2p_0^2 e^{-x}}$$

Hallado el valor de x , el descenso resulta

$$z = \frac{Lx \text{sen} \alpha}{2gp}$$

y el volumen de agua que se ha desaguado en exceso durante la parada

$$V_e = \frac{Lfx}{2gp}$$

De ello se deduce que el nivel de reposo a que queda la masa, una vez amortiguadas las oscilaciones "confinadas", está por debajo de la solera de salida, a una profundidad

$$h_e = \frac{Lx \cdot \text{sen} \alpha \cdot \text{sen} \beta}{2gp(\text{sen} \alpha + \text{sen} \beta)}$$

Siendo β el ángulo vertical de la rama de salida del sifón, y suponiendo que el agua del canal posterior no retrocede.

Cuanto mayor sea la pendiente del tramo inicial, tanto mayor será el descenso h_e ; en cambio, el volumen V_e disminuye al crecer el ángulo α . El nivel final estará más profundo cuanto mayor fuera el caudal de partida, como ya se señaló. Para un determinado valor de α , h_e será mayor cuanto mayor sea β ; pero la recíproca no es cierta, pues para cada pendiente final, hay una de la rama de entrada que da lugar al máximo descenso del nivel de reposo.

8. El periodo de oscilación

En las chimeneas de equilibrio el período de las oscilaciones de masa, suponiendo que el rozamiento de la conducción en carga fuera nulo, es

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{LF}{gf}} \text{ (segundos)}$$

si en toda la amplitud del movimiento, la sección F es constante. Con esa misma condición, las oscilaciones en un sifón cuyo tramo de entrada tenga un ángulo α , tendrán un período

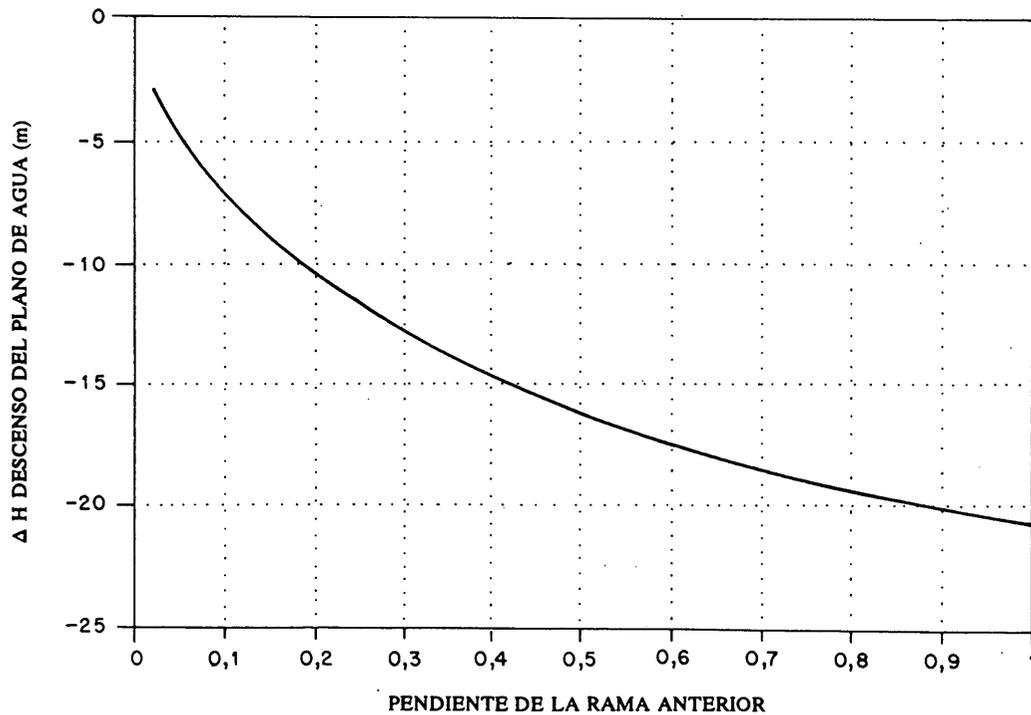
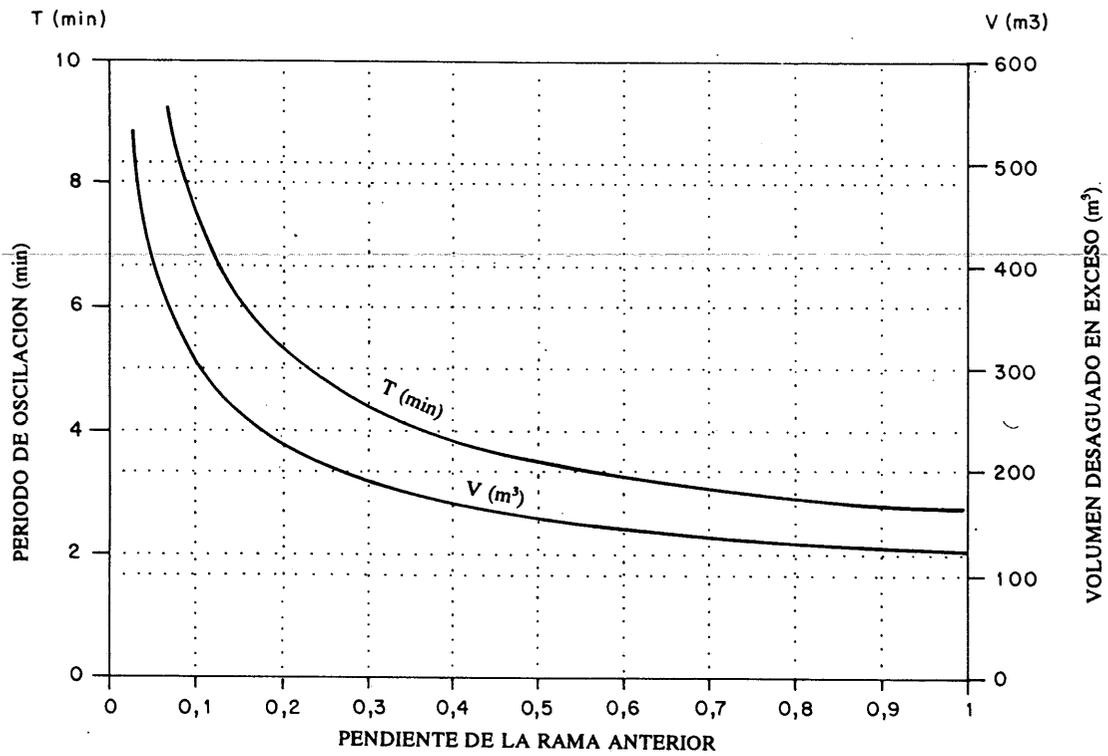
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g \text{sen} \alpha}}$$

En realidad, la sección F que entra en estas fórmulas no es el área horizontal de la chimenea sino la media armónica entre dicha área y la superficie del embalse de donde arranca la conducción

$$\frac{1}{Fm} = \frac{1}{F} + \frac{1}{Fe}$$

Al ser mucho mayor el embalse que la chimenea, F_m es, prácticamente, igual a F . Lo mismo sucede en los sifones mientras el flujo desemboca en el canal posterior, cuya superficie equivale a la de un embalse; pero en las que se ha denominado "oscilaciones confinadas", la sección a consi-

OSCILACIONES CONFINADAS



derar es la media armónica de las áreas horizontales de los tramos de entrada y salida, de lo que resulta un periodo

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g(\text{sen}\alpha + \text{sen}\beta)}}$$

más breve, por consiguiente, que el de la oscilación normal.

Las pérdidas de carga alargan el periodo de la oscilación en las chimeneas, de acuerdo con la expresión original

$$T = \frac{2\pi L}{g \sqrt{\frac{L_f}{Fg} - p^2 w_r^2}}$$

siendo p , como antes se indica, el coeficiente de pérdidas y W_r la velocidad que corresponde al caudal del salto $Q_r = fw_r$. Para $p = 0$ y para $W_r = 0$ (cierres de turbinas) la fórmula coincide con la señalada previamente. El periodo crece con W_r y llegará a ser infinito cuando

$$W_r = \frac{1}{p} \sqrt{\frac{L_f}{Fg}}$$

Inversamente, para un máximo caudal de régimen Q_r , el plano del agua se acercará asintóticamente a su nivel de equilibrio dinámico, si la sección de chimenea vale (1)

$$F_a = \frac{L_f^3}{gp^2 Q_r^2}$$

En los sifones, al no haber ningún órgano que limite el flujo, no puede darse el ascenso asintótico hasta el nivel de equilibrio final, que será siempre sobrepasado, tanto más cuanto menor sea la superficie libre. Además, las variaciones durante el proceso oscilatorio de L y de p , que anteriormente se han despreciado, adquieren importancia en el cálculo del periodo cuando el ángulo α es muy pequeño, por lo que la fórmula completa sólo vale como aproximación.

9. Resonancias

En los saltos hidroeléctricos es preciso calcular la amplificación de las oscilaciones de masa que se pueden producir en la chimenea como consecuencia de maniobras del regulador -del mismo signo o del contrario-realizadas durante el proceso oscilatorio de la maniobra precedente. Por ejemplo, si se reanuda la turbinación mientras está descendiendo el nivel en la chimenea a causa de una parada anterior, la bajada será mayor que la producida por una apertura simple.

La probabilidad de que se produzcan resonancias en centrales hidroeléctricas es muy alta, dada la prontitud de respuesta que se exige a estas instalaciones.

En el caso de un canal de riegos o abastecimiento, las variaciones del caudal darán lugar a las oscilaciones en el sifón que se han descrito previamente; pero que, en breve lapso de tiempo, se efectúen sucesivos cambios del flujo que originen resonancias en las oscilaciones de masa, es tan poco probable que no merece mayor consideración.

Por el contrario, cuando existen dos o más sifones largos en una misma conducción a lámina libre, sí pueden producirse fenómenos de resonancia de las oscilaciones del caudal. Como antes se señala, una duplicación de la aportación puede crear, a la salida del primer sifón, un flujo triple del inicial que, posteriormente, se reducirá incluso por debajo del primitivo, y crecerá después, amortiguándose las fluctuaciones poco a poco. En el segundo sifón, los cambios del caudal de llegada pueden originar variaciones de los caudales de salida notablemente mayores.

En tramos de canal donde haya varios sifones próximos, habrá que estudiar estas posibles resonancias para coartar la amplificación de las oscilaciones. Recientemente se ha proyectado una importante conducción en la que, en un trayecto de menos de 40 km, existen tres sifones, con una longitud conjunta del 69% del recorrido. Es probable que, de no haber largos tramos intermedios a lámina libre, las oscilaciones del caudal se amplificarían hasta límites poco convenientes, durante las fases transitorias de cambio del flujo, aunque las ondas de cada sifón tengan periodos diferentes. (La condición de sincronismo, que es independiente del diámetro de las tuberías y del

caudal de transporte, es que las longitudes totales y los ángulos del tramo inicial estén en la relación (2)

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{\text{sen}\alpha_1}{\text{sen}\alpha_2}$$

10. Recomendaciones

Algunos de los extremos que se han expuesto en estas notas pueden resultar excesivamente teóricos, con escasa trascendencia en la práctica, pues sus efectos negativos serán de mínima incidencia en instalaciones bien diseñadas y quedarán dentro de los márgenes de seguridad adoptados. El incremento de caudal por encima del máximo a causa del remanso de las aguas ante la cabecera del sifón, suele ser insignificante, al serlo también la sobreelevación de dicho remanso que, a estos efectos, equivale a una gran cámara de oscilación. En el canal que anteriormente se cita, con un caudal de $26 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, al crecer el calado un centímetro el volumen de retención aumenta 360 m^3 .

La evaluación de las pérdidas de carga en los conductos, es un aspecto fundamental del diseño de la instalación. Una vez más, se insiste en la inconveniencia de calcularlas mediante fórmulas establecidas para cauces naturales, aunque sus coeficientes estén "contrastados" en pequeñas tuberías o acequias. En un sifón importante, construido hace varios años, se comprueba que el parámetro adoptado para el cálculo sería el adecuado si el diámetro de los tubos hubiera sido la tercera parte del de diseño, de donde resulta que la capacidad del conducto es casi un 10% menor que la prevista.

Si las pérdidas de carga máximas para la aportación de proyecto se han estimado correctamente, cuando se presente esta aportación apenas se producirán sobreelevaciones ni fluctuaciones del caudal de salida. El ascenso del agua en el tramo inicial del sifón habrá sido muy rápido en los primeros momentos; pero será muy lento a partir del instante en que el nivel sobrepase la cota de solera del canal anterior, por ser ya grande, y cada vez más, la superficie libre del flujo.

En cambio, a la llegada de caudales parciales cuyo nivel de equilibrio dinámico esté situado por

debajo de dicha solera, el ámbito de la oscilación estará dentro de un tramo de tubería de reducida superficie horizontal, lo que dará lugar a las fluctuaciones que aquí se han descrito. La forma de atenuarlas es disponer la rama inicial del sifón con inclinación lo más suave posible y lo más continuada que permita la topografía del emplazamiento, para que su sección horizontal sea amplia y queden, en ese tramo de poca pendiente, las cotas de equilibrio de gran parte de la gama de caudales parciales.

Cuando el perfil del valle que ha de cruzar el sifón es muy abrupto en su comienzo, la tendencia general es llegar con el canal hasta las proximidades del cortado para disminuir la longitud entubada de la conducción y, con ello, el coste y el desnivel. Pero con ese esquema, la rama de entrada tendrá fuerte pendiente y poca superficie horizontal, por lo que las fluctuaciones del caudal de salida serán más pronunciadas que las que se darían si se hubiera ubicado la cabecera del sifón lejos del escarpe. En cada caso particular habrá que pesar las ventajas e inconvenientes de una u otra disposición y de los posibles efectos en el cauce de aguas abajo.

Por el contrario, la pendiente del tramo final del sifón apenas tiene influencia en los fenómenos transitorios descritos. Solamente condiciona el nivel a que quedará el agua, en reposo, durante las interrupciones del servicio y el periodo de las oscilaciones confinadas, lo que no tiene ninguna importancia práctica.

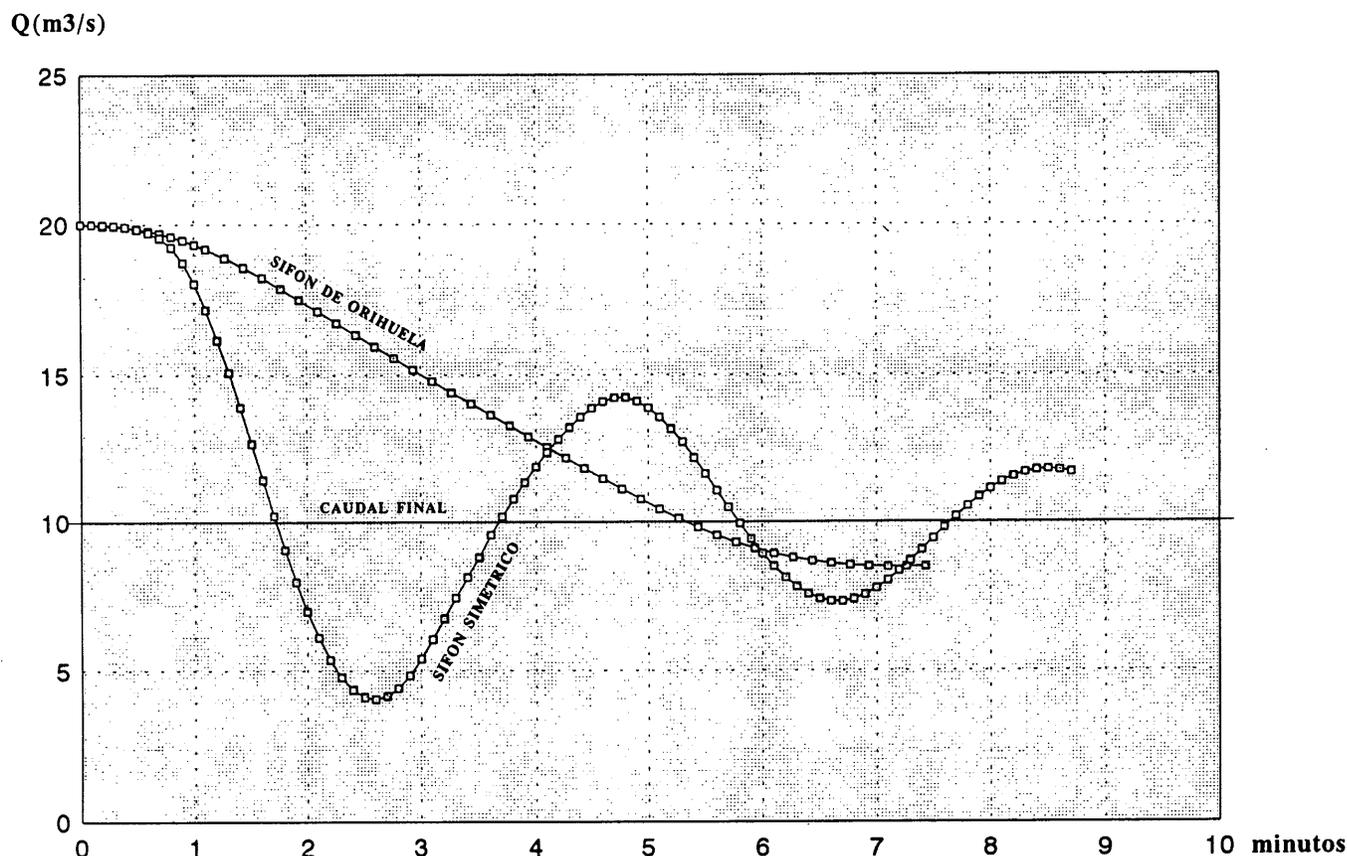
Para dejar patente la influencia que tiene el perfil inicial de las tuberías de un sifón sobre las oscilaciones del flujo de salida, se han calculado estas fluctuaciones en una instalación real, el sifón de Orihuela, y cómo variarían los caudales si el perfil hubiera sido el simétrico; es decir, si las aguas circularan en sentido contrario (pero manteniendo el mismo desnivel entre las bocas de entrada y salida).

11. El Sifón de Orihuela

El sifón de Orihuela está formado por dos tuberías de 2,35m de diámetro y 5,2km de longitud. Se inicia el tramo en presión con una pendiente muy suave ($i = 0,0383$), mientras que la rama de salida tiene una inclinación de $24^\circ 15'$ ($i = 0,4505$). Los canales anterior y posterior son de sección

DESCENSO DE LA APORTACION DESDE 20 m³/s A 10 m³/s EN 1 MINUTO

CAUDALES A LA SALIDA DEL SIFON



trapezoidal, con pendiente de dos diezmilésimas y 3m de anchura de solera. A partir de estos datos, se ha realizado el cálculo de las fluctuaciones de caudales a la salida, cuando la aportación desciende de 20m³s⁻¹ a 10m³s⁻¹, en un minuto. Se ha supuesto un coeficiente de pérdidas de carga de 1,396 que corresponde a una rugosidad de los tubos de 0,25mm (equivalente de arena). El coeficiente de Manning apropiado a esta rugosidad y al diámetro de estos conductos, es $n = 0,0115$.

En el sifón real, al bajar la aportación, desciende el nivel libre del agua en el tramo de entrada 8,06 m en 5 min 15 seg, rebasando en -1,81 m la cota de equilibrio final. Dos minutos después el caudal de salida llega a su valor mínimo (84,5%). No se prosigue el cálculo porque las fluctuaciones posteriores serán ya tan leves que no vale la pena evaluarlas.

En el teórico sifón "especular", el primer descenso del agua en la tubería de entrada rebasa -11,65 m el nivel de régimen final y se produce a 1 min 42 seg. El caudal de salida, que va disminuyendo, llega a su mínimo (40,7% del definitivo) a los 2 min 36 seg. Luego crece hasta el 142,2% y vuelve a descender al 73% en un breve lapso de tiempo. El periodo de oscilación es de 4 min 12 seg, mayor que el que corresponde a la pendiente de la tubería porque, en los ascensos, el nivel libre aún alcanza la obra de emboquillado del sifón.

Las fluctuaciones de caudales tan rápidas y pronunciadas, todavía se amplificarían más si, aguas abajo de este sifón supuesto hubiera otro, aunque fuera de menor entidad. Por ello, en el caso de sifones en serie, es necesario hacer un estudio conjunto, de forma que las perturbaciones no se sumen, sino que se contrarresten en lo po-

sible, y no imposibiliten la implantación de automatismos de regulación o de derivación de caudales, almenaras, aforadores, etc. ■

(1) En instalaciones hidroeléctricas, con galerías de presión de diámetro d revestidas de hormigón, de rugosidad media, el diámetro equivalente de chimenea para que el agua no descienda por debajo del nivel de equilibrio correspondiente al caudal máximo del salto es, aproximadamente

$$D = \frac{225d^{4,2}}{Q\sqrt{L}}$$

El nivel puede ser sobrepasado, si bien ligeramente, en el caso de "resonancia" de maniobras.

(2) La fórmula completa, en la que intervienen caudales y diámetros, da resultados muy poco diferentes, en general.