

ESTUDIO DE LOS PROBLEMAS HIDRÁULICOS EN EFECTOS DESTRUCTIVOS DE LA CENTRAL DOCK SUR¹

Ing. RAÚL A. LOPARDO
Académico de Número

Antecedentes históricos del sifón invertido

Cuando conducciones a superficie libre se encuentran con obstrucciones en su camino tales como ríos, canales, túneles o valles es frecuente encontrar estas estructuras denominadas “sifones invertidos”, que consisten en un brusco descenso del conducto hasta la cota necesaria, luego un tramo horizontal bajo esa obstrucción y finalmente un ascenso hasta la cota del terreno.

En realidad, ese conducto no trabaja hidráulicamente como un sifón convencional, por lo que algunos autores han propuesto denominarlo como “depressed sewer”, una suerte de alcantarilla sumergida (Metcalf & Eddy Inc., 1981).

Desde un punto de vista histórico, puede afirmarse que “el sifón apareció por primera vez sobre una conducción de agua en Jerusalén, pero son los griegos los que lo divulgaron en Grecia, Sicilia, España y Asia Menor a partir del principio del siglo II antes de nuestra era” (Hill, D. 1984). Según Litaudon (Litaudon, J.C., 2002), en los cuatro acueductos romanos que servían de agua potable a la ciudad de Lyon había una gran cantidad de sifones “invertidos”.

De acuerdo con esas referencias de obras ya pretéritas, en caso del sifón invertido, “el agua llega al depósito situado en la entrada, llamado aquí el depósito de captura” y sale por varios tubos, para dividir el flujo, que se apoyan en una parte construida llamada rampa, antes de llegar al suelo. “El codo (*geniculus*) causado por el brusco cambio de pendiente era el lugar más frágil de los sifones. Cruzado el valle, los tubos remontaban del otro lado hasta el otro depósito, llamado el depósito de fuga, situado algo más bajo que el primero y

¹ La conferencia corresponde al trabajo realizado en conjunto por los Ings. Raúl A. Lopardo, Daniel Bacchiaga y José Casado.

finalmente el agua encontraba el canal normalmente construido y seguía su curso por gravedad hacia su destino”.

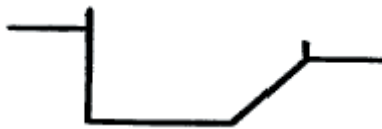
Con referencia a este tipo de estructuras, se pueden apreciar algunos interesantes conceptos como que “...si los valles son muy largos habrá que poner tubos descendiendo según la pendiente de la ladera, sin sostenerlos por la albañilería; y sucederá que irán muy lejos en el fondo del valle según su nivel, que es lo que se llama vientre... puesto que si no se conducen por este largo espacio que está a nivel a lo largo del valle, remontarán muy pronto, formando un codo que forzará al agua a hacer un esfuerzo capaz de romper todos los empalmes de los tubos. En este tramo llamado vientre, será necesario hacer ventosas por las cuales el aire que quede encerrado, pueda salir” (Marco Vitruvio, 23 a.C.)

En principio, los principales tipos de sifones son los que se indican a continuación (República de Bolivia, 2001):

- ✓ De ramas oblicuas, que se emplea para cruces de obstáculos, para lo que se cuenta con suficiente desarrollo, y en terrenos que no presentan grandes dificultades de ejecución.



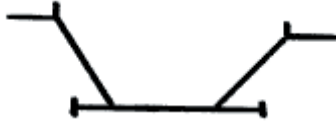
- ✓ De pozo de ingreso vertical, en el que aparece una cámara de carga aguas arriba que se continúa con el tubo vertical de descenso.



- ✓ de ramas verticales que, como el anterior, son preferidos para emplazamientos de poco desarrollo o en caso de grandes dificultades constructivas; sus características de fácil limpieza y reducido espacio, los hacen muy aconsejables.



- ✓ Con cámaras de limpieza, que tiene su mayor aplicación en obras de cruce de vías de transporte subterráneas (subtes).



El presente caso es claramente el mencionado en tercer término, pues cuenta con las dos ramas de entrada y salida verticales, aunque no con una cámara de carga aguas arriba, tal como se observa en los diseños convencionales.

El sifón invertido es una obra de costo relativamente elevado y presenta dificultades de limpieza y desobstrucción, razón por la cual debe ser utilizado solamente después de un estudio comparativo con otras alternativas. En el caso del presente estudio, además de que el sifón ya era existente, por las características de la zona de descarga no se estima posible una alternativa más favorable.

Hidráulica de sifones invertidos

El sifón invertido presenta aproximadamente una forma de U interconectada con dos cámaras. En su entrada existe una cámara cuya función es orientar el flujo hacia el sifón propiamente dicho y a su salida otra que permite guiar el flujo efluente hacia el colector aguas abajo. Entre estas cámaras, el escurrimiento se produce por gravedad, en conducto forzado (escurrimiento a presión), siendo por lo tanto el nivel de agua en la cámara de entrada superior al de la cámara de salida.

La conexión entre las dos cámaras es lo que constituye el sifón propiamente dicho. Este tipo de estructura tiene uso muy habitual en sistemas sanitarios, existiendo algunas normas acerca de su diseño.

Los conceptos hidráulicos aplicables son, en general, aquellos que corresponden a conductos a presión cuya pérdida de energía es igual a la diferencia de niveles entre las cámaras de entrada y la salida. Para los cálculos de pérdidas generales de energía, debidas a la fricción contra las paredes del conducto, algunos recomiendan el uso de la fórmula universal de cálculo de conductos, con el coeficiente de rugosidad uniforme equivalente $k = 2 \text{ mm}$, equivalente a un valor $n = 0,015$ de la fórmula de Manning (República de Bolivia, 2001).

Para el cálculo de pérdidas de carga localizadas, que son debidas a las singulares de la conducción, en esa referencia se utilizan las siguientes expresiones:

a) En cámara de entrada al Sifón

La pérdida de carga J_e , supuesta la entrada por un cambio de rasante en solera de borde agudo es:

$$J_e = 1,1 (U^2/2 g),$$

donde U es la velocidad media en el conducto y g la aceleración de la gravedad.

b) Pérdida de altura potencial J_f

Debido al incremento de velocidad al pasar de una velocidad media U_1 en el colector de llegada, que no funciona en carga, a una mayor velocidad del agua en el Sifón U_2 , es necesario agregar:

$$J_f = 1,1 (U_2^2 - U_1^2)/2 g),$$

c) Pérdida de carga en el sifón propiamente dicho

c.1.) Pérdida debida a los codos:

$$J_c = 0,132 (U_2^2/2 g) (\alpha^\circ/90^\circ)$$

c.2.) Pérdida por fricción debida al rozamiento con las paredes para la longitud "L" de sifón:

$$J = j L.$$

El cálculo de caudales en régimen uniforme y permanente puede ser efectuado utilizando, como en el caso de alcantarillas a presión (Chow, V. T., 1959) a partir de la ecuación de Chézy-Manning:

$$j = (U/n)^2 R^{-1/3}$$

donde "j" es la pérdida unitaria de energía por fricción, "U" es la velocidad media, "n" es el coeficiente de Manning (que depende de la rugosidad de las paredes)

y "R" el radio hidráulico de la sección del conducto, calculado como la relación entre el área de la misma y su perímetro mojado.

elcálculo de sifones invertidos.

Por tanto, la pérdida total será:

$$J_T = J_e + J_f + J_c + J.$$

Según la bibliografía específica, para obtener una buena autolimpieza en el sifón invertido, la velocidad del líquido en su interior debe ser como mínimo de 0,90 m/s, que, además de impedir la sedimentación del material sólido en la tubería, es capaz de remover y arrastrar los sólidos ya depositados.

Por tanto, un criterio racional para el dimensionamiento de sifones invertidos puede ser la imposición de tener en cualquier época una velocidad mayor o igual a 0,90 m/s para el caudal máximo de aguas residuales de un día cualquiera.

Un criterio de dimensionamiento alternativo, que está siendo adoptado con éxito en Brasil, es el de garantizar una velocidad igual o superior a 0,60 m/s para el caudal medio, a lo largo de todo el período de proyecto. Este criterio, da resultados próximos a aquellos obtenidos por el uso del anteriormente expuesto.

La velocidad máxima es función de las características del material del sifón y de la carga disponible, pero de un modo general se aconseja que la misma no supere 3,0 m/s.

Descripción de la obra existente

La central Dock Sud se encuentra emplazada en el partido de Avellaneda, sobre la calle Debenedetti N° 1636, y cuenta, para su adecuado funcionamiento con un sistema de refrigeración que permite el enfriamiento de las unidades de generación. Este sistema se compone de obras de toma emplazadas sobre la margen izquierda del canal Dock Sud y de una estación de bombeo compuestas por dos unidades de impulsión dotadas de un caudal de diseño de 5,52 m³/s con una altura de impulsión de 21 m.

Una vez que se ha producido el enfriamiento del agua, el sistema se complementa con un conducto principal de descarga que restituye el flujo de refrigeración al río de La Plata. La longitud total del conducto de descarga es de 1.364 m, de los cuales 185 m corresponden a un sifón invertido mediante el cual se atraviesa el canal Dock Sud.

La estructura del sifón contaba, originalmente, con una cámara de carga cerrada emplazada en el extremo aguas arriba. No obstante, el proceso de ampliación de la planta requirió, aparentemente, una modificación en la estructura de acceso al sifón, la cual se materializó mediante la incorporación de un vertedero de control ubicado inmediatamente aguas debajo de la salida del conducto de refrigeración de la planta de generación. Este vertedero cumpliría, en principio, el doble propósito de mantener un nivel mínimo para evitar el vaciado del sistema de refrigeración durante períodos de mantenimiento, así como garantizar un adecuado funcionamiento del sifón.

La estructura del vertedero se conforma de un perfil de planta semi-oval, con una cota de desborde relativa de +100,50, ubicada a 4,3 m por encima de la embocadura del sifón. El perfil de vertimiento propiamente dicho presenta una geometría curva conformada por cinco segmentos de círculos de radios variables entre 0,118 m y 1,40 m. El flujo de refrigeración accede al vertedero mediante una cámara perimetral a la cual descarga, en cota +94,75, el conducto proveniente de la planta de generación.

La estructura del sifón está compuesta por un conducto vertical inicial, de sección circular de 2,50 m de diámetro y de 14,30 m de longitud, que vincula la estructura del vertedero con el tramo horizontal que permite atravesar el canal Dock Sud. Este tramo, de 185 m de longitud, está compuesto por una sección tipo “baúl” de 2,50 m de ancho, que culmina con un conducto vertical de empalme con el canal final de descarga. A partir de esta sección de embocadura, el canal se desarrolla en una longitud total de 1169 m, con unas secciones variables cuadradas y rectangulares de 2,50 m x 2,50 m, 3,50 m x 2,50 m y 2,95 m x 2,95 m.

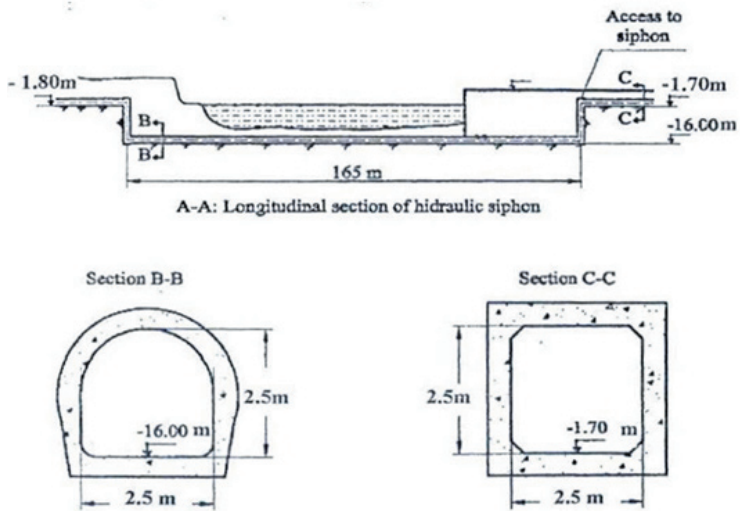


FIGURA 1: Layout and dimensions of the duct.

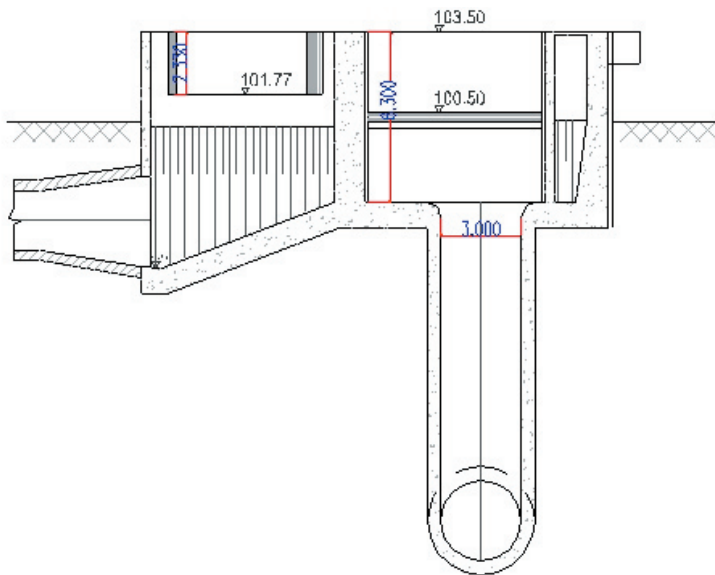


FIGURA 2. Corte lateral de la cámara de ingreso al sifón invertido.

Comportamiento y análisis del sistema en régimen transitorio

Si se efectúa un análisis hidráulico en régimen permanente, no se registran solicitaciones superiores a las consideradas en el cálculo de verificación estructural. En consecuencia, el análisis realizado no permitiría explicar, considerando las condiciones de operación en régimen permanente y bajo la hipótesis de un adecuado nivel de resistencia del conducto, los procesos de rotura y fisuración registrados frecuentemente en el mismo. No obstante, del análisis realizado pueden extraerse algunas conclusiones importantes que permitirán establecer las pautas necesarias para la comprensión del proceso de deterioro registrado en el conducto: a) el vertedero existente en la cámara de ingreso al sifón permite controlar la descarga del sistema de enfriamiento, manteniendo un nivel mínimo de sumergencia en la descarga de las unidades de bombeo, b) para todas las condiciones de restitución analizadas y para los distintos caudales de operación del sistema, no se observan condiciones de ahogamiento del vertedero, razón por la cual su descarga se produce en forma libre, c) esta descarga genera un proceso de disipación parcial de la energía residual aguas abajo del vertedero, dando lugar a la existencia de un nivel fluctuante en la zona inmediatamente aguas arriba de la sección de ingreso al sifón. Este proceso origina la potencial incorporación de burbujas de aire al escurrimiento, que son susceptibles de ser arrastradas aguas abajo, hacia la zona del tramo horizontal del sifón, d) para todas las condiciones de operación registradas, el sistema funciona, en todo su desarrollo, con niveles piezométricos superiores a la cota de techo del conducto, registrándose presiones positivas máximas del orden de los 18 m en el sifón propiamente dicho.

A partir de estas conclusiones preliminares, resulta posible asumir que la incorporación de aire a través de la sección de ingreso al sifón sea capaz de generar procesos transitorios, con fuertes incrementos de la presión sobre el dintel del conducto, a partir de la progresiva compresión del aire atrapado en su interior. Si se toman en consideración las condiciones de funcionamiento registradas en el sistema, la existencia de aire en el interior del conducto puede originarse tanto por el funcionamiento en régimen del mismo como por los procesos de llenado de la tubería luego de una operación de reparación de la misma.

La presencia de aire atrapado en el interior del escurrimiento resulta siempre inconveniente para los sistemas de conducción, dado que puede dar origen a condiciones de funcionamiento inestables y a solicitaciones superiores a las registradas bajo condiciones normales de operación. En particular, durante un proceso de llenado, la presencia de bolsones de aire puede originar la progresiva compresión del mismo, dando lugar a una variación en la cantidad de movimiento del flujo. Esta variación se traduce en un progresivo aumento de la presión de la bolsa de aire que dependerá, principalmente, de la carga hidráulica que la comprime.

Para efectuar el análisis de las consecuencias sobre el conducto a partir de la presencia de aire atrapado en su interior, pueden efectuarse hipótesis sim-

plificativas respecto del comportamiento del aire y del agua y de la geometría de los bolsones de aire: la masa de agua resulta *incompresible* en el proceso, el aire se comporta según los principios de los gases perfectos, considerándose un proceso de compresión adiabático y el volumen del bolsón atrapado resulta despreciable frente al volumen de agua que tiende a comprimir al mismo.

El análisis del comportamiento del sistema puede efectuarse, con las hipótesis anteriores, a partir del balance de la cantidad de movimiento del flujo durante un proceso transitorio:

$$\int_{P_0}^{P_1} P \cdot \Omega \cdot dt = \int_V^0 m \cdot dv$$

donde P es la presión absoluta del aire atrapado, Ω es el área de la conducción, m es la masa del líquido y dv el diferencial de velocidad del escurrimiento. Sobre la base de este planteo, puede obtenerse la relación existente entre la presión final y la presión inicial del bolsón de aire atrapado:

$$\frac{P_1}{P_0} = e^{f(\gamma, g, P_0, V, V_0)}$$

donde V es la velocidad inicial de escurrimiento de agua, V_0 el volumen inicial de agua, γ el peso específico del agua y g la aceleración de la gravedad.

Si bien este análisis resulta válido, en principio, para el proceso de llenado de la conducción, puede aplicarse también a la condición de funcionamiento en régimen, con bolsones de aire alternativamente ingresados en la conducción y arrastrados por el flujo a la zona superior del tramo horizontal del sifón. El hecho de considerar a la columna líquida como incompresible genera algunos inconvenientes cuando se intenta evaluar el comportamiento y las sobrepresiones máximas generadas por pequeños volúmenes de aire atrapado. El hecho de considerar la compresibilidad de la columna líquida da lugar a una aproximación más adecuada del problema, debiendo introducirse un parámetro que tenga en cuenta la celeridad de las ondas de sobrepresión generadas durante el transitorio de compresión del bolsón de aire (Acosta A., 1999).

Dadas las condiciones de operación del sistema, tanto en régimen permanente como en un transitorio de llenado de la tubería, resulta difícil evaluar

con precisión la cantidad de aire que puede incorporarse al conducto, así como el comportamiento de éste en el interior del mismo. No obstante, es posible afirmar que el sistema presenta elevadas probabilidades de incorporar aire en el seno del fluido, el cual puede ser arrastrado tanto hacia el tramo horizontal del sifón como hacia el conducto de descarga. En estas zonas, encontrándose el conducto trabajando a presión, puede generarse un proceso de compresión del aire en el dintel del mismo, principalmente en el tramo inferior del sifón donde no existen conductos de ventilación.

Bajo estas condiciones, y tomando en cuenta los conceptos teóricos planteados en el punto anterior, se efectuó un análisis de sensibilidad de las presiones máximas que puede alcanzar distintos volúmenes de aire incorporado al flujo en la sección de máxima presión del conducto horizontal del sifón. Para ello se empleó un modelo matemático, desarrollado en diferencias finitas, que permite calcular, sobre la base de la formulación teórica antes planteada, el comportamiento del transitorio producido por compresión de un bolsón de aire en el interior del conducto.

En la figura N° 3 se presenta el resultado obtenido para una condición de volumen inicial de aire de 21.2 m^3 en el interior de la tubería. Asimismo, en la figura N° 4 se aprecian los resultados correspondientes a cantidades pequeñas de aire, inferiores a 5 m^3 de volumen inicial. En todos los casos se observa un fuerte incremento de la presión relativa del aire, el cual, al estar en contacto con la conducción, transmite este nivel de solicitaciones sobre la estructura del conducto. En la Figura N° 5 se aprecia, en forma comparativa, la variación de la presión máxima alcanzada para diferentes volúmenes iniciales de aire atrapado. Tal como se aprecia, aun para volúmenes de aire relativamente pequeños, inferiores a 1 m^3 , las sobrepresiones resultan importantes, pudiendo alcanzarse valores variables entre 26 m y 86 m de columna de agua sobre la estructura.

De acuerdo a los antecedentes consultados con relación al cálculo de verificación estructural realizado, las cargas máximas consideradas corresponden al nivel del río por encima del conducto horizontal, es decir a 13,05 m (según la hipótesis asumida en el estudio estructural).

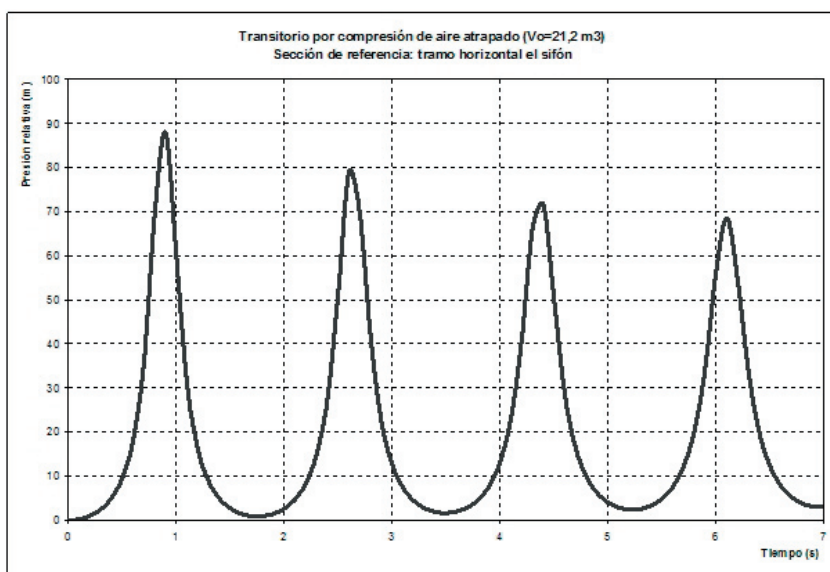


FIGURA 3. Variación de presiones (volumen inicial de aire $21,2 \text{ m}^3$).

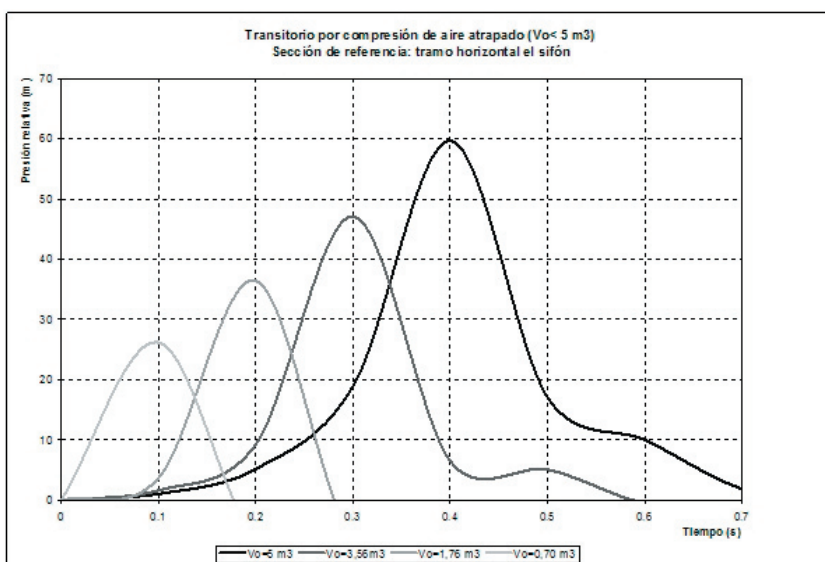


FIGURA 4. Variación de presiones (volumen inicial de aire $< 5 \text{ m}^3$).

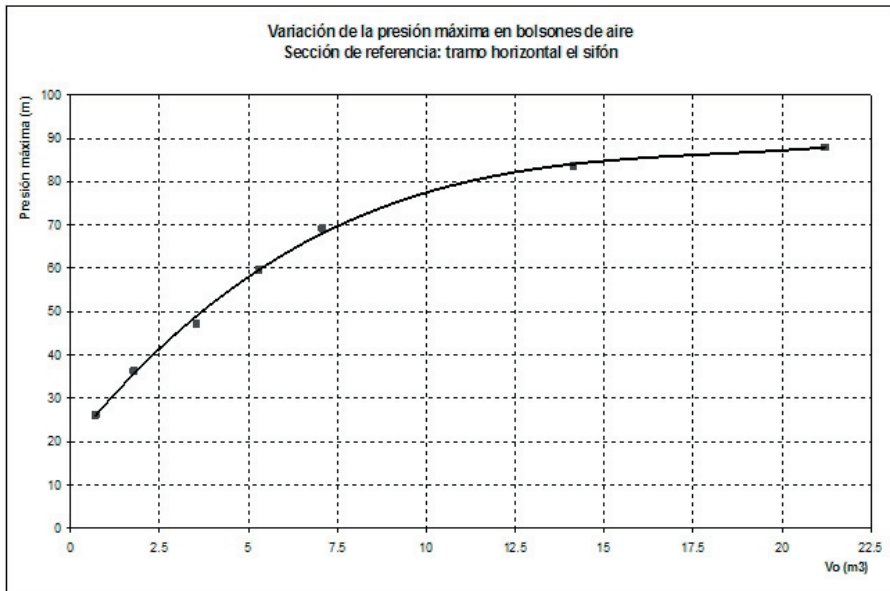


FIGURA 5. Variación de presiones máximas debidas a bolsones de aire atrapado.

Para esta condición de funcionamiento se obtuvieron coeficientes de seguridad del orden de 1,30, valor que, según dicha referencia, resulta inferior a los límites prefijados en los reglamentos de cálculo. No obstante el limitado coeficiente de seguridad, bajo condiciones de operación en régimen permanente, la estructura no debería presentar procesos de rotura o fisuración. Por otra parte, el hecho de considerar potenciales sobrepresiones que aumentarían entre dos y seis veces las cargas internas máximas consideradas en la verificación estructural, podrían poner en riesgo la integridad estructural de la conducción y explicar razonablemente los procesos de deterioro efectivamente registrados en obra.

Resultados de diagnóstico y alternativas de solución

De acuerdo a los análisis realizados, tanto en su funcionamiento en régimen permanente como régimen transitorio, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- El diseño del conducto de descarga del sistema de refrigeración de la central presenta ciertas particularidades derivadas, en principio, de restricciones impuestas por condiciones operativas del sistema de bombeo, por la necesidad de atravesar un curso de agua existente previo a la sección de descarga y por el espacio disponible para su emplazamiento.
- En el contexto planteado, se ha emplazado un vertedero de control que permite mantener cierto nivel de contra carga aguas abajo del sistema de bombeo, descargándose los caudales erogados directamente en la embocadura del sifón que atraviesa el canal adyacente a la planta. Esta configuración se aparta de los diseños convencionales de sifones invertidos, donde normalmente se diseñan sendas cámaras de carga, tanto aguas arriba como aguas abajo de la estructura de cruce.
- El vertedero existente en la cámara de ingreso al sifón permite controlar la descarga del sistema de enfriamiento, manteniendo un nivel mínimo de sumergencia en la descarga de las unidades de bombeo. Asimismo, para todas las condiciones de descarga analizada no se observaron niveles en el conducto de descarga, aguas abajo del vertedero, que generaran un funcionamiento ahogado del mismo.
- El análisis del sistema en régimen permanente permitió verificar que el conducto de descarga funciona a presión en todo su recorrido, tanto en el tramo correspondiente al sifón invertido como en el conducto rectangular de descarga final. En tales condiciones, se demostró que, para niveles de descarga del río de la Plata con recurrencias mayores a dos años, los niveles piezométricos alcanzados superan el nivel del terreno natural.
- De acuerdo a este análisis, las máximas presiones registradas en el conducto se encuentran en el orden de las consideradas como hipótesis en el cálculo de verificación estructural. Esta condición se observa para el sistema funcionando en régimen permanente y para toda la gama de niveles de restitución analizada (con valores máximos correspondientes a eventos de sudestada de 10 años de recurrencia). En consecuencia, de acuerdo a estos resultados, la operación normal del sistema no debería dar lugar a los procesos de deterioro y fisuración efectivamente registrados en obra.
- Sobre la base de este análisis inicial, se evaluaron las condiciones de ingreso del flujo al sifón invertido, considerándose para ello los cálculos realizados y las observaciones directas efectuadas en obra. En tal sentido, puede afirmarse que la descarga del vertedero genera un proceso de disipación parcial de la energía residual aguas abajo del mismo, dando lugar a la existencia de un nivel fluctuante en la zona inmediatamente aguas arriba de la sección de ingreso al sifón. Este proceso origina la potencial incorporación de burbujas de aire al escurrimiento, las cuales son susceptibles de ser arrastradas aguas abajo, hacia la zona del tramo horizontal del sifón.
- El análisis del régimen transitorio, realizado a partir de la potencial compresión del aire incorporado al seno del fluido, da lugar a la aparición de sobrepresiones máximas que incrementan, potencialmente, entre dos y seis veces las máximas cargas registradas en régimen permanente.

- Teniendo en cuenta que el cálculo de verificación estructural arrojó valores del coeficiente de seguridad relativamente bajos, y más allá de la verificación que debiera realizarse con las máximas sobrepresiones alcanzadas, podría considerarse como causa directa de los procesos de rotura registrados a la progresiva compresión del aire incorporado en el interior del conducto. Esta afirmación se sustenta en la hipótesis de que el sistema se encuentra en adecuadas condiciones estructurales para soportar las cargas normales derivadas del funcionamiento en régimen de la conducción, pero no así valores que al menos duplican los de cálculo original.
- El análisis de sensibilidad realizado con respecto a los efectos del aire determina que, potencialmente, se pueden generar condiciones de sollicitación que tiendan a dañar la estructura, a partir de un proceso de fisuración progresivo que podría implicar la rotura de la misma. No obstante, si se tienen en cuenta las condiciones de funcionamiento hidráulico de la estructura, las cuales fueron verificadas mediante *mediciones expeditivas*, no se considera factible que se haya producido un colapso de la estructura, más allá de fisuras diametrales visibles a partir del escape de aire al exterior.
- En consecuencia, la causa primaria a la cual puede atribuirse el proceso de deterioro del conducto deberá considerarse como condición de borde básica para el análisis de potenciales medidas de mitigación que permitan mejorar el funcionamiento del sistema e incrementar sus niveles de seguridad.

De acuerdo al funcionamiento actual del sistema y a las pautas básicas de diseño de sifones invertidos, se han considerado las siguientes premisas básicas para el desarrollo de las alternativas de solución:

- Las soluciones planteadas deberán evitar la incorporación de aire en el interior del conducto durante su funcionamiento en régimen permanente.
- Las variantes deberán permitir conservar un control de niveles en la descarga del sistema de bombeo que evite el vaciado completo del mismo durante la ejecución de tareas de mantenimiento en el sifón invertido.
- De acuerdo a las pautas generales de diseño de sifones invertidos, deberá lograrse un adecuado nivel de carga estática sobre la sección de ingreso al sifón, garantizándose la no formación de vórtices con incorporación de aire al conducto.
- Los sistemas alternativos planteados deberán mantener las condiciones de funcionamiento previstas para todo el rango operativo del conducto de descarga, considerándose como caudal de diseño el caudal máximo operativo de $11,04 \text{ m}^3/\text{s}$ y como caudal de verificación el caudal mínimo de $5,52 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Se deberá contemplar el uso de la estructura existente, tratando de reducir al máximo las modificaciones necesarias para lograr el funcionamiento hidráulico adecuado el sistema.
- Asimismo, deberá contemplarse un adecuado procedimiento de llenado del conducto a fin de evitar los riesgos inherentes a la compresión de aire atrapado en el interior del mismo.

Si bien el planteo de las premisas de diseño antes descritas orientan claramente la solución hacia la conformación de una cámara de carga en la sección de ingreso al sifón invertido, deben contemplarse la existencia de determinadas condiciones de borde impuestas por necesidades operativas de la planta y por el espacio disponible para el desarrollo de las soluciones. En el contexto planteado, y de acuerdo a las necesidades del Comitente, se han considerado las siguientes restricciones al planteo de las soluciones propuestas:

- Toda alternativa planteada deberá considerar la necesidad de funcionamiento del sistema que, en virtud de lo informado, sólo puede estar fuera de servicio por un período no mayor a los 25 días.
- En tales condiciones, se deberán contemplar soluciones que introduzcan cambios menores a la estructura existente o bien que permitan materializarse por etapas, con una construcción parcial fuera del ámbito de la estructura existente, materializándose los empalmes y las readecuaciones a la misma en períodos inferiores al límite antes señalado.
- No deberán alterarse las condiciones de circulación existentes en el interior de la planta, debiendo contemplarse variantes cuya geometría no supere el espacio disponible entre la cámara existente y la calle de circulación interna existente en forma adyacente a la misma.

Dimensionamiento de la alternativa seleccionada

A partir de la configuración geométrica adoptada para la alternativa seleccionada, se efectuó un análisis detallado de su comportamiento hidráulico, estableciéndose los niveles de operación característicos. Para ello se empleó la misma metodología detallada en la etapa de evaluación preliminar de alternativas, evaluándose el funcionamiento del sistema para un caudal de 11,04 m³/s y niveles de restitución asociados a distintos períodos de recurrencia. Asimismo, se efectuó una verificación del sistema para la operación de un solo grupo de bombeo, situación que justifica las restricciones de uso impuestas al sistema.

En primera instancia se analizó el funcionamiento del conducto de descarga para los dos caudales de bombeo posibles y para niveles de restitución correspondientes a 1, 2, 5 y 10 años de recurrencia. En este primer análisis no se consideró el funcionamiento del vertedero auxiliar emplazado en la cámara de descarga. Para el caudal máximo de diseño se obtienen niveles de carga suficientemente elevados como para impedir el funcionamiento del vertedero de control existente en la embocadura del conducto. Esta situación no resulta similar para el caso de la operación del caudal correspondiente a un grupo de

bombeo, donde se observa que los niveles finales resultan siempre inferiores a la cota de cresta del mismo.

Asimismo, se observa en la figura que para un nivel de restitución correspondiente a 10 años de recurrencia, con el conducto operando con el caudal máximo, el nivel en la cámara resultaría superior al nivel de coronamiento del muro perimetral. No obstante, esta circunstancia resulta hipotética, dado que en este primer análisis no se consideró la operación del vertedero lateral de desborde.

El análisis realizado permitió corroborar que la configuración geométrica adoptada para la alternativa seleccionada resulta compatible con las premisas hidráulicas de diseño preestablecidas. En tales condiciones, para el caudal máximo de diseño se logran niveles en la cámara de ingreso ubicados entre 1,75 m y 2,31 m por encima de la cota de cresta del vertedero de control actual, garantizándose una sumergencia variable, respecto de la embocadura del conducto vertical de 5 m a 5,6 m. Estos niveles generan una adecuada revancha respecto de los riesgos de desborde por sobre el muro lateral de la estructura, registrándose, para el nivel de restitución más elevado considerado, un margen del orden de los 0,70 m. Asimismo se pudo verificar que el sistema no resulta apto para su operación con un solo grupo de bombeo, situación en la que se obtienen niveles en la cámara de ingreso inferiores a la cota de vertimiento de la estructura de control emplazada en cota 100,50 m.

De acuerdo al estudio realizado, puede decirse que la alternativa seleccionada cumple con el objetivo de resolver, para el estado de funcionamiento normal (con dos bombas a plena marcha), en forma económica el problema de la incorporación exagerada de aire en la tubería del sifón invertido, sin la construcción de una cámara de carga que, tal como se describiera en el texto, sería la solución integral ortodoxa, pero que, según el Comitente, podría exceder, en costos y plazos, las posibilidades constructivas.

Más allá de la ventaja comparativa que presenta, desde el punto de vista constructivo, debe destacarse que la alternativa seleccionada, por no contar con la cámara de carga, podría en ciertas condiciones resolver sólo parcialmente el problema, aunque se estima que su resultado sería sin dudas favorable respecto de las condiciones actuales. A partir de estas condiciones planteadas, se efectuó un análisis definitivo de la variante seleccionada, estableciéndose la ubicación y dimensiones del orificio de contracción, así como aspectos complementarios que hacen a su diseño definitivo.

Tal como se destacó previamente, no es posible encontrar una solución única de dimensionado del orificio, compatible con ambas condiciones de funcionamiento: dos bombas a pleno y una sola bomba del circuito de refrigeración en actividad. Cualquier mecanismo de carácter manual o automático que brindara respuesta para la totalidad del rango de funcionamiento resultó descartado, a efectos de evitar maniobras o elementos mecánicos dentro de un sistema que debe funcionar con el menor riesgo de falla. En virtud de incrementarse el nivel

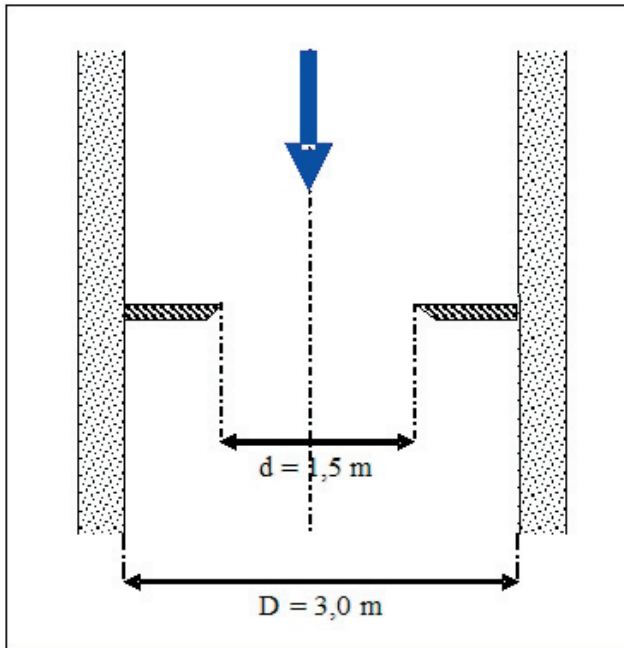
de aguas arriba mediante una contracción de la conducción de bajada, se han analizado las relaciones de diámetros más adecuadas para las dos situaciones posibles, seleccionándose naturalmente la que corresponde a la situación de funcionamiento normal. Esta circunstancia obedece al hecho de que el orificio requerido para una sola bomba en funcionamiento (orificio de menor tamaño que el anterior) determinaría un nivel en la cámara demasiado elevado para el caso de funcionamiento normal, que modificaría la condición de descarga de las bombas del sistema de refrigeración y excedería la cota de la cámara exterior, lo que no es aceptable.

Como consecuencia de lo expuesto, se ha considerado conveniente dimensionar el orificio de estrechamiento para la condición de funcionamiento normal, restringiendo, tal como se verá más adelante, las condiciones de operación del sistema para caudales menores al de diseño. La ubicación en vertical de la contracción debe asegurar dos aspectos importantes: nunca se debe encontrar por debajo de la cota mínima generada por el nivel de restitución (condición mínima de nivel del río de la Plata o nivel mínimo generado por la estructura de control aguas abajo del canal de descarga) y debe tener un flujo organizado en la totalidad de la sección mayor.

Tomando en cuenta las restricciones del problema y la decisión del Comité de concentrar el esfuerzo en la denominada Alternativa 1, resulta adecuado proponer la contracción de diámetro interno $d = 1,5$ m, concéntrica con la tubería de bajada de diámetro $D = 3$ m, a una distancia mínima de $L_{\min} = 2 D = 6,0$ m por debajo del comienzo de la tubería de bajada.

Esta contracción podrá materializarse en cualquier material resistente, sugiriéndose la conveniencia de que la misma se construya con acero inoxidable a fin de garantizar una adecuada durabilidad de la estructura.

En el esquema adjunto se observa la geometría en corte del anillo diseñado, apreciándose la necesidad de respetar el diámetro superior del mismo con las dimensiones preestablecidas. Asimismo, deber considerarse la materialización de un biselado como el indicado a fin de garantizar la independencia del funcionamiento del orificio con el espesor requerido para su estabilidad estructural.



El flujo de aproximación a la estructura de contracción deberá ser relativamente uniforme. Por esta razón se ha considerado imprescindible emplazar el orificio de contracción a una distancia superior a $2D$, contados a partir de la embocadura del conducto vertical actual. Considerando que dicha sección se encuentra en cota 97,20 m (referida al cero local de Dock Sud), el plano del orificio diseñado deberá ubicarse a una cota máxima de 91,20 m.

La conformación geométrica del orificio fue seleccionada a los fines de independizar su espesor de las condiciones de funcionamiento hidráulico del mismo. En tales circunstancias, el espesor deberá ser seleccionado a partir de condicionantes estructurales y de la metodología de fijación que resulte más conveniente. En todos los casos deberá respetarse la condición de garantizar un flujo uniforme sin perturbaciones, tanto aguas arriba como aguas abajo de la singularidad.

Aspectos complementarios

El fundamento sobre el cual se sustenta el diseño de esta alternativa radica en garantizar una adecuada sumergencia de la sección de embocadura del sifón invertido. Este hecho se logra impidiendo que el vertedero de control

actualmente existente en la cámara de entrada funcione como tal, debiendo garantizarse que, para cualquier condición de restitución en el río de la Plata, los niveles de operación en el ingreso se encuentren por encima de la cota de vertimiento.

La presencia del orificio introduce una elevada pérdida de carga al sistema, razón por la cual se produce un incremento de la carga hidráulica necesaria para garantizar el escurrimiento del caudal de diseño. No obstante, esta carga se encuentra fuertemente condicionada por los niveles de restitución en la descarga. Tal como se verá más adelante, para niveles del río de la Plata asociados a períodos de retorno superiores a 2 años, los niveles alcanzados en la cámara de ingreso resultan suficientes como para impedir el funcionamiento del vertedero de control. No obstante, la existencia de niveles extraordinariamente bajos podría dar lugar a niveles de carga en la cámara de ingreso no compatibles con las premisas de diseño preestablecidas.

Tal circunstancia pudo observarse en oportunidad de la visita de inspección y relevamiento efectuada en el mes de marzo de 2005, donde pudo apreciarse un nivel de río relativamente bajo, que no influenciaba la descarga del conducto de salida. En esa oportunidad, pudo relevarse el nivel de restitución existente en la sección inmediata aguas abajo de la compuerta de descarga, el cual se encontraba a 3,10 m por debajo del portal de superior de la misma. Teniendo en cuenta que la cota de referencia resulta de 98,72 m, la cota de restitución se emplazaba en 95,62 m. Considerando que en el momento de la medición se encontraba el sistema funcionando a pleno, es decir erogando un caudal de 11,04 m³/s, el pasaje del mismo por la sección de salida determinaría un tirante crítico de 1,14 m. Con este valor puede inferirse que la cota superior del fondo del canal de salida se encontraría, actualmente, en el entorno de los 94,50 m, es decir 1,50 m por debajo que su condición de proyecto emplazada en cota 96,00 m.

Para esta potencial configuración geométrica del canal de salida y con la existencia de niveles bajos en el río de la Plata, aun con la incorporación del orificio de estrechamiento, no se garantizarían niveles en la cámara de ingreso superiores a la cota de vertimiento del vertedero actual.

De acuerdo al análisis hidráulico realizado sobre la variante finalmente seleccionada, la incorporación del orificio de estrechamiento y la modificación de la geometría del canal de salida permitirían garantizar adecuados niveles de sumergencia sobre la sección de ingreso al sifón invertido.

No obstante, el análisis realizado permitió corroborar que, aun para niveles del río de la Plata inferiores a los 2 años de recurrencia, los niveles alcanzados en la cámara de ingreso determinarían el funcionamiento del vertedero auxiliar de desborde.

En tales condiciones, en caso de que se considere conveniente evitar una derivación frecuente de caudales por dicha estructura, resultará necesario efectuar un recrecimiento del nivel de cresta del vertedero auxiliar.

De acuerdo a los resultados del cálculo definitivo realizado, el nivel de cresta necesario para evitar la derivación de caudales para niveles del río de la Plata inferiores al indicado deberá ser de 102,60 m, es decir 0,83 m por encima de su cota de vertimiento actual.

Dado que el sistema no impide el ingreso de aire para funcionamiento parcial, con una sola bomba, se estima oportuno estudiar la posibilidad de agregar una chimenea en el tramo horizontal del sifón invertido, en el sitio más próximo posible al talud del Canal Dock Sur, a efectos de eliminar el exceso de aire que a esa distancia de recorrido se encuentre en la parte superior de la conducción.

Es importante considerar esta obra como un elemento de seguridad adicional frente a cualquier circunstancia que impida respetar rigurosamente la consigna de no utilizar el sistema con caudales menores la máxima de diseño adoptado.

Tal como se dijo, en esas condiciones, la pérdida de carga obtenida en el orificio de estrechamiento no resulta suficiente como para lograr niveles de sumergencia adecuados, razón por la cual el sistema funcionará a partir del vertimiento del flujo a través de la estructura de control existente. En este caso, se repetirían las condiciones propicias para el ingreso de aire, el cual podría ser eliminado a través de una columna de aireación adecuadamente emplazada aguas abajo de la primera curva vertical del sifón invertido.

Conclusiones

Se efectuó una evaluación del comportamiento actual que presenta el sistema de descarga del circuito de enfriamiento de la central termoeléctrica Dock Sud, situación que permitió establecer un diagnóstico de los problemas de rotura y deterioro registrados en el conducto.

A partir de este diagnóstico se efectuó un planteo integral de potenciales alternativas de solución, las cuales fueron evaluadas por el Comitente, que seleccionó la más conveniente tomando en consideración aspectos hidráulicos, constructivos y económicos. Sobre la base de la alternativa seleccionada, se efectuó un dimensionamiento final de la misma, estableciéndose sus principales características así como sus condiciones de funcionamiento hidráulico. Sobre la base del análisis realizado, pueden extraerse las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- El análisis del sistema en régimen permanente permite establecer que no se registran solicitaciones hidráulicas superiores a las consideradas en el cálculo de verificación estructural. Por esta razón, y bajo la hipótesis de considerar que la estructura se encuentra apta para soportar dicho estado de cargas, se consideró factible que el proceso de rotura se originara a partir de la existencia de efectos transitorios debido a la existencia de aire en el interior del conducto.
- Dada la condición de ingreso que presenta el sistema, la incorporación de aire resulta altamente probable toda vez que la sección de inicio del sifón invertido no presenta una cámara de carga capaz de garantizar un nivel estático relativamente estable durante la operación. Por el contrario, la presencia del flujo proveniente del vertedero de control da lugar a una disipación parcial de la energía residual, con la formación de vórtices y niveles fluctuantes en secciones próximas a la embocadura del conducto.
- La existencia de aire en el interior del conducto, ya sea durante su operación en régimen o durante un proceso de llenado puede originar efectos de sobrepresión que incrementen el nivel de solicitaciones estáticas a las que está sometida la estructura. En tal sentido, los cálculos realizados permitieron verificar que, aun con la existencia de pequeños volúmenes de aire, las cargas hidráulicas existentes pueden originar su progresiva compresión, incrementando entre dos y seis veces la magnitud de las presiones máximas sobre la estructura.
- En virtud de los coeficientes de seguridad que aparentemente se han considerado para la estructura, desde el punto de vista estático, la existencia de tales sobrepresiones podría explicar la generación de tensiones superiores a la resistencia admisible del material que conforma el conducto.
- De acuerdo al análisis realizado, se pudo concluir que el principal inconveniente que presenta el sistema es que la cámara existente al ingreso del sifón invertido no permite garantizar un nivel de carga estable, dando lugar a la formación de vórtices. Por esta razón, las alternativas planteadas se orientaron a la conformación de cámaras de carga que permitieran cumplir con tal función.
- Si bien la opción más ortodoxa y la que brindaría mejores condiciones de funcionamiento sería la ampliación de la cámara existente a fin de transformar la estructura de ingreso en una auténtica cámara de carga, se ha considerado la posibilidad de modificar las condiciones de funcionamiento de la cámara de ingreso actual a partir de la incorporación de un anillo de estrechamiento que produzca una pérdida de carga adicional. Dadas las ventajas constructivas y económicas que presenta esta solución, el Comitente optó por considerar a la

misma como la más adecuada para mejorar las condiciones de funcionamiento del sistema.

- La alternativa seleccionada contempla, entonces, la colocación de un anillo metálico con un orificio central de 1,5 m de diámetro, emplazado en la rama vertical descendente del sifón invertido. Para garantizar su adecuado funcionamiento, este estrangulamiento deberá emplazarse a una distancia no inferior a dos veces el diámetro del conducto, es decir a no menos de 6 m de la sección de embocadura del conducto.
- Con la finalidad de evitar el vertimiento del flujo por sobre el vertedero lateral de derivación existente en la cámara inicial, puede considerarse la posibilidad de recrecer el mismo hasta alcanzar una cota de desborde de 102,60 m.
- La solución se complementa con la readecuación del canal de descarga, garantizando que el mismo cuente con una sección de control con un fondo emplazado en cota 96,00 m.
- Debe considerarse especialmente que esta solución no aporta resultados satisfactorios para la operación del sistema con el caudal correspondiente a una unidad de bombeo funcionando en forma aislada. Por esta razón se recomienda específicamente la restricción de uso del sistema en esas condiciones. En caso de que la misma no pueda evitarse, resulta recomendable también considerar la posibilidad de implementar una chimenea de aireación en una zona comprendida entre el conducto descendente de descarga y la margen izquierda del canal Dock Sud, debiendo situarse la misma en la sección más próxima posible a la margen del canal.
- Al margen de la condición de uso antes establecida, deberán tomarse especiales recaudos para las condiciones de llenado del conducto que deban realizarse en forma posterior a tareas de mantenimiento. En tal sentido, se ha establecido una consigna de llenado con un caudal máximo de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual deberá garantizar que la velocidad de llenado resulte del orden del 10 % de la velocidad de circulación correspondiente al régimen permanente.
- Finalmente, se recomienda monitorear el funcionamiento del sistema en las primeras etapas de uso posteriores a la implementación de la alternativa, registrándose los niveles de operación característicos y verificándose su compatibilidad con las condiciones de borde existentes en el sistema.

Referencias bibliográficas

- Acosta, A., (1999), "Aire atrapado en tuberías. Consideraciones sobre el volumen crítico", 5º Reunión del Grupo de Trabajo sobre Hidromecánica, IAHR, Montevideo, Uruguay.

-
- AISI (1980), "Modern sewer design", American Iron and Steel Institute.
- Chow, V. T. (1959), *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, Inc., New York.
- Hill, D. R. (1984), *A history of engineering in classical and medieval times*, Ed. Routledge, United Kingdom.
- Litaudon, J. C. (2002), *Aqua Lugdunensis. El Acueducto Romano Del Gier*, Traianus.
- Marco Vitruvio Polion (23 a.C.), *De Architectura*, libros VII y VIII, reedición Roma, 1486.
- Metcalf & Eddy Inc. (1981), *Wastewater Engineering: Collection and Pumping of Wastewater*, editado por Tchobanoglous, G., McGraw-Hill, New York.
- República de Bolivia, 2001: *Reglamento Técnico de Diseño para Proyectos de Sifones Invertidos en Sistemas Sanitarios*, Reglamento Nacional, Bolivia.