



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – APROVECHAMIENTOS HIDRÁULICOS

INTRUSIÓN PATÓGENA EN CONDUCTOS A PRESIÓN CAUSADA POR
TRANSITORIOS CON AIRE ATRAPADO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ALDO RODRIGO MARTÍNEZ PUJOL

TUTOR PRINCIPAL:
ÓSCAR POZOS ESTRADA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. AGOSTO, 2014



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Oscar Fuentes Mariles

Secretario: Dr. Ramón Domínguez Mora

1er Vocal: Dr. Oscar Pozos Estrada

2do Vocal: Dr. Adrián Pedrozo Acuña

3er Vocal: Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez

Lugar donde se realizó la tesis: México, Distrito Federal.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Oscar Pozos Estrada

FIRMA

“La mayor necesidad del género humano es una ecología equilibrada
y su mayor patrimonio es una mente inquieta.”

Isaac Asimov (1920-1992). Bioquímico y escritor.

Agradecimientos

A CONACYT por el apoyo brindado para la elaboración de este trabajo.

A Oscar Pozos y Agustín Escalante por el apoyo y confianza.

A mi familia: Isabel y Jorge, Austin y Abril, los amo.

A Thelma, mi fiel y amorosa compañera.

A mis hermanos por elección: Javier, Martín, Gerardo, Noé, Vicente, Marco y Roberto, por creer en mi siempre.

A Juan José Risoul y Erwin Rivera, por su comprensión.

A mis compañeros y amigos.

Resumen

Una línea de conducción generalmente transporta agua considerada de buena calidad, segura para consumo humano y satisfacer sus necesidades de uso. La posible entrada al sistema de elementos ajenos a la conducción (intrusión patógena), que contaminen el fluido y deterioren la infraestructura se puede convertir en un problema. Esta situación se puede dar cuando variaciones de presión, asociadas a cambios de velocidad súbitos (fenómenos transitorios) permitan la entrada de un flujo ajeno a la conducción, causando problemas en la calidad de agua.

Así pues para que se presente la intrusión patógena son necesarios tres factores: una fuente contaminante, una vía de entrada y un mecanismo que desencadene el evento.

El presente trabajo analiza la ocurrencia de la intrusión patógena asociada directamente con las fugas de agua en una línea de conducción, cuando las condiciones de presiones transitorias son adversas en el sistema. Es decir el último factor para la intrusión, el mecanismo que desencadena el evento.

Se enfoca el trabajo en el caso particular del fenómeno de intrusión, asociado a fenómenos transitorios en presencia de bolsas de aire, las cuales afectan la magnitud de las variaciones de presión.

Se hace uso de la ecuación del orificio para el cálculo del caudal de intrusión (comportamiento experimentado por otros investigadores) y se aplica a un caso de estudio, donde operan diversos equipos de bombeo y ocurre el paro inesperado.

Palabras clave: Intrusión patógena, fenómenos transitorios, bolsas de aire, caudal de intrusión.

Planteamiento del problema

El agua es empleada de diversas formas prácticamente en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o para producir e intercambiar bienes y servicios.

La provisión de agua potable y de saneamiento es un factor significativo en la salud de la población, especialmente entre la infantil. El acceso al agua potable y al saneamiento adecuado son elementos cruciales para la reducción de la mortalidad y morbilidad entre la población menor de cinco años, en la disminución tanto de la incidencia de enfermedades de transmisión hídrica como la hepatitis viral, fiebre tifoidea, cólera, disentería y otras causantes de diarrea, así como posibles afecciones resultantes del consumo de agua con componentes químicos patógenos, tales como arsénico, nitratos o flúor.

En función del uso que se pretenda dar al líquido se diseñarán sistemas de conducción que permitan el transporte más eficiente desde el punto de abastecimiento al usuario final. Un ejemplo de suministro, uso y disposición de agua potable se presenta en la Figura 1.

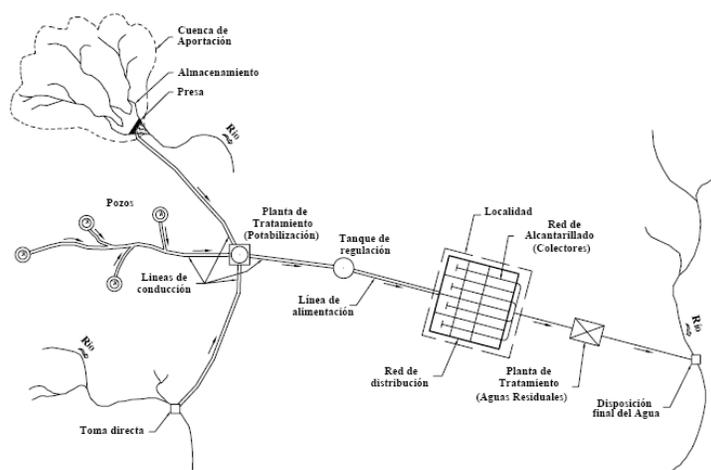


FIGURA 1. CONFIGURACIÓN TÍPICA DE SUMINISTRO DE AGUA (MAPAS, CONAGUA. 2007)

Una vez puesto en funcionamiento el sistema de distribución presurizado (ya sea por gravedad o por bombeo) debemos reconocer que el comportamiento del sistema es dinámico y que las condiciones de funcionamiento determinan la variación de las condiciones hidráulicas en mayor o menor rapidez.

A continuación, en la Figura 2 se muestra un diagrama que indica las posibles causas de contaminación en el suministro de agua potable.

A los fenómenos de variación de presiones en los acueductos, motivadas por variaciones proporcionales en las velocidades del fluido, se les conoce comúnmente como transitorios, y éstos pueden no causar problema alguno al sistema o bien ser muy destructivos.

Uno de los casos particulares del análisis de transitorios es aquel en el que se cuenta con aire atrapado dentro de la tubería. El aire puede ser introducido por vórtices en la succión de las bombas, por construcción defectuosa de las líneas de conducción, por el aire disuelto en el agua, por un purgado de aire inadecuado de la línea, debido a juntas defectuosas en la tubería o por

dispositivos de alivio que funcionen incorrectamente. En la Figura 3 se ilustra de forma esquemática, las causas por las que se introduce el aire en las tuberías.

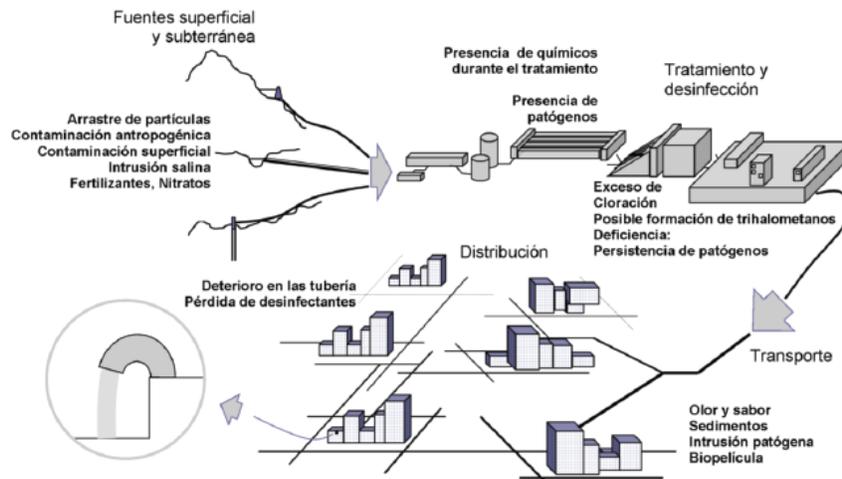


FIGURA 2. ADVERSIDADES DE LA CALIDAD DE AGUA EN LA DISTRIBUCIÓN (MORA, 2011)

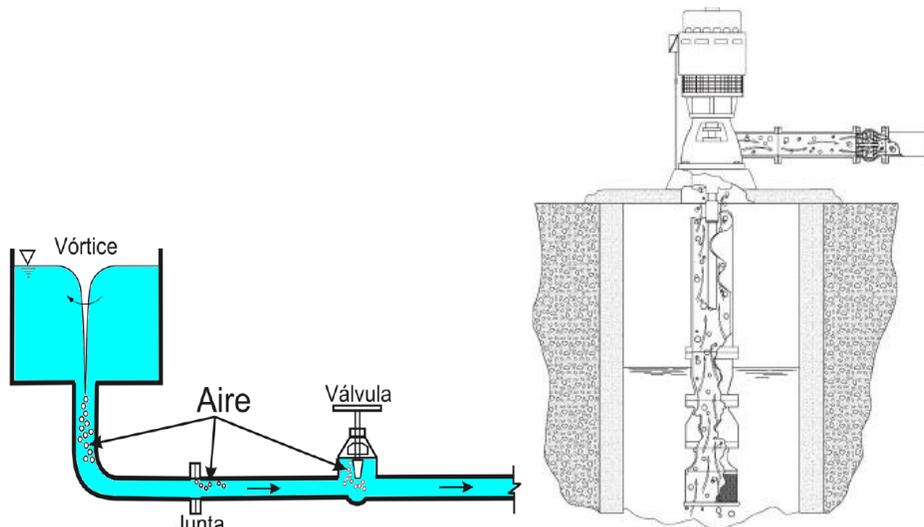


FIGURA 3. CAUSAS POR LAS QUE SE INTRODUCE EL AIRE A LOS ACUEDUCTOS (MAPAS, CONAGUA. 2007)

Una vez que el aire se encuentra en la tubería los efectos sobre el comportamiento dinámico del sistema de la tubería son variados. Las investigaciones previas relacionadas con este tema, 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.

Como se observó en la Figura 2 una causa de contaminación es la intrusión patógena, un fenómeno poco estudiado hasta el momento en México, pero que ha adquirido importancia en las últimas décadas, en tanto que la salubridad en materia hídrica es fundamental para el desarrollo humano.

Justificación y alcances

La calidad del agua para el consumo humano es uno de los temas vigentes por parte de los gestores de los sistemas de abastecimiento y de centros de investigación en el entorno de la hidráulica urbana. Este aspecto es abordado desde distintos puntos de vista, motivado de manera primordial por las consecuencias que implica el consumo de agua contaminada. En este sentido y por tratarse de la protección de la salud pública, es indispensable tener mayor conocimiento en todas las formas en las que se ha visto vulnerable el agua potable.

Las redes de distribución de agua, como toda obra de ingeniería, presentan una vida útil, en la mayoría de las poblaciones urbanas se tienen instalaciones que han cumplido con ella y como consecuencia de circunstancias adversas se pueden ir incrementando los problemas físicos en las conducciones con el paso del tiempo. En las décadas recientes, en las zonas de producción y tratamiento el problema de la calidad del agua cada vez está más controlado. En cambio en las redes de distribución se ha venido incrementando la degradación de la calidad por problemas de contaminación, hecho que ha sido documentado principalmente por eventos epidemiológicos. Entre otros factores identificados en esta problemática se encuentra el fenómeno de la intrusión patógena.

En el presente trabajo se analiza numéricamente la intrusión patógena asociada a fenómenos transitorios en presencia de aire atrapado. Al modelar estos fenómenos creamos las herramientas que permitirán reproducir escenarios puntuales donde la vulnerabilidad de los acueductos este comprometida y con ello tener mayor conocimiento de las posibles situaciones que podrían darse durante eventos imprevistos, como el paro inesperado de los equipos de bombeo.

Contenido

Resumen.....	4
Planteamiento del problema	5
Justificación y alcances	7
Capítulo 1. Acueductos y sus componentes.....	11
1.1 Introducción.....	11
1.1.1 Conducción por bombeo.....	11
1.1.2 Conducción por gravedad.....	12
1.1.3 Conducción por bombeo-gravedad	12
1.2 Componentes de un acueducto	13
1.2.1 Tuberías.....	13
1.2.2 Piezas especiales.....	17
1.2.3 Válvulas	20
1.3 Recomendaciones de diseño.....	22
1.4 Metodología de diseño	23
1.4.1 Trazo planimétrico.....	23
1.4.2 Trazo altimétrico	23
1.4.3 Cálculo hidráulico.....	24
1.4.4 Localización de piezas especiales y dispositivos.....	24
1.4.5 Cálculo de la pérdida por fricción en la tubería.....	24
1.5 Hidráulica de tuberías	25
1.5.1 Ecuaciones para flujo permanente	25
1.5.2 Pérdidas de energía por fricción en la conducción.....	25
1.5.3 Pérdidas locales.....	26
Capítulo 2. Fenómenos transitorios	28
2.1 Introducción.....	28
2.2 Regímenes posibles del flujo en tuberías a presión.....	28
2.3 Velocidad de propagación de la onda de presión (celeridad).....	29

2.4	La fórmula de Joukowski.....	30
2.5	Golpe de ariete.....	31
2.5.1	Casos en que se presenta el golpe de ariete	32
2.5.2	Descripción del fenómeno.....	32
2.6	Método de las Características.....	36
2.7	Dispositivos supresores de golpe de ariete.....	39
2.7.1	Válvula aliviadora de presión	40
2.7.2	Válvula anticipadora del golpe de ariete	40
2.7.3	Torre de oscilación.....	41
2.7.4	Tanque unidireccional.....	41
2.7.5	Cámara de aire	42
2.7.6	Instalación de un by-pass en la válvula de no retorno.....	43
2.7.7	Instalación de un by-pass en la planta de bombeo.....	43
Capítulo 3. Aire atrapado en acueductos		45
3.1	Introducción.....	45
3.2	Causas	46
3.3	Efectos	47
3.3.1	Incremento de la pérdida de carga causado por aire atrapado	47
3.3.2	Pérdida de carga que reduce la capacidad del sistema.....	48
3.3.3	Retorno de bolsas de aire de gran tamaño debido a la fuerza de flotación (Blowback).....	49
3.3.4	Golpe de ariete provocado por la evacuación de aire.....	50
3.4	Efecto de las bolsas de aire en transitorios hidráulicos en acueductos de bombeo	51
3.5	Modelo numérico para investigar el efecto de bolsas de aire en transitorios hidráulicos	53
3.5.1	Localización de las bolsas de aire.....	53
3.5.2	Cálculo del volumen de las bolsas de aire.....	55
3.5.3	Propuesta del modelo numérico.....	57
3.5.4	Metodología para evaluar transitorios hidráulicos con aire atrapado	59

Capítulo 4. Intrusión patógena por transitorios hidráulicos	61
4.1 Causas y Efectos.....	61
4.2 Intrusión patógena	67
4.3 Avances en la Investigación del fenómeno.....	69
4.4 Caracterización del volumen de agua que entra en la distribución.....	72
Capítulo 5. Simulación del Fenómeno de Intrusión Patógena en presencia de Aire atrapado	74
5.1 Caso de estudio.....	74
5.2 Análisis de transitorios con aire atrapado.....	75
5.3 Análisis de Intrusión Patógena	76
5.4 Resultados de la Intrusión Patógena.	80
Conclusiones.....	82
Bibliografía	83
Anexo A.....	87

Capítulo 1. Acueductos y sus componentes

1.1 Introducción

El agua es empleada de diversas formas prácticamente en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o para producir e intercambiar bienes y servicios.

La provisión de agua potable y de saneamiento es un factor significativo en la salud de la población, especialmente entre la infantil. El acceso al agua potable y al saneamiento adecuado son elementos cruciales para la reducción de la mortalidad y morbilidad entre la población menor de cinco años, en la disminución tanto de la incidencia de enfermedades de transmisión hídrica como la hepatitis viral, fiebre tifoidea, cólera, disentería y otras causantes de diarrea, así como posibles afecciones resultantes del consumo de agua con componentes químicos patógenos, tales como arsénico, nitratos o flúor.

En el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) del 2012, se registran los volúmenes concesionados a los usuarios de aguas nacionales. En dicho registro se tienen clasificados los usos del agua en 12 rubros, mismos que para fines prácticos se han agrupado en cinco grandes grupos; cuatro de ellos corresponden a usos consuntivos, a saber, el agrícola, el abastecimiento público, la industria autoabastecida y la generación de energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad, y por último el hidroeléctrico, que se contabiliza aparte por corresponder a un uso no consuntivo.

En función del uso que se pretenda dar al líquido se diseñarán sistemas de conducción que permitan el transporte más eficiente desde el punto de abastecimiento al punto requerido. Al medio a través del cual se realiza la conducción se le llama acueducto.

Podemos utilizar la definición de acueducto de la Real Academia Española (RAE): Conducto artificial por donde va el agua a lugar determinado, y especialmente el que tiene por objeto abastecer de aguas a una población.

Para complementar la definición podemos incluir que las conducciones son de sección cerrada (tuberías) o de sección abierta (canales).

El tipo de conducto será determinado por la forma en que el flujo se traslada.

1.1.1 Conducción por bombeo

Es necesaria cuando se requiere adicionar energía para suministrar el gasto de diseño. Este tipo de conducción se usa generalmente cuando la elevación del agua en la fuente de abastecimiento es menor a la altura piezométrica requerida en el punto de entrega. El equipo de bombeo proporciona la energía necesaria para lograr el transporte del agua, tal y como se muestra la Figura 1.1.

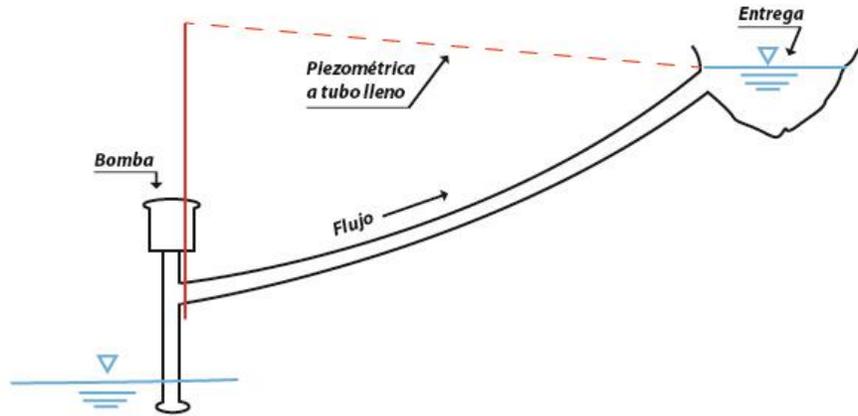


FIGURA 1. 1 ESQUEMA TÍPICO DE UN ACUEDUCTO A BOMBEO

1.1.2 Conducción por gravedad

Se presenta cuando la elevación del agua en la fuente de abastecimiento es mayor a la altura piezométrica requerida o existente en el punto de entrega del agua, el transporte del fluido se logra por la diferencia de energías disponible, un esquema que podría ejemplificar este caso se muestra en la figura 1.2.

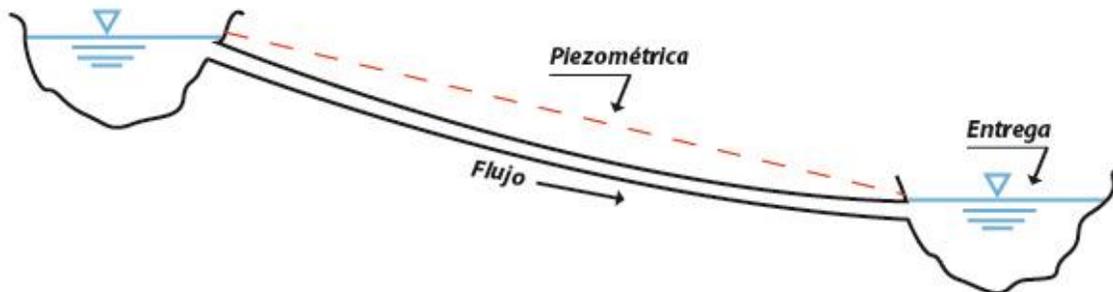


FIGURA 1. 2 ESQUEMA TÍPICO DE UN ACUEDUCTO A GRAVEDAD

1.1.3 Conducción por bombeo-gravedad

Si la topografía del terreno obliga al trazo de la conducción a cruzar por partes más altas que la elevación de la superficie del agua en el tanque de regularización, conviene analizar la colocación de un tanque intermedio en ese lugar. La instalación de dicho tanque ocasiona que se forme una conducción por bombeo-gravedad, donde la primera parte es por bombeo y la segunda por gravedad.

En ciudades donde es necesario buscar fuentes alternas para el abastecimiento del agua, su ubicación puede presentarse en puntos diferentes. En este caso resultan a menudo conducciones más económicas al interconectar los conductos, formando en este caso una red de conducción.

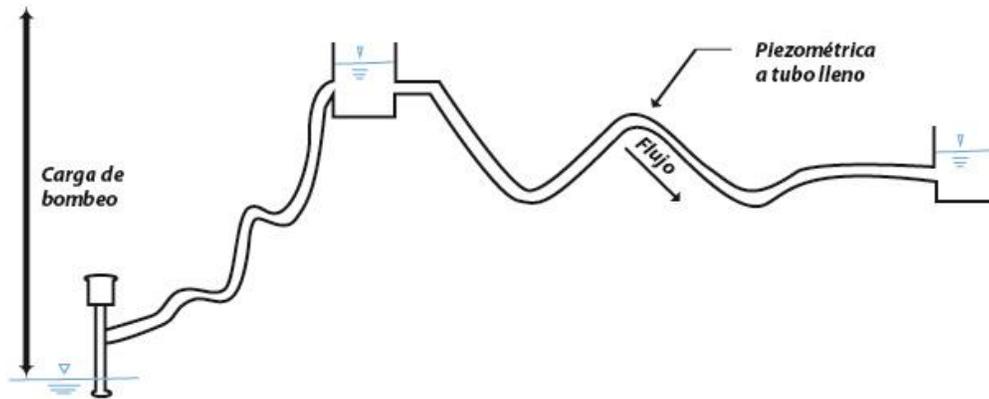


FIGURA 1. 3 ESQUEMA TÍPICO DE UN ACUEDUCTO BOMBEO-GRAVEDAD

Las derivaciones de una conducción hacia dos o más tanques de regularización, ocasiona también la formación de redes de conducción.

Las líneas de conducción paralelas se forman cuando es necesario colocar dos o más tuberías sobre un mismo trazo. Esta instalación se recomienda para evitar la colocación de diámetros grandes, para efectuar la construcción por etapas según sean las necesidades de la demanda de agua, la disponibilidad de los recursos, y facilitar la operación a diferentes gastos.

1.2 Componentes de un acueducto

1.2.1 Tuberías

Del diseño hidráulico debe determinarse para todo el sistema o por tramos, la mayor presión estática o dinámica (incluyendo los fenómenos transitorios). De acuerdo con estas presiones, se escoge la clase de tubería que se debe instalar de forma que la presión de trabajo o servicio recomendada por el fabricante sea mayor o igual a la máxima presión a la que va a estar sometido durante su vida útil.

En la fabricación de tuberías utilizadas en los sistemas de agua potable, los materiales de actual uso son: acero, fibrocemento, concreto, cloruro de polivinilo (PVC), hierro dúctil, polietileno de alta densidad (PAD) y poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV).

Tuberías de acero

Los aceros son aleaciones de hierro-carbono, aptas para ser deformadas en frío y en caliente. Generalmente, el porcentaje de carbono no excede del 1.76%. Las tuberías de acero tienen un gran uso industrial debido a su alta resistencia en la contención de fluidos, presión y dureza. En la figura 1.4 se muestra una serie de tubos de acero con costura helicoidal listos para ser colocados en su zanja.



FIGURA 1. 4 TUBERÍA DE ACERO CON COSTURA HELICOIDAL

Tuberías de Fibrocemento

Son elaborados a partir de una mezcla íntima y homogénea de fibras y cemento Portland o portland puzolánico, exenta de materia orgánica, con o sin adición de sílice y agua. Tienen alta resistencia a la compresión, a la tracción, estanquidad, no presentan corrosión, normalmente dieléctricos y no propician el albergue de colonias bacterianas. En la figura 1.5 se muestra un tendido de tubería de fibrocemento con sistema de conexión espiga campana.



FIGURA 1. 5 TUBERÍA DE FIBROCEMENTO

Tuberías de Concreto

Son elaboradas de concreto en las clases I, II, III, IV y V, con refuerzo o sin él, en función de las necesidades del proyecto, inclusive pueden tener recubrimientos plásticos de PAD o PVC. Las tuberías de concreto son un sistema rígido donde el 85% de la resistencia es aportada por la tubería y sólo el 15 % es aportado por el material de relleno. Son durables, resistentes al fuego, y el ritmo de instalación depende más de la instalación que de la colocación del tubo por lo general. En la figura 1.6 se muestra la maniobra de izaje y colocación de una tubería de concreto reforzado en la zanja así como un patio de almacenamiento.

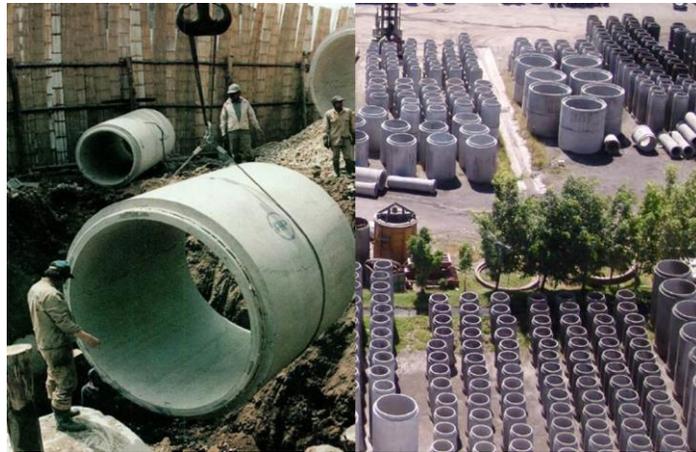


FIGURA 1. 6 TUBERÍA DE CONCRETO REFORZADO

Tuberías de Cloruro de Polivinilo (PVC)

Creada a partir de compuestos vírgenes rígidos de PVC, esta tubería ofrece entre sus ventajas: bajo peso (reduce costos de transportación, manejo e instalación), paredes suaves y sin costuras, altamente elásticos, durables y resistencia al impacto. Son libres de toxicidad, no proporcionan olores ni sabores, no presentan corrosión, inmunes al ataque galvánico y electrolítico, son autoextinguibles, con pérdidas mínimas por fricción, baja conductividad térmica, bajo costo y libre de mantenimiento. En la figura 1.7 se muestra la tubería de PVC Big Blue lista para su colocación mediante sistema de espiga-campana y anillo.



FIGURA 1. 7 TUBERÍA DE PVC

Tuberías de Polietileno de Alta Densidad (PAD)

Fabricada con resina de polietileno de alta densidad, de alto peso molecular y con paredes externa e interna lisas, esta tubería se une a través de la termofusión y electrofusión garantizando un sistema totalmente hermético. Tiene alta resistencia química, a la abrasión, a la intemperie y con bajo costo. Presenta las mismas características de la tubería de PVC. En la figura 1.8 se muestra el izaje de tubería de PVC así como utilización de contrapesos de concreto para asegurar la estanquidad de la tubería aún bajo el agua.



FIGURA 1. 8 TUBERÍA DE PAD

Tuberías de Hierro Dúctil

Esta tubería está compuesta por un recubrimiento interior de mortero aplicado por centrifugación, una capa de zinc que evita la corrosión, hierro fundido de grafito de forma esferoidal y por último una capa bituminosa. Tiene alta resistencia a la tracción, al impacto, alto límite elástico, resistencia a la abrasión, vida útil de 50 años y sistema de montaje por espiga campana. En la figura 1.9 se muestra la estiba e izaje de la tubería de hierro dúctil.



FIGURA 1. 9 TUBERÍA DE HIERRO DÚCTIL

Tubería de poliéster reforzado con fibra de vidrio

Esta tubería tiene larga vida útil, no necesita protección contra la corrosión, es muy ligero (pesa 10 veces menos que el concreto), medidas hasta 12 m de longitud, muy lisa pared que evita la fricción y la incrustación, fácil instalación y múltiples tipos de conexión que se adaptan a las necesidades de la obra. Tiene una celeridad de onda menor a la de otros materiales y redonda en beneficios al momento de soportar fenómenos transitorios. En la figura 1.10 se muestra la fabricación de la tubería de fibra de vidrio así como un acueducto en operación.



FIGURA 1. 10 TUBERÍA DE FIBRA DE VIDRIO

1.2.2 Piezas especiales

Juntas

Las juntas se utilizan para unir dos tuberías; las de metal pueden ser de varios tipos, por ejemplo, Gibault, Dresser, etc. En la figura 1.11 se muestra una junta flexible y Snap Joint, ambas en acero.



FIGURA 1. 11 JUNTA FLEXIBLE Y SNAP JOINT

Carretes

Los carretes son tubos de pequeña longitud provistos de bridas en los extremos para su unión. Se fabrican de fierro fundido con longitudes de 25, 50, y 75, cm. En la figura 1.12 se presentan dos diferentes tipos de carretes en fierro fundido.



FIGURA 1. 12 CARRETES DE FIERRO FUNDIDO

Extremidades

Las extremidades son tubos de pequeña longitud que se colocan sobre alguna descarga por medio de una brida en uno de sus extremos. Se fabrican en longitudes de 40, 50, y 75 cm. Para materiales de PVC, las extremidades pueden ser campana o espiga como se observa en la Figura 1.13.



FIGURA 1. 13EXTREMIDADES DE PVC

Tees

Las tees se utilizan para unir tres conductos en forma de te, donde las tres uniones pueden ser del mismo diámetro, o dos de igual diámetro y uno menor. En el segundo caso se llama te reducción. En la Figura 1.14 se observan ejemplos de tees en acero inoxidable y PAD.



FIGURA 1. 14 TEES DE ACERO INOXIDABLE Y PAD

Cruces

Las cruces se utilizan para unir cuatro conductos en forma de cruz, donde las cuatro uniones pueden ser del mismo diámetro, o dos mayores de igual diámetro y dos menores de igual diámetro. En el segundo caso se llama cruz reducción. En la Figura 1.15 se observa un cruce de agua potable fabricado en fierro fundido en reparación.



FIGURA 1. 15 CRUCERO DE TUBERÍA DE AGUA POTABLE

Codos

Los codos tienen la función de unir dos conductos del mismo diámetro en un cambio de dirección ya sea horizontal o vertical. Los codos pueden tener deflexiones de 11.25°, 22.5°, 30°, 45°, 60° y 90°. En la Figura 1.16 se observan codos de 90 grados en PVC y PAD de radio corto y largo.



FIGURA 1. 16 CODOS DE PVC Y PAD.

Reducciones

Las reducciones se emplean para unir dos tubos de diferente diámetro. En materiales de PVC, las reducciones pueden ser en forma de espiga o de campana. En la Figura 1.17 se aprecian reducciones en diferentes materiales.



FIGURA 1. 17 REDUCCIÓN CON JUNTA Y EN PVC

Coples

Los coples son pequeños tramos de tubo de PVC o de fibrocemento que se utilizan para unir las espigas de dos conductos del mismo diámetro. Los coples pueden ser también de reparación, los cuales se pueden deslizar libremente sobre el tubo para facilitar la unión de los dos tubos en el

caso de una reparación. En la Figura 1.18 se observa un cople de acero inoxidable y uno de pvc, en el segundo se aprecia además un cambio de diámetro.



FIGURA 1. 18 COPLES DE ACERO INOXIDABLE Y PVC

Tapones y tapas

Los tapones y las tapas se colocan en los extremos de un conducto con el objetivo de evitar la salida de flujo. En materiales de PVC, es costumbre llamarlos tapones, pudiendo ser en forma de campana o espiga. En materiales de hierro fundido, se acostumbra llamarlos tapas ciegas. En la figura 1.19 se aprecian dos tapones de hierro fundido.



FIGURA 1. 19 TAPONES DE FIERRO FUNDIDO

1.2.3 Válvulas

Válvula eliminadora de aire

La válvula eliminadora de aire cumple la función de expulsar el aire en la tubería que continuamente se acumula en las partes altas sobre el trazo de la conducción, cuando ésta se encuentra en operación. Es útil principalmente en el evento de llenado de la conducción y generalmente con el diseño mostrado en la Figura 1.20.

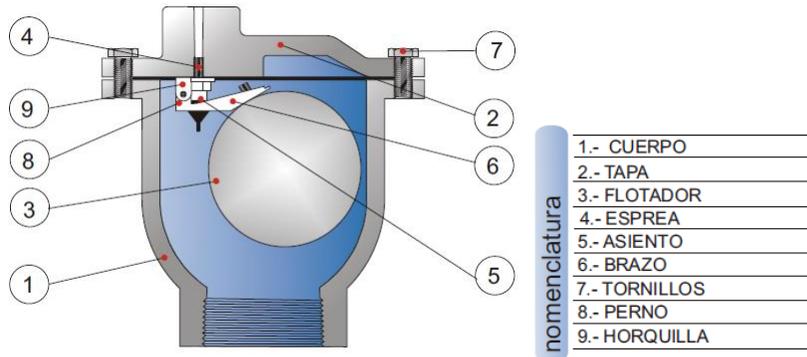


FIGURA 1. 20 ESQUEMA DE VÁLVULA ELIMINADORA DE AIRE

Válvula de admisión y expulsión de aire

La válvula de admisión y expulsión de aire se utiliza para expulsar el aire que contiene la tubería al momento de iniciar el llenado del conducto. Una vez que el agua ejerce presión sobre el flotador de la válvula, ésta se cierra y no se abre mientras exista presión en el conducto.

Otra función de esta válvula es permitir la entrada de aire dentro del tubo al momento de iniciar el vaciado de la tubería, y con ello evitar que se presenten presiones negativas. Generalmente con el diseño mostrado en la Figura 1.21.

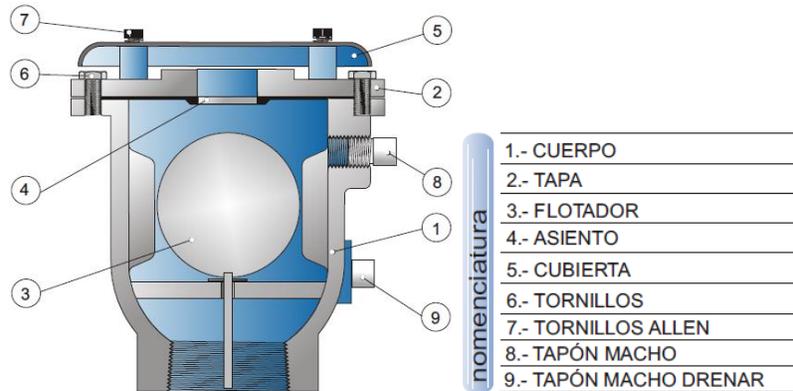


FIGURA 1. 21 ESQUEMA DE VÁLVULA ADMISIÓN-EXPULSIÓN DE AIRE

Válvula de no retorno (Válvula Check)

La válvula de no retorno tiene la función de evitar la circulación del flujo en el sentido contrario al definido en el diseño. En la actualidad existen numerosos modelos, en la Figura 1.22 se muestra un esquema típico.

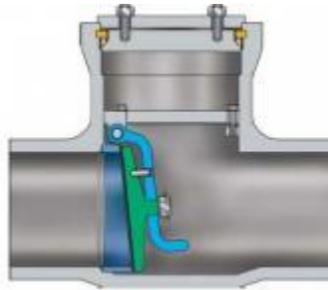


FIGURA 1. 22 VÁLVULA DE NO RETORNO (CHECK)

Válvula de seccionamiento

La válvula de seccionamiento se utiliza para controlar el flujo dentro del tubo, ya sea para impedir el paso del agua o reducir el gasto a un valor requerido.

Las válvulas de seccionamiento pueden ser, por ejemplo, tipo compuerta, de mariposa, o de esfera, tal y como se muestra en la Figura 1.23.



FIGURA 1. 23 VÁLVULA DE SECCIONAMIENTO TIPO MARIPOSA Y ESFERA

1.3 Recomendaciones de diseño

A continuación se presentan los lineamientos generales de los conceptos que es necesario considerar cuando se realiza el proyecto de la línea de conducción de un acueducto.

- La tubería debe seguir, en lo posible, el perfil del terreno; en cuanto a su localización se escoge para que sea la más favorable, con respecto al costo de construcción y a las presiones resultantes. Se debe tener especial atención en la línea del gradiente hidráulico, mientras más cercana esté ésta a la tubería la presión en el acueducto será menor; condición que conlleva un ahorro en el costo de la tubería. En ocasiones, las altas presiones internas se pueden eliminar rompiendo la línea de gradiente hidráulico con la instalación de almacenamientos auxiliares, como embalses o cajas rompedoras de presión.
- La velocidad de agua en la tubería debe ser la adecuada para evitar que se depositen sedimentos en ella, sin provocar problemas de desgaste de las mismas.
- En las obras de conducción por lo general, las tuberías se instalan en zanja; en el trazo topográfico debe procurarse evitar en lo posible, la excavación en roca.
- Cuando la topografía es accidentada, se debe estipular en el proyecto la utilización de válvulas de admisión y expulsión de aire localizadas en los sitios más elevados del perfil, mientras que, cuando la topografía sea moderadamente plana, se ubicarán en puntos situados a cada 1.5 km, como máximo, así como en los puntos más altos del perfil de la línea, o provocar con el perfil de la línea de conducción puntos elevados para propiciar la salida del aire.
- En tramos con pendiente fuerte, ascendente o descendente, se debe analizar la conveniencia de instalar válvulas de admisión o expulsión de aire en puntos intermedios.
- Por otra parte, se deben instalar desagües en los puntos más bajos del perfil, con el fin de vaciar la línea en caso de reparación o mantenimiento durante su operación, así también para utilizarlos éstos al lavar la línea de conducción durante y una vez concluida su instalación.

Para el proyecto de una línea de conducción a bombeo, se deben tomar en cuenta los aspectos indicados en el diseño de conducciones a gravedad; además de reducir, cuando sea posible, la longitud de la línea a presión, disminuyendo con esto los efectos de los fenómenos transitorios.

Se deben analizar los fenómenos transitorios en la línea de conducción, con el objeto de revisar si los tipos y las clases de la tubería seleccionada son los adecuados, y por lo tanto se requieren estructuras de protección, como: tanques unidireccionales, válvulas aliviadoras de presión, torres de oscilación y cámaras de aire.

Topografía. El tipo y la clase de tubería por usar en una conducción dependen de las características topográficas de la línea. Conviene obtener perfiles que permitan bajas presiones de operación, evitando también tener puntos notablemente altos.

Afectaciones. Para el trazo de la línea, se deben considerar los problemas resultantes por la afectación de terrenos ejidales y particulares. De ser posible, se utilizarán los derechos de vía de cauces de agua, caminos, ferrocarriles, líneas de transmisión de energía eléctrica y linderos.

Geotecnia. En general, las tuberías de conducción deben quedar enterradas, principalmente las de fibrocemento y de PVC. El trazo más adecuado puede ser el que permita disminuir al máximo posibles excavaciones en roca. Se debe tener en cuenta la altura del nivel freático.

Cruzamientos. Durante el trazo topográfico se deben localizar los sitios más adecuados para el cruce de la línea de conducción, evitando dentro de lo posible caminos, vías férreas, ríos, canales, lagunas, etc.

Calidad del agua por conducir. Es indispensable saber el grado de turbiedad, si es incrustante, corrosiva o si tiene hierro y manganeso, que puedan afectar notablemente la capacidad de conducción.

Suministro e instalación de tuberías. Se debe tomar en cuenta tanto los costos de suministro, la calidad de los materiales como la disponibilidad oportuna de las tuberías, además de las facilidades financieras que otorguen los fabricantes.

Aspectos socioeconómicos. El uso de ciertas fuentes de abastecimiento (concesionada o no) y el no tomar en cuenta lo indicado en el punto de afectaciones, origina en ocasiones problemas con los habitantes de la región, propiciando cambios de fuente de abastecimiento, modificaciones del trazo de la conducción, indemnizaciones, etc.

1.4 Metodología de diseño

Generalmente los pasos a seguir para el diseño de una línea de conducción, son los siguientes:

1.4.1 Trazo planimétrico

A partir del plano topográfico, se plasma el trazado de la línea de conducción más económica, es decir, la más corta y la de menor diámetro; generalmente ésta es el resultado de varias alternativas siguiendo diversas rutas.

La conducción sigue los accidentes del terreno, si se usa tubería de fibrocemento o de PVC, se instala en zanja, como medida de protección contra los agentes exteriores. Los cambios de dirección, tanto en el plano horizontal como en el vertical, deben efectuarse por medio de curvas suaves empleando la deflexión que permita las uniones con los distintos tipos de tubos.

1.4.2 Trazo altimétrico

En un plano vertical, se construye un perfil del trazado, estableciendo la posición relativa de la tubería, el terreno y la línea piezométrica. Debe tenerse especial cuidado que la línea de conducción, se encuentre siempre por debajo de la línea piezométrica. Las tuberías que pasan sobre la línea piezométrica reciben el nombre de sifones.

1.4.3 Cálculo hidráulico

Una vez estudiados los trazos planimétrico y altimétrico de la conducción, se procede a calcular su diámetro. Si la línea tiene carga suficiente para fluir por gravedad, el diámetro estará completamente definido. Cuando la conducción está alimentada por equipos de bombeo, el problema tiene múltiples soluciones y la mejor se decide con criterios económicos.

En efecto, si el diámetro es pequeño, la pérdida de carga es grande y entonces habrá que usar una bomba de carga elevada que logre vencer las pérdidas, siendo por esta razón muy elevada el costo de la impulsión. Por el contrario, si el diámetro de la tubería es grande, la pérdida de carga es pequeña y la altura para elevar el agua será menor, lo que se traducirá en menor costo de bombeo, pero con una tubería de mayor diámetro y precio. En resumen, en el primer caso, la tubería es barata y el costo de bombeo grande; en el segundo, sucede lo inverso: la tubería es costosa y el gasto de bombeo es reducido. Lo que se debe procurar es que la suma de ambos costos de un costo anual mínimo. El diámetro de la tubería correspondiente a este caso se llama diámetro económico de la línea de conducción.

En el caso de una línea de conducción por bombeo, en el que la pérdida de carga no está prefijada, el diámetro de la línea de conducción debe ser tal que haga que el costo anual sea mínimo. Para un caudal conocido o supuesto, se calculan los costos de varias tuberías de diámetro diferente, así como las pérdidas de carga que ellas producen. El costo anual total estará representado por el interés del costo de conducción, más la depreciación del mismo y más el costo anual del bombeo. El diámetro económico de la línea de conducción, será el que haga que la suma de los conceptos anteriores sea mínima. El costo de la línea de conducción por metro lineal incluye:

- El costo de la tubería, que varía dependiendo del material de que está fabricada
- El costo de uniones (juntas) y su instalación (material y mano de obra)
- La colocación de la tubería, incluyendo la excavación de la zanja, la instalación de la tubería, el relleno de la zanja y su compactación (mano de obra y equipos)

El costo anual del bombeo será igual al interés y depreciación de los costos de la estación de bombeo más los del bombeo en sí. Como los primeros son un sumando común para las distintas tuberías, pues el diámetro de la tubería afecta poco a la capacidad de la estación de bombeo; para la comparación de los costos de las líneas de conducción no se toma éste en cuenta.

Si se trata el caso de una línea de conducción por gravedad, el diámetro económico será aquel con el que se utilice la mayor carga disponible en el perfil considerado, es decir, cuando la pérdida de carga total se acerque a la altura estática entre los puntos de inicio y fin de la línea.

1.4.4 Localización de piezas especiales y dispositivos

Una vez determinados el diámetro y el trazado definitivo, se procede a localizar en el perfil y en la planta, las piezas especiales y dispositivos de la línea de conducción que correspondan, según las funciones y recomendaciones indicadas anteriormente.

1.4.5 Cálculo de la pérdida por fricción en la tubería.

Generalmente en líneas de conducción de gran longitud, la resistencia por fricción o superficial, ofrecida por el interior del tubo es el elemento dominante en su diseño hidráulico. La fórmula de

Darcy-Weisbach es la más adecuada para el cálculo de la resistencia a la fricción en conducciones a presión.

1.5 Hidráulica de tuberías

1.5.1 Ecuaciones para flujo permanente

Las ecuaciones fundamentales de la hidráulica que aquí se aplican son dos, la de continuidad y de energía. La ecuación de continuidad se aplica en los nodos (Es el punto donde se unen dos o más de los elementos mencionados) y la de energía en los recorridos (Es una trayectoria a través de los elementos del sistema de tubos con un sentido arbitrario, pasando por un punto sólo una vez).

1.5.2 Pérdidas de energía por fricción en la conducción

Para calcular las pérdidas de energía por fricción en la conducción, entre otras ecuaciones, existen las de Darcy-Weisbach, Hazen - Williams, y Manning, de las cuales se recomienda utilizar la primera, por su carácter general y mejor modelación del fenómeno.

Ecuación de Darcy-Weisbach

La ecuación de Darcy-Weisbach se expresa:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (1.1)$$

Donde f es un coeficiente de pérdida. L y D son la longitud y el diámetro interior del tubo respectivamente, V es la velocidad media del flujo y h_f es la pérdida de energía por fricción.

El flujo en régimen turbulento es el caso que normalmente se presenta en los conductos de sistemas de agua potable. En este régimen de flujo, f depende del número de Reynolds y de la rugosidad relativa ε/D ; sus valores se obtienen aplicando la ecuación de Colebrook-White.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3.71 D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (1.2)$$

Donde Re

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (1.3)$$

ε es la rugosidad absoluta de la pared interior del tubo expresado en mm, y ν es la viscosidad cinemática del fluido en m^2/s .

Ecuación modificada de Colebrook-White

Se han efectuado varios estudios para obtener expresiones explícitas para el cálculo del coeficiente de pérdidas f ajustado a los resultados de la ecuación de Colebrook- White y poder así aprovechar las ventajas que tiene esta ecuación.

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left[\frac{\epsilon/D}{3.71} + \frac{G}{ReT}\right]\right]^2} \quad (1.4)$$

La ecuación (1.4) tiene ventajas sobre otras presentaciones explícitas para calcular el valor de f , donde:

$$G = 4.555 \text{ y } T = 0.8764 \text{ para } 4000 \leq Re \leq 10^5$$

$$G = 6.732 \text{ y } T = 0.9104 \text{ para } 10^5 \leq Re \leq 3 \times 10^6$$

$$G = 8.982 \text{ y } T = 0.93 \text{ para } 3 \times 10^6 \leq Re \leq 10^8$$

Se tiene:

$$f = \frac{0.203L}{gD^5 \left[\log\left[\frac{\epsilon/D}{3.71} + \frac{G}{ReT}\right]\right]^5} Q^2 \quad (1.5)$$

con la cual se calculan las pérdidas de energía por fricción en una conducción, con los mismos resultados que las ecuaciones de Darcy-Weisbach y de Colebrook-White.

1.5.3 Pérdidas locales

Las pérdidas locales de energía se generan en distancias relativamente cortas, por accesorios de la conducción tales como codos, tees, cruces, válvulas, etc. Para calcular las pérdidas locales de energía se utiliza la expresión general:

$$h = k \frac{V^2}{2g} \quad (1.6)$$

donde k es un coeficiente de pérdida que depende del tipo de accesorio que lo genera, g es la gravedad y V es la velocidad media del flujo, por lo general aguas abajo del dispositivo, exceptuando el caso de la llegada del flujo de una tubería a un depósito; en cuyo caso V es la velocidad en el tubo.

ACCESORIO	COEFICIENTE k
1. De depósito a tubería (pérdida a la entrada)	
- Conexión a ras de la pared	0.50
- Tubería entrante	1.00
- Conexión abocinada	0.05
2. De tubería a depósito (pérdida a la salida)	1.00
3. Contracción brusca (véase tabla 1.2)	k_c
4. Codos y tees	
- Codo de 45°	0.35 a 0.45
- Codo de 90°	0.50 a 0.75
- Tees	1.50 a 2.00

TABLA 1. 1 VALORES DE K EN FUNCIÓN DEL TIPO DE ACCESORIO.

En el caso de un ensanchamiento brusco el valor de k es igual a 1.0 y el valor de V se sustituye por la diferencia de velocidades existente en los tubos aguas arriba y aguas abajo del ensanchamiento.

D_1/D_2	k_e
1.20	0.08
1.40	0.17
1.60	0.26
1.80	0.34
2.00	0.37
2.50	0.41
3.00	0.43
4.00	0.45
5.00	0.46

TABLA 1. 2 VALORES DE K EN DADA UNA CONTRACCIÓN BRUSCA

Capítulo 2. Fenómenos transitorios

2.1 Introducción

Habitualmente en el análisis y el diseño de las instalaciones hidráulicas se considera su comportamiento en condiciones estacionarias donde las magnitudes hidráulicas de la instalación (caudales y presiones) permanecen constantes en el tiempo, al ser también invariables las condiciones de funcionamiento de la instalación: Condiciones de contorno (consumos y alturas de los depósitos) y el estado de sus elementos (grado de apertura de las válvulas y velocidad de giro de las turbomáquinas).

Sin embargo, la realidad de una instalación hidráulica es un sistema dinámico y jamás se halla en estado estacionario, ya que las condiciones de funcionamiento que determinan las variables hidráulicas varían en el tiempo con una mayor o menor rapidez. Debido a esto, el análisis o el diseño adecuados de una instalación pasa por conocer la respuesta temporal de las variables hidráulicas de la instalación con el fin de evitar situaciones indeseables como:

- Presiones excesivamente altas o excesivamente bajas.
- Flujo inverso.
- Movimiento y vibraciones de las tuberías.
- Velocidades excesivamente bajas.

Los resultados de estas situaciones pueden variar desde lo ligeramente inconveniente hasta lo desastroso. Ejemplos de lo primero podrían ser la interrupción momentánea del abastecimiento o una caída de la presión en los nudos de consumo y de lo segundo la destrucción de una estación de bombeo, un desastre medioambiental, una explosión o un incendio. El comportamiento dinámico de la instalación, denominado transitorio, es aquel que tiene lugar entre dos situaciones estacionarias de la instalación, puede estar producido por diferentes causas que suelen además determinar la naturaleza del transitorio. Dichas causas pueden ser:

- Una maniobra del operador.
- La mala selección de un componente.
- Un acontecimiento externo a la instalación.
- Problemas que se generan lentamente o de manera inadvertida.

Sobre algunas de las causas anteriores el diseñador o el operador pueden tener cierto control, como por ejemplo el arranque o parada controlados de las turbomáquinas (bombas o turbinas) y el cierre o apertura de las válvulas. Por el contrario, existen causas sobre las que no existe control alguno tales como el corte del suministro eléctrico o la rotura de una tubería. El hecho de que existan en la producción de transitorios causas de naturaleza incontrolada, no exonera a los diseñadores y operadores de prever el riesgo de que éstas puedan tener lugar y deben dotar a la instalación, en la medida de lo posible, de los elementos que eliminen o minimicen los efectos indeseados de los transitorios.

2.2 Regímenes posibles del flujo en tuberías a presión

Se conoce con el nombre de “transitorios” a los fenómenos de variación de presiones en las conducciones a presión, motivadas en variaciones proporcionales en las velocidades (Farras, 2005).

Un flujo es estacionario o permanente cuando sus parámetros característicos (presión y velocidad) no varían en el tiempo. Si las condiciones del flujo varían en el tiempo, el flujo es no estacionario, no permanente o transitorio.

Se distinguen 3 tipos de transitorios hidráulicos:

- Transitorio muy lento o cuasi-estático, en el que las variables del flujo varían de manera muy lenta en el tiempo (con períodos del rango de intervalos de varias horas hasta varios días). Como un ejemplo se tiene el flujo no permanente en una red de agua potable, cuyos cambios se generan por la variación del consumo y de los niveles de agua en los tanques.

Debido a que las variaciones en este tipo de flujo son muy lentas, no es necesario considerar en los métodos de análisis la inercia del flujo ni las propiedades elásticas del fluido y de las tuberías, y el flujo transitorio se puede modelar con una aplicación sucesiva de un modelo estático. Una simulación de este tipo se conoce también con el nombre análisis de períodos extendidos.

- Transitorio lento u oscilación de masa, que se relaciona ante todo con el movimiento de la masa de agua en la conducción, semejante a la oscilación en dos vasos comunicantes. Los cambios de las variables en este tipo de transitorio son significativos pero no tanto como para tomar en consideración las propiedades elásticas del fluido y de las tuberías. El período de un transitorio de este tipo normalmente es de varios minutos a varias horas, y es suficiente un modelo que considere solamente el movimiento y la inercia del volumen de agua en las tuberías.

- Transitorio rápido o golpe de ariete, generado por cambios bruscos de la velocidad en la tubería derivados de maniobras rápidas como la parada repentina de una bomba o el cierre rápido de una válvula. Los cambios bruscos en la velocidad se acompañan de cambios bruscos en la presión que se propagan por la tubería, generando ondas de presión de período muy corto (apenas varios segundos). Las variaciones de presión en un transitorio de este tipo son importantes, por lo que resulta necesario considerar los efectos elásticos de la tubería y del líquido.

En los proyectos de conducciones para agua potable pocas veces resulta necesario un análisis de períodos extendidos, siendo éste más importante para las redes de distribución. Un caso donde puede resultar necesario, es el caso de una red de conducción con varios tanques con o sin bombeo; para analizar el llenado y vaciado de los tanques en el día.

La oscilación de masa representa un caso particular de transitorio rápido en que los efectos de elasticidad son pequeños, gracias a lo cual los modelos que pueden simular transitorios rápidos simulan implícitamente también este fenómeno.

En los transitorios hidráulicos rápidos pueden llegar a producirse presiones muy altas o muy bajas (vacíos), debido a lo cual es necesario considerarlos en el diseño de cualquier conducción.

2.3 Velocidad de propagación de la onda de presión (celeridad)

Las perturbaciones en el régimen del flujo que se originan en un punto de una tubería a presión se transmiten (propagan) por la tubería con una velocidad que depende de la elasticidad del fluido y de

la pared de la tubería. Esta velocidad se señala con a y se denomina también celeridad, para distinguirla de la velocidad del flujo v . Si la tubería fuera completamente indeformable (completamente rígida), la velocidad a sería igual a la velocidad de propagación del sonido en el fluido. La deformabilidad de la tubería disminuye la velocidad de propagación, y es válida la ecuación 2.1.

$$a = \frac{a_0}{\sqrt{1 + \frac{E_{agua} D}{E_{mat} \delta}}} \quad (2.1)$$

donde:

a_0 velocidad del sonido en el agua.

E_{agua} módulo de elasticidad volumétrica del agua.

E_{mat} módulo de elasticidad (módulo de Young) del material del tubo.

D diámetro interior del tubo.

δ espesor de la pared del tubo.

La velocidad del sonido en el agua a_0 depende de la temperatura; para las temperaturas normales del agua en conducciones tiene valores de 1425 a 1440 m/s. El módulo de elasticidad del agua es igual a $2.074 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ($2.115 \times 10^4 \text{ Pa}$). El valor de E_{mat} se toma de la Tabla 2.1.

Material	E_{mat} $\text{N/m}^2 \cdot 10^{-9}$	E_{mat} $\text{Pa} \cdot 10^{-6}$
Acero	200-212	2.03-2.16
Fibro cemento	24	0.245
Concreto presforzado	39	0.398
Hierro dúctil	166	1.69
Polietileno	1.4- 2	0.0143 – 0.0204
PVC	2.4 – 2.75	0.0245 – 0.028

TABLA 2. 1 MÓDULO DE ELASTICIDAD DE MATERIALES DE TUBERÍAS

2.4 La fórmula de Joukowski

La fórmula de Joukowski representa lo siguiente: si en algún punto de la tubería se produce un cambio momentáneo en la velocidad con Δv , esto conduce a una variación en la carga que se calcula ΔH según la ecuación 2.2:

$$\Delta H = \frac{a}{g} \Delta v \quad (2.2)$$

donde

g aceleración de la gravedad ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$)

a es la velocidad de propagación de la onda.

Una vez producida la perturbación, las variaciones de carga y velocidad ΔH y Δv se transmiten por la tubería con una celeridad a , hasta que encuentren alguna singularidad.

Una disminución de la velocidad en la tubería genera un incremento de la presión (sobrepresión) aguas arriba y una disminución de la presión (depresión) aguas abajo, y viceversa. El cierre reduce la velocidad generando variaciones de presión, las cuales se propagan en ambos sentidos. En otras palabras, la disminución de la velocidad genera una retención del flujo aguas arriba de la válvula y con esto una sobrepresión, produciéndose aguas abajo una liberación del flujo y una depresión.

2.5 Golpe de ariete

Se podría definir al fenómeno de Golpe de Ariete como la oscilación de presión por encima o debajo de la normal a raíz de las rápidas fluctuaciones de la velocidad del escurrimiento.

En realidad, el fenómeno conocido como "Golpe de Ariete" es un caso particular del estudio de los movimientos transitorios en las conducciones a presión. La diferencia se encuentra en que los transitorios implican variaciones de velocidad y su correlación con la transformación en variaciones de presión de pequeña magnitud, mientras que el "Golpe de Ariete" implica las grandes variaciones, de velocidad y presión.

Las maniobras de detenimiento total, implican necesariamente los golpes de ariete de máxima intensidad puesto que se pone de manifiesto la transformación total de la energía de movimiento que se transforma en energía de presión.

Se presenta en todas las líneas de conducción de agua cuando se tiene un paro brusco del fluido contenido en la tubería. La energía cinética que contiene el fluido debido a la velocidad de conducción, se transforma en energía potencial, que a su vez, dará origen a un incremento de la carga piezométrica original, llevándose a cabo un trabajo elástico de deformación en las paredes del conducto y el agua.

En el diseño de líneas de conducción de agua es muy importante considerar el golpe de ariete con el fin de evitar fallas en la tubería, que podrían provocar daños a personas, daños a las instalaciones hidráulicas y por ende, pérdidas económicas.

De forma ilustrativa podemos hacer la analogía de una columna de agua la cual actúa como un tren de carga parando repentinamente cuando una válvula de salida es cerrada repentinamente, tal y como se muestra en la Figura 2.1.

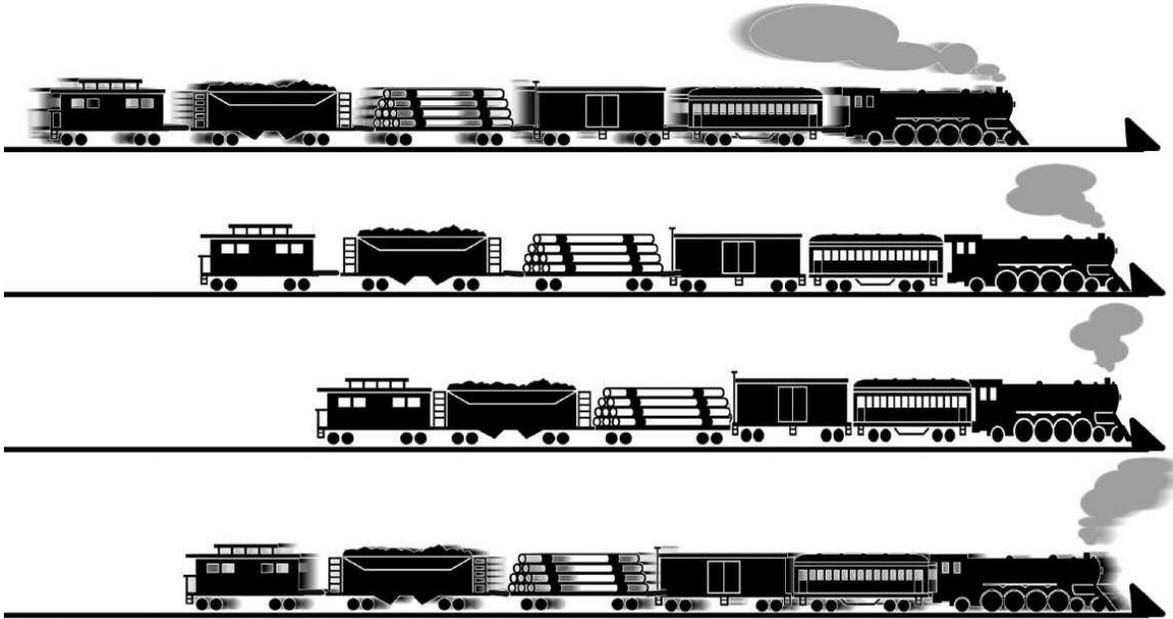


FIGURA 2. 1 ANALOGÍA DEL GOLPE DE ARIETE CON UN TREN PARANDO REPENTINAMENTE (LAHLOU, 2009)

2.5.1 Casos en que se presenta el golpe de ariete

Además del caso ejemplificado anteriormente, existen diversas maniobras donde se induce el fenómeno:

- Cierre y apertura de válvulas.
- Arranque de las bombas.
- Paro de las bombas.
- Funcionamiento inestable de bombas.
- Llenado inicial de tuberías.
- Accionamiento de sistemas de protección contra Incendios.

En general, el fenómeno aparecerá cuando por cualquier causa en una tubería se produzcan variaciones de velocidad y, por consiguiente en la presión.

Como puede observarse del listado anterior todos estos fenómenos se producen en maniobras necesarias para el adecuado manejo y operación de un acueducto, por lo que debemos tener presente que su frecuencia es importante y no un fenómeno eventual.

2.5.2 Descripción del fenómeno

En la Figura 2.2 se presenta una tubería de longitud L , espesor δ y diámetro interior D por la que circula agua proveniente de un tanque y que termina en su extremo aguas abajo en una válvula. Si ésta se cierra rápidamente, en virtud del principio de conservación de la energía, al disminuir la energía cinética, ésta se va transformando en un trabajo de compresión del fluido que llena la tubería y en el trabajo necesario para dilatar ésta última, se ha generado una sobrepresión o un golpe de ariete positivo.

Por el contrario, al abrir rápidamente una válvula se puede producir una depresión, o golpe de ariete negativo.

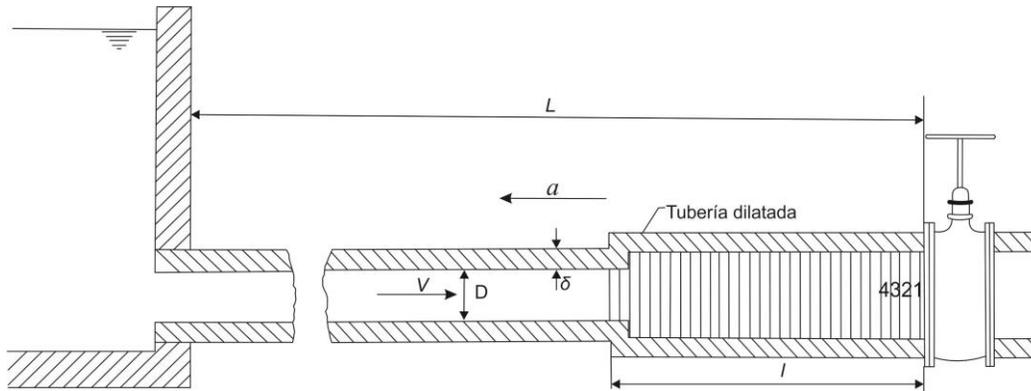


FIGURA 2.2 ONDA DE PRESIÓN EN EL CIERRE INSTANTÁNEO DE UNA VÁLVULA, a ES LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA O CELERIDAD Y v ES LA VELOCIDAD DEL FLUIDO. LA TUBERÍA SE DILATA O SE CONTRAE AL AVANZAR LA ONDA DE PRESIÓN O DEPRESIÓN, RESPECTIVAMENTE

Aunque es físicamente imposible cerrar una válvula instantáneamente, el estudio inicial del caso de cierre instantáneo ayuda al estudio de los casos reales.

Al cerrarse por completo instantáneamente la válvula de la Figura 2.2, si dividimos imaginariamente todo el fluido que llena la tubería en rodajas, como la 1, 2, 3 y 4 indicadas en el esquema, se quedará primero en reposo la rodaja 1 y a continuación la 2, 3, 4, etc., necesitando un cierto tiempo. Es decir, en la válvula se ha originado una onda de presión que se propaga con celeridad a , la cual en el instante considerado tiene dirección contraria a la velocidad v del fluido, se ha creado una onda elástica, es decir una onda de presión que se propaga por la tubería, se refleja en el embalse, vuelve a la válvula, de nuevo al embalse, y así sucesivamente; originando sobrepresiones y depresiones en la tubería, la cual se dilata o contrae al paso de la onda. El tiempo que tarda la onda en recorrer una vez la distancia entre la válvula y el tanque es $t_0 = L/a$. Después de un tiempo $T = 4t_0 = 4L/a$ el ciclo se repite.

Consideremos en la Figura 2.3 la serie de acontecimientos en una tubería durante un periodo $T = 4L/a$.

1. *No hay perturbación.* Régimen permanente. El líquido en la tubería se desplaza con velocidad v del embalse a la válvula. Diámetro de la tubería normal.

2. *Tiempo 0.* La válvula se cierra instantáneamente. La velocidad del líquido se anula a partir de la válvula, no instantáneamente en toda la tubería.

3. *Tiempo $\frac{1}{2} t_0 = \frac{1}{2} L/a$.* La onda de presión se ha propagado hacia el embalse con celeridad a y el frente de onda ha llegado a la mitad de la tubería. Mitad derecha de la tubería dilatada por la sobrepresión. La mitad izquierda conserva su diámetro normal. En esta mitad izquierda el agua sigue circulando con velocidad v hacia la válvula. En la mitad derecha, $v = 0$.

4. *Tiempo* $t_0 = L/a$. La onda de presión ha llegado al embalse. En toda la tubería el líquido está en reposo, $v = 0$, pero no en equilibrio. Toda la tubería está dilatada. Como un resorte que se expande, el agua en la tubería comienza a moverse con velocidad v , pero dirigida en sentido contrario al de la Figura 2.3 (1). El líquido empieza a ponerse en movimiento comenzando, por decirlo así, por las rodajas contiguas al tanque.

5. *Tiempo* $\frac{3}{2} t_0 = \frac{3}{2} L/a$. La mitad izquierda de la tubería se ha contraído a su diámetro normal. La onda sigue propagándose hacia la derecha con velocidad a . En la mitad izquierda de la tubería el fluido circula con velocidad v .

6. *Tiempo* $2t_0 = 2L/a$. Diámetro de toda la tubería normal. Todo el fluido de la tubería en movimiento desde la válvula hacia el tanque tiene una velocidad v ; es decir en dirección contraria a la de las figuras 2.3 (1), (2) y (3). No hay sobrepresión en ninguna parte de la tubería; pero por la inercia la presión continúa disminuyendo, la onda elástica se sigue propagando, ahora con depresión desde la válvula hacia el embalse con la velocidad a el diámetro de la tubería irá disminuyendo por debajo de su diámetro normal.

7. *Tiempo* $\frac{5}{2} t_0 = \frac{5}{2} L/a$. La depresión ha alcanzado la mitad de la tubería. La mitad derecha de la tubería contiene agua en reposo y una presión por debajo de la normal. El diámetro de la tubería en esta mitad es inferior al normal.

8. *Tiempo* $3t_0 = 3L/a$. El agua en toda la tubería está en reposo; pero no en equilibrio, y el agua inicia su movimiento desde el embalse a la válvula con velocidad v dirigida hacia la derecha. La depresión reina en toda la tubería. El diámetro de toda la tubería es inferior al normal.

9. *Tiempo* $\frac{7}{2} t_0 = \frac{7}{2} L/a$. En la mitad izquierda de la tubería el fluido está en movimiento con velocidad v hacia la válvula. En la mitad derecha el líquido continúa en reposo y en depresión. El diámetro de la parte izquierda es normal. El de la mitad derecha menor que el normal; a y v tienen el mismo sentido.

10. *Tiempo* $4t_0 = 4L/a$. Diámetro de la tubería normal. Todo el fluido en movimiento con velocidad v hacia la válvula. Todo igual que en el tiempo 0. Luego el periodo de este movimiento es: $T = 4t_0 = 4L/a$.

Teóricamente este movimiento oscilatorio continuaría indefinidamente si no existiera el rozamiento del agua con la pared del tubo.

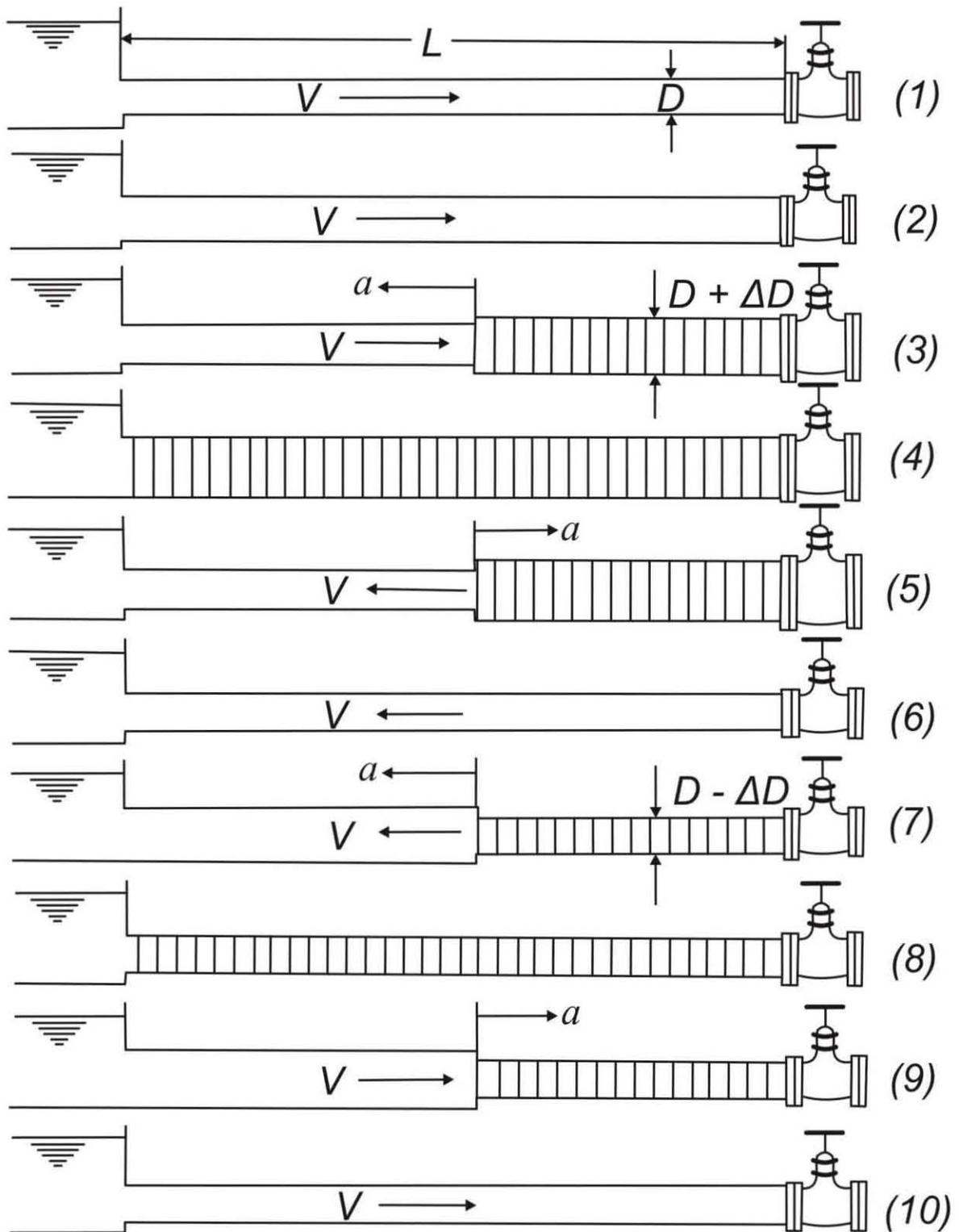


FIGURA 2. 3 CIERRE INSTANTÁNEO DE UNA VÁLVULA AL FINAL DE UNA TUBERÍA QUE SALE DE UN DEPÓSITO

2.6 Método de las Características

El método de las características consiste esencialmente en la resolución numérica, con las condiciones de frontera impuestas por cada problema.

Es importante destacar que el método de las características es el más general que se dispone para resolver el problema del golpe de ariete, no habiendo simplificaciones que distorsionen los resultados y siendo, además, el más difundido.

El método parte de las dos ecuaciones de Saint Venant introduciendo la siguiente definición para simplificar matemáticamente:

$$H = Z + \frac{P}{\gamma} \quad \text{ó} \quad P = \gamma(H - Z) \quad (2.4)$$

Entonces:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \gamma \left(\frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial Z}{\partial t} \right) = \rho \cdot g \left(\frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial Z}{\partial t} \right) \quad (2.5)$$

Sustituyendo en la ecuación de Saint Venant (2.4) y multiplicando por g:

$$g \frac{\partial H}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{f}{2D} U|U| = 0 \quad (2.6)$$

Sustituyendo en la 2ª ecuación de Saint Venant (2.5) y multiplicando por a^2 :

$$\frac{a^2}{g} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial \tau} + U \operatorname{sen} \theta \quad (2.7)$$

Estas ecuaciones diferenciales en derivadas parciales no lineales en U y en H en función de l y t no responden a ninguna solución general, pero sí se pueden resolver aplicando el método de las características y adecuarlas a una solución en diferencias finitas en computadora.

Las ecuaciones L_1 y L_2 contienen dos incógnitas: U y H. Además, estas ecuaciones se pueden relacionar a partir de un multiplicador desconocido:

$$L = L_1 + \lambda L_2 \quad (2.8)$$

Ahora, un par de valores λ cualquiera, reales y distintos, da un par de ecuaciones en U y H que conservan el significado físico dado por las ecuaciones de L_1 y L_2 . Para hallar esos valores de λ , calculamos L:

$$L = \left[\frac{\partial H}{\partial t} (U + \lambda g) + \frac{\partial H}{\partial \tau} \right] + \lambda \left[\frac{\partial U}{\partial t} \left(U + \frac{a^2}{g\lambda} \right) + \frac{\partial U}{\partial \tau} \right] + U \operatorname{sen} \theta + \lambda f \frac{U|U|}{2D} = 0 \quad (2.9)$$

Teniendo en cuenta que:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{dH}{dl} \frac{dl}{dt} + \frac{\partial H}{\partial t} \quad \text{y} \quad \frac{dU}{dt} = \frac{\partial U}{\partial l} \frac{dl}{dt} + \frac{\partial U}{\partial t} \quad (2.10) \text{ y } (2.11)$$

Podemos deducir que:

$$\frac{\partial l}{\partial t} = U + \lambda g \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial l}{\partial t} = U + \frac{a^2}{\lambda g} \quad (2.13)$$

Y por lo tanto

$$U + \lambda g = U + \frac{a^2}{g\lambda} \quad (2.14)$$

Entonces:

$$\lambda = \pm \frac{a}{g} \quad (2.15)$$

Estos dos valores de λ reales y distintos convierten a las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales en un par de ecuaciones diferenciales ordinarias, es decir:

$$c^+ \begin{cases} \frac{dH}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dU}{dt} + U \operatorname{sen} \theta + \frac{af}{2gD} U|U| = 0 \\ \frac{dl}{dt} = U + a \end{cases} \quad (2.16)$$

$$c^- \begin{cases} \frac{dH}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dU}{dt} + U \operatorname{sen} \theta - \frac{af}{2gD} U|U| = 0 \\ \frac{dl}{dt} = U - a \end{cases} \quad (2.17)$$

Consideramos que se conocen U y H en R y en S.

En la intersección de las curvas c^+ y c^- las ecuaciones son válidas y pueden dar U_P y H_P . En el punto P las ecuaciones dan también l y t . Por lo tanto, se obtienen así las soluciones a lo largo de las líneas características, partiendo de condiciones conocidas y hallando nuevas intersecciones de tal forma que se pueden obtener las presiones y velocidades para tiempos posteriores.

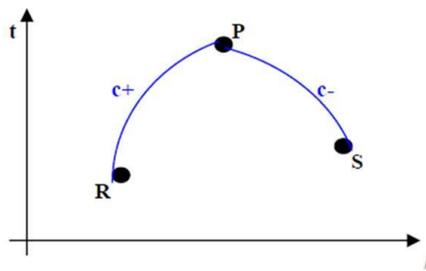


FIGURA 2. 4 ESQUEMA DE LAS LÍNEAS CARACTERÍSTICAS

En los cálculos usuales $a \gg U$ y podemos despreciar U en comparación con a y así las líneas características son ahora rectas de pendiente $\pm a$ en el diagrama. En la figura 2.5 se muestra un ejemplo esquemático de la aplicación del método de las características.

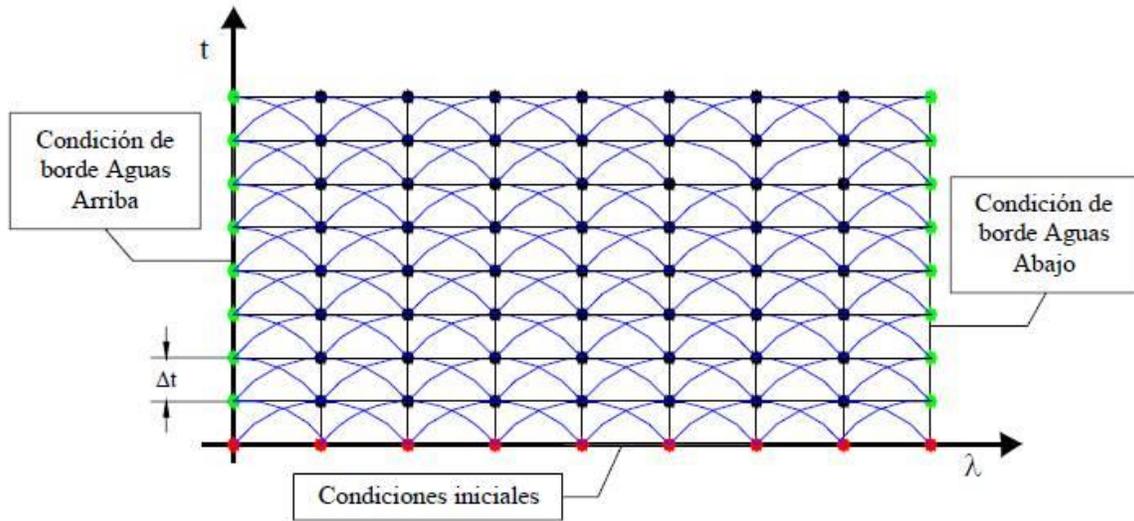


FIGURA 2. 5 DIAGRAMA DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA EN EL ESQUEMA DE CÁLCULO MÉTODO DE LAS CARACTERÍSTICAS

Ahora, recordando que, en diferencias finitas:

$$dH = H_p(I) - H(I - 1) ; dU = U_p(I) - U(I - 1) ; dt = \Delta t \quad (2.18)$$

Las ecuaciones quedan:

$$H_p(I) = 0.5[H(I + 1) + H(I - 1)] + \frac{a}{g}[U(I - 1) - U(I + 1)] - \text{sen}\theta \cdot \Delta t \cdot [U(I - 1) + U(I + 1)] - \frac{af}{2gD} \Delta t [U(I - 1) - U(I + 1) \cdot |U(I + 1)|] \quad (2.19)$$

$$U_p(I) = 0.5[U(I + 1) + U(I - 1)] + \frac{a}{g}[H(I - 1) - H(I + 1)] - \text{sen}\theta \cdot \Delta t \cdot [U(I - 1) + U(I + 1)] - \frac{af}{2g} \Delta t [U(I - 1) \cdot |U(I - 1)| + U(I + 1) \cdot |U(I + 1)|] \quad (2.20)$$

Estas dos últimas ecuaciones se emplean en los puntos intermedios para obtener los valores de U_p y H_p . Después se aplican las condiciones de borde para obtener $H_p(0)$, $U_p(0)$, $H_p(N)$ y $U_p(N)$.

Obtenido esto se reemplaza $U(I)$ y $H(I)$ por $U_p(I)$ y $H_p(I)$, se incrementa el tiempo y se repite el proceso.

Condiciones de frontera

En general, las condiciones de frontera dependen del problema y del tramo en estudio. En el caso de un tramo regulado con válvula al pie, las condiciones de frontera son, aguas arriba (en el depósito):

Para el flujo hacia la tubería:

$$H_D = H_p(0) + \frac{(U_p(0))^2}{2g} \quad (2.21)$$

Para el flujo hacia el depósito:

$$H_D = H_p(0) \quad (2.22)$$

Y aguas abajo:

$$\Omega U_0 = (c_d \Omega_v)_0 \sqrt{2g H_0} \quad (2.23)$$

Donde:

- Ω = área de la tubería.
- H_0 = carga en la válvula.
- $(C_d \cdot \Omega_v)_0$ = área del orificio por el coeficiente de descarga.
- V_0 = velocidad en régimen permanente en la tubería.

En general:

$$\Omega U_p(N) = (c_d \Omega_v)_0 \sqrt{2g H_p(N)} \quad (2.24)$$

Dividiendo una por otra:

$$\frac{U_p(N)}{U_0} = \tau \sqrt{\frac{H_p(N)}{H_0}} \quad (2.25)$$

Donde τ es el coeficiente adimensional de apertura de válvula:

$$\tau = \left(1 - \frac{\tau}{\tau_c}\right) \quad (2.26)$$

2.7 Dispositivos supresores de golpe de ariete

Un sistema hidráulico puede diseñarse con un factor de seguridad muy grande para soportar las cargas máximas y mínimas debidas al golpe de ariete. Cuando están dentro de valores razonables, pueden enfrentarse dimensionando adecuadamente el espesor de la tubería (a veces engrosándolas un poco respecto de lo que necesitan para el funcionamiento en régimen permanente).

Cuando la longitud de la tubería es muy grande, las sobrepresiones alcanzan valores muy altos y se debería sobredimensionar demasiado las tuberías para que puedan soportarlas con una seguridad razonable. Por ello, se recurre a métodos de atenuación de estas presiones mediante dispositivos especialmente diseñados para tal objetivo.

El diseño óptimo de un sistema deberá tomarse en cuenta la instalación de uno o varios dispositivos de alivio o atenuación.

Los diferentes tipos de dispositivos supresores se describen a continuación:

2.7.1 Válvula aliviadora de presión

La válvula aliviadora de presión se coloca en la tubería para disminuir las sobrepresiones causadas por un fenómeno transitorio.

Es un dispositivo provisto de un resorte calibrado para abrir una compuerta cuando la presión sobrepasa un valor determinado. Se recomienda colocar este tipo de elemento, mostrado en la Figura 2.6, en conducciones con diámetros pequeños; sin embargo, no debe olvidarse que las presiones negativas tendrán que resolverse con algún otro dispositivo.

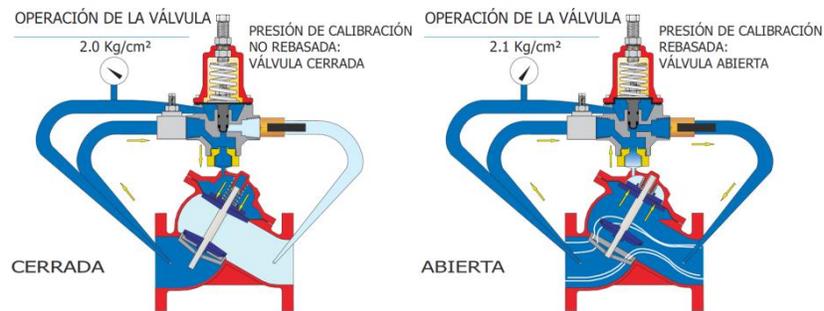


FIGURA 2. 6 DIAGRAMA DE UNA VÁLVULA ALIVIADORA DE PRESIÓN

2.7.2 Válvula anticipadora del golpe de ariete

La válvula anticipadora del golpe de ariete protege al equipo de bombeo de la onda de sobrepresión causada por el paro de la bomba o falla de la energía. Esta válvula, mostrada en la Figura 2.7, opera con la presión de la línea de conducción, y el nombre de anticipadora se debe a que entra en funcionamiento antes de la llegada de la onda de sobrepresión.

Este tipo de válvula realiza la apertura de la válvula cuando baja la presión hasta un valor prestablecido y evacúa a la atmósfera el exceso de presión que provoca la onda de sobrepresión.

El tanque unidireccional es un depósito que se coloca generalmente a una elevación superior a la del terreno natural y este por lo general se encuentra en contacto con la atmósfera por la parte superior.

La elevación de la corona es menor a la carga piezométrica del punto de conexión del tanque con la conducción. La función de un tanque unidireccional es aliviar fundamentalmente las depresiones causadas por un fenómeno transitorio, provocado por un paro repentino de la bomba.

Se recomienda colocar un tanque unidireccional cuando las cargas piezométricas en flujo establecido de los posibles lugares de colocación del dispositivo de control, son muy grandes y resulta inadecuado colocar una torre de oscilación demasiado alta.

Para evitar el vaciado del tanque cuando el gasto de la conducción es igual a cero, la elevación de la corona debe ser menor al nivel mínimo del agua en los depósitos conectados a la conducción.

Debe contener un conducto de vaciado y otro de llenado. En el de vaciado se instala una válvula de no retorno para permitir el flujo únicamente del tanque hacia la conducción. En el conducto de llenado debe existir una válvula para cortar automáticamente el flujo cuando se alcance el nivel máximo del agua. En la figura 2.9 se muestra un esquema de un tanque unidireccional.

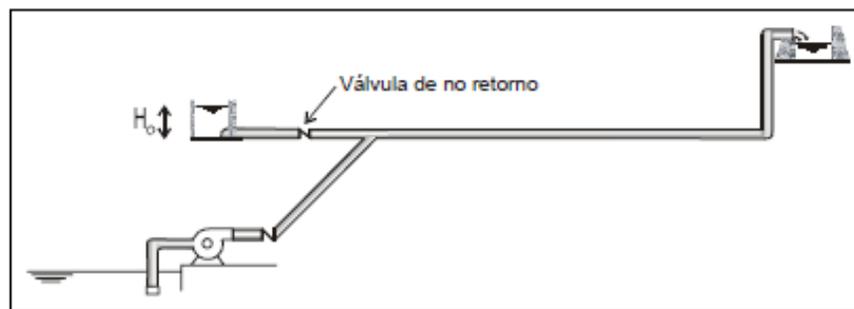


FIGURA 2. 9 ESQUEMA DE OPERACIÓN DE UN TANQUE UNIDIRECCIONAL

2.7.5 Cámara de aire

La cámara de aire es un depósito por lo general metálico cerrado en cuyo interior una parte contiene un volumen de agua y el resto un volumen de aire con el cual se proporciona la presión de una forma adecuada a la conducción. Se colocan normalmente al nivel del terreno natural.

La función de una cámara de aire es aliviar las sobrepresiones y depresiones causadas por un fenómeno transitorio.

Se recomiendan colocar cuando, para flujo establecido, son muy grandes las cargas piezométricas de los posibles lugares de colocación del dispositivo de control, como se muestra en la Figura 2.10, evitando así la colocación de una torre de oscilación demasiado alta o un tanque unidireccional muy elevado.

Una cámara de aire contiene normalmente dos conductos, uno de vaciado y otro de llenado, el primero contiene una válvula de no retorno para permitir la circulación del flujo únicamente del tanque hacia la conducción. El segundo conducto contiene un dispositivo disipador de energía el

cual puede ser, por ejemplo, un orificio, cuya función es evitar un incremento de presión cuando la cámara se está llenando.

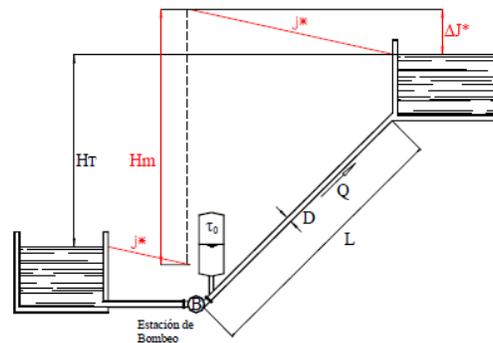


FIGURA 2. 10 ESQUEMA DE OPERACIÓN DE UNA CÁMARA DE AIRE

2.7.6 Instalación de un by-pass en la válvula de no retorno

Para obtener una rotación inversa controlada en la bomba y evitar sobrepresiones que causen problemas a las tuberías, se puede colocar aguas abajo del equipo de bombeo un válvula de no retorno y un by-pass alrededor de la válvula, cuya capacidad de conducción no permita una velocidad inadmisibles en sentido inverso y que se asegure la reducción necesaria de las sobrepresiones, provocadas por un paro accidental del equipo de bombeo.

2.7.7 Instalación de un by-pass en la planta de bombeo

Cuando la fuente de abastecimiento dispone de un cierto nivel de presión en la succión, como en el caso de un depósito a superficie libre o un tanque elevado, el bypass puede ser de utilidad en las plantas de bombeo para contrarrestar las presiones negativas provocadas por un paro accidental del equipo de bombeo. El by-pass se construye colocando un tubo paralelo al equipo de bombeo que se conecta aguas abajo y aguas arriba del equipo de bombeo, tal como se muestra en la figura 2.11. En este tubo se instala una válvula de no retorno para impedir la descarga de la bomba hacia el depósito, cuando la operación de la misma es a flujo permanente.

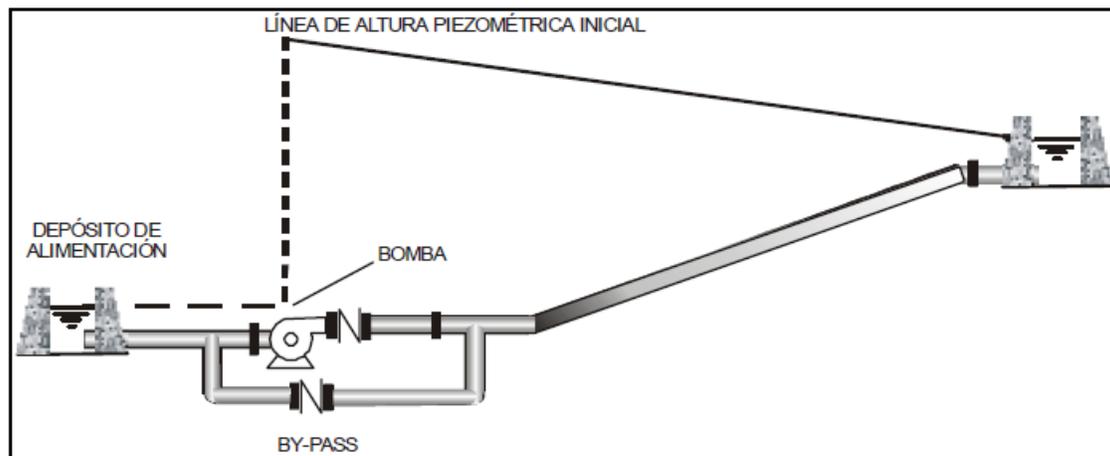


FIGURA 2. 11 ESQUEMA DE OPERACIÓN DE UN BY PASS EN LA PLANTA DE BOMBEO

Como ya se ha mencionado, los transitorios hidráulicos son alteraciones en los conductos que transportan agua causados durante un cambio de estado, comúnmente efectuando una transición de un estado o una condición de equilibrio a otra. Los principales componentes de las alteraciones son los cambios de presión y gasto en el punto, donde se causa la propagación de ondas de presión a través del sistema de distribución. Las ondas de presión viajan a velocidades sónicas, dependiendo de la elasticidad del agua y de las propiedades elásticas (por ejemplo material y espesor de la pared) de la tubería. Al propagarse estas ondas, se crea un ajuste transitorio de las condiciones de presión y de flujo a través del sistema. Al paso del tiempo, la presencia de las pérdidas y la fricción reduce las ondas hasta que el sistema se estabiliza en un nuevo estado estacionario. Usualmente solo la regulación del flujo extremadamente lento puede resultar en transitorios aparentemente suaves desde un estado estacionario a otro sin fluctuaciones obvias en presión o gasto (Boulos et al., 2005).

Los transitorios pueden tener implicación en la calidad del agua y la salud. Un evento transitorio de baja presión, por ejemplo, una falla en un acueducto o la ruptura de una tubería, tienen el potencial de causar la intrusión de agua contaminada hacia la tubería a través de las juntas y/o rupturas. Las presiones negativas inducen el retorno de agua no potable. En la Figura 2.12 se muestra una situación calculada mediante un modelo numérico para simular fenómenos transitorios, en ésta se puede observar la línea de presión en un instante determinado del transitorio ocurrido por un paro inesperado de los equipos de bombeo. En este caso, el valor de la presión negativa es de -3.094 metros de columna de agua (m.c.a.) y permanece constante por 24 segundos, durante este tiempo se podría introducir agua contaminada contenida en el suelo circundante a la tubería, o la cual este acumulada en una caja de válvulas.

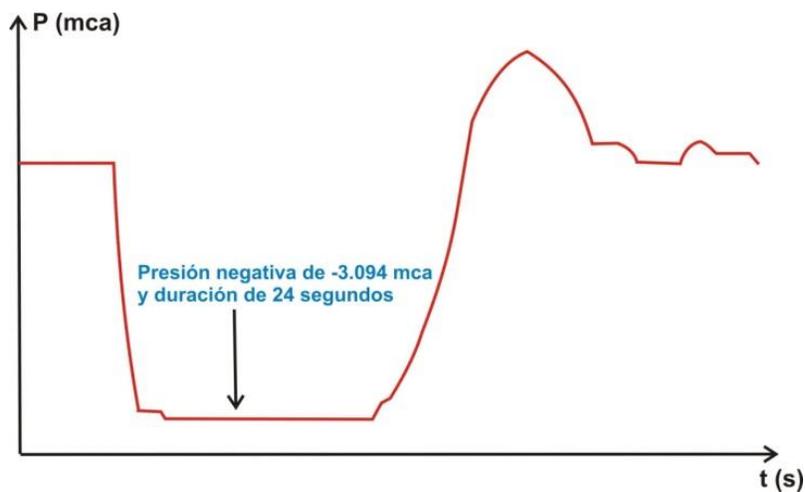


FIGURA 2. 12 PRESIÓN NEGATIVA POR UN PARO INESPERADO EN UNA PLANTA DE BOMBEO

En este Capítulo fueron descritos los fenómenos transitorios, así como los dispositivos supresores de golpe de ariete para evitar daños a los conductos a presión. En el siguiente se presentan los problemas generados por los transitorios hidráulicos con aire atrapado, además de un modelo numérico para simular estos últimos. Posteriormente, en el Capítulo 4 se describe con mayor detalle el fenómeno de intrusión patógena.

Capítulo 3. Aire atrapado en acueductos

3.1 Introducción

La presencia de aire atrapado en acueductos puede reducir de forma importante el transporte de agua en las líneas. En sistemas por gravedad, las bolsas de aire estacionarias pueden reducir la sección transversal del paso del agua. En acueductos por bombeo la presencia de aire se refleja en un incremento del consumo de energía eléctrica y la reducción del gasto. Estos problemas siguen ocurriendo aun hoy en día en acueductos construidos recientemente, debido a la falta de criterios de diseño que hagan que los sistemas por gravedad y por bombeo funcionen más eficientemente.

Las conducciones, con un perfil marcadamente irregular, que transportan agua a presión presentan una serie de singularidades que no pueden ser ignoradas por los ingenieros que las proyectan y/o mantienen. En caso contrario, su buen funcionamiento y fiabilidad no quedan plenamente garantizados.

Con frecuencia, los ingenieros dedicados al diseño de acueductos no toman en cuenta o no conocen las causas que generan la entrada de aire a este tipo de sistemas, ni los efectos potenciales que produce el aire atrapado.

La mayoría de las veces, los acueductos contienen aire atrapado en forma de bolsas que generalmente se acumulan en sus puntos altos. Este fenómeno ocurre debido a que el aire es más ligero que el agua y por tanto va a migrar hacia las cimas del sistema.

Para evitar tanto el posible colapso de la conducción como la potencial cavitación que toda depresión puede originar se recurre, por lo general, a la instalación de válvulas en estos puntos. En la Figura 3.1 se puede observar la falla por aplastamiento en una conducción horizontal sin dispositivos de alivio, dada una condición de baja presión en la tubería de acero, no considerada en el diseño o por un fenómeno transitorio magnificado por la presencia de aire atrapado.



FIGURA 3. 1 TUBERÍA DE ACERO HELICOIDAL CON FALLA POR APLASTAMIENTO

Estas válvulas de aire, en su función de admisión, impiden que la presión en el interior de la tubería sea muy inferior a la atmosférica controlando, por tanto, de manera eficaz aquellos potenciales problemas. Ocurre, sin embargo, que el aire voluntariamente admitido durante la parada de la

instalación debe ser expulsado con ocasión del nuevo llenado cuando la instalación es rearmada. Y ello debe realizarse con la suficiente delicadeza como para que, durante este proceso, no aparezcan golpes de ariete indeseados.

Los hechos anteriores implican seleccionar cuidadosamente una válvula, sobre todo por lo que a su misión de expulsión de aire se refiere. Estas válvulas de aire, además de los problemas derivados de un comportamiento no adecuado a las necesidades de la instalación, incluyen elementos móviles que requieren de un adecuado mantenimiento preventivo que evite posibles atascamientos.

La inaccesibilidad de muchos de los máximos relativos en los que se han instalado las válvulas dificulta, en ocasiones, este tipo de labores. Por otro lado, la propia compresión de las posibles bolsas de aire al absorber la energía cinética de las columnas de agua en movimiento, en ausencia de válvulas, puede dar lugar a presiones muy elevadas que no soporte la tubería.

3.2 Causas

El aire atrapado entre dos columnas de agua en una conducción a presión constituye, con o sin presencia de válvulas de purga, un motivo de preocupación por las importantes sobrepresiones que pueden generarse con ocasión del arranque de la instalación. Por ello, el conocimiento físico del problema y la posibilidad de evaluar los picos que potencialmente pueden generarse presenta un indudable interés práctico.

En la Figura 3.2 se puede observar el colapso de una tubería de acero helicoidal justo en el punto donde se localiza una válvula de expulsión de aire. Posiblemente la causa de falla sea el malfuncionamiento de la válvula asociado a un fenómeno transitorio que causó sobrepresiones, magnificadas por la presencia de bolsas de aire en tanto que era un tramo horizontal.



FIGURA 3. 2 FALLA DE TUBERÍA DE ACERO HELICOIDAL PRÓXIMA A LA UBICACIÓN DE UNA VÁLVULA DE EXPULSIÓN DE AIRE

Mencionando unas de las causas de entrada de aire en las conducciones podemos enumerar las siguientes:

a) Antes de la puesta en marcha del sistema la línea se encuentra llena de aire, y para llenar por completo el acueducto con agua es necesario eliminar todo el aire. Al iniciarse el llenado de la línea, la mayor parte del aire es arrastrado hacia aguas abajo para ser expulsado por las válvulas y demás mecanismos colocados para este fin. Sin embargo, una parte del aire puede quedar atrapado en los puntos altos de los acueductos.

b) El agua contiene aproximadamente 2 % de aire disuelto, el cual puede ser expulsado cuando la presión se reduce o la temperatura se incrementa y formar burbujas y/o bolsas de aire.

c) El equipo mecánico puede introducir aire a los acueductos. Por ejemplo, las bombas pueden succionar entre 5 y 10 % de aire, debido a la acción de los vórtices en su succión. Asimismo, cuando hay presión de vacío en un acueducto, el aire puede introducirse a través de juntas defectuosas o mediante válvulas de admisión de aire.

3.3 Efectos

El aire atrapado en acueductos puede conllevar gran variedad de problemas. Por ejemplo, el aire acumulado en los puntos altos de las conducciones puede reducir la sección efectiva del paso del agua, dando como resultado un incremento de la pérdida de carga. Asimismo, el aire puede acelerar el proceso de corrosión en las tuberías de fierro al aumentar la cantidad de oxígeno disponible. Por otra parte, el aire atrapado puede producir lecturas incorrectas en dispositivos de medición. La transición de tubo parcialmente lleno a tubo lleno causada por la presencia de una bolsa de aire, puede generar vibraciones en la tubería. Las bolsas de aire de gran tamaño pueden regresar a contraflujo debido a su fuerza de flotación y dañar de forma importante algunas estructuras, tales como sifones o cajas rompedoras de presión.

3.3.1 Incremento de la pérdida de carga causado por aire atrapado

El aire que se introduce a los acueductos es arrastrado por el flujo de agua y suele acumularse en puntos altos, formando bolsas de aire que incrementan su tamaño si más bolsas o burbujas de aire se les unen. 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 puede igualar la fuerza de arrastre del agua; entonces la bolsa de aire permanece estacionaria en la tubería, y así la fuerza de fricción tiende a cero.

El aire atrapado reduce la sección transversal del conducto, por lo que se presenta un flujo como canal debajo de la bolsa de aire, lo cual provoca que la línea piezométrica sea paralela a la pendiente de la tubería. Lo anterior se muestra en la Figura 3.3.

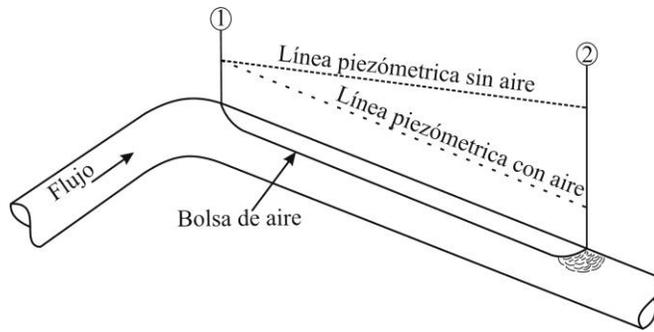


FIGURA 3. 3 BOLSAS DE AIRE EN UNA PENDIENTE DESCENDENTE (EDMUNDS, 1979)

3.3.2 Pérdida de carga que reduce la capacidad del sistema

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 (Edmunds, 1979, Corcos, 2003, Corcos, 2005).

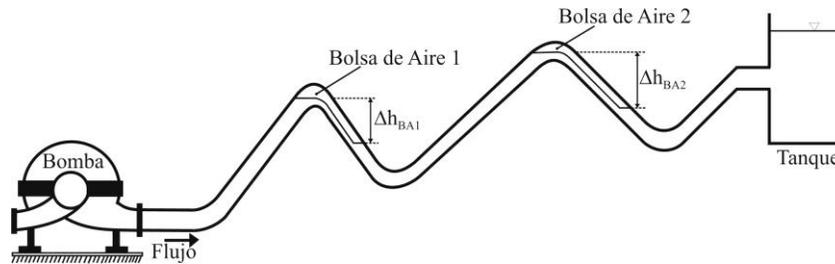
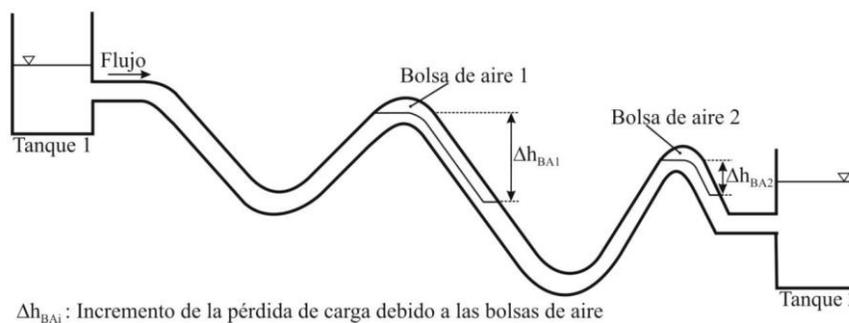


FIGURA 3. 4 PÉRDIDA DE CARGA HIDRÁULICA POR BOLSAS DE AIRE EN CONDUCCIONES A BOMBEO



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

FIGURA 3. 5 PÉRDIDA DE CARGA HIDRÁULICA POR BOLSAS DE AIRE EN CONDUCCIONES A GRAVEDAD

Richards (1962) comenta que la mayor pérdida de carga provocada por el aire atrapado se debe al cambio de la pendiente de la línea piezométrica, cuando el tubo fluye lleno y posteriormente cambia a flujo en superficie libre.

Los acueductos con pendientes descendentes en la dirección del flujo pueden acumular aire. En acueductos por bombeo a causa del aire atrapado hay un incremento del consumo de energía eléctrica y una reducción del gasto, si las bolsas de aire localizadas en los puntos altos del acueducto no pueden ser removidas hacia aguas abajo. 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.

En acueductos por gravedad, la reducción de la capacidad de conducción debida al aire atrapado puede provocar derrames a través de venteos, tanques, cajas rompedoras de presión y torres de oscilación. Esto se debe a que la carga estática disponible no es suficiente para remover las bolsas de aire.

Los problemas causados por la reducción de la sección transversal del paso del agua en la tubería debido al aire atrapado, tal vez ocurran con mayor frecuencia que la que indica los registros. Si las pérdidas de carga fuesen un poco menores, los derrames no ocurrirían y el flujo no se detendría por completo, haciendo que estos problemas pasaran desapercibidos (Richards, 1962).

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

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

El aire que se acumula en los puntos altos de los acueductos puede formar grandes bolsas de aire, la longitud de las bolsas puede ser de varias veces el diámetro de la tubería. Si en algún tramo del acueducto existe un tubo con una pendiente descendente pronunciada, puede suceder que la bolsa de aire se establezca alrededor de ésta y al mismo tiempo se presente un salto hidráulico en el extremo aguas abajo de la bolsa, tal como se muestra en la Figura 3.6. 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 estas 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 incrementaran su tamaño al mismo tiempo que se reducirá 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.

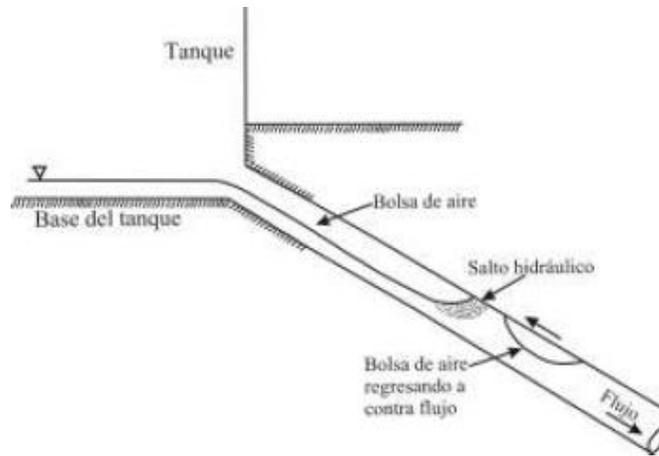


FIGURA 3. 6 RETORNO DE BOLSAS DE AIRE A CONTRAFLUJO (BLOWBACK)

3.3.4 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, tal como se muestra en la Figura 3.7.

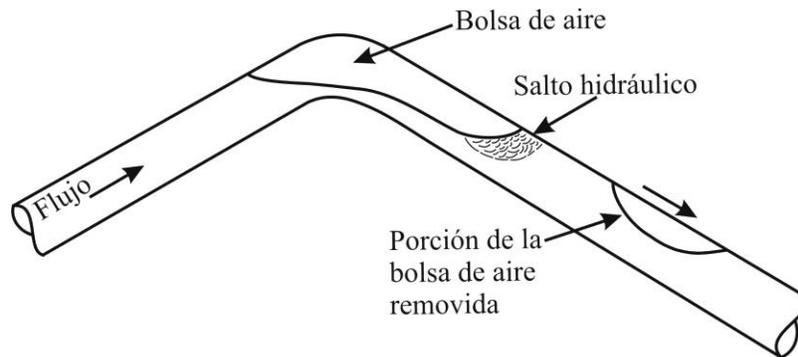


FIGURA 3. 7 UBICACIÓN DE BOLSAS DE AIRE EN TUBERÍAS CON CAMBIO DE PENDIENTE

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 causaría un daño considerable a accesorios, uniones e incluso podría provocar la ruptura de la tubería.

Reducción de la eficiencia en sistemas de bombeo causada por el aire atrapado Thomas (2003) presenta una útil comparación entre la eficiencia de algunos acueductos de bombeo y el costo de remover el aire atrapado de la línea. Se estima que el 75 % del costo de operación de un acueducto es el costo por bombeo. La revisión de una variedad de acueductos para distribución de agua potable, realizada alrededor del mundo, revela que el aire atrapado puede reducir la eficiencia de estos sistemas hasta en 30 %. La mayoría de los acueductos operan con aire atrapado, lo cual genera una disminución de entre 15 y 20 % del gasto proporcionado por el sistema. Las bolsas de aire comprimido son un enorme obstáculo para cualquier intento de bombear agua. El aire atrapado incrementa 20 % la carga de presión, lo que provoca que las bombas trabajen más forzadas y, por tanto, demanden mayor consumo de energía eléctrica. En

1999 una ciudad industrial al sur de Canadá gastó un millón 600,000 dólares en electricidad para hacer funcionar sus acueductos de bombeo. Asumiendo que la maquinaria tiene que trabajar 20 % más, forzada para remover el aire atrapado, esto implicó un costo adicional en electricidad fue de 320 000 dólares, casi un tercio de millón de dólares gastados en un año para hacer funcionar acueductos con venteo deficiente.

3.4 Efecto de las bolsas de aire en transitorios hidráulicos en acueductos de bombeo

El análisis de los transitorios hidráulicos se hace generalmente asumiendo que no hay aire atrapado en los acueductos. Sin embargo, en muchos de estos sistemas el aire puede ser introducido a través de los vórtices que se forman en la succión de las bombas (entre un 5% y 10% de aire por volumen de agua). Asimismo, cuando se presenta una presión menor a la atmosférica en la línea, el aire se puede introducir por los sellos defectuosos de las juntas y las válvulas. También es sabido que el agua contiene aproximadamente un 2% de aire disuelto, si la presión baja o la temperatura se incrementa el aire escapa de la solución y puede formar pequeñas bolsas de aire que pueden migrar a los puntos altos o intermedios del acueducto, y unirse al aire que pudo haber quedado acumulado por un mal purgado de la línea. Además, si las bolsas de aire localizadas en los puntos altos de los acueductos no pueden ser removidos de los mismos, podría ocurrir que el flujo se detenga por completo debido a que la pérdida de carga hidráulica acumulada producida por las bolsas puede ser mayor a la carga generada por la bomba.

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 de cómo esté distribuido. Cuando por la tubería circula un flujo a baja velocidad el aire tenderá a formar bolsas de aire, que pueden amortiguar las presiones transitorias (Kottmann, 1992; Horlacher y Lüdecke, 2006; 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.

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.

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:

Brown (1968) reporta resultados obtenidos en campo e investigación analítica de dos acueductos a bombeo, donde se presentaron presiones mayores a las predichas durante el diseño, lo cual fue atribuido a la presencia de aire atrapado. El análisis teórico estuvo basado en el método de las características, modificando la solución de la separación de columna líquida y considerando el efecto del aire atrapado en la línea. Los volúmenes de aire considerados para la simulación fueron localizados en puntos equidistantes a lo largo del acueducto. Brown concluyó:

- 1) El efecto del aire y otros gases disueltos en el agua deben ser considerados en el análisis numérico de los transitorios.
- 2) El aire atrapado puede tener efectos perjudiciales en los transitorios hidráulicos, causando sobrepresiones importantes en la descarga de las bombas, asimismo su presencia puede generar una mayor velocidad de giro en reversa de los impulsores de las bombas.

Martin (1976) simuló matemáticamente el efecto del aire atrapado en transitorios hidráulicos en acueductos con distintas configuraciones. 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.

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. 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.

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 para que pueda ser utilizada para estudiar el efecto de grandes bolsas de aire en transitorios hidráulicos en tuberías con diámetros mayores al modelo.

Fuertes (2001) 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 llevo a cabo una 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 dejo 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.

3.5 Modelo numérico para investigar el efecto de bolsas de aire en transitorios hidráulicos

En este trabajo se presenta una metodología para evaluar transitorios hidráulicos en acueductos con aire atrapado, cuando ocurre el paro inesperado de los equipos de bombeo. El primer paso en el procedimiento es identificar los posibles puntos de la conducción, donde las bolsas de aire podrían acumularse, para posteriormente cuantificar el volumen de las mismas. Una vez conocida la ubicación y el volumen de las bolsas, se hace el análisis de los transitorios utilizando las ecuaciones de continuidad y dinámica, las cuales se resuelven mediante el método de las características. En el análisis las bolsas de aire se consideran como acumuladores, en los cuales la presión en cualquier instante es considerada como constante en todo el volumen. Asimismo, se supone que la expansión y compresión de las bolsas de aire siguen un proceso politrópico.

3.5.1 Localización de las bolsas de aire

Como se ha mencionado con anterioridad grandes bolsas de aire pueden quedar atrapadas en los puntos altos de los conductos a presión, cuando válvulas expulsoras de aire (admisión, expulsión o combinadas) no son colocadas en las cimas de los sistemas que podrían acumular aire. Aun cuando existan válvulas en estos puntos altos, éstas podrían fallar y el aire no sería expulsado. Comúnmente las válvulas se localizan en zonas de difícil acceso para su mantenimiento.

Cuando las grandes bolsas de aire se extienden en la sección de la tubería con pendiente descendente pronunciada, comúnmente al final de las bolsas se presenta un salto hidráulico. La turbulencia del salto genera pequeñas burbujas de aire que son bombeadas o introducidas hacia el tubo que fluye completamente lleno. Posteriormente, estas burbujas serán arrastradas por el flujo y formaran burbujas más grandes o pequeñas bolsas de aire que se adhieren al techo de la tubería. Si las bolsas que fluyen pegadas a la tubería continúan creciendo, su fuerza de flotación se incrementará y podría ser mayor que la fuerza de arrastre ejercida por el flujo de agua sobre las bolsas. Si esto ocurre las bolsas de aire podrían regresar a contra flujo e incorporarse a la bolsa grande a través del salto hidráulico. El caso ideal sería que las burbujas y bolsas de aire fuesen removidas de la línea de conducción por la velocidad del agua.

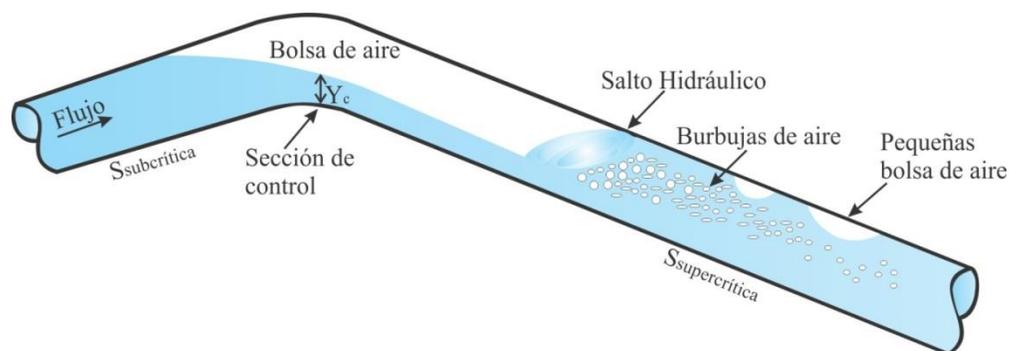


FIGURA 3. 8 BOLSA DE AIRE ATRAPADO

Observaciones realizadas en dispositivos experimentales confirman que las grandes bolsas de aire se acumulan a ambos lados de la sección de control de las bolsas, que se localiza en la transición de una pendiente subcrítica a una supercrítica (Walski et al., 1994; Pozos, 2007).

Asimismo, varios investigadores han analizado el movimiento del aire en conductos a presión, enfocándose principalmente en la velocidad de remoción también llamada velocidad crítica, es decir, la velocidad mínima del agua, necesaria para expulsar el aire de la conducción.

Por todo lo antes mencionado, se puede decir que no existe una ecuación universalmente aceptada para predecir el movimiento del aire en conductos a presión. Por lo tanto, el diseño y análisis de este tipo de sistemas se realiza utilizándose expresiones empíricas, que deben ser tomados con cautela, porque éstas podrían no ser aplicables para diseñar determinados acueductos.

En una investigación realizada anteriormente Pozos et al. (2010a) propusieron una expresión analítica, ecuación (3.1), para estudiar el comportamiento de las burbujas y bolsas de aire en tuberías con pendientes descendentes. La efectividad de dicha ecuación ha sido validada con investigación teórico-experimental, así como con el análisis de acueductos en campo. La ecuación fue obtenida al realizar el balance de la fuerza de arrastre y la componente de la fuerza de flotación en sentido contrario al flujo, actuando sobre una burbuja de aire estacionaria en una tubería fluyendo completamente llena. La comparación de los resultados experimentales con las predicciones obtenidas utilizando la ecuación (3.1) mostró que estos coinciden muy bien. Esta expresión se puede utilizar para analizar acueductos en la etapa de diseño, así como aquellos que se encuentran en funcionamiento. La mencionada expresión puede escribirse como:

$$Q^2/gD^5 = S \quad (3.1)$$

Donde Q es el gasto de agua que circula por la tubería, D es el diámetro del tubo, g es la aceleración de la gravedad y S la pendiente de la tubería. Al miembro izquierdo de la ecuación (3.1) se le conoce como parámetro de gasto adimensional (PGA).

Para determinar si las grandes bolsas de aire podrían permanecer estacionarias en los puntos altos de los acueductos a bombeo, el PGA debe ser calculado para el rango de gastos con los que opera el sistema y comparado con todas las pendientes de la tubería que componen la línea. Cuando el $PGA > S$ las burbujas y bolsas de aire se moverán con el flujo. Sin embargo, si el $PGA <$

S las burbujas y las bolsas regresarán en sentido contrario al flujo. En este último caso el punto podría acumular grandes bolsas de aire.

3.5.2 Cálculo del volumen de las bolsas de aire

Como se mencionó en el punto anterior las bolsas de aire tienden a acumularse en los puntos altos e intermedios de los acueductos. Los volúmenes de aire contenidos en las bolsas pueden calcularse mediante una relación que ocupa algunas de las variables obtenidas al aplicar el Método del Paso Directo (MPD), descrito en los libros de hidráulica de canales. Las variables que se ocupan son 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 Pozos et al. (2010c):

$$V = \left\{ \left[A - \frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right] \Delta x_{i,i+1} + \left[A - \frac{A_{i+1} + A_{i+2}}{2} \right] \Delta x_{i+1,i+2} + \dots + \left[A - \frac{A_{i-m} + A_m}{2} \right] \Delta x_{i-m,m} \right\} \quad (3.2)$$

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. El esquema de la Figura 3.9 muestra en detalle la terminología usada en la ecuación (3.2).

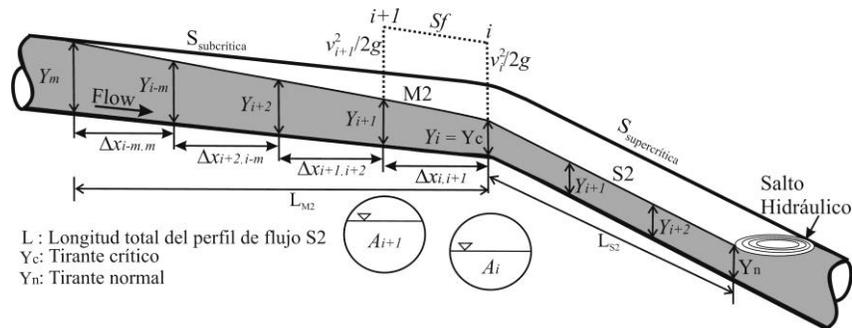


FIGURA 3.9 VARIABLES UTILIZADAS EN EL MÉTODO DEL PASO DIRECTO (MPD)

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 (Pozos et al. (2010c)):

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.
 - a. Calcular los tirantes normales Y_n aguas arriba y aguas abajo de la sección de control
 - b. Calcular el tirante crítico o tirante de control $Y_c = Y_i$

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 (3.3) y (3.4), respectivamente.

$$\Delta Y = \frac{Y_m - Y_i}{k} \quad (3.3)$$

$$\Delta Y = \frac{Y_i - Y_n}{k} \quad (3.4)$$

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 (3.5) a (3.8).

$$A_i = D^2/4(\theta - \text{sen } \theta \cos \theta) \quad (3.5)$$

$$v_i = Q_{wi}/A_i \quad (3.6)$$

$$P_i = \theta D \quad (3.7)$$

$$R_i = A_i/P_i \quad (3.8)$$

Donde θ se define como $\theta = \cos^{-1}(1-2Y/D)$.

3. Calcular la pendiente de fricción para la sección correspondiente, utilizando la ecuación de Manning, ecuación (3.9).

$$S_f = \left(\frac{n v}{R^{2/3}} \right)^2 \quad (3.9)$$

4. 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 (3.10). Los tramos de tubería se consideran siempre positivo

$$\Delta x_{i,i+1} = \frac{E_i - E_{i+1}}{S - S_{fm}} = \frac{E_i - E_{i+1}}{S - 0.5(S_{fi} + S_{fi+1})} = \frac{(Y_i + v_i^2 / 2g) - (Y_{i+1} + v_{i+1}^2 / 2g)}{S - 0.5n^2(v_i^2 / R_i^{4/3} + v_{i+1}^2 / R_{i+1}^{4/3})} \quad (3.10)$$

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.

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 (3.2).

Para una aplicación práctica de la ecuación (3.2), es recomendable iniciar con el cálculo del volumen de aire V_i de la porción de la bolsa que se extiende hacia aguas arriba de la sección de control. Basados en 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.

La suma acumulada de la longitud del perfil entre pasos consecutivos puede ser considerada para calcular el volumen de aire de varias bolsas. 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 . En todo momento se considera que al final de la bolsa de aire ocurre un salto hidráulico.

3.5.3 Propuesta del modelo numérico

El modelo numérico implementado 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, las cuales se mencionan a continuación:

- i. 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.
- ii. Bolsas de aire de un tamaño predeterminado pueden ser ubicadas en los nodos de la línea. La bolsa de aire nunca ocupa la totalidad de la sección transversal del tubo y siempre permanece en su posición original durante toda la evolución del transitorio.
- iii. La celeridad permanece constante durante el análisis.
- iv. La bolsa de aire se comporta según la relación politrópica.
- v. 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 tal como se aprecia en la Figura 3.9.

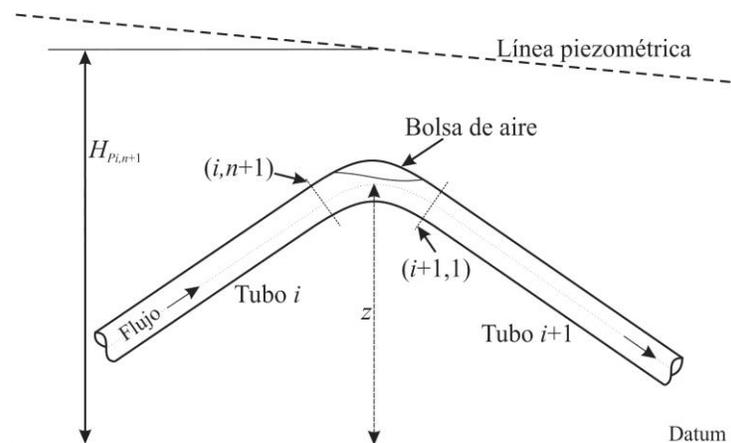


FIGURA 3. 10 NOTACIÓN PARA LA BOLSA DE AIRE

La ecuación (3.11) 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 $H = (\rho/\rho g)z$, como se ve en la Figura 3.9.

$$HV^\psi = C \quad (3.11)$$

Donde H es la carga piezométrica, V el volumen de aire, ψ el índice politrópico y C es una constante. La ecuación (3.11) también puede escribirse como:

$$(H_{P_{i,n+1}} - z + H_b)V_{P_i}^\psi = C \quad (3.12)$$

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

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

$$V_{P_i} = V_i + \frac{I}{2} \Delta t \left[(Q_{P_{i+1,l}} + Q_{i+1,l}) - (Q_{P_{i,n+1}} + Q_{i,n+1}) \right] \quad (3.13)$$

Donde V_i es el volumen de aire al inicio del intervalo de tiempo, Δt es el intervalo de tiempo, $Q_{i,n+1}$ el gasto aguas arriba de la bolsa de aire al inicio del intervalo de tiempo, $Q_{P_{i,n+1}}$ gasto aguas arriba de la bolsa de aire al final del intervalo de tiempo, $Q_{i+1,l}$ gasto aguas abajo de la bolsa de aire al inicio del intervalo de tiempo, $Q_{P_{i+1,l}}$ gasto aguas abajo de la bolsa de aire al final del intervalo de tiempo.

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 esta tesis 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:

$$Q_{P_{i,n+1}} = C_{(+)} - C_{a_i} H_{P_{i,n+1}} \quad (3.14)$$

$$Q_{P_{i+1,l}} = C_{(-)} + C_{a_{i+1}} H_{P_{i+1,l}} \quad (3.15)$$

Donde

$$C_{(+)} = Q_{i,n+1} + C_{a_i} H_{i,n+1} - R_i Q_{i,n+1} \left| Q_{i,n+1} \right| \quad (3.16)$$

$$C_{(-)} = Q_{i+1,l} - C_{a_{i+1}} H_{i+1,l} - R_{i+1} Q_{i+1,l} \left| Q_{i+1,l} \right| \quad (3.17)$$

$$R_i = \frac{f_i \Delta t_i}{2D_i A_i} \quad (3.18)$$

$$R_i = \frac{f_{i+1} \Delta t_i + 1}{2D_{i+1} A_{i+1}} \quad (3.19)$$

$$C_{ai} = \frac{gA_i}{a_i} \quad (3.20)$$

$$C_{ai} = \frac{gA_{i+1}}{a_{i+1}} \quad (3.21)$$

Donde f es el factor de fricción de Darcy – Weisbach, D es el diámetro del tubo, A es el área de la sección transversal del tubo, g es la aceleración de la gravedad y a es la celeridad. Si las pérdidas en la unión de los tubos no son consideradas, entonces:

$$H_{P_{i,n+1}} = H_{P_{i+1,l}} \quad (3.22)$$

Ahora se tienen cinco variables desconocidas y cinco ecuaciones, las cuales son $H_{P_{i,n+1}}$, V_{P_i} , $Q_{P_{i+1,l}}$, $Q_{P_{i,n+1}}$, $H_{P_{i+1,l}}$. La ecuación (3.23) se puede resolver para $H_{P_{i,n+1}}$ mediante un método iterativo, por ejemplo el de la bisección. Los valores de las otras variables desconocidas pueden ser evaluados con las ecuaciones (3.12) a (3.22)

$$\left(H_{P_{i,n+1}} + H_b - z \right) \left[C_{aire} + \frac{1}{2} \Delta t (C_{a_i} + C_{a_{i+1}}) H_{P_{i,n+1}} \right]^W = C_l \quad (3.23)$$

$$C_{aire} = V_i + \frac{1}{2} \Delta t (Q_{i+1,l} - Q_{i,n+1} + C_{(-)} - C_{(+)}) \quad (3.24)$$

Durante los cálculos el esquema de diferencias finitas se mantiene estable, debido a que la condición de Courant – Friedrich – Lewy (ecuación 3.25) se cumple en todo momento si el Δt es elegido adecuadamente.

$$\Delta x \geq a \Delta t \quad (3.25)$$

3.5.4 Metodología para evaluar transitorios hidráulicos con aire atrapado

A continuación se presenta el procedimiento de cálculo o metodología para evaluar transitorios con aire atrapado en conductos a presión, así como las ecuaciones asociadas:

- 1) Identificación de puntos altos del acueducto, donde el aire podría acumularse, ecuación (3.1).
- 2) La determinación de los perfiles de flujo, se hace mediante la ecuación dinámica del flujo gradualmente variado, ecuación (3.10).

- 3) Cálculo del volumen de aire aguas arriba y aguas abajo de la sección de control, ecuación (3.2).
- 4) La simulación de los transitorios hidráulicos con aire atrapado se puede realizar utilizando las ecuaciones (3.11) a (3.25).

En el siguiente capítulo se describe la intrusión patógena, fenómeno que está muy relacionado con los transitorios hidráulicos. En el capítulo 5 se utiliza el modelo numérico antes descrito, para demostrar la influencia de los transitorios hidráulicos con aire atrapado en la intrusión patógena en acueductos a bombeo que transportan agua potable.

Capítulo 4. Intrusión patógena por transitorios hidráulicos

4.1 Causas y Efectos

El principal problema asociado con la calidad del agua suministrada es la posibilidad de que llegue a contaminarse la misma durante la distribución, por heces humanas o animales. Estos problemas han ocurrido a lo largo de la historia registrada. En Bristol, 1985 cuando la contaminación se produjo a través de una fractura de la conducción; en Suiza, 1963 cuando una gran epidemia de fiebre tifoidea ocurrió cuando aguas residuales se filtraron a la conducción de agua a través de una fuga no detectada en la tubería. Los problemas ocurren especialmente en situaciones en régimen no permanente, cuando los niveles de presión en las conducciones son momentáneamente fuertemente negativos, y se agravan cuando las conducciones de aguas residuales se encuentran cerca de las de suministro de agua. En la Figura 4.1 se pueden observar las adversidades para la calidad del agua desde su captación, tratamiento y desinfección, conducción y distribución.

En la captación ya sea de fuentes superficiales o subterráneas se puede contar con arrastre de partículas, la contaminación antropogénica, contaminación superficial, intrusión salina, fertilizantes, nitratos y muchas más. En los casos de la contaminación antropogénica es necesario actuar con responsabilidad pues la cantidad de desechos orgánicos e inorgánicos que produce el ser humano supera la capacidad natural de asimilación por parte de los ecosistemas.

De la carga contaminante del agua en su captación dependerá la complejidad del proceso de potabilización y el nivel de calidad de agua que se pueda lograr (Ferrer y Aguado, 2007).

Posterior al tratamiento, la calidad del agua se verá influenciada por las condiciones en las que se encuentren los elementos de transporte, almacenamiento y distribución, aún con ello se deben mantener las condiciones idóneas para su consumo. En la distribución se instalan estaciones de cloración, las cuales se encargan de preservar la desinfección en zonas donde el contenido de cloro sea insuficiente para mantener el nivel adecuado, desafortunadamente el mantenimiento que se hace de estas estaciones y la verificación de su adecuado funcionamiento dista de ser el ideal.

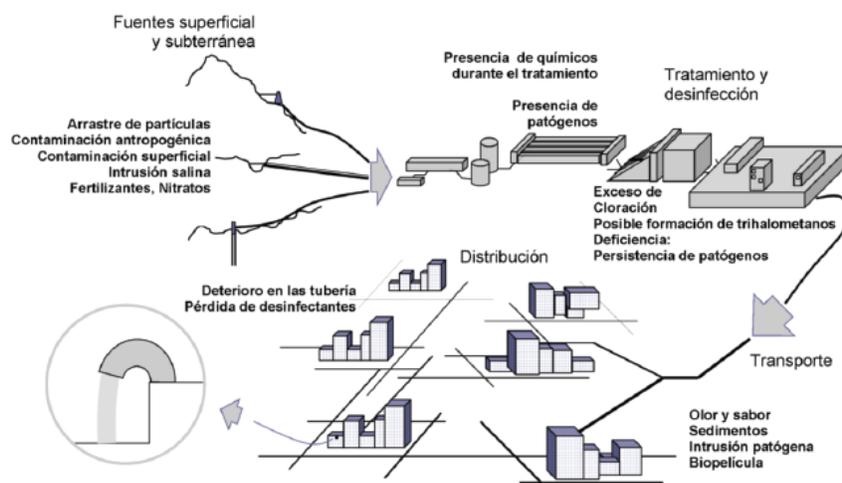


FIGURA 4. 1 ADVERSIDADES DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA DISTRIBUCIÓN (MORA, 2011)

De esta forma mantener la calidad del agua de consumo depende de la integridad de la red de distribución. Mantener los niveles adecuados de calidad se vuelve una tarea primordial, debido al impacto que conlleva para la salud de los consumidores. El consumo de agua contaminada se ve reflejado en los casos que son reportados por enfermedades epidémicas; no obstante en la mayoría de los casos no se tiene conocimiento del origen de la contaminación del agua, el evento que la genera y sobre todo la entrada del contaminante. En la Figura 4.2 se observa la reparación de un fallo en la distribución de agua potable en el que personal de mantenimiento debe realizar una excavación a cielo abierto, la cual está seriamente expuesta a organismos patógenos.



FIGURA 4. 2 DIFICULTADES DE LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE EN ZONAS URBANAS

Una sencilla solución a este problema implica que las conducciones deben estar tan alejadas como sea posible del seno de la urbanización, sin embargo esta condición se vuelve cada vez más complicada de cumplir, teniendo en cuenta el rápido crecimiento de las áreas urbanas.

En la Figura 4.3 se observa la disposición común de las tuberías en una zona urbana. Un criterio de diseño básico, inclusive reglamentado, es ubicar las tuberías de aguas negras, de riego, saneamiento o de disposición de cualquier elemento contaminado por debajo de las tuberías de agua potable o cruda. Es claro que en caso de tener algún fallo el agua potable posiblemente escurriría hacia las tuberías de desagüe sin embargo éstas también podrían tener rupturas que permitan el ascenso por capilaridad hacia las de agua limpia, contaminándola.



FIGURA 4. 3 DISPOSICIÓN COMÚN DE TUBERÍAS EN UNA ZONA URBANA

No hay que perder de vista que la propia agua que se encuentre en el terreno circundante puede ser un agente contaminante (por ejemplo procedente de lixiviados debidos a actividades humanas) e incluso la propia matriz del suelo puede constituirse en un contaminante sedimentable o particulado.

En estas circunstancias podemos ver que los eventos transitorios pueden tener significativa implicación en la calidad del agua y la salud, un enfoque poco convencional de las variaciones de presión en los sistemas de conducción. Un evento transitorio de baja presión, por ejemplo, un fallo en el acueducto tiene el potencial de causar la intrusión de agua contaminada en la matriz del suelo hacia la tubería por las fugas en juntas o roturas.

Asimismo, cuando una caja de válvulas está inundada de agua no potable, ésta se puede introducir al ocurrir un decremento de presión en el sistema. En la Figura 4.4, se puede observar una caja de válvulas inundada con agua sucia.



FIGURA 4. 4 CAJA DE VÁLVULAS INUNDADA CON AGUA CONTAMINADA

En la Figura 4.5 se aprecia la magnitud de las fallas en las conducciones de agua potable y la dificultad para darles reparación, donde el sistema presurizado no puede dejar de dar servicio y la posibilidad de intrusión de un caudal contaminado dentro de la tubería es de alto riesgo.



FIGURA 4. 5 RUPTURA EN LÍNEA DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE CON DESCARGA EN LA MATRIZ DEL SUELO.

Podemos definir la intrusión patógena es el fenómeno mediante el cual se contamina el agua potable durante su transcurso antes de ser entregada a los usuarios para su consumo (Mora et al, 2009).

El incremento de bacterias heterótrofas dentro del sistema de distribución se debe a una serie de factores, una vez que ha ocurrido el fenómeno de la intrusión. Estos factores normalmente están ligados a un deficiente proceso de desinfección y a la posibilidad de recrecimiento de las bacterias una vez que han llegado a formar parte del agua suministrada.

El recrecimiento dentro de la red se va a dar si existe una cantidad de nutrientes aceptable, parametrizado en lo que llamamos carbono orgánico asimilable. A pesar de que pueda haber pequeños niveles de intrusión patógena, con un buen tratamiento y una adecuada desinfección con cloro, y una presencia de cloro residual adecuado, estos niveles se encuentran mantenidos dentro de unos valores aceptables. Pero hay que encontrar un equilibrio adecuado para que la excesiva presencia del cloro residual no suponga potencialmente peligro por la formación de compuestos clorados de la desinfección (López et al, 2006a).

En la Tabla 4.1 se muestran algunos de los efectos adversos a la salud que representan los organismos patógenos de posible transmisión hídrica y que pueden afectar a la población dado un evento de intrusión.

Microorganismo	Efectos en la Salud
Cryptosporidium	<ul style="list-style-type: none"> • Causa diarrea. • Altamente asociada a epidemias de origen hídrico. • Alto riesgo infeccioso (la ingestión de 10 unidades formadoras de colonia puede llevar a la infección). • La primera epidemia de transmisión hídrica documentada fue en 1985 por contaminación de un pozo con aguas residuales (Gray, 1994). • Ver Figura 4.6
Giardia	<ul style="list-style-type: none"> • Causa diarrea y mal absorción intestinal. • Identificada con epidemias de origen hídrico por más de 30 años en EUA. • La ingesta de menos de 10 unidades formadoras de colonia representa un alto riesgo de infección. • Una epidemia de Giardia fue documentada en un parque de casas rodantes (Blackburn et al, 2004).
Norovirus	<ul style="list-style-type: none"> • Causa gastroenteritis viral y vomito. • Se considera la causa más común de gastroenteritis en América. • Las altas tasas de ataque indican que la dosis infectantes es muy baja. La probabilidad media de infección para una sola partícula de virus se estima en 0.5, por mucho la superior reportada por cualquier otro virus. • Ver Figura 4.7.
E.Coli O157:H7	<ul style="list-style-type: none"> • Causa diarrea y en algunos casos se desarrolla el síndrome urémico hemolítico. • La capacidad infecciosa de las cepas es sustancialmente mayor que de otras cepas (solo se necesitan 100 organismos para causar una infección). • Identificado como el agente epidémico en las fallas del sistema de distribución hidráulico en Cabool (Geldreich, 1992) y Walkerton (Hrudey, 2003).
Campylobacter jejuni	<ul style="list-style-type: none"> • Uno de los más importantes causantes de gastroenteritis aguda en todo el mundo. • Fuentes de agua potable contaminadas con esta bacteria se han identificado como el origen de epidemias. • Capacidad infecciosa alta (solo se necesitan 1000 organismos para causar una infección). • Principal causa de diarrea en Europa (Gray, 1994) siendo más común aún que la Salmonella.
Enterovirus Retrovirus Adenovirus VHA (virus de hepatitis A)	<ul style="list-style-type: none"> • Las epidemias de estos virus generalmente se dan con un patrón cíclico en una región, donde la población adquiere inmunidad y tarda una generación en repetirse la epidemia. • El CHA representa el 87% de las enfermedades virales transmitidas por agua en EUA (Craun et al, 2006)

Microorganismo	Efectos en la Salud
Legionella	<ul style="list-style-type: none"> • Bacteria Gram negativa con forma de bacilo. • Su crecimiento se ve favorecido por presencia de materia orgánica. • La mayor fuente de contagio es por transmisión hídrica en grandes edificios, hospitales, hoteles, humidificadoras, máquinas de rocío, spas y fuentes de agua termales (legionella.org, 2012). • Ha sido la enfermedad hídrica de mayor incidencia en España, de 1980 a 1997 se han registrado 2,147 casos en las ciudades de Murcia, Alcalá, Alcoy, Granada, Barcelona y Vigo (López, 2006).
Salmonella typhimurium	<ul style="list-style-type: none"> • Formado por bacilos gramnegativos anaerobios facultativos. • Capacidad infecciosa alta (solo se necesitan desde 25 organismos y 1000 organismos son suficientes para causar una infección). • Sus principales factores de contagio es la contaminación de depósitos de almacenamiento y fallos en la desinfección en los sistemas de conducción. • En 1993 Missouri, EUA, se estimaron 650 casos de infección debido a la contaminación fecal en depósitos procedentes de aves.

TABLA 4. 1 MICROORGANISMOS DE INTERÉS PARA ESTIMAR EL RIESGO POTENCIAL EN LA SALUD DE LA POBLACIÓN DEBIDO A LA INTRUSIÓN PATÓGENA, (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD; WHO, 2004)



FIGURA 4. 6 LIMPIEZA DE PLANTA DE AGUA POTABLE DEBIDO A LA EPIDEMIA DE CRYPTOSPORIDIUM EN MILWAUKEE, 1993 (JOURNAL SENTINEL, 2013)



FIGURA 4. 7 EL CENTRO DE CONTROL DE ENFERMEDADES Y PREVENCIÓN EN EUA (CDC POR SUS SIGLAS EN INGLÉS) REPORTÓ 194 PASAJEROS DEL QUEEN MARY ENFERMOS CON NOROVIRUS TRANSMITIDO POR AGUA CONTAMINADA EL 24 DE ENERO DE 2013. EN TOTAL SE REPORTAN 140 EPIDEMIAS EN DIFERENTES EMBARCACIONES DESDE SEPTIEMBRE 2012 A ENERO 2013. (CBS NEWS,2013)

4.2 Intrusión patógena

Debido a la naturaleza de las potenciales fuentes de contaminación (fugas de drenaje, agua estancada en válvulas de alivio inundadas), los eventos de intrusión patógena resultan en la introducción de una variedad de microorganismos. Estos patógenos tienen diferentes probabilidades de ocurrencia y diferente resistencia a desinfectantes residuales (cloro libre y cloraminas) que afectarán su subsistencia en el sistema.

Los parámetros así como sus valores permisibles se basan principalmente en las recomendaciones de La Organización Mundial de la Salud (OMS) y en las condiciones preventivas que se establezcan para preservar un nivel de protección de la salud pública. La calidad del agua será verificada en las zonas de consumo y los programas de control dependerán de cada abastecimiento. El objetivo de un sistema de conducción y distribución es satisfacer la entrega de agua segura al consumidor para lo cual se requiere de una vigilancia continua evitando cualquier intrusión de contaminación en la red y la degradación del agua.

En México Para garantizar la calidad del agua en las redes de distribución de agua potable es necesario tener concentraciones de los parámetros entre los rangos establecidos dentro de la norma NOM-127-SSA1-1994, que establece los límites máximos permisibles de los parámetros del agua para consumo humano.

En cuanto a la vigilancia y evaluación del control de calidad del agua para uso y consumo humano, distribuida por sistemas de abastecimiento público se tiene la Norma Oficial Mexicana, NOM-179-SSA1-1998.

El uso de un programa que modele la distribución y calidad del agua, como EPANET, se podría utilizar para determinar el destino final y análisis del transporte (López, 2001).

El principal mecanismo desencadenante de la intrusión es la falta de mantenimiento de una presión adecuada en el sistema de distribución. Las bajas presiones son generalmente considerados como presiones por debajo de 10 m.c.a., en general los sistemas de distribución deben ser operados con una presión superior en todas las condiciones de flujo. La presión atmosférica corresponde a un valor de presión manométrica de 0 m.c.a y presiones negativas son presiones manométricas cuando están por debajo de 0 m.c.a. la cual crea un efecto de succión dentro de la conducción de agua. La presión más baja posible en un tubo sería un valor menor a la presión atmosférica, cuyo

valor es variable dependiendo de la elevación y las condiciones atmosféricas. Sin embargo, antes de que la presión alcance este valor el agua comenzará a evaporarse y causar cavitación.

Existen dos tipos principales de las condiciones de presión adversos que pueden tener lugar en los sistemas que transportan agua potable (Besner et al, 2011).

1. Transitorios de presión negativa: los transitorios de presión (golpe de ariete) son causados por los cambios bruscos en la velocidad del agua y se puede suponer que todos los sistemas de distribución sufren, en diversos grados, las fluctuaciones de presión rápidas que puede resultar en eventos de presión transitorios bajos o negativos. Estos son eventos de corta duración que pueden típicamente durar desde unos pocos milisegundos a unos pocos minutos y pueden ser provocados por la operación prevista del sistema de distribución, o acontecimientos imprevistos, tales como interrupciones del servicio, y los cambios repentinos en la demanda.
2. Eventos de presión negativa sostenida: Estos eventos tienen típicamente duraciones más largas (en la gama de minutos a horas) y a menudo están asociados con actividades de operación del sistema de distribución y de mantenimiento. La suspensión de la operación es una posible causa de despresurización del sistema de conducción y se pueden encontrar una amplia gama de situaciones. En un caso extremo, la interrupción total del suministro de agua se puede producir cuando ocurren fenómenos naturales, por ejemplo: terremotos, tornados, etc. y se presentan las condiciones catastróficas como la rotura de tuberías de agua potable y alcantarillado. Aunque crítico en la naturaleza, este tipo de situaciones no se contemplan directamente en este tg, ya que estamos tratando de entender los riesgos potenciales para la salud asociados con eventos de menor escala que ocurren de forma más frecuente.

La intrusión en las líneas de conducción de agua se presenta como consecuencia de la conjugación de la existencia de una rotura u orificio en una conducción, con un estado de presión negativa en el interior de la misma y la presencia de un fluido exterior que se introduce a consecuencia de una disminución de la presión dentro de la conducción. En este sentido, cualquier entrada de flujo externo en la conducción debe ser considerada patógena, en tanto que va a alterar los niveles de calidad del flujo que circula por la tubería. En la Figura 4.8 se presentan los factores causantes de la intrusión patógena.

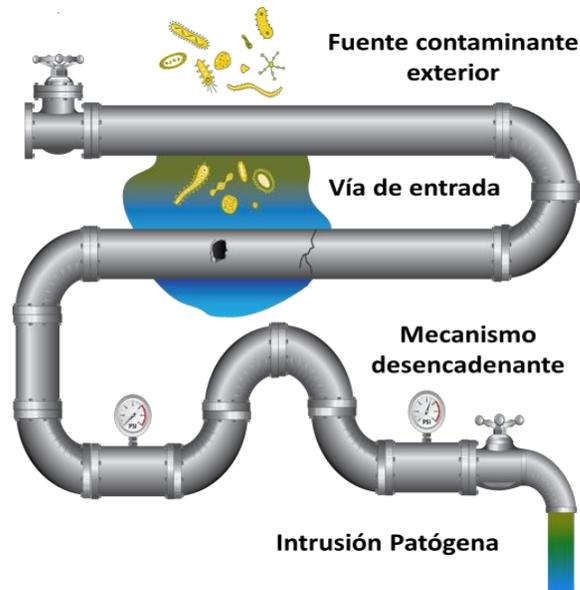


FIGURA 4. 8 FACTORES REQUERIDOS PARA EL FENÓMENO DE LA INTRUSIÓN PATÓGENA

También pueden aparecer situaciones de depresión en las redes no ligadas a fenómenos transitorios, cuando se diseña una conducción en la que los caudales requeridos generan grandes pérdidas de carga, y las cotas de ciertos puntos son altas, puede aparecer una situación de presiones negativas en el interior de las conducciones con carácter permanente, es lo que conocemos como un sifón. En estas condiciones la presión puede bajar hasta los niveles de cavitación del fluido, con lo que podemos encontrarnos con tramos de las conducciones potencialmente en depresión como consecuencia de un mal diseño de las mismas.

4.3 Avances en la Investigación del fenómeno

May (1994) desarrolló la teoría FAVAD (Fixed And Variable Area Discharge paths) sobre los “trayectos de descarga de área fija y variable” y demostró que el área transversal de algunos tipos de fugas (agujeros, desgarros o roturas en tubos, juntas o accesorios) podría variar también con la presión P , mientras la velocidad del flujo seguía variando con la raíz cuadrada de la presión. Esto daba lugar a diferentes tipos de fugas en las cuales la relación entre caudal Q y presión era $Q_f = K_f \cdot P^x$, donde x es un exponente que podría variar entre 0.5 y 2.5, K_f agrupa al coeficiente de descarga C_d , al área de la tubería A , y a la aceleración de la gravedad g . En definitiva, se concluye que el caudal de fuga es función del material de la tubería y del tipo de defecto.

El riesgo de intrusión patógena puede tener muchas causas. Kirmeyer (2001) hizo una clasificación enfocada al nivel de riesgo, resultando de mayor a menor: penetración de agua tratada, conexiones cruzadas (potenciales puntos de conexión entre suministro de agua potable y fuentes no potables) y por último reparaciones o rupturas en las tuberías. En la Figura 4.9 se observa la complicada labor de reparación de una tubería de conducción de agua potable de 90 cm de diámetro, en material arcilloso, afectado por la socavación. Aun cuando se haga logre el secado del área de trabajos la conducción se ha contaminado en su totalidad.



FIGURA 4. 9 REPARACIÓN DE TUBERÍA DE PVC EN FUGA DE AGUA POTABLE APOYADA EN MATERIAL ARCILLOSO

Como resultados de dicha clasificación se generaron tres rangos para clasificar los tipos de intrusión que se pueden presentar, rutas con alto riesgo, con mediano riesgo y con bajo riesgo, la clasificación se realizó en base a cuatro criterios: volumen contaminado, frecuencia de intrusión, probabilidad de causar brotes de enfermedades relacionadas con el agua de consumo y la gravedad de las enfermedades.

Entre las rutas con de bajo riesgo se incluyen instalaciones de los tanques de almacenamiento cubiertos, la instalación de nuevas tuberías, resuspensión de bacterias y contaminación provocada. Las rutas de mediano riesgo se han considerado los tanques de almacenamiento descubiertos. Finalmente las rutas de alto riesgo se consideran a las conexiones con medios no potables, contaminación por transitorios de presión, sitios de roturas y reparación de conducciones, además de considerar la etapa durante el tratamiento de agua. Se pueden observar en la Figura 4.10 fugas en dos líneas de conducción, a través de las cuales se expulsa agua susceptible de contaminarse y que podría reingresar a la tubería.



FIGURA 4. 10 TUBERÍAS CON FALLOS DE TIPO ORIFICIO

Debe confluír una situación de una reducción de presión importante en la red, además de que en la zona del defecto de la conducción se presente un fluido externo con propiedades diferentes a las

del agua potable en la conducción. Ésta es una de las posibles rutas de entrada de la intrusión patógena, aunque no la única, como se ha mencionado con anterioridad. En la Figura 4.10 se muestra el proceso de intrusión patógena hacia el interior de una tubería que transporta agua potable.

En el **Anexo A** se presentan fotografías tomadas a diversas conducciones en México que se encuentran en malas condiciones, reuniendo las condiciones propicias para que se dé el fenómeno de intrusión patógena.

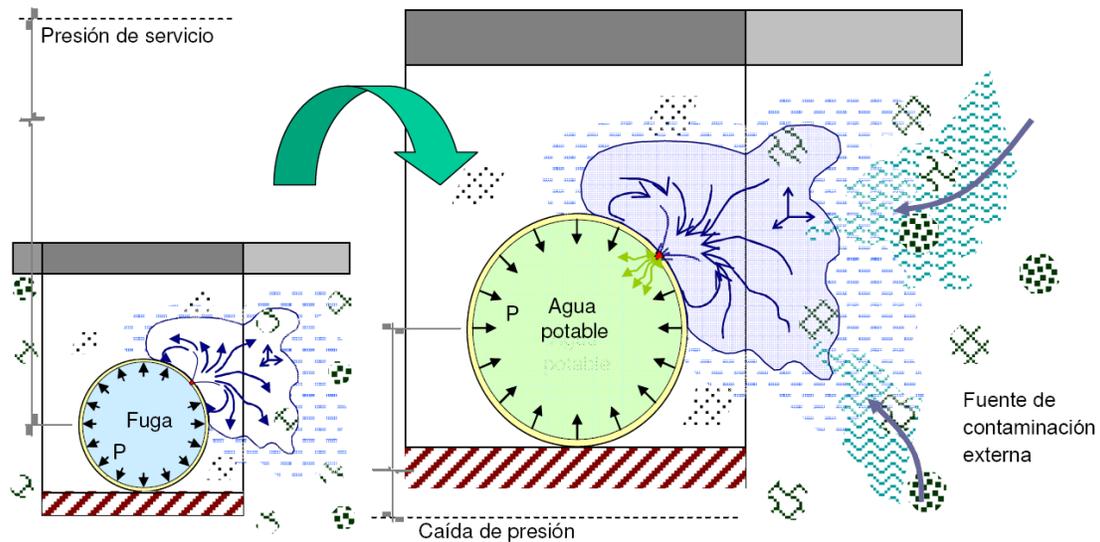


FIGURA 4. 11 PROCESO DE INTRUSIÓN PATÓGENA EN CONDUCTOS A PRESIÓN (MORA,2011)

López (2005) propone que el modelado de fugas visto desde un punto de vista hidráulico puede ser enfocado como el flujo de agua a través de un orificio, permaneciendo válidos los casos en los cuales la sobrepresión y subpresión en la conducción favorecen la entrada de contaminantes. Para el modelado se hace uso de la "Teoría Favard".

López y Mora (2008) presentan un análisis minucioso del comportamiento de la intrusión patógena considerando el transporte de contaminante a través de medición experimental y simulaciones computacionales. El programa utilizado es ©FluentInc el cual es un modelo computacional que resuelve numéricamente las leyes de Dinámica de Fluidos.

López y Mora (2010) generan un modelo numérico utilizando los modelos de la dinámica de fluidos computacionales (CFD por sus siglas en inglés) con el cual se reproducen escenarios presentes en campo y cuantifican los rangos en que se pueden producir volúmenes de intrusión con base en diversas condiciones de carga externa a la tubería.

Mora (2011) desarrolló la modelación de la intrusión patógena a través de fallos y su implicación en la distribución de agua. Su propósito fue obtener valores cuantificables del fenómeno en fallos físicos, hace modelación estacionaria y no estacionaria. Describe con bastedad los tres factores que se requieren para que se produzca la intrusión patógena:

1. La fuente contaminante, de las cuales se analizaron muestras de agua superficiales corroborando que los organismos patógenos se encuentran en ambientes que saturan los suelos en el entorno urbano. Además, se constató que las distancias requeridas entre la red de saneamiento y la de agua en ocasiones no es la mínima requerida por lo que las fuentes contaminantes se encuentran en el entorno de las conducciones de agua.

2. Se ha realizado un análisis de los fallos de las conducciones hasta mostrar la clasificación de los tipos de fallo, a partir de los cuales se basó la modelación de la intrusión.

3. De los mecanismos que generan la intrusión a través de los fallos se identificaron los transitorios de presión y los servicios intermitentes de agua con los cuales se planeó la modelación.

Realizó un modelo basado en la teoría de Favard considerando un medio poroso en el exterior de la conducción, validando los resultados a través de un modelo CFD. Analizó la intrusión durante transitorios de presión a través del método de las características y valida sus resultados con una modelación CFD.

4.4 Caracterización del volumen de agua que entra en la distribución.

Una vez que se presentan los tres elementos generadores de la intrusión patógena, en uno o más puntos de la conducción, existe un volumen que se introduce en la tubería. A continuación, se presentan algunas consideraciones que se realizan para determinar el caudal de intrusión por transitorios hidráulicos (Besner et al, 2011).

1. Un modelado preciso de eventos de presiones negativas por transitorios con aire atrapado.

Ver Capítulo 3 del presente trabajo.

2. El uso de la ecuación del orificio para el cálculo del caudal de intrusión.

$$Q_{intrusión} = C_D A \sqrt{2g\Delta H} \quad (4.1)$$

Donde $Q_{intrusión}$ es el caudal de intrusión (m^3/s), C_D es el coeficiente de descarga (sin unidades), A es el área del orificio (m^2), g es la aceleración gravitacional (m/s^2) y ΔH es la diferencia entre la carga de presión externa e interna (m).

La expresión mostrada es válida para estimar los volúmenes de intrusión a través de orificios circulares, sin embargo no necesariamente produce estimaciones precisas para todas las formas y tamaños de orificios de fugas en las tuberías (grietas longitudinales o circunferenciales). Investigaciones en la relación presión- fuga (en condiciones de presión positiva en las tuberías) han demostrado que el valor del exponente puede diferir del valor teórico de 0.5 así como el área de la fuga efectiva puede, en algunos casos, ser dependiente de la presión (Lambert, 2001; Greyvenstein y Van Zyl, 2007).

El comportamiento del material de la tubería se refleja en la expansión de tamaño del orificio con la presión, mostrándose como el factor principal que explica la variación en los valores del exponente. El comportamiento de fugas bajo condiciones de presión negativas aún no se ha investigado a profundidad. Se debe reconocer que las características del suelo no se toman en cuenta cuando se utiliza la ecuación que calcula el flujo (como si el tubo solo estuviera rodeado de agua y sin suelo).

El flujo en medios porosos saturados pueden verse influidos por las características del suelo , tales como la permeabilidad, tamaño de partícula, la interacción de las partículas del suelo con el orificio, y el tipo de flujo en el suelo (laminar / turbulenta) (Van Zyl, 2007).

Los autores han investigado el rol del suelo en las relaciones presión-fuga (bajo condiciones de presión positiva) y han concluido que la interacción entre el suelo externo y el tubo de escape es complejo y todavía no se tiene una comprensión adecuada hasta este momento. Esta resolución es probable que sea la misma para las condiciones de intrusión. El trabajo de investigación se está llevando a cabo actualmente en la Universidad de Sheffield (Reino Unido) evaluando la posibilidad de la entrada de contaminantes en los sistemas de distribución por medio de mediciones directas utilizando una instalación de laboratorio (EPSRC, 2009). Los arreglos experimentales se han diseñado para incluir las condiciones del terreno circundante a la tubería y un campo de flujo contaminante (fugas de alcantarillado). Los resultados se utilizarán para desarrollar un nuevo modelo de entrada que permitirá la cuantificación de los volúmenes potenciales de intrusión basado en condiciones realistas.

El uso de la expresión (4.1) muestra que el volumen de intrusión no es tan sensible a la diferencia de presión (pues se encuentra dentro de la raíz cuadrada) como al tiempo que dura el evento. Lo anterior dado que el volumen es el producto del gasto por el tiempo. De esta forma podemos decir que el gasto es bajo para una diferencia de presión pequeña (pequeña ΔH), sin embargo entre más tiempo dure el fenómeno transitorio el volumen de intrusión será mayor. Lo anterior implica que los sistemas de conducción caracterizados por bajas presiones de mayor duración son más propensos a la intrusión; el uso de la ecuación (4.1) indica que una de las estrategias de mitigación del fenómeno de intrusión sería minimizar la duración de los eventos de presión negativa reduciendo la potencial exposición a los contaminantes (Gullick et al, 2004).

3. El uso del mismo diámetro del orificio y la misma carga de presión externa a la tubería.

En una línea de conducción real, las fugas (de diferentes formas y tamaños) por lo general se encuentran a lo largo de las tuberías, con algunas secciones de tuberías que tienen más fugas que otros debido a material de la tubería, las condiciones del suelo, etc. En la Figura 4.11 se muestran algunos tipos característicos de fallas en tuberías.

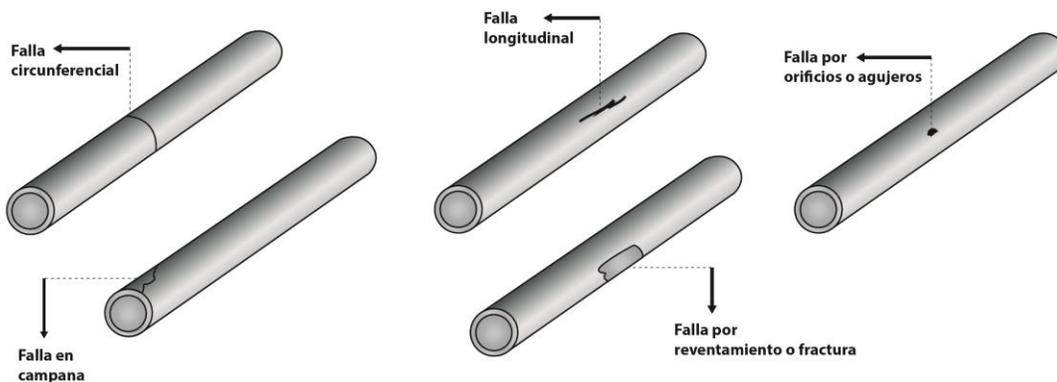


FIGURA 4. 12 DIVERSOS TIPOS DE FALLAS EN TUBERÍAS

Con el fin de calcular el volumen de intrusión, los modelos convencionales de transitorios asignan orificios de igual tamaño para cada nodo del sistema y el diámetro de estos orificios se calcula en

base a la tasa de fuga proporcionada por el usuario; por ejemplo el 20% del total de agua perdida por fugas se traduce en un valor de diámetro de orificio único que se aplicará a todos los nodos incluidos en el modelo del sistema de distribución. El mismo principio se aplica al parámetro de carga de presión externa.

En el siguiente capítulo se presenta la simulación de los transitorios hidráulicos con aire atrapado en un acueducto a bombeo. Además, la envolvente de presiones mínimas es utilizada para evaluar la intrusión patógena con ayuda de la ecuación (4.1). Este caso de estudio permitirá comprender mejor la influencia de los transitorios hidráulicos con aire atrapado en la intrusión patógena.

Capítulo 5. Simulación del Fenómeno de Intrusión Patógena en presencia de Aire atrapado.

5.1 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. Para este análisis se presenta la simulación de los transitorios generados por una falla eléctrica repentina en los equipos de bombeo. Una vez determinados los parámetros de la conducción bajo este fenómeno se aplicará el modelo elegido de intrusión patógena para calcular el gasto y volumen que ingresa en la conducción.

La estación de bombeo opera con tres equipos conectados en paralelo. El agua es bombeada hacia el tanque de carga constante ubicado a 292.66 m sobre el nivel del tanque de succión. La conducción tiene una longitud de 2288.66 m y está compuesta de tubo de concreto reforzado con diámetro interno de 1.2 m. El esquema de la Figura 5.1 ilustra el sistema estudiado.

Antes de aplicar el modelo numérico para investigar el efecto del aire atrapado en transitorios hidráulicos, se lleva a cabo un análisis preliminar para identificar los puntos donde las bolsas de aire podrían acumularse y posteriormente cuantificar su volumen. Utilizando la expresión propuesta por Pozos et al. (2010a) (ecuación 3.1), se encontraron 3 puntos que podrían acumular aire.



FIGURA 5. 1 PERFIL DEL ACUEDUCTO A BOMBEO

Haciendo uso de la información del capítulo 3 y aplicando las ecuaciones (3.1) y (3.2) se determinan los puntos en los que las burbujas se concentran, produciendo bolsas de atrapado. Hay que recordar que es necesario evaluar el avance o retorno de las burbujas y bolsas de aire, en

función del Parámetro de Gasto Adimensional y por último, mediante el Método del Paso Estándar, se determina la longitud de las bolsas de aire desde la sección de control hacia los extremos aguas arriba y aguas abajo; teniendo en cuenta el diámetro de la tubería, las áreas hidráulicas y los tramos de tubería se obtiene el volumen de aire atrapado.

Cadenamiento (m)	Elevación (m)	Vol. de Aire (m³)	Pendiente (m/m)
1+376.464	244.810	1.447	0.195
1+565.563	255.000	1.461	0.531
1+998.664	354.580	1.081	0.215

TABLA 5. 1 UBICACIÓN Y VOLUMEN DE LAS BOLSAS DE AIRE EN LA CONDUCCIÓN, GASTO $Q=2.1 \text{ m}^3/\text{s}$

5.2 Análisis de transitorios con aire atrapado

El efecto de diferentes bolsas de aire en transitorios hidráulicos generados por el paro simultáneo de las unidades de bombeo, sin considerar dispositivos supresores de transitorios, son analizados en esta sección. Los volúmenes de aire presentados en la Tabla 5.1 son colocados en los puntos altos del sistema identificados durante el análisis. Posteriormente, una serie de simulaciones numéricas son llevadas a cabo para encontrar la situación más crítica en este sistema en particular

A través del Método de las Características se determina la carga piezométrica H y el gasto Q para todos los nodos considerados a lo largo de la línea durante el tiempo seleccionado. Para este análisis en particular, sólo se consideran las envolventes de las cargas máximas y mínimas experimentadas por el sistema. Para identificar más fácilmente los puntos críticos en el sistema, se graficaron las cargas máximas y mínimas contra el cadenamiento de la línea.

En la Figura 5.2 se observa que la envolvente de las cargas piezométricas mínimas, sin considerar aire atrapado, no cruza con la tubería por tanto se esperaría que el sistema funcionara correctamente. Sin embargo al considerar el efecto de las bolsas de aire en los cadenamientos mostrados en la Tabla 5.1 se observa que la envolvente de cargas piezométricas mínimas 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 y en caso de que se presenten las condiciones requeridas, cavitación. Debido a esto es indispensable el uso de dispositivos para control de transitorios hidráulicos, reduciendo o eliminando los efectos negativos en el sistema.

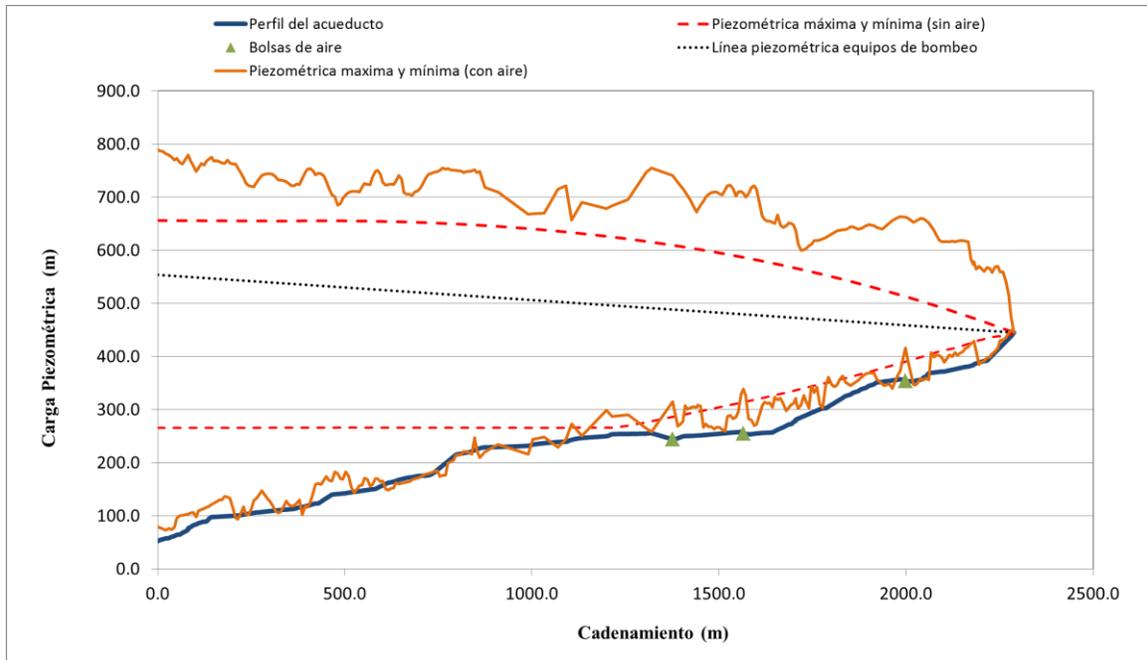


FIGURA 5. 2 ENVOLVENTES DE LAS LÍNEAS PIEZOMÉTRICAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS $Q=2.1 \text{ m}^3/\text{s}$

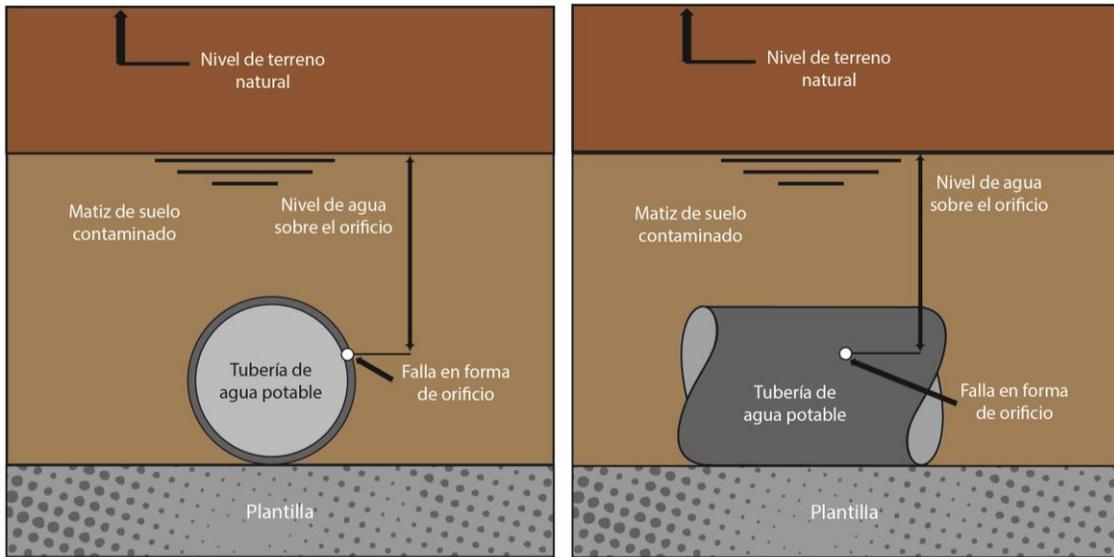
La presencia de las tres bolsas de aire causa un importante aumento de las presiones transitorias máximas y mínimas a lo largo del sistema. La simulación numérica indica que estas bolsas de aire absorben parcialmente las presiones transitorias, generando, que el resto sea reflejado hacia las fronteras 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.

5.3 Análisis de Intrusión Patógena

En el punto anterior de este capítulo se obtuvieron la ubicación, dimensión y forma en que afectan las bolsas de aire atrapado en una conducción. Aplicando la metodología anteriormente descrita, el arreglo genera 3 bolsas de aire, específicamente en los cadenamientos 1+376.464, 1+565.563 y 1+998.664. Las bolsas de aire afectan los valores de presión mínimos y máximos al momento del paro de las bombas. En la Figura 5.2 se muestra el efecto de las bolsas de aire en las envolventes de presión.

Se contabilizaron 52 puntos con baja presión (menor a 0 m.c.a.) que sugieren posibles sitios de falla del acueducto. La presión más baja es de - 22.66 m.c.a. y la más alta sin llegar a ser positiva es de - 0.02 m.c.a. En promedio estos puntos mantienen una carga de - 6.91 m.c.a., la mayor parte de estos puntos se localizan entre los cadenamientos 0+600.00 y 0+900.00 de la conducción.

Si aunadas a las bajas presiones se localizan fallas como fracturas, orificios, válvulas rotas o en mal funcionamiento tenemos el riesgo latente de una intrusión patógena. En la Figura 5.3 se observa una falla en forma de orificio, la cual se encuentra apoyada sobre una plantilla y rodeada por una matriz de suelo contaminada. El nivel de agua sobre el orificio representa el Nivel de Agua Freática o la saturación del terreno por el flujo expulsado a través del orificio en la operación normal del acueducto.

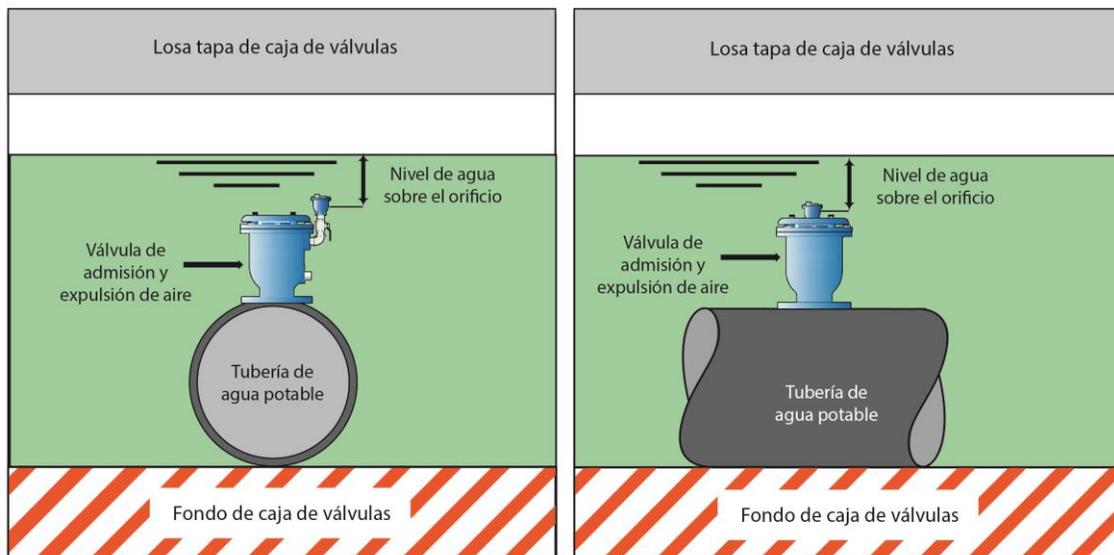


CORTE TRANSVERSAL

PERFIL LONGITUDINAL

FIGURA 5. 3 FALLA EN FORMA DE ORIFICIO EN UNA CONDUCCIÓN

En la Figura 5.4 se observa una válvula de admisión y expulsión de aire dentro de una caja saturada de agua. Este tirante de agua se puede originar por el funcionamiento normal de la válvula, expulsando agua, la cual al no contar con una vía de salida se estanca. El estancamiento puede llegar hasta la losa superior e incluso forzar las tapas y desbordar. Al momento de funcionar la válvula como admisoras de aire succionará el líquido circundante, siendo una posible vía de entrada de organismos patógenos.



CORTE TRANSVERSAL

PERFIL LONGITUDINAL

FIGURA 5. 4 FALLA DE UNA VÁLVULA DE ADMISIÓN-EXPULSIÓN DE AIRE EN UNA CONDUCCIÓN

Para el caso en estudio y con motivos académicos, se supone la existencia de orificios en la conducción así como dispositivos de alivio de presión, en las condiciones mostradas en las Figuras 5.3 y 5.4 las cuales tendrán repercusiones directas en la conducción.

Asimismo se propuso la carga hidráulica sobre la válvula u orificio según sea el caso y la duración del evento de baja presión. En la Tabla 5.2 se muestran los puntos y sus características.

Sitio	Cadenamiento	Carga Hidráulica	Vía de entrada	Diámetro del Orificio	Nivel del agua sobre el Orificio	Duración de la Baja Presión
	(m)	(m)			(m)	(s)
1	214.666	-7.057	VAEA	6 in	2.00	15.00
2	243.017	-2.390	orificio	2 cm	3.00	12.00
3	314.553	-0.556	orificio	2 cm	2.50	10.00
4	321.735	-4.853	orificio	3 cm	1.50	9.00
5	328.917	-3.588	orificio	2.5 cm	2.80	13.00
6	386.373	-14.470	VAEA	4 in	2.40	11.00
7	400.737	-3.361	orificio	1.5 cm	3.00	14.00
8	524.955	-2.396	VAEA	4in	2.00	15.00
9	630.291	-11.988	VAEA	6in	2.10	13.00
10	651.278	-8.200	orificio	3 cm	3.30	8.00
11	672.590	-7.700	orificio	2 cm	2.50	13.00
12	754.836	-16.081	VAEA	4in	2.80	14.00
13	761.884	-18.148	orificio	1 cm	3.50	9.00
14	768.932	-22.658	orificio	2.5 cm	2.80	10.00
15	790.076	-6.685	orificio	1.5 cm	1.90	12.00
16	860.329	-17.789	VAEA	6 in	1.90	13.00
17	874.197	-9.025	orificio	3 cm	2.00	14.00
18	990.415	-15.372	VAEA	8 in	2.70	13.00
19	1069.610	-9.693	orificio	2.5 cm	3.20	11.00
20	1935.726	-3.580	orificio	2.3 cm	2.90	14.00
21	1963.699	-15.928	VAEA	4 in	2.00	13.00
22	2019.644	-5.580	orificio	1 cm	3.20	12.00
23	2026.637	-8.336	orificio	2.5 cm	3.30	10.00
24	2047.360	-4.348	orificio	1.5 cm	2.60	11.00
25	2061.090	-13.155	VAEA	6 in	2.00	13.00
26	2194.886	-3.971	VAEA	4 in	2.40	11.00
27	2202.100	-1.102	orificio	2 cm	3.20	10.00

TABLA 5. 2 UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS PUNTOS SUJETOS AL FENÓMENO DE INTRUSIÓN PATÓGENA

Tomando en cuenta la información mostrada de la conducción se analizó el caudal y volumen de intrusión patógena según la Ecuación (4.1), los resultados se muestran en la Tabla 5.3.

Sitio	Cadenamiento	Carga Hidráulica	Diámetro del Orificio	Nivel del agua sobre el orificio	Duración de la baja presión	Gasto intrusión	Volumen intrusión
	(m)	(m)	(m)	(m)	(s)	(m ³ /s)	(m ³)
1	214.666	-7.057	0.152	2.00	15.00	1.2596	18.8934
2	243.017	-2.390	0.020	3.00	12.00	0.1275	1.5302
3	314.553	-0.556	0.020	2.50	10.00	0.0960	0.9602
4	321.735	-4.853	0.030	1.50	9.00	0.2077	1.8689
5	328.917	-3.588	0.025	2.80	13.00	0.1735	2.2558
6	386.373	-14.470	0.102	2.40	11.00	1.1460	12.6062
7	400.737	-3.361	0.015	3.00	14.00	0.1039	1.4545
8	524.955	-2.396	0.102	2.00	15.00	0.5850	8.7756
9	630.291	-11.988	0.152	2.10	13.00	1.5709	20.4218
10	651.278	-8.200	0.030	3.30	8.00	0.2794	2.2351
11	672.590	-7.700	0.020	2.50	13.00	0.1754	2.2804
12	754.836	-16.081	0.102	2.80	14.00	1.2124	16.9737
13	761.884	-18.148	0.010	3.50	9.00	0.1278	1.1500
14	768.932	-22.658	0.025	2.80	10.00	0.3464	3.4641
15	790.076	-6.685	0.015	1.90	12.00	0.1207	1.4484
16	860.329	-17.789	0.152	1.90	13.00	1.8571	24.1424
17	874.197	-9.025	0.030	2.00	14.00	0.2736	3.8298
18	990.415	-15.372	0.203	2.70	13.00	2.3723	30.8398
19	1069.610	-9.693	0.025	3.20	11.00	0.2465	2.7118
20	1935.726	-3.580	0.023	2.90	14.00	0.1608	2.2510
21	1963.699	-15.928	0.102	2.00	13.00	1.1814	15.3583
22	2019.644	-5.580	0.010	3.20	12.00	0.0814	0.9765
23	2026.637	-8.336	0.025	3.30	10.00	0.2342	2.3420
24	2047.360	-4.348	0.015	2.60	11.00	0.1086	1.1944
25	2061.090	-13.155	0.152	2.00	13.00	1.6293	21.1810
26	2194.886	-3.971	0.102	2.40	11.00	0.7043	7.7472
27	2202.100	-1.102	0.020	3.20	10.00	0.1139	1.1392

TABLA 5. 3 GASTO Y VOLUMEN DE INTRUSIÓN PATÓGENA EN LOS EVENTOS SITIOS ESTABLECIDOS

En la Figura 5.5 se aprecia la variación de presión en la conducción y la duración de los eventos de baja presión en diferentes sitios sujetos a la intrusión patógena.

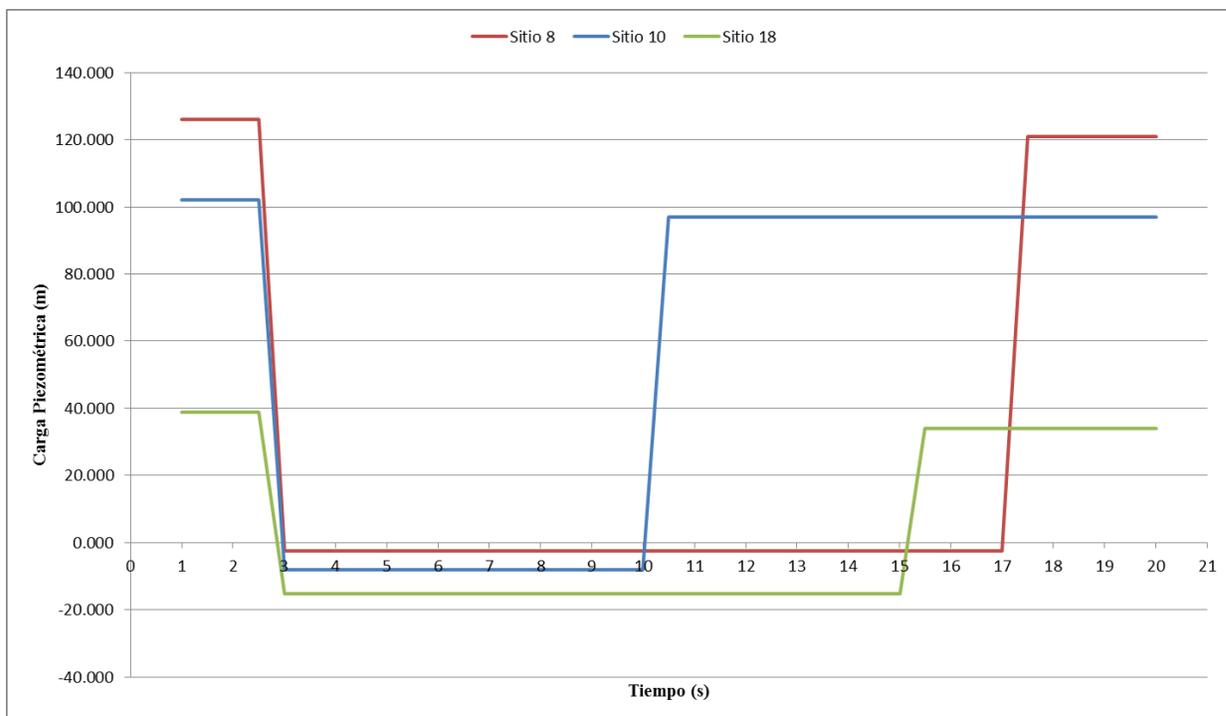


FIGURA 5. 5 DURACIÓN DE LA BAJA PRESIÓN EN ALGUNOS SITIOS DE LA CONDUCCIÓN

5.4 Resultados de la Intrusión Patógena.

La representación del fenómeno de intrusión se lleva a cabo mediante la modelación numérica del caso en estudio. Se analizó el mecanismo que generaba eventos de baja presión, es decir, el transitorio generado por el paro de equipos de bombeo afectado por bolsas de aire atrapado.

Todo lo anterior se ha escenificado en un caso particular, controlando los parámetros hidráulicos, así como las características físicas de la tubería y del fallo (diámetro del orificio y carga hidráulica sobre mismo).

El resultado del caso en estudio fue la determinación de los caudales de intrusión y el volumen total de agua que penetró en la conducción, mediante el uso de múltiples métodos matemáticos y aplicando las más nuevas teorías de comportamiento del fenómeno de intrusión.

Los eventos mostrados resultan en un gasto promedio de intrusión de $0.6109 \text{ m}^3/\text{s}$, con duración promedio de la baja presión de 11.96 s y un volumen total de intrusión en la conducción de 210.032 m^3 , considerando los 27 sitios con fallas en la conducción.

El caudal de intrusión representa el 29% del gasto de diseño de la conducción durante casi 12 segundos para un volumen de 210 m^3 que permanecerán dentro de la tubería hasta su nueva puesta en operación.

En caso de que la conducción no cuente con un sistema de desinfección de efecto residual el volumen de intrusión podría contaminar una mayor cantidad de agua e incrementar su potencial infeccioso para el ser humano.

La metodología aplicada es una de las primeras aproximaciones para estimar el fenómeno y futuras investigaciones podrán hacer uso y verificación del caso aquí presentado.

Todavía resta modelar otros aspectos importantes en el análisis de este fenómeno como: la dispersión de contaminantes en una red de acuerdo al tipo de patógeno presente en el agua, la estimación de la dispersión de contaminantes en el interior de la conducción principal, la consideración de la porosidad del terreno circundante saturado y valorar la efectividad de la desinfección como protección del agua potable en sistemas de operación intermitente donde los rangos sin servicio producen una potente intrusión de contaminantes.

Los eventos de intrusión patógena que conducen a brotes epidémicos son poco frecuentes y probablemente es el tipo de evento de contaminación de agua de consumo menos documentado. Las razones de esto pueden incluir las dificultades asociadas con la identificación de este mecanismo específico como la única causa de la contaminación.

Conclusiones

La calidad del agua potable depende de la integridad de la conducción y red de distribución. Mantener los niveles adecuados de calidad se vuelve una tarea primordial, debido al impacto que conlleva para la salud de los consumidores. El consumo de agua contaminada se ve reflejado en los casos que son reportados por enfermedades epidémicas; no obstante en la mayoría de los casos no se tiene conocimiento del origen de la contaminación del agua, el evento que la genera y sobre todo la entrada del contaminante. Es por ello la importancia de esta línea de investigación, y las aportaciones que se dan para generar más conocimiento en este tipo de eventos.

Determinar el potencial riesgo a la salud de la población debido a los eventos de intrusión patógena por fenómenos transitorios con presencia de aire atrapado en una línea de conducción es un proceso altamente complejo.

Son indispensables los tres factores para que se presente la intrusión patógena. Un entorno contaminado, una vía de entrada y un mecanismo desencadenante. La exposición de la población a los organismos patógenos depende de muchos factores y de los cuales muy pocos se pueden medir o predecir. Podemos aseverar que la magnitud y duración de los mecanismos desencadenantes son ciertamente los factores clave del estudio.

Se presenta un caso de estudio, donde el mecanismo desencadenante es el paro de los equipos de bombeo el cual genera a su vez un fenómeno transitorio. Las presiones negativas, como se muestra en el trabajo, son amplificadas por la presencia de aire atrapado en forma de bolsas. A través del Método de las Características se determina la línea piezométrica y con el Método del Paso Estándar se determina el volumen de las bolsas.

En el caso en estudio el volumen de las bolsas es pequeño pero suficiente para propiciar que la presión sea menor a 0 m.c.a., lo cual no sucedería en un análisis estático. Con motivo académico se plantearon diversos fallos en la conducción, comunes en las conducciones, como fisuras o cajas de válvulas inundadas.

El resultado de aplicar la metodología propuesta en el trabajo fue la determinación de los caudales de intrusión y el volumen total de agua que penetraron en la conducción; considerando el comportamiento del fenómeno de intrusión en los fallos de la conducción, como si se trataran de orificios (acorde a los avances en la investigación del fenómeno).

Se concluyó que el caudal de intrusión patógena en el caso de estudio podría llegar a ser hasta el 29% del total bombeado. Promediando 12 segundos de duración en los eventos de baja presión, para un volumen total de 210 m^3 , que permanecerán dentro de la tubería hasta su nueva puesta en operación.

En caso de que la conducción no cuente con un sistema de desinfección de efecto residual el volumen de intrusión podría contaminar una mayor cantidad de agua e incrementar su potencial infeccioso para el ser humano.

Se considera que el uso de técnicas numéricas de vanguardia, en las que se implican las bases de la mecánica de fluidos y de la hidráulica, aplicadas en el entorno de la hidráulica urbana, permite una mejor comprensión de eventos y fenómenos que acontecen en los sistemas de abastecimiento

de agua durante su operación. Con los resultados obtenidos se ha logrado de manera satisfactoria el objetivo de mostrar una forma de cuantificar la intrusión patógena en eventos complejos.

Bibliografía

Besner Marie-Claude, Pre´vost Miche`le, Regli Stig (2011). Assessing the public health risk of microbial intrusion events in distribution systems: Conceptual model, available data, and challenges. *Water research* 45. Science Direct.

Blackburn, B.G., Craun, G.F., Yoder, J.S., Hill, V., Calderon, R.L., Chen, N., Lee, S.H., Levy, D.A., Beach, M.J. (2004), Surveillance for waterborne-disease outbreaks associated with drinking water-United States,

Boulos F. P., Karney W. B., Wood J. D., Lingireddy S. (2005), Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems, *American Water Works Association*, 97:5 *Journal AWWA*.

Brown, R J (1968), Water column separation at two pumping plants, *Journal of Basic Engineering*, ASME.

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, trabajo sometido para IAHR / IWA International Conference - PEDS-2003 - Valencia, España.

Catálogo de Válvulas y Principios de Operación (2006), VAMEX, México.

CBS News (2013), CDC says new norovirus strain caused 140 outbreaks since September <http://www.cbsnews.com/news/cdc-says-new-norovirus-strain-caused-140-outbreaks-since-september/>

Corcos, G (2003), Air in water pipes: A manual for designers of spring-supplied gravitydriven drinking water rural delivery systems. *Agua para la vida*, 2a ed.

Corcos, G (2005), Aire en tuberías de agua. *Agua para la vida*, 2a ed.

Craun, F. M., Craun, F. G., Calderon, L. R., Beach, J. M. (2006), Waterborne outbreaks reported in the United States, *Journal of Water and Health*, 04. Supl. 2, pp. 9-30.

Edmunds, R C (1979), Air binding in pipes, *Journal AWWA*, *Water Technology Distribution*.

Ferrer P.J., Aguado G.D. (2007), Abastecimiento, Distribución y Saneamiento de Aguas. REF 2001.489. DIHMA-UPV.

Forster, G (1997), Druckstosdampfung durch grose Luftblasen in Hochpunkten von Rohrleitungen, *Mitteilungen des Institutes fur Wasserbau der Universitat Stuttgart*, fasciculo 94.

Fuertes, V S (2001), Transitorios hidráulicos con aire atrapado, tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, España.

Geldreich, E.E., Fox, K.R., Goodrich, J.A., Rice, E.W., Clark, R.M., Swerdlow, D.L. (1992), Searching for a water supply connection in the Cabool, Missouri disease outbreak of *Escherichia coli* O157:H7. *Water Research* 26.

Gray, N. F. (1994), *Calidad del agua potable. Problemas y soluciones*, Ed. Acribia, Título original *Drinking Water Quality. Problems and Solutions*, Ed. John Wiley & Sons Ltd., Baffins Lane, Chichester.

Greyvenstein, B., van Zyl, J.E. (2007), An experimental investigation into the pressure-leakage relationship of some failed water pipes. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* 56.

Gullick, R.W., LeChevallier, M.W., Svindland, R.C., Friedman, M.J. (2004), Occurrence of transient low and negative pressures in distribution systems. *Journal of the American Water Works Association* 96.

Hrudey, S.E., Payment, P., Huck, P.M., Gillham, R.W., Hrudey, E.J. (2003), A fatal waterborne disease epidemic in Walkerton, Ontario: comparison with other waterborne outbreaks in the developed world. *Water Science and Technology* 47.

Horlacher, H-B, y Lüdecke, H-J (1992), *Strömungsberechnung für Rohrsysteme*, Ehningen, Expert-Verlag.

Qiu, D Q (1995), *Transient analysis and the effect of air pockets in a pipeline*, Tesis de Maestría, Universidad de Liverpool, Reino Unido.

Journal Sentinel (2013), Milwaukee marks 20 years since *Cryptosporidium* outbreak <http://www.jsonline.com/news/milwaukee/milwaukee-marks-20-years-since-cryptosporidium-outbreak-099dio5-201783191.html>

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.

Kirmeyer G. J., Friedman M., Martel K., Howie D., LeChevalier, M., Abbaszadegan M., Karim M., Funk J., Harbour J. (2001), *Pathogen Intrusion Into Distribution Systems*, American Water Works Association Research Foundation (AWWARF), USA y United States Environmental Protection Agency. Publicado por la AWWA Research Foundation y la American Water Works Association, Impreso en Estados Unidos.

Kottmann, A (1992), *Druckstosermittlung in der Wasserversorgung*, Essen: Vulkan- Verlag
Horlacher, H-B, y Ludecke, H-J (1992), *Stromungsberechnung fur Rohrsysteme*, Ehningen, Expert-Verlag.

Lahlou, Michael (2009), *Tecnología en Breve. Golpe de Ariete*. National Enviromental Service Center, West Virginia University, EUA.

Lambert, A. (2001), What do we know about pressure-leakage relationships in distribution systems. In: *Proceedings of IWA System approach to leakage control and water distribution systems management*, Brno, Czech Republic.

Larsen, T, y 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.

Legionella.org (2012), website: about the disease. <http://legionella.org/about-the-disease/what-is-legionnaires-disease/>

López P. A. (2001), Metodología para la calibración de modelos matemáticos de dispersión de contaminantes incluyendo regímenes no permanentes. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

López P. A., V. Fuertes, P. L. Iglesias, F. J. Martínez (2005), Modelación mediante CFD de fugas en tuberías de redes de abastecimiento, V SEREA, Seminario Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Abastecimiento de Agua, Valencia, España.

López J. A., Martínez S. J., López P. G., Fuertes M. V. (2006), Análisis de la Problemática de Calidad de los Abastecimientos: Desde la Planta de Tratamiento hasta el Grifo, V Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua, Portugal.

López J. A., Martínez S. J., López P. G., Fuertes M. V. (2006a), Panorámica sobre la Problemática de Calidad de los Suministros de Agua en España. Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua, Brasil.

López P. A., J. J. Mora, L. Salas, F. J. Martínez (2007), Contaminación de los sistemas de distribución de agua como consecuencia de la intrusión patógena, VII SEREA, Seminario Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Abastecimiento de Agua, Morelia, México.

López P. A., J. J. Mora, V. Fuertes, F. J. Martínez (2008), Modelling external intrusion into water distribution systems. International Congress on Environmental Modelling and Software 2008. International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs).

López P. A., J. J. Mora (2010), 3D Computational model of external intrusion in a pipe across defects. International Congress on Environmental Modelling and Software 2010. International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs).

Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (2007), Comisión Nacional del Agua, México.

Martin, C S (1976), Entrapped air in pipelines, Proceedings of the Second International Conference on Pressure Surges, British Hydromechanics Research Association, The City University, Londres.

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, Reino Unido.

Mora J.J., López P. A., V. Fuertes, P. L. Iglesias, F. J. Martínez (2009) La Intrusión Patógena Simulada con un Modelo CFD. Jornadas de Ingeniería del Agua, JIA 2009. ISBN 978-90-78046-09-7. Madrid, España.

Mora J. J. (2011), Modelación de la Intrusión patógena a través de fallos y su implicación en la red de distribución de agua, tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, España.

May J. (1994), Pressure dependent leakage, World Water and Environmental Engineering.

Memoria Documental del Registro Público de Derechos del Agua (2012), Comisión Nacional del Agua, México.

Ochoa L.H., Bourguett V. J. (2001), Reducción integral de pérdidas de agua potable, Editores Edición 2a Ed. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Tecnología de Hidráulica.

Pérez Farras, Luis E. (2005), Estudio De Transitorios: Golpe De Ariete. Facultad de Ingeniería. Departamento de Construcciones Civiles. Argentina.

Pozos Estrada, O., (2007) Investigation on the Effects of Entrained Air in Pipelines, Tesis Doctoral, Instituto de Ingeniería Hidráulica, Universidad de Stuttgart, Alemania.

Pozos O., Gonzalez C.A., Giesecke J., Marx W. And Rodal E.A. (2010a) Air entrapped in gravity pipeline systems. Journal of Hydraulic Research.

Pozos, O, Giesecke, J, Marx, W, Rodal, E.A., Sanchez, A. (2010b) Experimental Investigation of Air Pockets in Pipeline Systems. Journal of Hydraulic Research, IAHR.

Pozos O., Sanchez A., Rodal E. A., Fairuzov Y. V. (2010c) Effects of Water–air Mixtures on Hydraulic Transients. Canadian Journal of Civil Engineering.

Qiu, D Q (1995), Transient analysis and the effect of air pockets in a pipeline, tesis de maestría, Universidad de Liverpool, Reino Unido.

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

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

Thomas, S (2003), Air management in water distribution systems. A new understanding of air transfer, Clear Water Legacy, Canadá.

Thorley, A R D (2004) Fluid transients in pipeline systems, 2nd Ed, D & L, George Ltd, Londres, Reino Unido.

Van Zyl, J.E., Clayton, C.R.I. (2007), The effect of pressure on leakage in water distribution systems. Water Management 160.

Walski, T M, Barnhart, T, Driscoll, J, y Yencha, R (1994), Hydraulics of corrosive gas pockets in force mains, Water Environment Research, 66(6).

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.

World Health Organization WHO (2004), Microbial fact sheets (Chapter 11). In: Guidelines for Drinking Water Quality, third ed. World Health Organization, Geneva.

Anexo A

A continuación se muestran imágenes que ejemplifican el estado en el que operan algunos de los sistemas de conducción y distribución en México, muy acorde a la Figura 4.1 del Capítulo 4 (Adversidades de la calidad del agua en la distribución).

Pozo de extracción de agua potable, Estado de México, 2013



FIGURA A. 1 OBRA DE TOMA DE POZO DE BOMBEO CON VÁLVULA DE ADMISIÓN Y EXPULSIÓN DE AIRE CON FUGAS Y LLENA DE HONGOS

Captación de Agua de Manantial, Estado de México, 2013



FIGURA A. 2 CAPTACIÓN DE AGUA DE MANANTIAL PARA SUMINISTRO DE AGUA POTABLE A LA POBLACIÓN



FIGURA A. 3 CAJA DE VÁLVULAS LLENA DE AGUA A TAL GRADO QUE LEVANTA LA TAPA; LA POBLACIÓN COLOCA PIEDRAS ENCIMA DE LA TAPA PARA EVITAR QUE SE DESPLACE. LLEGADA DE LA LÍNEA DE CONDUCCIÓN AL TANQUE DE ALMACENAMIENTO

Tubería de Agua Potable al Noreste de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 2014



FIGURA A. 4 TUBERÍA DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE HECHA DE ACERO HELICOIDAL DE 1.50 M DE DIÁMETRO



FIGURA A. 5 CAJA DE VÁLVULAS CON UNA VÁLVULA DE ADMISIÓN Y EXPULSIÓN DE AIRE INUNDADA CON UN TIRANTE DESDE EL FONDO DE LA CAJA DE 1.95 M. EL AGUA ES PRODUCTO DE LA EXPULSIÓN DE AGUA DE LA VÁLVULA Y DADO QUE NO TIENE COMO DRENARSE, SE HA INUNDADO

Mercado mayorista y minorista de la Ciudad de México, 2013

Las siguientes imágenes se tomaron en el recorrido de campo dentro de un mercado mayorista y minorista en Noviembre de 2013. Se levantaron las tapas de las cajas de válvulas del sistema de distribución de agua potable que abastece al mercado.

Se observó que la mayoría de las cajas contenían agua producto de la limpieza diaria de pasillos, locales y calles, lo que a su vez propiciaba la acumulación de materia en descomposición, lixiviados de los locales, grasas y aceites. Después de las lluvias de temporal se observaron múltiples cajas azolvadas con tierra y materia orgánica.

En todas las cajas visitadas se apreció la presencia de materia o líquidos degradados, los cuales podrían fácilmente penetrar en las tuberías, dadas las variaciones de presión en el flujo que transita dentro de ellas.



FIGURA A. 6 EL MERCADO MAYORISTA Y MINORISTA CUENTA CON UNA EXTENSIÓN DE 327 HECTÁREAS Y POBLACIÓN FLOTANTE DE 300,000 PERSONAS



FIGURA A. 7 LA CAJA DE VÁLVULAS CAP-A74 SE ENCUENTRA LLENA DE MATERIA ORGÁNICA EN ESTADO DESCOMPOSICIÓN



FIGURA A. 8 LA CAJA DE VÁLVULAS CV-7 SE ENCUENTRA LLENA DE LÍQUIDOS EN ESTADO DESCOMPOSICIÓN



FIGURA A. 9 LA CAJA DE VÁLVULAS A-27 SE ENCUENTRA INUNDADA CON UN TIRANTE DE 0.70 M, SE ENCUENTRA UNA VÁLVULA ANTIRETORNO DE SOLENOIDE Y UNA VÁLVULA DE ADMISIÓN Y EXPULSIÓN DE AIRE. LA CAJA REGULARMENTE SE SATURA Y DESBORDA



FIGURA A. 10 LA CAJA DE VÁLVULAS CV-33 SE ENCUENTRA COMPLETAMENTE INUNDADA CON PROFUNDIDAD APROXIMADA DE 1.5 M



FIGURA A. 11 LA CAJA DE VÁLVULAS A-12 SE ENCUENTRA AZOLVADA EN UNA MATRIZ DE SUELO CONTAMINADO



FIGURA A. 12 LA CAJA DE VÁLVULAS A-35 SE ENCUENTRA INUNDADA CON UN TIRANTE DE 0.60 M



FIGURA A. 13 LA CAJA DE VÁLVULAS A-51 SE ENCUENTRA INUNDADA CON UN TIRANTE DE 0.80 M



FIGURA A. 14 LA CAJA DE VÁLVULAS CV-19A SE ENCUENTRA INUNDADA CON GRASA CON UN TIRANTE DE 0.25 M



FIGURA A. 15 LA CAJA DE VÁLVULAS CV-32 SE ENCUENTRA TOTALMENTE AZOLVADA Y CON DESECHOS HUMANOS



FIGURA A. 16 LA CAJA DE VÁLVULAS CV-21 SE ENCUENTRA TOTALMENTE AZOLVADA Y CON DESECHOS HUMANOS



FIGURA A. 17 LA CAJA DE VÁLVULAS A-53 SE ENCUENTRA INUNDADA CON GRASA CON UN TIRANTE DE 0.65 M



FIGURA A. 18 LA CAJA DE VÁLVULAS A-56 SE ENCUENTRA INUNDADA CON GRASA CON UN TIRANTE DE 0.55 M