



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

“Análisis de aire atrapado en conductos a presión”

QUE PRESENTA:

FERNANDO ZAMORANO BEAR

PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL



DIRECTOR:

DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA



DEDICATORIA

A mis padres y hermano, a Cristina, mi familia, amigos y maestros que me han estado ahí para apoyarme.

CONTENIDO

Introducción.	8
Objetivo.	13
1. Aire atrapado en acueductos.	15
1.1. Problemas causados por el aire atrapado en acueductos.	15
1.2. Causas por las cuales se introduce el aire en los acueductos.	20
1.3. Medios para la remoción de aire.	21
1.3.1. Medios Hidráulicos.	22
1.3.2. Medios Mecánicos.	30
1.3.2.1. Venteos.	31
1.3.2.2. Válvulas.	31
1.4. Localización de las válvulas.	36
2. Diseño convencional de válvulas de aire.	42
2.1. Válvulas de aire no cinéticas.	42
2.1.1. Cierre prematuro o Cierre dinámico.	42
2.1.2. Sellado deficiente.	43
2.1.3. Deformación y atascamiento del flotador.	44
2.1.4. Efecto Venturi.	44
2.2. Válvulas de aire cinéticas.	44
2.2.1. Golpe de ariete por la expulsión de aire a altas velocidades.	45
2.2.2. Derrame de agua.	46
2.2.3. Falla de las juntas entre las válvulas de aire y seccionamiento.	47
2.2.4. Efecto Venturi.	47
3. Metodología para ubicar los puntos altos de conductos a presión, donde podrían acumularse bolsas de aire.	49
3.1. Introducción.	49
3.2. Método para analizar el movimiento de burbujas y bolsas de aire.	50
3.3. Comportamiento del aire en conductos a presión.	55
3.4. Investigación experimental.	57
3.4.1. Dispositivo experimental.	57
3.4.2. Procedimiento experimental.	60
3.5. Metodología para localizar los posibles puntos de acumulación de grandes bolsas de aire en conductos a presión.	61

4. Casos de estudio.	64
4.1. Aguas residuales.	64
4.1.1. Problemas al conducir agua residual.	64
4.1.1.1. Corrosión por Sulfuro de hidrógeno.	64
4.1.2. Determinación del problema.	68
4.1.3. Metodología y cálculos (Método del paso directo).	69
4.2. Línea alterna del Sistema Cutzamala.	70
4.2.1. Problemas presentes en el sitio.	70
4.2.2. Motivo de la presencia del problema.	71
4.2.3. Metodología y Cálculos.	72
4.2.3.1. Parámetros de Gasto Adimensional.	72
4.2.3.2. Línea piezométrica.	73
4.2.4. Resultados.	75
4.3. Termoeléctrica Juan de Dios Batíz Paredes.	77
4.3.1. Problemas presentes en el sitio.	78
4.3.2. Motivo de la presencia del problema.	79
4.3.3. Acciones tomadas en campo.	81
4.3.4. Metodología y cálculos.	84
4.3.4.1. Coeficiente de fricción en tuberías.	84
4.3.4.2. Capacidad de conducción esperada sin aire atrapado.	87
5. Conclusiones.	91
Referencias.	94

Introducción

Los proyectos de ingeniería hidráulica se desarrollan, en la mayoría de los casos, con un enfoque que abarca de manera individual sólo la conducción de líquidos, gases y la combinación de sustancias líquidas con residuos sólidos. Sin embargo, en pocas ocasiones se tiene conciencia de que al transportar un líquido, agua por ejemplo, es necesario tomar en cuenta la presencia de aire. La interacción de estas dos sustancias puede llegar a producir efectos benéficos para el sistema de conducción, no obstante, la combinación de aire-agua en una línea de conducción trae consigo fenómenos que suelen afectar a la estructura hidráulica y que necesitan de acciones para reducir los efectos y costos.

Autores de todo el mundo han tratado de explicar el fenómeno de aire atrapado y proponen metodologías para localizarlo y de alguna manera reducir las consecuencias que trae. Existe literatura en donde se exponen situaciones catastróficas que se relacionan al aire atrapado en líneas de conducción de agua.

Hay registro de que en Alberta, Canadá el 4 de Julio de 1995 se presentó una tormenta extrema de dos horas aproximadamente. Este evento hizo que las aguas de tormenta y las aguas residuales inundaran sótanos en la ciudad de Edmonton. El sistema de drenaje combinado de aguas residuales y pluviales fue sobrecargado debido a la tormenta extraordinaria.

En Gallagher Hill Park, en la misma ciudad, ocurrieron daños severos a la infraestructura hidráulica. La estructura de un pozo de visita estalló y se separó de la tubería, además otras estructuras auxiliares resultaron perjudicadas. El problema supone que la tubería experimentó un flujo en reversa causado por la sobrecarga del sistema de drenaje. Autores coinciden en que el aire atrapado en la línea fue un factor significativo en la falla de la estructura (Zhou *et al.*, 2002).

Por un lado la poca existencia de información sobre el tema ha causado que se diseñen y construyan líneas de conducción con evidentes carencias que se traducen en problemas de aire atrapado. Por otro lado, una vez construida la infraestructura, los problemas comienzan y se buscan formas de contrarrestar los efectos. Existen gran variedad de estudios relacionados con el aire atrapado en acueductos que sugieren que éste puede inducir a presiones y

oscilaciones no deseadas en las líneas de conducción. Estos fenómenos se traducen en fallas de las estructuras hidráulicas. La manera más sencilla de combatir este fenómeno es con la instalación de válvulas de aire. Sin embargo, su uso y diseño no están plenamente reglamentados y los fabricantes discrepan en su forma de instalación.

Una compañía Sudafricana, al final de la década de los setenta, intentó producir una válvula de aire para sacarla al mercado. Naturalmente, buscaron hacer un producto que fuera competitivo con lo que ya existía en ese momento y con tal fin recolectaron información de todo el mundo acerca de las válvulas de aire ya existentes. A pesar de dicha labor, se dieron cuenta de que la información disponible era escasa, cuestionable y de poca ayuda.

Además de la falta de información de fabricantes lo más alarmante era que no existía información técnica de describiera de qué manera el aire afectaba a los sistemas de conducción. Fue entonces cuando por primera vez se comenzó a hacer una investigación documentada del fenómeno del manejo de aire atrapado en tuberías (Thomas, 2003).

Las válvulas instaladas a lo largo de la tubería sirven para extraer el aire de la línea de conducción de agua y de hecho reducen el consumo de energía. En los puntos altos de los acueductos es donde generalmente se acumulan bolsas de aire, debido a la tendencia natural del aire a subir en la dirección del flujo del agua. Las bolsas de aire reducen el diámetro del tubo y obligan a las bombas a esforzarse más para desplazar las mismas cantidades de agua, la consecuencia es un aumento en el consumo de energía.

Durante la etapa del proyecto la presencia de aire atrapado en las conducciones no es considerado. En México sus efectos son, en muchas ocasiones desconocidos. Por otra parte, el poco conocimiento del comportamiento del aire en las tuberías, conlleva a un mal dimensionamiento e incorrecta ubicación de válvulas de aire en el perfil de conducción, poniendo en riesgo la integridad de las tuberías y se exponen a diferentes efectos y fenómenos no deseados.

I have never let my schooling interfere with my education.
Mark Twain

Objetivo

El objetivo de este trabajo de tesis es analizar la problemática de presencia de aire en acueductos a presión, evaluar casos concretos y reales, así como comparar diferentes metodologías de resolución de problemas ya existentes y de diseño. Tiene como propósito también, reunir trabajos de autores sobre el aire atrapado en acueductos, producir una fuente de referencia acerca del tema, una metodología para ubicar puntos donde se podrían acumular bolsas de aire y consejos de diseño para evitar el problema. Una correcta instalación y ubicación de las válvulas expulsoras de aire se convierte en la mejor arma de un ingeniero hidráulico para combatir el problema del aire atrapado en acueductos y por ese motivo, en este trabajo se hablará con detalle de estos accesorios hidráulicos.

1. Aire atrapado en acueductos

La presencia de aire en acueductos suele reducir la eficiencia de los sistemas que transportan agua. Los problemas de aire atrapado no son restrictivos del tipo de conducción que se tenga en el acueducto, pueden llegar a presentarse complicaciones tanto en sistemas a bombeo como a gravedad. En los primeros, la presencia de aire se refleja en un incremento en el consumo de energía eléctrica en los equipos de bombeo; en los segundos las bolsas de aire estacionarias pueden reducir la sección efectiva del paso del agua y generar derrames a través de estructuras, tales como torres de oscilación o cajas rompedoras de presión.

Es indispensables que los conductos a presión, ya sean redes de distribución o los acueductos, funcionen adecuadamente y cumplan con su tarea de entregar agua potable de buena calidad a todos los asentamientos humanos. El objetivo de la investigación en estos temas es evitar problemas graves en la etapa de diseño y dar soluciones en el caso de que ya existan fallas en las tuberías.

1.1. Problemas causados por el aire atrapado en acueductos

Los ingenieros encargados del diseño de acueductos no suelen tomar en cuenta las causas que generan la entrada de aire al sistema, muchas veces por restarle importancia a este fenómeno o simplemente lo desconocen.

Debido a que el aire es más ligero que el agua con la que se encuentra interactuando dentro del acueducto, éste sube a las partes más altas del sistema formando grandes bolsas que afectan de manera importante la conducción del líquido.

Si bien el aire atrapado puede ser benéfico para prevenir la cavitación o para reducir los efectos perjudiciales causados por transitorios hidráulicos, en cantidades no controladas éste también puede ser perjudicial. Por ejemplo, existen rangos de volúmenes de aire, los cuales pueden producir un incremento indeseable de las presiones durante el arranque o el paro de las bombas en un acueducto a bombeo. El efecto del aire en ambas situaciones dependerá de las causas que generan el transitorio, de la cantidad de aire acumulada, de su localización, así como de la configuración del acueducto.

En la actualidad son muchos los problemas que se presentan debido al aire atrapado en acueductos. Varios autores a lo largo de los años han enumerado los principales inconvenientes que causa el aire dentro de las tuberías, a continuación se enlistan algunos de estos:

- Thomas (2003) explica que en sistemas de bombeo, el aire acumulado puede aumentar la carga hidráulica en 20%, haciendo necesario hacer trabajar a las bombas un 20% más y por ende la necesidad de más energía eléctrica para su correcto funcionamiento.
- Incremento de presiones durante el arranque o el paro de las bombas.
- Cuando el aire se acumula dentro del conducto a presión se forman bolsas, éstas pueden regresar a contra flujo provocando daños importantes en estructuras hidráulicas.
- Las bolsas pueden generar vibraciones en las transiciones de tubo parcialmente lleno a tubo lleno, destruyendo las juntas de los tubos. El aire atrapado en forma de bolsas reduce la sección efectiva de paso de flujo, como consecuencia hay más pérdida de carga hidráulica en el sistema.
- Muchas veces el aire es responsable de lecturas incorrectas en instrumentos de medición.

Incremento de la pérdida de carga causado por aire atrapado

Se ha hablado mucho de las bolsas que se forman en los puntos altos del sistema de conducción. También, se puede presentar el caso en el que una bolsa de aire se ubique en un tramo de la tubería con pendiente descendente, el flujo de agua tratará de moverla hacia aguas abajo, no obstante, si el tamaño de la bolsa de aire es lo suficientemente grande para que su fuerza de flotación sea igual a la fuerza de arrastre de agua, la bolsa se quedará estacionaria en ese punto de la tubería, sin ser necesariamente un punto alto.

De presentarse esta situación implicaría que la bolsa de aire estacionaria reduzca la sección efectiva del paso del agua, presentándose un flujo como canal abierto debajo de ésta, provocando que la línea piezométrica sea paralela a la pendiente de la tubería. Fig. 1.1.

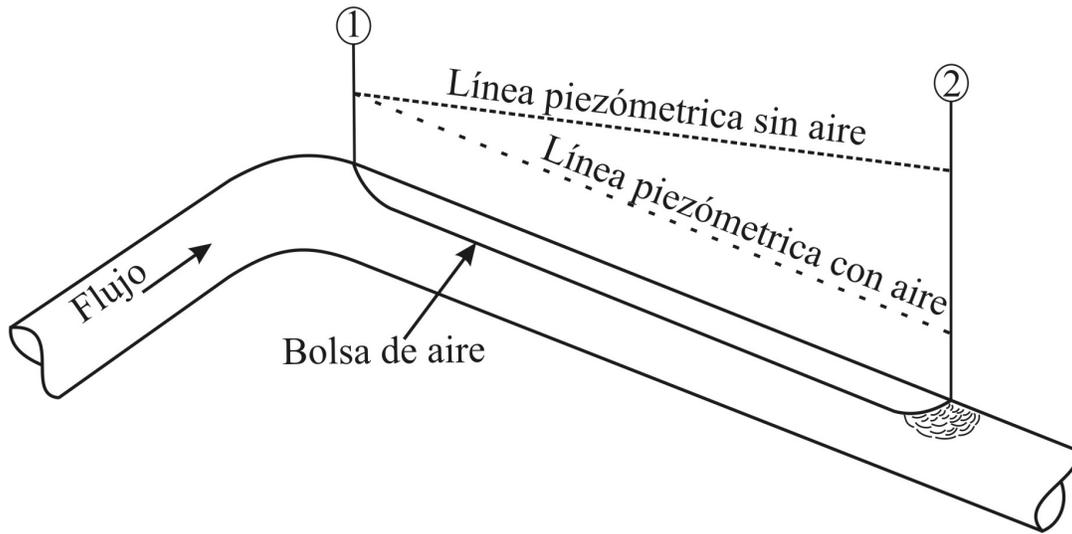
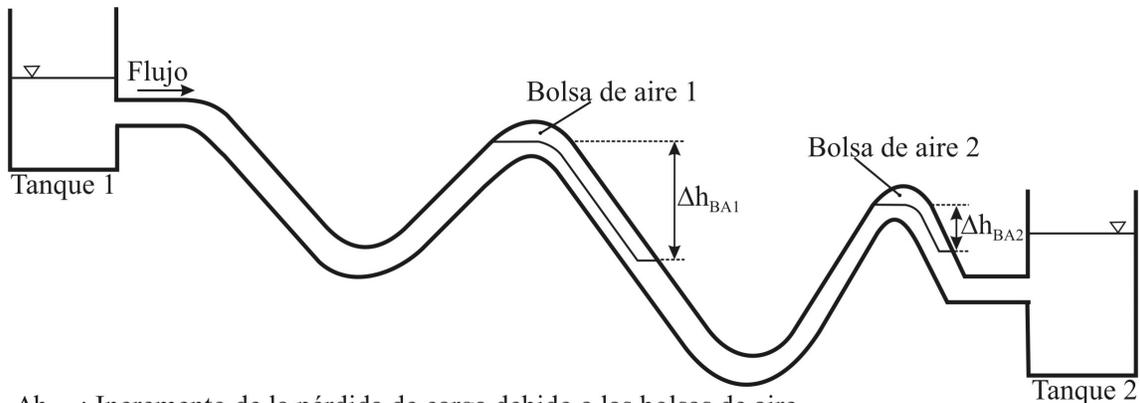


Figura 1.1 Bolsa de aire en una pendiente descendente (Edmunds, 1979)

En las Figuras 1.2 y 1.3 se puede ver que la pérdida de carga es casi igual a la longitud de la componente vertical de la bolsa, Edmunds (1979).



Δh_{BAi} : Incremento de la pérdida de carga debido a las bolsas de aire

Figura 1.2 Bolsa de aire en acueducto a gravedad

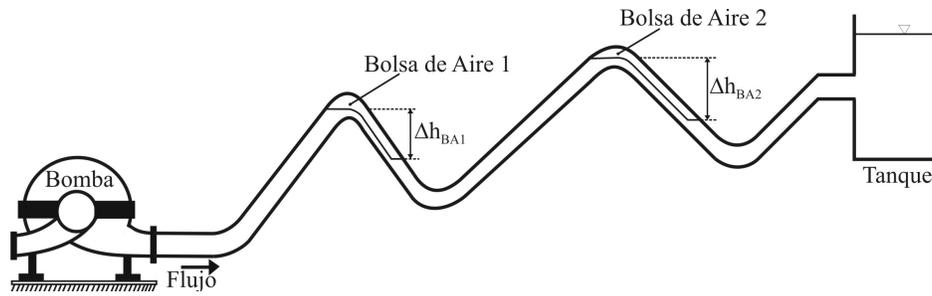


Figura 1.3 Bolsa de aire en acueducto a bombeo

Según Richards (1962) la reducción de la sección efectiva del paso del agua provocada por el aire atrapado no es una causa importante de la pérdida de carga. Afirma que la mayor pérdida provocada por el aire atrapado se debe al cambio de la pendiente de la línea piezométrica, es decir, cuando el tubo fluye a tubo lleno y cambia a flujo a superficie libre.

Retorno de bolsas de aire de gran tamaño debido a la fuerza de flotación (blowback)

Ya se hablaba en el punto anterior de las bolsas de aire que se acumulan en tramos con pendiente descendiente y que, de llegar a ser lo suficientemente grandes, pueden quedar estacionarias en ese tramo de la tubería, sin ser necesariamente un punto alto. Ahora bien, puede presentarse el caso en el que se presente un salto hidráulico en el extremo aguas abajo de la bolsa estacionaria, tal como se muestra en la Figura 1.4.

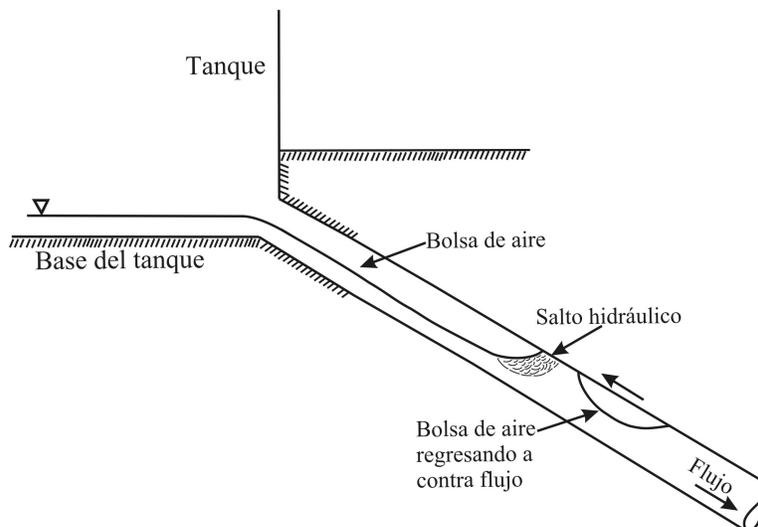


Figura 1.4 Retorno de bolsa de aire (blowback)

El salto hidráulico somete a una acción turbulenta al flujo de agua, situación que favorece la introducción de aire a la tubería y una rápida interacción agua - aire. Aguas abajo del salto hidráulico se pueden ir formando burbujas y/o bolsas de aire. Si la fuerza del flujo es incapaz de arrastrar a estas burbujas y/o bolsas, éstas permanecerán estacionarias en ese tramo de la tubería, incrementando su tamaño y más burbujas de aire llegarán a unírseles. Las bolsas de aire incrementarán su tamaño al tiempo que se reducirá su velocidad como resultado del aumento de la fuerza de flotación. Dicha situación puede resultar en que las bolsas de aire regresen con una enorme fuerza a través del salto hidráulico y puedan destruir parcial o completamente la base de las estructuras hidráulicas, como tanques y cajas rompedoras. Este fenómeno es conocido como “blowback”.

Golpe de ariete provocado por la evacuación de aire

Al verse la sección reducida por la presencia de una bolsa de aire estacionaria, es inevitable un incremento de velocidad del fluido debajo ella. Esta nueva velocidad puede provocar el desprendimiento de una porción de la bolsa, o bien, su completa remoción, ver Figura 1.5.

El cambio abrupto de la velocidad del fluido, cuando la bolsa es removida y se reinstala en algún otro punto alto de la tubería, puede generar un golpe de ariete.

El golpe de ariete, como es bien sabido, puede causar daños importantes a accesorios, uniones e incluso rupturas a la tubería.

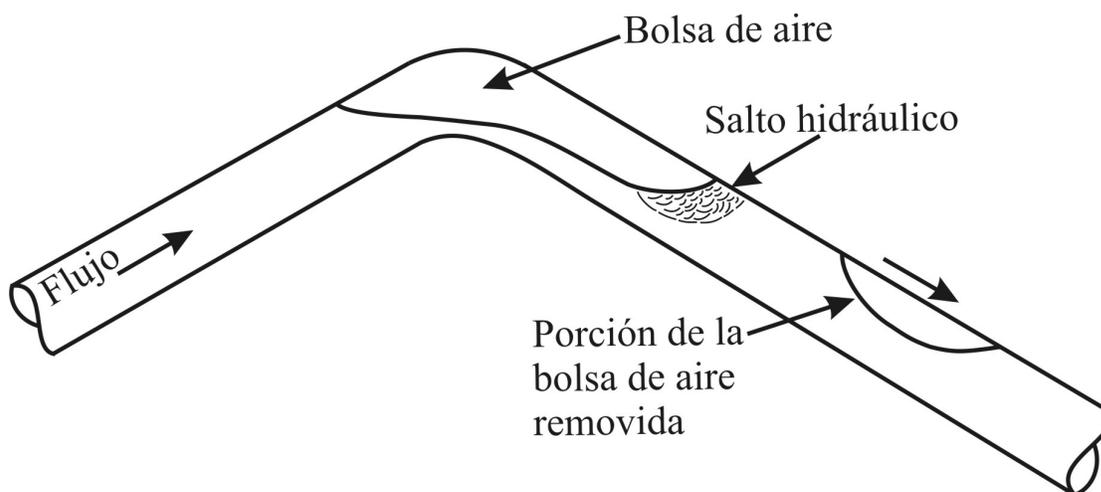


Figura 1.5 Golpe de ariete causado por remoción de una bolsa de aire

Reducción de la eficiencia en sistemas a bombeo debido al aire atrapado

Thomas (2003) presenta una útil comparación entre la eficiencia de algunos acueductos a bombeo y el costo por remover el aire atrapado de la línea. Se estima que el 75% del costo de operación de un acueducto es el costo por bombeo.

La revisión de una variedad de acueductos para la distribución de agua potable, realizada alrededor del mundo revela que el aire atrapado puede reducir la eficiencia de estos sistemas hasta en un 30%. La mayoría de los acueductos operan con aire atrapado, lo cual genera una disminución de entre el 15% al 20% del gasto proporcionado por el sistema.

Bolsas de aire comprimido presentan un enorme obstáculo a cualquier intento de bombear agua. El aire atrapado incrementa la carga de presión en un 20% esto provocará que las bombas trabajen más forzadas, por lo tanto se demandará un mayor consumo de energía eléctrica.

1.2. Causas por las cuales se introduce el aire en los acueductos

Evidentemente existen muchas causas que generan la entrada de aire en los acueductos. La poca fiabilidad de los dispositivos para la evacuación del aire es parte fundamental del mal desempeño de las líneas de conducción.

La gran mayoría de los acueductos que se construyen son diseñados sin considerar el aire disuelto que el agua potable trae consigo. Esta situación es una de las principales causas de la existencia de aire en las conducciones. No obstante, no es este el único origen del aire atrapado.

Existen ciertas situaciones a las que se le debe dar mayor importancia en el momento del diseño o cuando se quiere reparar una falla ya existente. En seguida se presentan algunas causas por las que se introduce el aire a los acueductos:

- Como se ha mencionado anteriormente, el 2% del volumen de agua es aire disuelto, cuando la presión dentro de la tubería se reduce el aire se libera y puede ir acumulándose poco a poco generando grandes bolsas de aire.

- Se puede introducir aire por un mal diseño de los tanques de succión de las bombas. También, cuando la presión de vacío se presenta en un acueducto, el aire puede introducirse a través de juntas defectuosas o mediante válvulas de admisión de aire.
- En sistemas de bombeo con muchos cambios de pendiente en su perfil se presenta aire atrapado debido a las interrupciones del suministro de agua.
- Se puede introducir el aire a las tuberías desde la atmósfera, a través de vórtices que se forman en los tanques.
- Durante el llenado de la tubería suele quedarse aire atrapado en los puntos altos del perfil, si el purgado de este aire es deficiente puede quedarse ahí durante la operación.
- Además del aire que se acumula en forma de bolsas en los puntos altos, se ha comprobado que también se pueden acumular bolsas alargadas en los tramos con pendientes suaves u horizontales.
- Un sistema que es puesto en marcha por primera vez se encuentra lleno de aire, mientras se va llenando de agua es necesario expulsar todo el aire que está dentro, ya sea por medios mecánicos o hidráulicos. No obstante, muchas veces algo de ese aire queda atrapado.

1.3. Medios para la remoción de aire

La mejor manera de tener control del aire de las tuberías es evitar su entrada al sistema desde un principio. Un buen diseño, tomando criterios de los que se hablará más adelante, garantizará una mejor operación en la conducción, evitando así serios problemas en el futuro, además de costos excesivos en el mantenimiento. Todavía, a pesar de tener un buen diseño es imposible lograr que la conducción se vea libre de aire por lo que es necesario conocer las metodologías existentes para la remoción de éste una vez que se encuentra atrapado dentro de la tubería. Una buena prevención puede evitar problemas y ahorrar gastos innecesarios.

Existen dos medios por los cuales es posible la expulsión del aire en tuberías.

El mecanismo hidráulico se vale de la inercia del flujo de agua para remover el aire de la línea, mientras que el mecanismo mecánico utiliza accesorios hidráulicos tales como venteos y válvulas de aire para realizar la misma tarea.

1.3.1. Medios hidráulicos.

Los mecanismos hidráulicos de remoción de aire aprovechan la inercia del agua para remover hidráulicamente el aire en las líneas de conducción. Esta opción es la más económica debido a que no hace falta instalación de dispositivos. Este mecanismo de remoción se basa en encontrar la velocidad crítica (V_c) que es la mínima necesaria para remover las burbujas y bolsas de aire acumuladas en cierto punto del acueducto.

Se debe ser crítico con la información de las investigaciones de estas velocidades ya que la mayoría de los estudios se han realizado en tubos de diámetros pequeños, menores a 50 mm (Pozos *et al.*, 2008).

Walski *et al.* (1994), proponen en su trabajo una ecuación para localizar los puntos en los que es posible la acumulación del aire. La relación de la ecuación (1.1) fue validada mediante investigación experimental y mediciones hechas en campo.

$$\frac{0.88v_{nom}^2}{gDS^{0.32}} = P \quad (1.1)$$

Donde:

v_{nom} - Velocidad media del agua sin aire atrapado en la tubería (m/s).

g - Aceleración de la gravedad (m/s^2).

D - Diámetro del tubo (m).

S - Pendiente de la tubería.

Cuando $P=1$, la bolsa de aire se acumula en un punto alto del acueducto, donde se presenta un cambio de pendiente horizontal, ascendente, o descendente suave a una pendiente descendente pronunciada.

Si $P>1$ la bolsa de aire avanzará hacia aguas abajo.

Si $P<1$ la bolsa de aire se moverá hacia aguas arriba.

González y Pozos (2000) proponen una relación analítica (Ecuación 1.2) similar a la publicada por Walski *et al.* (1994), que es capaz de analizar el comportamiento de las bolsas de aire a través de la tubería. Esta investigación fue desarrollada de forma teórica y experimental para validar su uso.

$$\frac{Q^2}{gD^5} = S \quad (1.2)$$

El término de la izquierda de la ecuación (1.2) es conocido como el “*Parámetro de Gasto Adimensional*” (PGA), mientras que el de la derecha es la pendiente del tramo en estudio.

Comparando el PGA y las pendientes que existan en el perfil del acueducto podemos determinar el comportamiento de las bolsas de aire. Se pueden presentar los siguientes casos:

Tabla 1.1 Comparación de pendiente con PGA

Caso	Comportamiento del aire
$Q^2/gD^5 < S$	El aire regresa a contra flujo.
$Q^2/gD^5 > S$	El aire se moverá en el sentido del flujo.

Pozos (2007) obtuvo excelentes resultados a través de la aplicación de la ecuación (1.2) en investigaciones del comportamiento del aire atrapado tanto en acueductos a gravedad como a bombeo. Su trabajo ayudó a darle mayor confiabilidad al uso del PGA.

Veronese (1937) y Lara (1955) realizaron estudios sobre burbujas de aire. Se encargaron de buscar y determinar la velocidad mínima a la cual las burbujas de aire se mantienen estacionarias.

Los autores observaron que si se presentasen velocidades mayores a la mínima, el tamaño de las burbujas de aire se reduciría por medio de generación y arrastre. Cuando, a pesar del incremento de velocidad, el tamaño de la burbuja se mantiene estable, se le denomina burbuja límite. Después de

este punto, cualquier incremento de velocidad no reducirá el tamaño de la burbuja, sino que la arrastrará y removerá de la conducción.

La velocidad para mantener la burbuja límite es llamada velocidad límite, según Veronese y Lara ésta tiene un valor de 0.59 m/s.

Kalinske y Robertson (1943) Sus estudios se enfocaron en el salto hidráulico dentro de conductos cerrados. Hicieron experimentos para estudiar la cantidad de aire que introduce o expulsa un salto hidráulico. Propusieron la ecuación (1.3) basándose en resultados experimentales.

$$\beta = \frac{Q_{aire}}{Q_{agua}} = 0.0066(F_1 - 1)^{1.4} \quad (1.3)$$

Donde:

Q_{aire} - Gasto de aire (m^3/s)

Q_{agua} - Gasto de agua (m^3/s)

F_1 - Número de Froude

Es importante señalar que la ecuación (1.3) fue propuesta con información obtenida de manera experimental, donde se establecieron condiciones en las que la tubería expulsó todo el aire ingresado por el salto hidráulico.

Para el experimento implementaron un dispositivo con tubos de acrílico de 152.4 mm de diámetro y una longitud de 11 metros. El experimento se realizó con pendientes variables de 0° a 16.7° .

Notaron durante la experimentación del salto hidráulico que el comportamiento del aire es variado para distintos flujos y pendientes. Con velocidades grandes y pendientes pronunciadas el aire tiende a formar una gran bolsa de aire que puede moverse hacia aguas abajo, donde puede mantenerse estacionaria o remontar el flujo a través del salto hidráulico. Con gastos pequeños y pendientes suaves se forman pequeñas bolsas de aire que se mueven hacia aguas abajo.

La cantidad de aire que ingresa por un salto hidráulico depende del gasto de agua, de la turbulencia; que depende del número de Froude al inicio del salto hidráulico y de la pendiente de la tubería, aunque en menor grado.

Kalinske y Bliss (1943) presentan datos experimentales, que indican el gasto de agua necesario para mantener la remoción o el barrido del aire de cualquier tubería con cualquier pendiente. La investigación experimental se realizó en tuberías de acrílico con diámetros de 102 mm y 152 mm. La pendiente de la tubería del dispositivo experimental fue variada de 0° a 17.5°.

Para todas las pendientes de tubería, excepto para las descendentes suaves las bolsas de aire terminaban en un salto hidráulico que sellaba el conducto. En algunos casos, cuando los gastos eran pequeños y las pendientes suaves el salto no llega hasta el techo del tubo, en tal caso el tirante aguas abajo del salto hidráulico se incrementaba gradualmente hasta llenar la tubería. Bajo estas condiciones el fenómeno de la remoción de aire es considerablemente diferente, comparado con el caso en el cual el salto hidráulico sella el tubo.

La velocidad a la cual el salto hidráulico introduce aire al tubo que fluye lleno de agua, no corresponde necesariamente a la velocidad a la cual el aire es removido de la bolsa de aire. Aguas abajo del salto el tubo fluye totalmente lleno de agua, excepto por las burbujas de aire, la velocidad a la cual el aire es removido de la conducción depende de la habilidad del flujo de agua. Para gastos de agua grandes, el salto hidráulico genera e introduce aire a velocidades mayores a las que el flujo aguas abajo del salto puede evacuar. El exceso de aire regresaba periódicamente a través del salto hasta la bolsa. Kalinske y Bliss encontraron que para cualquier diámetro de tubería y cualquier pendiente hay un determinado gasto que es capaz de evacuar de la conducción todo el aire que introduce el salto hidráulico.

Para un gasto pequeño, la remoción de aire dependerá de la velocidad del flujo aguas abajo del salto, y para un gasto grande la velocidad del agua aguas abajo del salto será suficiente para remover todo el aire introducido por el salto.

Kalinske y Bliss, encontraron que para pendientes suaves las bolsas de aire serán rápidamente removidas por completo de la tubería. Sin embargo, alguna

protuberancia cerca de las cimas del acueducto puede provocar que la parte final de la bolsa quede fija a ésta. Los autores consideran que en prototipo pueden existir varias protuberancias, particularmente en las juntas de la tubería.

El análisis hecho por los autores indica que la relación del gasto de aire removido y el gasto de agua $Q_{\text{aire}}/Q_{\text{agua}}$ esta relacionada con la pendiente de la tubería S , y con el término denominado gasto adimensional, definido como Q_{agua}^2/gD^5 , donde g es la aceleración de la gravedad y D el diámetro de la tubería. Al graficar los datos obtenidos en laboratorio se puede observar la existencia de tal relación. El valor de $Q_{\text{aire}}/Q_{\text{agua}}$ se incrementa con Q_{agua}^2/gD^5 para cualquier pendiente S . La gráfica se muestra en la Figura 1.6.

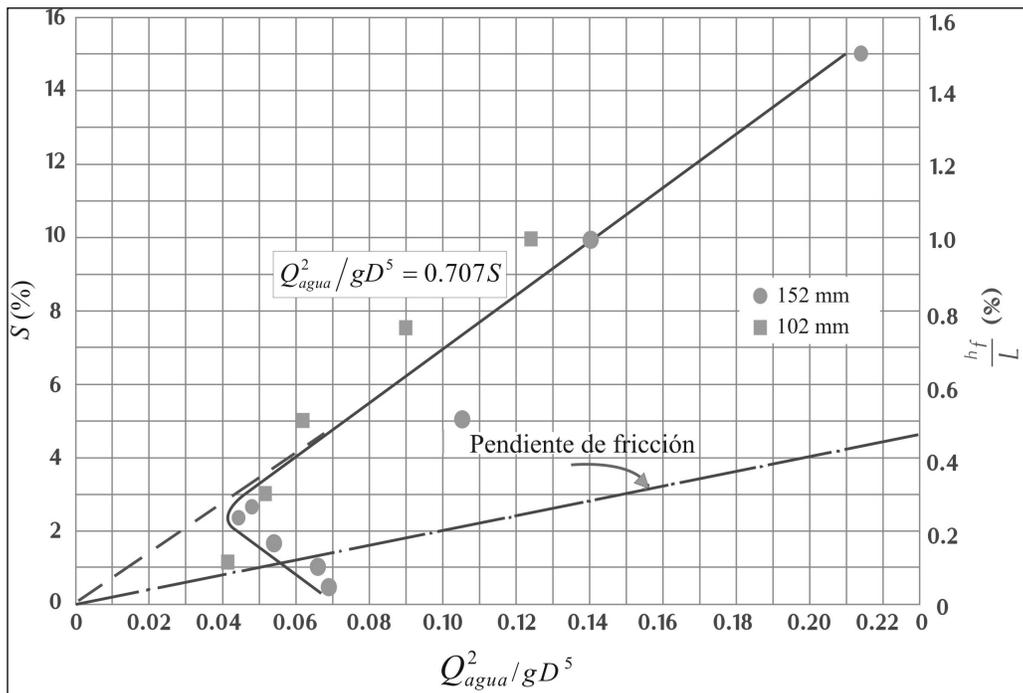


Figura 1.6 Datos experimentales obtenidos por Kalinske y Bliss (1943)

Los datos experimentales pueden representarse con la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{agua}}^2 / gD^5 = 0.707S \quad (1.4)$$

La ecuación anterior también puede presentarse en términos de la velocidad del agua v , como:

$$v^2 / gD = 1.146S \quad (1.5)$$

La peculiar desviación de los datos obtenidos para pendientes suaves es totalmente diferente a lo esperado. Se encontró que para pendientes menores al 2.5% los datos experimentales se desvían de la línea recta que representa la ecuación (1.5). Esto ocurre cuando el salto hidráulico no sella el conducto. Así el proceso de entrada de aire es totalmente diferente, que cuando el tirante aguas abajo del salto es mayor que el diámetro del tubo. Es aparente que para pendientes menores a 2.5% gastos de agua mayores son requeridos para iniciar la remoción de aire.

Kent (1952) estudió las velocidades que se necesitan para remover el aire atrapado por medio de un salto hidráulico. Gracias a sus experimentos se propuso una relación semiempírica para obtener el valor de V_{\min} que es la velocidad mínima necesaria para que se lleve a cabo la remoción de las burbujas.

$$V_{\min} = C_0^{1/2} \sqrt{gDS} \quad (1.6)$$

La ecuación 1.6 está en función de la pendiente S de la tubería y el diámetro D . Kent encontró que el valor de $C_0^{1/2}$ se vuelve constante cuando la longitud de la bolsa de aire es mayor o igual que 1.5 veces el diámetro D .

Gandenberger (1957) estudió la información estadística relacionada con fallas en líneas de fierro fundido de 900 mm de diámetro. Estas fallas ocurrieron con mayor frecuencia cerca de los puntos altos de las líneas, cuando la velocidad del agua en la tubería era menor a 0.3 m/s.

Gandenberger sugiere que estas fallas pueden ser atribuidas a las fluctuaciones de presión causadas por la presencia de aire. En contraste, acueductos con una antigüedad de más de 50 años con perfiles más susceptibles de atrapar aire, pero con velocidades mayores no presentaban fallas relacionadas con aire atrapado. Para reconocer el efecto de aire atrapado, Gandenberger realizó investigación experimental para estudiar el movimiento de aire en acueductos.

Los experimentos fueron desarrollados en tubos de cristal con diámetros de 10.5 mm, 26 mm y 45 mm, así como en tuberías de acero de 100 mm.

Las pendientes podían ser variadas entre 0° y 90°. Los resultados se presentan en la Figura 1.7, donde se lee la velocidad mínima del agua requerida para remover un determinado volumen de aire acumulado en un punto alto del perfil con un diámetro unitario, y una cierta pendiente descendente. El parámetro adimensional n para caracterizar el tamaño de burbujas y bolsas de aire, se define como $n = 4V/\pi D^3$, donde V es el volumen de la burbuja o de la bolsa de aire. La gráfica cubre el rango de $n = 0.02$ a $n > 1$. Para cualquier diámetro de tubería, la velocidad de remoción se incrementa al crecer el tamaño de la burbuja o bolsa de aire hasta un valor $n = 1$, y posteriormente el valor del parámetro n permanece constante. Gandenberger concluyó que la gráfica es válida para tuberías con diámetros mayores a 0.1 m y para burbujas o bolsas de aire con $n > 1$. En una investigación posterior llevada a cabo en una tubería de 455 m de largo con un diámetro de 500 mm y una pendiente de 5°, El autor corroboró sus conclusiones anteriores.

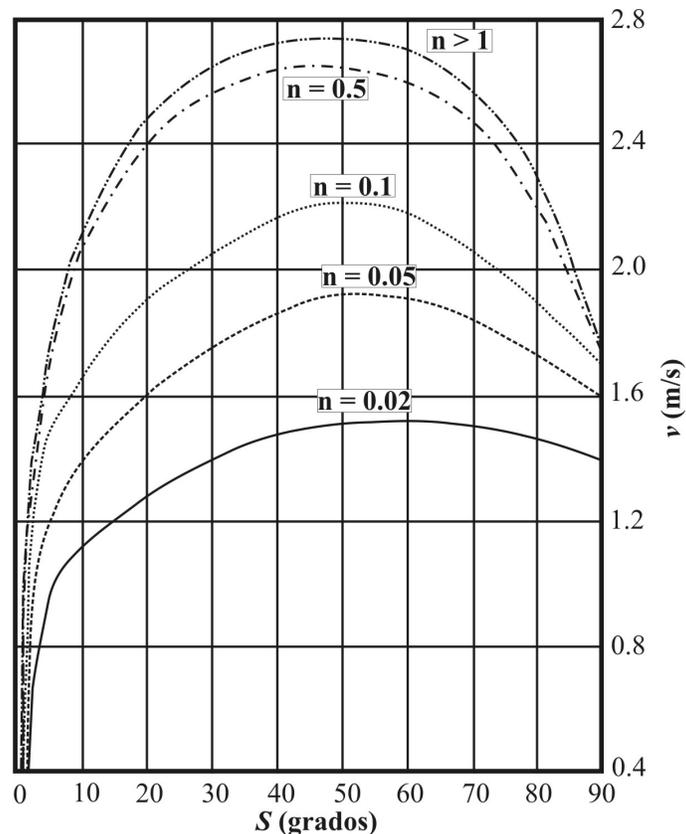


Figura 1.7 Movimiento de burbujas y bolsa de aire de diferentes tamaños en pendientes descendentes (Gandenberger, 1957)

Falvey (1980) elaboró una gráfica que muestra los límites de movimiento de burbujas y bolsa de aire en conductos cerrados, basado en datos presentados por Kalinske y Bliss (1943); Runge y Wallis (1965); Colgate (1966) y Martin (1976). El autor comenta que la dirección de movimiento de las burbujas y bolsas de aire puede ser analizada tomando en cuenta las magnitudes de las fuerzas de arrastre y flotación actuando sobre una burbuja estacionaria en el flujo. Por ejemplo, las burbujas de aire se mueven perpendicularmente al eje del tubo, cuando la componente vectorial de la fuerza de flotación en la dirección aguas arriba es igual a la componente vectorial de la fuerza de arrastre. Asimismo, Falvey incluye en su gráfica los resultados obtenidos por Sailer (1955) en prototipos, en los cuales se presentan problemas con grandes bolsas de aire que se movieron en contra flujo, destruyendo por completo las bases de concreto reforzado de algunos tanques del acueducto San Diego. En la Figura 1.8 se muestra la gráfica propuesta por Falvey.

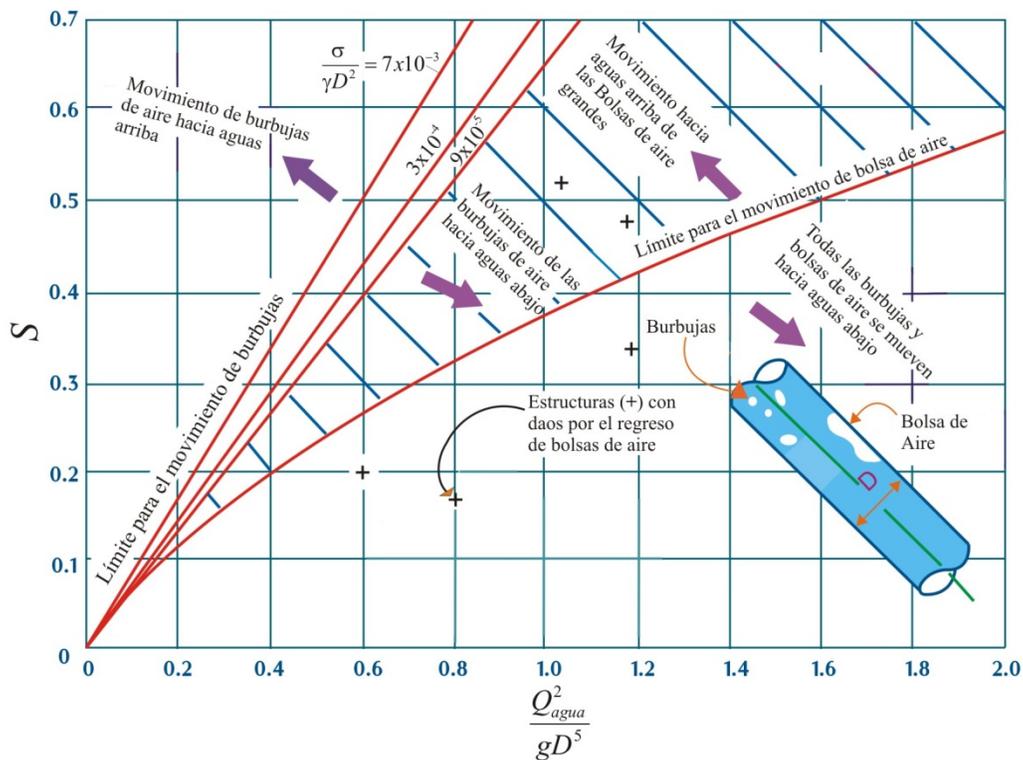


Figura 1.8 Movimiento de burbujas y bolsas de aire en conductos cerrados fluyendo llenos (Falvey, 1980)

Escarameia et al. (2005) describen estudios experimentales y numéricos, llevados a cabo para desarrollar una guía de diseño para minimizar los efectos negativos de la presencia de bolsas de aire en tuberías, particularmente para pendientes suaves.

La investigación experimental fue desarrollada en un dispositivo compuesto por tubos de 150 mm de diámetro interno, las pendientes podían ser variadas en un rango de 0° a 22.5°. Basados en sus resultados, los autores proponen una ecuación para analizar el comportamiento del aire en acueductos. Escaramela et al. (2005) consideran que la ecuación (1.7) es válida para tuberías con una inclinación máxima de 40° y puede ser utilizada en tubos con diámetros menores a 1.5 metros.

Ecuación que consideraron Escaramela et al. (2005):

$$v/(gD)^{0.5} = S_f \left[0.56(\text{sen}S)^{0.5} + a \right] \quad (1.7)$$

Dónde a tiene los siguientes valores:

$$a = 0.45 \text{ para } n < 0.06$$

$$a = 0.50 \text{ para } 0.06 \leq n < 0.12$$

$$a = 0.57 \text{ para } 0.12 \leq n < 0.30$$

$$a = 0.61 \text{ para } 0.30 \leq n < 2$$

En la ecuación (1.7) v es la velocidad mínima del flujo requerida para mover una bolsa de aire definida por el parámetro $n = 4V/\pi D^3$ en un tubo con pendiente descendente S y diámetro D . V es el volumen de la bolsa de aire y S_f es un factor de seguridad igual a 1.1.

Pozos et al. (2010) propusieron un método para encontrar los posibles puntos altos de los acueductos, donde bolsas de aire podrían acumularse. La metodología presentada por los autores se basa en las investigaciones realizadas por González y Pozos (2000) y Pozos (2007).

1.3.2. Medios Mecánicos

A través de medios mecánicos como válvulas de aire y venteos se expulsa el aire de las tuberías. La instalación de este tipo de dispositivos puede llegar a

ser costoso y una mala determinación de la ubicación de las válvulas o venteos puede dar resultados adversos.

1.3.2.1. Venteos

El uso de venteos para la expulsión de aire tiene limitaciones. Falvey (1980) explica que éstos son útiles principalmente cuando la línea piezométrica está cerca al nivel de terreno.

En la figura 1.9 se muestra la instalación típica de venteos en tuberías que presentan pendientes importantes.

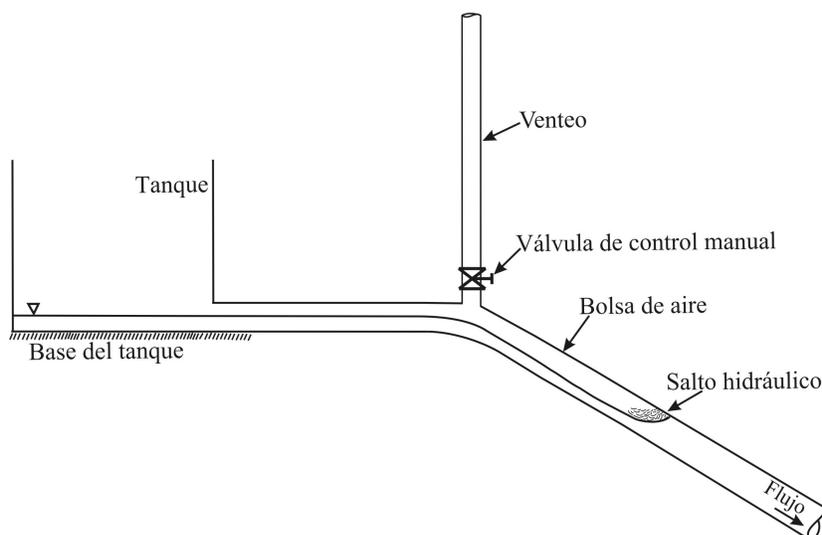


Figura 1.9 Venteo

Es necesaria la instalación de una válvula de control manual en el venteo para permitir que el aire sea descargado a la atmósfera.

1.3.2.2. Válvulas

El aire puede ser perjudicial pero también benéfico en un sistema de conducción a gravedad o de bombeo, lo importante es saber qué cantidad de aire hay que administrar para una operación en específico y cómo controlar la introducción o extracción de éste en las tuberías. La remoción mecánica se

realiza generalmente con válvulas, éstas permiten la interacción con el aire de la atmósfera y el que está dentro de la tubería.

Las válvulas tienen tres funciones principales en una tubería:

1.- La expulsión de aire durante el llenado de una línea de conducción.

Cuando la tubería aún no contiene el líquido que va a conducir se dice que está vacía. En realidad está llena de aire y éste debe ser expulsado para poder llenar el acueducto con el fluido a conducir (agua potable, agua residual, etc.). Esta acción evita sobrepresiones que se producen por el aire atrapado.

2.- La admisión de grandes volúmenes de aire en el vaciado de una línea de conducción.

Es necesario dar mantenimiento periódico a las líneas de conducción, así como hacer reparaciones en caso de ser necesarias. Contrario al punto anterior, cuando la tubería está llena del fluido a conducir, se tiene que vaciar para realizar estas acciones. Es necesario sustituir el fluido que va siendo expulsado con aire para evitar así el colapso de la línea de conducción.

3.- Expulsión de aire durante la operación del sistema.

Como se ha explicado antes, el aire puede introducirse al sistema de muchas formas durante la operación. Es necesaria la existencia de válvulas capaces de evacuar éstas pequeñas, pero peligrosas cantidades de aire.

Clasificación de Válvulas

Existen varios tipos de válvulas usadas en todo el mundo y todas cumplen con la función de expulsar y admitir aire. Se diseñan de tal manera que sean automáticas y no necesiten de personal para que su operación sea correcta.

Válvulas de expulsión de aire (VEA)

Se valen de un pequeño orificio (12 mm) para evacuar el aire que se acumula en los puntos altos de la línea de conducción por la operación normal del sistema. Tienen un flotador que cuando detecta aire dentro de la tubería lo expulsa. También puede admitirlo de ser necesario. Mateos (1985) y Pfander (2004).

No es posible expulsar cantidades grandes de aire y por tal motivo este tipo de válvulas no sirven al momento del vaciado total de la línea.

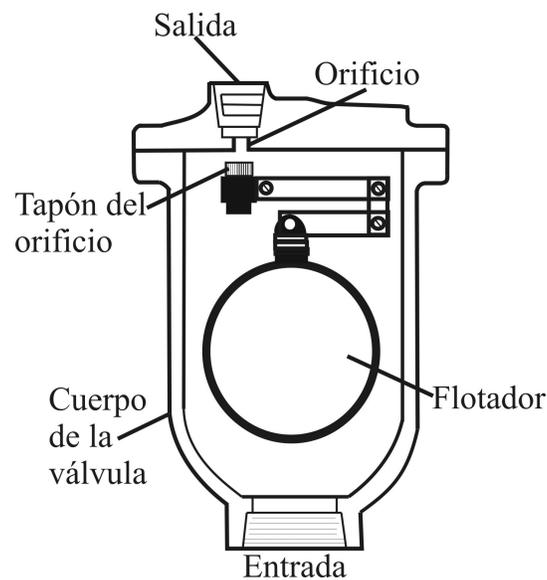


Figura 1.10 Válvula de expulsión de aire (VEA)

Válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA)

Su función se limita a la admisión de aire durante el vaciado de la tubería y a la expulsión de aire durante el llenado. Para ello presentan un orificio de grandes dimensiones, de 25 a 40mm de diámetro.

Es importante mencionar que el flotador que compone a este tipo de válvulas tiende a presentar algunos problemas, los cuales serán tratados más adelante.

En el momento en el que el aire es removido de la línea de conducción el agua que va entrando se encarga de elevar al flotador y sellar el orificio una vez expulsado el aire. Durante el vaciado de la tubería el flotador va a ceder ante la presión que el aire de la atmósfera está ejerciendo sobre él, permitiendo así la admisión de aire. Es recomendable que la evacuación del aire sea lenta para evitar transitorios.

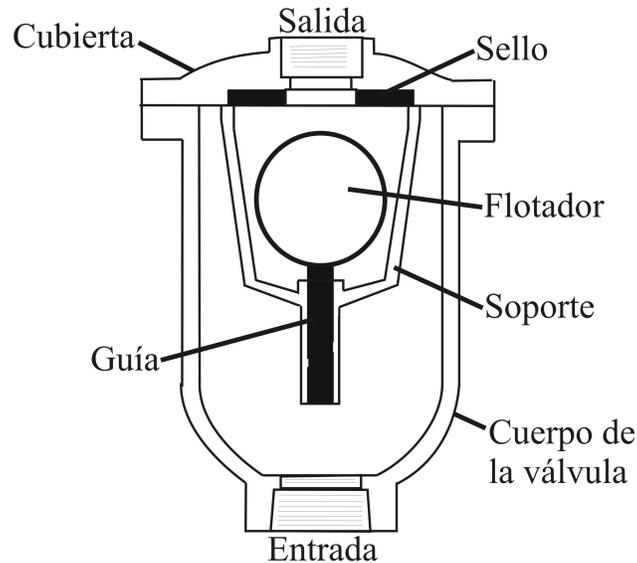


Figura 1.11 Válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA)

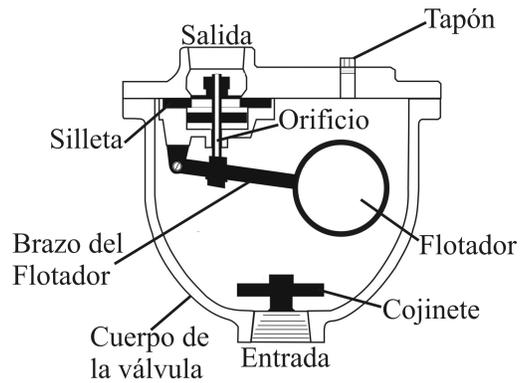
Válvulas de aire combinadas (VAC)

Mateos (1985) fundamenta que una sola válvula o ventosa es capaz de realizar tres funciones:

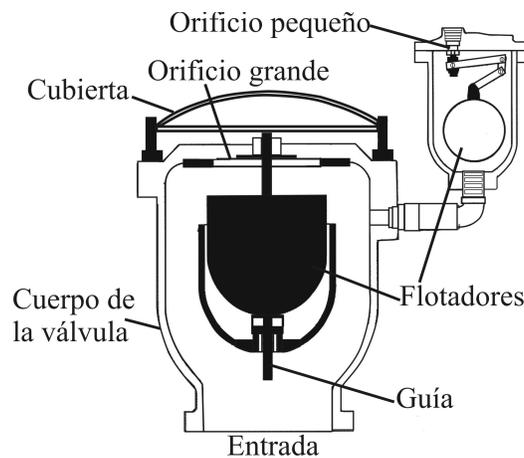
- Admisión de aire durante el vaciado de la tubería.
- Expulsión de aire durante el llenado de la tubería.
- Expulsión de aire durante la operación del sistema.

También son llamadas “de doble orificio” debido a su diseño. Tienen un orificio grande, que sirve para el vaciado o llenado de la tubería, y uno pequeño encargado de la expulsión del aire durante la operación del sistema.

Existen VAC de un cuerpo y de doble cuerpo. Las de un cuerpo son más compactas, mientras que las de doble cuerpo ofrecen beneficios como poder escoger de entre una gama más amplia el tamaño del orificio, se puede separar para darle mantenimiento o reparación.



a) VAC de un cuerpo



b) VAC de doble cuerpo

Figura 1.12 Válvulas de Aire Combinadas

1.4. Localización de las válvulas

No siempre es correcto ~~el~~ suponer que todas las válvulas tienen que ser instaladas en los puntos altos de la instalación. También se forman bolsas de aire alargadas en los tramos que tienen poca pendiente, no importando si son de subida o bajada, o en tramos largos horizontales (Mateos, 1985).

Es importante considerar en primer lugar el perfil de la conducción. La pendiente debe permanecer constante a medida de lo posible. Una pendiente ideal puede ser de 2 a 3 mm/m.

Se deben ofrecer las condiciones adecuadas para que el aire se concentre en los puntos altos, una forma de conseguir este objetivo es diseñar el perfil de manera que tenga pendientes descendentes suaves.

Es recomendable colocar una válvula de compuerta antes de la válvula de aire para su futura compostura o mantenimiento.

A continuación se describe la posible localización de válvulas, dependiendo del tramo del sistema y el tipo de válvula que se recomienda instalar. Existe una serie de recomendaciones que se deben tener en consideración al momento de escoger el lugar en el que se van a colocar las válvulas. No sólo es importante en donde se tienen que colocar las válvulas, además se debe tener cuidado de escoger adecuadamente el tipo de válvula que se va a instalar.

Descarga de la bomba

Localización: Después de la bomba y antes de la válvula check o de retención.

Tipo de válvula: Válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA).

Dimensionamiento: Se calcula con el gasto de agua que descarga la bomba.

Beneficios: Una buena instalación de válvulas en este punto garantiza la expulsión de aire durante la puesta en marcha del equipo de bombeo y permite la entrada del aire después de que se haga paro total del equipo de bombeo.

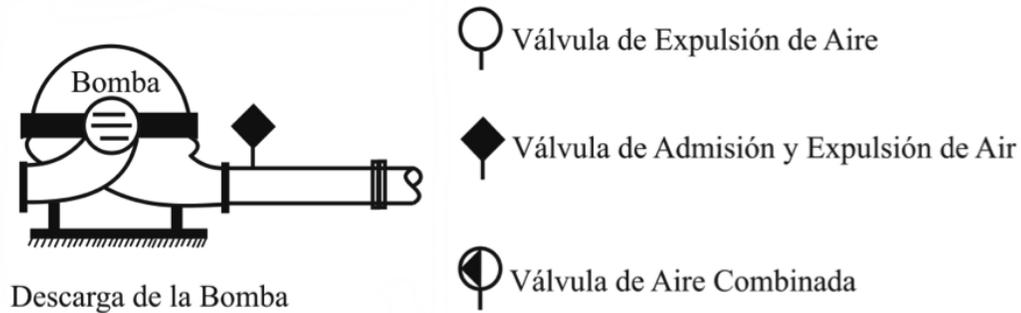


Figura 1.13 Válvula en la descarga de la bomba

Incremento de la pendiente descendente

Localización: Se deben colocar cuando en el perfil se presenten cambios radicales entre pendientes descendentes.

Tipo de válvula: Válvula de expulsión de aire (VEA).

Dimensionamiento: La válvula se diseña con el gasto de diseño.

Beneficios: Evitar la posibilidad de que se presente presión de vacío y separación de la columna líquida.

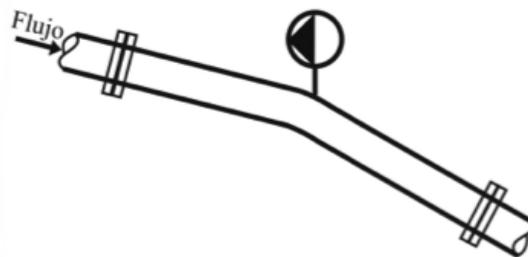


Figura 1.14 Válvula en incremento de la pendiente descendente

Decremento de la pendiente ascendente.

Localización: En cambios abruptos de pendientes ascendentes.

Tipo de válvula: Válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA) o válvula combinada (VAC).

Dimensionamiento: La válvula se diseña con el gasto de diseño.

Beneficios: Evitar la posibilidad de que se presente presión de vacío y separación de la columna líquida.

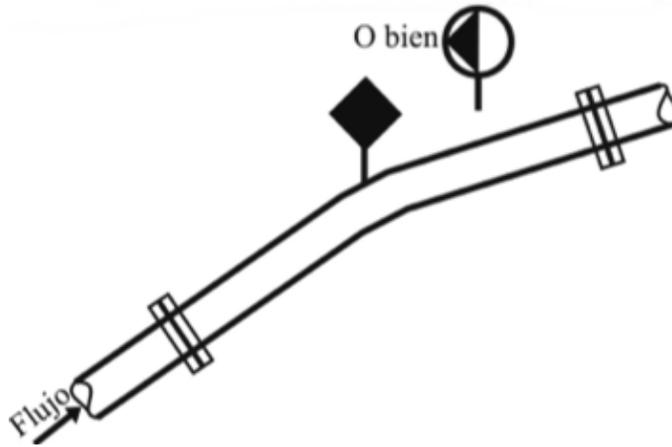


Figura 1.15 Válvula en decremento de la pendiente ascendente

Tramos horizontales largos

Localización: Inicio y final de un tramo de tubería horizontal largo. También a lo largo de la sección horizontal en intervalos desde 380 m hasta 760 m. Se recomienda 600 m.

Tipo de válvula: Válvula combinada (VAC).

Dimensionamiento: La válvula se diseña con el gasto de aire que se debe expulsar.

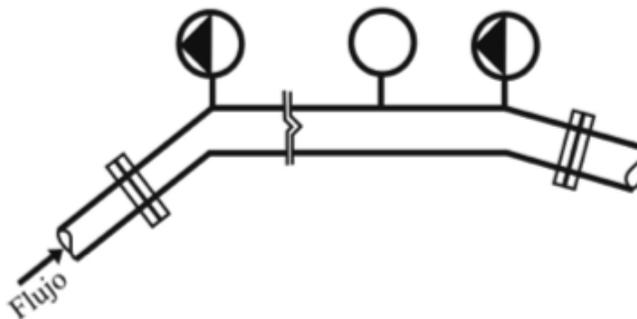


Figura 1.16 Válvula en tramo horizontal largo

Tramos ascendentes largos

Localización: A todo lo largo de tramos extensos de tubería con pendiente ascendente a intervalos de 400 a 800 m.

Tipo de válvula: Válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA) o válvula combinada (VAC)

Dimensionamiento: Se debe comparar el gasto de aire expulsado por el orificio de gran diámetro con el gasto de aire que se introduce a través del mismo. Calculado para la ruptura del tubo y para el fallo de los equipos de bombeo.

Beneficios: Adecuada expulsión del aire durante la operación de llenado y permitir la entrada de aire durante el vaciado del sistema.

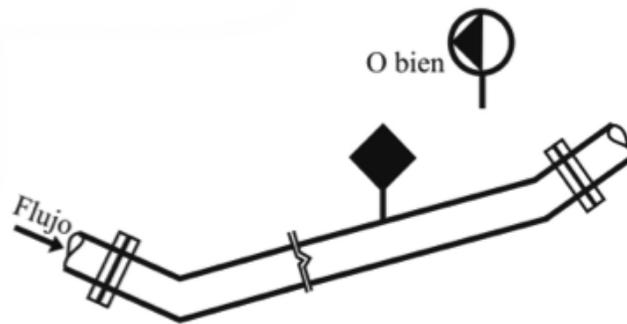


Figura 1.17 Válvula en tramo ascendente largo

Tramos descendentes largos

Localización: A todo lo largo de tramos extensos de tubería con pendiente descendente a intervalos de 400 a 800 m

Tipo de válvula: Válvula combinada (VAC).

Dimensionamiento: Se aplica el mismo criterio que en las de “tramo ascendente largo”

Beneficios: Adecuada expulsión del aire durante la operación de llenado y permitir la entrada de aire durante el vaciado del sistema.

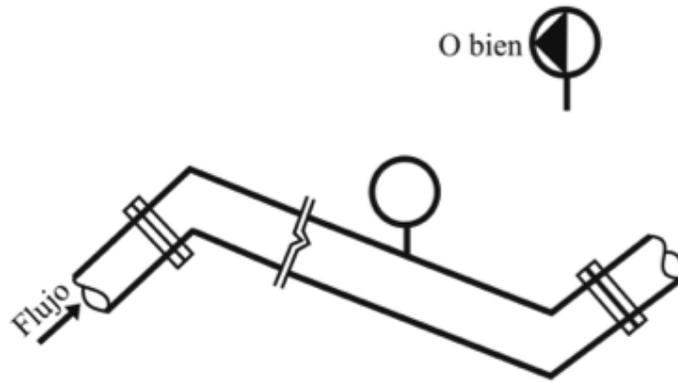


Figura 1.18 Válvula en tramo descendente largo

Puntos altos

Localización: Puntos altos del perfil de la línea de conducción.

Tipo de válvula: Válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA) o válvula combinada (VAC)

Beneficios: Expulsa el aire durante el llenado y lo admite durante el vaciado para mantenimiento, expulsa también el aire de la operación normal de la línea de conducción. Evita la presión de vacío y la separación de columna.

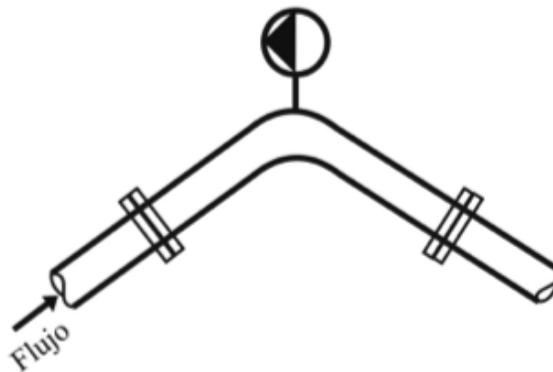


Figura 1.19 Válvula en punto alto

2. Diseño convencional de válvulas de aire

Garantizar un correcto dimensionamiento y colocación de las válvulas de aire es esencial para el buen funcionamiento de todo acueducto.

Las válvulas de aire que se encuentran instaladas en la actualidad fueron diseñadas a principio del siglo XX y desde entonces no ha cambiado su diseño.

Las válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA) son las más problemáticas de los tres tipos básicos de válvulas, ya que estas cuentan con un flotador esférico para obturar el orificio y este dispositivo suele ser la causa de graves problemas en el funcionamiento de este tipo de válvulas.

Las VAEA pueden ser “cinemáticas” y “no cinemáticas”.

2.1. Válvulas de aire no cinéticas

Son aquellas que su cerrado se realiza mediante un flotador esférico hueco el cual sella el orificio de expulsión y admisión.

El sellado suele ser deficiente ya que es difícil manufacturar flotadores perfectos, cuando se intenta sellar el orificio éste debe tener un sello blando para que el flotador cierre bien. Sin embargo, muchos de estos sellos suelen desgastarse impidiendo un buen funcionamiento de la válvula.

2.1.1 Cierre prematuro o cierre dinámico

En el caso de las VAEA es común que se presente el fenómeno de “cierre dinámico”. Es decir, el flotador tiende a obturar el orificio por completo a presiones relativamente bajas, haciendo imposible la expulsión del cien por ciento del aire atrapado. Cuando el flotador esférico sella de forma prematura al orificio de la válvula se genera el fenómeno conocido como “cierre dinámico”. Esta situación provoca que grandes cantidades de aire queden atrapadas en los acueductos durante su operación normal.

El punto del cierre dinámico fue obtenido mediante investigación experimental realizada por el Consejo de Ciencia e Investigación para la Industria (CSIR siglas en inglés) de Sudáfrica en 1989. Los resultados se muestran en forma grafica en la Figura 2.1

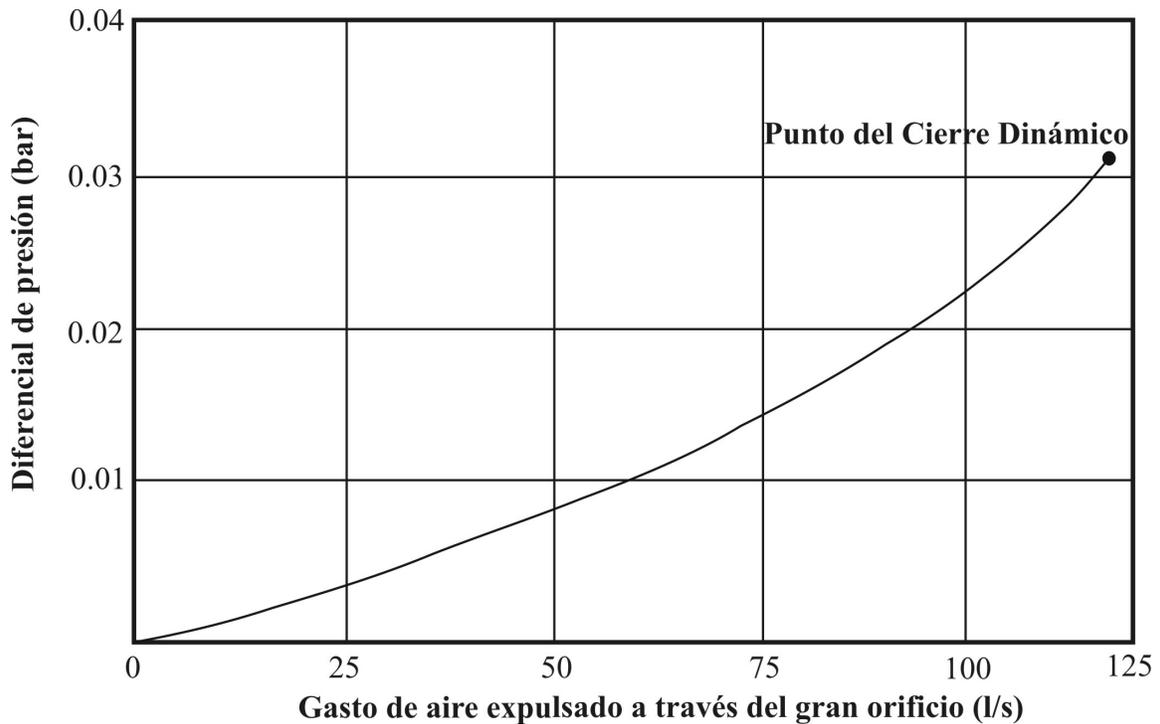


Figura 2.1 Punto del Cierre Dinámico

2.1.2 Sellado deficiente

El flotador de la válvula tiene que ser perfectamente esférico y tener la capacidad de sellar adecuadamente el orificio. En la práctica no es posible la producción en masa de flotadores perfectos por lo que se fabrican de materiales blandos para compensar la no uniformidad de los flotadores. Esta práctica produce que el flotador se adhiera al sello impidiendo el correcto funcionamiento de la válvula.

2.1.3 Deformación y atascamiento del flotador

Mateos (1985) argumenta que otro problema se deriva de que los flotadores son huecos y se deforman con presiones grandes. Existen casos en que los flotadores esféricos sufrían deformaciones tan radicales a manera de adquirir la forma de un ocho. Estas deformaciones causan la pérdida de grandes cantidades de agua.

Al ser huecos los flotadores esféricos de este tipo de válvulas los hace susceptibles a sufrir deformaciones permanentes, cada vez que se presentan altas presiones en los acueductos. Un flotador que sella un orificio de 150 mm a una presión diferencial de 25 bar debe resistir una fuerza total de 4.5 toneladas, y en el caso de producirse golpe de ariete en el sistema la fuerza actuante sería todavía mayor.

En la práctica se ha observado que los flotadores se atascan dentro de los grandes orificios de las válvulas, provocando que dichos dispositivos queden fuera de servicio.

2.1.4. Efecto Venturi

Todas las válvulas de aire con orificios grandes diseñadas con flotadores esféricos huecos tenderán a sellar parcialmente el orificio durante la admisión de aire hacia el acueducto. Esto se debe a la existencia de una zona de baja presión en la parte superior del flotador comparada con la que experimenta la línea.

Este fenómeno ocurre a diferenciales de presión muy bajos (0.15 a 0.20 bar), lo cual restringe de forma importante el funcionamiento de las válvulas, y ha sido causa del colapso de tuberías.

Muchos técnicos operadores de acueductos conocen el fenómeno e insertan cuñas de madera u otro material para mantener abierto el gran orificio y evitar el efecto venturi. Sin embargo, esta solución no es efectiva en el caso de acueductos con tuberías de gran diámetro.

2.2. Válvulas de aire cinéticas.

Este tipo de válvulas es la respuesta a la solución del fenómeno de cierre dinámico. Básicamente se rediseñaron las características aerodinámicas de las

válvulas de aire no cinéticas. El flotador es empujado hacia el orificio al tiempo que el aire es expulsado de la tubería y sustituido con agua, garantizando así la expulsión de todo el aire atrapado.

A pesar de que es un mejor diseño y garantiza que no se presente el cierre dinámico, es importante tomar en consideración ciertos problemas que se han presentado en el pasado para su correcto diseño.

Debido a que esta válvula es capaz de expulsar aire dentro de una tubería que maneja grandes presiones diferenciales y velocidades, es común que se presenten fuertes presiones transitorias. El flotador suele obturar bruscamente la salida lo que conlleva a una súbita disminución de la velocidad del agua que dará lugar a una sobrepresión.

También puede existir derrame de agua cuando el líquido ingresa a gran velocidad en la válvula, empujando al flotador e impidiendo el cierre del orificio. Lo más grave son los problemas originados por sobrepresiones que se producen por la obturación abrupta del orificio de gran diámetro.

Cuando este tipo de dispositivos expulsan el aire a altas velocidades se presentan problemas en la conducción. Balutto (1998) nos describe algunos de ellos:

2.2.1. Golpe de ariete por la expulsión de aire a altas velocidades

Si la conducción se lleva a cabo con grandes velocidades, una válvula de aire cinética inducirá un cierre que provocará fenómenos y presiones transitorias en el acueducto. El efecto producido por la entrada abrupta del agua al cuerpo de la válvula es similar al golpe de ariete producido por el cierre rápido de una válvula de compuerta.

Sobrepresión generada por el cierre de una válvula

El cierre rápido de una válvula de aire cinética puede producir que se presenten sobrepresiones de gran magnitud que afecten al sistema de conducción. La magnitud de las sobrepresiones depende del tamaño de la válvula, la longitud

del acueducto, el diferencial de presión a través del gran orificio, del módulo de elasticidad del agua, entre otros factores.

La magnitud de las sobrepresiones se puede calcular con la ecuación de Joukowski (ecuación 2.1):

$$\Delta h = -\frac{a}{g} \Delta v \quad (2.1)$$

Donde:

Δh - Diferencia de carga hidráulica (m)

a- Celeridad (m/s)

g- Aceleración de la gravedad (m/s^2)

Δv - Diferencia de velocidades (m/s)

Las investigaciones sobre el tema concluyen que los daños causados por este tipo de válvulas, debido a la expulsión de aire a alta velocidad no deben ser ignorados durante el diseño de acueductos. Investigadores y fabricantes recomiendan limitar el diferencial de presión a 0.05 bar, con el propósito de prevenir daños causados por este fenómeno.

2.2.2. Derrame de agua

Este fenómeno ocurre al fallar el flotador del orificio de gran diámetro, cuando el agua entra a gran velocidad al cuerpo de la válvula, cubriendo el flotador y empujándolo hacia abajo e impidiendo que selle el orificio. La cantidad de agua que se derrama puede ser importante, generando la inundación de la caja de válvulas.

El derrame de agua produce una sobrepresión debido a que el agua posee una densidad mucho mayor que la del aire, causando una repentina desaceleración de la columna de agua al alcanzar ésta el orificio de salida, lo cual tendría un efecto similar al causado por el cierre rápido de una válvula localizada en la descarga de un acueducto. La magnitud de la presión transitoria puede ser

significativa y dependerá de la velocidad a la que entra el agua al cuerpo de la válvula, así como de la longitud y del diámetro del acueducto.

2.2.3. Falla de las juntas entre las válvulas de aire y seccionamiento

Este problema se genera debido a las importantes presiones transitorias provocadas por el cierre abrupto de la válvula de gran orificio.

2.2.4. Efecto Venturi

El efecto venturi descrito para las válvulas de aire no cinéticas es también aplicable a las válvulas cinéticas.

3. Metodología para ubicar los puntos altos de conductos a presión, donde podrían acumularse bolsas de aire.

3.1 Introducción

Mucho se ha hablado ya de las bolsas de aire, su naturaleza y las complicaciones que pueden ocasionar en acueductos que transportan agua. Reducen la sección efectiva del paso de agua, causando un incremento en la pérdida de carga, e incluso pueden llegar a bloquear por completo el flujo.

En el capítulo uno se describen varios estudios del fenómeno del aire atrapado en acueductos. No obstante, en la actualidad no se ha establecido aún una expresión analítica que sea universalmente aceptada para analizar el comportamiento del aire en acueductos y ayude a los ingenieros a diseñar infraestructura hidráulica de forma correcta. Por lo tanto, en el presente capítulo se propone un método para localizar los puntos altos de los conductos a presión, donde el aire podría acumularse.

Con la información aquí presentada, se pretende proporcionar una metodología para analizar acueductos ya construidos, y sentar las bases que se deban tomar en consideración para su diseño. Este método ha sido utilizado para estudiar problemas de aire atrapado en acueductos de México, y las soluciones propuestas han permitido un mejor funcionamiento de estos sistemas.

Es de suma importancia tener claras las consecuencias que conlleva tener aire dentro de los conductos a presión. La capacidad de conducción se ve gravemente afectada con la presencia de bolsas de aire, esto como resultado de la reducción de la sección efectiva total del paso del agua, que origina una pérdida considerable de carga. Peor aún, esta situación sigue ocurriendo en la construcción de acueductos hoy en día, por lo que se hace indispensable tener un criterio adecuado que permita un mejor diseño y funcionamiento de las líneas de conducción cuando se tiene aire atrapado.

3.2 Método para analizar el movimiento de burbujas y bolsas de aire

La falta de un método analítico completamente aceptado para analizar el comportamiento de las burbujas y bolsas de aire en acueductos ha obligado a los ingenieros y constructores a lo largo de la historia a diseñar basándose en fórmulas semiempíricas como las expuestas en el capítulo uno. La desventaja es que las recomendaciones hechas por los investigadores antes mencionados varían ampliamente y pueden no ser adecuadas para el análisis o diseño de algunas líneas de conducción. Las causas de estas discrepancias en los resultados de los autores se deben quizá a que las condiciones que adoptan para sus estudios son arbitrarias. A esto hay que sumarle que sus investigaciones fueron realizadas en modelos con tuberías de diámetros pequeños comparados con prototipos.

Diversos investigadores han adoptado criterios que definen la velocidad de remoción o de barrido, también conocida como velocidad mínima o crítica del agua para remover burbujas y bolsas de aire de las tuberías. Algunos de ellos utilizaron bolsas de aire estacionarias en una tubería, mientras el flujo de agua llenaba por completo el tubo (Kalinske y Bliss, 1943; Kent, 1952; Wisner et. al., 1975; Bendiksen, 1984). Mientras otros consideraron la velocidad de ascenso de bolsas de aire en una tubería llena de agua estática (Zukoski, 1966; Gandenberger, 1966).

Esta circunstancia de condiciones variables son la causa por la que se reportan varias velocidades de remoción en los resultados de los autores antes descritos. Si alguno de estos valores es usado para un diseño específico, la velocidad del agua puede no ser suficiente para remover el aire del acueducto, lo cual puede generar una variedad de problemas como los antes mencionados.

En este trabajo se usará la información obtenida por González y Pozos (2002), Pozos (2007) y Pozos et al. (2010) para proponer la metodología para analizar el comportamiento del aire atrapado en acueductos. Los resultados de estos autores han sido comprobados teóricamente y experimentalmente por lo que se consideran confiables. Se habló con anterioridad en este mismo trabajo de la ecuación propuesta por estos autores. Ahora, se profundizará en el proceso de obtención de dicha fórmula.

Una investigación teórica-experimental fue desarrollada para validar el uso práctico de dicha ecuación.

Los autores analizaron el movimiento de una bolsa de aire en una tubería fluyendo a tubo lleno, al balancear la fuerza de arrastre del flujo de agua y la componente de la fuerza de flotación en dirección contraria al flujo, Figura 3.1.

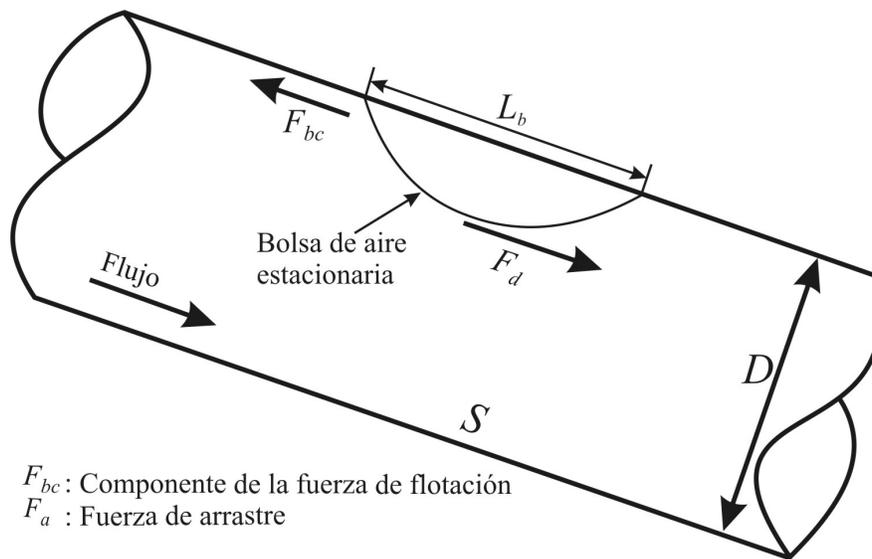


Figura 3.1 Análisis del movimiento de una bolsa de aire

El balance de las dos fuerzas se puede escribir como:

$$C_a L_b^2 \rho \frac{v^2}{2} = L_b^3 \rho g S \quad (3.1)$$

Donde:

C_a - Coeficiente de arrastre.

L_b - Dimensión lineal de la bolsa de aire.

ρ - Densidad del agua.

v - Velocidad media del agua que actúa sobre la burbuja de aire estacionaria.

g - Aceleración de la gravedad.

S - Pendiente del tubo.

La densidad del aire no es tomada en cuenta, debido a que su valor es muy pequeño comparado con la densidad del agua.

Reacomodando términos, la ecuación (3.1) se puede presentar como:

$$v^2 / 2gL_b = (S / C_a) \quad (3.2)$$

Nada se puede obtener de este análisis a menos que se haga una consideración con respecto a la dimensión lineal de la burbuja, si L_b depende del diámetro de la tubería D , entonces L_b/D se vuelve constante. Por lo tanto L_b se puede reemplazar por D en la ecuación (3.2).

$$v^2 / 2gD = (S / C_a) \quad (3.3)$$

Se sabe que en conductos circulares $Q = v(\pi D^2/4)$, entonces la ecuación (3.3) también se puede escribir como:

$$Q^2 / gD^5 = \frac{\pi^2}{8} (S / C_a) \quad (3.4)$$

El término del lado izquierdo de la ecuación (3.4) se conoce como parámetro de gasto adimensional (PGA).

La ecuación (3.4) es muy similar a la expresión obtenida por Kalinske y Bliss (1943). Sin embargo, ellos no especifican el valor del coeficiente de arrastre C_a . Asimismo, Walski et al. (1994) realizaron experimentos en un modelo físico para determinar el valor de C_a para bolsas de gas, pero los resultados no fueron satisfactorios, debido a que los valores del número de Reynolds (R_e) obtenidos estaban dentro del orden 1×10^3 , valor para el cual el coeficiente de arrastre es independiente a R_e . Por otra parte, Kent (1952) propone una

ecuación para obtener el valor del coeficiente de arrastre C_a , la expresión puede escribirse como:

$$C_a = 0.76 \left(\frac{L_b}{D} \right)^{1.11} \quad (3.5)$$

De la ecuación (3.5) se puede deducir, que el C_a es únicamente función de la relación L_b/D , además Kent encontró un valor límite ($L_b/D = 1.5$) para el cual el coeficiente de arrastre permanece constante y las burbujas y bolsas de aire se mantienen estacionarias en una tubería con pendiente descendente. Este valor límite es el que se utiliza para calcular el coeficiente de arrastre, obteniéndose $C_a = 1.2$.

El resultado del cociente $\frac{\pi^2}{8C_a}$ se puede redondear a la unidad de lo cual se obtiene:

$$Q^2 / gD^5 = S \quad (3.6)$$

Es importante mencionar, que la ecuación (3.6) ha sido utilizada para estudiar problemas de aire atrapado en acueductos de México, y las soluciones propuestas han permitido un mejor funcionamiento de estos sistemas (González y Pozos, 2000; Pozos, 2002; Pozos, 2007; Pozos et al., 2010).

Reescribiendo la ecuación (3.6) en términos de la velocidad media del agua, se obtiene:

$$\frac{v}{\sqrt{gD}} = \frac{4\sqrt{S}}{\pi} \quad (3.7)$$

Las ecuaciones de Kalinske y Bliss (1943) y Kent (1952) son las más usadas para calcular la velocidad de remoción en acueductos. Kalinske y Bliss (Ec. 3.8) encontraron una buena correlación entre el movimiento inicial de las burbujas de aire, utilizando la pendiente de la tubería y el número Eötvös $\gamma D^2 / \sigma$, el cual relaciona la fuerza de flotación con la tensión superficial. Por otra parte, Zukoski (1966) y Viana et al. (2003) plantearon que para condiciones de flujo turbulento, los efectos viscosos y de tensión superficial son mínimos para tubos con diámetros de 175 mm o mayores. Por lo tanto el número de Eötvös puede no ser considerado. Asimismo, la relación propuesta por Kent (ecuación 3.9) es comúnmente utilizada en la práctica debido a su simplicidad. No obstante, la ecuación 3.9 muestra una desviación sistemática con respecto a los resultados experimentales.

$$\frac{v_c}{\sqrt{gD}} = 1.07\sqrt{S} \quad (3.8)$$

v_c es la velocidad crítica del agua actuando sobre la burbuja de aire.

$$\frac{v_{\min}}{\sqrt{gD}} = 1.62\sqrt{\xi S} \quad (3.9)$$

v_{\min} es la velocidad mínima para la cual la burbuja está en equilibrio y $\xi = 0.58$ es un factor de forma obtenido experimentalmente.

Las velocidades de remoción calculadas con las ecuaciones antes presentadas se enlistan en la Tabla 3.1. Los resultados son comparados con la velocidad de remoción obtenida por Babb y Johnson (1968) ($v = 3.3$ m/s) en un sifón con diámetro de 3.66 m, un gasto $Q = 34.33$ m³/s, y pendiente descendente $S = 0.42$.

Tabla 3.1 Valores de la velocidad de remoción

Ecuación	Valor adimensional de la velocidad de remoción	Velocidad de remoción (m/s)
Kalinske y Bliss (1943)	4.16	0.69
Kent (1952)	4.65	0.77
González y Pozos (2000)	4.93	0.82

Analizando los resultados, se puede ver fácilmente que el mayor valor de la velocidad de remoción es el calculado con la ecuación propuesta por González y Pozos (2000). Los valores obtenidos muestran que la ecuación (3.6) es conservadora y está del lado de la seguridad. Por lo tanto, se recomienda su uso para el diseño de nuevos acueductos, o bien para analizar el movimiento del aire en acueductos que se encuentren en funcionamiento.

3.3 Comportamiento del aire en conductos a presión

Investigaciones llevadas a cabo en dispositivos experimentales indicaron que grandes burbujas de aire pueden acumularse hacia ambos lados de una sección de control, que se localiza en el cambio de pendiente subcrítica a supercrítica (Mosvell, 1976; Walski et al., 1994; Pozos, 2007), tal como se muestra en la Figura 3.2.

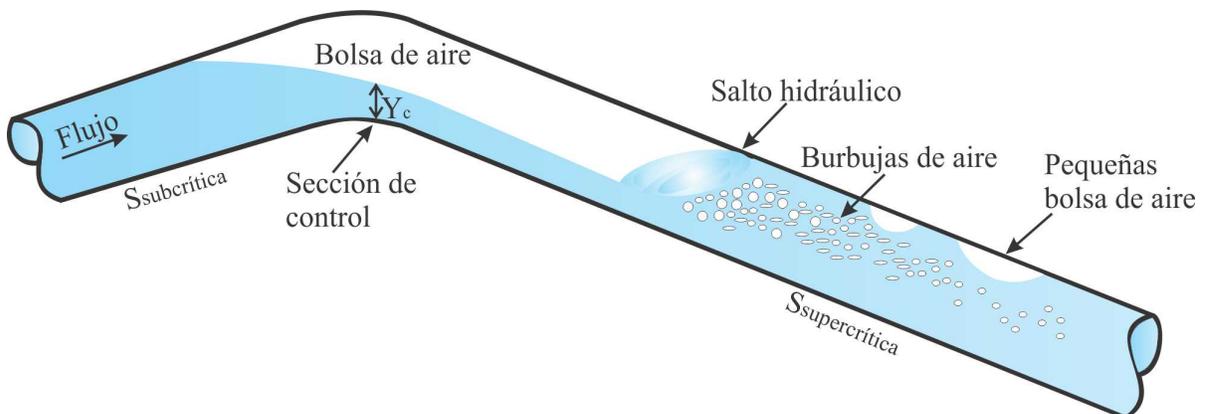


Figura 3.2 Bolsa de aire acumulada en una sección de control

Rodal et al. (2000) encontraron que el tirante crítico Y_c necesario para remover una gran bolsa de aire de una sección de control, debe ser igual o mayor que el 90% del diámetro del tubo. Mediciones realizadas en modelos físicos han permitido concluir que el gasto de diseño puede no ser suficiente para remover la bolsa de aire.

El salto hidráulico al final de una bolsa de aire introduce aire en forma de burbujas. La velocidad a la cual el aire es removido de la línea depende de la habilidad del agua que fluye aguas abajo del salto. La ecuación (3.6) es usada para analizar el movimiento de burbujas y bolsas de aire en tubos con pendiente descendente que fluyen completamente llenos. Las burbujas bombeadas por el salto hidráulico se mueven hacia el techo de la tubería formando burbujas de mayor tamaño y bolsas de aire. Las burbujas y las bolsas de aire pueden regresar a contra flujo, permaneciendo la misma cantidad de aire en la línea. Este fenómeno depende de la magnitud de la fuerza de flotación, de la pendiente de la tubería S , del diámetro del tubo D , y del gasto de agua Q . Por otra parte, si la pendiente de la tubería es ascendente en la dirección del flujo, el aire se va mover hacia aguas abajo. De la misma manera, en tubos horizontales la componente vertical de la fuerza de flotación no influye en el movimiento de las burbujas y bolsas de aire, por lo tanto se espera que éstas sean removidas.

Para determinar si las grandes bolsas de aire podrían permanecer en cambios de pendiente en líneas de conducción, el PGA es calculado para el rango completo de gastos de agua, y comparado con todas las pendientes que componen el acueducto. Cuando PGA es mayor que S , las burbujas y bolsas de aire se mueven con el flujo. Sin embargo, si PGA es menor que S , el aire va a regresar a contra flujo. Tabla 3.2. En este caso los puntos altos e intermedios, serán identificados como posibles puntos de acumulación de aire. Por lo tanto, la colocación de válvulas y venteos tiene que ser considerada para remover mecánicamente el aire atrapado.

Tabla 3.2

Caso	Observaciones
$Q^2/gD^5 < S$	El aire regresa a contra flujo.
$Q^2/gD^5 > S$	El aire se moverá con y en el sentido del flujo.

3.4 Investigación experimental

Para validar la aplicación de la ecuación (3.6) se realizó una investigación experimental. Un dispositivo experimental fue diseñado y construido para estudiar el comportamiento de grandes bolsas de aire estacionarias en puntos altos e intermedios de los acueductos, así como para analizar el aire introducido por un salto hidráulico localizado en una pendiente descendente. La investigación experimental también incluyó la medición de la velocidad de las burbujas de aire, mediante el uso de una cámara de alta velocidad, colocada en diferentes secciones de la tubería aguas abajo del salto hidráulico. Esto se hizo con el propósito de definir las fronteras entre la zona de entrada del aire y la zona donde se inicia el transporte del aire, para así dar un límite de aplicación de la expresión analítica propuesta.

3.4.1 Dispositivo experimental

El dispositivo se compone de un tanque de carga constante de 5.0 x 1.1 metros en la base y una altura de 1.0 m. El tanque está dividido en dos depósitos interconectados mediante un tubo de 10 cm para evitar turbulencias en la succión de la bomba. La bomba puede entregar un gasto máximo de 2.5 l/s. El flujo es controlado con una válvula de compuerta colocada en la descarga de la bomba. La sección de medición se compone de un primer tramo de tubería de acrílico de 76.2 mm de diámetro interno con longitud de 6.8 metros, seguida de un tubo flexible de 50 cm de largo, continuando con otra sección de tubería de acrílico de 6.4 m, todo esto soportado por marcos metálicos. Al final de la sección de medición se implementó un tubo en forma de cuello de garza, conectado mediante un tubo flexible a una tubería de fierro galvanizado para retornar el agua al tanque.

Con respecto a los efectos de escala en modelos y dispositivos experimentales, Zukoski (1966) sugiere que para flujo turbulento los efectos viscosos y de tensión superficial que actúan sobre las burbujas y bolsas de aire son mínimos en tuberías con diámetros iguales o mayores que 175 mm. Por otra parte, aunque los datos obtenidos analíticamente por Viana et al. (2003) coinciden con los resultados de Zukoski, Viana et al. aseveran que los efectos viscosos y de tensión superficial son despreciables si el número de Eötvös es mayor que 40. Esta aseveración fue sustentada con una investigación

experimental realizada en un dispositivo experimental con una tubería de acrílico de 76.2 mm de diámetro interior.

Es importante mencionar que en las pruebas experimentales llevadas a cabo en el dispositivo experimental mostrado en la Figura 3.3, el número de Eötvös siempre fue mayor que 40.

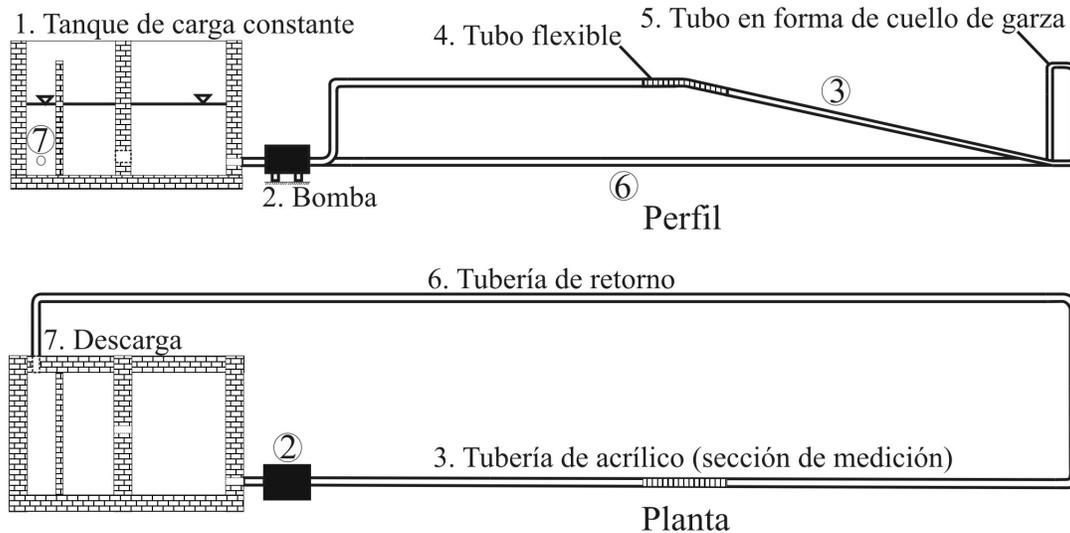


Figura 3.3 Planta y perfil del dispositivo experimental.

Las fotografías de la sección de medición y el tubo en forma de cuello de garza se muestran en las Figuras 3.4 a 3.6, respectivamente.

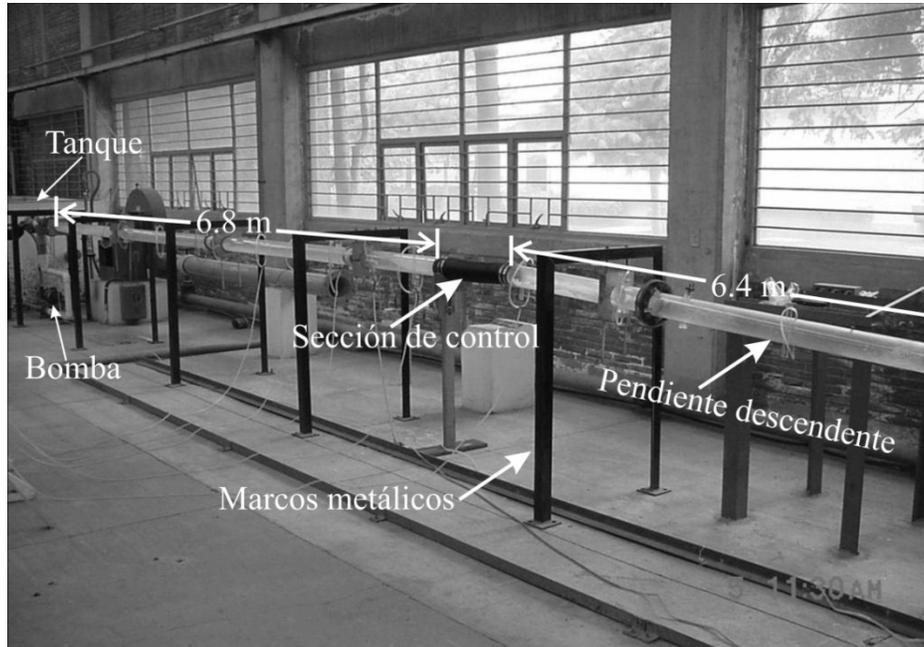


Figura 3.4 Sección de medición del dispositivo experimental aguas arriba



Figura 3.5 Sección de medición del dispositivo experimental aguas abajo



Figura 3.6 Tubo en forma de cuello de garza

3.4.2 Procedimiento experimental

Mientras la línea fluía completamente llena, el aire era inyectado con un compresor. Una vez en la sección de medición, el aire tendía a acumularse en la sección de control en forma de grandes bolsas, que terminaban con un salto hidráulico (Figura 3.2). Asimismo, el salto hidráulico sellaba el tubo y la acción turbulenta del mismo introducía una cantidad considerable de aire, que era barrido hacia aguas abajo por el flujo de agua. Se observó que las pequeñas burbujas de aire se unían formando burbujas de mayor tamaño y bolsas de aire. Dependiendo del gasto de agua y de la pendiente descendente de la tubería, las burbujas y bolsa de aire regresaban a contra flujo a través del salto hidráulico o se movían en la dirección del flujo. Las mediciones realizadas fueron para diferentes gastos y pendientes descendentes. Durante las pruebas todas las pendientes fueron comparadas con el rango del PGA. González y Pozos (2000) observaron en el dispositivo experimental que las burbujas y bolsas de aire se comportan como lo predice la ecuación (3.6). La ventaja del PGA es que incluye el gasto de agua y el diámetro de la tubería, por lo tanto esto permite la transferencia de resultados de modelo a prototipo.

Parte de los resultados obtenidos durante la investigación experimental se resumen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Movimiento de burbujas y bolsas de aire en una tubería con pendiente descendente.

Q (m³/s)	Q² / gD⁵ (-)	Comportamiento del aire
Evento 1. S = 0.089, Pendiente descendente		
0.0015	0.0889	se mueve aguas arriba
0.0017	0.1147	se mueve aguas abajo
0.0019	0.1432	se mueve aguas abajo
Evento 2. S = 0.060, Pendiente descendente		
0.0015	0.0889	se mueve aguas abajo
0.0017	0.1147	se mueve aguas abajo
0.0019	0.1432	se mueve aguas abajo
Evento 3. S = 0.052, Pendiente descendente		
0.0015	0.0889	se mueve aguas abajo
0.0017	0.1147	se mueve aguas abajo
0.0019	0.1432	se mueve aguas abajo

3.5. Metodología para localizar los posibles puntos de acumulación de grandes bolsas de aire en conductos a presión

En esta sección se presenta la metodología para localizar los puntos altos e intermedios, donde las grandes bolsas de aire pueden acumularse. El análisis se hará utilizando una hoja de cálculo.

Lo primero que se requiere para llevar a cabo el análisis es el perfil del acueducto que se pretende revisar, es decir, el cadenamiento y elevación de la

línea de conducción. El acueducto puede estar ya construido o en proceso de diseño.

Con los datos antes mencionados, se prosigue a calcular la pendiente del tubo entre cada dos puntos topográficos $P_n(x_n, y_n)$ y $P_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1})$. Debido a que en hidráulica la pendiente descendente se considera positiva, y por convenir al análisis, la ecuación (3.10) puede escribirse como:

$$S = \frac{y_n - y_{n+1}}{x_{n+1} - x_n} \quad (3.10)$$

Adicionalmente, al perfil del acueducto se deben conocer los gastos Q con los que se opera o pretende operar el sistema. Otro dato necesario es el diámetro D o los diámetros de la tubería. En el caso de la aceleración de la gravedad g se ocupa el valor estándar de 9.81 m/s^2 .

Posteriormente, se calculan los parámetros de gasto adimensional PGA y las pendientes del perfil S , con las ecuaciones (3.6) y (3.10), respectivamente. Una vez obtenidos estos valores, se comparan mediante la función lógica **IF** ó **SI** de las utilerías de una hoja de cálculo, la función condicional se puede expresar como:

$$\mathbf{IF} (Q^2 / gD^5 > S; \text{“avanza”}; (\mathbf{IF} (Q^2 / gD^5 < S; \text{“regresa”}; \text{“estacionaria”})) \quad (3.11)$$

La función condicional indica que el aire avanzará cuando el PGA sea mayor que el valor de la pendiente S , y en caso contrario, cuando la pendiente tenga un valor mayor que el PGA el aire regresará. En caso de que el PGA y S tengan el mismo valor, las bolsas de aire permanecerán estacionarias.

En el siguiente capítulo se presenta la aplicación de la metodología propuesta, para analizar casos reales de acueductos con problemas de aire atrapado.

4. Casos de Estudio

En este capítulo se analizarán algunos casos reales, para mostrar la aplicación de la metodología expuesta en el capítulo anterior.

4.1. Aguas residuales

Al igual que en la conducción de agua potable, cuando se transporta agua residual suelen formarse bolsas de aire en algunos puntos de la línea, sin embargo, estas bolsas contienen gases corrosivos. La conducción de aguas residuales es un tema importante a tratar. Esta agua tiene partículas sólidas y gases que hacen que su conducción presente problemas aparte de los ya expuestos en el capítulo uno.

Las bolsas de gas que se acumulan en los puntos altos comúnmente causan problemas de corrosión. Aunado a estos problemas, las válvulas expulsoras de aire que son colocadas en los puntos altos a lo largo de la línea de conducción, para ventear los gases suelen quedar bloqueadas por desechos sólidos o permanecen cerradas después de un evento transitorio. La posibilidad de usar estos accesorios suele verse reducida por las complicaciones que trae consigo. Es más viable diseñar estos sistemas desde un principio de tal manera que se garantice que el gasto de agua en la conducción sea lo suficientemente grande para remover las bolsas que se puedan acumular.

4.1.1. Problemas al conducir agua residual

4.1.1.1. Corrosión por sulfuro de hidrógeno

Se han realizado diversas investigaciones sobre las afectaciones que la corrosión tiene sobre tuberías tanto de concreto como de acero, No obstante, estos esfuerzos se han encaminado más a tratar el problema en el proceso químico y biológico que en el comportamiento hidráulico de las bolsas de gas.

Las aguas residuales urbanas contienen diversos gases con diferentes concentraciones. Entre ellos están el oxígeno disuelto, anhídrido carbónico, metano y en disolución acuosa; el ácido sulfhídrico. (Calvo, 2005).

A través de los años se han estudiado los daños causados por gases corrosivos en los sistemas de conducción que transportan aguas residuales. El gas al que más tiempo y estudios se le ha dedicado por su impacto en tuberías es el sulfuro de hidrógeno (H_2S). Este gas se presenta en la atmósfera del interior de las tuberías y disuelto en el agua residual.

El H_2S puede ser oxidado a ácido sulfúrico por la acción de bacterias que se desarrollan en las paredes de los tubos, lo cual da lugar a importantes problemas de corrosión (Pozos *et al.*, 2009).

Como se ha descrito antes, los sistemas a bombeo que transportan agua que tienen muchos cambios de pendiente suelen albergar bolsas de aire en los puntos altos de la línea. En el caso de la conducción de aguas residuales las bolsas de aire son realmente bolsas de sulfuro de hidrógeno y si estas bolsas permanecen mucho tiempo los tubos pueden ser severamente dañados por corrosión, tal como se muestra en la Figura 4.1.

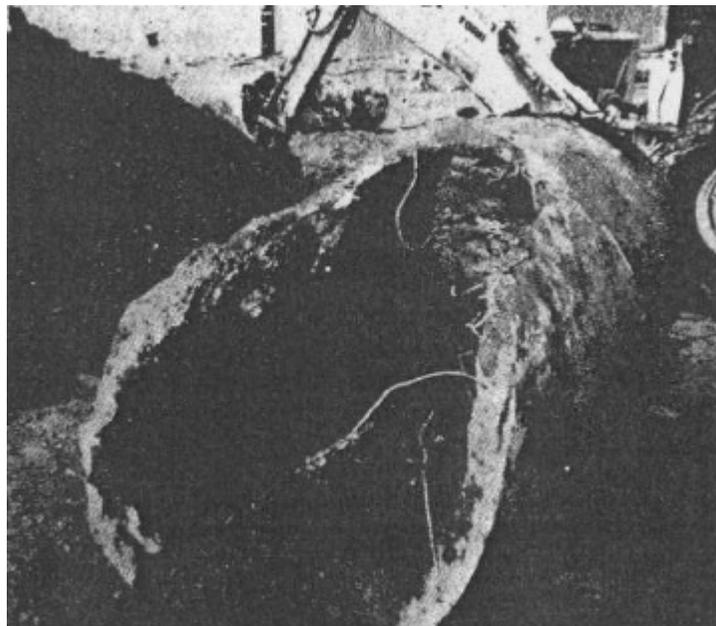


Figura 4.1 Tubería de concreto dañada por corrosión

Actualmente se combate al problema de la corrosión en acueductos que transportan aguas residuales usando productos químicos como el peróxido de hidrógeno o el permanganato de potasio para reducir la formación de sulfuro de hidrógeno (Livingston, 1993). Desafortunadamente, esta práctica es costosa y el implemento de sustancias químicas siempre conlleva riesgos. Es por esto, que es necesario plantear una solución que garantice la expulsión de las bolsas de gas corrosivo con recursos meramente hidráulicos.

En la figura 4.2 se observa una tubería de acero dañada por la presencia de CO_2 y H_2S (dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno).



Figura 4.2 Tubo de acero corroído (Díaz et al., 2010)

Proceso de corrosión

El proceso de corrosión por H_2S es el mismo para las tuberías metálicas y de concreto (Pozos *et al.*, 2009). Para cualquier de los dos tipos de tuberías antes mencionados el proceso de corrosión es el siguiente:

- Liberación de sulfuro de hidrogeno.
- Absorción en las superficies húmedas expuestas.
- Reacción de corrosión.

En la figura 4.3 se describe de manera gráfica cómo es por dentro una tubería que transporta agua residual y como se libera el sulfuro de hidrógeno a la atmosfera del tubo.

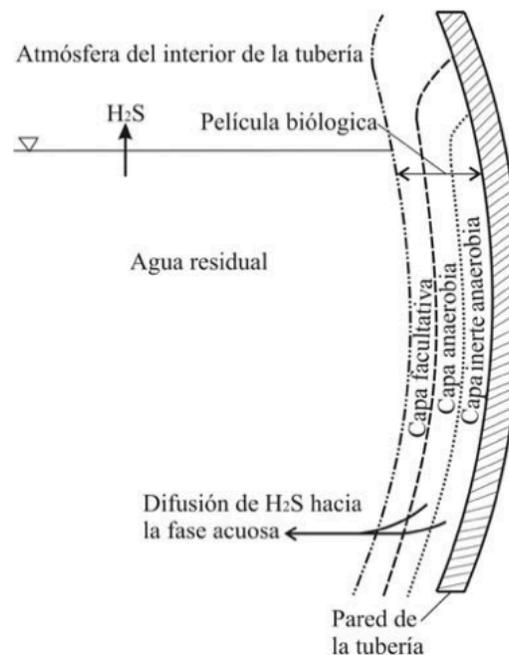


Figura 4.3 Difusión de H₂S (Pozos et al., 2009)

Mecanismo de corrosión en las tuberías

Una vez formada la película biológica, ésta libera sulfuro al agua residual. Una vez en solución, el H₂S escapa a la atmósfera del tubo (ver figura 4.3). Después el H₂S se fija a las paredes de la tubería húmeda. El sulfuro de hidrógeno (H₂S) que se queda pegado en las paredes de tubería es transformado en ácido sulfúrico por la acción de bacterias. En este punto el ácido sulfúrico reacciona con el cemento del concreto debilitándolo y haciendo que éste sea arrastrado por el agua del flujo de operación normal de la tubería. Pozos et al. (2009).

En la figura 4.4 se muestra el mecanismo de corrosión por sulfuro de hidrógeno.

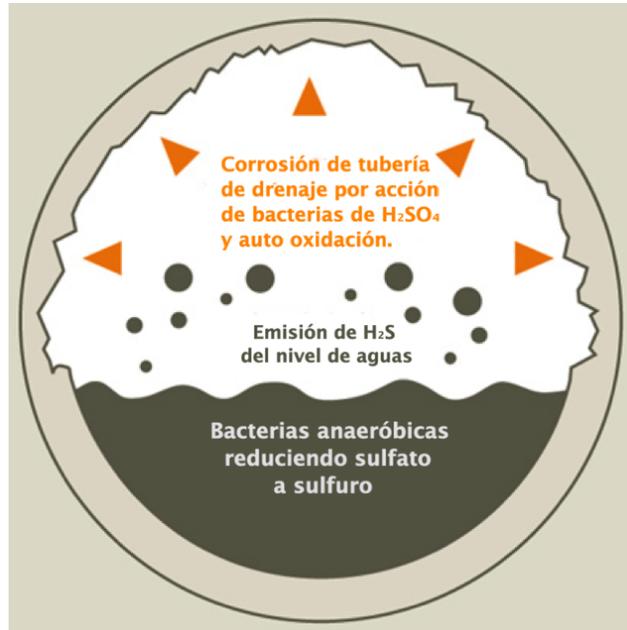


Figura 4.4 CALUCEM este es un apellido? (2010)

4.1.2. Determinación del problema

Pozos *et al.* (2009). analizan un sistema de bombeo que transporta aguas residuales. En el extremo de aguas arriba se ubica una estación de bombeo y aguas abajo un tanque de carga constante. La figura 4.5 muestra el perfil del acueducto estudiado.

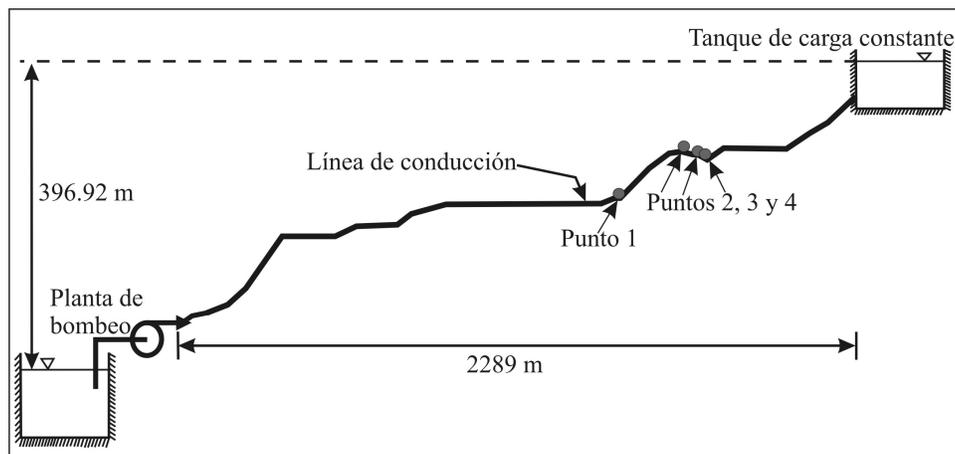


Figura 4.5 Acueducto que transporta agua residual

En el capítulo tres se estableció la metodología para el análisis de las bolsas de aire y en el primer paso se utiliza la ecuación (3.6), para establecer la ubicación de los puntos donde se podría acumular bolsas de gases corrosivos y así tratar de evitar la corrosión.

$$\frac{Q^2}{gD^5} = S \quad (3.6)$$

Al operar con cuatro unidades de bombeo con una capacidad de 0.625 m³/s se encontró que sólo en un punto de la línea se podría acumular una gran bolsa de gas corrosivo. Una situación más crítica se presentaría cuando sólo 3 bombas se encuentren en funcionamiento. Dicha condición podría propiciar que se acumulen 4 bolsas con contenido de sulfuro de hidrógeno.

Una vez ubicados los puntos altos, donde se podrían acumular las bolsas de gas corrosivo se procede al cálculo de tirantes críticos y normales para aplicar la teoría del flujo gradualmente variado utilizando el método del paso directo para calcular los perfiles debajo de las boslas.

4.1.3. Metodología y cálculos (Método del paso directo)

Se utiliza el método del paso directo para calcular los perfiles de flujo debajo de las bolsas de gas. En investigaciones experimentales el comportamiento de las bolsas de aire en el cambio de pendiente subcrítica a supercrítica resulta ser muy similar a los perfiles de flujo gradualmente variado. Las bolsas de aire, a diferencia de un flujo a superficie libre, se encuentran a una presión mayor que la atmosférica, además su presión es constante a lo largo del perfil. Asimismo, el perfil del flujo bajo las bolsas de aire depende únicamente del gasto y tirante crítico. Entonces, es válido decir que la teoría de flujo gradualmente variado es aplicable al flujo debajo de las bolsas de aire estacionarias.

Para determinar la longitud de las bolsas de aire y su volumen, se utilizó el método del paso directo por su fácil aplicación. Esta metodología divide al

canal en tramos realizando el cálculo paso a paso. Muchos autores han descrito a detalle el procedimiento exacto de este método.

En la tabla 4.1 se muestran la longitud de las bolsas de aire tanto hacia aguas arriba como aguas abajo de la sección de control. Se debe ser cuidadoso y contar con un criterio amplio para poder determinar si es necesario o no la implementación de recubrimientos y protección para la tubería.

Tabla 4.1 Longitud de las bolsas de aire.

Punto	L _{aguas arriba} (m)	L _{aguas abajo} (m)
1	5.397	0.823
2	6.727	3.122
3	6.123	7.583
4	4.027	2.967

4.2. Línea alterna del Sistema Cutzamala

La Línea Alterna del Sistema Cutzamala se construyó en apoyo al canal Donato Guerra, debido a los problemas de inestabilidad en sus taludes que éste presentó.

Las características físicas de la línea alterna se enlistan enseguida:

Tiene una longitud de 6.9 km. Se compone principalmente de tubería de concreto reforzado de 2.74 m de diámetro interior. A 4 km aguas arriba del inicio de la línea alterna se localiza la Torre de Oscilación 4 (TO4), su altura es de 37m con un diámetro de 10m.

4.2.1. Problemas presentes en el sitio

La línea alterna inició su operación transportando un gasto de 8 m³/s, con este caudal, el bordo libre de la TO4 era de 9.9 m y su funcionamiento era, en general, el adecuado. Posteriormente, se incrementó el gasto a 12 m³/s y el

bordo libre de la TO4 registró una reducción de cinco metros en su bordo libre. Después, el agua alcanzó el nivel de la corona, justo al siguiente mes de haber incrementado el gasto en el sistema. Esta situación derivó en el derrame de agua de la TO4 (ver Fig 4.6).

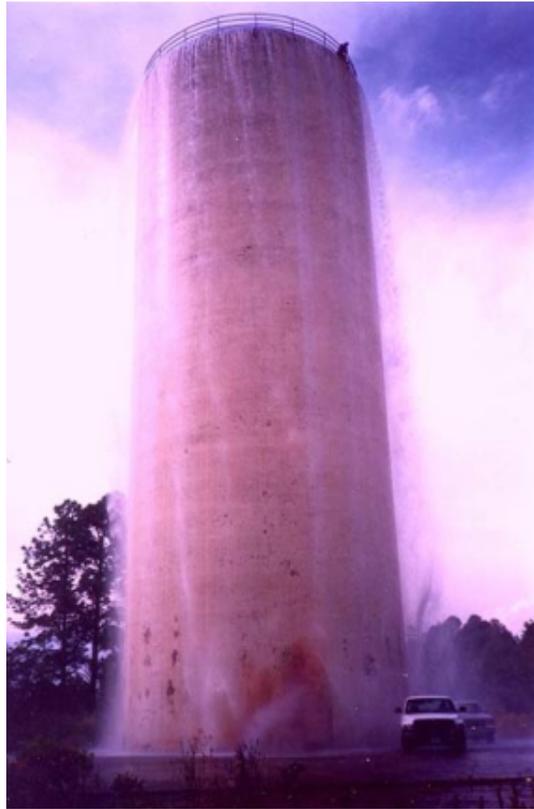


Figura 4.6 Derrame de la TO4

2.2. Motivo de la presencia del problema

Se introduce aire constantemente a la línea de conducción, si éste no es evacuado correctamente puede acumularse y generar grandes bolsas que reducen la sección efectiva de paso de gasto en la tubería. Se cree que al aumentarse el gasto de conducción se dieron las circunstancias para que el aire quedase atrapado en uno o varios puntos del acueducto, ocasionando así el derrame en la TO4.

4.2.3. Metodología y Cálculos.

4.2.3.1. Parámetros de Gasto Adimensional.

Una vez más se apoya el estudio del aire en el método del Parámetro de Gasto Adimensional con la ecuación propuesta por Pozos y González (2000).

Para calcular los valores de los parámetros de gasto adimensional fue necesario obtener datos físicos del lugar en estudio:

- Datos de perfil.
 - Cadenamiento.
 - Elevación.
- Gastos.
- Diámetros.
- Factores de fricción.
- Valor de la aceleración de la gravedad.

Una vez obtenidos estos datos se procede a realizar el cálculo de los valores de los PGA con la ecuación (4.1) y las pendientes de la tubería del acueducto (S) con la ecuación (4.2) de cada uno de los tramos de la línea de conducción.

$$\frac{Q^2}{gD^5} = S \quad (4.1)$$

Es importante recordar que el término de la izquierda (Q^2/gD^5) es el PGA o parámetro de gasto adimensional.

Con los datos antes mencionados, se prosigue a calcular la pendiente del tubo entre cada dos puntos topográficos $P_n(x_n, y_n)$ y $P_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1})$. Debido a que en hidráulica la pendiente descendente se considera positiva, y por convenir al análisis, la ecuación (4.2) puede escribirse como:

$$S = \frac{y_n - y_{n+1}}{x_{n+1} - x_n} \quad (4.2)$$

Una vez calculados los PGA y las pendientes de la tubería, se procede a realizar la comparación con la función “if” de una hoja de cálculo (ecuación 4.3).

$$IF (Q^2/gD^5 > S; \text{“avanza”}; (IF (Q^2/gD^5 < S; \text{“regresa”}; \text{“estacionaria”})) \quad (4.3)$$

El aire podría acumularse en forma de bolsa de aire en los puntos donde, la comparación realizada con la ecuación (4.3), muestre consecutivamente condiciones de “avanza” y “regresa”.

Es recomendable graficar los datos del perfil, es decir cadenamiento y elevación; así como los puntos “avanza-regresa” para ubicar de manera más sencilla en dónde se podrían acumular bolsas de aire.

4.2.3.2. Línea piezométrica

El cálculo de línea piezométrica puede ser de utilidad al ser graficado junto con el perfil del acueducto. De presentarse el caso en que la piezométrica corte el perfil, pueden presentarse dos escenarios.

- Si existen válvulas o venteos en los puntos altos localizados inmediatamente aguas arriba, donde la piezométrica corta la tubería, se va a presentar flujo a superficie libre.
- En caso de no existir mecanismo para evacuar el aire en estos puntos, la conducción se va a comportar como un sifón. Si se continúa acumulando aire y este no puede ser removido, el flujo de agua puede detenerse por completo.

También, puede ocurrir que el flujo que pasa por debajo de la bolsa de aire sea tan limitado que provoque un almacenamiento excesivo de agua en alguna estructura hidráulica aguas arriba del punto de acumulación de aire, lo cual seguramente fue la causa por la que se generó el derrame de agua a través de la corona de la TO4.

A continuación se describe un método para el cálculo de la línea piezométrica, mediante la utilización de la ecuación de Darcy – Weisbach:

$$\frac{h_f}{L} = S_f = \frac{f v^2}{D 2g} \quad (4.4)$$

Despejando h_f (m) se obtiene:

$$h_f = \frac{f v^2}{D 2g} L \quad (4.5)$$

Si se escribe la velocidad media en términos del gasto: $V=Q/A$, donde $A=\pi D^2/4$, entonces $v=4Q/\pi D^2$:

$$h_f = \frac{8f}{\pi^2 g D^5} Q^2 L \quad (4.6)$$

Para fines prácticos se considera que el cociente es constante por lo que:

$$h_f = KQ^2 L \quad (4.7)$$

Para encontrar el valor de la línea piezométrica (LP)

$$LP_n + h_f = LP_{n-1} \quad (4.8)$$

Que se puede escribir como:

$$LP_n + KQ^2 L = LP_{n-1} \quad (4.9)$$

Donde L es la diferencia entre dos valores consecutivos del cadenamiento $L = (Cad_n - Cad_{n-1})$, entonces:

$$LP_n + KQ^2(Cad_n - Cad_{n-1}) = LP_{n-1} \quad (4.10)$$

La Ec. (4.10) es válida cuando el cálculo de la línea piezométrica se hace desde un punto aguas abajo del perfil hacia aguas arriba. Para este propósito se utiliza una nueva hoja de cálculo, donde se deben copiar las columnas correspondientes al cadenamiento y a la elevación del perfil, además de obtener el valor de K.

$$K = \frac{8f}{\pi^2 g D^5} \quad (4.11)$$

4.2.4. Resultados

Con ambas líneas piezométricas trazadas, la correspondiente a $8 \text{ m}^3/\text{s}$ y $12 \text{ m}^3/\text{s}$ y los puntos donde el aire podría acumularse ubicados en el perfil se puede observar en la figura 4.7 que efectivamente ambas líneas piezométricas cortan al perfil en sus punto más altos, generando un flujo a superficie libre. Esto se debe a que el aire entra a través del venteo localizado en el punto 6.

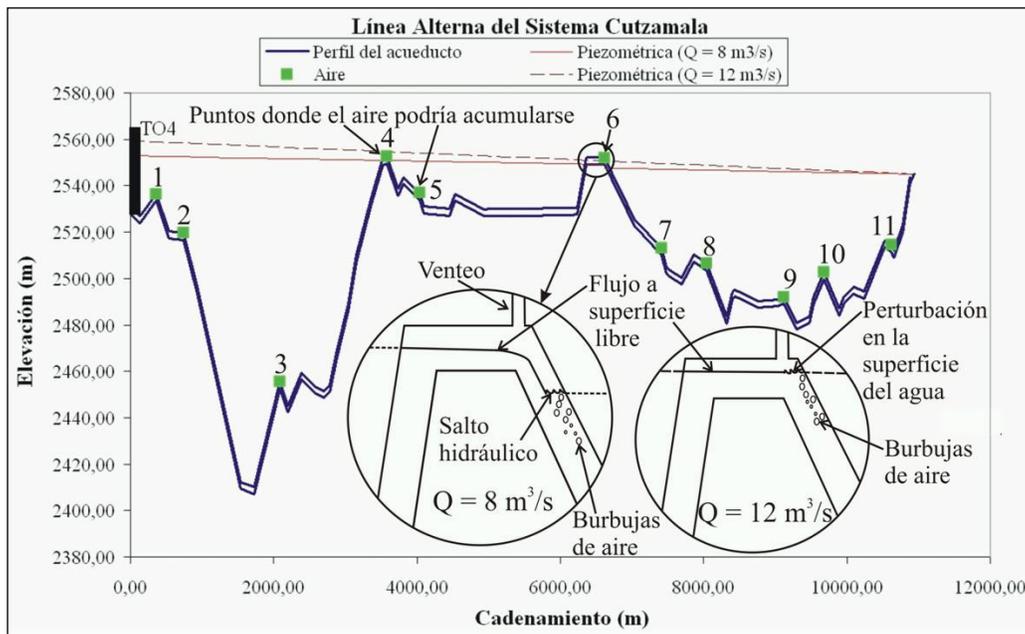


Figura 4.7 Perfil de Línea Alternada del Sistema Cutzamala

En la condición 1, cuando el gasto es igual a $8 \text{ m}^3/\text{s}$ se presenta una transición de flujo a superficie libre a flujo a tubo lleno mediante un salto hidráulico, que se presenta inmediatamente aguas abajo del venteo en el punto 6. Como se ha explicado con anterioridad, el salto hidráulico introduce una cantidad considerable de aire que se acumula en el punto 7. En este punto no hay válvulas expulsoras de aire instaladas motivo que favorece a la acumulación de aire.

Cuando el gasto se aumentó de $8 \text{ m}^3/\text{s}$ a $12 \text{ m}^3/\text{s}$ la mayor parte del aire que se encontraba acumulado en el punto más alto de la línea fue removido hacia aguas abajo hasta instalarse en el punto 7.

En los puntos 1 a 5 y 8 a 11 no se presentan problemas de acumulación de aire, debido a que en ellos sí hay válvulas expulsoras de aire (VEA) instaladas.

En el punto 7 está instalado un venteo pero tiene un diámetro relativamente pequeño comparado con el diámetro de la tubería, esto provocó que el aire pasará por la parte baja del venteo sin ser expulsado. Asimismo, al aumentar el gasto a $12 \text{ m}^3/\text{s}$ se elevó el nivel del agua en el tramo horizontal ubicado en la parte más alta de la conducción, sin embargo continúa presentándose flujo a superficie libre. Es probable que se haya presentado una perturbación en la superficie del agua al chocar con la pared del tubo, donde termina el tramo horizontal e inicia la pendiente descendente. Esta inestabilidad puede introducir aire de forma lenta pero continua, y puede ser la causa que generó el paulatino crecimiento de la bolsa de aire en el punto 7 a lo largo de un mes, produciéndose el posterior derrame de la TO4 al reducirse aún más la sección efectiva de paso del agua.

Como solución al problema se recomendó la instalación de una válvula expulsora de aire en el punto 7, localizado en el cadenamiento 7+416.40 y elevación 2512.97 m.

3.3. Termoeléctrica Juan de Dios Batíz Paredes



Fig 4.8 Central Termoeléctrica Juan de Dios Batiz Paredes, Zapeda

La Central Termoeléctrica se ubica en la vecindad del poblado de Topolobampo, en la parte norte de la costa del estado de Sinaloa, México. Cuenta con tres unidades turbogeneradoras, la 1 y 2 de 160 MW (Topolobampo II) y la 3 de 40 MW (Topolobampo I), sumando una capacidad instalada de 360 MW.

El circuito de enfriamiento a condensadores o de circulación, utiliza el agua de mar que llega por un canal de llamada a un cárcamo de bombeo.

El esquema de la central termoeléctrica se muestra en la figura 4.9. El circuito comienza con un canal de llamada que conduce el agua de mar hasta el cárcamo de bombeo. De ahí se suministra el agua a las tres unidades. La unidad tres descarga al cuerpo de agua de Topolobampo I cerca de la Bahía de Ohuira. Las unidades 1 y 2 juntan sus salidas en una estructura hidráulica denominada Caja de Sello. A partir de este punto la conducción deja de ser por bombeo y se inicia el tramo a gravedad hasta el túnel de descarga para la posterior entrega de aguas de Topolobampo II a la Bahía de Topolobampo.

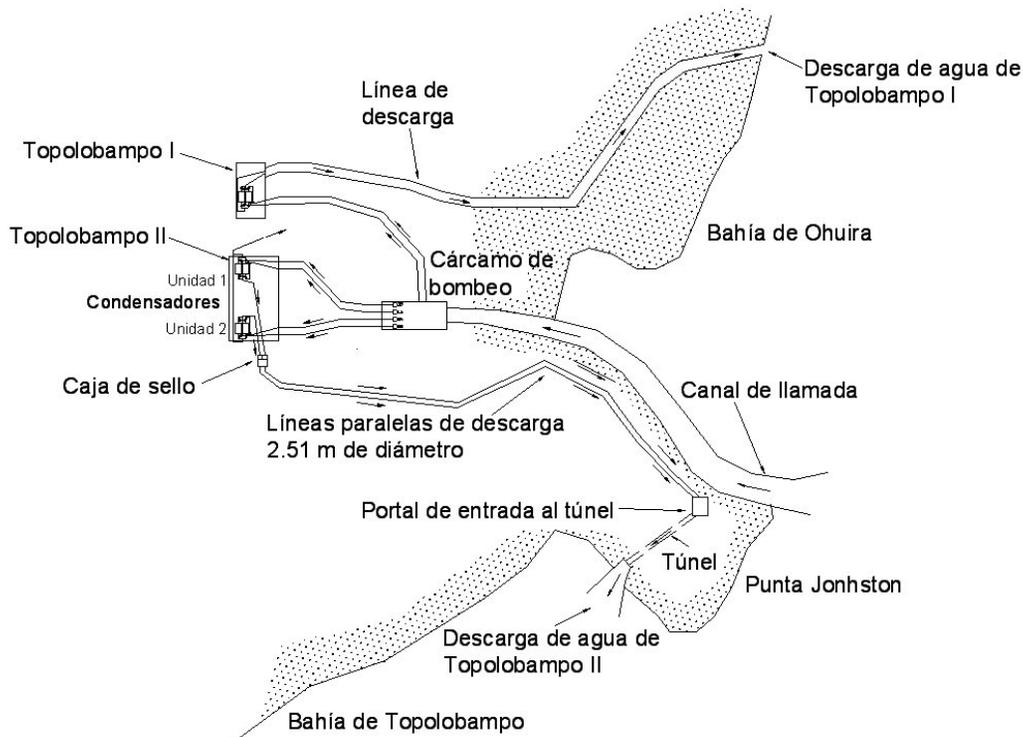


Figura 4.9 Circuito hidráulico de la central Termoeléctrica

4.3.1. Problemas presentes en el sitio

La unidad 3 corresponde a la etapa inicial de la central mientras que las unidades 1 y 2 corresponden a la segunda etapa que se realizó para ampliar la capacidad instalada de la central. Desde el arranque de la segunda etapa los operadores de la central detectaron que en las unidades 1 y 2 la transferencia de calor en los condensadores imponía un límite que impedía trabajar a las turbinas a su máxima potencia.

Estudios realizados, buscando explicaciones al problema, indican que los condensadores debieron tener mayor tamaño. Sin embargo, cambiar los condensadores implicaría costos elevados por lo que se ha analizado la alternativa de incrementar el caudal de enfriamiento en un 10% con respecto al actual. Esta alternativa se puede implementar con un cambio en los equipos de bombeo y así cubrir el caudal necesario pero la línea de gravedad parece no poder conducir este caudal bajo las condiciones actuales.

La línea de gravedad que conduce el agua de los condensadores de regreso al mar, como se ha expuesto anteriormente, comienza justo en la estructura

hidráulica llamada caja de sello. A ésta se le asignó el cadenamiento 0+000 para simplificar el análisis del perfil de conducción. De la caja de sello hasta el cadenamiento 0+500 la tubería se encuentra enterrada, el resto de la tubería continúa a nivel de terreno hasta llegar al portal del túnel de descarga en el cadenamiento 1+060.

Resulta sustancial destacar, para el análisis de un probable problema de aire atrapado, que a partir del cadenamiento 0+400 la línea de conducción se vio obligada a enterrarse a mayor profundidad para librar el paso de líneas de combustible y un camino en la zona. Esta situación provoca que tubería tenga una pendiente descendente mayor la cual es más susceptible de atrapar aire en este punto.

4.3.2. Motivo de la presencia del problema

La inspección directa de la conducción permitió constatar que efectivamente la línea tiene problemas de aire atrapado a lo largo de la primera mitad del tramo. La hipótesis planteada fue que el aire atrapado reduce la sección transversal efectiva de paso de agua, lo que limita su capacidad actual de conducción.

Es imposible garantizar el aumento de caudal si no se ataca primero el problema de aire atrapado, solucionado esto, resultaría innecesaria la instalación de equipos de bombeo de mayor capacidad. Es decir, se puede recuperar el caudal evitando el aire atrapado.

La caja de sello representa el principal problema ya que es ahí donde el aire es introducido lentamente en forma de pequeñas burbujas debido a la viscosidad del flujo en la caja de sello (Figura 4.10).

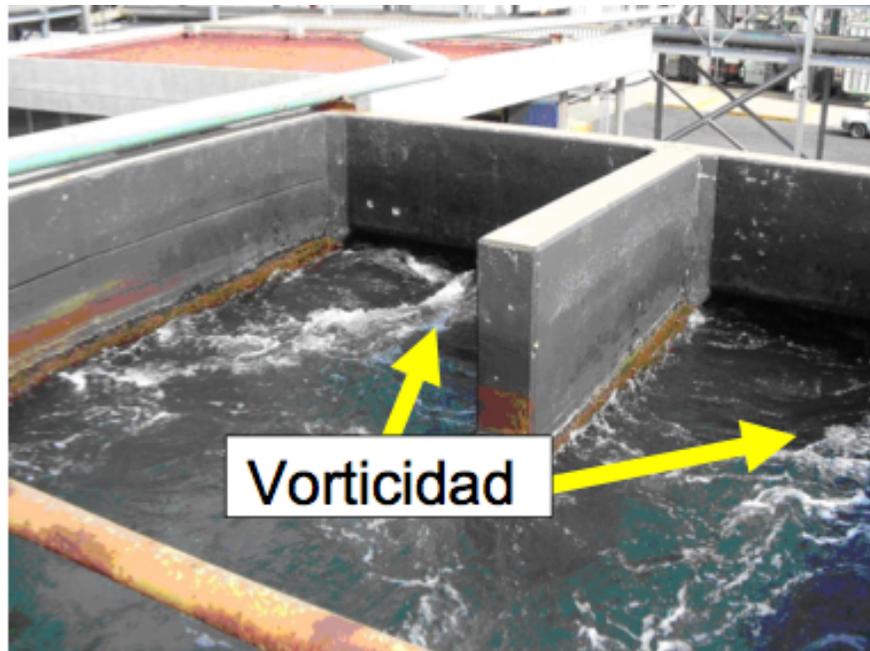


Figura 4.10 Caja de sello

La caja de sello es una estructura a cielo abierto sobre la cual descargan las tuberías que vienen de los condensadores de las unidades 1 y 2. El sistema de circulación a bombeo termina en la caja de sello y a partir de ésta se inicia el tramo a gravedad. La conducción a gravedad tiene las siguientes características:

- Dos tuberías paralelas de concreto presforzado.
- Diámetro de 2.51m cada una.
- Longitud de 1046 m cada una.
- Ambas diseñadas para trabajar a tubo lleno.

Su objetivo es conducir el agua hacia el túnel de descarga para entregar el flujo a la bahía de Topolobampo II.

La velocidad de conducción es relativamente baja $V=1.3\text{m/s}$, haciendo imposible que las burbujas sean arrastradas por el flujo más allá del cadenamiento 0+450. Las burbujas forman una bolsa de aire que se extiende a

lo largo de la conducción. Por lo tanto, la presencia de aire en la conducción hace que la sección efectiva se vea reducida considerablemente. En la figura 4.11 se muestra el esquema el problema antes planteado.

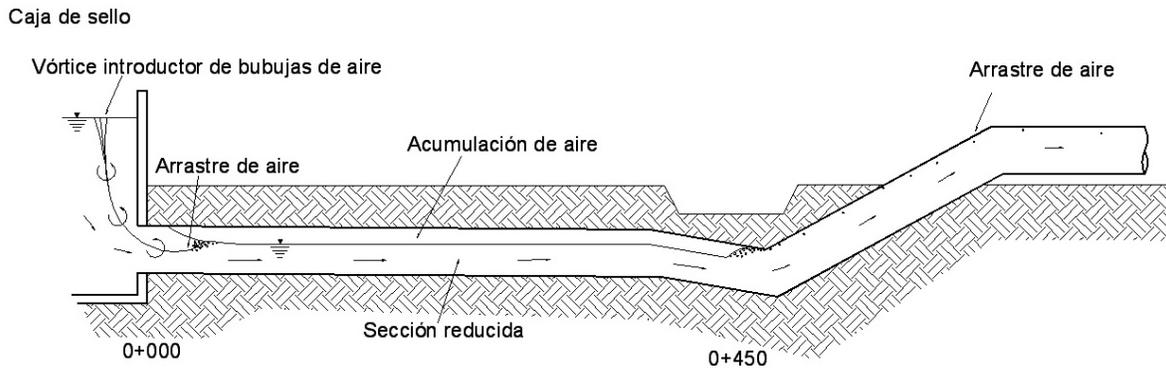


Figura 4.11 Esquema del aire atrapado en la conducción Rodal, et al. (2007).

4.3.3. Acciones tomadas en campo.

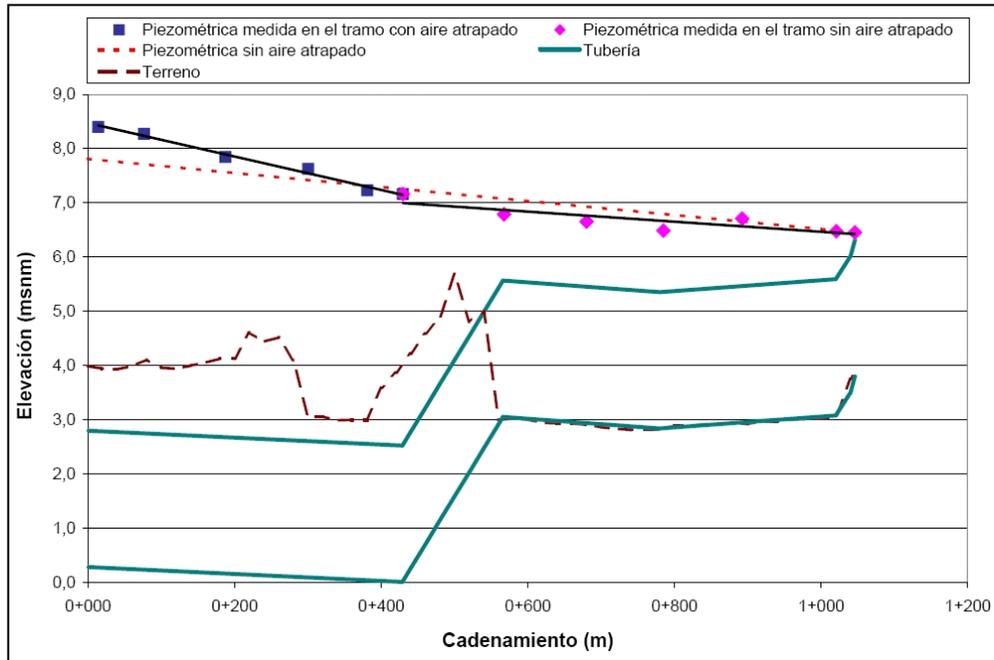
Para la solución del problema se realizaron estudios de campo durante dos días. El 1 y 2 de noviembre de 2005 se llevaron a cabo mediciones del gradiente de presión. Para esta tarea se utilizaron manómetros de Bourdon. También se preparó la colocación de válvulas de seccionamiento en las tapas de entrada de hombre. Se dispuso de 11 puntos de medición para cada línea. Las mediciones se realizaron colocando el manómetro de manera secuencial en cada punto.

Las perforaciones realizadas para la instalación de válvulas se hicieron del cadenamiento 0+000 al 0+450. Es importante resaltar que el aire comenzó a escapar una vez hechas las perforaciones.

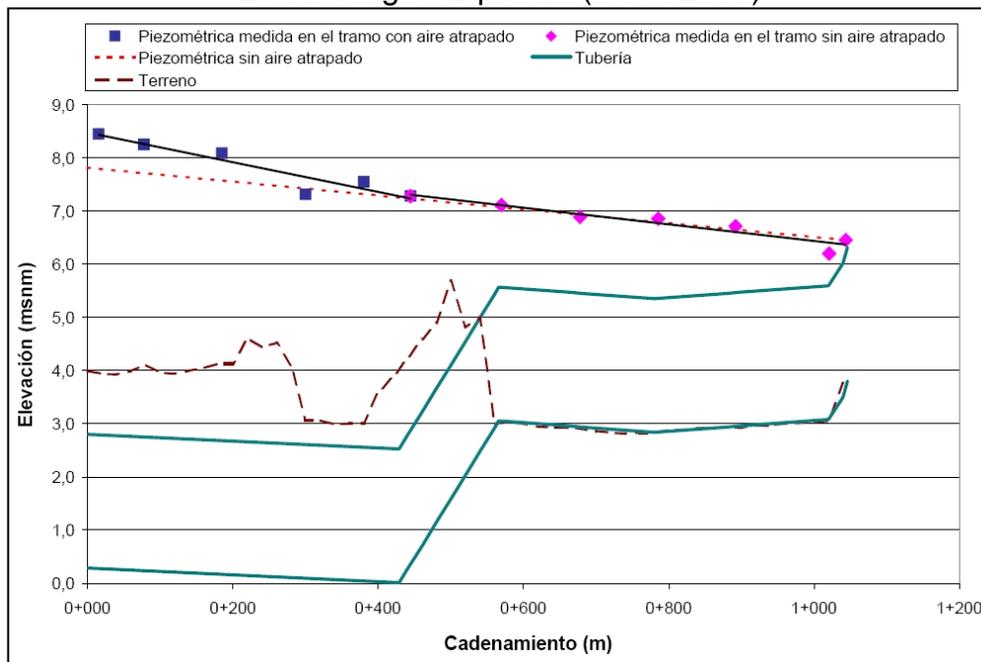
El 1 de noviembre de 2005 se llevo a cabo la primera medición en donde se registró:

- El nivel en la caja de sello.
- El nivel en el portal de entrada del túnel.
- Las lecturas de presión en los 11 puntos de cada línea.

El 2 de noviembre de 2005 se repitieron las mediciones de presión en los mismos puntos y se realizaron aforos en las descargas de las bombas, con el objetivo de estimar el caudal del tramo a gravedad. De las mediciones hechas durante los dos días se obtuvo la información graficada en las figuras 4.12 y 4.13.

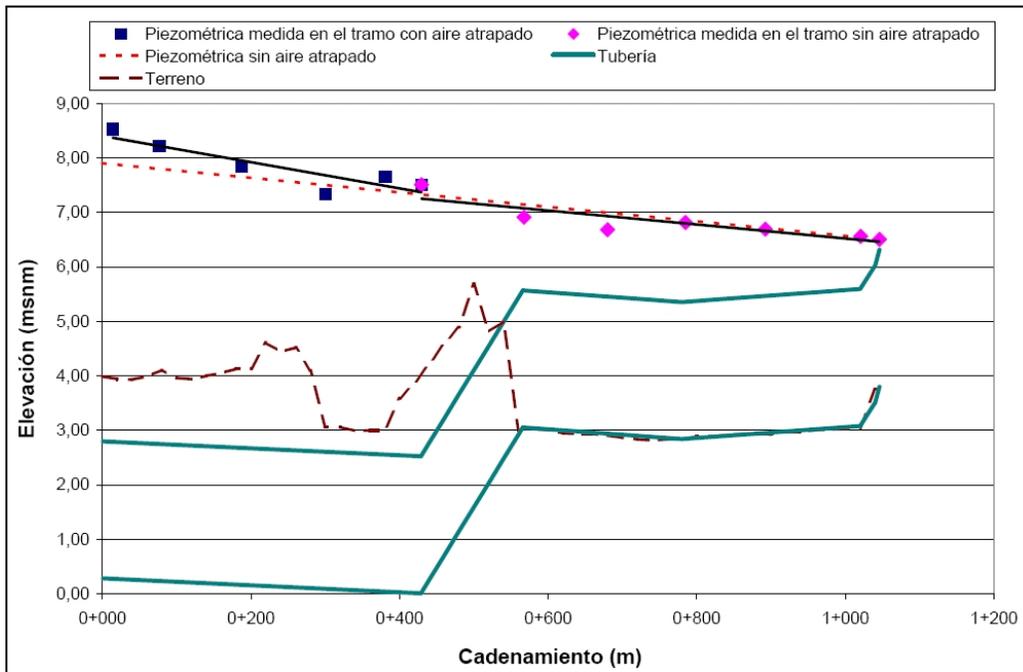


Línea margen izquierda (01/11/2005)

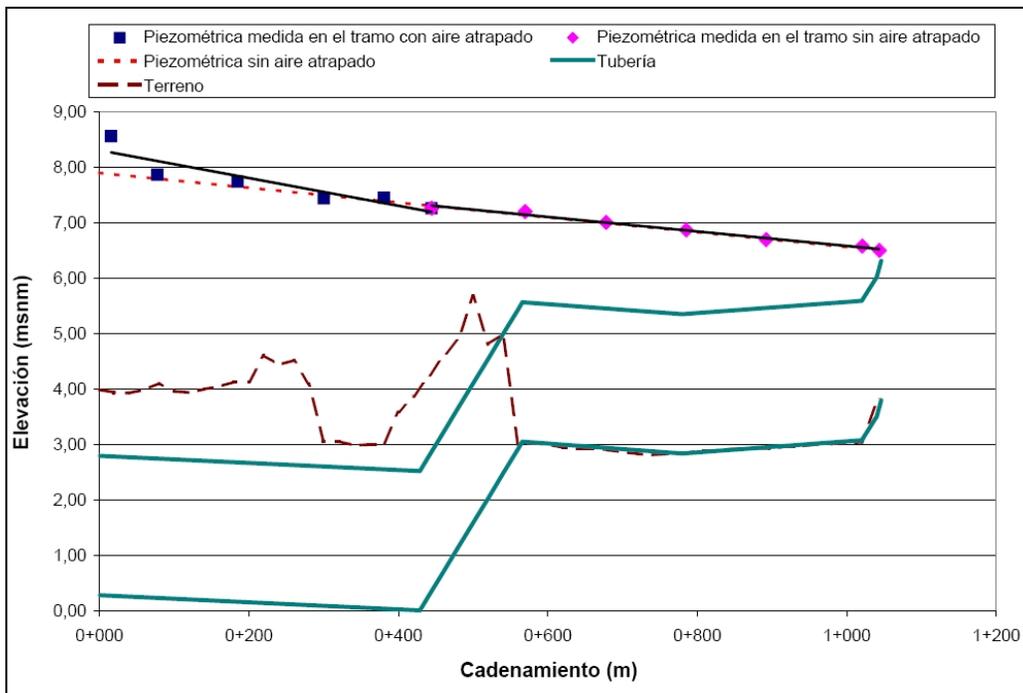


Línea margen derecha (01/11/2005)

Figura 4.12 Mediciones de la piezometría el 1 de noviembre



Línea margen izquierda (02/11/2005)



Línea margen derecha (02/11/2005)

Figura 4.13 Mediciones de la piezométrica el 2 de noviembre

Analizando las líneas piezométricas de las figuras 4.12 y 4.13 se considera que el gasto de agua y aire se divide en partes iguales para cada tubería. El caudal promedio de las 11:20 horas a 14.15 horas en el sitio de operación de las unidades 1 y 2 fue de 12.807 m³/s.

El criterio usado para determinar que cadenamiento ocupaba la bolsa de aire se basó en las líneas piezométricas de las figuras 4.12 y 4.13.

De las figuras 4.11 y 4.12 se dedujo lo siguiente:

- Entre los cadenamientos 0+000 y 0+400 la pendiente de las líneas piezométricas presenta un incremento con respecto al tramo 0+400 y 1+060. Este incremento es resultado de la presencia de aire en forma de bolsa localizado en ese tramo de la tubería. El motivo por el que la pendiente se ve magnificada es porque la energía que se pierde por fricción se incrementa como resultado de reducción de la sección transversal efectiva de paso de agua. La reducción es, evidentemente, producida por el aire atrapado.
- A partir del cadenamiento 0+450 las líneas piezométricas tienen una pendiente más suave. Debido a esto se planteo que en el segundo tramo (0+450 a 1+060) no existen puntos en donde quede atrapado el aire.
- El gasto de agua de la margen izquierda es ligeramente menor al de la margen derecha.

4.3.4. Metodología y Cálculos

4.3.4.1. Coeficiente de fricción en tuberías

Las mediciones que serán utilizadas para el cálculo del coeficiente de fricción serán las del segundo tramo (0+450 a 1+060). Esto se debe a que en el primer tramo fue imposible expulsar por completo todo el aire atrapado, por lo que la

estimación a la que se puede llegar con información del primer tramo puede estar alejada de la realidad.

Con Darcy – Weisbach

$$Q = \sqrt{\frac{g\pi^2 D^5 S_f}{8f}} \quad (4.12)$$

Donde:

g - Aceleración de la gravedad (m/s^2).

π - Constante pi.

D - Diámetro interior de la tubería (m).

S_f - Pendiente de fricción.

f - Coeficiente de fricción.

Q - Gasto (m^3/s).

Con las mediciones del segundo tramo (0+450 a 1+060) se obtuvieron las pendientes de fricción de las dos tuberías:

$$S_{2izq} = 0.00128$$

$$S_{2der} = 0.00131$$

El gasto total promedio durante la operación simultánea de las unidades 1 y 2 registró:

$$Q_{Total} = 12.807 \text{ m}^3/s$$

Despejando el coeficiente de fricción f y estimando que el gasto Q_{Total} se divide en partes iguales en ambas tuberías:

$$f = \frac{g\pi^2 D^5 S_f}{8 \left(\frac{Q_{Total}}{2} \right)^2} \quad (4.13)$$

Como las pendientes de ambas líneas de conducción son muy parecidas, el coeficiente de fricción también lo es. Por lo que $f = 0.035$.

Para obtener los valores de rugosidad absoluta ε se utilizó la ecuación de Swame y Jain.

$$f = \frac{0.25}{\left(-\text{Log}_{10}\left(\left(\frac{\varepsilon}{3.7D}\right) + \left(\frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}}\right)\right)\right)^2} \quad (4.14)$$

Donde:

ε - Rugosidad absoluta en la pared del tubo (mm).

D- Diámetro en (mm).

Re- Número de Reynolds.

f- Coeficiente de fricción.

En la tabla 4.2 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 4.2 Resultados de coeficiente de fricción

Tubería (margen)	Caudal (m ³ /s)	S_f	f	ε (mm)
Izquierda	12.807	0.001279	0.0351	19.5
Derecha	12.807	0.001311	0.0358	20.8

El coeficiente de fricción es del orden de 0.035 para ambas líneas de conducción. Este valor es alto a comparación de coeficientes de otros sistemas con gastos y diámetros parecidos. Esto puede indicar dos cosas:

- La reducción de la sección efectiva del segundo tramo (0+450 a 1+060) es causada por depósitos de sedimentos.

- La reducción de la sección efectiva del segundo tramo (0+450 a 1+060) es causada por aire atrapado. De ser esto cierto es evidente que el aire estaría en menor cantidad que en el primer tramo.

Se presume que aún siendo estos coeficientes altos, al mejorar la conducción del primer tramo se darán las condiciones para que exista la capacidad de conducción suficiente para incrementar el caudal al valor deseado.

Se programa una actividad de mantenimiento para eliminar la posibilidad de que se trate de depósitos de sedimentos.

Es interesante resaltar que cuando hay aire atrapado, una tubería de 2.31 m de diámetro, con una rugosidad absoluta de 20 mm y por consiguiente un coeficiente de fricción $f = 0.035$, podría corresponder a la pérdida de carga observada en la longitud total, esto equivaldría a reducir el área de sección transversal en un 15.5% para provocar una línea piezométrica igual a la observada.

4.3.4.2. Capacidad de conducción esperada sin aire atrapado

Se calculó la capacidad de conducción y los niveles esperados en el sistema para el gasto actual y el incrementado una vez expulsado el aire atrapado. Se consideraron las ecuaciones y datos antes utilizados.

En la tabla 4.3 se resume la información calculada. La figura 4.14 muestra las líneas piezométricas correspondientes a la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Análisis hidráulico actual sin aire y niveles esperados.

Cálculo de los niveles esperados sin aire atrapado.				
Variables	Caudal actual	Caudal máximo (BL de 1 m)	Caudal máximo (sin BL)	Unidades
Caudal por línea	6.4035	8.713	10.441	m ³ /s
Rugosidad	20	20	20	mm
Re	2441465	4010876	4806191	-
<i>f</i>	0.035	0.035	0.035	-
Diámetro int.	2.51	2.51	2.51	m
Área	4.927	4.927	4.927	m ²
Velocidad	1.30	1.76	2.10	m/s
Gradientes	0.0008088	0.002194	0.003150	Hf/m
Hf	1.26	2.30	3.30	m
Nivel en caja de sello	7.76	8.80	9.00	msnm
Bordo Libre (calculado)	2.04	1.00	0.00	m
Nivel en la entrada del túnel	6.50			msnm
Bordo Libre (BL)	1.40			m

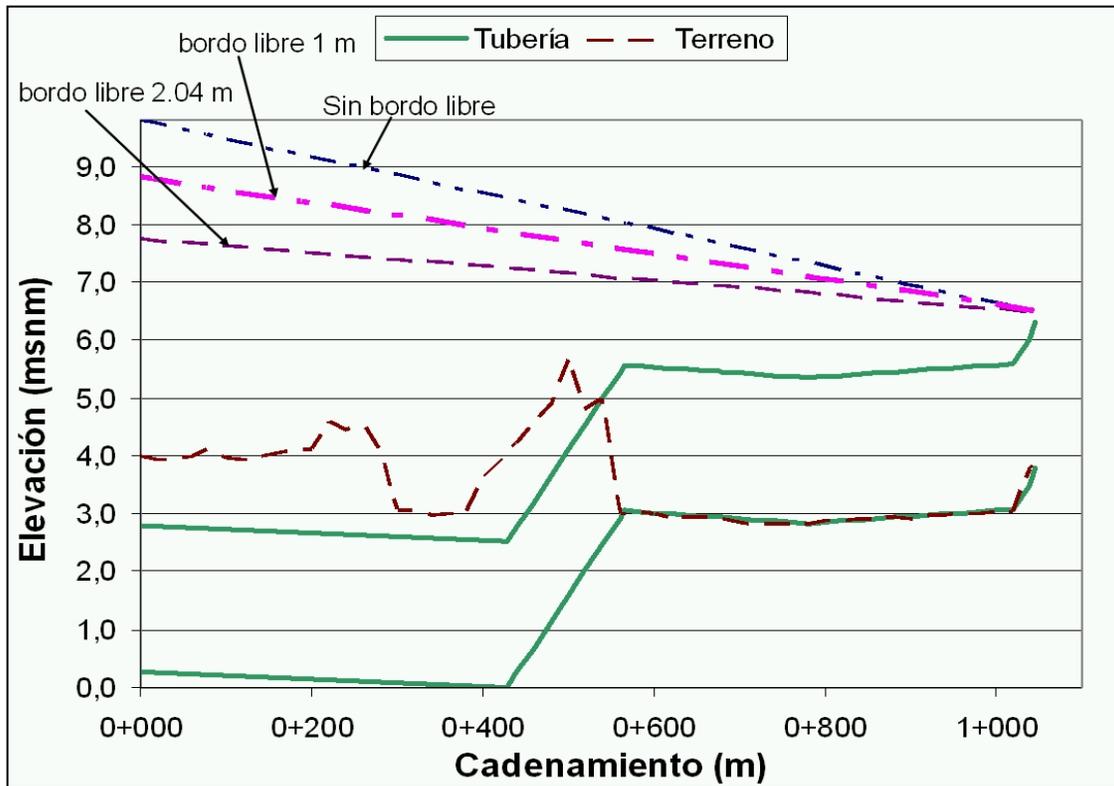


Figura 4.14 Líneas piezométricas calculadas

Se recomendó la colocación de venteos en la línea a gravedad, la correcta selección y el adecuado dimensionamiento de estos dispositivos son parte fundamental en el diseño de acueductos a gravedad.

5. Conclusiones

La presencia de aire atrapado en acueductos suele traducirse en problemas de conducción del agua. Cuando un proyecto hidráulico se encuentra en la etapa inicial es poco común que se profundice en estudios sobre aire atrapado, en parte porque sus efectos son desconocidos o poco valorados. La correcta ubicación de las válvulas a lo largo del perfil hidráulico es poco abordada en la literatura y por ende mal diseñada.

Es necesario garantizar el buen funcionamiento de válvulas expulsoras de aire, si no se desempeñan adecuadamente, pueden presentarse rupturas en las tuberías. Aunque la elección de una válvula idónea parezca difícil, se simplifica recurriendo a la instalación de válvulas de admisión y expulsión de aire aunque cada caso debe ser analizado particularmente.

La optimización de la conducción del flujo de miles de millones de litros de agua cada día en el mundo con la adecuada instalación de válvulas de expulsión de aire pueden convertirse en un poderoso instrumento de ahorro de energía y dinero.

Es, también, prioridad garantizar una buena conducción de agua potable, con la presencia de aire la sección se ve reducida y con ello el gasto que transporta. Con un buen diseño puede existir un ahorro de cerca de 20% de energía en lo referente a conducción por bombeo, en términos de gasto de energía para un país se traduce en un ahorro importante de dinero.

En el mundo de hoy es muy importante proteger al medio ambiente, la conservación de energía es una misión de carácter global. El ahorro de agua es un ámbito sensible y si se puede aportar un bien a la naturaleza con el ahorro de energía, habrá que hacer lo necesario para garantizarlo.

En los casos de estudio se uso una metodología, la cual puede ser utilizada por los ingenieros, para evitar complicaciones relacionadas con aire atrapado desde el diseño o bien para dar solución a problemas de este tipo en

acueductos ya existentes. Asimismo, un buen análisis sirve para determinar los puntos donde pueden ser instaladas válvulas de admisión y expulsión de aire.

Con este trabajo se pudo demostrar que las pendientes descendentes pronunciadas deben tener un estudio cuidadoso y especial. Evitar que éstas sean muy pronunciadas, es prioridad en el diseño de nuevas líneas de conducción. En el escenario en que sea imposible evadir pendientes descendentes pronunciadas se deberá considerar la implementación de materiales resistentes y la correcta colocación y dimensionamiento de válvulas expulsoras de aire en los puntos altos de los acueductos.

De las investigaciones hechas con experimentos físicos y de la observación se puede confirmar que el aire atrapado puede llenar rápidamente una tubería y debido a esto, inducirlo a grandes presiones. Cuando se presentan los picos máximos de presión son, sin duda, lo suficientemente grandes para provocar daños estructurales importantes como para volar las tapas de los pozos y provocar rupturas en el alcantarillado. Asimismo, puede causar derrames de agua en estructura hidráulicas, como ocurrió en la torre de oscilación de la Línea Alterna del sistema Cutzamala.

En el análisis de la Línea Alterna se revela que el problema con aire atrapado pudo haber pasado inadvertido si la Torre de Oscilación 4 no hubiera derramado. Es así, que se recomienda realizar un análisis detallado de los sistemas en los que con anterioridad se han presentado problemas relacionados al aire atrapado, especialmente en aquellos donde se tiene un importante número de cambios de pendiente, para identificar posibles puntos de acumulación de aire. Se recomienda a los ingenieros relacionados con el diseño de acueductos incorporar el análisis de aire de atrapado a sus diseños, así, será posible identificar los posibles escenarios que pueden llevar a problemas severos como los descritos en este trabajo.

Se presenta en este texto una propuesta de metodología para identificar los puntos altos del acueducto donde el aire podría acumularse. La metodología puede ser utilizada para analizar acueductos ya construidos que se encuentren en funcionamiento, también, en aquellos sistemas de conducción que se encuentran en la etapa de diseño. Este método cuenta con un respaldo teórico y experimental.

Referencias

- Babb, A.F., Johnson, W.K. (1968).** Performance characteristics of siphons outlets, *Journal of the Hydraulics Division. ASCE, November, pp. 1421-1437.*
- Balutto, A. (1998).** The application of controlled air transfer technology to new and existing pipeline systems, <http://www.ventomat.com>
- Bendiksen, K.H. (1984).** An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. *Int. J. Multiphase Flow, Vol. 10, No. 4, pp. 467-483.*
- CALUCEM (2010).** Pipes and Sewage <http://www.calucem.com/>
- Cohen de Lara, G. (1955).** Degazage naturel dans les puits inclines reliant les adductions secondaires aux galeries en charge. *In Proceedings of the 6th International Association for Hydraulic Research Congress, La Haye, Vol. 3(C19), pp. 1–20.*
- Colgate, D. (1966).** Hydraulic model studies of the flow characteristics and air entrainment in the check towers of the main aqueduct, *Canadian river project Texas. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Report N° Hyd-555, USA.*
- Díaz, I., Gamboa, S., Remolina, E., Rodríguez, J. (2010).** Estudio de la corrosión de un tubería que transporta gases con contenido de CO₂ y H₂S situada entre Ballena y Maicao. *Agosto 18 de 2010.*
- Edmunds, R. C. (1979).** Air binding in pipes, *Journal AWWA, Water Technology/Distribution, pp. 273-277.*
- Escarameia, M., Dabrowski, C., Gahan, C. and Lauchlan, C. (2005).** *Experimental and numerical studies on movement of air in water pipelines.* HR Wallingford Report SR661.
- Falvey, H. (1980).** Air-Water Flow in Hydraulic Structures. *United States Department of the Interior Water and Power Resources Service.*
- Gandenberger, W., (1957).** Germany Design of overland water supply pipelines for economy and operational. *Report of the Task Force on Flow in Large Conduits of the Committee on Hydraulic Structures, ASCE.*
- Gandenberger, W., (1966).** Factors influencing flow in large conduits. *Report of the Task Force on Flow in Large Conduits of the Committee on Hydraulic Structures, ASCE, Vol. 92, No. HY4.*

- González, C.A., Pozos, O. (2000).** Análisis Experimental del Ingreso de Aire en un Acueducto. *Tesis*, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Kalinske, A.A, Robertson, J.M., (1943).** Closed conduit flow, *ASCE Vol. 108*, pp. 1453-1516.
- Kalinske, A.A, Bliss, P.H., (1943).** Removal of air from pipelines by flowing water, *ASCE Vol. 13, No. 10*, pp. 480-482.
- Kent, J.C., (1952).** The entrainment of air by water flowing in circular conduits with downgrade slopes. *Doctoral thesis, University of California, Berkley, California, USA.*
- Martin, C.S. (1976).** Entrapped air in pipelines, *Proceedings of the Second International Conference on Pressure Surges, British Hydromechanics Research Association, The City University, London*
- Mateos, M. (1985).** Ventosas. Análisis práctico de su comportamiento y presentación de 17 tipos, *Revista de Obras Públicas*, 659 a 665 pp.
- Mendiluce, E. (1984).** Peligrosidad del aire en el interior de las tuberías. *Revista de obras públicas*. 177 a 184 pp.
- Mosvell, G., (1976).** Luft I utslippsledning (Air at outfalls), Prosjektkomiteen for rensing av avkrpsvann (Project committee on sewage). *PRA report 8, NIVA (Norwegian Water Institute), Oslo, 1976 (in norwegian).*
- Pfander, A. (2004).** Career and personal counseling: Comparing process and outcome. *Revista Ingeniería Sanitaria y Ambiental, No. 74.*
- Pozos, O. (2002).** Desarrollo de un programa de cómputo para detectar las posibles zonas de acumulación de aire en acueductos, y ejemplos de su aplicación. *Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, DEPFI, Universidad Nacional Autónoma de México, México.*
- Pozos, O. (2007).** Investigation on the effects of entrained air in pipelines. *Tesis*, University of Stuttgart, Alemania.
- Pozos Estrada, O., Ramos Tapia, S., Rodal Canales, A. (2007).** Reducción en la capacidad de conducción debido a aire atrapado en la línea de circulación de la termoeléctrica Juan de Dios Bátiz Paredes. *VII SEREA – Seminario Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua. Morelia, Mich, (México) de 18 a 21 junio de 2007.*
- Pozos Estrada, O., Sánchez Huerta, A. Rodal Canales, A., Fairuzov, Y. (2008).** Método para la localizar los posibles puntos de acumulación de grandes bolsas de aire en conductos a presión. *VIII SEREA – Seminario Iberoamericano.*
- Pozos Estrada, O., Rodal Canales, A., Sánchez Huerta, A., Fairuzov, Y. (2008).**

Aire atrapado en acueductos a bombeo. *XX Congreso Nacional de Hidráulica, Toluca, Estado de México, México, Octubre 2008.*

Pozos Estrada, O., , Sánchez Huerta, A., Rodal Canales, A. Fairuzov, Y. (2008).

Aire atrapado en acueductos a gravedad. *XX Congreso Nacional de Hidráulica, Toluca, Estado de México, México, Octubre 2008.*

Pozos Estrada, O., Sánchez Huerta, A. Rodal Canales, A., Fairuzov, Y., (2009). Hidráulica de las bolsas de gases corrosivos en sistemas a bombeo que transportan aguas residuales. *IX SEREA – Seminario Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua. Valencia (España), 2 al 5 de junio de 2009.*

Pozos, O, Gonzalez, C.A, Giesecke, J, Marx, W, Rodal, E.A. (2010). Air Entrapped in Gravity Pipeline Systems. *Journal of Hydraulic Research, IAHR. 48(3), pp. 338-347.*

Richards, R.T., (1962) Air binding in water pipelines, *AWWA, June, pp. 719-730.*

Rodal E.A., Carmona, R., Gonzalez, C.A., Pozos, O., (2000). Aumento de la pérdida de carga en conducciones debido a aire atrapado. *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Cordoba, Argentina, pp. 583-592. (in spanish)*

Runge, D.E. and Wallis, G.B., (1965). *AEC Rept. NYO-3114-8 (EURAEC-1416).*

Sailer, R. E. (1955). San Diego aqueduct, *Journal of civil engineering, ASCE, Vol. 25, N° 5, pp. 38-40.*

Seoánez Calvo, M. (2005). Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo: Soluciones reales, viables, razonadas y contrastadas que ponen en evidencia la desastrosa gestión de las aguas residuales en España. *Editorial Ediciones Mundi-Prensa, España.*

Thomas, S. (2003). Air Management in Water Distribution Systems: A New Understanding of Air Transfer. *Tesis. Burlington, Ontario, Canadá.*

Veronese, A. (1937). Sul motto delle bolle d'aria nelle condotte d'acqua, *Estrato dal fascicolo X, Vol. XIV, October.*

Viana, F., Pardo, R, Yanez, R, Trallero, J.L., Joseph, D.D. (2003). Universal Correlation for the rise velocity of long gas bubbles in round pipes. *Journal of Fluid Mechanics, vol. 494, pp. 379-398.*

Walski, T.M., Barnhart T., Driscoll J. and Yencha R. (1994). *Hydraulics of*

Corrosive Gas Pockets in Force Mains. *Water Environment Research*. 66(6), 772-778.

Wisner, P.E., Mohsen, F.N., Kouwen, N., (1975). Removal of air from water lines by hydraulic means. *ASCE, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 101, HY2, pp. 243-25.*

Zhou, F., Hicks, F., Steffler, M. (2002). Transient flow in a rapidly filling horizontal pipe containing trapped air. *Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 128, No6.*

ZAPEDA, A. CENTRAL TERMOELECTRICA JUAN DE DIOS BATIZ PAREDES. *Panoramio* <http://www.panoramio.com/photo/25959264>

Zukoski, E.E. (1966). Influence of viscosity, surface tension and inclination on motion of long bubbles in closed tubes. *J. of Fluid Mechanics, 25(4), pp. 821-837.*