



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“Problemas en sistemas de bombeo que transportan aguas residuales, debido a la inyección de aire para reducir la producción de sulfuro de hidrógeno”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
I N G E N I E R A C I V I L
P R E S E N T A:
I R A I S B A S U R T O H E R N Á N D E Z

DIRECTOR DE TESIS

DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA



CUIDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F., MAYO, 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Para una mujer maravillosa

MÍ MAMÁ

Estela Hernández Camargo

A ti es a quien agradezco la inmensa alegría de vivir.

*Tú eres quien ha sembrado en mí los valores más profundos y puros,
mismos que me acompañarán siempre a lo largo de mi vida.*

*El amor incondicional y la ternura que me das, hacen que seas la
mamá más linda y especial del mundo.*

*Eres la mujer más bella que jamás conocí. Todo lo que soy, te lo
debo a ti. Atribuyo todos mis éxitos en esta vida a la enseñanza
moral, intelectual y física que recibí de ti.*

Me gusta que seas mi mamá pero me encanta que seas mi amiga.

Agradecimientos

Con este trabajo culmino una etapa muy importante en mi vida, fue una etapa llena de alegría, compañerismo, amistad, aprendizaje y experiencia. Quiero manifestar con especial cariño mi agradecimiento a todas aquellas personas que me han apoyado y que sin su presencia, esta etapa no hubiera sido la misma.

En primer lugar quiero agradecer a las personas más importantes en mi vida. Dos personas que durante toda mi vida me han dado amor y me han inculcado valores que me permitieron ser quien soy. Estas personitas son mis padres, Saúl Basurto y Estela Hernández. Estoy sumamente agradecida porque me han heredado el tesoro más valioso que puede dársele a una hija, una profesión. Nunca podré pagar todo el esfuerzo que han hecho para que hoy sea una ingeniera. A ellos, los seres más queridos, sinceramente GRACIAS.

Agradezco a mis hermanos, Saúl y Susana, por todas las sonrisas que hemos compartido. Siempre hemos estado y seguiremos estando juntos para apoyarnos y alentarnos a ser mejores personas y profesionistas, para demostrarnos a nosotros mismos que podemos lograr lo que nos propongamos y que podemos llegar tan lejos como queramos. Los amo hermanitos.

Agradezco a mi abuelita Susana Guerrero por todo el amor que me dio durante mi infancia, fue una mujer ejemplar y sé que si estuviera hoy conmigo, estaría muy orgullosa de mí. También agradezco a mi abuelito Augurio Basurto por su cariño, comprensión y apoyo desde siempre.

Por otro lado, agradezco a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme proporcionado tantos conocimientos y experiencias que me ayudarán a cumplir con los compromisos que adquirí al elegir como profesión una ingeniería.

Agradezco al Instituto de Ingeniería de la UNAM por el apoyo en la realización de esta tesis y por todos los conocimientos adquiridos durante mi estancia en el mismo. También agradezco a todos los investigadores que me apoyaron y que siempre tuvieron la disposición de compartir sus experiencias.

Quiero agradecerle a mi director de tesis, el Dr. Óscar Pozos Estrada, todo su apoyo, sus conocimientos y experiencias invaluable que me brindo para llevar a cabo esta tesis. Gracias por apoyar a jóvenes como yo, que estamos dispuestos a aprender de personas tan preparadas como él.

Agradezco a los miembros del jurado: al Dr. Óscar A. Fuentes Mariles, Dr. Óscar Pozos Estrada, M.I. Amalia Adriana Cafaggi Félix, M.I. Alba Beatriz Vázquez González y al Ing. Ernesto René Mendoza Sánchez, por las valiosas contribuciones que hicieron al trabajo final y por el tiempo que dedicaron para revisarlo, a pesar de tantas actividades que los ocupan.

Agradezco a aquellas grandes personas que hacen posible el conocimiento en las aulas de la facultad, los excelentes profesores que se esfuerzan cada día más para formar mejores ingenieros.

A mis compañeros de la generación, por todos los buenos y malos momentos que viví con ellos. Todos aquellos momentos que compartimos durante estos casi cinco años, en las aulas, en los viajes de estudio y en la convivencia diaria. Esto hizo que pudiéramos establecer grandes lazos de amistad que perdurarán por siempre.

Agradezco a Luis Palomino por todas esas pláticas enriquecedoras, por todos los momentos en los que estuvo ahí para ayudarme, apoyarme, regañarme, aconsejarme pero sobre todo para hacerme sonreír.

Agradezco a Isis Morales, Antonio Flores, Alberto Álvarez, Enrique Meneses, Rodrigo López, Israel Rivera, Iván García, Eduardo Bueno, por todas sus enseñanzas, sus consejos y su apoyo a lo largo de nuestra valiosa amistad.

Agradezco a Hansel Montes, Antonio Vásquez, Víctor Salinas, Ramón Moncada e Iván Vázquez por permitirme conocerlos y compartir momentos especiales con ellos.

Gracias a Jessica Montoya, Erick Nieto, Luis Espinoza, Gustavo Bravo y Maricruz Valdez por su amistad y apoyo durante los últimos diez años.

Agradezco a Arturo Mezquital por acompañarme en los últimos meses, a lo largo de mi proceso de titulación y por el sentimiento que compartimos.

De todo corazón, MUCHAS GRACIAS.

Índice

Introducción.....	6
I. Sistemas de bombeo que transportan aguas residuales.....	7
1.1. Conceptos generales.....	7
1.1.1. Caudal o capacidad.....	7
1.1.2. Carga.....	7
1.1.2.1. Carga geométrica de aspiración, H_s	7
1.1.2.2. Carga geométrica de elevación, H_d	8
1.1.2.3. Carga geométrica total, H_{geom}	8
1.1.2.4. Carga de velocidad.....	8
1.1.2.5. Pérdidas de carga.....	8
1.1.2.6. Carga manométrica total, H_t	8
1.1.3. Eficiencia.....	9
1.1.4. Curvas características.....	10
1.2. Clasificación de las bombas.....	11
1.2.1. Bombas para aguas residuales.....	12
1.2.1.1. Bombas de flujo radial.....	12
1.2.1.2. Bombas de flujo mixto.....	13
1.2.1.3. Bombas de flujo axial.....	14
1.2.2. Bombas de tornillo.....	14
1.2.3. Bombas de rodete liso.....	15
1.3. Características del funcionamiento de las bombas.....	16
1.3.1. Cavitación.....	16
1.3.2. Constante de cavitación.....	17
1.3.3. Cavitación en el punto de funcionamiento.....	18
1.4. Estaciones de bombeo.....	18
1.4.1. Justificación de las estaciones de bombeo.....	18

1.4.2.	Clasificación de las estaciones de bombeo	19
1.5.	Proyecto de tuberías de impulsión	20
1.5.1.	Determinación del diámetro de la tubería de impulsión ...	21
1.5.2.	Pérdida de carga en las tuberías de impulsión	21
1.5.3.	Velocidades en la tubería de impulsión.....	22
1.5.4.	Consideraciones de proyecto	22
1.5.4.1.	Recubrimiento	22
1.5.4.2.	Anclaje.....	22
1.5.4.3.	Reducción de la turbulencia en la descarga.....	23
1.5.4.4.	Materiales de las tuberías.....	23
II.	Descripción del proceso de producción de sulfuro de hidrógeno ...	24
2.1.	Proceso de producción de sulfuros	25
2.1.1.	Precipitación de sulfuros metálicos	25
2.1.2.	Oxidación de sulfuros	25
2.1.3.	Emisión de sulfuro de hidrógeno H ₂ S a la atmósfera de la alcantarilla	26
2.1.4.	Acumulación de sulfuros en las alcantarillas.....	27
2.2.	Corrosión debida al sulfuro de hidrógeno	27
2.3.	Control de la corrosión causada por sulfuro de hidrógeno ...	29
2.3.1.	Métodos químicos.....	30
2.3.1.1.	Uso del Cloro (Cl ₂)	30
2.3.1.2.	Peróxido de hidrógeno.....	32
2.3.1.3.	Nitratos	32
2.3.1.4.	Sales metálicas	33
2.3.2.	Métodos físicos	33
2.3.3.	Alcalinidad.....	33
2.3.4.	Consideraciones de diseño	34

III. Beneficios y desventajas de inyectar aire a sistemas que transportan agua residual	39
3.1. Inyección de aire a los sistemas a bombeo que transportan agua residual	39
3.2. Beneficios de inyectar aire a los conductos a presión que transportan agua residual.....	41
3.3. Causas por las que se acumulan bolsas de aire/gas en sistemas a bombeo	42
3.4. Efectos producidos por las bolsas de aire/gas.....	43
3.4.1. Pérdida de carga por bolsas de aire.....	44
3.4.2. Efecto Blowback	46
3.4.3. Golpe de ariete provocado por la evacuación de aire.....	47
IV. Análisis del comportamiento del aire/gas en sistemas que transportan agua residual	48
4.1. Medios para la remoción de aire/gas	48
4.1.1. Medios Hidráulicos.....	48
4.1.2. Medios mecánicos	48
4.2. Metodología para ubicar los posibles puntos de acumulación aire/gas en conductos cerrados	51
4.3. Cálculo del volumen de aire/gas acumulado en conductos cerrados.....	57
4.3.1. Flujo gradualmente variado	63
4.3.2. Algoritmo de cálculo.....	65
V. Problemas causados por el aire/gas en sistemas de bombeo que transportan aguas residuales	70
5.1. Fenómenos transitorios	70
5.1.1. Ecuaciones para simular flujo transitorio en conductos a presión	73
5.1.2. Dispositivos supresores de transitorios	79

5.1.3. Método de las características	94
5.2. Efecto de las bolsas de aire/gas en fenómenos transitorios .	98
5.3. Modelo numérico para el análisis del aire/gas en fenómenos transitorios	101
VI. Conclusiones	111
Bibliografía	113

Introducción

En los sistemas de aguas residuales se presentan problemas como la corrosión y la falla o fractura de algún elemento del sistema a causa de los fenómenos transitorios, es por ello que surge la necesidad de estudiar los posibles factores que ocasionan dichos problemas. En este trabajo se presentan algunas complicaciones que podrían ocurrir en sistemas de bombeo de agua residual.

En primer lugar se describen conceptos generales que permiten comprender las características y el funcionamiento de las bombas. Por otro lado, se presenta la clasificación de las bombas, la cual nos muestra los diferentes tipos de bombas que existen y cuáles son las más usadas en el manejo de aguas residuales.

Se sabe que en la mayoría de los casos es necesario instalar una estación de bombeo para que las aguas residuales lleguen al lugar de disposición final, estas instalaciones deben seguir un proyecto mediante el cual se definirán las dimensiones de la misma para que la operación y el servicio sean óptimos. En esta tesis se presentan algunas consideraciones de diseño que deben ser tomadas en cuenta por el ingeniero.

Asimismo, al profesional de la ingeniería le preocupa que el manejo del agua sea eficiente, por eso es de vital importancia las dificultades que se pueden presentar a lo largo de la línea de conducción de un sistema de aguas residuales. Como principal problema se encuentra la producción de sulfuro de hidrógeno en las tuberías, el cual después de un proceso bioquímico puede generar corrosión al propiciar el desgaste de la sección transversal del tubo, haciendo que la vida útil del mismo se reduzca considerablemente. Debido a la magnitud de la corrosión se han planteado diversos métodos de control; los hay físicos y químicos. Pero también debemos tomar en cuenta que podemos controlar dicho problema desde la etapa de diseño del sistema, tomando las consideraciones pertinentes con base en las condiciones esperadas.

Uno de los métodos físicos que existen para controlar el problema de la corrosión es la inyección de aire en las tuberías, método que permite aumentar el contenido de oxígeno en la atmósfera del tubo y de esta manera evitar que haya condiciones idóneas para la formación de este agente corrosivo. La inyección de aire, como todos los métodos de control, tiene ventajas y desventajas. Este aspecto se trata en el capítulo III a fin de tener claros, principalmente, los problemas que se puede generar. El principal problema a estudiar es la acumulación de bolsas de aire en los sistemas de bombeo, su comportamiento, los efectos producidos, los métodos para removerlas, ubicarlas y estimar el volumen de aire acumulado, así como los problemas causados por las bolsas de aire en caso de que se presente un transitorio hidráulico.

I. Sistemas de bombeo que transportan aguas residuales

En este capítulo se definirán conceptos importantes sobre los sistemas de bombeo, sus características, funcionamiento y el análisis de los mismos.

El objetivo principal de un sistema de bombeo que maneja aguas residuales es transportar el agua de un punto bajo a uno de mayor altura para su disposición final o su tratamiento.

1.1. Conceptos generales

En este subcapítulo se definirán los conceptos principales relativos al análisis de los sistemas de bombeo que nos ayudan a comprender el funcionamiento de los equipos de bombeo.

1.1.1. Caudal o capacidad

El caudal de una bomba es el volumen de líquido bombeado por unidad de tiempo y se expresa, generalmente, en litros o metros cúbicos por segundo.

1.1.2. Carga

La carga de una bomba es la distancia a la que puede elevar un líquido y se mide en metros de columna del líquido bombeado. La carga necesaria para vencer las pérdidas que se producen en las conducciones de un sistema a un caudal dado es la altura del sistema (Tchobanoglous, 1996).

1.1.2.1. Carga geométrica de aspiración, H_s

Es la diferencia de cotas existentes entre el nivel del líquido en la aspiración y el eje del rodete de la bomba.

Las bombas para aguas residuales se suelen instalar con una pequeña altura geométrica de aspiración positiva para evitar tener que incluir un dispositivo de cebado que podría obturarse por los sólidos presentes en el agua residual.

1.1.2.2. Carga geométrica de elevación, H_d

Es la diferencia de cotas existente entre el nivel del líquido en la descarga y el eje del rodete de la bomba.

1.1.2.3. Carga geométrica total, H_{geom}

Es la diferencia entre las cotas de los niveles del líquido en la descarga y aspiración.

1.1.2.4. Carga de velocidad

Es la energía cinética contenida en el líquido bombeado en cualquier punto del sistema y se expresa de la siguiente manera:

$$h = \frac{v^2}{2g} \quad (1.1)$$

Donde v Velocidad del líquido, m/s

g Aceleración de la gravedad, m/s²

1.1.2.5. Pérdidas de carga

La carga de una bomba o de un sistema de bombeo debe ser suficiente para vencer las pérdidas que se producen en la tubería, ya sean debidas a la fricción del flujo con las paredes de la conducción o por los accesorios y dispositivos con los que cuenta un sistema de este tipo, denominando estas últimas como pérdidas locales o singulares. Las pérdidas de carga locales serán consideradas en el análisis del tramo de aspiración y de impulsión como una fracción de la carga de velocidad. Las pérdidas por fricción en ambos tramos se pueden calcular mediante la fórmula de Darcy-Weisbach o la de Hazen-Williams.

1.1.2.6. Carga manométrica total, H_t

La carga manométrica total es aquella contra la que trabaja la bomba durante su funcionamiento. Se determina considerando la carga geométrica de aspiración y

elevación, las pérdidas por fricción y las pérdidas locales. Para la determinación de la carga manométrica total podemos hacer uso de la siguiente ecuación (Tchobanoglous, 1996):

$$H_t = H_d - H_s + \frac{V_d^2}{2g} - \frac{V_s^2}{2g} \quad (1.2)$$

Donde

- H_t Carga manométrica total, m
 H_d, H_s Carga de elevación y de aspiración, m
 V_d, V_s Velocidad en el conducto de impulsión y aspiración, m/s

La figura 1.1 muestra un diagrama esquemático de la carga de elevación de una bomba.

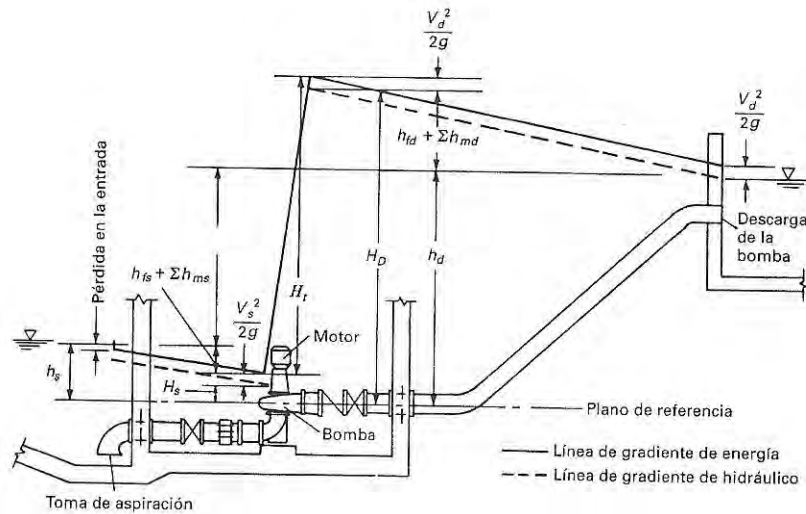


Figura 1.1 Altura de elevación de una bomba (Tchobanoglous, 1996)

1.1.3. Eficiencia

La eficiencia de una bomba se determina en base al caudal que descarga contra una carga dada y con un rendimiento determinado. La eficiencia η de la bomba se puede expresar como el cociente entre la potencia útil y la absorbida por la bomba.

$$\eta = \frac{\gamma Q H_t}{P_i} \quad (1.3)$$

Donde

- η Eficiencia de la bomba, adimensional

- P_i Potencia absorbida, kW, kN*m/s
- γ Peso específico del agua, kN/m³
- Q Caudal, m³/s
- H_t Carga manométrica total, m

La eficiencia de las bombas puede verse afectada por tres tipos de pérdidas que se presentan en el interior de una bomba; las pérdidas volumétricas se deben a la existencia de fugas entre la carcasa y el rotor, las pérdidas mecánicas son originadas por fricciones mecánicas en los empaques, cojinetes, discos internos y esfuerzos cortantes creados por el líquido, y las pérdidas por fricción producidas por el flujo. Estas pérdidas pueden disminuir hasta en un 40% la eficiencia de las bombas.

1.1.4. Curvas características

El fabricante de bombas debe proporcionar las curvas características que corresponden a cada equipo, con el fin de proporcionar al usuario sus características y éste pueda hacer uso correcto y óptimo de la bomba. Estas curvas se generan mediante una serie de ensayos en los cuales se varía el caudal de bombeo para alcanzar una carga hidráulica a una cierta velocidad de giro. Los resultados de dichos ensayos representan gráficamente las siguientes leyes: H-Q curva de carga, η -Q curva de eficiencia y P-Q curva de potencia. Para determinar las características de operación en forma completa, es necesario usar las tres curvas mencionadas. Un ejemplo de curvas características se muestra en la figura 1.2 (Gardea, 1992).

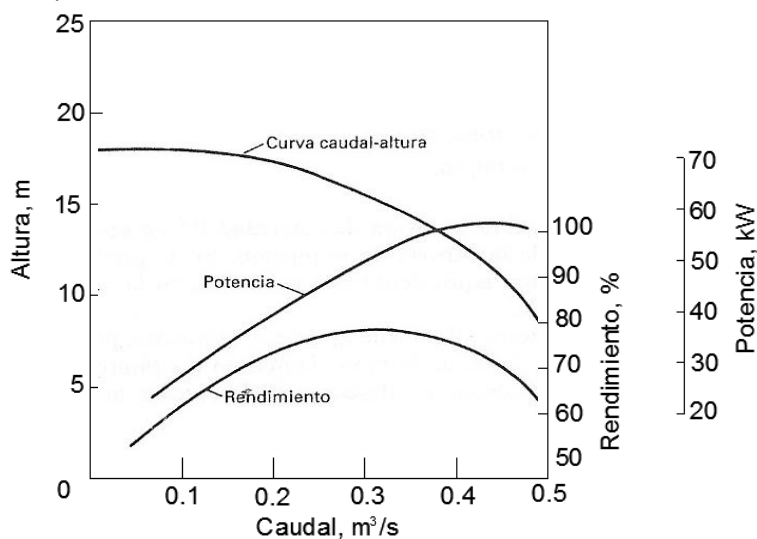


Figura 1.2 Curvas características típicas de una bomba (Tchobanoglous, 1996)

Para determinar la carga requerida por una bomba, o grupo de bombas, para descargar gastos dados a través de un sistema de tuberías determinado, hay que desarrollar la curva de carga del sistema. Esta curva se obtiene graficando los puntos correspondientes a la altura manométrica total para una gama de caudales que varíe desde cero al valor máximo esperado.

Si se dibuja la curva de la bomba en el mismo plano que la del sistema de bombeo, la intersección entre ambas curvas proporciona el punto de funcionamiento de la bomba, tal como se muestra en la figura 1.3. (Tchobanoglous, 1996)

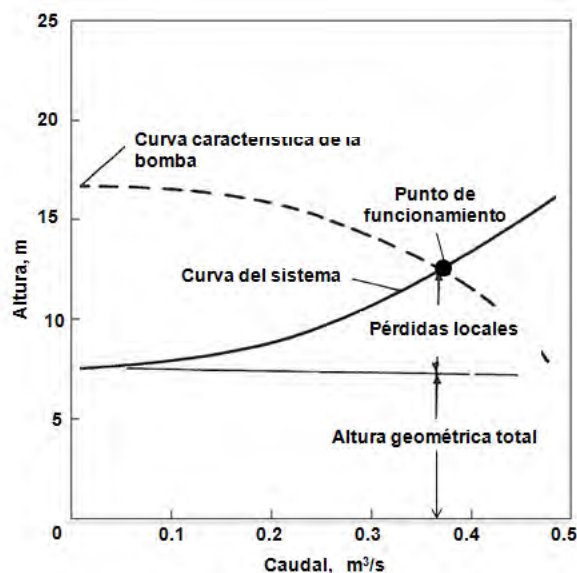


Figura 1.3 Punto de funcionamiento de una bomba en el sistema (Tchobanoglous, 1996)

1.2. Clasificación de las bombas

Las bombas pueden clasificarse en dos grupos, las de energía cinética y las de desplazamiento positivo. Un ejemplo de bombas cinéticas es la bomba centrífuga, este tipo de bomba es el más utilizado en el campo de la ingeniería sanitaria. Los tres tipos de bombas centrífugas son las de flujo radial, flujo axial y flujo mixto.

Las bombas de flujo radial y mixto se pueden utilizar en el bombeo de aguas residuales y las de flujo axial se pueden emplear para el bombeo de agua tratada. En los párrafos siguientes se mencionaran características relevantes de los tipos de bombas.

1.2.1. Bombas para aguas residuales

Las bombas se clasifican en bombas de flujo radial, mixto y axial. En una bomba de flujo radial el líquido entra axialmente en el rodete a través de la boquilla de aspiración y es descargado radialmente hacia la carcasa. En las bombas de flujo mixto, el líquido entra axialmente en el rodete y es descargado en una dirección intermedia entre la radial y la axial. En una bomba de flujo axial, el flujo entra y sale axialmente. En general, las bombas de flujo radial y mixto se emplean para el bombeo de aguas residuales y pluviales. Las bombas de flujo axial se pueden emplear para el bombeo de efluentes tratados o aguas pluviales exentas de agua residual. A menudo, las bombas se clasifican de acuerdo con un valor conocido como velocidad específica, el cual varía según la forma del rodete. (Tchobanoglous, 1996)

1.2.1.1. Bombas de flujo radial

Este tipo de bombas cuenta con un rodete que envía el flujo del líquido en dirección radial hacia la periferia de éste. La carga de velocidad es convertida a carga de presión en la descarga de la bomba. Por lo general, los alabes de estos rodetes están curvados hacia atrás. El rodete radial ha sido el tipo más comúnmente usado. Las bombas de tipo radial, incluyendo a las del rodete tipo Francis, tienen velocidades específicas variables entre 10 y 80.

Los ejes de las bombas pueden ser horizontales o verticales. Sin embargo, una ventaja de las bombas verticales es que ocupan un menor espacio. Las bombas para agua residual deben poder manejar los sólidos que entran en la red de alcantarillado. Las bombas inatascables de tamaño inferior a 100 mm no son adecuadas para su uso con aguas residuales sin tratamiento previo.

En la figura 1.4 podemos observar las partes de una bomba vertical de flujo radial para aguas residuales.

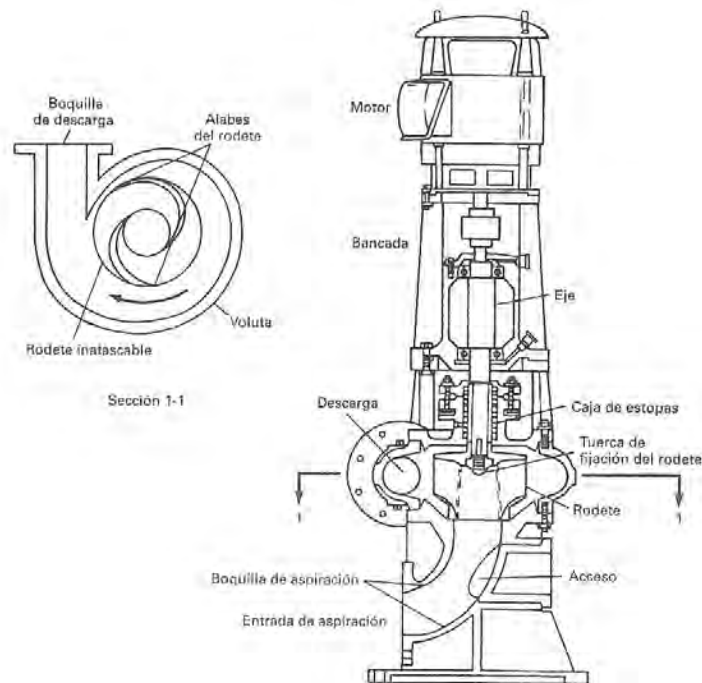


Figura 1.4 Bomba vertical de flujo radial (Tchobanoglous, 1996)

1.2.1.2. Bombas de flujo mixto

En este tipo de bombas el flujo es en parte radial y en parte axial, siendo la forma del rodete acorde con ello. El tamaño del rodete y el diseño de la bomba varían. Los rodetes pueden ser abiertos o cerrados, en la práctica se prefieren los últimos. Las bombas de carcasa de flujo mixto son adecuadas para el bombeo de agua residual sin tratar y agua pluvial, especialmente dentro del intervalo de velocidad específica comprendido entre 80 y 130. La velocidad específica de las bombas de flujo mixto varía entre 80 y 200. Las hay disponibles en tamaños de 200 mm y mayores y para cargas de hasta 15 a 18 m. La figura 1.5 ilustra una bomba de flujo mixto.



Figura 1.5 Bomba de flujo mixto

1.2.1.3. Bombas de flujo axial

Las bombas de flujo axial suelen tener solo dos o cuatro alabes, por lo que tienen grandes conductos sin obstáculos, que permiten trabajar con agua que contengan elementos sólidos sin que se produzca atascos. Los álabes de algunas bombas axiales grandes son ajustables para permitir fijar la inclinación que dé el mejor rendimiento bajo condiciones reales.

Las bombas de flujo axial tienen un rotor dotado de varios álabes dispuestos en hélice situado en una carcasa que incluye unos canales guías fijos antes y después de la hélice. En la figura 1.6 se muestra una bomba vertical de este tipo. Estas bombas tienen velocidades específicas superiores a 200 y se emplean para bombear grandes caudales a poca altura, especialmente en el bombeo del efluente tratado de una planta de tratamiento o de aguas pluviales. No deben utilizarse para bombear agua residual sin tratar y lodos porque puede obturarse (Tchobanoglous, 1996).

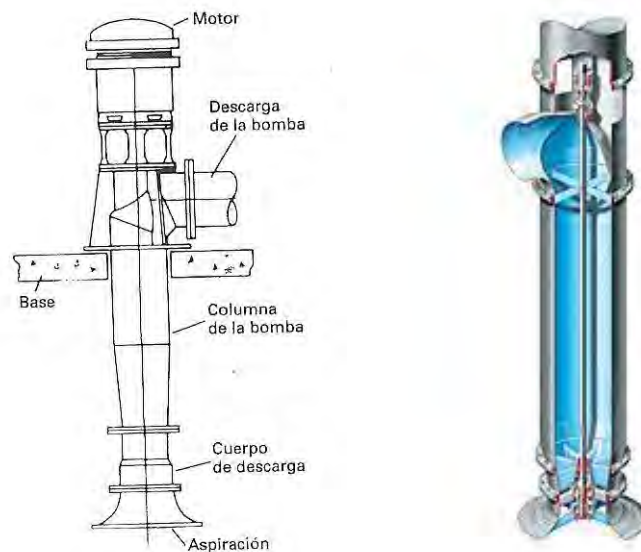


Figura 1.6 Bomba vertical de flujo axial (Tchobanoglous, 1996)

1.2.2. Bombas de tornillo

Estas bombas se clasifican como bombas de desplazamiento positivo y se basan en el principio de Arquímedes, en el cual un eje giratorio que lleva acoplado chapas helicoidales gira en una cuneta inclinada, empujando el agua a través de ésta.

Las bombas de tornillo pueden manejar sólidos de mayor tamaño sin atascarse y funcionan a velocidad constante para una amplia gama de caudales con eficiencias relativamente buenas. Se encuentran desde tamaños de 0.3 a 3 m de diámetro exterior y capacidades desde 0.01 a 3.2 m³/s. El ángulo de inclinación esta normalizado entre 30° a 38° pero se tiene mayor capacidad si se instala a 30°. La carga de bombeo está limitada a unos 9 m. La capacidad de la bomba es proporcional a la altura del líquido sobre el tornillo.

La bomba de tornillo puede ser muy útil en diversas aplicaciones de bombeo de agua residual como:

- Bombeo de agua residual a baja altura
- Bombeo de aguas pluviales
- Bombeo de lodos de retorno
- Bombeo de efluentes tratados
- En una planta de tratamiento que se vaya a ampliar a un tratamiento secundario o avanzado.

En la figura 1.7 se muestra un par de bombas de tornillo en funcionamiento.



Figura 1.7 Bombas de tornillo

1.2.3. Bombas de rodete liso

Estas bombas son de tipo voluta o carcasa equipadas con un rodete especial sin álabes, son adecuadas para caudales pequeños y se pueden encontrar en tamaños de hasta 125 mm.

1.3. Características del funcionamiento de las bombas

En este subcapítulo se abordan las relaciones básicas que pueden utilizarse para caracterizar y analizar el comportamiento de las bombas en diversas condiciones de funcionamiento. Se debe tener en cuenta que hay bombas que parecen ser iguales o similares pero pueden tener diferencias de diseño que cambian su funcionamiento.

Como ya se mencionó, los fabricantes de las bombas suministran la información relativa al comportamiento de las bombas en forma de curvas características donde se representa la carga manométrica total, la eficiencia y la potencia absorbida y el punto óptimo de operación de una bomba.

Una bomba funciona mejor en su punto de máxima eficiencia, en este punto, los esfuerzos radiales sobre los cojinetes son mínimos, ya que la carga desequilibrada sobre el rodete es también mínima. Estos esfuerzos radiales se incrementan notablemente a medida que el punto de funcionamiento se separa de la máxima eficiencia. Cuando el caudal de la bomba sobrepasa el correspondiente al punto de máxima eficiencia la presión absoluta necesaria para evitar la cavitación aumenta de tal manera que, además de los problemas de esfuerzos radiales, la cavitación se convierte en un problema importante.

Cuando el caudal descargado por la bomba desciende hacia el punto de válvula cerrada (carga a gasto cero) la recirculación del líquido impulsado dentro del rodete es otro problema. Esta recirculación da lugar a vibraciones y a pérdidas hidráulicas en la bomba y puede producir cavitación.

1.3.1. Cavitación

Todos los líquidos tienden a evaporarse al cambiar su estado líquido por gaseoso; es decir, que en la inmediata vecindad de la superficie libre de un líquido, algunas de sus moléculas escapan hacia el medio por encima de dicha superficie. En la misma manera, si la superficie libre permanece en un nivel fijo algunas de las moléculas libres regresan al líquido y puede alcanzarse un equilibrio en el intercambio cuando es igual al número de las que salen y las que entran.

Si es aire el gas que hay en el medio, entonces no solo se presentaría un equilibrio entre el aire y las moléculas del líquido, sino que también habría presión parcial del aire, sumada a la del vapor de agua. Al haber este equilibrio la

temperatura, del líquido y del gas, es la misma, con lo cual se presenta la presión de vapor.

La cavitación se produce en las bombas cuando la presión absoluta en la entrada se reduce por debajo de la presión de vapor del líquido bombeado. En estas condiciones se forman burbujas de vapor en la admisión de la bomba y cuando éstas son arrastradas a la zona de mayor presión se produce un colapso instantáneo de las mismas, con lo que el líquido circundante tiende a llenar rápidamente el vacío creado, con una fuerza tal que tiene lugar un efecto de martilleo. Dicho efecto puede dañar el rodete de la bomba.

Para determinar si la cavitación puede constituir un problema se emplean dos valores distintos de la Carga Neta Positiva de Succión (NPSH por sus siglas en inglés). El NPSH disponible ($NPSH_A$) es el que existe en el sistema en la entrada del rodete, mientras que el NPSH necesario ($NPSH_R$) es el que se precisa para evitar la cavitación en la bomba. El $NPSH_A$ es la altura de aspiración total absoluta por encima de la presión de vapor del agua, expresada en metros. La cavitación se produce cuando el $NPSH_A$ es menor que el $NPSH_R$. El $NPSH_A$ se obtiene añadiendo el término $P_{atm}/\gamma - P_{vapor}/\gamma$ al segundo miembro de la ecuación de la energía, cuando se aplica a la aspiración de la bomba. Por lo que

$$NPSH_A = \frac{P_s}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z_s + \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_{vapor}}{\gamma} \quad (1.4)$$

Donde

$NPSH_A$	Carga neta positiva de succión disponible, m
P_{atm}	Presión atmosférica, N/m^2
P_{vapor}	Presión de vapor absoluta del agua, N/m^2
γ	Peso específico del agua, N/m^3

En algunas ocasiones, el valor obtenido se reduce en un 0.6 m para tener en cuenta las variaciones barométricas locales y posibles errores.

1.3.2. Constante de cavitación

La relación entre el $NPSH_R$ y la carga manométrica total se conoce como la constante de cavitación de Thoma (σ)

$$\sigma = \frac{NPSH_R}{H_t} \quad (1.5)$$

Donde

H_t Carga manométrica total, m

La constante de cavitación se utiliza en bombas geoméricamente similares que funcionan en puntos correspondientes de sus curvas Q-H y se entiende que sólo es de aplicación en el punto de máximo rendimiento.

1.3.3. Cavitación en el punto de funcionamiento

Si la bomba funciona con baja carga y a caudal notablemente superior al correspondiente del punto de máxima eficiencia, pueden utilizarse las siguientes ecuaciones aproximadas:

$$\frac{NPSH_R \text{ en el punto de funcionamiento}}{NPSH_R \text{ en el punto de máxima eficiencia}} = \left(\frac{Q \text{ en el punto de funcionamiento}}{Q \text{ en el punto de máxima eficiencia}} \right)^b \quad (1.6)$$

Donde el exponente b varía entre 1.25 y 3.0 dependiendo del rodete. En la mayoría de las bombas para aguas residuales, b se sitúa entre 1.8 y 2.8. El $NPSH_R$ en el punto de máxima eficiencia aumenta con la velocidad específica de la bomba.

1.4. Estaciones de bombeo

En este subcapítulo se presentan aspectos relevantes acerca de los tipos de estaciones de bombeo, su diseño y el análisis del golpe de ariete.

1.4.1. Justificación de las estaciones de bombeo

Las estaciones de bombeo de aguas residuales son necesarias para elevarla o transportarla, cuando la disposición final del flujo por gravedad ya no es posible. En terrenos planos, los colectores que transportan el agua residual hacia la estación de tratamiento se pueden profundizar de tal modo que se tornaría impráctica la disposición final sólo por gravedad.

Las estaciones de bombeo son necesarias para la impulsión de aguas residuales, aguas pluviales, lodos producto del proceso de tratamiento de las mismas y efluentes tratados.

Aparte de las instalaciones de bombeo de las plantas de tratamiento, las principales condiciones y factores que afectan a la necesidad de recurrir al uso de estaciones de bombeo en las redes de alcantarillado son los siguientes:

- Cuando la cota de la zona a servir es demasiado baja para que sus aguas residuales puedan ser evacuadas por gravedad a los colectores existentes o de proyecto.
- Cuando se requiere dar servicio a zonas situadas en el exterior de la cuenca vertiente, pero perteneciente al término a sanear.
- Cuando la omisión de un bombeo supone un costo de construcción excesivo debido a la necesidad de efectuar grandes excavaciones para la construcción de la alcantarilla que dé servicio a una zona determinada.

Las estaciones de bombeo modernas están completamente automatizadas. Las de pequeño tamaño no suelen tener personal adscrito a ellas, no requiriendo más atención que la necesaria para una inspección diaria del funcionamiento y del engrase de los equipos instalados. Las estaciones de mayor tamaño suelen tener operarios que las atienden permanentemente, aunque el número de los mismos es mínimo. En la mayoría de los casos, es suficiente disponer de turnos compuestos por una o dos personas.

1.4.2. Clasificación de las estaciones de bombeo

Las estaciones de bombeo han sido clasificadas de varias maneras, aunque ninguna de ellas es satisfactoria. Algunos de los sistemas normales de clasificación son los siguientes:

- Por capacidad (metros cúbicos por segundo, metros cúbicos por día o litros por segundo).
- Según la fuente de energía (electricidad, motores diesel, etc.).
- Por el método de construcción empleado (in situ, prefabricadas, etc.).
- Por su función u objeto específico

En la tabla 1.1 se resume la clasificación de las estaciones de bombeo según su capacidad y método constructivo utilizado.

Clase/tipo	Intervalo de capacidad m ³ /s
Prefabricada	
Cámara de aspiración	0.006-0.03
Cámara seca	0.006->0.1
Convencional	
Pequeña	0.2-0.09
Mediana	0.06-0.65
Grande	>0.65

Tabla 1.1 Clasificación de las estaciones de bombeo

Las estaciones de bombeo prefabricadas son suministradas en módulos que incluyen todos los equipos y componentes ya montados. Normalmente, se encuentran disponibles con tres tipos de equipos de bombeo: eyectores neumáticos, bombas sumergidas y bombas de cámara seca. Los eyectores neumáticos se suelen emplear para caudales pequeños, ya que las bombas centrífugas cuya sección de paso sea de 75 mm, no pueden funcionar a caudales menores de 0.006 m³/s. Para caudales pequeños también se pueden emplear bombas sumergidas que pueden ser extraídas para su mantenimiento sin afectar al sistema de impulsión.

Ambos tipos de bombas pueden utilizarse en instalaciones prefabricadas o convencionales. Durante los últimos años, la capacidad de las instalaciones prefabricadas se ha visto incrementada notablemente, ya que actualmente hay instalaciones de capacidades superiores a 0.3 m³/s.

La capacidad de las estaciones de bombeo convencionales suelen oscilar entre 0.02 y 0.65 m³/s. Se emplean cuando las condiciones locales impiden el uso de estaciones prefabricadas y la magnitud o variación del caudal es tal que excede a las capacidades disponibles de las instalaciones prefabricadas. Cada estación convencional se proyecta para adecuarla a las condiciones locales.

1.5. Proyecto de tuberías de impulsión

La tubería de impulsión es la encargada de recibir el agua residual descargada por una estación de bombeo y transportarla a presión hasta el punto de descarga. La tubería de impulsión es parte del sistema de bombeo y su diseño está influido por el número, tamaño y tipo de bombas existentes en la estación.

Otros factores que tienen influencia sobre el diseño de las tuberías de impulsión son la necesidad de velocidades mínimas del agua residual y la capacidad para resistir las presiones internas máximas, incluyendo las temporales debidas al golpe de ariete.

Este subcapítulo se enfoca en el diseño hidráulico de las tuberías de impulsión y de sus elementos e instalaciones complementarias.

1.5.1. Determinación del diámetro de la tubería de impulsión

En la práctica, la selección del diámetro se rige por la necesidad de mantener una velocidad adecuada para que el caudal mínimo evite la disposición de sólidos, o una velocidad capaz de arrastrar los sólidos depositados al menos una vez durante el día. Sin embargo, ocurre que, a menudo no es factible dimensionar las tuberías de impulsión de gran longitud, basándose, exclusivamente, en las limitaciones de la velocidad para el caudal mínimo. En estos casos, es conveniente elegir el tamaño más económico de la tubería que consiga velocidades del flujo adecuadas para el intervalo total de caudales, actuales y futuros y después seleccionar las bombas. Puede ser que sea necesario emplear un diámetro mayor para reducir pérdidas por fricción, de manera que la selección de las bombas sea más adecuada.

1.5.2. Pérdida de carga en las tuberías de impulsión

Las pérdidas por fricción en las tuberías de impulsión pueden determinarse mediante la fórmula de Hazen-Williams o la de Darcy-Weisbach con valores adecuados de C y f , respectivamente.

Las pérdidas locales producidas por válvulas y piezas especiales, entradas y descargas, pueden calcularse como una fracción específica de la carga de velocidad en el conducto.

Las pérdidas por fricción y locales constituyen las pérdidas de energía cinética en la tubería de impulsión.

1.5.3. Velocidades en la tubería de impulsión

Se ha establecido que a una velocidad circulante de 0.6 m/s en una tubería de aguas residuales, los sólidos no se depositan y a velocidades menores, los sólidos se sedimentan, por lo que es necesario conseguir una velocidad mayor a 1.1 m/s para que estos sean arrastrados de nuevo por el flujo.

En ciertos casos puede ser aceptable la disposición de sólidos por las siguientes razones:

- A caudal mínimo, el contenido de sólidos y arenas de agua residual es también mínimo.
- Para los caudales punta diarios, el caudal de bombeo será de 1.5 a 2.0 veces el medio diario, permitiendo que sean arrastrados los sólidos depositados durante el periodo de caudal mínimo.

1.5.4. Consideraciones de proyecto

Una vez determinado el diámetro de la tubería de impulsión, hay que solucionar un conjunto de detalles para asegurar que funcione satisfactoriamente.

Se debe hacer una selección cuidadosa del tipo de material a utilizar, definir el trazado de la tubería y proyectar las instalaciones complementarias de la misma.

1.5.4.1. Recubrimiento

Se recomienda disponer un recubrimiento mínimo de 0.9 m para minimizar la sobrecarga de impacto. Las tuberías deben colocarse a una profundidad tal que no se vean afectadas por el clima. Existen reglamentos locales o regionales que especifican la distancia mínima entre conducciones de agua potable, tuberías de impulsión y alcantarillas.

1.5.4.2. Anclaje

Las tuberías han de anclarse para resistir los empujes que se producen en ciertos puntos tales como cambios de dirección, codos y conexiones con ramales. El anclaje necesario puede conseguirse mediante la instalación de juntas reforzadas o macizos de concreto.

Es recomendable que el proyecto de anclaje de los componentes de las tuberías de impulsión se base en presiones internas superiores al menos a un 25% de la máxima que produce al pararse el bombeo más la producida por el golpe de ariete con un factor de seguridad adecuado.

1.5.4.3. Reducción de la turbulencia en la descarga

Es importante revisar la disposición vertical y horizontal de la descarga de la tubería de impulsión para minimizar la turbulencia y la liberación resultante de sulfuro de hidrógeno.

Para reducir la turbulencia se puede situar a la misma cota las claves de la tubería de impulsión y de la alcantarilla, en el pozo de registro donde se verifica la descarga.

Si la velocidad del agua en la tubería de impulsión es superior a 2 m/s, o si existe más de una tubería de impulsión, puede ser necesario proyectar un sistema de descarga especial para reducir la turbulencia, así como un elemento disipador de energía.

1.5.4.4. Materiales de las tuberías

Los materiales a utilizar en las tuberías de impulsión deben ser adecuados para el suelo en que han de colocarse y ser capaces de resistir la corrosión interna que pueda originar el agua residual a transportar.

En el siguiente capítulo se expone con mayor detalle el fenómeno de corrosión en tuberías y los materiales recomendados para evitarla o reducirla.

II. Descripción del proceso de producción de sulfuro de hidrógeno

La composición química de las aguas residuales consiste, principalmente, en materia orgánica e inorgánica, y los gases presentes en ellas. Los gases que con mayor frecuencia podemos encontrar son el nitrógeno (N₂), el oxígeno (O₂), el dióxido de carbono (CO₂), el sulfuro de hidrógeno (H₂S), el amoníaco (NH₃), y el metano (CH₄). Los tres últimos gases son producto de la descomposición de la materia orgánica.

El gas H₂S es tóxico para los seres humanos y ha causado la muerte de muchos técnicos encargados del mantenimiento de sistemas de alcantarillado. La mínima concentración conocida de H₂S que ha causado muertes es de 300 ppm, mientras que 3000 ppm supondría una muerte casi instantánea.

El H₂S tiene un olor a huevos podridos que se puede detectar en bajas concentraciones. Además, es muy conocido por su alta toxicidad y su habilidad de corroer metales, como el hierro, zinc, cobre, entre otros. El H₂S es también precursor de la formación de ácido sulfúrico, el cual corroe el concreto.

El H₂S es un gas que está presente tanto en la atmósfera del interior de las alcantarillas como en estado disuelto en el agua residual. Este gas puede ser oxidado a ácido sulfúrico por la acción de las bacterias que se desarrollan en las paredes de los conductos, lo cual da lugar a importantes problemas de corrosión (Tchobanoglous, 1996).

Los organismos importantes relacionados con la producción de H₂S en las redes de aguas residuales son los que reducen los sulfatos para obtener energía para el mantenimiento y crecimiento celular. Existen dos géneros de bacterias anaerobias de la especie *Desulfovibrio* que pueden convertir el sulfato en sulfuro.

La reacción de reducción suele desarrollarse al mismo tiempo que la de oxidación de la materia orgánica y, algunas veces, del hidrógeno. En casos especiales en que los organismos actuantes contienen la enzima hidrogenasa, puede darse la siguiente ecuación, que es importante en la corrosión de las tuberías de hierro (Tchobanoglous, 1996):



Debido a que la mayoría de las aguas residuales contienen bacterias capaces de completar estas reacciones, así como materia orgánica e iones sulfato, siempre existen las condiciones para la producción de H₂S.

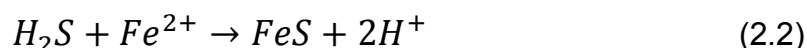
2.1. Proceso de producción de sulfuros

Como se mencionó anteriormente, la reducción bacteriana del sulfato a sulfuro sólo se desarrolla en un medio anaerobio, es decir, en la parte sumergida de la película biológica, que se forma en las paredes de las alcantarillas. El espesor de esta película depende de las condiciones de flujo en la tubería y puede medir entre 1 y 1.5 mm; contiene una población heterogénea de microorganismos, incluyendo formas filamentosas. Dicho espesor decrece gradualmente como consecuencia de la acción de cizalladura causada por el movimiento del agua o por el peso propio de la misma.

Se produce una difusión de SO_4^- , materia orgánica y nutrientes hacia el interior de la capa anaerobia, mientras que el sulfuro producido en ésta se difunde hacia fuera a la corriente de agua residual.

2.1.1. Precipitación de sulfuros metálicos

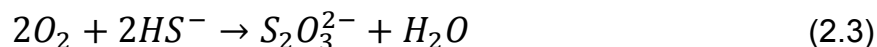
La reacción del H_2S con los compuestos metálicos del agua residual puede caracterizarse por medio de la siguiente reacción con el hierro:



También pueden precipitarse otros metales, tales como el cinc, plomo, cobre, cadmio y cobalto. La presencia de metales reduce la concentración de sulfuro soluble; de hecho, la adición de metales es uno de los métodos para controlar los sulfuros en las alcantarillas.

2.1.2. Oxidación de sulfuros

El ión sulfhídrico que se difunde desde la capa anaerobia puede ser oxidado, en presencia de oxígeno libre, a sulfato y otros compuestos parcialmente oxidados por bacterias de la capa facultativa. La oxidación bacteriana del H_2S a ión tiosulfato puede representarse por:



El H_2S que se difunde hacia el agua residual puede ser, asimismo, oxidado a azufre elemental, de acuerdo a la siguiente reacción (Tchobanoglous, 1996):



Se encontró que la tasa de oxidación de los sulfuros es proporcional a la concentración de sulfuros solubles totales y a la tasa de reaireación (tasa de transporte de oxígeno desde la atmósfera del interior de la alcantarilla a la corriente de agua residual) (Tchobanoglous, 1996).

2.1.3. Emisión de sulfuro de hidrógeno H₂S a la atmósfera de la alcantarilla

La emisión física de sulfuro de hidrógeno a la atmósfera de la alcantarilla tiene lugar antes de que comiencen los problemas de corrosión. La tasa a la que se produce la emisión de sulfuro de hidrógeno desde la corriente de agua residual está dada por:

$$\phi_{se} = f_s D_s \quad (2.5)$$

Donde

- ϕ_{se} Flujo de sulfuro de hidrógeno a través de la superficie de la corriente, g/m²h
- f_s Coeficiente de intercambio de sulfuro de hidrógeno entre una fase acuosa y otra gaseosa, m/h
- D_s Fuerza actuante sobre el sulfuro de hidrógeno, g/m³

La fuerza actuante D_s que es una medida de la tasa a la que el gas penetra o sale de la fase acuosa, depende de las concentraciones relativas del sulfuro de hidrógeno en el agua y en la atmósfera de la alcantarilla. Si las concentraciones están en equilibrio, no existirá fuerza actuante. Frecuentemente, el agua residual está supersaturada de H₂S y la fuerza actuante puede obtenerse de la siguiente manera:

$$D_s = H_2S_{(aq)} - H_2S_{(aq)}(\text{saturación}) \quad (2.6)$$

La concentración de saturación del H₂S soluble se puede determinar mediante la Ley de Henry: la concentración de equilibrio del sulfuro de hidrógeno en el agua es proporcional a la presión parcial del gas H₂S en la atmósfera, es decir (Tchobanoglous, 1996):

$$H_2S_{(aq)}(\text{saturación}) = KP_{H_2S} \quad (2.7)$$

2.1.4. Acumulación de sulfuros en las alcantarillas

La cantidad de sulfuro de hidrógeno disuelto presente, aumenta al disminuir el pH. Una vez en solución, el sulfuro de hidrógeno escapa a la atmósfera de la alcantarilla. La cantidad presente en ella está directamente relacionada con la concentración de sulfuro de hidrógeno en la fase acuosa y con el valor de saturación relativa de la atmósfera de la alcantarilla.

Por ejemplo, para un pH de 7.0, el H_2S representa el 50 % de los sulfuros disueltos, mientras que para un pH de 6.0, H_2S representa el 90% de los sulfuros disueltos, esto se puede observar fácilmente en la figura 2.1.

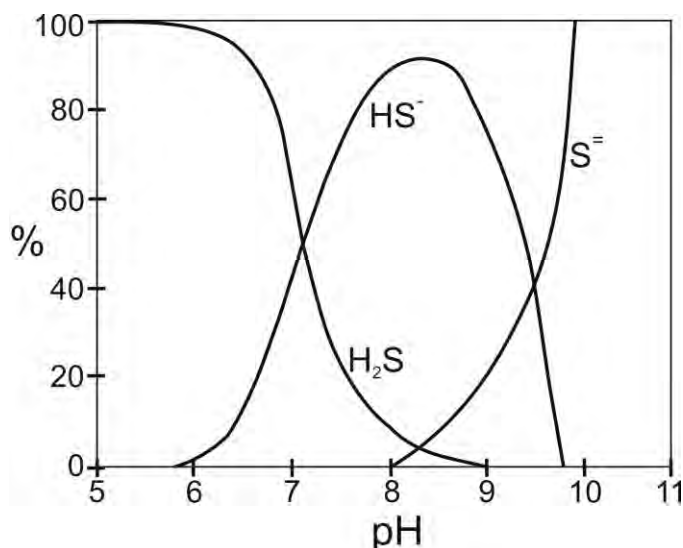


Figura 2.1 Efecto del pH en el equilibrio del H_2S (EPA, 1985)

La acumulación de sulfuros en las alcantarillas depende del patrón de circulación del agua, es decir, si el agua fluye a tubo lleno el sulfuro producido permanecerá en la corriente y una parte se perderá por precipitación; pero si el flujo es a tubo parcialmente lleno, la concentración de sulfuro de hidrógeno llega a alcanzar un valor límite. Cuando se alcance dicho límite, las pérdidas por oxidación, emisión o precipitación, y las aportaciones a la corriente de agua residual serán prácticamente iguales.

2.2. Corrosión debida al sulfuro de hidrógeno

En general el deterioro de tuberías de diversos materiales debido a actividad microbiana suele conocerse como biocorrosión o corrosión inducida por microorganismos. Las bacterias causantes de estos procesos se suelen agrupar en biopelículas o comunidades microbianas adheridas a superficies sumergidas.

Las biopelículas pueden participar en la corrosión metálica a través de interacciones complejas (a veces sinérgicas) entre la superficie del material, los productos de corrosión abiótica, las células bacterianas y sus metabolitos (Bethencourt, 2010).

Después de su emisión a la atmósfera interna, el siguiente paso en el proceso de corrosión consiste en su transferencia a la zona de paredes del conducto situada por encima de la superficie del líquido. Puesto que, normalmente, las paredes de las alcantarillas están húmedas debido a las condensaciones en ellas acumuladas, el sulfuro de hidrógeno de la atmósfera quedará fijado a las paredes tan pronto como entre en contacto con ellas. El H_2S retenido en esas zonas húmedas es transformado en ácido sulfúrico por la acción de bacterias del tipo Thiobacillus.



En el siguiente paso de corrosión, si se trata de tuberías de concreto, el ácido sulfúrico reacciona con el cemento del concreto y, de forma similar con el acero del armado. Si la tasa de producción de ácido sulfúrico (H_2SO_4) es baja, prácticamente la mayor parte del mismo reacciona con el cemento, dando lugar a un material pastoso que queda muy pobremente ligado a los agregados empleados en la fabricación del concreto. Si la tasa de producción de ácido sulfúrico es elevada, gran parte del mismo no podrá difundirse a través de la masa pastosa citada y, consecuentemente, será arrastrado de las paredes por la corriente de agua residual en donde reacciona con los álcalis, con lo que el azufre presente quedará en forma de ion sulfato. En la figura 2.2 se muestra la formación de la biopelícula y el daño causado al tubo.

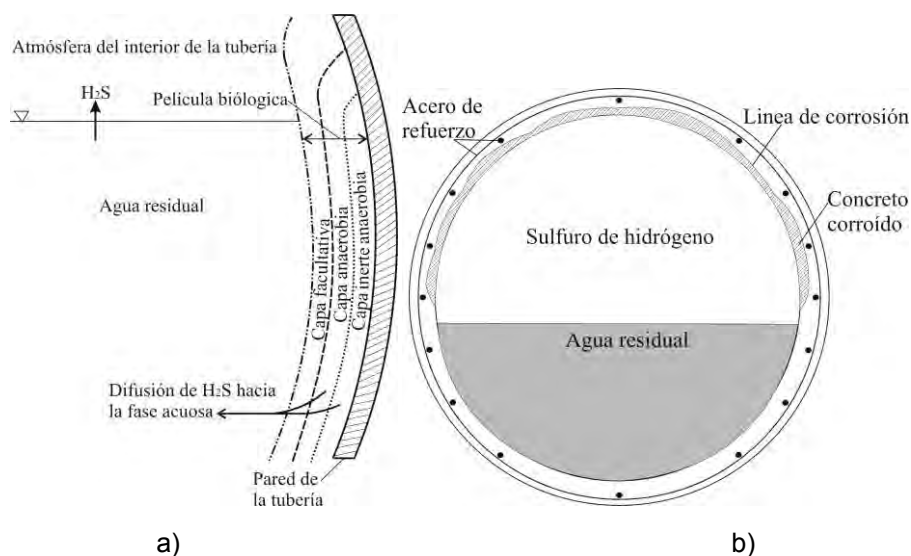


Figura 2.2 Corrosión en la tubería: a) película biológica, b) tubo dañado

Periódicamente, cuando se llena la alcantarilla, parte de la masa pastosa es arrastrada por el agua o se desprende por su propio peso, repitiéndose el proceso a medida que continúa la corrosión de la alcantarilla. La forma de evolución de la corrosión varía, dependiendo de la circulación de aire, de la cantidad de condensados existentes, de la tasa y cantidad de H_2S producido y de otros factores locales como la temperatura. Generalmente, la tasa de corrosión será más elevada en la parte superior de la alcantarilla y junto a la superficie del agua.

En la figura 2.3 se muestra una fotografía de una tubería, donde tanto el concreto como el acero de refuerzo han sufrido el ataque de H_2S .



Figura 2.3 Tubería de concreto corroída con el acero de refuerzo expuesto.

2.3. Control de la corrosión causada por sulfuro de hidrógeno

Durante muchos años se han implementado satisfactoriamente diferentes métodos para evitar la corrosión en tuberías de concreto, sin embargo, la mayoría de ellos resultan muy costosos pero indispensables para el mantenimiento de las alcantarillas. Dichos métodos se basan en interrumpir el proceso de corrosión ocasionada por cualquiera de las siguientes causas:

1. Presencia de sulfatos en el drenaje.
2. Reducción biológica de estos compuestos a H_2S .
3. Transporte del H_2S disuelto desde la superficie del agua a la atmósfera.
4. Oxidación biológica de H_2S a H_2SO_4 .
5. Ataque del H_2SO_4 a superficies metálicas o de concreto expuestas a la atmósfera.

Se puede decir que existen dos clasificaciones de los métodos para el control de la corrosión, los métodos físicos y químicos. Estos métodos se emplean, comúnmente, en tuberías o sistemas ya existentes, sin embargo, se puede evitar su uso si se tiene presente, desde la etapa de diseño, que se puede desarrollar el problema de corrosión, es decir, para evitar la corrosión se pueden hacer consideraciones de diseño para evitar puntos donde se pueda desarrollar este fenómeno. Una de las principales consideraciones de diseño es el uso de pendientes pronunciadas, ya que esto impide el proceso de producción de H_2S a través de turbulencias inducidas.

2.3.1. Métodos químicos

Estos métodos tienen por objeto la interrupción del proceso de producción del H_2S por medio de adición de algún agente químico o cuidando los niveles de algunas propiedades químicas del agua residual tales como el pH o el contenido de O_2 .

A continuación se describirán algunos de los métodos químicos más utilizados:

2.3.1.1. Uso del Cloro (Cl_2)

El cloro (Cl_2) es un agente químico capaz de oxidar los sulfuros presentes en el flujo de agua residual, por lo que hasta ahora se había venido usando durante más de 50 años para impedir la producción de H_2S . Se puede añadir en estado líquido o gaseoso por medio de difusores directamente al drenaje, pero es importante tomar en cuenta que el consumo de Cl_2 depende de la calidad de mezclado que se tenga cuando éste se agrega a las tuberías. Si el mezclado es deficiente el consumo de cloro tiende a elevarse de tal manera que representa un costo considerable, además de la inversión que implica la instalación para la adición de Cl_2 . A esto se le pueden sumar los costos de instalación y de mantenimiento que requiere una instalación de este tipo.

En la figura 2.4 se muestra una instalación típica para la inyección de cloro. Asimismo, la figura 2.5 muestra los difusores más comunes para la adición de Cl_2 a sistemas a gravedad y a presión con flujo en movimiento.

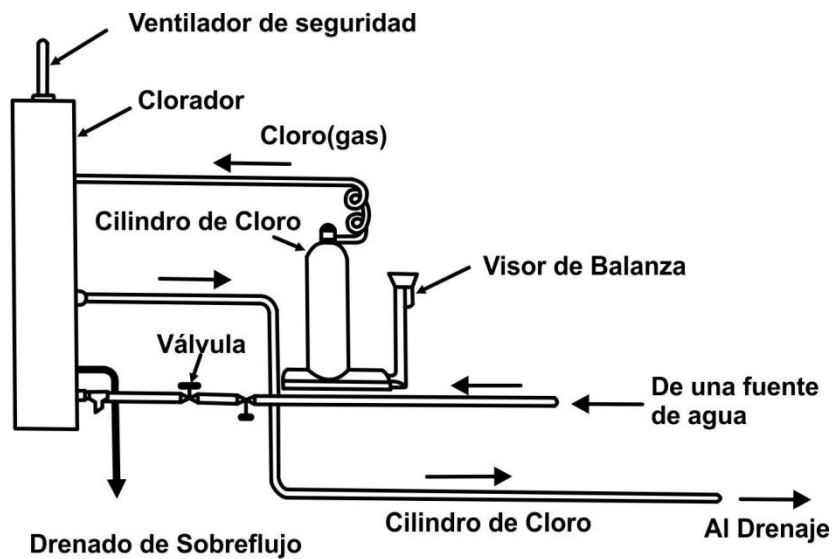


Figura 2.4 Instalación para la inyección de cloro

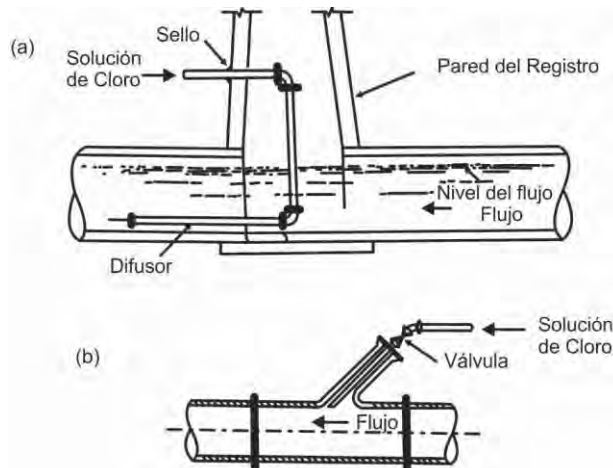


Figura 2.5 Difusores típicos para la adición de cloro para drenajes a gravedad y a presión

El uso de cloro en gas implica un cuidado mayor, ya que al ser un gas comprimido tóxico se deben implementar medidas de seguridad para evitar derrames que puedan ser catastróficos, lo cual aumenta aún más el costo por adición de cloro.

Debido al costo del manejo del Cl_2 , se buscó otro agente químico que pudiera reducir costos y que fuera más eficiente. Dicho agente es el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), el cual oxida químicamente al H_2S .

2.3.1.2. Peróxido de hidrógeno

El consumo del H_2O_2 es relativamente menor que el del cloro, aunque depende de la finalidad de su uso, es decir, si se utiliza para oxidar sulfuros existentes o para evitar la producción de estos. La dosis depende de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), de la temperatura del agua residual y de las condiciones hidráulicas de la tubería.

Las ventajas principales que tiene el uso de H_2O_2 , en lugar de cloro, es el tiempo de reacción y el consumo del mismo, ya que para que se consuma el 90% del H_2O_2 bastan de 10 a 15 minutos, el resto se consumirá en los siguientes 20 a 30 minutos. En cuanto al consumo, a pH menores a 8.5 se requiere una parte de peróxido por una de sulfuro.

El equipo requerido para la instalación de adición de H_2O_2 es relativamente sencillo y barato, pero cabe señalar que variará dependiendo del flujo total del drenaje y de los materiales necesarios para garantizar que no sean oxidados por el peróxido. En la figura 2.6 se muestra una instalación típica para la adición de H_2O_2 al drenaje.

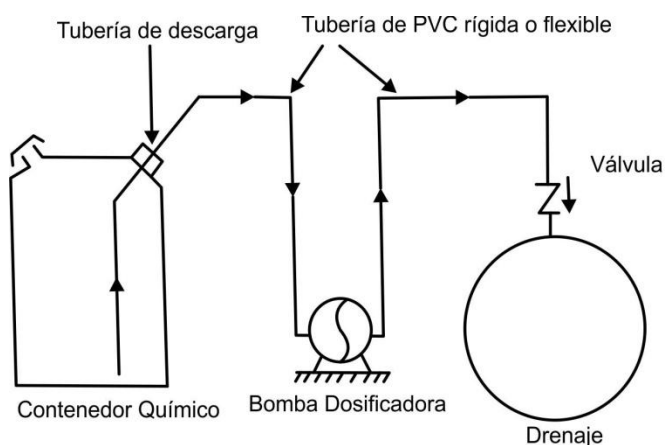


Figura 2.6 Instalación para la adición de H_2O_2

2.3.1.3. Nitratos

Las bacterias reductoras de sulfatos utilizarán receptores de hidrógeno en el siguiente orden: 1) O_2 , 2) NO_3^- , 3) SO_4^{2-} . De manera que la reducción de sulfatos no ocurrirá hasta que todo el nitrato haya sido consumido. El consumo de nitrato de sodio sólo resulta eficaz en agua residual con alta concentración de H_2S y la dosis promedio es de 10 partes de nitratos por cada parte de sulfuros que se desea eliminar.

El equipo para la instalación de un dosificador de nitratos y su mantenimiento es muy similar a las implementadas en la adición de cloro y peróxido de hidrógeno, por lo que la única ventaja que tienen los nitratos frente a los demás agentes químicos, es el costo por galón de solución de nitratos.

2.3.1.4. Sales metálicas

Este método se basa en impedir el paso del H_2S a la atmósfera de la alcantarilla mediante la adición de sales metálicas para que éstas reaccionen con los sulfuros disueltos en el agua y se formen sulfuros metálicos que precipitarán.

Algunos metales utilizados son el zinc, el plomo y el cobre, sin embargo se deben cuidar los posibles problemas de contaminación que pueda ocasionar la adición de estos y los costos que se podrían generar.

2.3.2. Métodos físicos

El método físico de mayor utilidad es el mejoramiento del balance de oxígeno, éste método consiste en introducir oxígeno, ya sea por aireación o inyección directa, para oxidar el H_2S .

Los métodos de aireación más comunes son la inyección de aire comprimido y el uso de tubos Venturi instalados a lo largo de la tubería, en puntos previamente determinados.

La inyección de aire comprimido se hace a través de un equipo conformado por un compresor que inyecta aire a la salida de la bomba que impulsa el agua en un sistema de alcantarillado. Con la inyección de aire se logra un aumento en la presión del mismo, lo cual aumentará la disolución del oxígeno en el flujo.

Los tubos Venturi permiten la entrada de aire provocado por la succión que ejerce la presión negativa que se genera en la descarga, debido a que un líquido que fluye a una velocidad considerable a través de una tobera producirá dicha presión negativa.

2.3.3. Alcalinidad

Otra alternativa para el control de la corrosión en tuberías es la modificación de la alcalinidad, debido a que la corrosión es inversamente proporcional a esta propiedad del concreto de la tubería en cuestión. Este método se basa en

proporcionar al concreto una alcalinidad más alta con ayuda del cemento y los agregados.

Se debe cuidar que la relación entre la alcalinidad que proporciona un agregado y el costo del mismo sea el óptimo. Los agregados que cumplen dicha relación, en la mayoría de los casos, son la caliza y dolomita. Las proporciones de agregado fino pueden disminuirse para aumentar la cantidad de cal en la preparación del concreto.

El método de mejoramiento de la alcalinidad es un medio de control barato y relativamente fácil de implementar. Aunque este método no elimina la corrosión, puede aumentar considerablemente la vida útil de las tuberías.

2.3.4. Consideraciones de diseño

Los sulfuros suelen producirse en redes de alcantarillado en aquellas zonas en que la velocidad del flujo es muy baja, cuando las distancias o los tiempos de recorrido son largos, cuando las alcantarillas fluyen a sección llena y en tuberías en las que el agua residual sólo está en contacto con el aire en forma intermitente o no tiene contacto con el aire. Es por eso que las tuberías proyectadas deben proporcionar suficiente velocidad para impedir la formación de la biopelícula en el fondo del tubo y por consiguiente la generación de H_2S .

El diseño debe contar con ventilación adecuada para favorecer la absorción del oxígeno en el flujo y, en las redes nuevas, se debe contar con registros y caídas artificiales de flujo para mejorar el balance de oxígeno.

Recubrimientos

Otra opción para proteger las tuberías contra la corrosión por sulfuro de hidrógeno es proporcionarles un recubrimiento metálico, no metálico o uno de conversión química.

Recubrimientos metálicos

Los sistemas de recubrimiento metálico pueden subdividirse en galvanización y galvanoplastia. El galvanizado ofrece protección de sacrificio del metal base y es comúnmente realizado sumergiendo el metal a proteger en un baño de zinc o

cadmio fundido. La vida útil efectiva de la capa del cinc galvanizado es directamente proporcional al espesor de la misma. El recubrimiento con cinc inorgánico también se han desarrollado e incluye silicato de sodio, que proporciona una buena unión con el metal de base.

Otro sistema de revestimiento metálico es la galvanoplastia, mediante el cual una delgada capa de cobre se aplica al metal base. Los metales usados en el proceso de electrodeposición incluyen aluminio, estaño, plomo, aleaciones de níquel / cobre, acero inoxidable, níquel, cromo y plata. De estos, los recubrimientos de níquel, cromo y plata son frecuentemente usados para la protección contra la corrosión.

Recubrimientos no metálicos

Los recubrimientos no metálicos consisten en resina de vinilo, epoxi, de silicona y pinturas. Las pinturas pueden ser clasificados como 1) termoplásticas, incluyendo alquitrán asfáltico/carbón y polietileno, que se aplican en caliente y se cura por enfriamiento, y 2) termoestables, tal como, el poliuretano y epoxi, que se establece por reacción química causada por un agente de curado. Todos los sistemas de pintura requieren un gran cuidado en la selección del tipo de pintura, en la preparación de la superficie, en humedecer y secar perfectamente los espesores de película, y en los requisitos de curado (en particular la temperatura y el tiempo antes de la inmersión).

Los tipos de pinturas más utilizados para entornos sumergidos y atmósferas corrosivas son epóxicos de alquitrán y de carbón (a base de resinas epoxicas) y pinturas epoxi. Hay probablemente más revestimientos epóxicos de alquitrán y de carbón en tuberías de concreto en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales que cualquier otro tipo de recubrimientos actualmente disponibles.

Recubrimientos de conversión química

Los recubrimientos de conversión química causan una reacción que se produce entre el material de recubrimiento y el metal base, tal que el revestimiento se convierte en una parte integral del metal. Por ejemplo, los recubrimientos de fosfato son producidos por la reacción del metal base con una solución de ácido fosfórico que contiene fosfatos de hierro y de zinc, hierro o manganeso. Estos revestimientos son normalmente utilizados para proporcionar una mejor adhesión de la pintura

Los materiales que a menudo se encuentran en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales y estaciones de bombeo que son propensos

a la corrosión de sulfuro de hidrógeno son el fierro fundido, fierro dúctil, acero, cobre, asbesto y concreto.

Selección del material de la tubería

La selección del material es un aspecto crítico en el diseño de los sistemas de aguas residuales en los cuales la generación de sulfuro es probable que ocasione problemas. El costo adicional por usar materiales con mayor grado de resistencia a la corrosión puede ser justificada por el ahorro de costos al reemplazar o rehabilitar estructuras deterioradas.

Las consideraciones de diseño para seleccionar materiales son:

- Disponibilidad de los materiales en las medidas de la tubería requerida.
- Nivel máximo y mínimo de sulfuro esperado en el agua residual.
- Otros factores como la resistencia a la abrasión y consideraciones de durabilidad.
- Características hidráulicas de los materiales bajo condiciones de uso actual.
- Ventajas y desventajas del material (facilidad de instalación, resistencia a la infiltración, flexibilidad, etc.)
- Requerimientos futuros de servicio.
- Costo, vida útil de varios tipos de tubería.

A continuación se describen algunos materiales usados en sistemas de aguas residuales, con particular énfasis en las propiedades resistentes a la corrosión de cada material.

Concreto

Es uno de los materiales más comúnmente usados en la construcción de un tubo de alcantarilla, y es virtualmente el único material usado en alcantarillas de gran diámetro.

Algunas alternativas están disponibles para extender la vida útil de la tubería de concreto en atmosferas corrosivas. Esto incluye 1) especificación de caliza agregada, la cual aumenta la alcalinidad del concreto; 2) especificación de espesor adicional que sirva como material de sacrificio; y 3) uso de revestimientos con alto grado de resistencia a la corrosión en el interior de las paredes del tubo.

Asbesto cemento

Este material está sujeto al ataque del ácido sulfúrico. Debido a que el contenido de cemento es más alto que para una tubería de concreto reforzado, la alcalinidad puede también ser alta, dependiendo del tipo de agregado que se use. Sin

embargo, la corrosión de tuberías de asbesto cemento empieza inmediatamente a degradar la sección estructural del tubo, en cambio para la corrosión de tuberías de concreto reforzado, en el cual el concreto cubre el acero de refuerzo, el concreto es degradado antes que la integridad estructural del tubo sea afectada.

Aunque la variabilidad en la alcalinidad de los tubos de asbesto cemento es limitada, la vida útil es un factor de diseño que puede ser empleado para determinar el espesor requerido. La alcalinidad de los tubos de asbestos cemento está entre 0.5 y 0.6.

Arcilla Vitrificada

Este material es inmune al ataque por ácido sulfúrico, a la mayoría de productos de desecho industrial y es un material adecuado para usarlo donde las concentraciones esperadas de sulfuro son altas. Si el material es propiamente colocado y unido, permanecerá en servicio por un largo tiempo si no es perturbado por fuerzas externas. Este tipo de tubería está disponible en medidas que van desde 10 cm hasta 107 cm.

Concreto con refuerzo plástico

Es construido de resina de poliéster mezclada con arena y reforzada con fibra de vidrio. El producto resultante no está sujeto al ataque de ácido sulfúrico a menos que la fibra esté expuesta debido al daño durante el manejo o las deflexiones de la tubería. Si las fibras están expuestas, el ácido puede deslizarse a lo largo de las fibras y reaccionar con las impurezas presentes.

Plástico Homogéneo

El policloruro de vinilo (PVC), el acrilonitrilo – butadieno – estireno (ABS) y polietileno (PE) son tuberías de materiales resistentes al ataque del ácido sulfúrico y es adecuado para su uso donde las concentraciones esperadas de sulfuro son altas. Debe cuidarse el lecho y el colchón del tubo para mantener las deflexiones en un mínimo aceptable.

Acero

Está sujeto a la corrosión por ácido sulfúrico a medida que el sulfuro de hidrógeno entra en contacto con el oxígeno cuando el agua fluye a tubo parcialmente lleno. El producto de la oxidación, sulfuro de hierro, se puede acumular de tal manera que la capacidad y la integridad estructural de la línea puede ser significativamente reducida.

Hierro dúctil

Tiene una vida útil mayor a la del acero debido al aumento del espesor de la pared. Sin embargo, el hierro está sujeto a la corrosión en presencia de oxígeno como el acero, el volumen de productos de la corrosión se puede acumular, restringir el área transversal del tubo y afectar la integridad estructural de la tubería.

Cuando la tubería de hierro es corroída por el gas de sulfuro de hidrógeno, ácido sulfúrico u otros agentes, el proceso remueve los cristales de hierro, dejando atrás los componentes no metálicos como el grafito y los productos de la corrosión (EPA,1985).

III. Beneficios y desventajas de inyectar aire a sistemas que transportan agua residual

Como se mencionó en el capítulo anterior, existen métodos físicos y químicos para reducir la producción de sulfuro de hidrógeno en los sistemas de bombeo de agua residual. Uno de los métodos físicos que se mencionaron es la inyección de aire y a continuación se describirá con más detalle, con el objetivo de analizar los efectos secundarios que éste puede tener en este tipo de conducciones.

La adición de suficiente oxígeno disuelto puede prevenir o reducir significativamente, además de la generación de sulfuro, la oxidación bioquímica de los sulfuros ya existentes (EPA, 1985).

Los métodos de adición de aire incluyen:

- Inyección directa de aire comprimido en las tuberías.
- Uso de aspiradores Venturi en las tuberías o en las estaciones de bombeo.
- Uso de bombas de aire comprimido en las estaciones de bombeo.
- Disolución en tubo U usando aire comprimido.

3.1. Inyección de aire a los sistemas a bombeo que transportan agua residual

En los siguientes párrafos se describen los métodos de adición de aire para comprender el funcionamiento de cada uno.

Inyección directa de aire comprimido

El incremento de la presión en una tubería permite mayor disolución del oxígeno en el flujo. A presión atmosférica y a 21°C, el agua disolverá aproximadamente 2 % de aire por unidad de volumen; esto se incrementa a 4 % a una presión de 103 kPa y a 6 % a 207 kPa.

La tasa requerida de inyección de aire varía dependiendo de las características del agua residual, del tiempo de retención en la tubería, de la temperatura y de la presión en el sistema, del perfil hidráulico de la tubería y del grado en que se desea controlar el sulfuro.

Aspirador Venturi

El aspirador Venturi opera bajo el principio de que el flujo a alta velocidad a través de una boquilla de diámetro decreciente crea una presión negativa en la descarga. La disposición de una abertura a la atmósfera en este punto permite que el aire sea dirigido hacia el dispositivo. La turbulencia en la descarga permite una adecuada mezcla entre el aire y el agua.

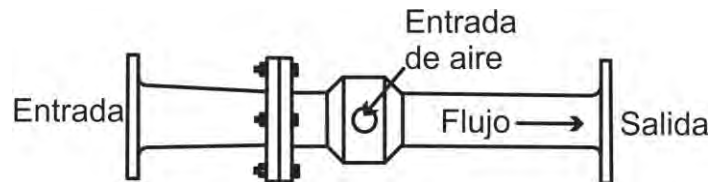


Figura 3.1 Aspirador Venturi (EPA, 1985)

Bomba de aire comprimido

Esta bomba ofrece la función simultánea de bombeo y aireación. Un diagrama de esta bomba se puede ver en la figura 3.2. Después de implementar un mecanismo como éste, el sulfuro disuelto en el agua residual puede reducirse e incluso desaparecer.

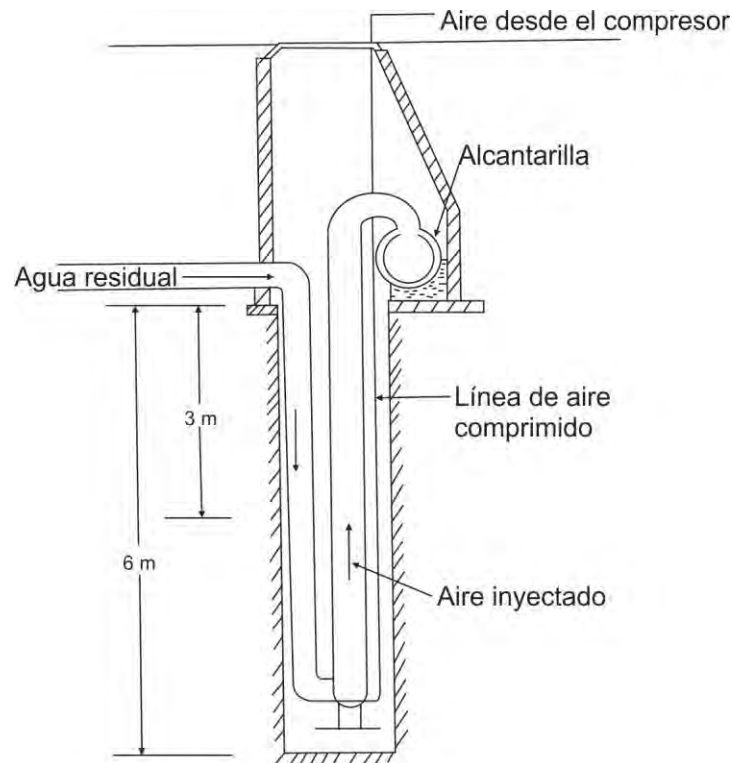


Figura 3.2 Ejemplo de una bomba de aire comprimido (EPA, 1985)

Tubo U

El aire es introducido en la parte superior de la primera tubería, como se puede ver en la figura 3.3; de la cual la mezcla aire-agua fluirá hacia abajo a través de un tubo de sección mayor. Esto permite reducir la velocidad y aumentar el tiempo de retención para provocar transferencia de oxígeno bajo condiciones de presión hidrostática crecientes. El oxígeno enriquece el agua residual y continua a través de la tubería de diámetro reducido para incrementar la velocidad y evitar que los sólidos se depositen.

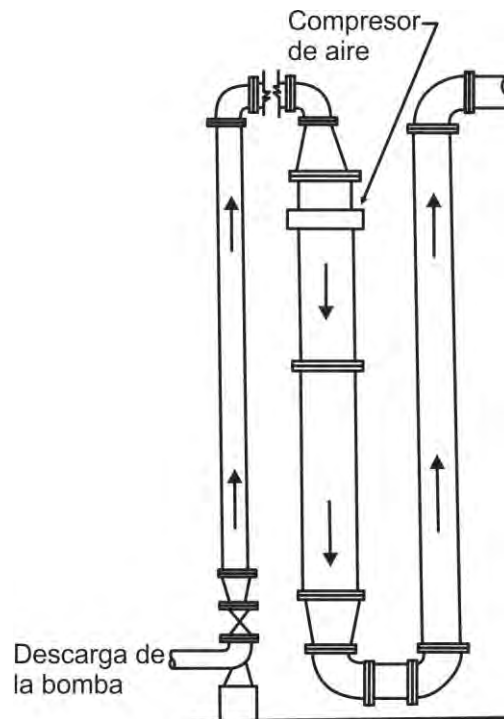


Figura 3.3 Tubo U (EPA, 1985)

3.2. Beneficios de inyectar aire a los conductos a presión que transportan agua residual

Como se discutió en el capítulo 2, el sulfuro es producido por bacterias anaerobias que reducen el sulfato, el cual normalmente está presente en las aguas residuales. Niveles de oxígeno disuelto por encima de 0.5 mg/l, generalmente, puede evitar la formación de sulfuro. El sulfuro se puede producir dentro de la biopelícula, pero si el oxígeno disuelto está presente, el sulfuro se oxida a medida que pasa a un ambiente aeróbico. Si el oxígeno disuelto no está presente, el sulfuro disuelto

entrará al volumen de agua residual, donde puede estar presente como gas de sulfuro de hidrógeno disuelto.

La aireación puede ser un método económico para controlar la generación de sulfuro si el aire se introduce por medios pasivos, tales como la presencia de condiciones turbulentas en el sistema. De otra manera, si se requiere equipo para comprimir e introducirlo en la tubería representará un costo considerable. Dos ventajas de este método son la reducción de la DBO y la no toxicidad en las aguas residuales. En una tubería a presión, una bolsa de aire puede formarse y causar problemas de carácter local, si la transferencia de oxígeno es inadecuada, incluso cuando está bien protegida por válvulas expulsoras de aire (EPA, 1992).

Cuando se utiliza un sistema de inyección de aire, es necesario:

- Estimar el oxígeno necesario por volumen de agua residual (mg/l de O₂), midiendo la tasa de consumo de oxígeno en el laboratorio.
- Estimar el oxígeno requerido por la biopelícula.
- Determinar el flujo de aire necesario.
- Seleccionar el tipo de inyección de aire más conveniente.

3.3. Causas por las que se acumulan bolsas de aire/gas en sistemas a bombeo

Para que un sistema de bombeo trabaje eficientemente se deben tomar en cuenta ciertas situaciones que pueden alterar el rendimiento del acueducto. Uno de estas situaciones es el aire que puede quedar atrapado a lo largo de la tubería si ésta no se diseña u opera correctamente.

En general, el aire que existe en las tuberías puede proceder:

- Del aire que llena la conducción antes de que entre en servicio.
- Del aire disuelto en el agua, que se desprende al disminuir la presión.
- De los vórtices que se forman en la succión.
- De pequeñas fisuras que puedan existir en las tuberías.

Las causas por las cuales se encuentra el aire dentro de los conductos a presión son variadas, por ejemplo, los acueductos contienen una importante cantidad de aire durante su llenado, si éste no es purgado por completo puede permanecer

atrapado en la línea. Asimismo, el aire puede introducirse a través de la succión de las bombas, como resultado de un mal diseño de los tanques de succión. Por otra parte, el agua contiene 2% de aire disuelto por volumen, cuando la presión se reduce en el sistema el aire se libera, formando cavidades que pueden ser comprimidas rápidamente por su baja densidad, provocando sobrepresiones que pueden dañar severamente las tuberías. Otra causa que da lugar a la presencia de aire en acueductos con varios cambios de pendiente en su perfil, son las interrupciones del suministro de agua (Pozos et al., 2008).

3.4. Efectos producidos por las bolsas de aire/gas

Debido a la acumulación de aire a lo largo de la tubería de un sistema, la puesta en marcha de los equipos de bombeo debe hacerse con mucho cuidado, para expulsar de forma controlada el aire a través de válvulas de aire para no producir sobrepresiones al comprimir de forma rápida las bolsas de aire acumuladas en algunos puntos del acueducto. Otro problema que plantean las acumulaciones de aire en las tuberías es la reducción de la sección útil de la tubería. El espacio que ocupa el aire se resta de la sección útil de la conducción, por lo que la vena líquida reducirá su diámetro en esos puntos. En consecuencia, también circulará el agua con mayor velocidad y se creará una pérdida de carga adicional.

Frecuentemente, los acueductos se diseñan sin considerar que el agua contiene aire disuelto, y algunas veces los ingenieros no toman en cuenta las causas que generan la entrada de aire a los mismos, además de los efectos perjudiciales que puede producir el aire atrapado.

Aun cuando el aire atrapado en acueductos a bombeo puede ser benéfico para prevenir la cavitación o para reducir los efectos perjudiciales causados por transitorios hidráulicos, en cantidades no controladas éste puede ser perjudicial. Por ejemplo, hay rangos de volúmenes de aire, los cuales pueden producir un incremento indeseable de las presiones durante el arranque o paro de las bombas en un acueducto. El efecto del aire en ambas situaciones dependerá de las causas que produzcan el transitorio, de la cantidad de aire acumulada, donde se localiza, y de la configuración del acueducto.

La presencia de aire atrapado en conductos a presión puede reducir de forma importante el transporte de agua en las líneas. En acueductos a bombeo la presencia de aire se puede reflejar en un incremento en el consumo de energía eléctrica y la reducción del gasto.

Un estudio realizado en una variedad de acueductos alrededor del mundo demostró que el aire atrapado puede:

- Reducir la eficiencia de los sistemas hasta en un 30%
- Disminuir entre un 15% a un 20% el gasto proporcionado por el sistema
- Incrementar la carga de presión en un 20%

Lo cual provocará que las bombas trabajen más forzadas, por lo tanto se demandará un mayor consumo de energía eléctrica.

Además, la fluctuación de presiones debido al movimiento, expansión y contracción de las bolsas de aire, causa vibraciones que pueden dañar las juntas y soportes de las tuberías. De igual manera, el aire atrapado en conductos a presión puede acelerar la corrosión en tuberías metálicas al aumentar la cantidad de oxígeno disponible, disminuyendo su resistencia y vida útil.

Por otra parte, el aire atrapado puede producir lecturas incorrectas en dispositivos de medición. La transición de tubo parcialmente lleno a tubo lleno causado por la presencia de una bolsa de aire, puede generar vibraciones en la tubería. Bolsas de aire de gran tamaño pueden regresar a contra flujo debido a su fuerza de flotación y dañar de forma importante algunas estructuras, tales como sifones y cajas rompedoras de presión (Pozos et al., 2008).

3.4.1. Pérdida de carga por bolsas de aire

El aire que se introduce a los acueductos es arrastrado por el flujo de agua y puede acumularse en puntos altos, formando bolsas de aire que pueden incrementar su tamaño si más bolsas o burbujas de aire se unen a éstas. Cuando una bolsa de aire se encuentra en un tramo de tubería con pendiente descendente, el agua trata de moverla hacia aguas abajo. Si la bolsa de aire es lo suficientemente grande, la fuerza de flotación de la bolsa podría igualar la fuerza de arrastre del agua, entonces la bolsa de aire permanecería estacionaria en la tubería, de esta manera la fuerza de fricción tiende a cero. Las fuerzas actuantes en una bolsa de aire se muestran en la figura 3.4.

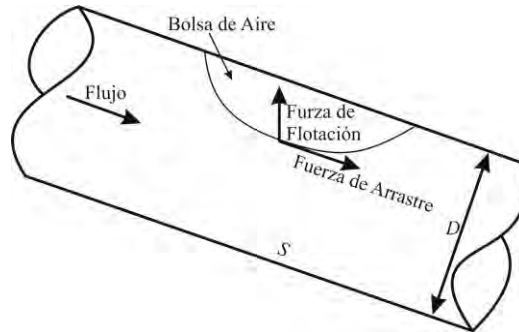


Figura 3.4 Fuerzas que actúan en una bolsa de aire estacionaria en una tubería con flujo de agua a tubo lleno

El aire atrapado reduce la sección transversal del conducto, presentándose un flujo como canal debajo de la bolsa de aire, provocando que la línea piezométrica sea paralela a la pendiente de la tubería, tal como se muestra en la figura 3.5.

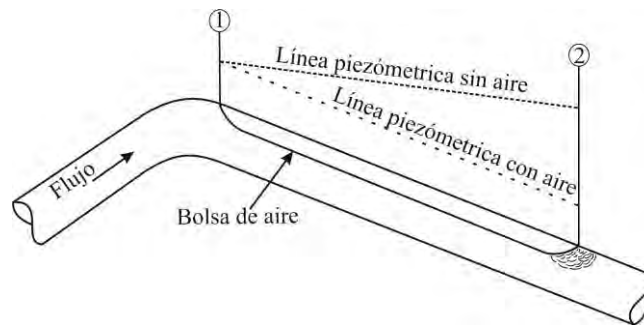


Figura 3.5 Bolsa de aire en una pendiente descendente.

Aplicando la ecuación de la energía entre los extremos de una bolsa de aire se puede comprobar, que la pérdida de carga es casi igual a la longitud de la componente vertical de la bolsa, esto se puede observar en las figuras 3.6 y 3.7.

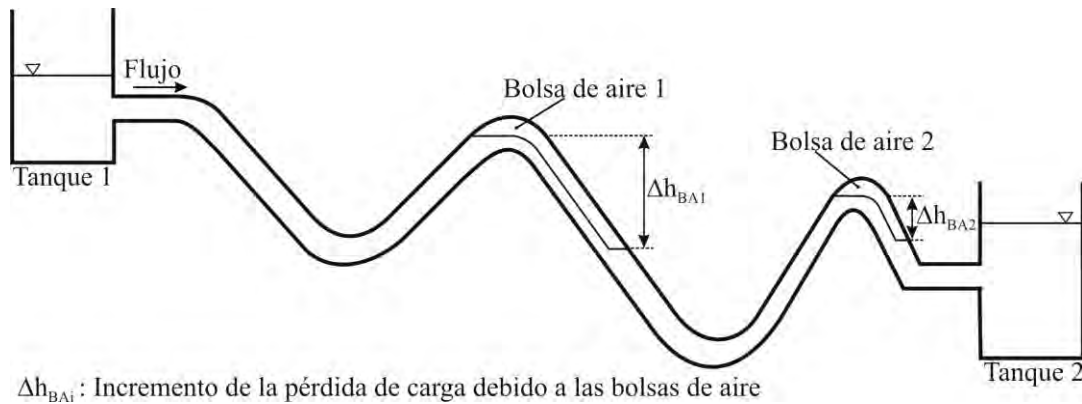


Figura 3.6 Bolsas de aire en un acueducto a gravedad

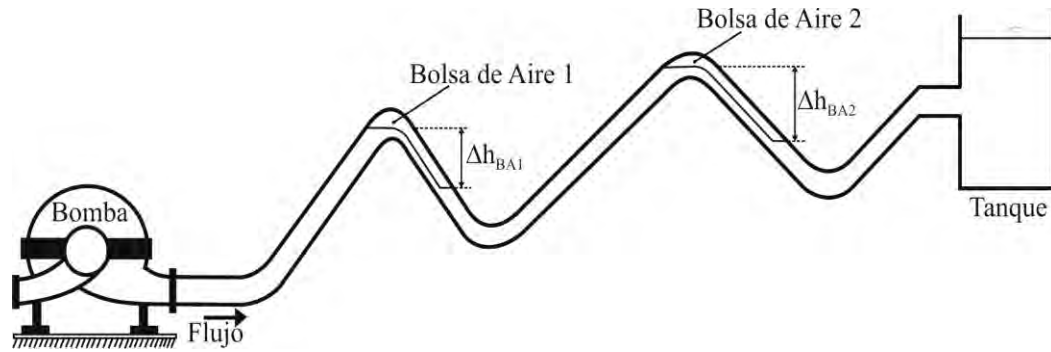


Figura 3.7 Bolsas de aire en un acueducto a bombeo

La mayor pérdida de carga provocada por el aire atrapado es causada por el cambio de la pendiente de la línea piezométrica, cuando el tubo fluye lleno y posteriormente cambia a flujo a superficie libre (Richards, 1962).

Puede ocurrir que el flujo a través de la línea se detenga por completo, debido a la pérdida de carga acumulada producida por varias bolsas de aire atrapadas. Esta pérdida puede ser mayor que la carga de la bomba.

Mientras más bolsas de aire se acumulen en los puntos altos de los acueductos, mayor será la pérdida de carga. Por lo tanto, la pérdida de carga total debe evaluarse como la suma de pérdidas producidas por cada bolsa de aire.

3.4.2. Efecto Blowback

La longitud de las bolsas de aire en la tubería puede ser de varias veces el diámetro de la misma. Si en algún tramo del acueducto existe un tubo con una pendiente descendente pronunciada, puede suceder que la bolsa de aire se estabilice alrededor de ésta y al mismo tiempo se presenta un salto hidráulico en el extremo aguas abajo de la bolsa, este fenómeno se ilustra en la figura 3.8.

La acción turbulenta del salto hidráulico causa que el aire entre y se mezcle con el agua que fluye en la tubería. Aguas abajo del salto hidráulico, el aire introducido puede formar burbujas de mayor tamaño y/o bolsas de aire y si éstas son lo suficientemente grandes, la fuerza de arrastre del agua no podrá superar la fuerza de flotación. Entonces, las burbujas y/o bolsas permanecerán estacionarias en la tubería, incrementando su tamaño al tiempo que más burbujas de aire llegan a unírseles.

Las bolsas de aire incrementarán su tamaño al mismo tiempo que se reduce su velocidad como resultado del aumento de la fuerza de flotación. Las bolsas de aire pueden regresar con una enorme fuerza a través del salto hidráulico, fenómeno conocido como blowback. Esta fuerza puede ser capaz de destruir parcial o

completamente la base de estructuras hidráulicas, como tanques y cajas rompedoras de presión.

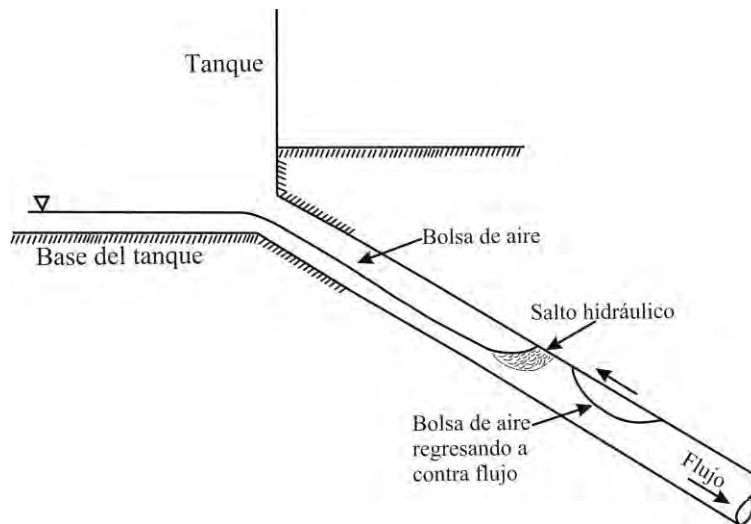


Figura 3.8 Efecto blowback

3.4.3. Golpe de ariete provocado por la evacuación de aire

El incremento de velocidad debajo de la bolsa de aire puede provocar el desprendimiento de una porción de la bolsa o bien su completa remoción como se muestra en la figura 3.9. El cambio abrupto de la velocidad del fluido, cuando la bolsa es removida y se instala en otro punto alto puede generar un golpe de ariete, el cual puede causar un daño considerable a accesorios, uniones e incluso puede provocar la ruptura de la tubería.

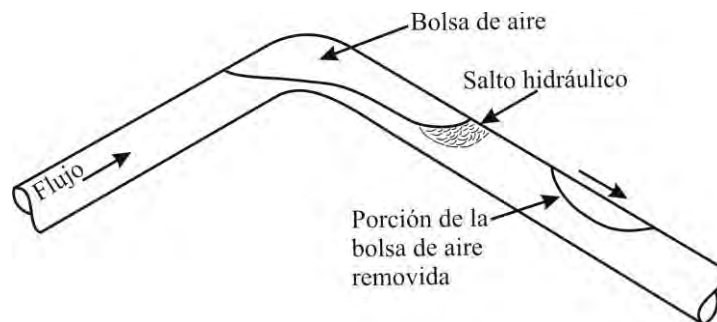


Figura 3.9 Golpe de ariete causado por remoción de una bolsa de aire

IV. Análisis del comportamiento del aire/gas en sistemas que transportan agua residual

4.1. Medios para la remoción de aire/gas

Debido a la importancia que representa el aire atrapado en los sistemas de bombeo, se debe implementar algún mecanismo que nos ayude a expulsarlo.

Si bien es cierto que la presencia de aire presenta varias ventajas, también es necesario tener en cuenta que en determinado momento este aire debe ser removido en forma controlada de la conducción, a fin de evitar la aparición de efectos indeseables como los ya descritos en puntos anteriores.

El primer mecanismo es el hidráulico, es decir, se aprovecha la inercia del flujo de agua para remover el aire en la línea. El segundo mecanismo es el mecánico, tales como válvulas de aire y venteos. El costo en el que se incurre al instalar válvulas de aire y/o excavar zanjas para lograr tener pendientes descendentes que permitan el movimiento de las burbujas y bolsas de aire hacia las válvulas es elevado. Por otra parte se puede tener un ahorro importante si el aire atrapado en los acueductos puede ser evacuado hidráulicamente (Pozos et al., 2008).

4.1.1. Medios Hidráulicos

A fin de transportar el aire atrapado en la conducción hasta los puntos donde pueda ser liberado a través de válvulas de aire, se requiere una velocidad mínima del agua en relación a la pendiente y diámetro de la tubería. Esta condición es de gran importancia para los tramos con pendiente descendente o bien horizontales, de las conducciones de transporte de agua, puesto que el movimiento natural de las burbujas de aire se opone al flujo de agua.

4.1.2. Medios mecánicos

Los medios mecánicos más utilizados para controlar la expulsión y la admisión de aire a los acueductos son las válvulas de aire, de las cuales se desprenden principalmente tres tipos:

- Válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA) o de gran orificio. Las VAEA son diseñadas para expulsar y admitir aire durante las

operaciones de llenado y vaciado del sistema, respectivamente. Este tipo de dispositivos no evacuan el aire cuando el acueducto trabaja a la presión de diseño.

- Válvula de expulsión de aire (VEA) o pequeño orificio. Estas válvulas expulsan pequeñas cantidades de aire, que podrían acumularse durante la operación normal del acueducto.
- Válvula de aire combinada (VAC) o de doble orificio. Las VAC combinan las funciones de las dos válvulas anteriores, y son usadas donde se requiere admitir aire al vaciar la línea y expulsar aire para llenar el acueducto, así como para expulsar pequeñas cantidades de aire acumulado durante la operación normal del acueducto.

Las válvulas de aire instaladas en los acueductos, pueden ocasionar problemas más graves, que los que se pretendían evitar. Un mal dimensionamiento de estos dispositivos, así como una deficiente respuesta o un funcionamiento incorrecto, derivado de la falta de mantenimiento, puede dar lugar a situaciones indeseadas. La operación ineficiente de estos dispositivos puede reducir la eficiencia del sistema en un 30%, lo que conlleva a un mayor consumo de energía eléctrica, para forzar las bombas a evacuar el aire atrapado en la línea.

Las válvulas de aire son dispositivos que permiten la salida de aire y gas corrosivo de las tuberías de aguas residuales. Pueden ser manuales o automáticas, siendo una de las más adecuadas las de tipo cinético, que tienen la ventaja de no cerrarse mientras se suministra aire a cualquier tasa de presión o velocidad de descarga. Mientras mayor es el tamaño de la válvula, esto le permitirá movilizar mayores cantidades de aire y gases corrosivos, mejorando el funcionamiento y evitando problemas de taponamiento por posibles impurezas, debido a que las aguas residuales contiene partículas en suspensión, mayormente de naturaleza orgánica.

Por lo anterior, los fabricantes han ideado diferentes modelos de válvulas de aire para sistemas de agua residual que permiten mantener alejada el agua residual de las partes críticas de la válvula, interponiendo por lo general un colchón de aire que minimiza los riesgos de obturación o mal funcionamiento. Otro aspecto a tener en cuenta es asegurar que la válvula no expulse líquido al exterior durante su operación. Esta característica, si bien no deseable, puede llegar a ser admisible para una válvula que trabaja con agua limpia; sin embargo, debe ser evitada cuando se trata de aguas residuales por los obvios riesgos inherentes de contaminación.

En las siguientes figuras pueden verse válvulas aptas para aguas residuales diseñadas por la empresa Regaber.



Figura 4.1 Válvula de aire, modelo S-020

La válvula S-020, ilustrada en la figura 4.1, es una válvula de aire automática cuyo diseño dinámico permite eliminar el aire de las tuberías con flujo de agua bajo presión. Su diseño especial la hace idónea para el uso en instalaciones de aguas residuales, ya que garantiza la completa separación de las aguas servidas del mecanismo de sellado al crear un espacio de aire en la parte superior de la válvula, incluso bajo condiciones extremas. El cuerpo de forma cónica mantiene una distancia máxima entre el líquido y el mecanismo de sellado, a la vez que se obtiene una mínima longitud del cuerpo. La parte inferior del cuerpo en forma de embudo asegura que los residuos se recojan al fondo, de donde pueden ser eliminadas fuera del sistema, por vía de la salida de drenaje o de una válvula de bola situada en la parte inferior de la válvula.



Figura 4.2 Válvula de aire k-020 para aguas residuales

La válvula K-020, figura 4.2, es una válvula de aire de efecto cinético cuyo diseño dinámico permite la descarga de aire a alta velocidad. Su diseño especial la hace idónea para el uso en instalaciones de aguas residuales, ya que garantiza la

completa separación de las aguas servidas del mecanismo de sellado al crear un espacio de aire en la parte superior de la válvula, incluso bajo condiciones extremas.



Figura 4.3 Válvula de aire modelo D-025

La válvula D-025, figura 4.3, es una válvula de aire de doble efecto cuyo diseño dinámico permite la descarga de aire a alta velocidad de grandes caudales a la vez que es capaz de eliminar el aire de las tuberías con flujo de agua bajo presión. Su diseño especial la hace idónea para el uso en instalaciones de aguas residuales. La junta articulada con resorte entre el flotador inferior y el flotador superior asegura que las vibraciones del flotador inferior no abran la válvula constantemente. La descarga de aire sólo ocurrirá cuando se haya acumulado un volumen suficiente de aire.

4.2. Metodología para ubicar los posibles puntos de acumulación aire/gas en conductos cerrados

En el presente capítulo se propone un método para localizar los puntos altos de los conductos a presión, donde el aire podría acumularse. Para validar el método propuesto se realizó una investigación teórica-experimental. La metodología aquí presentada puede ser aplicada para analizar acueductos ya construidos, así como aquellos que se encuentran en la fase de 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.

Método para analizar el movimiento de burbujas y bolsas de aire

Para el análisis del movimiento de burbujas y bolsas de aire en acueductos se recurre a fórmulas semiempíricas que, dependiendo del autor, varían ampliamente y quizá no sean adecuadas para el diseño de algunos acueductos. Las posibles causas de esta discrepancia son que las condiciones adoptadas por diferentes investigadores no son generales, además muchas de sus mediciones fueron realizadas en dispositivos experimentales con diámetros relativamente pequeños (50 mm).

Para la mejor comprensión del análisis se definen los siguientes términos:

- Velocidad de barrido: se usa para denotar la velocidad mínima del agua, v_b , para transportar una bolsa o burbuja de aire en un acueducto.
- Generación de burbujas: se refiere a la acción turbulenta del salto hidráulico que se presenta en el extremo aguas abajo de una bolsa de aire, la cual genera las burbujas de aire.
- Arrastre: es el término usado para describir el movimiento en dirección del flujo de las burbujas de aire introducidas por el salto hidráulico.

Velocidad de remoción: es la velocidad mínima del agua, v_r , para remover las burbujas o bolsas de aire fuera de la línea de conducción. Para ciertos acueductos la v_r va a ser igual que v_b , pero para otras configuraciones de líneas de conducción v_r tendrá que ser mayor que v_b . Walski et al. (1994) propusieron una ecuación para localizar los posibles puntos de acumulación de aire en líneas de conducción a bombeo que transportan aguas residuales. La relación fue validada mediante investigación experimental y mediciones hechas en campo. La siguiente ecuación fue obtenida al igualar las fuerzas de arrastre, flotación y gravedad.

$$\frac{0.88v_{nom}^2}{gDS^{0.32}} = P \quad (4.1)$$

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 va a acumular 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, pero si $P<1$ el aire se moverá hacia aguas arriba.

De igual manera, González y Pozos (2000) propusieron una relación analítica para determinar dichos puntos de interés. Analizaron el movimiento de las burbujas de aire estacionarias en una tubería fluyendo a tubo lleno, al balancear la fuerza de arrastre del flujo de agua y la fuerza de flotación de una burbuja contraria al flujo de agua, obtuvieron:

$$\frac{Q^2}{gD^5} = S \quad (4.2)$$

Siendo S la pendiente en el tramo analizado y el cociente del lado izquierdo, el parámetro de gasto adimensional (PGA).

Para determinar si las grandes bolsas de aire podrían permanecer en los cambios de pendiente de los acueductos, se debe calcular el PGA y posteriormente compararlo con todas las pendientes del acueducto. Cuando $PGA > S$, el aire se moverá con el flujo. Sin embargo, si $PGA < S$ el aire regresará a contra flujo. En este caso los puntos altos serán identificados como posibles puntos de acumulación de aire. Este procedimiento ha dado resultados satisfactorios.

Método para analizar el 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 (Walski et al. 1994; Pozos 2007), tal como se muestra en la figura 4.4.

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.

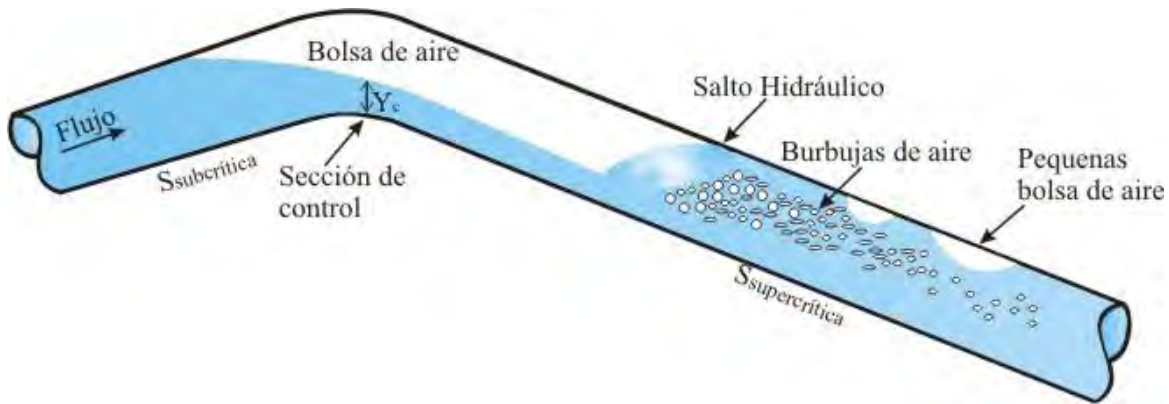


Figura 4.4 Acumulación de grandes burbujas de aire

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. 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 a 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.

Investigación experimental

Para validar la aplicación de la ecuación (4.2) 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.

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 una primer 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 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.

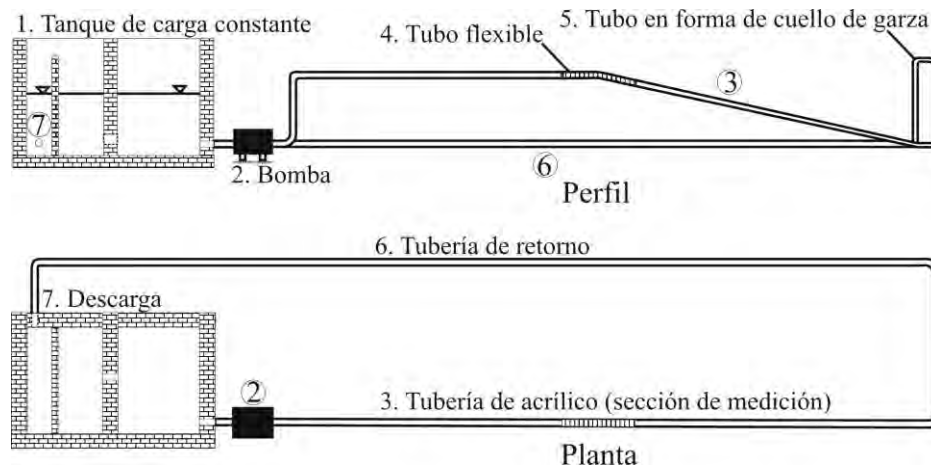


Figura 4.5 Planta y perfil del dispositivo experimental

La sección de medición en el dispositivo experimental se muestra en la figura 4.6.

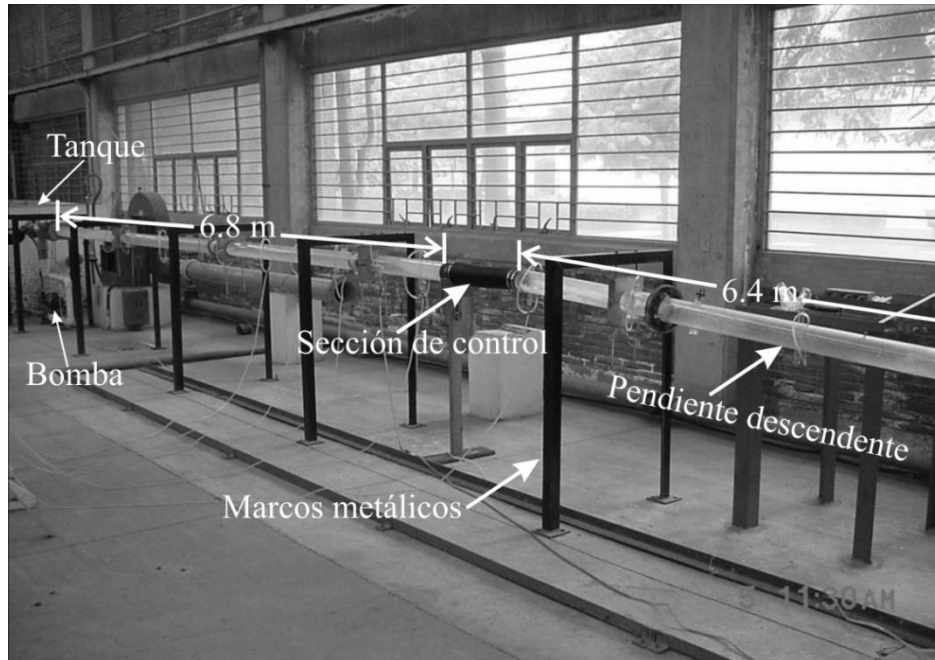


Figura 4.6 Sección de medición

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. 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 (4.2). 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 4.1.

Q (m ³ /s)	Q^2 / gD^5 (-)	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

Tabla 4.1 Movimiento de burbujas y bolsas de aire en una tubería con pendiente descendente, $D = 76.2$ mm

4.3. Cálculo del volumen de aire/gas acumulado en conductos cerrados

Como se describió anteriormente las bolsas de aire tienden a acumularse en los puntos altos e intermedios de los acueductos. Los volúmenes de aire contenidos en las bolsas se calcularon mediante una relación que ocupa algunas de las variables obtenidas al aplicar el Método del Paso Directo, tales como las áreas hidráulicas y la longitud de los tramos de tubería. La ecuación propuesta para determinar el volumen de aire contenido en una bolsa es:

$$V = \left\{ \left[A - \frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right] \Delta x_{i,i+1} + \left[A - \frac{A_{i+1} + A_{i+2}}{2} \right] \Delta x_{i+1,i+2} + \dots + \left[A - \frac{A_{i-m} + A_m}{2} \right] \Delta x_{i-m,m} \right\} \quad (4.3)$$

Donde V es el volumen de aire en la bolsa de aire ya sea aguas arriba o aguas abajo de la sección de control, A es la sección transversal total del tubo, A_i, A_{i+1}, \dots, A_m son las áreas de la sección transversal del flujo en secciones específicas a lo largo de la tubería, y $\Delta x_{i,i+1}, \Delta x_{i+1,i+2}, \dots, \Delta x_{i-m,m}$ denotan las longitudes de los tramos en los que fue dividido el tubo.

Para un acueducto a bombeo dado, el algoritmo de solución para calcular el volumen de las bolsas de aire puede resumirse de la siguiente manera:

- 1) Determinar los perfiles de flujo aguas arriba y aguas abajo de la sección de control, localizada en la transición de pendiente subcrítica a supercrítica.
 - Calcular los tirantes normales Y_n aguas arriba y aguas abajo de la sección de control
 - Calcular el tirante crítico o tirante de control $Y_c = Y_j$

Si $Y_n > Y_c$ el flujo va ser subcrítico, por otra parte si $Y_n < Y_c$ el perfil de flujo es supercrítico. Para un flujo subcrítico, los cálculos inician desde la sección aguas abajo del tubo y continúan hacia la sección aguas arriba, hasta que el tirante Y_m coincida con el diámetro interno del conducto. En este caso la sección i del primer tramo de tubo considerado coincide con el extremo aguas abajo del tubo, donde $Y_c = Y_i$ es conocido y utilizado como condición de frontera para iniciar el cálculo del perfil subcrítico. De la misma manera, para obtener el perfil de flujo supercrítico se procede desde aguas arriba hacia aguas abajo, hasta que el tirante se aproxime al tirante normal Y_n . Para comenzar con el cálculo del perfil el tirante $Y_c = Y_i$ es conocido, pues es el tirante que se presenta en el extremo aguas arriba del tramo del tubo.

Una vez conocidos todos los tirantes o condiciones de frontera y por convenir a los cálculos, se puede adoptar un incremento o decremento para evaluar los perfiles de flujo subcrítico y supercrítico utilizando las ecuaciones (4.4) y (4.5), respectivamente.

$$\Delta Y = \frac{Y_m - Y_i}{k} \quad (4.4)$$

$$\Delta Y = \frac{Y_i - Y_n}{k} \quad (4.5)$$

Donde ΔY puede ser el incremento o decremento, Y_m es la condición de frontera aguas arriba para el perfil subcrítico, $Y_c = Y_i$ es la condición de frontera aguas abajo y aguas arriba para el perfil subcrítico y supercrítico, respectivamente; k es el número de pasos para llegar al tirante deseado, que es comúnmente de 10 a 35.

2) Para cada Y_i , calcular el área hidráulica A_i , la velocidad media del agua v_i , el perímetro mojado P_i y el radio hidráulico R_i utilizando las ecuaciones (4.6) a (4.9).

$$A_i = \frac{D^2}{4(\theta - \text{sen}\theta \cos\theta)} \quad (4.6)$$

$$v_i = \frac{Q_i}{A_i} \quad (4.7)$$

$$P_1 = \theta D \quad (4.8)$$

$$R_i = \frac{A_i}{P_i} \quad (4.9)$$

donde θ se define como $\theta = \cos^{-1}(1 - \frac{2Y_i}{D})$.

- 3) Calcular la pendiente de fricción para la sección correspondiente, utilizando la ecuación de Manning, ecuación (4.10).

$$S_f = \left(\frac{nv}{R^{2/3}} \right)^2 \quad (4.10)$$

Obtener la longitud de los tramos de la tubería $\Delta x_{i,i+1}$ entre las secciones consecutivas i e $i+1$ con la ecuación (4.11). Los tramos de tubería se consideran siempre positivos.

$$\Delta x_{i,i+1} = \frac{E_i - E_{i+1}}{S - S_{fm}} = \frac{E_i - E_{i+1}}{S - 0.5(S_{fi} + S_{fi+1})} = \frac{(Y_i + v_i^2/2g) - (Y_{i+1} + v_{i+1}^2/2g)}{S - 0.5n^2(v_i^2/R_i^{4/3} + v_{i+1}^2/R_{i+1}^{4/3})} \quad (4.11)$$

Donde $\Delta x_{i,i+1}$ es la longitud del tramo de tubería, E_i y E_{i+1} son la energía específica aguas abajo y aguas arriba del tramo de tubería, respectivamente; S es la pendiente de la tubería; S_{fi} y S_{fi+1} son la pendiente de fricción aguas abajo y aguas arriba del tramo de tubería, respectivamente, que se obtiene de la ecuación de Manning (4.10). v_i y v_{i+1} son las velocidades del agua en la tubería aguas abajo y aguas arriba del tramo de tubería, respectivamente; R_i y R_{i+1} son el radio hidráulico aguas abajo y aguas arriba del tramo de tubería, respectivamente; y n es el coeficiente de fricción de Manning.

- 4) Repetir los pasos 2) a 4) para las siguientes secciones consideradas hasta obtener la longitud total del perfil.
- 5) Calcular el volumen de aire aguas arriba y aguas abajo de la sección de control con la ecuación (4.3), la cual también puede ser expresada como:

$$V = \sum_i^m \left[A - \frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right] \Delta x_{i,i+1} \quad (4.12)$$

Para una aplicación práctica de la ecuación (4.12), es recomendable iniciar con el cálculo del volumen de aire V_1 de la porción de la bolsa que se extiende hacia aguas arriba de la sección de control. Basados en la investigación experimental, se puede afirmar que este volumen de aire permanecerá constante, al llegar la porción de la bolsa de aire a su longitud total, posteriormente la bolsa continuará creciendo únicamente en la dirección del flujo. Aguas abajo del tirante crítico pueden calcularse diferentes volúmenes de aire V_2 , debido a que en algunos acueductos la entrada de aire puede ser continua. Por lo tanto, la suma acumulada de la longitud del perfil entre pasos consecutivos puede ser considerada para calcular el volumen de aire de varias bolsas de aire. El mayor volumen de aire se obtiene cuando el tirante de agua aguas abajo de la sección de control se aproxima al normal. Finalmente, el volumen de aire total será la suma

de V_1 y V_2 (Figura 4.7). En todo momento se considera que al final de la bolsa de aire ocurre un salto hidráulico.

La Figura 4.7 muestra los volúmenes de las bolsas de aire estacionarias que podrían presentarse en un acueducto.

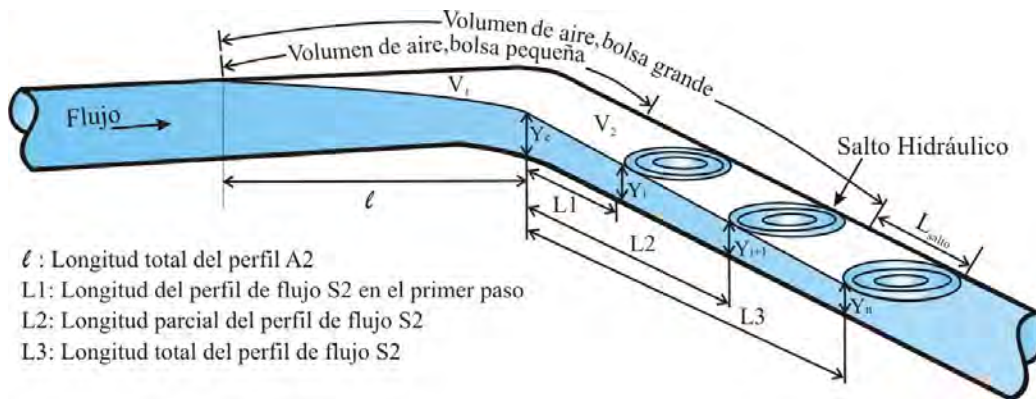


Figura 4.7 Volumen de una bolsa de aire estacionaria

Investigación experimental

Para simular distintos perfiles de flujo bajo las bolsas de aire con una presión mayor a la atmosférica, así como con flujo a superficie libre a presión atmosférica en la sección de medición, se realizaron tres experimentos en el dispositivo experimental ya descrito. Posteriormente, los datos experimentales obtenidos durante las pruebas fueron utilizados para calcular la forma de los perfiles de flujo usando la teoría del flujo gradualmente variado, para compararlos con los perfiles de flujo obtenidos experimentalmente.

La tubería de la sección de medición aguas arriba de la sección de control fue variada en tres ocasiones para poder reproducir los perfiles A2 ($S_{01} = -0.0063$), H2 ($S_{01} = 0.0$) y M2 ($S_{01} = 0.0060$), respectivamente. Durante todas las pruebas la pendiente descendente pronunciada permaneció en la misma posición ($S_{02} = 0.060$).

Para cada uno de los experimentos se llevaron a cabo tres pruebas diferentes para un gasto particular y dos volúmenes de aire diferentes.

Experimento 1. En este caso se tiene flujo a tubo lleno sin aire acumulado en la sección de control. Para esta condición la línea piezométrica fue medida y observada en un banco de manómetros, así como la diferencia en elevación Δh en el manómetro diferencial para calcular el valor experimental del coeficiente de fricción f_{exp} de Darcy – Weisbach, mediante la expresión (4.13)

$$f_{exp} = 12.103 \frac{\Delta h}{L_{SM}} \frac{D^5}{Q^2} \quad (4.13)$$

Donde L_{SM} es la longitud de la sección de medición en (m), y D es el diámetro de la tubería en (m).

Asimismo, el coeficiente de Manning n para cada una de las pruebas fue calculado en términos del factor de fricción f_{exp} al igualar la Ec. (4.13) con la fórmula de Manning, ecuación (4.14).

$$Q = \frac{AR^{2/3}}{n} \left(\frac{\Delta h}{L_{SM}} \right)^{1/2} \quad (4.14)$$

Donde A es el área transversal de la tubería en (m²), y R es el radio hidráulico en (m).

Después de reordenar términos se obtiene:

$$n = 0.09 f_{exp}^{1/2} D^{1/6} \quad (4.15)$$

Experimento 2. Para simular los perfiles de flujo bajo las bolsas de aire con una presión mayor a la atmosférica, se inyectaron volúmenes de aire conocidos a la sección de medición mientras la tubería fluía completamente llena. El aire se movía hacia el cambio de pendiente formando una bolsa de aire que permanecía estacionaria en la sección de control, al final de todas las bolsas de aire se presentó un salto hidráulico que selló el conducto. Asimismo, las burbujas de aire introducidas por el salto hidráulico hacia aguas abajo se unían formando burbujas de aire de mayor tamaño que retornaban continuamente hacia la bolsa de aire, por lo tanto, se considero que el volumen de aire permaneció constante durante la realización de todas las pruebas.

Durante esta prueba las siguientes variables fueron medidas:

- a) La diferencia en elevación Δh en el manómetro diferencial, cuando se tiene una bolsa de aire en la sección de control.
- b) La longitud total de la bolsa de aire y la longitud del salto hidráulico al final de la misma.
- c) Los tirantes de agua bajo las bolsas de aire.

Durante este experimento se llevaron a cabo dos pruebas, en ambas se mantuvo constante el gasto y se utilizaron dos volúmenes de aire distintos. Los gastos y volúmenes de aire se resumen en la tabla 4.2.

Experimento 2		Prueba 1			Prueba 2		
Pendiente	Tipo de flujo	Q (m ³ /s)	$V_{1inyectado}$ (m ³)	$V_{2inyectado}$ (m ³)	Q (m ³ /s)	$V_{1inyectado}$ (m ³)	$V_{2inyectado}$ (m ³)
Adversa	A2	0.0013	0.010	0.015	0.0017	0.005	0.010
Horizontal	H2	0.0017	0.010	0.015	0.0020	0.010	0.015
Suave	M2	0.0020	0.010	0.015	0.0023	0.010	0.015

Tabla 4.2 Gastos y volúmenes de aire usados en el experimento 2

Experimento 3. Durante la investigación se realizó la simulación de flujo a superficie libre a presión atmosférica. Primero se abrieron las válvulas colocadas a lo largo de la sección de medición, posteriormente se inclinó el tubo en forma de cuello de garza, hasta que la línea piezométrica cortara la sección de medición en el mismo punto donde el salto hidráulico selló el tubo durante la simulación de los perfiles de flujo en los ensayos durante el experimento 2, esto permitió que la conducción trabajara como canal a superficie libre. En la figura 4.8 se presenta un esquema de la sección de medición simulando este fenómeno. Los gastos utilizados durante el experimento 3 fueron los mismos que en el experimento 2.

Las variables medidas en esta ocasión fueron:

- Los tirantes de agua en los perfiles de flujo
- Las longitudes de los perfiles de flujo y de los saltos hidráulicos

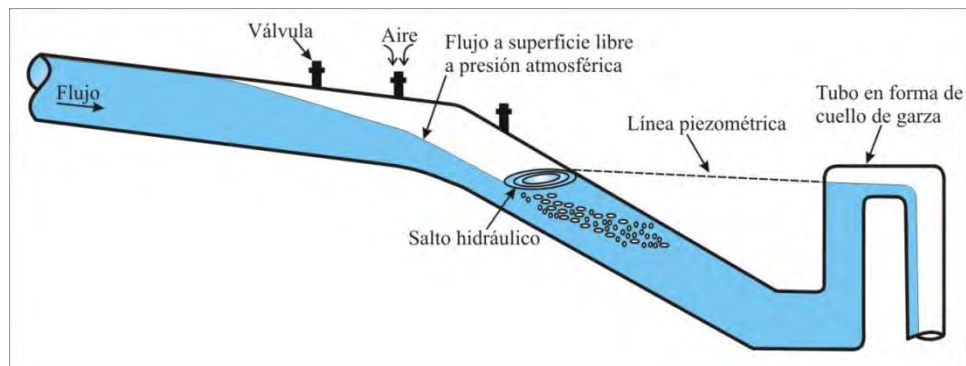


Figura 4.8 Sección de medición con flujo a superficie libre a presión atmosférica

A continuación se hace una breve descripción del flujo gradualmente variado y del método de paso directo.

4.3.1. Flujo gradualmente variado

El flujo gradualmente variado es un flujo establecido no uniforme de una clase especial. El tirante, la rugosidad, la pendiente del canal, el área y el radio hidráulico varían lentamente a lo largo del canal. La consideración básica requerida es que la pérdida de carga en una sección determinada del canal sea dada por la fórmula de Manning, ecuación (4.10), (Streeter y Wylie, 1985).

Para un determinado gasto, los tirantes Y_n (tirante normal) y Y_c (tirante crítico) dividen el canal en tres zonas.

Zona 1: el espacio encima de la línea superior

Zona 2: el espacio entre las dos líneas

Zona 3: el espacio debajo de la línea inferior

Los perfiles de flujo se clasifican de acuerdo con la pendiente del canal y dependiendo en que zona se encuentre el perfil de flujo. Los tipos de los perfiles de flujo se designan como: A2, A3; H2, H3; M1, M2, M3; C1, C2, C3; S1, S2, S3. Donde la letra describe la pendiente, A para adversa, H para horizontal, M para suave (subcrítica), C para crítica, S para pronunciada (supercrítica); y el número representa la zona. Los perfiles de flujo se presentan en la Figura 4.9.

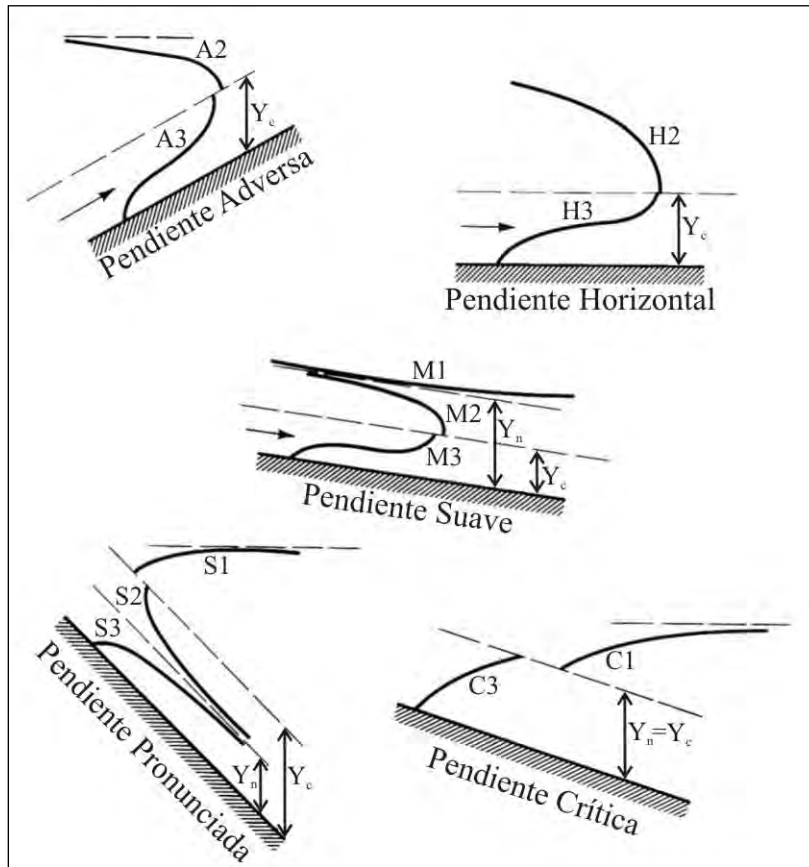


Figura 4.9 Clasificación de los perfiles del flujo gradualmente variado

En la figura 4.10 se muestran las variables que se usan en el cálculo de los perfiles del flujo gradualmente variado.

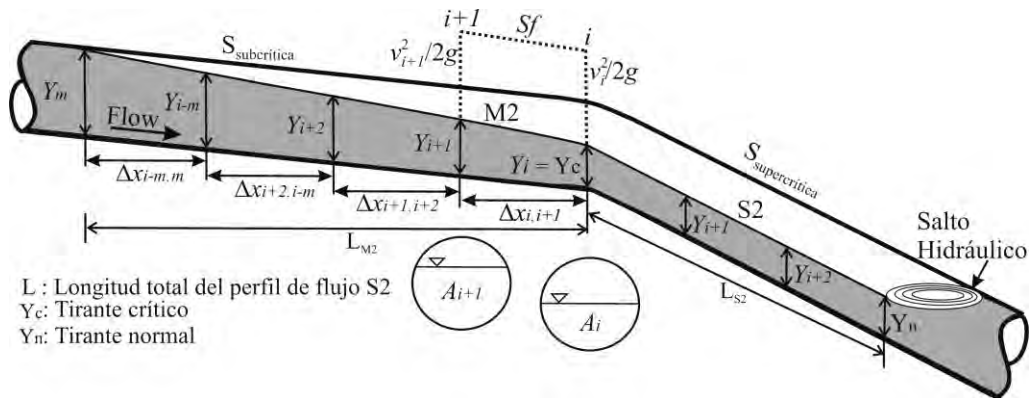


Figura 4.10 Variables utilizadas en el flujo gradualmente variado.

4.3.2. Algoritmo de cálculo

El Método de Paso Directo (MPD) es muy útil para calcular los perfiles de flujo, debido a su fácil aplicación en canales prismáticos. El MPD se caracteriza por dividir el canal en tramos y realizar el cálculo paso a paso desde un lado al otro de cada tramo.

Con los datos obtenidos durante la investigación experimental fueron calculados los perfiles de flujo utilizando el MPD. En todo momento el tirante que se presentó en la transición entre las dos pendientes de la sección de medición fue considerado como el crítico. Para cada una de las pruebas del experimento 2, los tirantes críticos asociados a cada gasto resultaron ser menores a los tirantes medidos en la tubería aguas arriba de la sección de control, por lo tanto el régimen de flujo que se presentó fue subcrítico ($Fr < 1$). Asimismo, los tirantes normales en la sección de tubería con pendiente descendente pronunciada fueron menores a los tirantes críticos correspondientes para los gastos ensayados, por lo tanto siempre se presentó un perfil supercrítico S2 en esta parte de la sección de medición.

Los perfiles de flujo en la tubería aguas arriba de la sección de control se calcularon en la dirección contraria al flujo hasta que el tirante fuese igual al diámetro interno de la tubería. De la misma manera, los perfiles S2 se evaluaron en la dirección del flujo, el cálculo se detuvo al encontrar la distancia a la cual se presenta el tirante normal.

Un ejemplo del cálculo de los perfiles de flujo mediante el método del paso directo se muestra en la Tabla 4.3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Y_i (m)	A (m ²)	R (m)	$R^{2/3}$ (m)	v (m/s)	$v^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f	S_{f_c}	$S - S_{f_c}$	Δx (m)	$\Sigma \Delta x$ (m)
0,0366	0,0022	0,0186	0,0700	0,6002	0,0184	0,0550	----	0,0060	----	----	0,0000	0,0000
0,0406	0,0025	0,0198	0,0731	0,5268	0,0141	0,0547	0,0003	0,0042	0,0051	0,0114	0,0223	0,0223
0,0445	0,0028	0,0209	0,0757	0,4698	0,0112	0,0558	0,0011	0,0031	0,0037	0,0100	0,1067	0,0843
0,0485	0,0031	0,0218	0,0778	0,4247	0,0092	0,0577	0,0019	0,0024	0,0028	0,0091	0,2098	0,2941
0,0524	0,0033	0,0224	0,0795	0,3885	0,0077	0,0601	0,0025	0,0019	0,0022	0,0085	0,2903	0,5844

Tabla 4.3 Perfil de flujo calculado con el método del paso directo

El procedimiento para calcular la forma de los perfiles de flujo se presenta a continuación, (Chow, 1981):

Columna 1: Tirante crítico en la sección de control de la bolsa de aire.

Columna 2: Área hidráulica correspondiente al tirante de la columna 1.

- Columna 3:** Radio hidráulico correspondiente al tirante de la columna 1.
- Columna 4:** Radio hidráulico elevado a la potencia $2/3$.
- Columna 5:** Velocidad media del flujo.
- Columna 6:** Carga de velocidad.
- Columna 7:** Energía específica obtenida al sumar el tirante de la columna 1 y la carga de velocidad de la columna 6.
- Columna 8:** Cambio de la energía específica, igual a la diferencia entre el valor de E en la columna 7 y el valor de E del paso anterior.
- Columna 9:** Pendiente de fricción calculada con la ecuación (4.5).
- Columna 10:** Valor promedio de la pendiente de fricción entre dos pasos, igual a la media aritmética de la pendiente de fricción recién calculada en la columna 9 y la evaluada en el paso anterior.
- Columna 11:** Diferencia entre la pendiente de la tubería y el promedio de la pendiente de fricción.
- Columna 12:** Longitud del tramo de tubería entre dos pasos consecutivos, calculado al dividir el valor de ΔE de la columna 8 entre el valor de la columna 11.
- Columna 13:** Distancia del perfil de flujo, es igual a la suma acumulada de los valores de la columna 12 calculados en los pasos previos.

Los perfiles de flujo evaluados con el método del paso directo se ilustran en las Figuras 4.11 a 4.13.

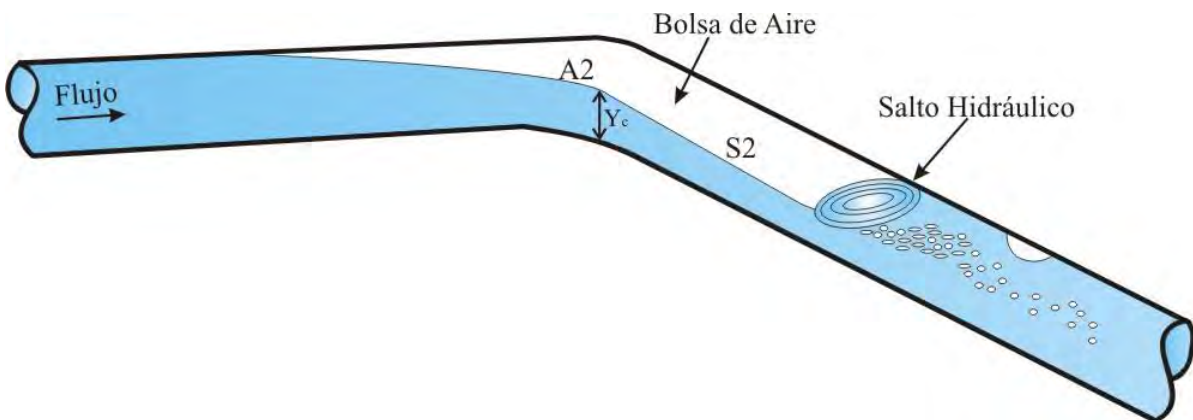


Figura 4.11 Perfiles de flujo A2 y S2

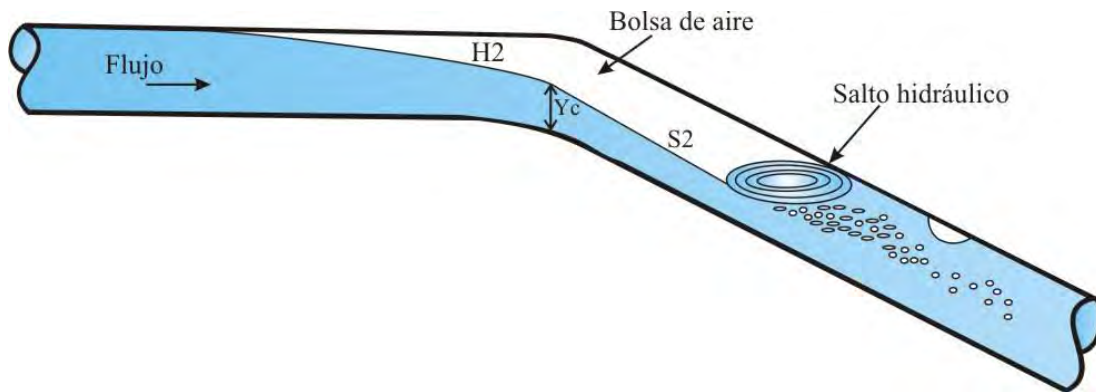


Figura 4.12 Perfiles de flujo H2 y S2

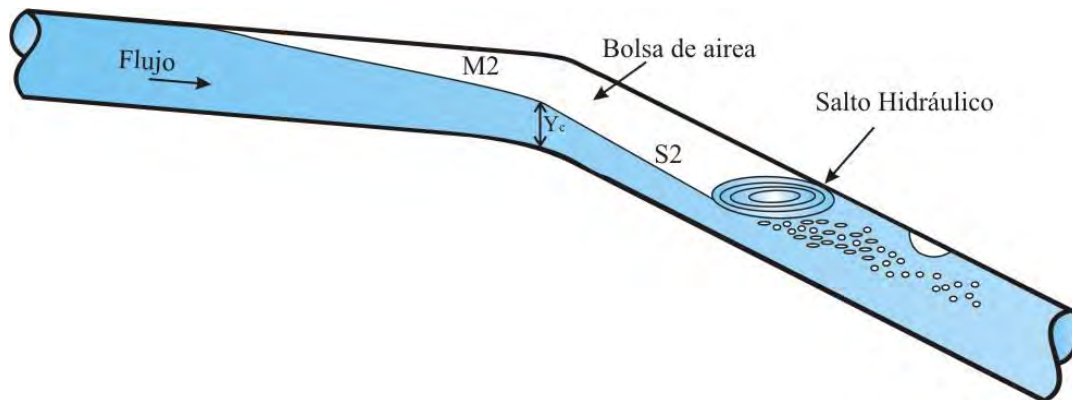


Figura 4.13 Perfiles de flujo M2 y S2

Después de analizar los resultados teóricos y experimentales, Pozos (2007) observó que los volúmenes de aire obtenidos usando la ecuación (4.12) son menores que los evaluados con la ley de Boyle. Esto se debe a que el volumen de aire sobre la superficie del salto hidráulico no es considerado, además los tramos de la tubería considerados al aplicar el método directo de pasos sucesivos no son lo suficientemente pequeños para obtener una mejor aproximación del volumen de aire. Asimismo, a partir de estos resultados, concluyó que los volúmenes de aire calculados con la ecuación (4.12) incrementan el factor de seguridad en el diseño de acueductos, debido a que pequeñas bolsas de aire localizadas en puntos altos e intermedios de acueductos a bombeo pueden amplificar la magnitud de las presiones transitorias generadas por un corte inesperado de energía en la estación de bombeo. Las bolsas de aire pequeñas y grandes se pueden definir en términos de su efecto en los fenómenos transitorios.

En cuanto a la forma de los perfiles de flujo, se observó que los perfiles obtenidos experimentalmente durante los experimentos 2 y 3 coinciden muy bien con los

perfiles calculados con el método directo de pasos sucesivos. Tal como se muestra en las figuras 4.14 a 4.16.

Es importante mencionar que en los experimentos realizados la presión en la sección de medición era ligeramente mayor a la presión atmosférica. Por lo tanto, los perfiles de flujo y los volúmenes de aire medidos y calculados fueron muy similares.

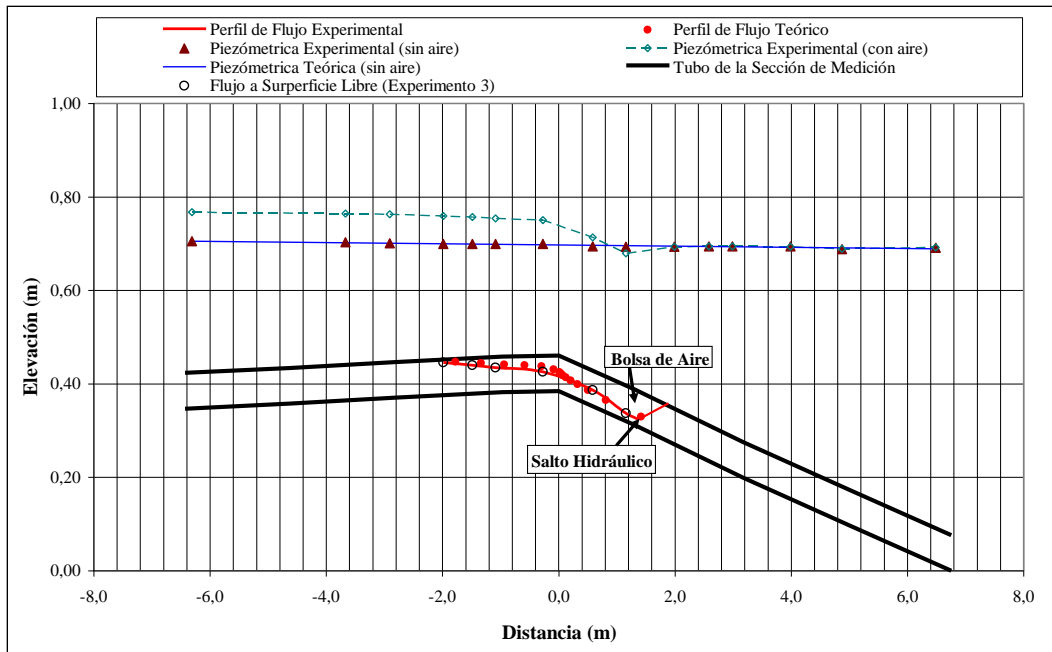


Figura 4.14 Perfiles de flujo A2 y S2, $Q = 0.013 \text{ m}^3/\text{s}$, $V = 0.01 \text{ m}^3$

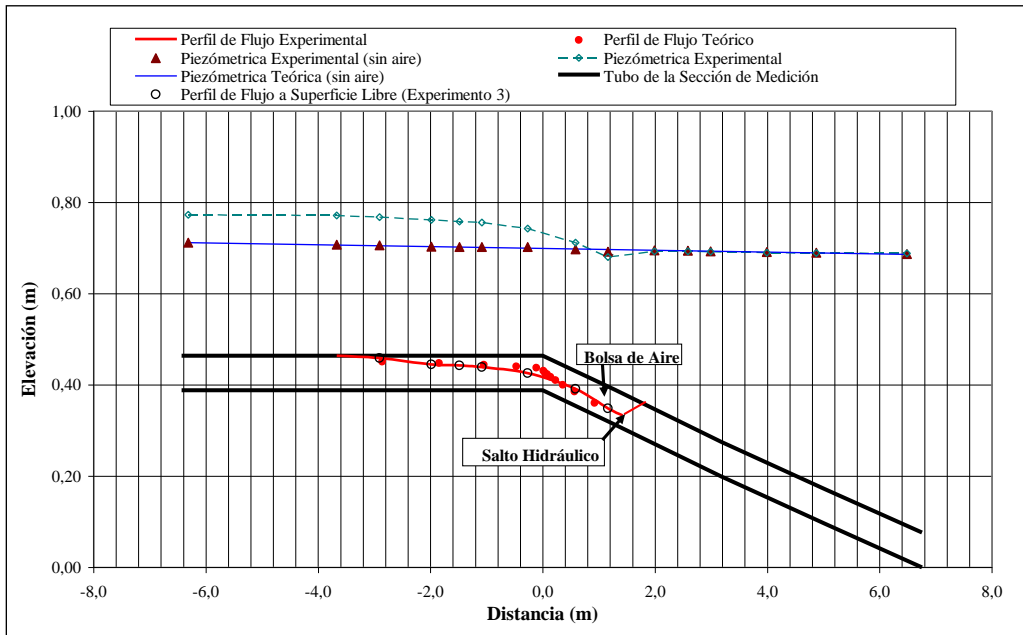


Figura 4.15 Perfiles de flujo H2 y S2, $Q = 0.017 \text{ m}^3/\text{s}$, $V = 0.01 \text{ m}^3$

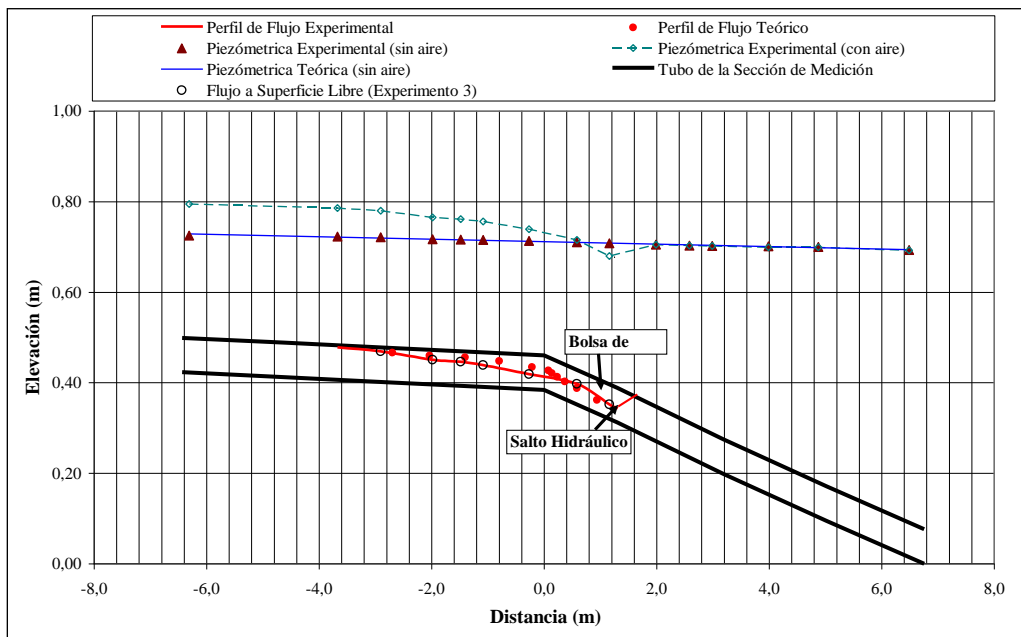


Figura 4.16 Perfiles de flujo M2 y S2, $Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, $V = 0.01 \text{ m}^3$

V. Problemas causados por el aire/gas en sistemas de bombeo que transportan aguas residuales

Como ya se mencionó en el capítulo III, hay varias causas por las que puede entrar aire en los sistemas de tuberías, es por esto que debemos considerar los problemas que puede ocasionar esta situación en caso de que se presente un fenómeno transitorio, ya que en muchas ocasiones se ha despreciado este efecto y se ha demostrado que puede dañar severamente las tuberías. El análisis de dichos problemas nos ayuda a proponer diseños más seguros y resistentes.

5.1. Fenómenos transitorios

En el momento en que se acciona la válvula de una tubería que contiene un líquido sometido a presión se altera la velocidad del mismo en la sección contigua al dispositivo, y se provoca una transformación de energía cinética a energía de presión. Esto implica la aparición de presiones locales distintas a las que había antes de la perturbación, lo que significa que se han formado ondas de presión y gradientes que las inducen a propagarse. El conjunto de ondas generadas se propaga alejándose de la válvula por la tubería hasta alcanzar una masa de líquido suficientemente grande como para reflejarse en ella y regresar hacia la válvula (Gardea, 1992).

Este fenómeno transitorio se conoce con el nombre del golpe de ariete y debe analizarse cuidadosamente para determinar la magnitud de las presiones que genera y diseñar una tubería capaz de resistirlas.

Dicho efecto no sólo se genera por la acción de una válvula, puede generarse debido al arranque de las bombas, al paro rápido o al fallo en el suministro eléctrico. Las condiciones más severas del golpe de ariete se producen durante las dos últimas.

Cuando se corta el suministro de energía al motor de una bomba, ésta se desacelera rápidamente desde su velocidad de régimen hasta cero, dando lugar a una rápida disminución del caudal descargado a la tubería. Esta disminución origina una onda de presión negativa que se traslada velozmente desde la estación de bombeo a lo largo de la tubería de impulsión hasta su extremo final, dando lugar a una desaceleración del caudal de acuerdo con la segunda ley de Newton. Cuando la onda de presión negativa alcanza el extremo final de la tubería de impulsión, sufre una reflexión que la hace desplazarse en forma de presión positiva hasta la estación de bombeo, desacelerando adicionalmente el flujo

durante su recorrido. Esto se repite hasta que toda la energía se disipa por la resistencia a la fricción de la tubería.

El tiempo empleado por la onda de presión en desplazarse por la tubería y volver al punto de partida se denomina tiempo crítico y está dado por:

$$T = \frac{2L}{a} \quad (5.1)$$

Donde

T Tiempo crítico, s

L Longitud de la tubería, m

a Celeridad de la onda de presión, m/s

La magnitud del incremento de presión en el punto de cambio del caudal es función de si el flujo se detiene al cabo de un intervalo de tiempo igual, menor o mayor que el tiempo crítico (Tchobanoglous, 1996).

Celeridad de la onda de presión

La celeridad de la onda de presión del golpe de ariete depende de las propiedades físicas del fluido y de la tubería de impulsión y de la aceleración de la gravedad.

Se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$a = \frac{1.440}{1+C_1(Kd/Ee)} \quad (5.2)$$

Donde

a Celeridad de la onda de presión, m/s

C_1 Coeficiente que depende del tipo de sujeción de la tubería.

K Módulo de masa del agua, estimado en 2.070 MN/m²

d Diámetro de la tubería, mm

E Modulo de elasticidad de la tubería, MN/m²

e Espesor de la pared de la tubería, mm

Magnitud del incremento de presión debida al golpe de ariete

La magnitud de la presión debida al golpe de ariete en el punto donde está situada la válvula para un cambio instantáneo de la velocidad puede derivarse por aplicación del principio del impulso mecánico:

$$h_{w(m\acute{a}x)} = \frac{aV}{g} \quad (5.3)$$

Donde

$h_{w(m\acute{a}x)}$	Presi3n máxima originada por el golpe de ariete, m
a	Celeridad de la onda de presi3n, m/s
V	Velocidad del fluido en la tubería, m/s
g	Aceleraci3n de la gravedad, 9.81 m/s ²

Puesto que la presi3n total en la tubería no puede ser inferior a la presi3n de vapor, un cierre instantáneo de una válvula en la descarga de una bomba puede producir la formaci3n de una cavidad de vapor en lugar de reducir la velocidad a cero.

En los casos que la velocidad disminuye hasta cero en un intervalo de tiempo T mayor a $2L/a$, lo cual corresponde a un cierre lento de una válvula o a una tubería de presi3n de corta longitud, el cambio se denomina lento.

Análisis del golpe de ariete

En la actualidad, el análisis del golpe de ariete se lleva a cabo por medio de programas adecuados sin tener que utilizar tantas hip3tesis simplificadoras como se hacía en el pasado con el método gráfico. Por ejemplo, con un programa adecuado, la tubería de impulsi3n puede dividirse en tantos tramos como sea necesario, cuyos puntos de separaci3n corresponden a los puntos altos del perfil o a cambios de diámetro o del material de la tubería.

El efecto de la existencia de puntos altos, la posibilidad de separaci3n de columna en los mismo puntos y las sobrepresiones que se producen al juntarse de nuevo las columnas de agua no son despreciables en absoluto y pueden ser analizadas perfectamente por un programa bien elaborado.

La forma del frente de la onda de presi3n depende de la relaci3n entre el par de deceleraci3n y la inercia (WR^2) de la bomba, de las características del líquido, del motor y de las condiciones de cierre de la válvula de descarga. Todos estos valores varían con el tiempo y pueden ser incorporados al programa, así como las características de las válvulas de sobrepresi3n o dispositivos supresores que se incluyan en el sistema. Como resultado, el uso de métodos numéricos y de programas de c3mputo para analizar las condiciones del golpe de ariete en tuberías de impulsi3n se han convertido en un sistema de cálculo rutinario. Existen diversos programas basados en las ecuaciones de continuidad y dinámica.

Control del golpe de ariete

El objetivo del control del golpe de ariete es limitar la variación de las presiones en la tubería de impulsión, dentro de un intervalo determinado de valores, mediante la reducción de las variaciones de la velocidad. Los sistemas de control del golpe de ariete necesarios para proteger las bombas y tuberías de impulsión pueden ser muy sencillos o muy elaborados. Los sistemas de control normalmente empleados son los siguientes:

- Válvula de retención situada en la descarga de las bombas, dotada de contrapeso y manivela para ayudar la maniobra de cierre.
- Válvula de retención de resorte situada en la descarga de las bombas.
- Válvula de retención de cualquiera de los dos tipos anteriores junto con una válvula reguladora de alta presión.
- Válvula de control positivo situada en la descarga, enclavada de manera que se abra a una presión predeterminada durante el arranque y cierre a velocidad prefijada después del corte de energía.
- Válvulas de purga y admisión de aire situadas en la estación de bombeo y en los puntos altos de la tubería de impulsión para limitar el desarrollo de presiones inferiores a la atmosférica.

5.1.1. Ecuaciones para simular flujo transitorio en conductos a presión

El flujo transitorio en conductos a presión se describe a partir de la ecuación dinámica y de continuidad. Estas ecuaciones se desarrollan a continuación.

Consideraciones

Las siguientes consideraciones se hacen en la derivación de las ecuaciones:

- El flujo en la tubería es unidimensional, y la distribución de la velocidad es uniforme a lo largo de la sección transversal del conducto.
- Las paredes del conducto y el fluido siguen un comportamiento elástico lineal, es decir, el esfuerzo es proporcional a la deformación. Esto es real para la mayoría de los conductos, tales como los de metal, concreto, madera, y túneles de roca.

Las formulas para calcular las pérdidas por fricción en flujo establecido, en conductos, son válidas para el flujo transitorio. Se ha observado que al utilizar un factor de fricción para flujo establecido en la simulación de flujo transitorio, subestima la atenuación de la onda de presión (Chaudhry et al. 1985, 1990). Aún

cuando se han hecho avances en este tema, hasta ahora no hay un modelo práctico para predecir el efecto de la fricción en flujo transitorio.

Shuy y Aplet (1983) y Fok (1987) condujeron una intensiva revisión literaria en esta materia. Sus conclusiones muestran que no hay una diferencia significativa entre usar un factor de fricción para flujo establecido o uno para flujo transitorio, para el diseño de un conducto a presión, cuando lo más importante por considerar en el análisis son las presiones máximas a las que va estar sometida la tubería. Sin embargo, las diferencias son grandes para cargas mínimas al utilizar uno u otro de los factores de fricción para predecir presiones subatmosféricas, que conllevan a la posible ocurrencia de cavitación. Es decir, en caso de no producirse separación de columna líquida en la conducción, los factores de fricción no producirán diferencias significativas en los resultados.

Ecuación Dinámica

Se usará la siguiente notación: distancia x , gasto Q , y velocidad del flujo v , son consideradas positivas en dirección aguas abajo, (Figura 5.1), y H es la carga piezométrica al eje del tubo por encima del nivel de referencia.

Se considerará un elemento horizontal del fluido que tiene un área transversal A y longitud δx , dentro de un conducto como se muestra en la figura 5.1. Si las carga piezométrica y la velocidad en una distancia x son H y V , entonces sus valores correspondientes en $x + \delta x$ son $H + (\partial H/\partial x)\delta x$ y $V + (\partial V/\partial x)\delta x$, respectivamente.

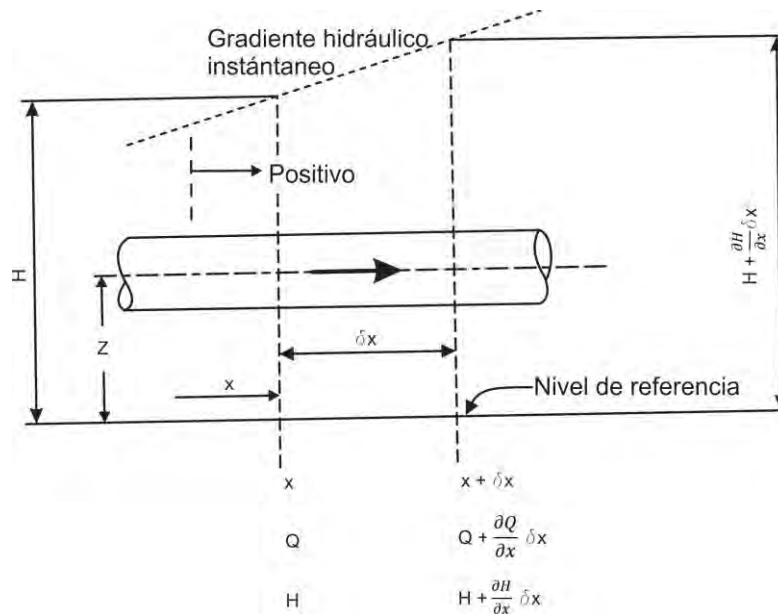


Figura 5.1 Elemento horizontal (Chaudhry, 1987)

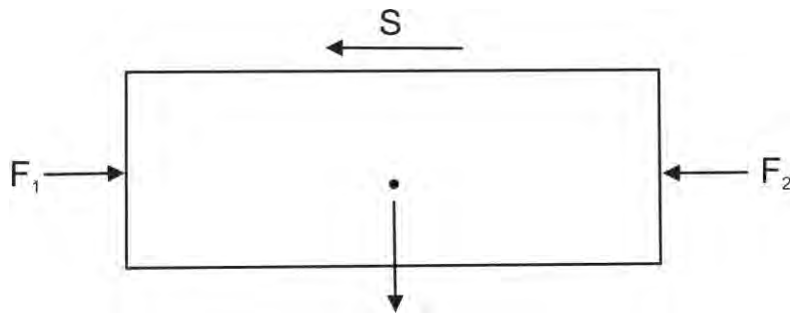


Figura 5.2 Diagrama de cuerpo libre (Chaudhry, 1987)

En la dirección de x , tres fuerzas, F_1 , F_2 , y S , están actuando sobre el elemento. F_1 y F_2 son fuerzas debidas a la presión mientras que S es la fuerza cortante debida a la fricción. Donde γ es peso específico del fluido, A el área transversal del conducto, y z la altura del conducto sobre el nivel de referencia, entonces

$$F_1 = \gamma A(H - z) \quad (5.4)$$

$$F_2 = \gamma \left(H - z + \frac{\partial H}{\partial x} \delta x \right) A \quad (5.5)$$

Si usamos la formula de Darcy-Weisbach para calcular las pérdidas de fricción, entonces la fuerza cortante queda:

$$S = \frac{\gamma f V^2}{g} \pi D \delta x \quad (5.6)$$

En la cual g es la aceleración debida a la gravedad, f el factor de fricción, y D el diámetro del conducto. La fuerza resultante F que actúa sobre el elemento está dada por la ecuación

$$F = F_1 - F_2 - S \quad (5.7)$$

Sustituyendo las expresiones F_1 , F_2 , y S dadas por las ecuaciones 5.4 a la 5.6 en 5.7 obtenemos

$$F = -\gamma A \frac{\partial H}{\partial x} \delta x - \frac{\gamma f v^2}{g} \pi D \delta x \quad (5.8)$$

De acuerdo con la segunda ley de movimiento de Newton,

$$\text{Fuerza} = \text{Masa} \cdot \text{Aceleración} \quad (5.9)$$

Para el elemento del fluido que se consideró,

$$\left. \begin{aligned} \text{Masa del elemento} &= \frac{\gamma}{g} A \delta x \\ \text{Aceleración del elemento} &= \frac{dv}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (5.10)$$

Sustituyendo las ecuaciones 5.8 y 5.10 en la ecuación 5.9 y dividiendo entre $\gamma A \delta x$ obtenemos

$$\frac{dv}{dt} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{fv^2}{2D} \quad (5.11)$$

De cálculo elemental, sabemos que la derivada total

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (5.12a)$$

ó

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + V \frac{\partial v}{\partial x} \quad (5.12b)$$

Sustituyendo la ecuación 5.12b en 5.11 y reordenando,

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fV^2}{2D} = 0 \quad (5.13)$$

En la mayoría de los problemas transitorios, el término $V(\partial v/\partial x)$ es significativamente más pequeño que el término $\partial v/\partial t$. Por lo tanto, el primero puede ser despreciado. Para tomar en cuenta el flujo en reversa, la expresión v^2 en la ecuación 5.13 puede escribirse como $v|v|$, en el cual $|v|$ es el valor absoluto de v . Escribiendo la ecuación 5.13 en términos del gasto Q y reordenando obtenemos:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (5.14)$$

En las ecuaciones 5.6, 5.8, 5.11, 5.13 y 5.14, la fórmula de Darcy-Weisbach ha sido utilizada para calcular las pérdidas por fricción.

Ecuación de Continuidad

Se considerará el volumen de control mostrado en la figura 5.3. El volumen de entrada del flujo, V_e , y el de salida, V_s , durante el intervalo de tiempo δt son

$$V_e = V\pi r^2 \delta t \quad (5.15)$$

$$V_s = \left(V + \frac{\partial V}{\partial x} \delta \right) \pi r^2 \delta t \quad (5.16)$$

Donde r es el radio del conducto. El aumento en el volumen del líquido δV_e durante el tiempo δt es

$$\delta V_e = V_e - V_s = -\frac{\partial V}{\partial x} \delta x \delta t \pi r^2 \quad (5.17)$$

El cambio en la presión δp , durante el intervalo de tiempo δt es $(\partial p / \partial t) \delta t$. Este cambio en la presión ocasiona que las paredes del conducto se expandan o contraigan radialmente y provoca que la longitud del elemento aumente o disminuya debido a la compresibilidad del líquido (Figura 5.3).

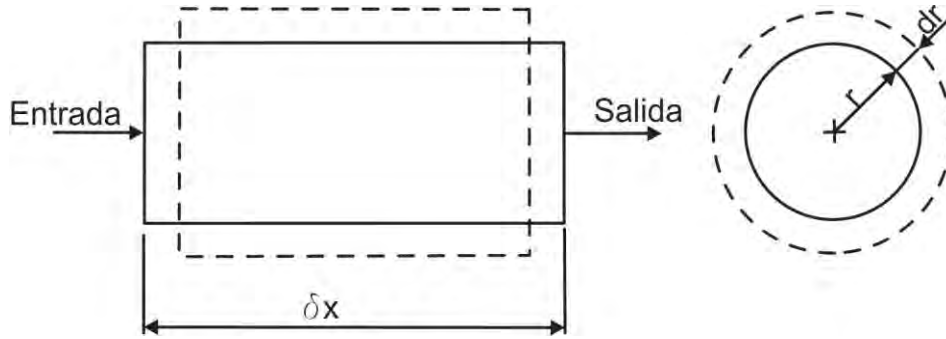


Figura 5.3 Volumen de control (Chaudhry, 1987)

Primero se considera el cambio de volumen δV_r , debido a la expansión o contracción radial del conducto. El esfuerzo radial σ en un conducto debido a la presión está dado por la ecuación (5.18).

$$\sigma = \frac{pr}{e} \quad (5.18)$$

Donde e es el espesor de las paredes del conducto. Por consiguiente, el cambio en el esfuerzo radial $\delta \sigma$ causado por δp se puede escribir como:

$$\delta \sigma = \delta p \frac{r}{e} = \frac{\partial p}{\partial t} \delta t \frac{r}{e} \quad (5.19)$$

Donde el radio r ha aumentado a $r + \delta r$, el cambio en deformación es:

$$\delta \epsilon = \frac{\delta r}{r} \quad (5.20)$$

Si se considera que las paredes del conducto tienen un comportamiento elástico lineal, entonces se puede expresar como:

$$E = \frac{\delta\sigma}{\delta\epsilon} \quad (5.21)$$

Donde E es el módulo de elasticidad de Young. Sustituyendo las ecuaciones 5.19 y 5.20 en la ecuación 5.21, obtenemos

$$E = \frac{(\partial p/\partial t)\delta t(r/e)}{\delta r/r} \quad (5.22)$$

ó

$$\delta r = \frac{\partial p}{\partial t} \frac{r^2}{eE} \delta t \quad (5.23)$$

El cambio de volumen del elemento debido a la expansión o contracción radial del conducto es

$$\delta V_r = 2\pi r \delta x \delta r \quad (5.24)$$

Sustituyendo 5.23 en la ecuación 5.24, tenemos

$$\delta V_r = 2\pi \frac{\partial p}{\partial t} \frac{r^3}{eE} \delta t \delta x \quad (5.25)$$

Generando una expresión para el cambio de volumen δV_c debida a la compresibilidad del fluido. El volumen inicial del elemento es

$$V = \pi r^2 \delta x \quad (5.26)$$

El modulo de elasticidad volumétrico de un fluido se expresa por K y está definido como:

$$K = \frac{-\delta p}{\delta V_c/V} \quad (5.27)$$

Sustituyendo V y señalando que $\delta p = (\partial p/\partial t)\delta t$, la ecuación 5.27 queda

$$\delta V_c = \frac{-\partial p}{\partial t} \frac{\delta t}{K} \pi r^2 \delta x \quad (5.28)$$

Si consideramos que la densidad del líquido permanece constante, entonces esto sigue la ley de la conservación de la masa

$$\delta V_e + \delta V_c = \delta V_r \quad (5.29)$$

La sustitución de las expresiones para δV_e , δV_c y δV_r de las ecuaciones 5.17, 5.25, y 5.28 en la ecuación de arriba y la división entre $\pi r^2 \delta x \delta t$, obtenemos

$$\frac{-\partial V}{\partial x} - \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{2r}{eE} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (5.30)$$

ó

$$\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} \left(\frac{2r}{eE} + \frac{1}{K} \right) = 0 \quad (5.31)$$

Ahora se define la velocidad de las ondas del golpe de ariete como

$$a^2 = \frac{K}{\rho[1+(KD/eE)]} \quad (5.32)$$

Donde ρ es densidad de masa del líquido. Señalando que $p = \rho gH$, reordenando los términos, y sustituyendo $Q = vA$, la ecuación 5.31 resulta

$$\frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (5.33)$$

5.1.2. Dispositivos supresores de transitorios

Generalmente la protección contra los transitorios puede lograrse de diversas formas y con diferentes medios. La tarea es seleccionar la variante más conveniente. El criterio determinante más frecuente es el económico, es decir, se busca la variante con un mínimo de costos para la protección, su mantenimiento, gastos complementarios por concepto de energía eléctrica, etc., manteniendo el golpe de ariete dentro de los límites permisibles; pero también puede ser otro como una máxima seguridad (en el caso de obras importantes), etcétera.

Excepcionalmente existen casos cuando en vez de emplear una protección antiarriete resulta más oportuno el uso de tuberías y accesorios con una resistencia mayor o de una clase superior.

Torre de oscilación

La torre de oscilación representa un cilindro conectado con la tubería, que en su parte superior está abierto y se comunica directamente con la atmósfera. En un régimen permanente la elevación del nivel de agua en la torre es igual a la carga piezométrica en la tubería. Las torres de oscilación aseguran la entrada de agua a la tubería al bajar la presión en ésta, y reciben el agua que sale de la tubería al subir la presión. El funcionamiento de la torre de oscilación es tanto más efectivo para reducir el golpe de ariete, cuanto mayor sea el área de la superficie libre de agua en ella. Ésta es la razón por la cual frecuentemente las torres de oscilación se construyen con diámetro variable. La parte donde suceden las oscilaciones del nivel de agua se construye con un diámetro mayor y se conecta con la tubería por medio de una conexión de diámetro menor (Figura 5.4).

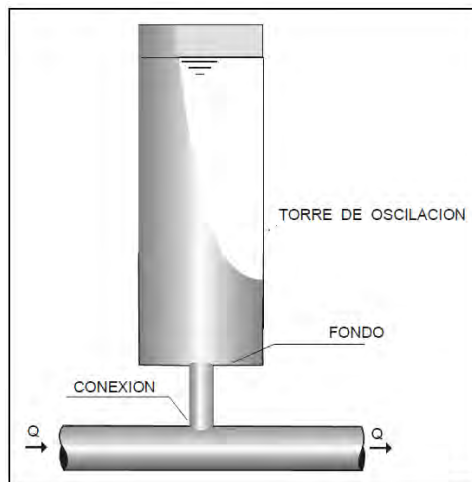


Figura 5.4 Torre de oscilación (MAPAS, 2007)

La torre de oscilación es un elemento de protección que presenta varias ventajas, pero cuyas desventajas pueden ser asimismo importantes. Es más, si no se tienen en cuenta los efectos secundarios que pueden generarse en la conducción por la instalación de una torre de oscilación pueden llegar a generarse sobrepresiones incluso mayores que las que se tendrían sin torre alguna.

Las ventajas que presenta la torre de oscilación son:

- La simplicidad de funcionamiento de este dispositivo, unida al hecho de que no requiere mantenimiento mecánico alguno.
- No necesita de mecanismo adicional alguno para llenar y reponer el volumen de agua aportado durante el transitorio. Únicamente se debe tener

la precaución de dar a la torre una altura suficiente para que no rebose por su parte superior durante el proceso de arranque de la instalación.

Las desventajas que presenta la instalación de una torre de oscilación son básicamente dos:

- La primera es derivada de la geometría que debe tener la torre de oscilación. La altura máxima de la torre (cota de coronamiento de la misma) debe ser superior a la altura piezométrica en el punto en que se instale. Además la cota del entronque de la torre con la conducción debe ser inferior a la altura piezométrica para caudal nulo, a fin de evitar que se vacíe de agua durante los períodos de tiempo en que la instalación esté parada. Estas limitaciones condicionan en gran medida la geometría que debe tener la torre así como la obra civil que es necesario realizar para su instalación.
- La segunda de las desventajas es la relativa al comportamiento que tiene la torre durante el transitorio en una línea de bombeo. El fenómeno que se origina es el siguiente. Al producirse el paro de las bombas, la torre de oscilación mantiene la altura piezométrica más o menos constante. Por el contrario la altura piezométrica en el punto inmediatamente aguas abajo de la bomba desciende en ocasiones con bastante rapidez. Esta diferencia de presiones origina que el flujo se invierta con mayor rapidez incluso que en el caso de no existir la torre. Esta fuerte desaceleración e inversión del flujo lleva consigo asociados dos fenómenos. Por un lado pueden generarse velocidades de giro inversas en la bomba bastante importantes en el caso de no disponer de válvula de no retorno. Por otro lado, en el caso de instalarse una válvula de no retorno para evitar velocidades de giro inversas en la máquina, se generan fuertes sobrepresiones al cerrarse ésta. Estas sobrepresiones pueden ser superiores a las que se generan sin la presencia de la torre.

Cámara de aire

Es uno de los dispositivos más utilizados para el control de transitorios, particularmente para la protección de instalaciones de bombeo frente al transitorio originado por el fallo del suministro eléctrico. Consiste en un depósito cerrado, unido a la tubería y que en su parte superior tiene comprimido un volumen de aire (Figura 5.5). Durante el trabajo normal en régimen permanente el aire en la cámara está comprimido a una presión igual a la presión del agua dentro de la tubería, no existiendo flujo entre la cámara y la tubería. Al bajar la presión dentro

de la tubería, surge un flujo desde la cámara. A la tubería entra un gasto que reduce las depresiones del transitorio. El volumen de aire dentro de la cámara se expande y su presión disminuye. Al subir posteriormente la presión en la tubería se genera un flujo hacia la cámara. El gasto que fluye hacia la cámara alivia las sobrepresiones en la tubería, el aire dentro de la cámara disminuye su volumen y su presión aumenta (el aire se comprime).

De esta manera, inmediatamente después del fallo en el suministro eléctrico de las bombas la cámara de aire se convierte en una fuente de energía que tiende a mantener el movimiento del fluido en la conducción. El caudal en la tubería se reduce de una forma controlada y mucho más lenta de lo que ocurriría sin la presencia de la cámara. Se trata pues de convertir un transitorio rápido en un fenómeno de oscilación de masa.

Mientras mayor sea el volumen de aire tanto más eficaz resulta la cámara de aire para reducir las depresiones y sobrepresiones. Por otra parte, con un volumen de aire insuficiente la cámara puede provocar incluso presiones más altas que aquellas que pudieran producirse sin medios de control alguno. Por esta razón, es imprescindible mantener el volumen de aire requerido al operar el sistema. Si no se toman medidas para mantenerlo, el volumen de aire rápidamente disminuye debido a su disolución en el agua y debido a posibles fugas en las conexiones de diferentes manómetros y juntas.

Ventajas e inconvenientes que presenta una cámara de aire:

- La primera ventaja fundamental de la cámara de aire frente a la torre de oscilación y al tanque unidireccional es que el efecto sobre la onda de presión negativa inicial no depende de la cota inicial de la superficie libre de agua en la cámara de aire. Esta diferencia hace que la cámara de aire sea especialmente útil para instalaciones cuyo perfil no permite la instalación de los citados dispositivos de protección.
- La independencia de instalación de la cámara de aire, hace que ésta pueda instalarse en la mayoría de las ocasiones cerca de la planta de bombeo. Esta instalación próxima a la planta de bombeo facilita la alimentación del compresor, además reduce en muchas ocasiones los gastos de mantenimiento del mismo, respecto a la situación en que la cámara de aire estuviese alejada de la planta de bombeo.

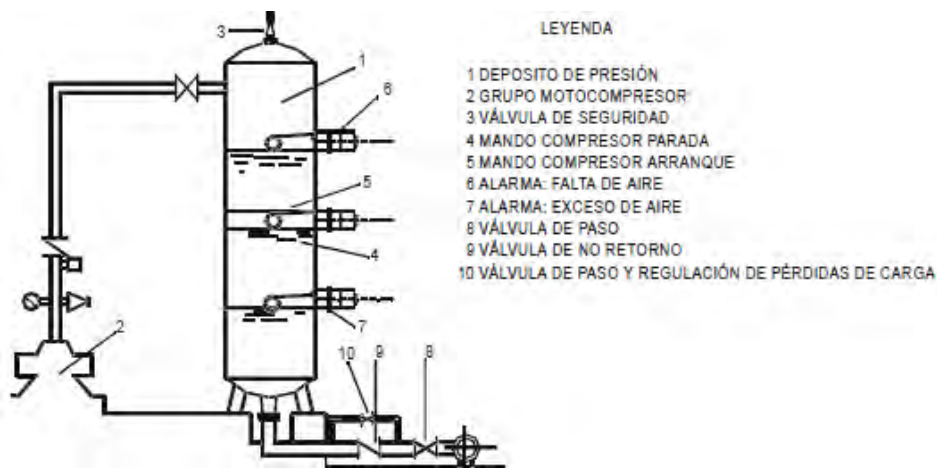


Figura 5.5 Cámara de aire (MAPAS, 2007)

Pero la cámara de aire no ofrece únicamente ventajas respecto de la torre y el tanque unidireccional, sino que presenta una serie de desventajas:

- La primera desventaja que presenta la cámara de aire, fundamentalmente frente a la torre de oscilación es que si bien reduce la onda de depresión inicial, no la suprime por completo, por lo que en ocasiones puede ser necesario instalar aguas abajo de la cámara de aire otros dispositivos de control secundarios, tales como tanques unidireccionales.
- La desventaja que quizás resulta más decisiva a la hora de rechazar la instalación de una cámara de aire es el costo económico que presenta, principalmente los gastos de mantenimiento que origina. Este gasto de mantenimiento se manifiesta en el compresor que es necesario para mantener el volumen de aire necesario; en las válvulas de no retorno y regulación que se instalan en la conexión de la cámara de aire, y en general en toda la instalación complementaria que acompaña a la misma.

Tanque unidireccional

El tanque unidireccional es un dispositivo que aporta agua a la tubería en los períodos de depresión del transitorio en puntos altos de la tubería, con el objetivo de evitar los vacíos y las separaciones de la columna líquida. Es semejante constructivamente a una torre de oscilación, pero a diferencia de ésta lleva una válvula de no retorno instalada en el tubo de conexión con la tubería que impide el flujo desde la tubería hacia el tanque. Ello trae como consecuencia que el nivel libre del agua en el tanque puede estar por debajo de la línea de alturas piezométricas en régimen permanente.

El esquema de funcionamiento de un tanque unidireccional se muestra en la figura 5.6. En presencia de presiones en la tubería mayores a H_0 , la válvula de no retorno se mantiene cerrada. Para presiones por debajo de H_0 la válvula se abre y a la tubería ingresa agua, mediante lo cual se evitan los vacíos y las separaciones de columna. De algún modo complementario se asegura el llenado reiterado del tanque con agua. De esta forma el volumen del tanque se determina sólo por la cantidad de agua necesaria para entregar a la tubería y su altura es mucho menor que aquella existente en una torre de oscilación.

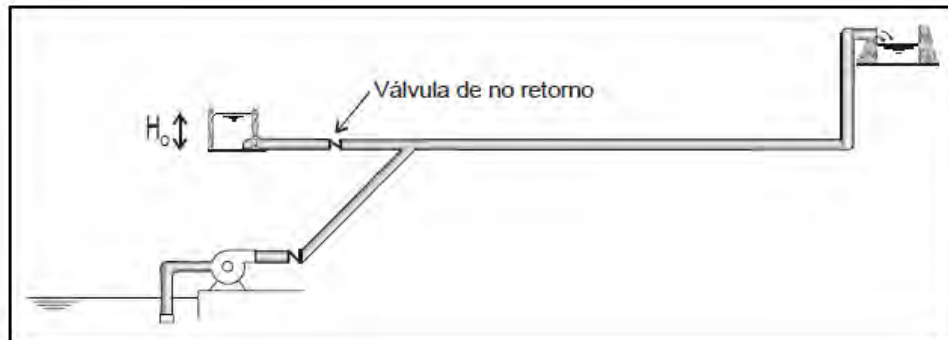


Figura 5.6 Esquema de funcionamiento de un tanque unidireccional (MAPAS, 2007)

Las ventajas que ofrece el tanque unidireccional como dispositivo de control de transitorios son:

- En comparación con la torre de oscilación, es que no se induce un flujo inverso de importancia entre el tanque y las bombas. Obviamente se puede evitar el giro inverso de la máquina colocando aguas abajo de la misma una válvula de no retorno que en el caso de existir un tanque originará en la conducción sobrepresiones inferiores a las que originaría una torre de oscilación.
- Otra de las ventajas es la que se deriva de la flexibilidad que puede tener la geometría del tanque. En este sentido, al contrario de lo que ocurría con la torre de oscilación, la cota superior del tanque se encuentra siempre por debajo de la altura piezométrica en régimen permanente en el punto donde éste se encuentra instalado. Esta flexibilidad de instalación del tanque hace que éste sea especialmente adecuado para perfiles topográficos irregulares, que requerirían de grandes torres de oscilación para su protección.

Los problemas del tanque unidireccional son:

- La transmisión parcial de las ondas de depresión que inciden sobre el tanque, origina que aguas abajo del mismo puedan aparecer problemas por depresiones excesivas en la conducción. Esto origina que deban utilizarse otros dispositivos de protección adicionales, tales como otros tanques unidireccionales o bien válvulas de aire. Esta desventaja en muchos casos resulta fundamental a la hora de realizar el análisis económico de las diferentes estrategias de protección, ya que se trata de comparar la instalación de varios tanques unidireccionales con la instalación, por ejemplo de una única cámara de aire.
- Otro inconveniente importante de la instalación del tanque unidireccional es que éste requiere de un mantenimiento mecánico periódico adecuado para asegurar el buen funcionamiento tanto de la válvula de no retorno que impide la entrada de fluido desde la conducción durante el transitorio, como de las válvulas de llenado que reponen el volumen de agua aportado por el tanque durante el transitorio (Figura 5.7).

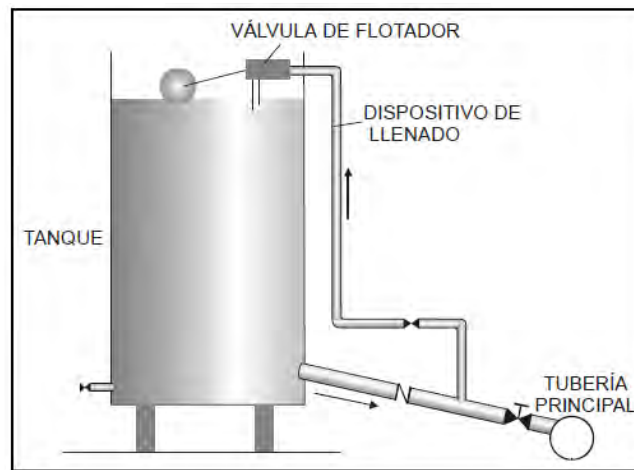


Figura 5.7 Tanque unidireccional (MAPAS, 2007)

Tanque bidireccional

El tanque bidireccional (llamado también tanque unidireccional cerrado) tiene la misma finalidad que el tanque unidireccional. Consiste de un depósito cerrado conectado a la tubería, en cuya parte superior se colocan válvulas de admisión rápida y expulsión lenta de aire. Su esquema de funcionamiento viene dado en la figura 5.8.

En presencia de presiones en la tubería mayores que Δz (Figura 5.8) el tanque permanece lleno de agua y las válvulas de aire se mantienen cerradas. Al descender la presión por debajo de Δz el agua fluye del tanque a la tubería, ingresa aire a través de las válvulas y el nivel del agua dentro del tanque desciende. Con el posterior aumento de la presión en la tubería, el agua entra al tanque, el nivel del agua sube y el aire escapa a través de las válvulas.

En el momento cuando el agua expulsa todo el aire se cierran las válvulas de aire. Una sobrepresión importante puede producirse en este instante, si la expulsión de aire fue demasiado rápida. Para evitar esto las válvulas de aire deben tener la capacidad de admitir rápidamente el aire, pero expulsarlo lentamente.

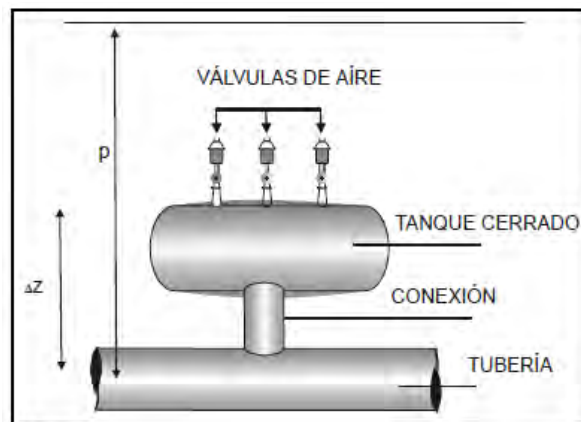


Figura 5.8 Esquema de funcionamiento de un tanque bidireccional (MAPAS, 2007)

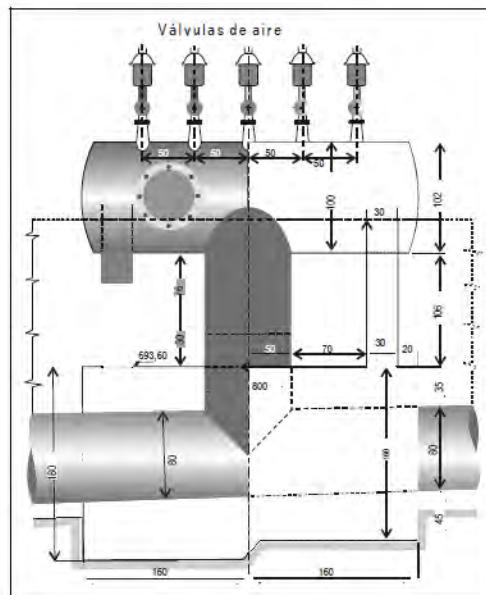


Figura 5.9 Tanque bidireccional (MAPAS, 2007)

Las ventajas y desventajas del tanque bidireccional son esencialmente las mismas del tanque unidireccional, con la ventaja adicional que no requiere de válvula de no retorno y dispositivo de llenado. Estos se sustituyen por las válvulas de admisión y expulsión lenta de aire que por lo general son más seguras en su funcionamiento y no requieren de tanto mantenimiento como una válvula de no retorno y un dispositivo de llenado.

Válvulas de no retorno

Por sí sola, la válvula de no retorno no es un medio antiarriete, y sirve para hacer posible el flujo en un solo sentido. Su consideración entre los medios de control de transitorios es necesaria no obstante por dos razones:

- Su cierre puede generar sobrepresiones importantes en los transitorios.
- En ciertas condiciones topográficas las válvulas de no retorno pueden colocarse en puntos intermedios de la tubería (aparte de las válvulas de no retorno que se tiene en las bombas), con vistas de detener el flujo inverso en el transitorio que se produce con el paro de las bombas y de esta forma reducir las sobrepresiones en el inicio de la conducción.

Para limitar más aún las sobrepresiones, aguas abajo de la válvula de no retorno (considerado por el sentido normal de circulación) puede colocarse una válvula de alivio (Figura 5.10-(a)). En caso de que se produzca un vacío aguas arriba de la válvula, en el mismo lugar se coloca una válvula de aire (Figura 5.10-(b)).

Es posible también la colocación al mismo tiempo de una válvula de aire aguas arriba, y una válvula de alivio aguas abajo de la válvula de no retorno (Figura 5.10-(c)). Las mismas funciones puede ejecutar un paso lateral (by-pass) (Figura 5.10-(d)). Stephenson (1981) recomienda que el diámetro de ese by-pass sea igual a una décima parte del diámetro de la tubería. Otra posibilidad de lograr el mismo efecto es la perforación de un orificio en el obturador de la válvula de no retorno.

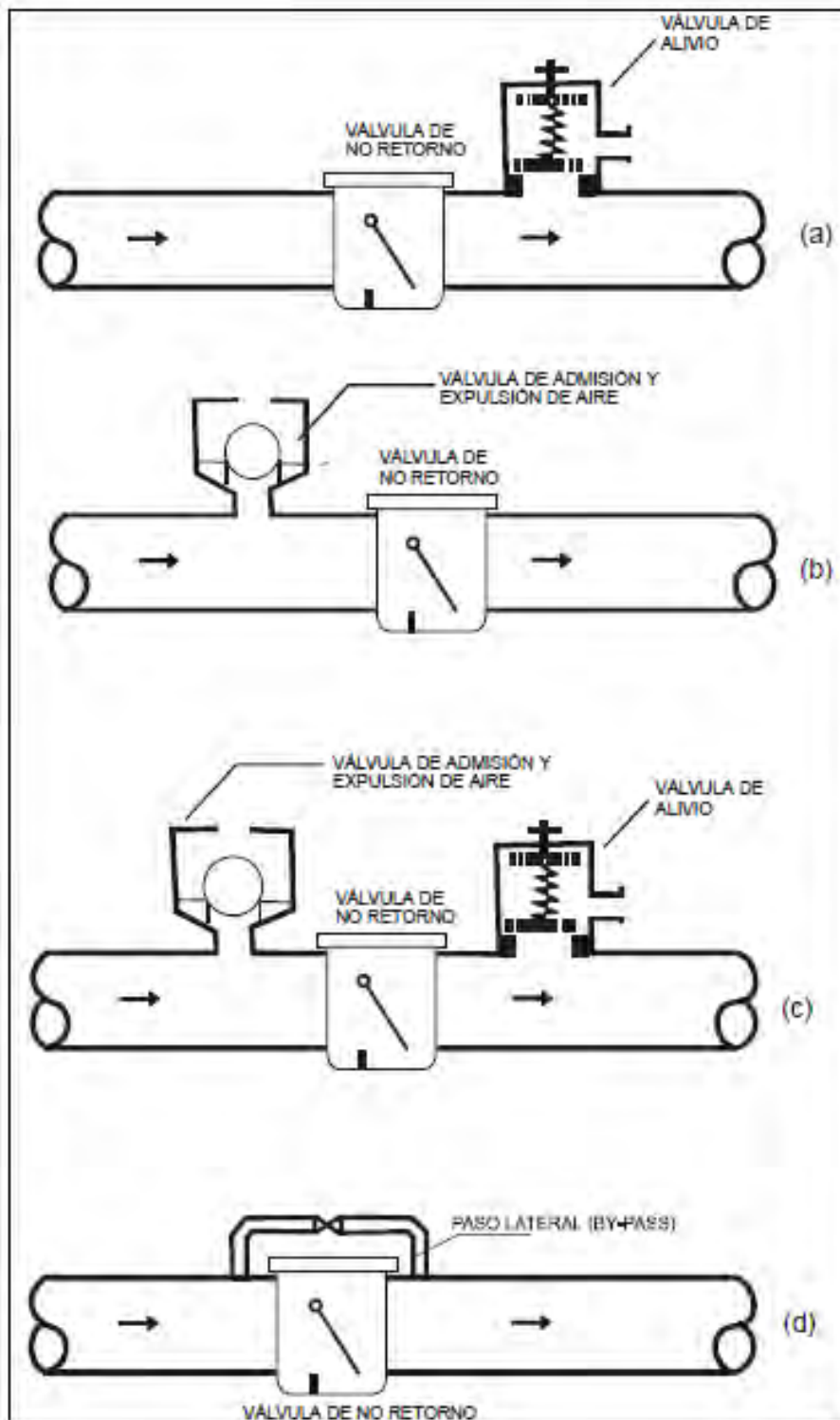


Figura 5.10 Arreglos para una válvula de no retorno intermedia (MAPAS, 2007)

Válvulas de alivio

Las válvulas de alivio son dispositivos conectados a la línea de conducción, que se abren al excederse una presión determinada y descargan ciertos gastos, limitando de esta forma la sobrepresión en la línea.

Existe gran variedad de válvulas de alivio, desde las más simples de resorte, o las de contrapeso, hasta válvulas complicadas con complejos pivotajes y posibilidades de regulación.

En la figura 5.11 se ilustra una válvula de alivio de resorte que es uno de los tipos más sencillos. Por medio de un vástago y un plato el resorte mantiene tapado un orificio que está comunicado con el agua en la tubería. Si la fuerza del empuje por la presión del agua que actúa sobre el plato sobrepasa la fuerza ejercida por el resorte, el plato se levanta y a través del orificio se descarga un cierto gasto directamente al exterior o hacia un recipiente. Al disminuir la presión dentro de la tubería, bajo la acción del resorte la válvula se cierra. La válvula se ajusta para abrir normalmente cuando la presión en la conducción alcanza un valor entre 10 y 20% superior a la presión del régimen permanente.

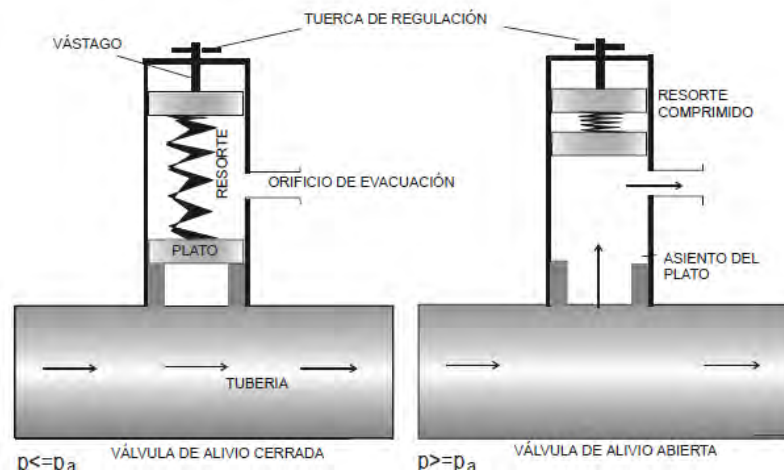


Figura 5.11 Válvula de alivio de resorte (MAPAS, 2007)

Válvulas anticipadoras del golpe de ariete

Las válvulas anticipadoras son válvulas de alivio especiales que se abren en el período inicial de presión baja en la tubería. Al bajar la presión hasta un valor determinado la válvula se abre rápidamente y comunica el agua de la tubería con el exterior. Si la presión continúa disminuyendo y tiende a producirse un vacío, por la válvula entra aire a la tubería.

Una vez abierta, la válvula anticipadora se cierra lentamente de modo que en las siguientes fases de sobrepresión se encuentre abierta y descargue ciertos gastos aliviando las sobrepresiones en la conducción.

Las válvulas anticipadoras se utilizan sólo en sistemas en que el transitorio comienza con depresiones, como es el caso de un paro accidental de bombas en una línea de bombeo.

Existen diversos tipos de válvulas anticipadoras en cuanto a construcción se refiere. La descripción de las mismas puede encontrarse en los catálogos de los fabricantes. Si durante todo el transitorio la presión no llega a bajar hasta el valor a que está ajustada a abrirse la válvula anticipadora, la misma permanece inactiva.

Válvulas de admisión y expulsión de aire

Permiten la entrada de aire atmosférico a la conducción en el punto de la tubería en que se encuentran instaladas cuando la presión en la conducción tiende a situarse por debajo de la presión atmosférica. Posteriormente y si la presión aumenta hasta superar la presión exterior, el aire es expulsado, de manera que las columnas de líquido separadas por la interfase gas, vuelven a juntarse de nuevo.

De este modo la válvula de admisión y expulsión de aire ejecuta las siguientes funciones:

- Asegura el escape del aire durante el llenado de la tubería.
- Asegura la entrada de aire al vaciar la tubería.
- Evita el vacío (presiones negativas) en los transitorios.

Las válvulas de aire se instalan en los puntos altos de las tuberías de perfil irregular, que es donde pueden presentarse problemas por bajas presiones. Si su funcionamiento es correcto son un elemento sumamente eficaz para la prevención de depresiones; pero una deficiente admisión puede dar lugar a una inesperada cavitación, y si la salida del aire no se efectúa adecuadamente puede aparecer el problema de un violento choque de las columnas en la reunificación.

Existe en el mercado una gran cantidad de tipos y formas constructivas de válvulas de aire. Es importante conocer las diferencias que hay entre unos y otros tipos ya que una elección inadecuada de la válvula de aire puede generar más problemas que los que puede llegar a resolver.

Las dos razones por las que una válvula de aire debe introducir aire dentro de una conducción son la ventilación y el control de depresiones originadas durante un transitorio.

Las condiciones que debe tener una válvula de aire destinada a ventilar la conducción son las siguientes:

- Gran capacidad de expulsión de aire, para que éste salga rápidamente cuando se llena la conducción.
- Gran capacidad de admisión de aire, para que éste entre rápidamente en la conducción cuando se está procediendo el vaciado de la misma.
- Baja capacidad de expulsión durante el funcionamiento normal de la conducción, para expulsar el aire que se libera del agua en los puntos altos.

Por otra parte, las condiciones que debe tener una válvula de aire diseñada para controlar las depresiones originadas por un transitorio son las siguientes:

- Gran capacidad de admisión de aire en los puntos críticos, para evitar la posible aparición de cavitación.
- Baja capacidad de expulsión, para evitar que la bolsa de aire que existe dentro de la conducción se cierre de forma brusca, ya que esto generaría una sobrepresión de bastante importancia.

Como puede verse, el funcionamiento de ambos tipos de válvulas de aire es diferente. Por ello la instalación inadecuada de una válvula de aire puede originar transitorios no esperados.

Admisión y retención de aire

Se realiza por dispositivos especiales que admiten la entrada de aire cuando tiende a producirse un vacío en la tubería, pero no permiten que el aire escape cuando la presión sube. El aire atrapado actúa como un amortiguador y puede reducir en grado considerable las sobrepresiones del transitorio; mientras mayor sea el volumen de aire atrapado, tanto mayor será el efecto antiarriete. En cierto sentido puede considerarse que el funcionamiento en el período de sobrepresión es equivalente al funcionamiento de una cámara de aire en el mismo punto de la conducción.

En una conducción, la admisión y retención de aire tiene lugar solamente como medio de control de transitorios. Para los efectos del vaciado y llenado de la línea puede ser más bien no deseable la retención del aire. Se puede usar cuando el trazo de la conducción pasa por un terreno sinuoso y se ubica en los puntos altos, donde pueden generarse volúmenes de aire suficientemente grandes. En todo caso se necesita una simulación con un modelo matemático para determinar su número y correcta ubicación.

Membranas protectoras o fusibles hidráulicos

Consisten en discos finos de metal u otro material, que se destruyen en presencia de una determinada presión. Se sitúan en desviaciones de la tubería en sostenedores especiales después de una válvula de paso abierta constantemente (Figura 5.12).

Ante un peligro de sobrepresiones inadmisibles la membrana se rompe, parte del líquido se expulsa y la presión se reduce. Posteriormente, la válvula se cierra hasta cambiar la membrana por una nueva.

Teniendo en cuenta su bajo costo y la posibilidad de fallas en el funcionamiento de los dispositivos antiarriete, se recomienda su uso aparte de los medios antiarriete normales como una protección adicional. Las membranas se colocan cerca de la planta de bombeo o en otros lugares que se quieran proteger especialmente.

Se debe de asegurar la evacuación del agua descargada. El defecto principal de las membranas protectoras consiste en que después de su accionamiento quedan abiertas y desde la tubería se descarga agua hasta sustituirlas. Este defecto puede ser eliminado con la utilización de dispositivos especiales que aseguren el cierre automático de la válvula de paso posterior a la rotura de la membrana.

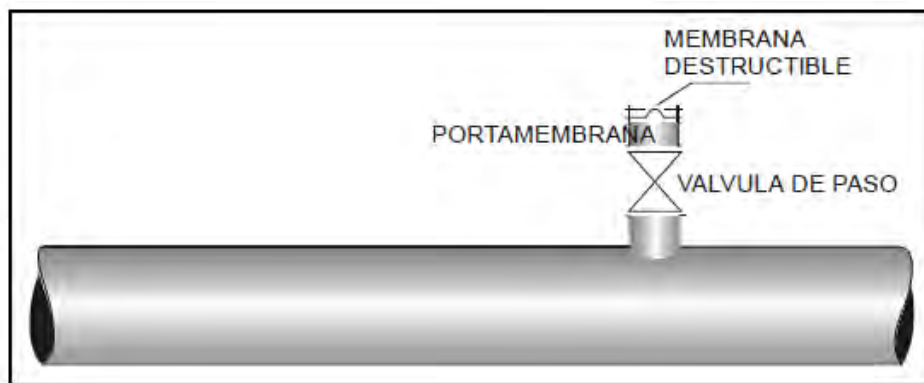


Figura 5.12 Membrana destructible (MAPAS, 2007)

Instalación de un by-pass en la planta de bombeo

El by-pass puede ser de utilidad en las plantas en que el grupo motor-bomba dispone de cierto nivel de presión en la succión (Figura 5.13). Al producirse el fallo de las bombas, la presión comienza a descender aguas abajo de la válvula de no retorno colocada a la salida de las bombas. Si la presión llega a caer por debajo del nivel de agua en el depósito del cual se alimentan las bombas, entonces a través del by-pass se produce un flujo desde el depósito de succión hacia la conducción principal sin pasar por las bombas.

Este aporte de caudal realiza una función de control similar a la que haría un tanque unidireccional instalado en dicho punto. En definitiva, se consigue evitar que las depresiones en el tramo inicial aguas abajo de la planta lleguen a ser de importancia. Por otra parte, es importante la presencia de una válvula de no retorno en el by-pass, que impide la descarga de la bomba hacia el propio depósito, evitando así que la máquina funcione en circuito cerrado.

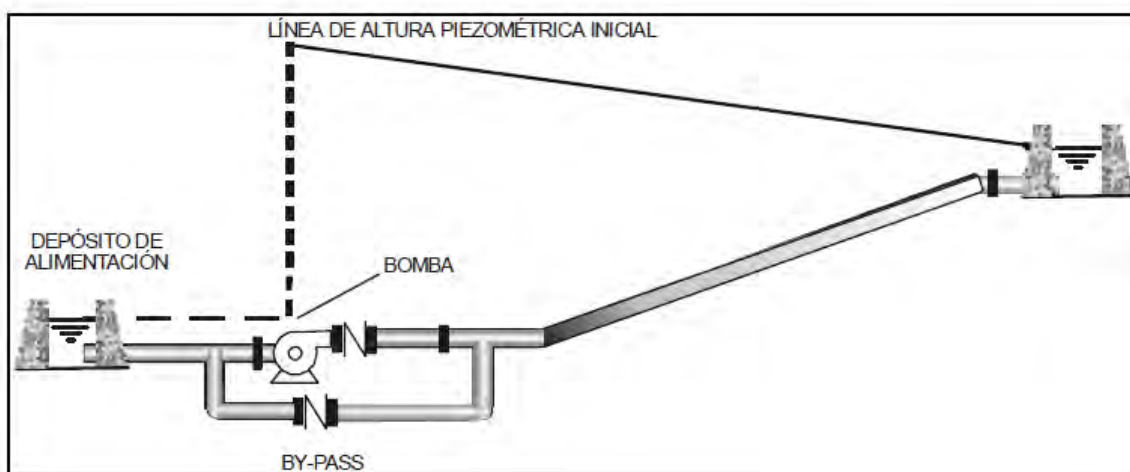


Figura 5.13 By-pass en una estación de bombeo (MAPAS, 2007)

El problema que se presenta en este tipo de instalaciones viene derivado del hecho de que hay que asegurar de alguna forma que la válvula de no retorno del paso lateral, que puede haber estado una larga temporada sin funcionar, se abra en el instante adecuado. A fin de garantizar que la válvula abra, se necesita una diferencia de presiones entre el depósito de succión y el punto aguas abajo de las bombas capaz de abrir la válvula de no retorno. Por otra parte, el mantenimiento de la válvula de no retorno del paso lateral, en este tipo de instalaciones, se vuelve un hecho de suma importancia.

5.1.3. Método de las características

El objetivo de este método es transformar las ecuaciones de cantidad de movimiento (ecuación dinámica) y de continuidad en ecuaciones en derivadas totales.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad \text{Ecuación dinámica} \quad (5.34)$$

$$\frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad \text{Ecuación de continuidad} \quad (5.35)$$

Para facilitar la discusión del método de las características, las ecuaciones anteriores se pueden reescribir de la siguiente forma:

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (5.36)$$

$$L_2 = \frac{a^2 \partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (5.37)$$

Ahora se puede considerar una combinación lineal de las ecuaciones 5.36 y 5.37. Multiplicando la ecuación de continuidad por una constante indeterminada λ y sumándola a la ecuación dinámica.

$$L = L_1 + \lambda L_2 \quad (5.38)$$

O bien la ecuación anterior se puede escribir como:

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \lambda gA \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (5.39)$$

Si $H = H(x,t)$ y $Q = Q(x,t)$, entonces las derivadas totales se pueden escribir como:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (5.40)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (5.41)$$

Además definiendo al multiplicador λ como:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{dx}{dt} = \lambda a^2 \quad (5.42)$$

De esta última ecuación se obtiene:

$$\lambda = \pm \frac{1}{a} \quad (5.43)$$

Ahora si sustituimos las ecuaciones 5.40 y 5.41 en la expresión 5.39 ésta se puede escribir como:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (5.44)$$

$$\text{Si } \frac{dx}{dt} = a \quad (5.45)$$

De la misma manera

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (5.46)$$

$$\text{Si } \frac{dx}{dt} = -a \quad (5.47)$$

Los dos valores reales del multiplicador λ han sido utilizados para convertir las dos ecuaciones en derivadas parciales en dos ecuaciones en derivadas totales, expresiones 5.44 y 5.46, cada una con la restricción de que son válidas si y sólo si sus respectivas ecuaciones 5.45 y 5.47 lo son también.

Debido a esta condición, es conveniente representar la solución en una gráfica x contra t , tal como se muestra en la figura 5.14.

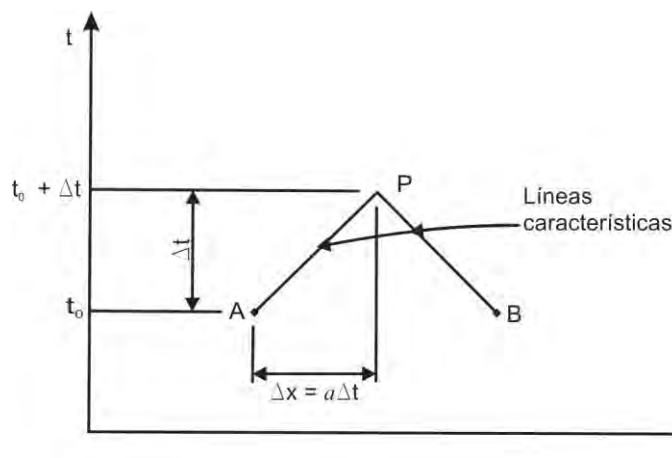


Figura 5.14 Líneas características en un plano $x-t$ (Chaudhry, 1987)

La posición x localiza el punto en la tubería que se mide desde el extremo aguas arriba, y t es el tiempo en el cual se van a determinar las variables dependientes Q y H . Se considera que se conocen las condiciones en A , es decir Q_A , H_A , x_A y t_A .

Para resolver las ecuaciones 5.44 a 5.47 se usa un esquema de diferencias finitas de primer orden. Si nos referimos a la figura anterior, para calcular la condición desconocida en $t + \Delta t$, se puede escribir a lo largo de la línea característica positiva AP .

$$dQ = Q_P - Q_A \quad (5.48)$$

$$dH = H_P - H_A \quad (5.49)$$

De manera similar a lo largo de la línea característica negativa BP se puede escribir

$$dQ = Q_P - Q_B \quad (5.50)$$

$$dH = H_P - H_B \quad (5.51)$$

Los subíndices en las ecuaciones 5.48 a 5.51 representan los valores de Q y H en el plano x - t . Sustituyendo las ecuaciones 5.38 y 5.49 en la ecuación 5.44, así como las ecuaciones 5.50 y 5.51 en la expresión 5.46, y multiplicando el término de la fricción por Δt .

$$(Q_P - Q_A) + \frac{gA}{a}(H_P - H_A) + \frac{f\Delta t}{2DA}Q_A|Q_A| = 0 \quad (5.52)$$

$$(Q_P - Q_B) - \frac{gA}{a}(H_P - H_B) + \frac{f\Delta t}{2DA}Q_B|Q_B| = 0 \quad (5.53)$$

Las ecuaciones 5.52 y 5.53 se pueden escribir como

$$Q_p = C_p - C_a H_P \quad (5.54)$$

$$Q_p = C_n + C_a H_P \quad (5.55)$$

Donde

$$C_p = Q_A + \frac{gA}{a}H_A - \frac{f\Delta t}{2DA}Q_A|Q_A| \quad (5.56)$$

$$C_n = Q_B - \frac{gA}{a} H_B - \frac{f\Delta t}{2DA} Q_B |Q_B| \quad (5.57)$$

$$Y \quad C_a = \frac{gA}{a} \quad (5.58)$$

En las ecuaciones 5.54 y 5.55 se tienen dos incógnitas, que son Q_p y H_p , los valores de estas variables se pueden encontrar resolviendo de manera simultánea las dos ecuaciones.

$$Q_p = 0.5(C_p + C_n) \quad (5.59)$$

De esta forma H_p se obtiene de la ecuación 5.54 ó 5.55.

El esquema de diferencias finitas para resolver las ecuaciones características tiene que ser estable y convergente, para que esto suceda se debe cumplir que:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{1}{a} \quad \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{a} \quad \text{Condición de estabilidad de Courant} \quad (5.60)$$

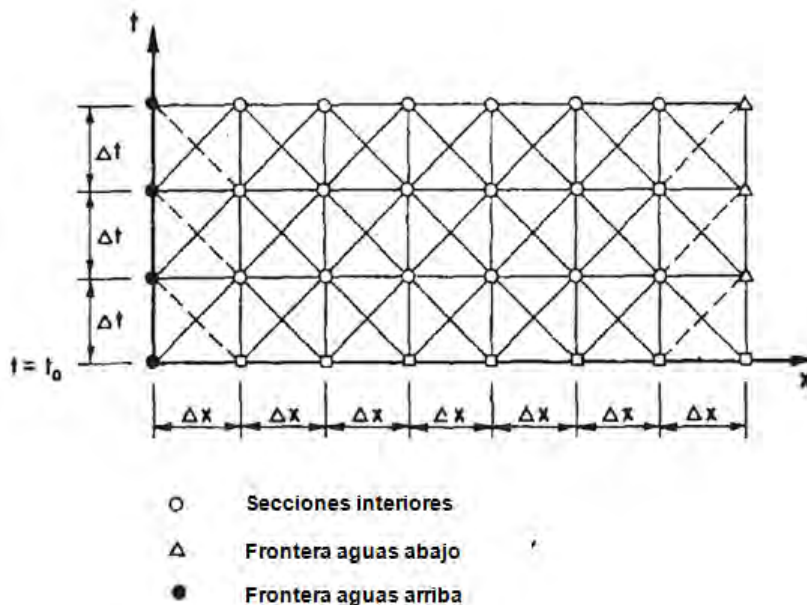


Figura 5.15 Esquema de diferencias finitas (Chaudhry, 1987)

Posteriormente, el método de las características se usa para simular transitorios hidráulicos con aire atrapado en sistemas de bombeo que transportan aguas residuales.

5.2. Efecto de las bolsas de aire/gas en fenómenos transitorios

El efecto del aire atrapado en acueductos a bombeo puede ser perjudicial o benéfico, esto dependerá de la cantidad del aire, su localización, así como de la configuración del sistema y de las causas del transitorio, Martin (1976, 1996).

Stephenson (1997) comenta que la formación de grandes bolsas de aire en los acueductos puede causar una serie de problemas. Sin embargo, éstas pueden ayudar a reducir el valor de las sobrepresiones causadas por la ocurrencia de transitorios hidráulicos.

La manera en la que responden los acueductos a bombeo a la presencia de aire atrapado dependerá como está éste distribuido. Cuando por la tubería circula un flujo a baja velocidad el aire tenderá a formar bolsas, que pueden amortiguar las presiones transitorias (Kottmann, 1992; Thorley, 2004).

En las décadas pasadas han sido reportados varios accidentes, debido a la rápida apertura de las válvulas al poner en marcha los equipos de bombeo. Esto se debe a que no existe un criterio práctico para remover el aire atrapado de los acueductos. Una consideración muy importante, que debe tomarse en cuenta durante la puesta en marcha de los equipos de bombeo, es que el aire atrapado debe ser expulsado lentamente a través de las válvulas de aire para evitar una súbita compresión del mismo, y así evitar sobrepresiones importantes que puedan provocar la ruptura de la tubería.

Otros problemas que han sido reportados a causa del aire atrapado en acueductos a bombeo es el corrimiento de los tubos de sus anclajes, Wylie et al. (1993).

Qiu (1995) comenta que el volumen de las bolsas de aire localizadas en puntos altos de los acueductos es incuantificable, por lo tanto sus efectos potenciales en transitorios hidráulicos no son tomados en cuenta, ya sea en la etapa de diseño o en un análisis posterior a una falla.

Estado del arte de los efectos del aire atrapado en transitorios hidráulicos

El efecto del aire atrapado en transitorios hidráulicos ha sido estudiado por varios investigadores, muchos de los cuales han propuesto modelos matemáticos. Los estudios relacionados con este tema se resumen a continuación:

Martin (1976) simuló matemáticamente el efecto del aire atrapado en transitorios hidráulicos en acueductos con distintas configuraciones. Los resultados muestran que el aire puede ser perjudicial o benéfico, esto dependerá de la cantidad, su localización, así como también de la configuración del sistema y de las causas del transitorio. Martin comenta que la situación más crítica puede ocurrir, cuando una

columna de agua se acelera rápidamente hacia un volumen de aire completamente confinado contra una válvula cerrada u otra columna de agua. En este caso la sobrepresión puede ser mucho mayor que la presión de operación del acueducto.

Jönsson (1985) describe el impacto de bolsas de aire en transitorios ocurridos en una planta de bombeo de aguas residuales, donde se encuentran instaladas válvulas de retención en la descarga de las bombas y un nivel bajo del agua en el tanque de succión. Para entender mejor el problema, el autor llevó cabo una investigación teórica y experimental, lo cual le permitió concluir que las sobrepresiones fueron causadas por la compresión de una bolsa de aire confinada contra la válvula de retención. Jönsson aplicó un modelo estándar con celeridad constante, los resultados muestran que las presiones son mayores al considerar aire atrapado en la línea, comparados con los obtenidos al simular el mismo sistema sin considerar aire atrapado; además concluyó que pequeños volúmenes de aire generan mayores presiones. Por otra parte, recomienda que los importantes picos de presión deben ser considerados en la etapa de diseño de los acueductos. Posteriormente, el mismo Jönsson (1992) presenta y discute los resultados obtenidos, así como las mediciones realizadas en tres diferentes estaciones de bombeo. En esta ocasión su modelo computacional si toma en cuenta el efecto de las bolsas de aire en el sistema, lo cual le permite corroborar sus conclusiones previas.

Larsen y Burrows (1992) realizaron mediciones de presiones transitorias en tres sistemas a bombeo de aguas residuales, posteriormente las compararon con los resultados obtenidos con la aplicación de un programa llamado WHPS. Las comparaciones muestran un efecto combinado de separación de columna y bolsas de aire localizadas en los puntos altos de las tres líneas, debido al paro de los equipos de bombeo. El modelo numérico utilizado se basa en el método de las características. Los investigadores encontraron, que al incluir en el modelo numérico las bolsas de aire en los puntos altos de los sistemas podía observarse un ajuste relativamente bueno entre los resultados y las mediciones. Los autores resaltan que las bolsas de aire pueden reducir o amplificar las presiones, esto va depender del volumen de aire y de las causas del transitorio. Asimismo, en algunas situaciones se puede presentar la ruptura de la tubería.

Qiu (1995); Burrows y Qiu (1995); Qiu y Burrows (1996) presentan casos reales, donde ilustran la influencia de bolsas de aire en transitorios hidráulicos. En algunos casos la magnitud de las presiones se puede incrementar de forma importante, pudiendo esto causar efectos catastróficos, como la ruptura de la tubería. Múltiples bolsas de aire o una sola de tamaño pequeño localizadas en puntos altos del acueducto, son especialmente problemáticas. Las presiones

pueden incrementarse entre 1.6 y 2 veces más, comparado con la presión en régimen establecido. Asimismo, concluyen que la presencia de pequeñas bolsas de aire en acueductos a bombeo puede tener un efecto perjudicial, cuando se tiene una abrupta interrupción del flujo causado por el paro de los equipos de bombeo. Esto puede tener serias implicaciones en sistemas a bombeo, si la presencia de aire atrapado no fue tomada en cuenta durante el diseño del acueducto.

Förster (1997) investigó de forma experimental y analíticamente la reducción de la presión en acueductos debido a la presencia de grandes bolsas de aire localizadas en puntos altos de la línea, durante la ocurrencia de transitorios hidráulicos. Asimismo, el autor realizó varias mediciones para identificar la influencia de la geometría y del volumen de las bolsas de aire en el amortiguamiento de las presiones transitorias. Förster propone una expresión adimensional, que puede ser utilizada para estudiar el efecto de grandes bolsas de aire en transitorios hidráulicos en tuberías con diámetros mayores al modelo.

Fuertes (2000) propone un modelo matemático para analizar transitorios con bolsas de aire atrapadas en puntos altos de los acueductos, cuando se inicia el arranque de las bombas. Se trata de un modelo de parámetros concentrados (modelo rígido) que introduce como novedad la movilidad de las interfases aire-agua. El autor simuló dos situaciones, la primera fue con la presencia de válvulas de admisión y expulsión de aire, y la segunda sin considerar éstas. Fuertes llevó a cabo investigación experimental para validar el modelo, encontrando una buena concordancia entre los resultados experimentales y teóricos.

Burrows (2003) reporta un caso real de un sistema a bombeo de aguas residuales ocurrido en el Reino Unido, donde se reportaron fracturas en un periodo de pocos años producidas por el paro de los equipos de bombeo, el último problema se presentó en 1992. El autor encontró que los transitorios producidos por el paro de las bombas no fue la única causa por la cual se produjeron las fracturas en la tubería. En reportes previos se menciona que la cámara de aire provista para mitigar los transitorios dejó de funcionar en 1989, asimismo, el perfil de la conducción fue modificada por la construcción de una carretera. Basado en Larsen (1992) y Burrows y Qiu (1996), Burrows llevo a cabo una nueva simulación de transitorios considerando el nuevo perfil y sin tomar en cuenta la cámara de aire, y concluyó que una pequeña bolsa de aire ($V = 0.015\text{m}^3$) localizada cerca del corte hecho para la construcción de la carretera generó un aumento en la magnitud de las presiones, lo cual causó los problemas antes mencionados.

5.3. Modelo numérico para el análisis del aire/gas en fenómenos transitorios

El modelo numérico fue implementado con el propósito de demostrar el efecto del aire atrapado en transitorios hidráulicos causados por el paro repentino de los equipos de bombeo, situación que puede considerarse como la más crítica en un acueducto.

El programa se basa en el método de las características, así como en la teoría y los procedimientos presentados por Wylie y Streeter (1978), Chaudhry (1987) y Wylie et al. (1993). Asimismo, algunas de las consideraciones hechas por Burrows y Qiu (1995) durante su investigación fueron tomadas en cuenta para el desarrollo del programa:

- 1) El método estándar de las características es utilizado para obtener las ecuaciones diferenciales ordinarias. Posteriormente, éstas son evaluadas a lo largo de las líneas características con una aproximación de primer orden y sin interpolación para eliminar la inestabilidad numérica.
- 2) Bolsas de aire de un tamaño predeterminado pueden ser localizadas en los nodos de la línea. La bolsa de aire nunca ocupa por completo la sección transversal del tubo y siempre permanece en su posición original durante toda la evolución del transitorio.
- 3) La celeridad permanece constante durante el análisis.
- 4) La bolsa de aire se comporta según la relación politrópica.
- 5) La fricción, las pérdidas por accesorios, así como las pérdidas en las estaciones de bombeo son consideradas en el programa
- 6) Por convenir al cálculo, las bolsas de aire se localizan en nodos coincidentes entre los tramos adyacentes de las tuberías

La bolsa de aire se localiza en el i -ésimo nodo, ver Figura 5.16.

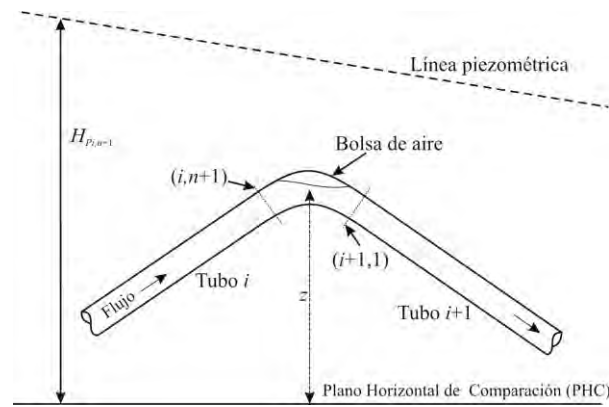


Figura 5.16 Notación para la bolsa de aire

La ecuación (5.61) que describe el proceso politrópico es usada como condición de frontera, para determinar la expansión y compresión de las bolsas de aire. Además, se considera que la carga piezométrica es igual a $H = (p/\rho g) + z$, ver Figura 5.16.

$$HV^N = C \quad (5.61)$$

Donde H es la carga piezométrica, V es el volumen de aire, N es el índice politrópico y C es una constante.

La ecuación también puede escribirse como:

$$(H_{P_{i,n+1}} - z + H_b)V_{P_i}^N = C \quad (5.62)$$

Donde $H_{P_{i,n+1}}$ es la carga piezométrica sobre el PHC en la sección $(i, n+1)$ al final del intervalo de tiempo, z es la distancia vertical desde el PHC hacia el eje del tubo, H_b es la carga barométrica y V_{P_i} es el volumen de aire al final del intervalo de tiempo.

El valor del índice politrópico N es igual a 1.0 para un proceso isotérmico lento, y es igual a 1.4 para un proceso adiabático rápido. El valor del índice politrópico considerado para los cálculos aquí presentados es $\psi = 1.2$.

Es importante mencionar que Burrows y Qiu (1995) encontraron que el valor del índice politrópico no influye de forma considerable en el valor de las presiones transitorias.

La ecuación de continuidad para la bolsa de aire puede escribirse como:

$$V_{P_1} = V_i + \frac{1}{2}\Delta t[(Q_{P_{i+1,1}} + Q_{i+1,1}) - (Q_{P_{i,n+1}} + Q_{i,n+1})] \quad (5.63)$$

V_i Volumen de aire al inicio del intervalo de tiempo (m^3)

Δt Intervalo de tiempo (s)

$Q_{i,n+1}$ Gasto aguas arriba de la bolsa de aire al inicio del intervalo de tiempo (m^3/s)

$Q_{P_{i,n+1}}$ Gasto aguas arriba de la bolsa de aire al final del intervalo de tiempo (m^3/s)

$Q_{i+1,1}$ Gasto aguas abajo de la bolsa de aire al inicio del intervalo de tiempo (m^3/s)

$Q_{P_{i+1,1}}$ Gasto aguas abajo de la bolsa de aire al final del intervalo de tiempo (m^3/s)

Las variables con el subíndice P indican que éstas son desconocidas al final del intervalo de tiempo $t + \Delta t$, mientras que las variables sin el subíndice P se refieren a las variables conocidas al inicio del intervalo de tiempo t .

Debido a que en este capítulo, el método de las características es utilizado para analizar el efecto de bolsas de aire en transitorios hidráulicos, las ecuaciones de las características positivas y negativas al final de cada intervalo de tiempo se definen de la siguiente forma:

$$Q_{P_{i,n+1}} = C_{(+)} - C_{a_i} H_{P_{i,n+1}} \quad (5.64)$$

$$Q_{P_{i+1,1}} = C_{(-)} + C_{a_{i+1}} H_{P_{i+1,1}} \quad (5.65)$$

Donde

$$C_{(+)} = Q_{i,n+1} + C_{a_i} H_{i,n+1} - R_i Q_{i,n+1} | Q_{i,n+1} | \quad (5.66)$$

$$C_{(-)} = Q_{i+1,1} - C_{a_{i+1}} H_{i+1,1} - R_{i+1} Q_{i+1,1} | Q_{i+1,1} | \quad (5.67)$$

$$R_i = \frac{f_i \Delta t_i}{2D_i A_i} \quad (5.68)$$

$$R_{i+1} = \frac{f_{i+1} \Delta t_{i+1}}{2D_{i+1} A_{i+1}} \quad (5.69)$$

$$C_{a_i} = \frac{g A_i}{c_i} \quad (5.70)$$

$$C_{a_{i+1}} = \frac{g A_{i+1}}{c_{i+1}} \quad (5.71)$$

Donde f es el factor de fricción de Darcy – Weisbach, Δt es el intervalo de tiempo, D es el diámetro del tubo, A es el área de la sección transversal del tubo, g es la aceleración de la gravedad y c es la celeridad.

Si las pérdidas en la unión de los tubos no son consideradas, entonces

$$H_{Pi,n+1} = H_{Pi+1,1} \quad (5.72)$$

Ahora se tienen cinco variables desconocidas y cinco ecuaciones, las cuales son $H_{Pi,n+1}$, V_{Pi} , $Q_{Pi+1,1}$, $Q_{Pi,n+1}$, $H_{Pi+1,1}$. La ecuación 5.73 se puede resolver para $H_{Pi,n+1}$ mediante un método iterativo, por ejemplo el de la bisección. Los valores de las otras variables desconocidas pueden ser evaluados con las ecuaciones 5.62 a 5.72.

$$\left(H_{Pi,n+1} + H_b - z \right) \left[C_{aire} + \frac{1}{2} \Delta t (C_{ai} + C_{ai+1}) H_{Pi,n+1} \right]^N = C_1 \quad (5.73)$$

$$C_{aire} = V_1 + \frac{1}{2} \Delta t \left(Q_{i+1,1} - Q_{i,n+1} + C_{(-)} - C_{(+)} \right) \quad (5.74)$$

Durante los cálculos el esquema de diferencias finitas se mantiene estable, debido a que la condición de Courant – Friedrich – Lewy (Ecuación. 5.75) se cumple en todo momento si el Δt es elegido adecuadamente.

$$\Delta x \geq a \Delta t \quad (5.75)$$

Caso de estudio

El estudio de un acueducto a bombeo sin dispositivos supresores de transitorios es presentado para demostrar el efecto potencial de bolsas de aire en transitorios hidráulicos. La condición de frontera aguas arriba es una estación de bombeo y aguas abajo un tanque de carga constante. Para este análisis sólo se simuló los transitorios generados por el paro repentino de los equipos de bombeo.

La estación de bombeo opera con cuatro equipos conectados en paralelo. El agua es bombeada hacia el tanque de carga constante ubicado a 396.92 m del nivel del tanque de succión. La conducción tiene una longitud de 2289 m y está compuesta de tubo de acero con diámetro interno de 1.22 m. El esquema de la Figura 5.17 ilustra esquemáticamente el sistema estudiado.

Antes de aplicar el modelo numérico para investigar el efecto del aire atrapado en transitorios hidráulicos, se llevó a cabo un análisis preliminar para identificar los

puntos donde las bolsas de aire/gas podrían acumularse (ecuación 4.2) y cuantificar su volumen (ecuación 4.12). Utilizando la ecuación propuesta por González y Pozos (2000) se encontraron 4 puntos que podrían acumular aire, cuando el sistema opera con 3 equipos de bombeo ($Q = 1.875 \text{ m}^3/\text{s}$). Por otra parte, cuando están en funcionamiento las 4 unidades de bombeo ($Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$) sólo se encontró un posible punto de acumulación de aire.

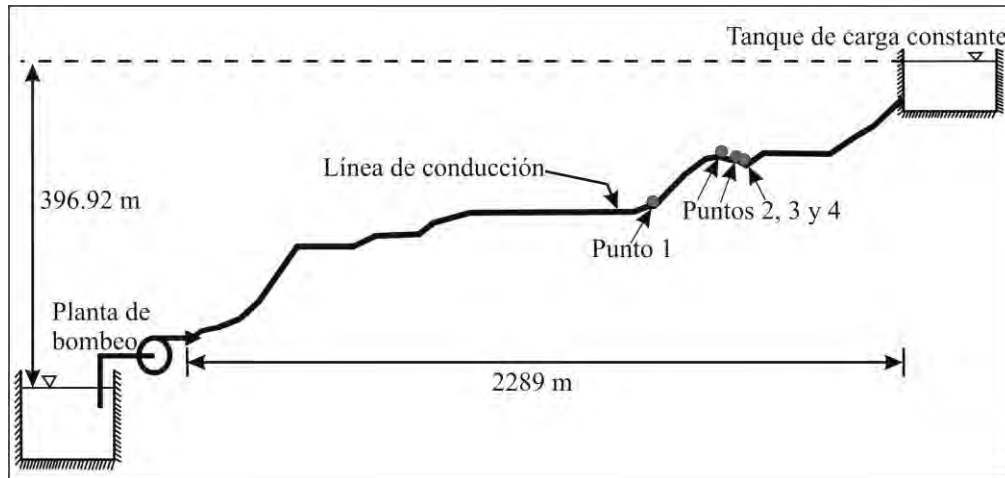


Figura 5.17 Perfil del acueducto a bombeo

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 5.1. Los valores de S corresponden a las pendientes descendentes del acueducto, donde el aire regresaría a contra flujo, provocando la acumulación del mismo en los puntos altos del sistema.

$Q = 1.875 \text{ (m}^3/\text{s)}$	
S	$Q^2/gD^5 = 0.1326$
0.1995	El aire regresa hacia aguas arriba
0.1354	El aire regresa hacia aguas arriba
0.1600	El aire regresa hacia aguas arriba
0.3226	El aire regresa hacia aguas arriba

Tabla 5.1. Movimiento de las bolsas de aire en las pendientes descendentes del acueducto

$Q_w = 2.5 \text{ (m}^3/\text{s)}$	
S	$Q_w^2/gD^5 = 0.1326$
0.3225	El aire regresa hacia aguas arriba

Tabla 5.2. Movimiento de las bolsas de aire en las pendientes descendentes del acueducto II

Asimismo, el volumen de las bolsas de aire localizadas en los puntos del acueducto se presenta en las Tablas 5.3 y 5.4.

Q = 1.875 (m³/s)			
Volúmenes de aire en la bolsa 1 (m ³)	Volúmenes de aire en la bolsa 2 (m ³)	Volúmenes de aire en la bolsa 3 (m ³)	Volúmenes de aire en la bolsa 4 (m ³)
0.145	0.448	1.038	0.412
0.242	0.576	1.152	0.480
0.429	0.816	1.368	0.614
0.761	1.235	1.747	0.856
1.334	1.944	2.395	1.286
2.326	3.147	3.503	2.048
4.099	5.244	5.456	3.449

Tabla 5.3. Volúmenes de aire cuando 3 equipos de bombeo están en operación

Q = 2.5 (m³/s)
Volúmenes de aire en la bolsa 1 (m ³)
0.164
0.214
0.325
0.542
0.948
1.702
3.143

Tabla 5.4. Volúmenes de aire cuando 4 equipos de bombeo están en operación

Los volúmenes de aire presentados en las Tablas 5.3 y 5.4 son colocados en los puntos altos del acueducto, identificados durante el análisis. A continuación, una serie de simulaciones numéricas fueron llevadas a cabo para hallar la situación más crítica en este sistema en particular. El escenario más crítico se presentó cuando la estación de bombeo opera con tres unidades, y cuatro pequeñas bolsas de aire se localizan en los puntos 1 a 4 de la conducción. Para comparar el efecto

del aire atrapado en transitorios hidráulicos, se evaluaron los transitorios de forma estándar, es decir, sin considerar aire atrapado.

El modelo numérico evalúa la carga piezométrica H y el gasto Q para los nodos considerados a lo largo del acueducto durante el tiempo de simulación. Para este análisis sólo se consideraron las envolventes de las cargas máximas y mínimas ocurridas en el sistema. Para identificar de mejor manera los puntos críticos en el acueducto, se graficaron las cargas máximas y mínimas versus el cadenamiento de la línea. En las figuras 5.18 y 5.19 se observa que las envolventes de las cargas piezométricas mínimas sin considerar aire atrapado cortan parte de la tubería, esto va a generar que el sistema experimente una presión menor a la atmosférica lo que puede conducir al fenómeno conocido como separación de columna líquida. Esto podría ocurrir entre los cadenamientos $0 + 716.5$ a $0 + 996.9$ y $1 + 565.6$ a $1 + 719.5$, cuando 4 bombas se encuentran en operación. Asimismo, al operar sólo 3 unidades en la estación de bombeo se podría producir la separación de columna entre los cadenamientos $1 + 586.6$ y $1 + 699.7$. Por lo tanto, se tiene que considerar el uso de dispositivos para control de transitorios hidráulicos, para reducir los efectos negativos en el sistema.

Estación de bombeo operando con 3 unidades y 4 bolsas de aire/gas ubicadas en los puntos 1 a 4

Tres diferentes grupos de bolsas de aire fueron tomados en cuenta, para demostrar el efecto de múltiples bolsas de aire localizadas en puntos altos del acueducto analizado. El escenario más crítico se presenta, cuando tres bombas se encuentran en operación y cuatro pequeñas bolsas de aire ($V_1 = 0.145 \text{ m}^3$, $V_2 = 0.448 \text{ m}^3$, $V_3 = 1.038 \text{ m}^3$, $V_4 = 0.412 \text{ m}^3$) se localizan en los puntos 1 a 4. El subíndice indica el punto donde la correspondiente bolsa de aire se encuentra instalada. Dos grupos más de bolsas de aire fueron considerados para comparar las envolventes de las cargas máximas y mínimas obtenidas con los pequeños volúmenes de aire. En este caso particular ($V_1 = 0.761 \text{ m}^3$, $V_2 = 1.235 \text{ m}^3$, $V_3 = 1.747 \text{ m}^3$, $V_4 = 0.856 \text{ m}^3$) son llamadas bolsas de aire de tamaño mediano y ($V_1 = 4.099 \text{ m}^3$, $V_2 = 5.244 \text{ m}^3$, $V_3 = 5.456 \text{ m}^3$, $V_4 = 3.449 \text{ m}^3$) son consideradas como bolsas de aire grandes.

La presencia de las cuatro pequeñas bolsas de aire causa un importante aumento de las presiones transitorias máximas y mínimas a lo largo del sistema. La simulación numérica indica que estas bolsas de aire absorben parcialmente las presiones transitorias, generando, que el resto sea reflejado hacia las fronteras aguas arriba y aguas abajo de la línea. La amplificación de las envolventes de las cargas máximas y mínimas es causada debido a la reflexión de las presiones en

las válvulas de retención en la descarga de las bombas, bolsas de aire y el tanque de carga constante.

Las cargas máximas y mínimas se reducen al incrementarse el volumen de aire. Por ejemplo, las bolsas de aire medianas reducen significativamente la reflexión de las presiones transitorias hacia la estación de bombeo; asimismo, las cargas mínimas experimentan una reducción menor a la comparada con las cargas mínimas obtenidas sin considerar aire atrapado en la conducción. Es importante destacar, que las bolsas de aire localizadas en los puntos 3 y 4 tienen un efecto de reflexión similar al de las pequeñas bolsas de aire localizadas en estos puntos.

En la Figura 5.18 puede observarse que después del paro de las 3 bombas, las cargas máximas y mínimas a lo largo del perfil del acueducto tienen una reducción considerable, cuando en los puntos 1 a 4 se localizan 4 bolsas de aire grandes. En este caso el efecto amortiguador producido por las bolsas absorbe considerablemente las presiones transitorias, y sólo se observa una mínima reflexión producida por el volumen de aire localizado en el punto 3. Por lo tanto, se puede concluir que estas bolsas de aire tienen un efecto benéfico para este sistema en particular.

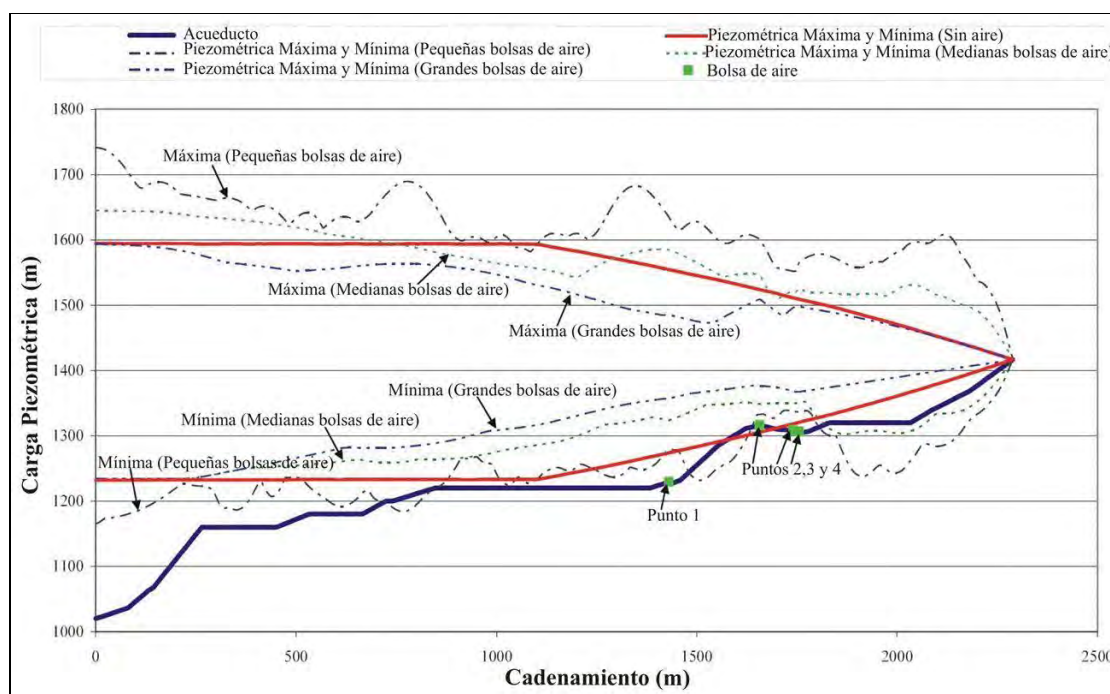


Figura 5.18 Envolventes de las líneas piezométricas máximas y mínimas con 4 diferentes volúmenes de aire en los puntos 1 a 4

Estación de bombeo operando con 4 unidades y 1 bolsa de aire/gas ubicada en el punto 1

Para demostrar el efecto de una bolsa de aire localizada en el punto 1 de la línea cuando cuatro bombas están en operación, se consideraron tres diferentes volúmenes de aire. Bolsa de aire pequeña ($V = 0.164 \text{ m}^3$), mediana ($V = 0.948 \text{ m}^3$) y grande ($V = 3.143 \text{ m}^3$). Los resultados se muestran en la Figura 5.19.

En el caso de la pequeña bolsa de aire ($V = 0.164 \text{ m}^3$), las cargas máximas y mínimas a lo largo del acueducto son ligeramente menores a las obtenidas sin considerar aire atrapado, excepto en la descarga de las bombas. Entonces se puede concluir que, la pequeña bolsa de aire produce una amortiguación que absorbe gran parte de las presiones transitorias.

La bolsa de aire con un volumen $V = 0.948 \text{ m}^3$ causa un considerable aumento de las cargas máximas a lo largo del perfil, cuando ésta se localiza en el punto 1. Asimismo, el efecto en la envolvente de cargas mínimas también es considerable. Además, la bolsa genera una reflexión importante de las cargas máximas hacia la planta de bombeo y el tanque de carga constante.

Varios investigadores han demostrado que los picos de presión pueden ser amplificados por pequeños volúmenes de aire (Burrows y Qiu, 1995; Qiu y Burrows, 1996; Burrows, 2003). De la misma manera, Gahan (2004) resalta que las bolsas de aire pequeñas y grandes pueden definirse en términos de su efecto en los transitorios hidráulicos.

En contraste, el mayor de los volúmenes de aire ($V = 3.143 \text{ m}^3$) genera una reflexión de las presiones transitorias que viajan hacia la planta de bombeo y el tanque de carga constante. Además, la bolsa de aire se comporta como una cámara de aire, que eleva la envolvente de cargas mínimas, sin embargo, en la descarga de las bombas se presentan valores menores de la carga mínima a aquellos que experimenta el sistema sin considerar aire atrapado. Por lo tanto, se puede concluir que para el mayor de los volúmenes de aire considerado en las simulaciones numéricas, éste no tiene un efecto benéfico para el sistema.

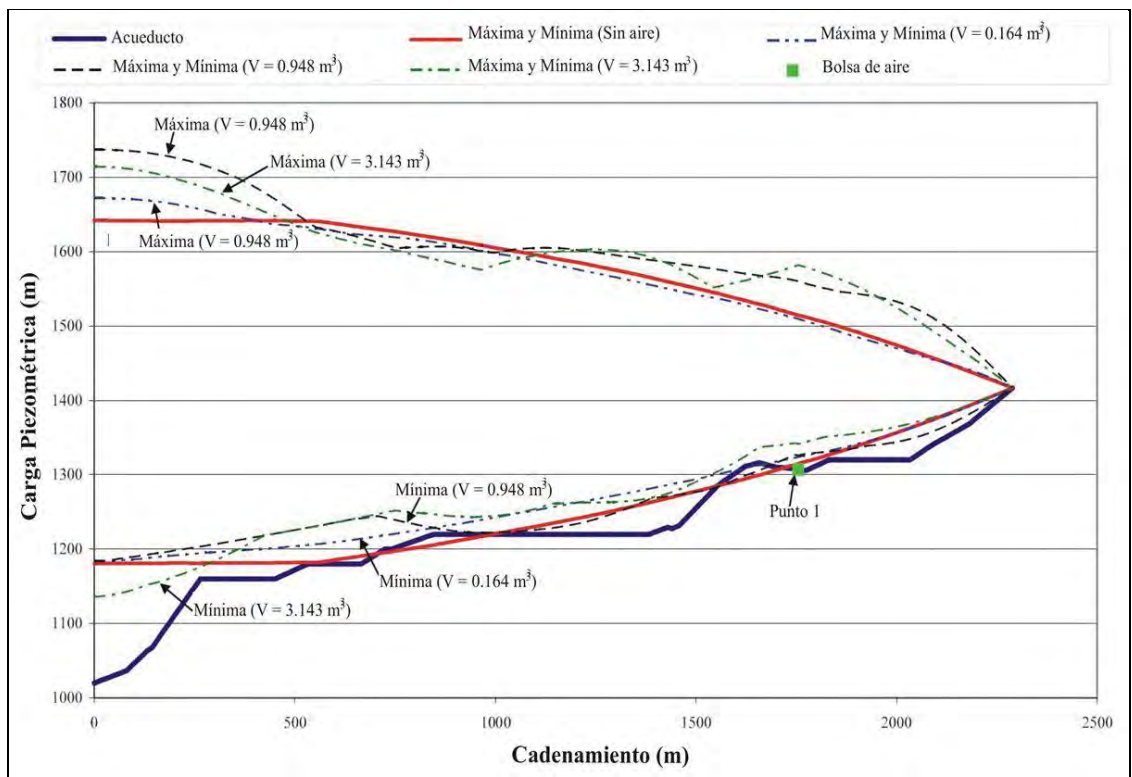


Figura 5.19 Envolventes de las líneas piezométricas máximas y mínimas con diferentes volúmenes de aire en el punto 1

VI. Conclusiones

El proceso de producción de sulfuro de hidrógeno, en las tuberías que conducen agua residual, se presenta cuando las condiciones de flujo o el trazo de la tubería permiten la formación de la biopelícula, dentro de la cual se lleva a cabo la transformación de los sulfatos a sulfuros debido a la acción bacteriana, para después ser liberados a la atmósfera de la alcantarilla.

Debido al desgaste en las tuberías y al costo por mantenimiento o reemplazo que esto atrae, se han implementado diversos métodos físicos y químicos para contrarrestar este problema.

Los métodos químicos resultan muy eficientes pero requieren de un estudio a fondo para determinar las concentraciones necesarias de cada agente químico a agregar, ya que en algunos casos puede ser demasiado costoso la aplicación de alguno de ellos en comparación con otro, como es el caso entre el cloro y los nitratos, donde el costo de adición y mantenimiento es el mismo pero el costo por galón de solución de nitratos es mucho menor que el del cloro.

Otro aspecto importante en la adición de algún agente químico es la contaminación que se puede generar, situación que sería contradictoria de acuerdo a los objetivos del control de la corrosión. Este caso se puede presentar si se hace una evaluación adecuada del contenido de sales metálicas que podríamos agregar al agua residual para evitar la corrosión.

Es por esto que en algunas ocasiones se opta por usar un método físico como la inyección de aire, este es un método que permite aumentar el contenido de oxígeno en el medio para prevenir o reducir significativamente la generación de sulfuro, además de la oxidación bioquímica de los sulfuros ya existentes. Pero este método también requiere de una evaluación a detalle para determinar la cantidad necesaria de aire, dependiendo de las características del agua que se maneja y de la presión interior del sistema.

Si el aire inyectado al sistema a bombeo no es disuelto en el agua, se pueden acumular bolsas de aire que podrían dañar de forma importante la tubería, cuando se genera un transitorio hidráulico. Dicho efecto dependerá de la ubicación, de la cantidad de aire, de la configuración del sistema y de las causas del transitorio.

Varios autores resaltan que las bolsas de aire pueden reducir o amplificar las presiones transitorias. Si la bolsa de aire es grande, ésta amortiguará el golpe de ariete resultando benéfico para el sistema. Sin embargo, puede ocurrir que el aire

acumulado en pequeñas cantidades aumente la presión de tal manera que la tubería puede afectarse considerablemente.

En el capítulo 5 se presenta la simulación de un sistema a bombeo que transporta agua residual, cuando fallan de forma simultánea las bombas. Las conclusiones generales sobre los resultados para este sistema se resumen a continuación:

La presencia de pequeñas bolsas de aire causa un importante aumento de las presiones transitorias máximas y mínimas a lo largo del sistema. La simulación numérica indica que estas bolsas de aire absorben parcialmente las presiones transitorias, generando que el resto sea reflejado hacia las fronteras aguas arriba y aguas abajo de la línea. La amplificación de las envolventes de las cargas máximas y mínimas es causada debido a la reflexión de las presiones en las válvulas de retención en la descarga de las bombas, bolsas de aire y el tanque de carga constante.

Las cargas máximas y mínimas se reducen al incrementarse el volumen de las bolsas de aire. Por ejemplo, las bolsas de aire medianas reducen significativamente la reflexión de las presiones transitorias hacia la estación de bombeo; asimismo, las cargas mínimas experimentan una reducción menor a la comparada con las cargas mínimas obtenidas sin considerar aire atrapado en la conducción. Es importante mencionar, que las bolsas de aire tienen un efecto de reflexión similar al de las pequeñas bolsas de aire.

Las cargas máximas y mínimas a lo largo del perfil del acueducto tienen una reducción considerable, cuando en sus puntos altos se acumulan bolsas de aire grandes. En este caso el efecto amortiguador producido por las bolsas absorbe considerablemente las presiones transitorias. Por lo tanto, se puede concluir que estas bolsas de aire tienen un efecto benéfico para este sistema en particular.

Estos posibles sucesos es conveniente que sean simulados para determinar la magnitud de las presiones que se pueden generar en el sistema durante un fenómeno transitorio y de esta manera determinar si es necesario modificar el perfil del acueducto o colocar válvulas de aire en las cimas del sistema.

Bibliografía

Bethencourt, M.; García de Lomas, J.; Corzo, A.; Villahermosa, D.; Matres, V. (2010). Efecto de la biopelícula en la corrosión de aceros inoxidables austeníticos en estaciones depuradoras de aguas residuales. Revista de Metalurgia No.46.

Burrows, R. and Qiu, D.Q., (1995). Effect of air pockets on pipeline surge pressure, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Journal of Water, Maritime and Energy, Volume 112, December, Paper 10859.

Burrows, R., (2003). A cautionary note on the operation of pumping mains without appropriate surge control and the potentially detrimental impact of small air pockets, Paper submission for IAHR / IWA International Conference - PEDS-2003 - Valencia, Spain, April 22nd-25th.

Chaudhry, M.H., (1987). Applied Hydraulic Transients, 2nd Edition, Van Nostrand Reinhold, New York, USA.

Chow, V.T., (1981). Open channel hydraulics, 17th Edition, McGraw Hill.

Comisión Nacional del Agua (2007). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Fenómenos transitorios en líneas de conducción. México.

Environmental Protection Agency (1985). Design Manual, Odor and Corrosion Control in Sanitary Sewerage Systems and Treatment Plants. Estados Unidos.

Environmental Protection Agency (1993). Detection, Control, and Correction Of Hydrogen Sulfide Corrosion in Existing Wastewater Systems.. Estados Unidos.

Fok, T.K., (1987). A contribution to the analysis of energy losses in transient pipe flow, Doctor of Philosophy Thesis, University of Ottawa, Canada.

Förster, G., (1997). Druckstoßdämpfung durch große Luftblasen in Hochpunkten von Rohrleitungen. In: Mitteilungen des Institutes für Wasserbau der Universität Stuttgart.

Fuertes, V.S., (2000). Hydraulic transients with entrapped air, PhD Thesis, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, España.

Gahan, C.M., (2004). A review of the problem of air release/collection in water pipelines with in-depth study of the effects of entrapped air on pressure transients, MRes Thesis, Department of Civil Engineering, University of Liverpool, UK

Gardea Villegas, H. (1992). Aprovechamientos hidroeléctricos y de bombeo. México: Editorial: Trillas, UNAM Facultad de Ingeniería.

González, C.A., Pozos, O., (2000). Análisis experimental del ingreso de aire en un acueducto, Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Jönsson, L., (1985). Maximum transient pressures in a conduit with check valve and air entrainment, Proceeding of the International Conference on the Hydraulics of Pumping Stations, British Hydromechanics Research Association, Manchester.

Jönsson, L., (1992). Anomalous pressure transients in sewage lines, Proceedings of the International Conference on Unsteady Flow and Transients, Durham, UK.

Kottmann, A., (1992). Druckstoßermittlung in der Wasserversorgung. Essen: Vulkan-Verlag.

Larsen, T., Burrows, R., (1992). Measurements and computations of transients in pumped sewer plastic mains, Proceedings of the BHR Group / IAHR International Conference on Pipeline Systems, Manchester.

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, September 22nd - 24th, Paper F2, F2-15 - F2-28.

Martin, C.S., (1996). Two-phase gas-liquid experiences in fluid transients, Proceedings of the 7th International Conference on Pressure Surge and Fluid Transients in Pipelines and Open Channels, BHRA, Harrogate, UK.

Pozos, O; Rodal, E.A.; Sánchez, A.; YURI, F. (2008). Aire atrapado en acueductos a bombeo. XX Congreso Nacional de Hidráulica, Toluca, México.

Qiu, D.Q., (1995). Transient analysis and the effect of air pockets in a pipeline, Master of Philosophy Thesis, University of Liverpool, UK.

Qiu, D.Q., Borrows, R., (1996). Prediction of pressure transients with entrapped air in a pipeline, Proceedings of the 7th International Conference on Pressure Surge and Fluid Transients in Pipelines and Open Channels, BHRA, Harrogate, UK.

Richards, R.T. (1962). Air binding in water pipelines, AWWA.

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.

Shuy, E.B., Aplet, C.J., (1983). Friction effects in unsteady pipe flow, 4th International Conference on Pressure Surge, BHRA.

Stephenson, D., (1997). Effects of air valves and pipework on water hammer pressure, Journal of Transportation Engineering, Vol. 123, N° 2.

Tchobanoglous, G. (1996). Ingeniería de aguas residuales, Redes de alcantarillado y bombeo, Tomo III. México: Editorial McGraw-Hill.

Thorley, A.R.D., (2004). Fluid transients in pipeline systems, 2nd Edition, Ed. D. & L. George Ltd., London, UK.

Walski, T.M., Barnhart T., Driscoll J. and Yencha R., (1994). Hydraulics of corrosive gas pockets in force mains. Water Environment Research, Vol. 66, No. 6, Sept/Oct.

Wylie, E.B. and Streeter, V.L. (1978). Fluid Transients, McGraw-Hill International Book Company, New York, USA.

Wylie, E.B., Streeter, V.L., Suo, L., (1993). Fluid transients in systems, Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

LISTA DE FIGURAS

Figura	Nombre	Página
I. Sistemas de bombeo que transportan aguas residuales		
1.1	Altura de elevación de una bomba.	9
1.2	Curvas características típicas de una bomba.	10
1.3	Punto de funcionamiento de una bomba en el sistema.	11
1.4	Bomba vertical de flujo radial.	13
1.5	Bomba de flujo mixto.	13
1.6	Bomba vertical de flujo axial	14
1.7	Bomba de tornillo.	15
II. Descripción del proceso de producción de sulfuro de hidrógeno		
2.1	Efecto del pH en el equilibrio del H ₂ S.	27
2.2	Corrosión en la tubería: a) película biológica, b) tubo dañado.	28
2.3	Tubería de concreto corroída con el acero de refuerzo expuesto.	29
2.4	Instalación para la inyección de cloro.	31
2.5	Difusores típicos para la adición de cloro para drenajes a gravedad y a presión.	31
2.6	Instalación para la adición de H ₂ O ₂	32
III. Beneficios y desventajas de inyectar aire a sistemas que transportan agua residual		
3.1	Aspirador Venturi.	40
3.2	Ejemplo de una bomba de aire comprimido.	40
3.3	Tubo U.	41
3.4	Fuerzas que actúan en una bolsa de aire estacionaria en una tubería con flujo de agua a tubo lleno	45
3.5	Bolsa de aire en una pendiente descendente.	45
3.6	Bolsas de aire en un acueducto a gravedad.	45
3.7	Bolsas de aire en un acueducto a bombeo.	46
3.8	Efecto blowback.	47
3.9	Golpe de ariete causado por remoción de una bolsa de aire.	47

IV. Análisis del comportamiento del aire/gas en sistemas que transportan agua residual

4.1	Válvula de aire, modelo S-020.	50
4.2	Válvula de aire k-020 para aguas residuales.	50
4.3	Válvula de aire modelo D-025.	51
4.4	Acumulación de grandes burbujas de aire.	54
4.5	Planta y perfil del dispositivo experimental.	55
4.6	Sección de medición.	56
4.7	Volumen de una bolsa de aire estacionaria.	60
4.8	Sección de medición con flujo a superficie libre a presión atmosférica.	62
4.9	Clasificación de los perfiles del flujo gradualmente variado.	64
4.10	Variables utilizadas en el flujo gradualmente variado.	64
4.11	Perfiles de flujo A2 y S2.	66
4.12	Perfiles de flujo H2 y S2.	67
4.13	Perfiles de flujo M2 y S2.	67
4.14	Perfiles de flujo A2 y S2, $Q = 0.013 \text{ m}^3/\text{s}$, $V = 0.01 \text{ m}^3$	68
4.15	Perfiles de flujo H2 y S2, $Q = 0.017 \text{ m}^3/\text{s}$, $V = 0.01 \text{ m}^3$	69
4.16	Perfiles de flujo M2 y S2, $Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, $V = 0.01 \text{ m}^3$	69

V. Problemas causados por el aire/gas en sistemas de bombeo que transportan aguas residuales

5.1	Elemento horizontal.	74
5.2	Diagrama de cuerpo libre.	75
5.3	Volumen de control.	77
5.4	Torre de oscilación.	80
5.5	Cámara de aire.	83
5.6	Esquema de funcionamiento de un tanque unidireccional.	84
5.7	Tanque unidireccional.	85
5.8	Esquema de funcionamiento de un tanque bidireccional.	86
5.9	Tanque bidireccional.	86
5.10	Arreglos para una válvula de no retorno intermedia.	88
5.11	Válvula de alivio de resorte.	89
5.12	Membrana destructible.	92
5.13	By-pass en una estación de bombeo.	93
5.14	Líneas características en un plano x-t.	95
5.15	Esquema de diferencias finitas.	97
5.16	Notación para la bolsa de aire.	102
5.17	Perfil del acueducto a bombeo	105
5.18	Envolventes de las líneas piezométricas máximas y mínimas con 4 diferentes volúmenes de aire en los puntos 1 a 4	108

5.19 Envolventes de las líneas piezométricas máximas y mínimas con diferentes volúmenes de aire en el punto 1

110

LISTA DE TABLAS

Tabla	Nombre	Página
1.1	Clasificación de las estaciones de bombeo.	20
4.1	Movimiento de burbujas y bolsas de aire en una tubería con pendiente descendente, $D = 76.2$ mm.	57
4.2	Gastos y volúmenes de aire usados en el experimento 2.	62
4.3	Perfil de flujo calculado con el método del paso directo.	65
5.1	Movimiento de las bolsas de aire en las pendientes descendentes del acueducto	105
5.2	Movimiento de las bolsas de aire en las pendientes descendentes del acueducto II	105
5.3	Volúmenes de aire cuando 3 equipos de bombeo están en operación	106
5.4	Volúmenes de aire cuando 4 equipos de bombeo están en operación	106