



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – OBRAS HIDRÁULICAS

**PROBLEMATICA DE LOS ACUEDUCTOS QUE
TRANSPORTAN AGUA POTABLE**

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

PRESENTA:
GABRIELA JESSICA LUNA VALDEZ

TUTOR PRINCIPAL
ÓSCAR POZOS ESTRADA
Instituto de ingeniería

Ciudad Universitaria, CD. MX., AGOSTO, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



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. Gracia Sánchez Jesús
Secretario: Dr. Fuentes Mariles Óscar Arturo
1 er. Vocal: Dr. Pozos Estrada Óscar
2 do. Vocal: Dra. Arganis Juárez Maritza Liliana
3 er. Vocal: Dr. Mendoza Reséndiz Alejandro

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, Ciudad de México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Pozos Estrada Óscar

FIRMA

“Fe, que todo llega”

Agradecimientos:

A **CONAHCYT** por el apoyo brindado durante la maestría y en la elaboración de este trabajo.

A Dios, por concederme esta oportunidad de poder crecer profesionalmente en México, en esta prestigiosa casa de estudios **Universidad Autónoma de México**, en este hermoso país, donde no solo puedo decir que desarrolle mejores herramientas para ser una mejor profesional, sino me ayudo a ser mejor persona.

A los Doctores Alejandro Mendoza, la Doctora Norma López Acosta que durante el tiempo que estuve cursando la maestría me enseñaron más allá de las materias dictadas, me enseñaron la pasión que se tiene a la Ingeniería.

Un agradecimiento especial al Doctor Óscar Pozos Estrada por el apoyo, la confianza brindada durante la elaboración de la tesis y durante el periodo de clases y la acertada conducción para la conclusión de este proyecto, gracias Doctor por ser un ejemplo de profesional para mí.

“Fe, que todo llega”

Dedicatoria:

Quiero dedicar esta Tesis a mis dos pilares de vida, mis PADRES **Luis y Mercedes**, papitos los amo con todo mi corazón, espero siempre hacerlos sentir orgullosos de mí.

A mis hermanos Carlos, Ana, Leslie y Vania por la compañía, el apoyo constante durante todos estos dos años, por nunca faltarme una palabra de aliento, y a la distancia nunca dejarme sola, los amo demasiado. En especial a mi hermano Carlos que durante estos dos años fue mi fuente de fortaleza para continuar, gracias brujito.

A mis sobrinos Joan, Luis y Manuel mis wawitas los amo, gracias por el apoyo, sueño y anhelo verlos a ustedes siempre triunfar, a mis cuñados Patricia, Marco y Mateo, por apoyo que siempre me dieron, el cariño y la confianza, son parte importante en mi vida, gracias por ser un gran ejemplo para mí.

Quiero dedicar este proyecto también a un pequeño ser que ahora ya esta en el cielo, pero sé que desde allí siempre estará acompañándome de manera incondicional con la inocencia que lo caracterizaba, a mi Hermanito.

También dedicar de manera especial a mis amigos en Bolivia, que de manera constante me estuvieron apoyando a la distancia, alentándome y nunca dejando de creer en mí, gracias mis queridos amigos, colegas.

INDICE

1. Introducción.....	8
1.1 Planteamiento del problema	8
1.2 Justificación y alcances.....	9
2. Acueductos y sus componentes.....	11
2.1 Clasificación de líneas de conducción	11
2.1.1 Conducción por bombeo	11
2.1.2 Conducción por gravedad	12
2.1.3 Conducción por bombeo – gravedad	13
2.2 Componentes de los acueductos	14
2.2.1 Tuberías.....	14
2.2.2 Válvulas	19
2.2.2.1 Válvula eliminadora de aire.....	19
2.2.2.2 Válvulas de admisión y expulsión de aire.....	20
2.2.2.3 Válvulas	21
2.2.2.4 Válvula anti-retorno	22
2.2.2.5 Válvula de seccionamiento.....	24
3. Problemática de los acueductos	26
3.1 Estado del arte	27
3.1.1 Aire atrapado en acueductos	27
3.1.2 Intrusión patógena en acueductos.....	28
4. Problemática 1: Aire atrapado en acueductos	30
4.1 Causas del aire atrapado	30
4.1.1 Bolsas de aire	31
4.2 Inconvenientes causados por el aire atrapado	33
4.2.1 Incremento de la pérdida de carga	33
4.2.2 Retorno de las bolsas de aire provocada por la fuerza de flotación.....	35
4.2.3 Golpe de ariete provocado por remoción de una bolsa de aire	35
4.2.4 Reducción de la eficiencia en sistemas de bombeo.....	36
4.2.5 Cambios en las propiedades del fluido	37
4.3 Expulsión del aire atrapado de los acueductos.....	37
4.3.1 Medios hidráulicos	37

4.3.2	Medios mecánicos.....	40
4.4	Modelo numérico para investigar el efecto de bolsas de aire en transitorios hidráulicos	45
4.4.1	Localización de las bolsas de aire.....	46
4.4.2	Cálculo del volumen de las bolsas de aire.....	48
4.4.3	Propuesta del modelo numérico.....	51
4.4.4	Metodología para evaluar transitorios hidráulicos con aire atrapado	55
4.4.4.1	Caso de estudio	55
4.4.4.2	Análisis de transitorios con aire atrapado.....	57
4.5	Recomendaciones	58
5.	Problemática 2: Intrusión patógena en acueductos	60
5.1	Causas de la intrusión patógena	60
5.1.1	Condiciones para que pueda existir una intrusión patógena	63
5.1.2	Fallas en tuberías.....	67
5.1.3	Fuentes contaminantes.....	68
5.1.4	Situación de depresión.....	69
5.2	Inconvenientes de intrusión patógena	70
5.3	Posibles soluciones a intrusión patógena	73
5.3.1	Volumen de agua por intrusión patógena	73
5.4	Caso de estudio para Intrusión patógena	76
5.4.1	Análisis de transitorios con aire atrapado.....	77
5.4.2	Análisis de intrusión Patógena	79
5.4.3	Resultados de la intrusión patógena.....	83
5.5	Recomendaciones	85
6.	Conclusiones	86
	Bibliografía.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Configuración típica de suministro de agua	8
Figura 2.1 Esquema de línea de conducción por bombeo (Fuente:www. iagua.es).....	11
Figura 2.2 Esquema de línea de conducción por gravedad (Fuente: Pozos et al.,2012)	12
Figura 2.3 Esquema de línea de Conducción por Bombeo – Gravedad (Fuente: Pozos et al.,2012).13	
Figura 2.4. Tuberías de Concreto apiladas (Fuente: página Bens tuberías).....	15
Figura 2.5. Tuberías de acero (Fuente: página Tubevalco)	16
Figura 2.6. Tuberías de PVC (Fuente: página Home center)	17
Figura 2.7. Tuberías de Fibrocemento (Fuente: página Feycofe, S.L.)	18
Figura 2.8. Tuberías de Polietileno de alta Densidad (PEAD)(Fuente: página LMD).....	18
Figura 2.9. Esquema de válvula eliminadora de aire	20
Figura 2.10. Esquema de una válvula de admisión y expulsión de aire	21
Figura 2.11. Esquema de válvulas combinadas (fuente: válvulas Claval)	22
Figura 2.12. Esquema de válvulas oscilantes	23
Figura 2.13. Esquema de válvulas de muelle	24
Figura 2.14. Válvula de mariposa	25
Figura 2.15. Válvulas de compuerta.....	25
Figura 4.1. Bolsa de aire acumulada en una sección de control (Fuente: Pozos et al.,2012)	32
Figura 4.2. Fuerzas que actúan sobre una bolsa de aire estacionaria (Fuente: Pozos et al.,2012) ..	32
Figura 4.3. Bolsas de aire en acueductos de bombeo (Fuente: Pozos et al.,2012).....	34
Figura 4.4. Bolsas de aire en un acueducto de gravedad (Fuente: Pozos et al.,2012).....	35
Figura 4.5. Golpe de ariete causado por remoción de una bolsa de aire (Fuente: Pozos et al.,2012)	
.....	36
Figura 4.6. Movimiento de burbujas y bolsas de aire en conductos cerrados fluyendo llenos	
(fuente: Falvey (1980))	38
Figura 4.7. Venteo colocado en un acueducto para expulsar aire atrapado (fuente: Pozos et	
al.,2012).....	40
Figura 4.8. Locación de venteo en cambio de pendientes (fuente: Falvey (1980))	41
Figura 4.9. Esquema de posible posicionamiento de Válvulas en un Acueducto	42
Figura 4.10. Variables utilizadas en el método del paso directo (MPD).	49
Figura 4.11. Notación para la bolsa de aire.....	52
Figura 4.12. Perfil del acueducto a bombeo	56
Figura 4.13. Envolventes de las líneas piezométricas máximas y mínimas $Q=2.1 \text{ m}^3/\text{s}$	58
Figura 5.1. Adversidades de la calidad del agua en la distribución(fuente (Rodríguez, 2011))	61
Figura 5.2. Factores requeridos para el fenómeno de la intrusión patógena(fuente: (Martínez Pujol,	
2014))	64
Figura 5.3. Mecanismos que generan fallos en tuberías (fuente: (Romero Chapa, 2013))	65
Figura 5.4. Proceso de intrusión patógena en líneas de conducción(fuente: (Martínez Pujol, 2014))	
.....	66
Figura 5.5. Tipos de fallas en tuberías debido a efectos sísmicos (fuente: (Ballantyne, 2005))	67
Figura 5.6. Diversos tipos de fallas en tuberías (fuente: página AIMPLAS)	68
Figura 5.7. Cargas tipo, aplicadas en tuberías (fuente: Penspen Defect Assesment).....	68

Figura 5.8. Disposición común de tuberías en una zona urbana (fuente: (Martínez Pujol, 2014)) ..	69
Figura 5.9. intrusión patógena a través de una fuga por presiones negativas	70
Figura 5.10. Perfil del acueducto a bombeo del caso de estudio	76
Figura 5.11. Envoltantes de las líneas piezométricas máximas y mínimas $Q=2.1 \text{ m}^3/\text{s}$	78
Figura 5.12. Falla en forma de orificio en una conducción	80
Figura 5.13. Falla de una válvula de admisión-expulsión de aire en una conducción	80
Figura 5.14. Duración de la baja presión en algunos sitios de la conducción	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Posibles localizaciones de válvulas de aire.	45
Tabla 4.2. Ubicación y volumen de las bolsas de aire en la conducción, Gasto $Q=2.1 \text{ m}^3/\text{s}$	56
Tabla 5.1. Problemas relacionados con la calidad de agua que aparece en acueductos	62
Tabla 5.2. Microorganismos potenciales para riesgo de la población debido a intrusión patógena (Organización Mundial de Salud, WHO, 2004).....	72
Tabla 5.3. Ubicación y volumen de las bolsas de aire en la conducción, Gasto $Q= 2.1 \text{ m}^3/\text{s}$	77
Tabla 5.4. Ubicación y características de los puntos sujetos al fenómeno de intrusión patógena ..	81
Tabla 5.5. Ubicación y características de los puntos sujetos al fenómeno de intrusión patógena ..	82

1. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

Hasta el día de hoy se sabe que los acueductos alrededor del mundo presentan problemas en las líneas de conducción y en sus distintos componentes, esto provoca que disminuya la confiabilidad en estos sistemas para el abastecimiento de agua potable.

En la actualidad el agua es imprescindible para las comunidades tanto como para el consumo personal, como para trabajo, el agua es conducida de lugares lejanos mediante tuberías de presión o conducciones a gravedad; estas tuberías y los elementos que acompañan a la misma como equipos de bombeo, válvulas, torres de oscilación, tanques, etc. A este conjunto se le llama acueductos. El buen funcionamiento de este sistema depende mucho de un buen diseño de la línea de conducción, por lo que es uno de los elementos más importantes en el funcionamiento de los acueductos.

La pérdida de capacidad de conducción ha sido medida y documentada a lo largo del tiempo de operación de varios acueductos y se ha corroborado con la inspección directa al interior de la tubería donde se ha observado la presencia de depósitos incrustados (Sánchez et al., 2000). La Figura 1.1 esquematiza la configuración típica de suministro de agua.

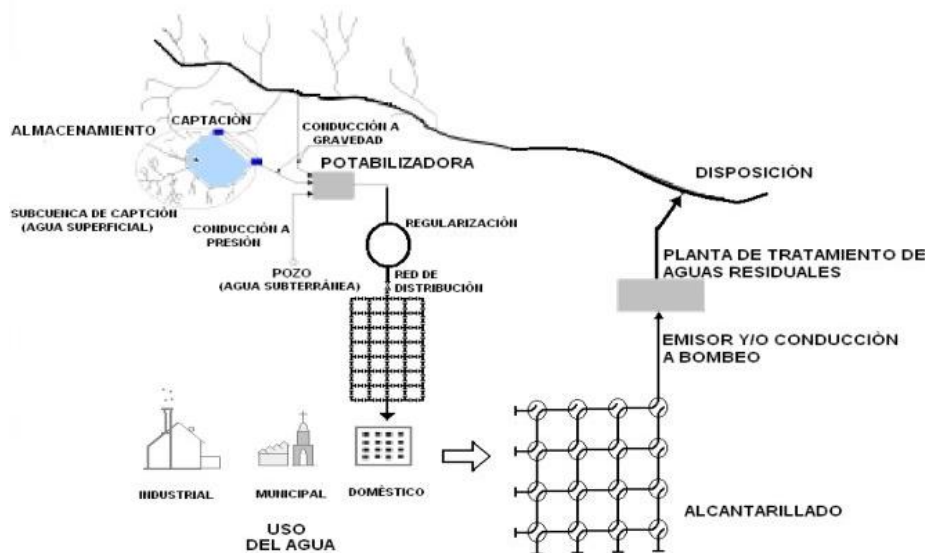


Figura 1.1. Configuración típica de suministro de agua

Desde mediados de la década de 1990, la intrusión patógena ha sido un fenómeno que se ha estado estudiando con mayor detenimiento, principalmente en países como Estados Unidos y Canadá, en donde se ha corroborado que una de las fuentes potenciales de enfermedades epidémicas están relacionadas con el agua. Durante los últimos años, la contaminación de enfermedades epidémicas relacionadas con el consumo de agua ha presentado un incremento de casos donde la fuente de contaminación está en la red de distribución y en los acueductos; en cambio ha disminuido los casos donde la fuente de contaminación estaba en el tratamiento del agua (Rodríguez et al., 2013)

El agua es fundamental para el desarrollo de las comunidades, sociedades, y es indispensable para que se puedan llevar a cabo los procesos biológicos, ecológicos, sociales y productivos. El acceso al agua tiene mucha incidencia en el bienestar y en las condiciones de seguridad y soberanía alimentaria.

La vigilancia de la calidad del agua para el abastecimiento a la población, comienza en el origen de la misma, es decir, en embalses, ríos y pozos, continúa durante su tratamiento en las estaciones de tratamiento de agua potable y a través de su paso por la red de distribución hasta que llega al consumidor.

La calidad del agua se determina comparando las características físicas y químicas de una muestra de agua con unas directrices de calidad del agua o estándares. En el caso del agua potable, estas normas se establecen para asegurar un suministro de agua saludable para el consumo humano y, de este modo, proteger la salud de las personas. Estas normas se basan en unos niveles de toxicidad aceptables tanto para las personas como para los organismos acuáticos.

1.2 Justificación y alcances

La problemática en los acueductos depende de muchos factores que se irán analizando a lo largo de esta tesis, pero como se puede evidenciar puede producirse en varias partes de la distribución de agua, puede producirse en la captación, en el transporte de agua o incluso en la distribución urbana.

Mantener los niveles adecuados de calidad del agua 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 (Rodríguez, 2011).

2. Acueductos y sus componentes

2.1 Clasificación de líneas de conducción

Para poder llevar el agua extraída hacia el lugar de uso es necesario transportarlo mediante una línea de conducción. Las líneas de conducción tienen que ser casi paralelas al camino y sobre todo tiene que tener fácil acceso para una buena inspección y mantenimiento.

El abastecimiento del agua a los usuarios puede realizarse de las siguientes formas:

1. Bombeo
2. Gravedad
3. Combinado bombeo-gravedad

2.1.1 Conducción por bombeo

La conducción por bombeo es necesaria cuando se requiere adicionar energía para transportar 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 (CONAGUA-LIBRO 10, 2019). En la Figura 2.1 se muestra un ejemplo de una conducción por bombeo.

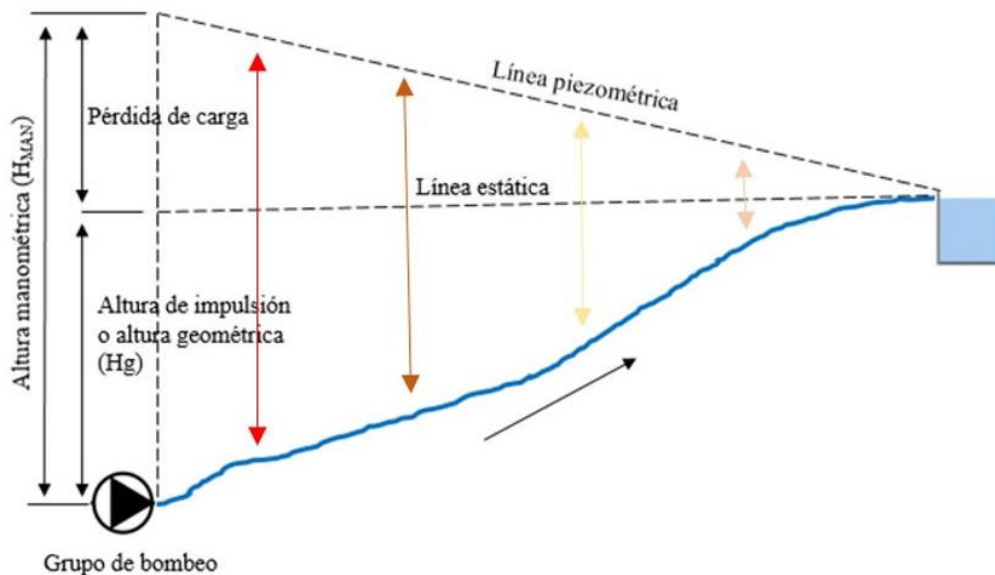


Figura 2.1 Esquema de línea de conducción por bombeo (Fuente: [www. iagua.es](http://www.iagua.es))

Existen líneas de conducción que tienen una gran diferencia de alturas entre el punto de captación con el punto de entrega, esto nos indica que requiere de más de una estación de bombeo para que pueda funcionar adecuadamente, estos puntos de bombeo pueden estar distribuidos en distintos puntos de la línea de conducción. Es entonces que se debe tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Contar con una fuente de poder alternativa en el bombeo.
- Automatizar el mismo en su operación.
- Dar el mantenimiento de manera estricta a los equipos de bombeo.
- Verificación continua de que la fuente de abastecimiento sea capaz de proporcionar el gasto máximo horario y no de pie a un déficit en el suministro.

2.1.2 Conducción por gravedad

Una 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 (CONAGUA-LIBRO 10, 2019). Un esquema de una conducción a gravedad se presenta en la Figura 2.2.

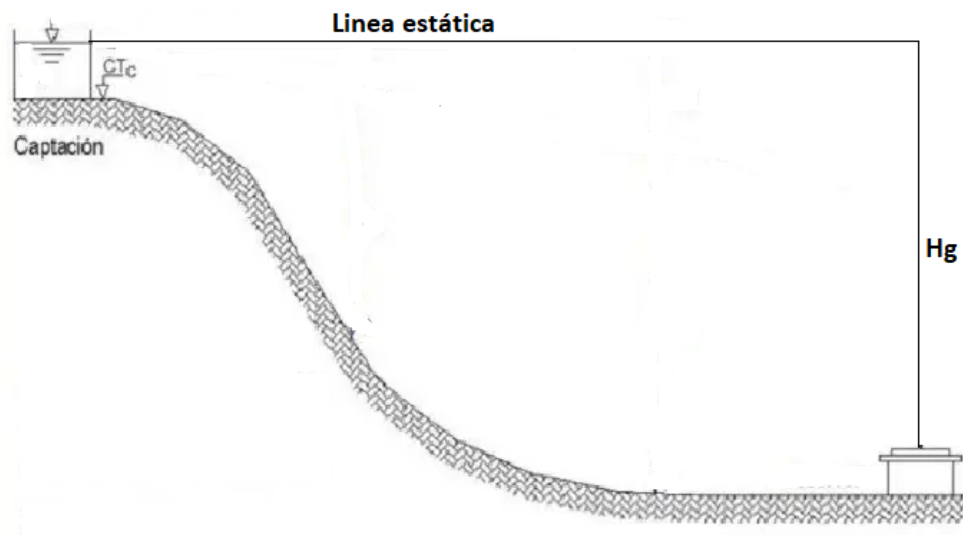


Figura 2.2 Esquema de línea de conducción por gravedad (Fuente: Pozos et al., 2012)

Un sistema de conducción por gravedad se sabe también que sin un bombeo mecanizado y en condiciones seguras e higiénicas; en caso de que la fuente no cumpla con los requerimientos físicos, químicos y bacteriológicos se requiere incluir una planta potabilizadora.

Los sistemas de conducción de agua por gravedad son los más utilizados en el Mundo, parece un proceso simple, pero puede complicarse en la fase de diseño como la distancia que debe recorrer el agua, la pendiente que es la que determina la rapidez en la que fluye el agua, el tamaño de las tuberías, el tipo de terreno, etc.

2.1.3 Conducción por bombeo – gravedad

Si la topografía del terreno obliga al trazo de la conducción a cruzar por partes con mayor elevación que la superficie del agua en el tanque de regularización, conviene analizar la colocación de un tanque intermedio. 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 (CONAGUA-LIBRO 10). Un ejemplo de una conducción bombeo – gravedad se puede ver en la Figura 2.3.

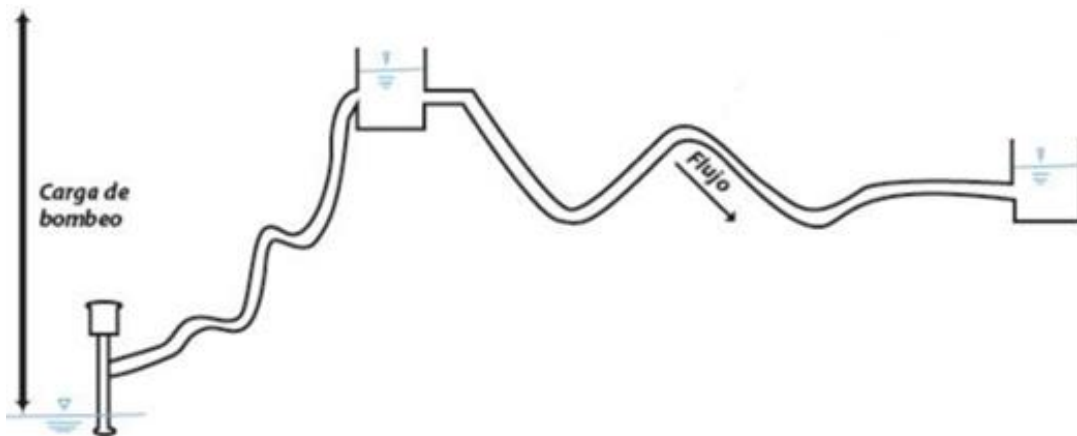


Figura 2.3 Esquema de línea de Conducción por Bombeo – Gravedad (Fuente: Pozos et al.,2012).

2.2 Componentes de los acueductos

Un acueducto necesita una gran cantidad y sobre todo de variedad de elementos y componentes para que pueda funcionar de manera adecuada.

2.2.1 Tuberías

Las tuberías cumplen la función de transportar agua o también otros fluidos. Debe resaltarse que el término tubería que en general designa las conducciones de sección circular.

Las tuberías son tubos fabricados de acuerdo a los tamaños normalizados, existe en el mercado diferentes tipos de tubos según su función y según su material de fabricación (Rosales et al., 2002).

Tenemos varios tipos de tuberías, los más importantes para los acueductos de agua potable son los siguientes:

- **Tubería de concreto**

Las tuberías de concreto presentan diferentes características que las hacen idóneas para la conducción de fluidos sean estos desechos industriales, aguas pluviales, aguas negras o aguas potables en diversas situaciones de suelo, rellenos o cargas externas (TRABER, 2011).

Las características más representativas son:

- No presenta problemas de flotación.
- El 85% de la resistencia es aportada por la tubería.
- Resistencia al fuego.
- Soporta agua agresiva con recubrimientos especiales y/o aditivos
- Por ser la tubería rígida las deformaciones son mínimas.

En la Figura 2.4 se muestra una fotografía de tuberías de concreto.



Figura 2.4. Tuberías de Concreto apiladas (Fuente: página Bens tuberías)

Es uno de los productos más redituables en la industria de la construcción por su bajo costo (tanto del producto como de la instalación) y su larga vida útil. Es una de las mejores inversiones en cuanto a infraestructura urbana y rural.

- **Tuberías de acero**

El acero es un material que puede usarse de muchas maneras, está compuesta por acero y cromo. El cromo contribuye en gran medida a evitar la corrosión de este material las bondades de este tipo de acero recaen principalmente en que además de resistirse a la oxidación, no afecta a los distintos metales en contacto (PIECSA, s.f.).

Un ejemplo de tuberías de acero se muestra en la Figura 2.5.



Figura 2.5. Tuberías de acero (Fuente: página Tubevalco)

Algunos tipos de tuberías de acero son las siguientes:

- *Acero Galvanizado*: Es necesario aplicarla en el interior y en el exterior se puede utilizar para el transporte de agua potable, gases o aceites.
 - *Acero Aleado*: Se utiliza principalmente en las centrales térmicas nucleares convencionales, las herramientas para minerías y pozos petrolíferos y las conducciones a baja temperatura.
 - *Acero al Carbono*: son las menos comunes y se usan para plataformas petrolíferas, en las conducciones a altas presiones, en las conducciones a bajas temperaturas y tuberías para calderas.
- **Tuberías de Cloruro de Polivinilo (PVC)**

El PVC o el Policloruro de Vinilo (del inglés Polyvinyl chloride) es un polímero termoplástico de origen petroquímico. Fue utilizado por primera vez en Alemania. Desde sus inicios en la aplicación de tuberías ha dado magníficos resultados en instalaciones hidráulicas de diferentes tipos de casas habitaciones hasta extensas redes de distribución de agua potable y alcantarillado en grandes ciudades. (Clases de tubería, 2011)

La tubería de PVC es un sustituto de las tuberías metálicas por su resistencia al ataque de productos químicos y corrosivos, por su bajo costo, por la facilidad de

instalación y por su durabilidad (Haro, s.f.). En la Figura 2.6 se muestran tubos PVC de diferentes diámetros.



Figura 2.6. Tuberías de PVC (Fuente: página Home center)

- **Tuberías de Fibrocemento**

Las tuberías de fibrocemento suelen utilizarse para canalización de agua de tejados, para conductos de aguas residuales y lo más importante para conducir agua a presión. Se fabrica con cemento de alta calidad, fibras de asbesto y sílice.

De las propiedades más importantes es que resiste cargas externas y las presiones internas a las que están expuestas y también resiste los agentes destructivos químicos y físicos que puedan encontrarse en operación.

Es de bajo costo y ligereza, pero existe problemas con su reparación ya que es un material quebradizo, siendo aconsejable eliminar el tubo, por lo que la reparación es más aparatosa y costosa. Una serie de tubos de fibrocemento se muestra en la Figura 2.7.



Figura 2.7. Tuberías de Fibrocemento (Fuente: página Feycofe, S.L.)

- **Tuberías de Polietileno de Alta Densidad (PEAD)**

Se fabrica por medio de extrusión de polietileno, el cual es un termoplástico no polar, semi - cristalino con distintos grados de reticulación, que se obtiene por medio de la polimerización del gas etileno, producto del craqueo de la nafta del petróleo y plastificante. Está diseñada para una vida útil de 50 años considerando que trabajaran enterradas a 20°C, sin embargo, se puede concluir que su vida útil es mucho mayor.

Al ser sometida a flujos abrasivos, posee una mayor resistencia al desgaste en comparación con tuberías de acero y concreto, es por esto que en los últimos años su uso incremento (GEOSAI, 2021). La Figura 2.8 presenta una serie de tubos PEAD.



Figura 2.8. Tuberías de Polietileno de alta Densidad (PEAD)(Fuente: página LMD)

2.2.2 Válvulas

Aparato mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación (paso) de líquidos o gases mediante una pieza movable que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más orificios o conductos.

Las válvulas son instrumentos de control esenciales en los acueductos. Debido a su diseño y materiales, las válvulas pueden abrir y cerrar, conectar y desconectar, regular, modular o aislar una enorme serie de líquidos. Para la selección de válvula se requieren los siguientes datos: Tipos de fluidos, material, presión, tipo de unión, temperatura, diámetro, entre otros.

2.2.2.1 Válvula eliminadora de aire

La válvula eliminadora de aire o válvula de expulsión de aire es un dispositivo para eliminar gases de un conducto cerrado que transporta líquidos, está diseñada para que un sistema de bombeo trabaje a la máxima capacidad de flujo. Cuenta con un pequeño orificio de venteo que automáticamente purga el aire acumulado en los puntos altos cuando el sistema está en operación o bajo presión.

El aire contenido en un acueducto actúa como una válvula de seccionamiento parcialmente cerrada, lo que provoca problemas como un mayor consumo de energía, un gasto menor al calculado; en ocasiones, la obstrucción del sistema y el golpe de ariete. Todos estos fenómenos se pueden evitar al colocar una válvula eliminadora de aire (VAYREMEX). Un esquema de una válvula expulsora de aire se muestra en la Figura 2.9.

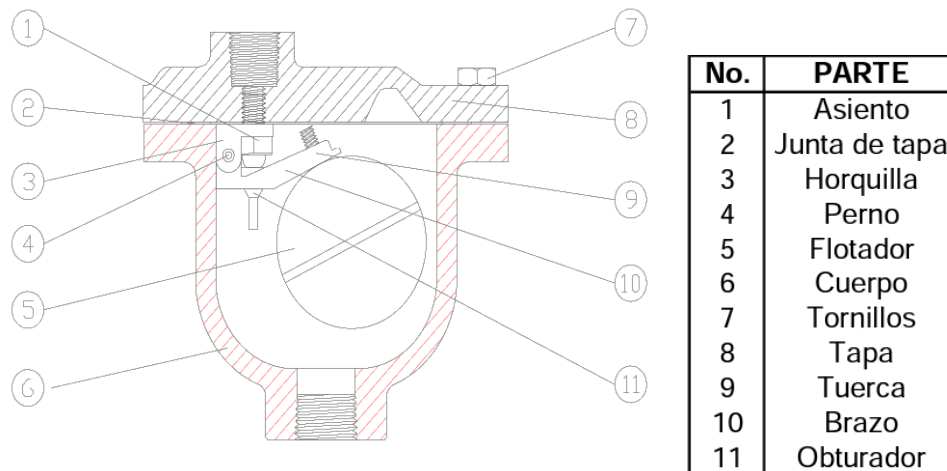


Figura 2.9. Esquema de válvula eliminadora de aire

Se puede dar mantenimiento a la válvula sin desmontarla de la instalación, pero si tiene que estar cerrada antes de comenzar cualquier mantenimiento. Tiene que crearse una rutina para abrirla y realizar una revisión y limpieza de la válvula. Muchas de las partes pueden ser sustituidas por mecanismos completos de válvula y ensamble de flotador, así como la junta de la tapa.

2.2.2.2 Válvulas de admisión y expulsión de aire

Uno de los aspectos menos comprendidos dentro de las instalaciones de agua, ya sea potable, de riego o residual, es la presencia de aire dentro de la tubería y los efectos que este provoca dentro de la línea. Muchos problemas de operación, daño a los equipos o malas lecturas de los instrumentos son atribuidos a una mala instalación o mal diseño de la línea, cuando en realidad el principal problema es un mal manejo del aire contenido en la línea. Esta válvula permitirá introducir o desfogar aire de acuerdo a las necesidades del sistema de manera manual o automática, previniendo la formación de bolsas de aire, presión de vacío y el golpe de ariete lo cual protege los equipos de bombeo, instrumento de medición y la tubería misma (VAYREMEX). Un esquema de una válvula de admisión y expulsión se presenta en la Figura 2.10.

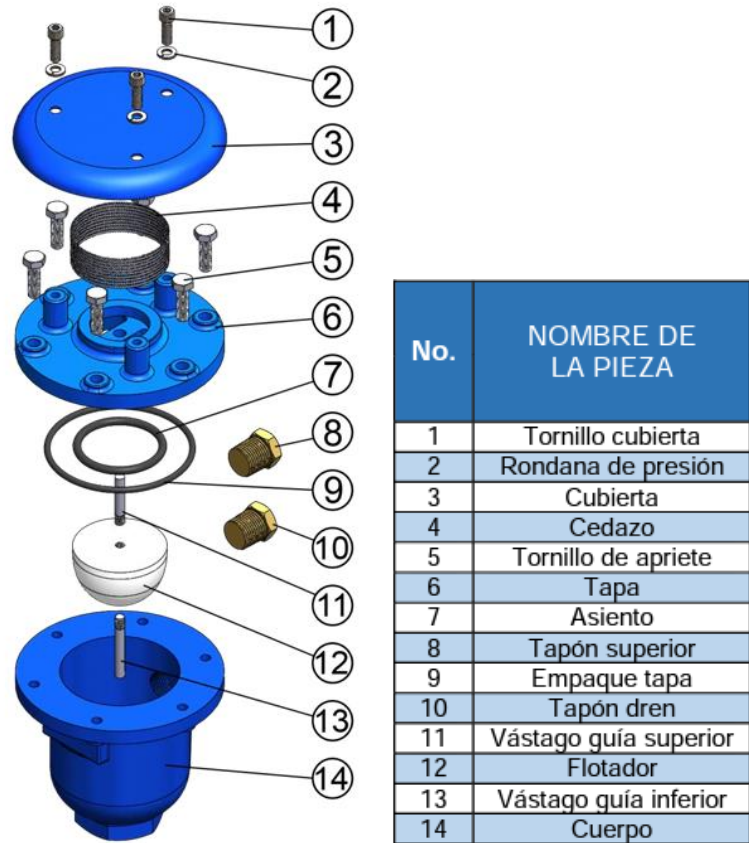


Figura 2.10. Esquema de una válvula de admisión y expulsión de aire

Se puede dar mantenimiento a la válvula sin desmontar la instalación, pero la válvula de corte o seccionamiento deberá ser cerrada antes de cualquier trabajo de mantenimiento. Esta válvula tiene que ser abierta rutinariamente para revisión de fugas y limpieza del mecanismo.

2.2.2.3 Válvulas

La válvula de aire combinada debe combinar las características de operación de válvulas: expulsión de pequeñas cantidades de aire durante la operación y admisión, y expulsión de grandes cantidades de aire en un solo cuerpo. La porción de válvula que maneja el aire y vacío, debe expulsar automáticamente grandes cantidades de aire durante el llenado de tuberías y permitir la entrada de grandes cantidades de aire cuando presiones negativas se presenten provocadas por la separación de columnas, vaciado o dren de la tubería u otra emergencia (Claval, s.f.).

En muchas ocasiones se recomienda usar una mezcla de ambos, por su naturaleza las válvulas no se abren bajo presión para expulsar las pequeñas cantidades de aire que se acumulan en los puntos de la línea de conducción, mientras el sistema está en operación. En la Figura 2.11 podemos observar un esquema de una válvula de aire combinada.

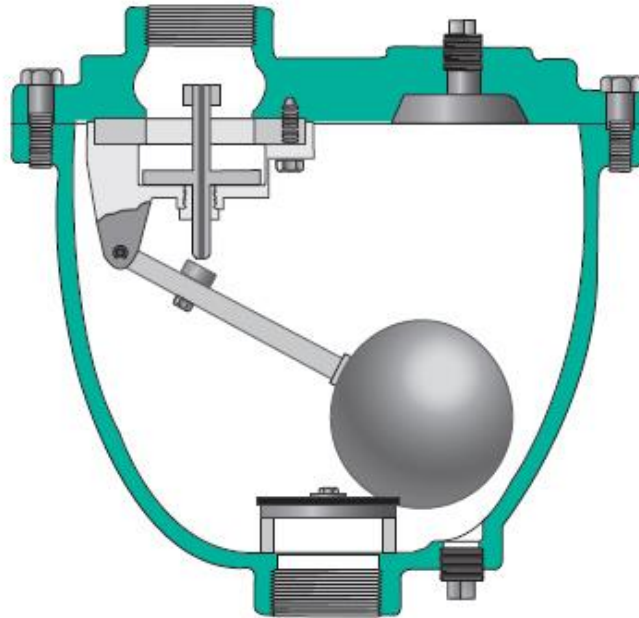


Figura 2.11. Esquema de válvulas combinadas (fuente: válvulas Claval)

2.2.2.4 Válvula anti-retorno

Es una de las piezas principales de los circuitos por los que circula el agua. También conocidas como válvulas de retención o unidireccionales su principal misión es cerrar el paso de un fluido que está circulando en una dirección determinada por un circuito. Es decir, controlar que no pase por un punto por el que no se desea que circule dicho fluido y que mantenga la circulación del agua por la parte del circuito que interese. El funcionamiento de la válvula de retención puede ser totalmente automática mediante la acción de un muelle interior o por gravedad, cierre el paso tan pronto como la presión del flujo desaparece.

Estas válvulas se instalan cuando se necesita mantener la presión en una tubería que está en funcionamiento, al mismo tiempo que se quiere evitar que el agua que circula por ella vuelva al punto por donde se suministra. Así se consigue que vaya desde el punto por el que entra al circuito hasta el paso de salida del mismo, por el que se descargará. En este sentido siempre se tendrá el paso despejado. En el sentido contrario, estará bloqueado por la válvula anti-retorno. Tipos de válvulas anti-retorno son:

- **Válvulas oscilantes:** esta realiza la función de obturador, su misión cerrar el paso cuando el líquido de un circuito funciona en una dirección que no se desea o necesita. Se muestra un esquema de válvulas oscilantes en la Figura 2.12.

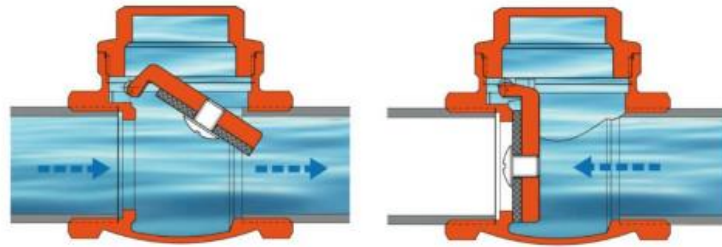


Figura 2.12. Esquema de válvulas oscilantes

- **Válvula de muelle:** este tipo de válvula no precisa estar en una posición en concreto. Esto se debe a que, a diferencia de las válvulas oscilantes no funcionan por la acción de la gravedad. Puede tener dos modos de funcionamiento; el primero, un muelle fabricado con un cierto nivel de rigidez se encarga de sostener un obturador que está colocado encima del anillo de cierre. Entonces, cuando llega el líquido a la zona, generalmente el agua, su presión se encarga de vencer la resistencia del muelle. Entonces el fluido puede pasar en esa dirección. Pero si el fluido intenta retroceder y circular en sentido contrario, no puede debido a la acción del muelle. Guardan su posición gracias un muelle ver Figura 2.13.

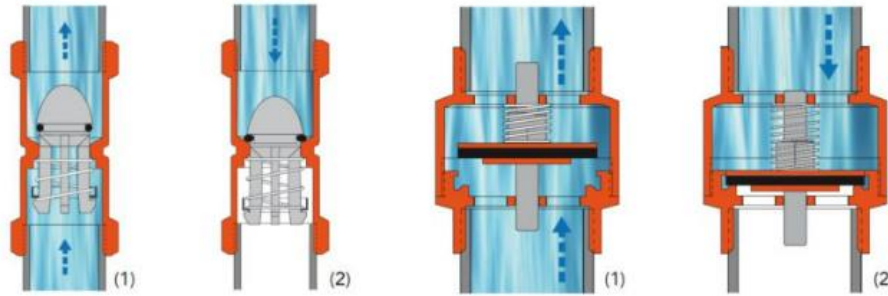


Figura 2.13. Esquema de válvulas de muelle

2.2.2.5 Válvula de seccionamiento

Son elementos indispensables para la gestión y control de la red de tuberías, permitiendo aislar tramos, atender labores de mantenimiento, avería y gestionar sectorizaciones, entre muchas labores. Dichas válvulas solo tienen un funcionamiento de estar completamente abierto o completamente cerrada.

Tiene variados usos en la red, dependiendo de la función a la que se sometan, estas válvulas puedan pasar largos periodos de tiempo en uno de los estados, abierta o cerrada, o someterse a multitud de ciclos de funcionamiento. Por ello, el diseño y procedimiento de fabricación de todas las válvulas de seccionamiento deben garantizar que sean, por encima de todo, fiables, robustas y duraderas. (PAm, s.f.)

Por ser las más utilizadas en las redes de distribución de agua:

- **Válvulas de mariposa**

Son consideradas como de aislamiento o seccionamiento cuyo disco o mariposa gira un $\frac{1}{4}$ de vuelta (90°) en el interior del cuerpo. Las posiciones intermedias deben ser estudiadas para evitar el fenómeno de cavitación.



Figura 2.14. Válvula de mariposa

- **Válvulas de compuerta**

Son las idóneas en aquellas canalizaciones que transportan agua potable, bruta o residual, cuya temperatura no exceda de 60°C. Las válvulas de compuerta funcionan de dos maneras

- Apertura total: ascenso completo de la compuerta en el interior del cuerpo que hace que la válvula sea de paso total
- Cierre total: La compuerta se ajusta perfectamente en el cierre, logrando estanqueidad total sin nada de fugas.



Figura 2.15. Válvulas de compuerta

3. Problemática de los acueductos

De acuerdo con la UNESCO el uso de agua a nivel global se multiplicó por seis durante el siglo pasado y se mantiene en aumento, y se llega a considerar que se puede enfrentar un déficit de este recurso del 40% para el 2040.

“Las ciudades no solo son grandes consumidoras de agua, sino que también ejercen la mayor presión sobre los sistemas e infraestructura. Utilizarla de, manera eficiente y económica nunca ha sido más importante que en la actualidad, sin embargo, seguimos tratando el agua como un bien inagotable” manifestó Carlos González, presidente de Pavco Wavin (Corresponsables, 2023).

La creciente demanda de agua en muchas ciudades del mundo ha obligado a la construcción y operación de grandes y extensos sistemas de transporte que permiten aprovechar fuentes de agua muy alejadas, muchas veces localizadas en cuencas externas. Más de 15 años de operación y monitoreo de acueductos han mostrado que las tuberías, al igual que la bomba, las válvulas y otros componentes de los sistemas de abastecimiento de agua potable, están sujetos a cambios en su condición de operación. (Carmona et al.,2002)

Si se revisan proyectos tanto en México como en otros países, se puede observar que la gran parte del agua que consumen la población es conducida desde sitios lejanos a través de tuberías. Que funcione de manera óptima depende mucho de la línea de conducción ya que es uno de los elementos más importantes de un diseño de un acueducto, pueden estar formadas con distintos componentes, los principales ya se mencionaron.

Los problemas en acueductos reducen la confiabilidad como sistemas de abastecimiento de agua potable, se tiene que tener en cuenta que la mayor parte de los problemas no son problemas de operación. Analizando varios sistemas se pudo evidenciar estos dos problemas recurrentes en varios acueductos que transportan agua:

1. Aire atrapado en la conducción.
2. Intrusión patógena.

3.1 Estado del arte

Se ha realizado una extensa revisión bibliográfica para obtener toda la información necesaria, para obtener un trabajo completo, sobre todo, que ayude a la detección y explicación de los dos problemas mencionados.

3.1.1 Aire atrapado en acueductos

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).

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).

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

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.

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.

3.1.2 Intrusión patógena en acueductos

El riesgo de intrusión patógena puede tener muchas causas. Kimeyer et al. (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 líneas.

López et al. (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.

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. Realizó un análisis de los fallos de las conducciones para 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 identificó los transitorios de presión y los servicios intermitentes de agua con los cuales se planeó la modelación.

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

4. Problemática 1: Aire atrapado en acueductos

La presencia de aire atrapado en los acueductos puede reducir de manera grave el transporte del agua, en los sistemas por gravedad las denominadas bolsas de aire estacionarias reducen las secciones transversales de las tuberías.

La mayor parte de las veces el problema de los acueductos que contienen aire atrapado en forma de bolsas de aire se acumula en los puntos más altos de acuerdo a la topografía del lugar, esto pasa porque el aire es más ligero que el agua y es por esta razón por la que llega a moverse hacia la parte más alta del sistema.

Si bien el aire atrapado puede ser benéfico para prevenir la cavitación o para reducir los efectos perjudiciales causados por transitorios hidráulicos, en cantidades no controladas también puede ser perjudicial. Por ejemplo, existen volúmenes de aire, que pueden producir un incremento indeseable de las presiones durante el arranque o el paro de las bombas en un acueducto. El efecto del aire en ambas situaciones dependerá de las causas que generan el transitorio, de la cantidad de aire acumulada, de su localización, así como de la configuración del acueducto (Pozos et al.,2012).

Para tener un buen entendimiento de este problema a continuación se presentan las causas y las consecuencias del aire atrapado en los acueductos.

4.1 Causas del aire atrapado

De acuerdo con varios investigadores el aire atrapado en los conductos cerrados no es expulsado del todo, a continuación, se enumeran algunas causas destacadas en el Manual de análisis de la problemática del aire atrapado en acueductos para mejorar su eficiencia (Pozos et al.,2012).

1. Antes de que se ponga en marcha el sistema la línea de conducción se encuentra llena de aire, ya cuando se pone en marcha dicho sistema se llena de agua por completo es entonces que el acueducto necesita eliminar ese aire inicial. Comienza el llenado de la línea y la mayor parte del aire es arrastrado hacia aguas abajo, para ser expulsados por las válvulas de admisión y expulsión y otros mecanismos

colocados. Pero en varias ocasiones se queda aire atrapado en las partes altas de los acueductos.

2. El agua contiene un 2% aproximadamente de aire disuelto, el cual puede ser expulsado cuando la presión se reduce o en otro caso la temperatura incrementa y forma burbujas y/o bolsas de aire.
3. El equipo mecánico puede introducir aire a los acueductos. Si damos un ejemplo claro mencionamos las bombas pueden succionar entre 5 y 10 % de aire, esto se debe a los vórtices en su succión. También cuando hay presión de vacío en un acueducto, el aire puede introducirse por las juntas defectuosas y también por las válvulas de admisión.

4.1.1 Bolsas de aire

Se va a hablar mucho a cerca de las bolsas de aire en este apartado, por lo que se definen como la acumulación de aire en las tuberías. Se sabe que el agua que circula a través de las tuberías contiene una pequeña porción de oxígeno disuelto que de acuerdo con las condiciones van variando, el oxígeno es liberado en mayor o menor proporción provocando las denominadas bolsas de aire.

Las burbujas de aire se elevan en agua tranquila a una velocidad aproximadamente de 0.2 a 0.25 m/s. Pequeñas burbujas de aire con diámetros de unos pocos milímetros serán arrastradas por el flujo de agua más fácilmente que las bolsas de aire (HR Wallingford, 2005). En la Figura 4.1 se puede observar una sección con una bolsa de aire.

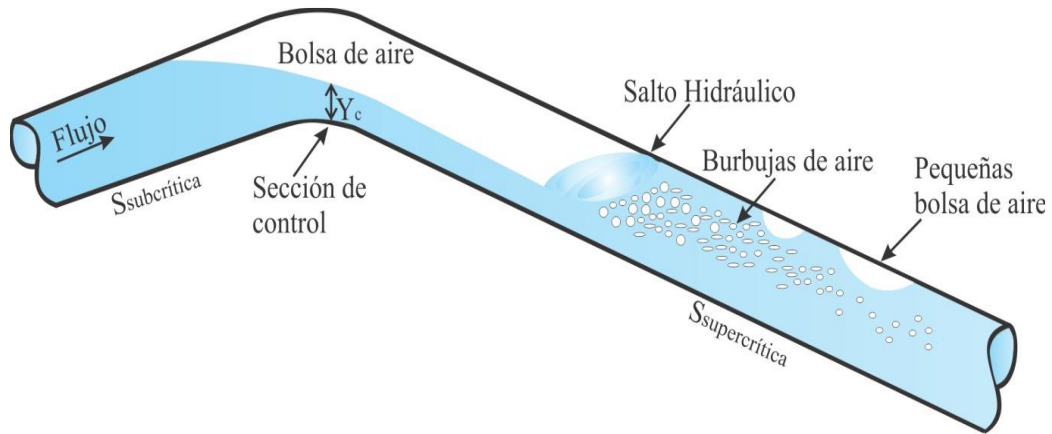


Figura 4.1. Bolsa de aire acumulada en una sección de control (Fuente: Pozos et al.,2012)

En la Figura 4.1 se muestran las bolsas de aire creadas debido al aire atrapado en la tubería, si llegamos a aislar una de esas pequeñas o grandes porciones de bolsa de aire, se aprecia que tiene sus propias fuerzas que actúan sobre la misma. La Figura 4.2 presenta las fuerzas que actúan en una bolsa de aire estacionaria.

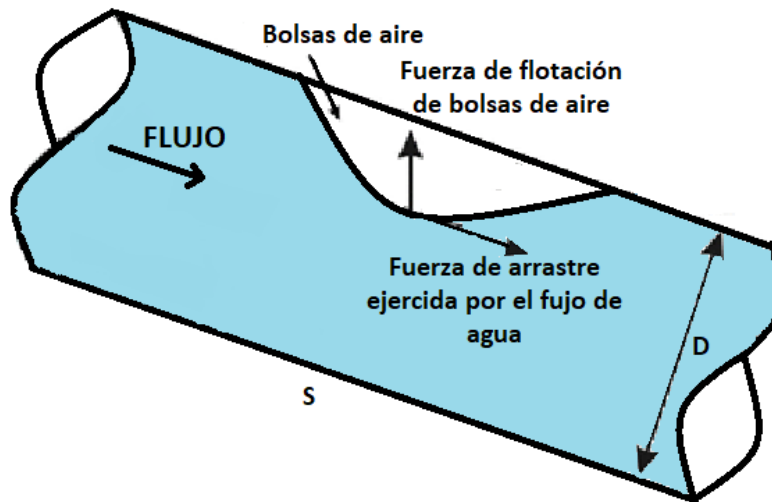


Figura 4.2. Fuerzas que actúan sobre una bolsa de aire estacionaria (Fuente: Pozos et al.,2012)

Al conocer las causas de aire atrapado se llega a conocer los probables problemas de los acueductos. A continuación, se mencionan los más importantes.

4.2 Inconvenientes causados por el aire atrapado

Entre los múltiples problemas están los siguientes:

- El aire acumulado en los puntos altos de los conductos puede llegar a reducir la sección efectiva del paso de agua, lo que crea un incremento de la pérdida de carga.
- El aire acumulado llega a acelerar el proceso de corrosión en las tuberías de fierro, porque aumenta el oxígeno utilizable.
- Durante algún tipo de medición, el aire atrapado puede llegar a producir lecturas incorrectas en los dispositivos de medición.
- Cuando existen bolsas de aire relativamente grandes, éstas pueden regresar a en sentido contrario al flujo esto debido a la fuerza de flotación, lo anterior mencionado hace que se dañe de manera temporal o permanente la estructura del acueducto, se producen los famosos sifones.
- La transición que se realiza de un tubo parcialmente lleno a un tubo completamente lleno causado por la presencia de un salto hidráulico al final de una bolsa de aire, llega a provocar vibraciones en las tuberías.

Ahora bien, estos son los problemas más comunes del relacionado con aire atrapado en tuberías, a continuación, se desarrollan de forma más extensa alguno de estos problemas.

4.2.1 Incremento de la pérdida de carga

En la Figura 4.1 se observa que una bolsa de aire que se acumuló en la parte más alta de la tubería y es lo que usualmente pasa en todos los acueductos; estas bolsas de aire comienzan muy pequeñas y mientras avanzan las burbujas de aire u otras bolsas de aire se le unen y hacen una bolsa de aire de mayor tamaño.

El fenómeno que ocurre cuando estas bolsas de aire están estacionarias en una pendiente descendente, es que la fuerza de arrastre debida al flujo del agua las movería hacia aguas hacia abajo, pero si la bolsa de aire es lo suficientemente grande su fuerza de flotación puede igualar a la fuerza de arrastre; y hace que la bolsa de aire permanezca

inmóvil en la tubería. Esto genera la reducción de la sección del paso del agua y ocasiona que la línea piezométrica tienda a ser paralela a la tubería.

En el caso de los acueductos a bombeo, cuando existe aire atrapado hay un incremento en el consumo de energía eléctrica y una reducción notable del caudal, es muy complicado remover bolsas de aire en las partes altas del acueducto en funcionamiento. En el caso más extremo se tendría que hacer un paro total de toda la línea, debido al incremento considerable de la pérdida de carga, ya que ésta puede llegar a ser mayor a la carga de la bomba. En la Figura 4.3 se ve un esquema de cómo se acumulan las bolsas de aire en un acueducto a bombeo, y como generan un incremento de la pérdida de carga.



Figura 4.3. Bolsas de aire en acueductos de bombeo (Fuente: Pozos et al.,2012)

Por otro lado, en los acueductos por gravedad la reducción de la capacidad de conducción provocada por el aire atrapado, produce derrames en tanques, cajas rompedoras de presión y en torres de oscilación. Todo esto debido a la carga estática que se tiene en ese momento no llega a ser suficiente para remover las bolsas de aire. En la Figura 4.4 se puede observar un esquema de cómo se ven unas bolsas de aire en un acueducto a gravedad.

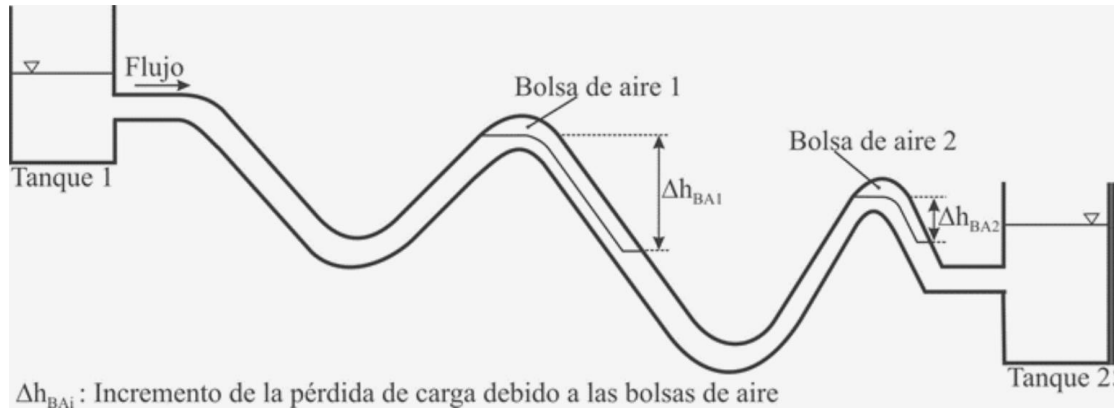


Figura 4.4. Bolsas de aire en un acueducto de gravedad (Fuente: Pozos et al.,2012)

Como se observa, mientras existan más bolsas de aire acumuladas en los puntos altos de los acueductos, ya sea acueducto a gravedad o acueducto a bombeo existirá mayor pérdida de carga. La pérdida de carga total será considerada como la suma de las pérdidas producidas por cada una de las bolsas de aire.

4.2.2 Retorno de las bolsas de aire provocada por la fuerza de flotación

Cuando se llegan a acumular las bolsas de aire en las tuberías, éstas pueden ser de diversos tamaños, desde pequeñas burbujas hasta grandes bolsas de aire.

Ahora bien, si existe una pendiente descendente, la bolsa de aire puede quedar estacionaria y terminar en un salto hidráulico, como se observa en la Figura 4.1. El salto hidráulico ocasiona una acción turbulenta que genera una entrada de aire que forma las denominadas burbujas y en mayor tamaño bolsas de aire. Las bolsas de aire formadas llegan a regresar con una fuerza mayor a través del salto hidráulico, esta fuerza puede llegar a destruir de forma parcial o completamente las estructuras hidráulicas.

4.2.3 Golpe de ariete provocado por remoción de una bolsa de aire

Después de analizar los problemas ocasionados por bolsas de aire en acueductos de gravedad y acueductos de bombeo, ahora analizamos el caso en el que existe un aumento de velocidad en el flujo de agua debajo de la bolsa de aire estacionaria, en este caso se puede producir un desprendimiento de un pequeño o gran parte de volumen de aire, o hasta de la bolsa de aire completa. La Figura 4.5 muestra gráficamente el golpe

de ariete en una bolsa de aire. Esto puede provocar daños en los accesorios, en la línea de conducción y también en las uniones de la res y en muchos casos puede ocasionar la ruptura de la tubería.

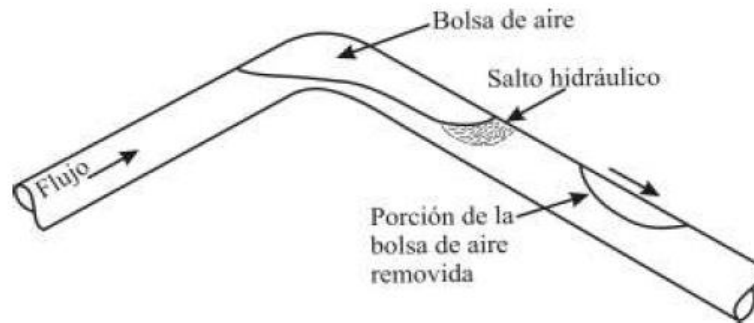


Figura 4.5. Golpe de ariete causado por remoción de una bolsa de aire (Fuente: Pozos et al.,2012)

4.2.4 Reducción de la eficiencia en sistemas de bombeo

Thomas (2003) desarrolló un trabajo minucioso de comparación entre la eficiencia de algunos acueductos de bombeo y el costo para poder llegar a remover el aire atrapado de las conducciones.

Se ha estimado que el 75% del costo de operación de un acueducto es el costo de bombeo del producto transportado. Los estudios de una variedad de sistemas de agua en todo el mundo han revelado que el aire atrapado puede reducir la eficiencia de la tubería hasta en un 30% y que la mayoría de los sistemas de agua comúnmente trabajan para remover las bolsas de aire que disminuyen la eficiencia del sistema en un 15 y 20% (Thomas, 2003).

El autor comenta que las bolsas de aire son un obstáculo para bombear agua en los acueductos. La acumulación de aire hace que la presión aumente un 20% y esto hace que se obligue a las bombas a funcionar un 20% extra, y también llega a consumir un 20% más de energía eléctrica, lo cual si nos damos cuenta también es un incremento en el gasto en electricidad.

4.2.5 Cambios en las propiedades del fluido

Como se sabe las propiedades del agua son varias, pero su composición llega a verse modificada por la adición de aire que incrementa la cantidad de oxígeno en la mezcla de agua - aire. Este cambio afecta principalmente a la densidad y también a la elasticidad del fluido.

4.3 Expulsión del aire atrapado de los acueductos

Las causas y sobre todo los posibles problemas que puede ocurrir al tener aire atrapado en las tuberías ya fueron expuestos, ahora bien, se tiene dos medios para poder evitar la formación de bolsas de aire atrapado.

- **MEDIOS HIDRÁULICOS:** esto es mediante el uso de la inercia del flujo para que así se pueda expulsar el aire atrapado de las tuberías
- **MEDIOS MECÁNICOS:** Mediante la utilización de válvulas expulsoras de aire, bombas de vacío y venteo, se realiza la expulsión del aire de los acueductos.

4.3.1 Medios hidráulicos

Revisando toda la bibliografía obtenida no existe un solo método que haya sido adoptado por todos, para el análisis de las burbujas y bolsas de aire en los acueductos. Todo lo que se va a describir a continuación son formulas empíricas. Los autores de las mismas siempre tienen distintas restricciones y recomendaciones diferentes para el uso de las mismas. Las más grandes diferencias son por las distintas condiciones en las que han sido investigadas, también tiene mucho que ver las mediciones y los dispositivos que utilizan, al mismo tiempo los diámetros de tuberías que usan para el experimento.

Algunos autores que se van a citar son los siguientes:

- **Henry T. Falvey (1978)**

Quien creo una gráfica que muestra los límites del comportamiento tanto de las bolsas de aire, como de las burbujas de un conducto cerrado. En su artículo comenta

que la dirección del movimiento de las burbujas y bolsas de aire se analizan de acuerdo a las fuerzas de arrastre y flotación.

Martín (1976) demostró que un fluido estacionario se forma una bolsa de aire cuando el parámetro de flujo adimensional $\frac{Q^2_{agua}}{gD^5}$ es igual a 0.3 para flujo vertical con dirección hacia abajo. Por lo tanto, el aumento de la tendencia de la curva probablemente no continua más allá de los 45° (Falvey, 1980).

Para tuberías con pendientes menores que 0.1, la pendiente es tan pequeña que los problemas de aire atrapado casi no se experimentan. La Figura 4.6 muestra la gráfica creada por (Falvey,1980).

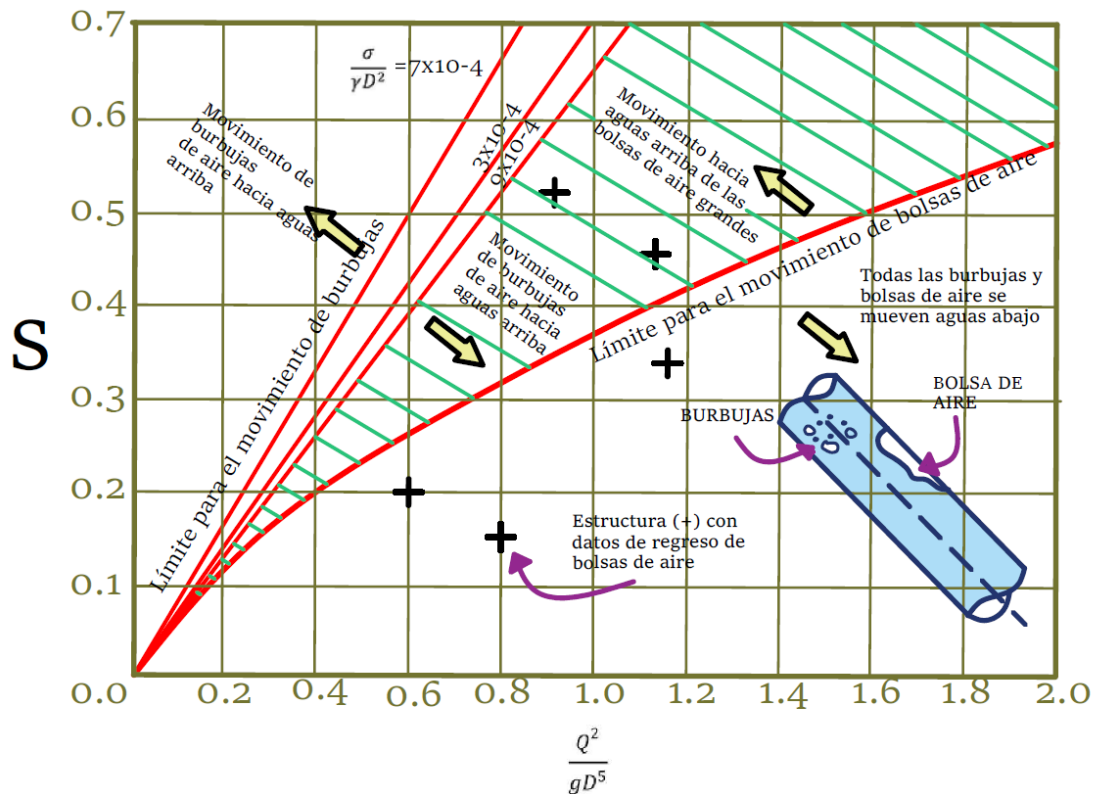


Figura 4.6. Movimiento de burbujas y bolsas de aire en conductos cerrados fluyendo llenos (fuente: Falvey (1980))

- Kent, (1952)

En su tesis doctoral encontró que la velocidad de expulsión del aire mediante un salto hidráulico al final de una bolsa de aire está relacionada con la fuerza de arrastre del agua que actúa sobre la bolsa de aire. Según Kent existe una velocidad de

remoción efectiva cuando la velocidad media del agua llega a ser mayor o igual a la velocidad mínima del agua, este autor desarrolló una relación semiempírica para obtener el valor de velocidad mínima que está en función a la pendiente de la tubería que se está examinando con el diámetro de la misma.

$$v_{min} = C_0^{1/2} \sqrt{gDS} \quad \text{Ecuación 4-1}$$

Un dato no conocido aquí es $C_0^{1/2}$ que es una función de la forma de la bolsa de aire, con datos experimentales en su tesis encontró un valor para esta que llegará a ser una constante, cuando la longitud de la bolsa de aire es mayor a 1.5D. Si nos ponemos a analizar se puede saber que esta fórmula de Kent se utiliza de manera común por lo simple de entender.

- González y Pozos, (2000)
Propusieron la Ecuación 4-2 para estudiar el comportamiento de las bolsas y burbujas de aire aguas abajo de un salto hidráulico que se llega a formar en el extremo final de una bolsa de aire.

$$\frac{Q^2}{gD^5} = S \quad \text{Ecuación 4-2}$$

Donde

- Q: Caudal (m^3/s)
- g: Gravedad (m^2/s)
- D: Diámetro (m)
- S: Pendiente de la tubería

El parámetro de la izquierda se debe comparar con todas las pendientes del acueducto, es decir cuando el parámetro de la izquierda es mayor a la pendiente de la tubería, las bolsas de aire o las burbujas serán expulsadas de las pendientes. Pero en caso contrario el parámetro de la izquierda es menor que la pendiente descendente, las burbujas o bolsas de aire se moverán a contraflujo.

$$Q^2/gD^5 > S \quad \text{EL AIRE AVANZA}$$

$$Q^2/gD^5 < S \quad \text{EL AIRE AVANZA}$$

Y Ecuación 4-2 puede identificar donde se acumulan las bolsas de aire.

Es importante mencionar que la Ecuación 4-2 ha sido utilizada para estudiar problemas de aire atrapado en varios acueductos de México.

4.3.2 Medios mecánicos

- **Venteos:**

En el siglo XX aun los ingenieros no entendían por completo el comportamiento de las bolsas de aire atrapado. Entonces de las primeras soluciones y que aún se usan son la colocación de venteos, que se conforman de una válvula de compuerta y un tubo, con la idea de que el aire puede ser evacuado por ahí.

Los venteos son un tipo de estructura de liberación de aire para ser utilizados en las partes altas, donde no rebase la altura de venteo. La altura del venteo máxima permitida se determina a partir de la topografía, estética y consideraciones económicas. Normalmente los venteos abiertos en las partes altas intermedias no son factibles y que la altura máxima no exceda 6 a 10 metros (Falvey, 1980). Un esquema de un venteo en un acueducto es mostrado la Figura 4.7.

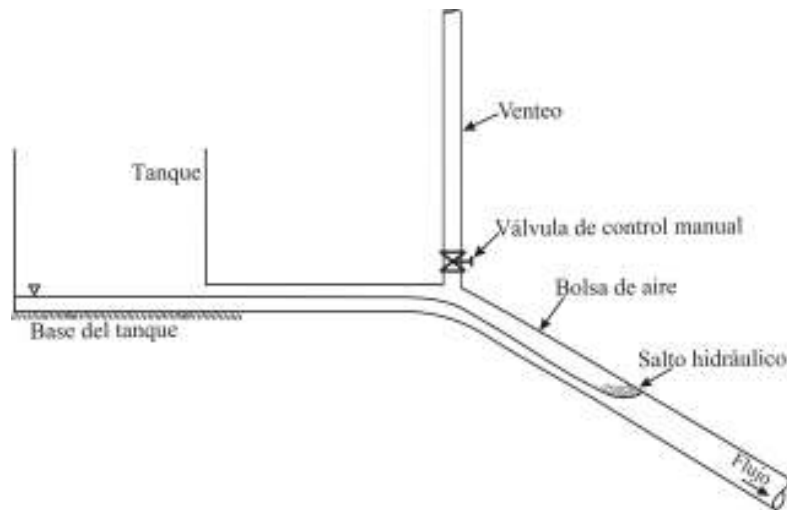


Figura 4.7. Venteo colocado en un acueducto para expulsar aire atrapado (fuente: Pozos et al.,2012)

Para que la línea de conducción funcione de manera óptima también se necesita venteos en lugares que no sean los puntos medios. Las velocidades del agua son

suficientes para trasportar burbujas de aire con el flujo, entonces también se necesitan venteos aguas debajo de los canales de pendientes de tubería negativas a positivas. Un esquema de un venteo en el cambio de pendientes se muestra en la Figura 4.8.

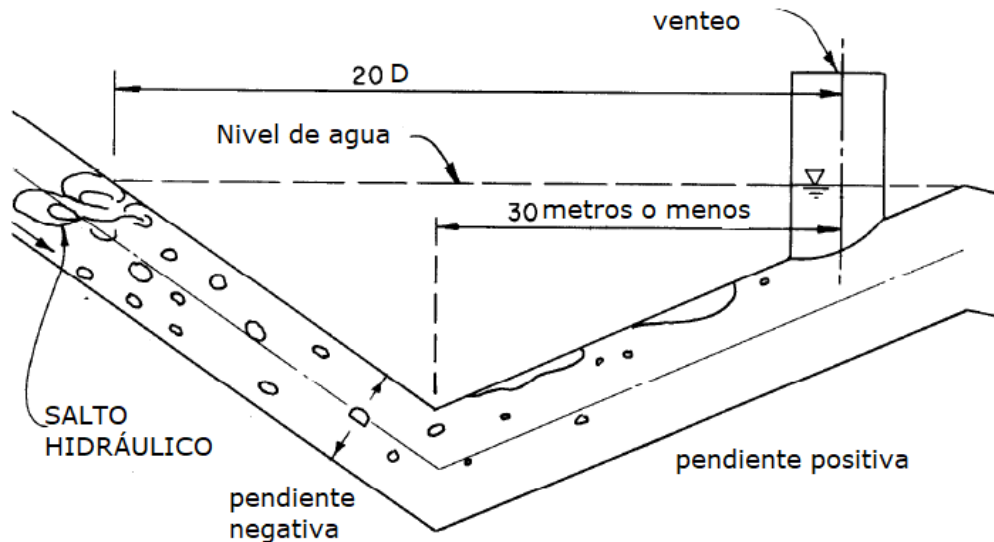


Figura 4.8. Locación de venteo en cambio de pendientes (fuente: Falvey (1980))

Estos venteos deben ubicarse 30 metros aguas abajo, justo en el cambio de pendientes de la tubería. Si la distancia de la intersección de la pendiente descendente y el venteo propuesto supera a los $20D$, donde D es el diámetro del conducto, entonces la ventilación debe colocarse en el mayor a dos distancias.

El criterio para el colocado de estos venteos es el mismo que los de posicionamiento de un venteo puesto en una tubería de pendiente ascendente, si la distancia entre aguas arriba y las estructuras de ventilaciones de aguas abajo es muy recomendada que los venteos sean colocados cada 500 a 1000 metros a lo largo del descenso (Falvey, 1980).

El criterio mencionado por Falvey de la colocación de venteos, es un criterio que aún es adoptado en la actualidad para el diseño acueductos, cuando se trata de tomar decisiones del posicionamiento de las válvulas de aire, ya que se utilizó como base para diseño de líneas de acueductos y funcionó de manera eficiente.

- *Válvulas de aire:*

Estos son los dispositivos más utilizados para expulsar aire durante el llenado de una línea de conducción, para evacuar el aire acumulado cuando el sistema está en funcionamiento cuando estas válvulas no funcionan de manera adecuada o llegan a fallar, lo que ocasiona una acumulación de aire. Por tanto, es muy importante que exista un correcto dimensionamiento y la colocación adecuada de las válvulas a lo largo de la línea de conducción.

Es necesario conocer el perfil topográfico de la línea y de ser posible la presión deseada al final de la misma para establecer el gradiente hidráulico y definir las válvulas requeridas, como se muestra en la Figura 4.9.

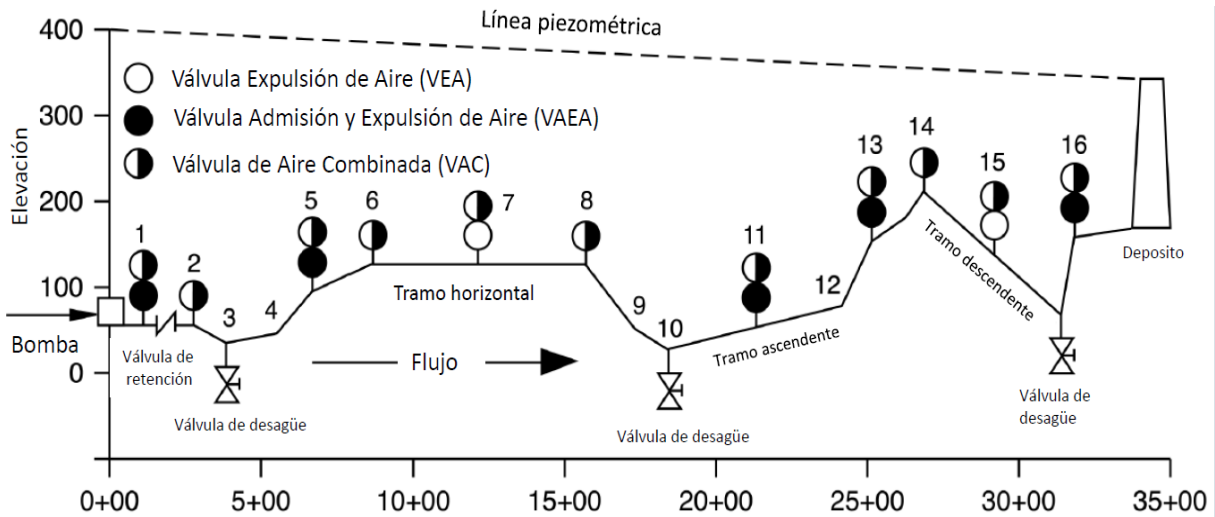


Figura 4.9. Esquema de posible posicionamiento de Válvulas en un Acueducto

El esquema de la Figura 4.9 muestra la localización típica de las válvulas de aire, que se desglosarán más adelante. Se tiene que tener en cuenta que la topografía del lugar, sobre todo las cotas de todos los tramos del acueducto son sumamente importantes para poder realizar la correcta localización de las válvulas. También después de seleccionarlas se tiene que tomar en cuenta que la decisión final de la localización se realiza después de un análisis en conjunto de las misma.

Los tipos de válvulas son:

- Válvulas de expulsión de aire (VEA)
- Válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA)
- Válvulas combinadas (VAC)

Vamos a describir cuales serían las posibles localizaciones de cada una de las válvulas descritas en el capítulo 2, se toma en cuenta los tres tipos de válvulas descritas anteriormente ya que son las más utilizadas.

- Se debe instalar una válvula de admisión y expulsión de aire en el lado de la descarga de la bomba y antes de la válvula de check, esto es para que se pueda expulsar el aire acumulado cuando se pone en marcha la línea de conducción y para que se admita la entrada de aire después de que llegue a existir un paro de los equipos. Algo bastante importante es que la diferencial de presión no exceda 0.05 bar durante la operación del llenado de la línea de conducción del acueducto.
- Se ponen las válvulas de aire en los cambios de pendientes descendentes, esto se debe a que se pueda presentar la presión de vacío. Se utiliza el caudal para el diseño de este tipo de válvulas. Se tiene que considerar el efecto Venturi en la instalación, esto consiste en un fenómeno en el que el agua que está en movimiento disminuye considerablemente la presión y aumenta la velocidad.
- Cuando existe un decremento de la pendiente ascendente se debe colocar una válvula de admisión y expulsión de aire o una válvula combinada, esto para evitar problemas en caso de que ocurra una separación de columnas líquidas.
- Tramos ascendentes largos se deben poner válvulas de admisión y expulsión de aire o válvulas combinadas en intervalos de 400 a 800 m., estos dispositivos son realmente necesarios para una adecuada expulsión del aire durante la operación de llenado y para permitir la entrada de aire durante el vaciado del sistema. Al dimensionar las válvulas con tramos ascendentes se tiene que hacer una

comparación entre el caudal de aire expulsado por el orificio de un mayor diámetro con el gasto de aire que se introduce por el mismo, entonces si el fasto de aire expulsado llega a ser mayor que el introducido.

- Tramos descendentes largos se deben instalar válvulas de expulsión de aire o válvulas combinadas más o menos a 400 u 800 m, a lo largo de toda la sección descendente.
- Cuando se tiene tramos horizontales largos se instala válvulas de aire combinadas al inicio y también al final de un tramo de tubería horizontal largo. Teniendo en cuenta que una de las recomendaciones principales al diseñar la línea de acueductos es no tener tramos horizontales largos, pero si realmente no se puede evitar a lo largo de ese tramo horizontal se ponen válvulas de expulsión de aire, esto por recomendación de algunos investigadores, pero sobre todo los fabricantes recomiendan colocarlas entre 380 y 760 m.
- Si se tiene puntos altos se deben colocar válvulas de aire combinadas para evitar la presión de vacío y para evacuar el aire de la línea durante el llenado, también expulsa aire que se introduce en la conducción durante la operación normal del acueducto y permitir la entrada de aire.

En el capítulo 2 se explica claramente cada uno de los tipos de válvulas de forma esquemática. En la Tabla 4.1 se tiene un resumen de las posibles localizaciones de las válvulas de aire, la Tabla 4.1 trabaja se considera un complemento de la Figura 4.9.

Tabla 4.1. Posibles localizaciones de válvulas de aire.

No.	Descripción	Tipo Recomendado
1	<i>Descarga de bomba</i>	Válvula de Admisión y Expulsión/Válvula de aire combinado
2	<i>Incremento descendente</i>	Válvula de aire combinado
3	<i>Punto bajo</i>	No se requiere Válvula de aire
4	<i>Incremento ascendente</i>	No se requiere Válvula de aire
5	<i>Decremento ascendente</i>	Válvula de Admisión y Expulsión / Válvula de aire combinado
6	<i>Inicio Horizontal</i>	Válvula de aire combinado
7	<i>Tramo Horizontal</i>	Válvula expulsión de aire / Válvula de aire combinado
8	<i>Fin horizontal</i>	Válvula de aire combinado
9	<i>Decremento descendente</i>	No se requiere Válvula de aire
10	<i>Punto bajo</i>	No se requiere Válvula de aire
11	<i>Tramo ascendente</i>	Válvula de Admisión y Expulsión/Válvula de aire combinado
12	<i>Incremento ascendente</i>	No se requiere Válvula de aire
13	<i>Decremento ascendente</i>	Válvula de Admisión y Expulsión/Válvula de aire combinado
14	<i>Punto alto</i>	Válvula de aire combinado
15	<i>Tramo descendente</i>	Válvula expulsión de aire / Válvula de aire combinado
16	<i>Decremento ascendente</i>	Válvula de Admisión y Expulsión/Válvula de aire combinado

4.4 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 asume que la expansión y compresión de las bolsas de aire siguen un proceso politrópico.

4.4.1 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.

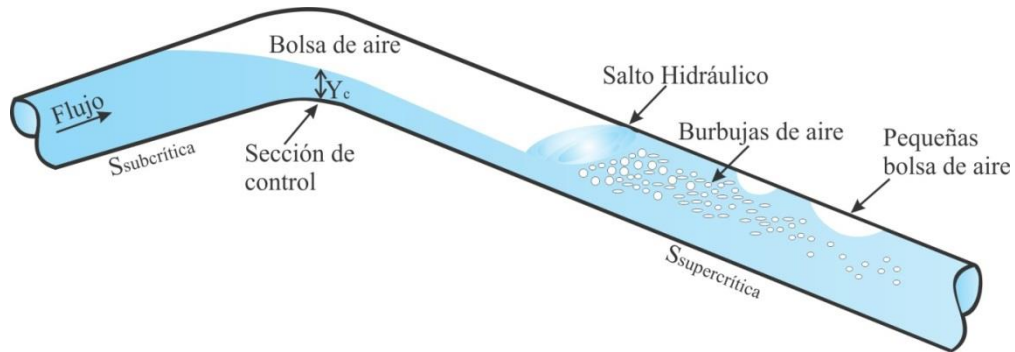


Figura 4.1. Bolsa de aire acumulada en una sección de control (Fuente: Pozos et al.,2012)

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, 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 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. (2010) propusieron una expresión analítica Ecuación 4-3, 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 4-2 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:

$$\frac{Q^2}{gD^5} = S \quad \text{Ecuación 4-2}$$

Donde

- Q: Caudal (m^3/s)
- g: Gravedad (m^2/s)
- D: Diámetro (m)
- S: Pendiente de la tubería

Al miembro izquierdo de la Ecuación 4-2 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.

4.4.2 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 4-3 propuesta para determinar el volumen de aire contenido en una bolsa es Pozos et al. (2010):

$$V = \left\{ \left[A - \frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right] \Delta x_{i,i+1} + \left[A - \frac{A_{i+1} + A_{i+2}}{2} \right] \Delta x_{i+1,i+2} + \dots + \left[A - \frac{A_{i-m} + A_m}{2} \right] \Delta x_{i-m,m} \right\} \text{Ecuación 4-3}$$

Donde
 V: Caudal (m^3)
 A: Área (m^2)
 Δx : longitudes (m)

Donde V es el volumen de aire en la bolsa de aire ya sea aguas arriba o aguas bajo 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 4.10 muestra en detalle la terminología usada en la Ecuación 4-3.

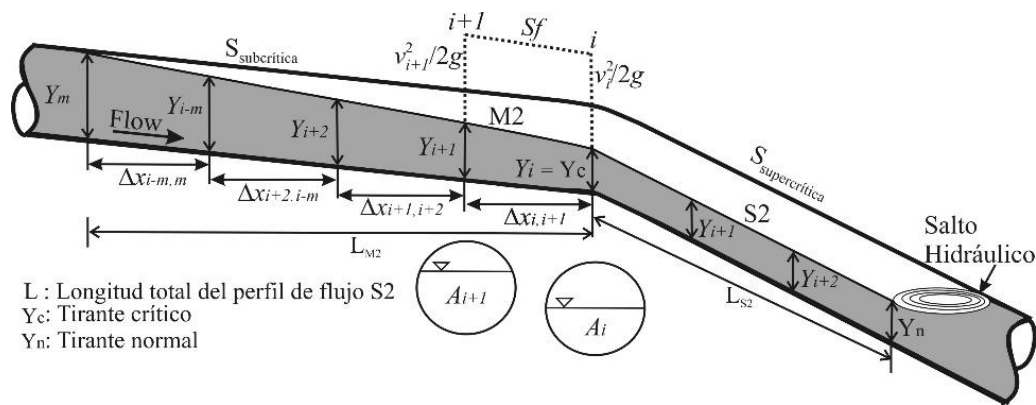


Figura 4.10. Variables utilizadas en el método del paso directo (MPD).

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., 2010):

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 la Ecuación 4-4 y Ecuación 4-5, respectivamente.

$$\Delta Y = \frac{Y_m - Y_i}{k} \quad \text{Ecuación 4-4}$$

$$\Delta Y = \frac{Y_i - Y_n}{k} \quad \text{Ecuación 4-5}$$

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

2. Para cada Y_i , calcular el área hidráulica A_i , la velocidad media del agua v_i , el perímetro mojado P_i y el radio hidráulico R_i utilizando la Ecuación 4-6 y Ecuación 4-9.

$$A_i = \frac{D^2}{4(\theta - \sin \theta \cos \theta)} \quad \text{Ecuación 4-6}$$

$$v_i = Q_{wi} / A_i \quad \text{Ecuación 4-7}$$

$$P_i = \theta D \quad \text{Ecuación 4-8}$$

$$R_i = A_i / P_i \quad \text{Ecuación 4-9}$$

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

3. Calcular la pendiente de fricción para la sección correspondiente, utilizando la ecuación de Manning, Ecuación 4-10.

$$S_f = \left(\frac{n v}{R^{2/3}} \right)^2 \quad \text{Ecuación 4-10}$$

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 4-11 Los tramos de tubería se consideran siempre positivo

$$\Delta x_{i,i+1} = \frac{E_i - E_{i+1}}{S - S_{fm}} = \frac{E_i - E_{i+1}}{S - 0.5(S_{fi} + S_{fi+1})} = \frac{(Y_i + v_i^2 / 2g) - (Y_{i+1} + v_{i+1}^2 / 2g)}{S - 0.5n^2(v_i^2 / R_i^{4/3} + v_{i+1}^2 / R_{i+1}^{4/3})} \quad \text{Ecuación 4-11}$$

Donde $\Delta x_{i,i+1}$ es la longitud del tramo de tubería, E_i y E_{i+1} son la energía específica aguas abajo y aguas arriba del tramo de tubería, respectivamente; S es la pendiente de la tubería; S_{fi} y S_{fi+1} son la pendiente de fricción aguas abajo y aguas arriba del tramo de tubería, respectivamente.

Repetir los pasos 2 a 4 para las siguientes secciones consideradas hasta obtener la longitud total del perfil.

5. Calcular el volumen de aire aguas arriba y aguas abajo de la sección de control con la Ecuación 4-3.

Para una aplicación práctica de la Ecuación 4-3, es recomendable iniciar con el cálculo del volumen de aire V_1 de la porción de la bolsa que se extiende hacia aguas arriba de la sección de control. Basados en 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.

4.4.3 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 4.11.

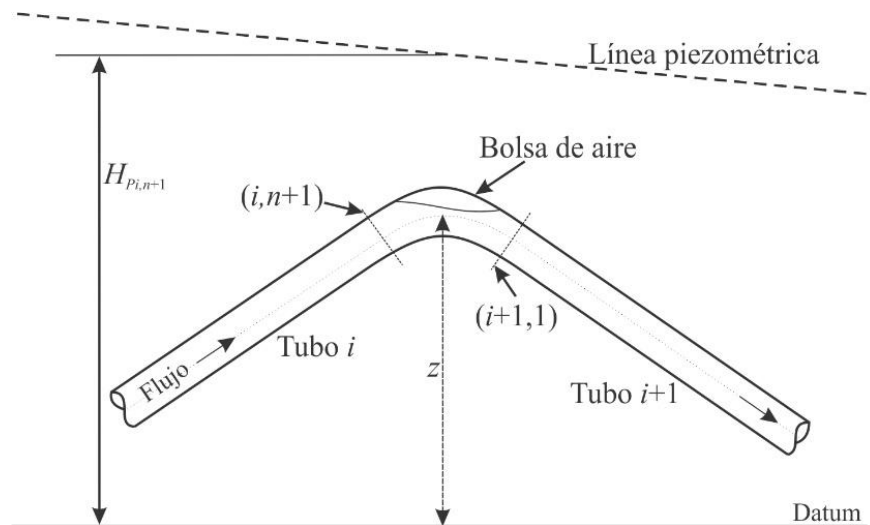


Figura 4.11. Notación para la bolsa de aire.

La Ecuación 4-12 que describe el proceso politrópico (proceso termodinámico en el que existe transferencia de energía) es usada como condición de frontera, para determinar

la expansión y compresión de las bolsas de aire. Además, se considera que la carga piezométrica es igual a $H = (p/\rho g) + z$, como se ve en la Figura 4.11.

$$HV^\psi = C \quad \text{Ecuación 4-12}$$

Donde H es la carga piezométrica, V el volumen de aire, ψ el índice politrópico y C es una constante. La Ecuación 4-12 también puede escribirse como:

$$(H_{P_{i,n+1}} - z + H_b)V_{P_i}^\psi = C \quad \text{Ecuación 4-13}$$

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:

$$V_{P_i} = V_i + \frac{I}{2} \Delta t [(Q_{P_{i+1,i}} + Q_{i+1,i}) - (Q_{P_{i,n+1}} + Q_{i,n+1})] \quad \text{Ecuación 4-14}$$

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, $Q_{i+1,1}$ gasto aguas abajo de la bolsa de aire al inicio del intervalo de tiempo, $Q_{P_{i+1,1}}$ 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:

$$Q_{P_{i,n+1}} = C_{(+)} - C_{a_i} H_{P_{i,n+1}} \quad \text{Ecuación 4-15}$$

$$Q_{P_{i+1,1}} = C_{(-)} + C_{a_{i+1}} H_{P_{i+1,1}} \quad \text{Ecuación 4-16}$$

Donde:

$$C_{(+)} = Q_{i,n+1} + C_{a_i} H_{i,n+1} - R_i Q_{i,n+1} \left| Q_{i,n+1} \right| \quad \text{Ecuación 4-17}$$

$$C_{(-)} = Q_{i+1,1} - C_{a_{i+1}} H_{i+1,1} - R_{i+1} Q_{i+1,1} \left| Q_{i+1,1} \right| \quad \text{Ecuación 4-18}$$

$$R_i = \frac{f_i \Delta t_i}{2D_i A_i} \quad \text{Ecuación 4-19}$$

$$R_i = \frac{f_{i+1} \Delta t_i + 1}{2D_{i+1} A_{i+1}} \quad \text{Ecuación 4-20}$$

$$C_{a_i} = \frac{gA_i}{a_i} \quad \text{Ecuación 4-21}$$

$$C_{a_i} = \frac{gA_{i+1}}{a_{i+1}} \quad \text{Ecuación 4-22}$$

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:

$$H_{P_{i,n+1}} = H_{P_{i+1,1}} \quad \text{Ecuación 4-23}$$

Ahora se tienen cinco variables desconocidas y cinco ecuaciones, las cuales son $H_{P_{i,n+1}}$, V_{P_i} , $Q_{P_{i+1,1}}$, $Q_{P_{i,n+1}}$, $H_{P_{i+1,1}}$. La Ecuación 4-24 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 Ecuación 4-13 y Ecuación 4-25.

$$\left(H_{P_{i,n+1}} + H_b - z \right) \left[C_{aire} + \frac{I}{2} \Delta t (C_{a_i} + C_{a_{i+1}}) H_{P_{i,n+1}} \right]^{\psi} = C_l \quad \text{Ecuación 4-24}$$

$$C_{aire} = V_i + \frac{I}{2} \Delta t (Q_{i+1,1} - Q_{i,n+1} + C_{(-)} - C_{(+)}) \quad \text{Ecuación 4-25}$$

Durante los cálculos el esquema de diferencias finitas se mantiene estable, debido a que la condición de Courant – Friedrich – Lewy (Ecuación 4-26) se cumple en todo momento si el Δt es elegido adecuadamente.

$$\Delta x \geq a\Delta t$$

Ecuación 4-26

4.4.4 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 4-2.
- 2) La determinación de los perfiles de flujo, se hace mediante la ecuación dinámica del flujo gradualmente variado, Ecuación 4-11.
- 3) Cálculo del volumen de aire aguas arriba y aguas abajo de la sección de control, Ecuación 4-3.
- 4) La simulación de los transitorios hidráulicos con aire atrapado se puede realizar utilizando la Ecuación 4-12 y la Ecuación 4-26.

4.4.4.1 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. 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 Figura 4.12 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. (2010) (Ecuación 4-2), se encontraron 3 puntos que podrían acumular aire.



Figura 4.12. Perfil del acueducto a bombeo

Haciendo uso de la información del capítulo 4 y aplicando las siguientes ecuaciones, Ecuación 4-2 y Ecuación 4-3 se determinan los puntos en los que las bolsas de aire pueden quedar atrapadas. 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.

La ubicación de las bolsas de aire, así como su volumen se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Ubicación y volumen de las bolsas de aire en la conducción, Gasto $Q=2.1 \text{ m}^3/\text{s}$

Cadenamiento (m)	Elevación (m)	Vol. de Aire (m^3)	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

4.4.4.2 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 4.2 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 4.13 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 4.2 se observa que la envolvente de cargas piezométricas mínimas corta 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.

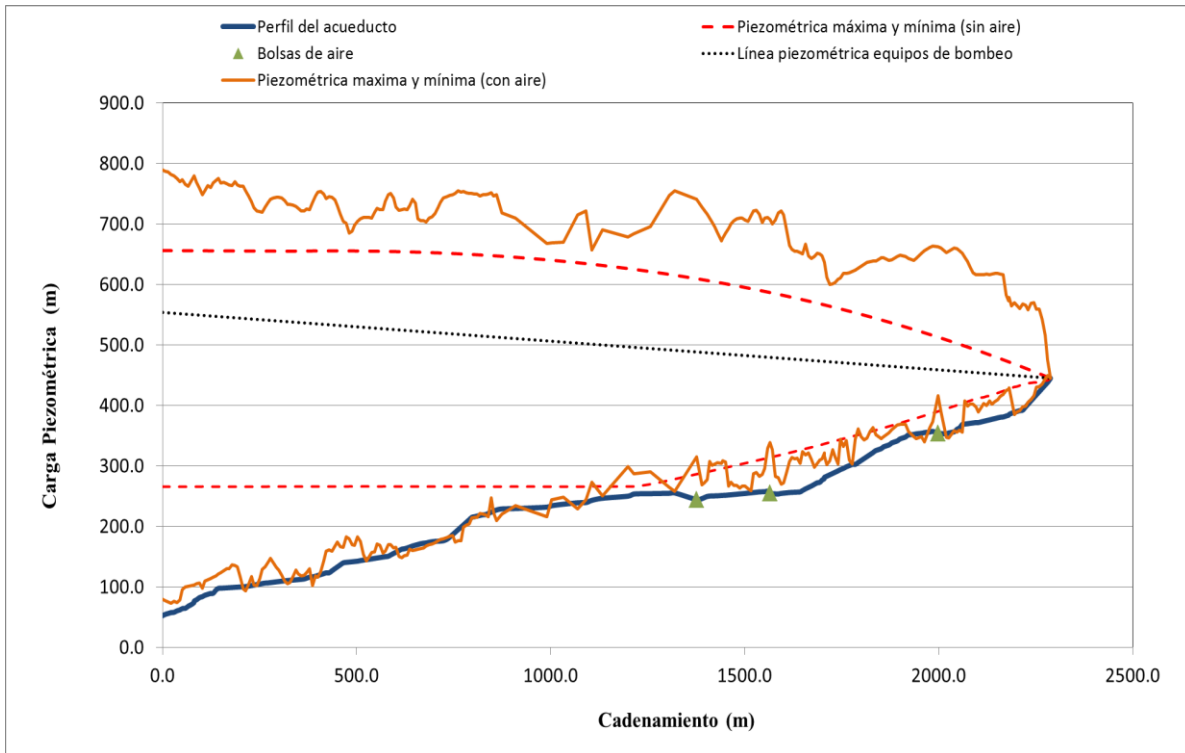


Figura 4.13. Envolventes de las líneas piezométricas máximas y mínimas $Q=2.1 \text{ m}^3/\text{s}$

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.

4.5 Recomendaciones

La presencia de aire atrapado y de burbujas de aire en los acueductos es uno de los problemas más recurrentes en las líneas de conducción de agua, este fenómeno se presenta durante la operación del acueducto y esto ocasiona varios fenómenos desfavorables, sus efectos en la mayoría de las veces son desconocidos y subvalorados por tanto se les presta muy poca atención o nula atención en muchos casos.

Se tiene que tener en cuenta que no se va a poder eliminar de ninguna manera el aire atrapado por completo, pero al saber que existen se pueden establecer soluciones para que los efectos sean menores, y también que la cantidad de aire dentro de las tuberías sea menor.

También tenemos que tener en cuenta que cuando diseñamos un acueducto con la mentalidad que no ingrese nada de aire, se tiene que aceptar que eso no se puede, se tiene que diseñar con un ingreso controlado de aire, variando las pendientes.

5. Problemática 2: Intrusión patógena en acueductos

La intrusión patógena es un fenómeno que se presenta en los acueductos de agua potable. En algunas ocasiones existen fluidos contaminados alrededor de la línea de conducción, los que pasan a través de algún defecto de la línea de conducción lo que puede ocasionar una disminución de la calidad del agua transportada que podría provocar problemas de salud.

La calidad del agua para el consumo humano es un tema debatible por parte de las entidades que se encargan del abastecimiento de agua potable a la población y también entre los centros de investigación en torno al agua. Lo que más se llega a debatir son las posibles consecuencias si llega a haber una contaminación de agua ya sea desde la distribución o también incluso del tratamiento.

5.1 Causas de la intrusión patógena

La intrusión patógena en un acueducto es la consecuencia de una posible rotura en las tuberías, una junta mal realizada o un orificio en la conducción, con esto mencionado en adición de una presión negativa dentro de las tuberías y la presencia de agentes externos provocan una intrusión patógena.

Así cualquier entrada de flujo externo en la línea de conducción sería considerada patógena, ya que ésta va a alterar los niveles de calidad de flujo que circula por las tuberías.

En la Figura 5.1 se observan las distintas formas de contaminación externa que puede llegar a tener el agua, desde la captación luego posiblemente en la planta de tratamiento y desinfección y finalmente en la distribución del agua.

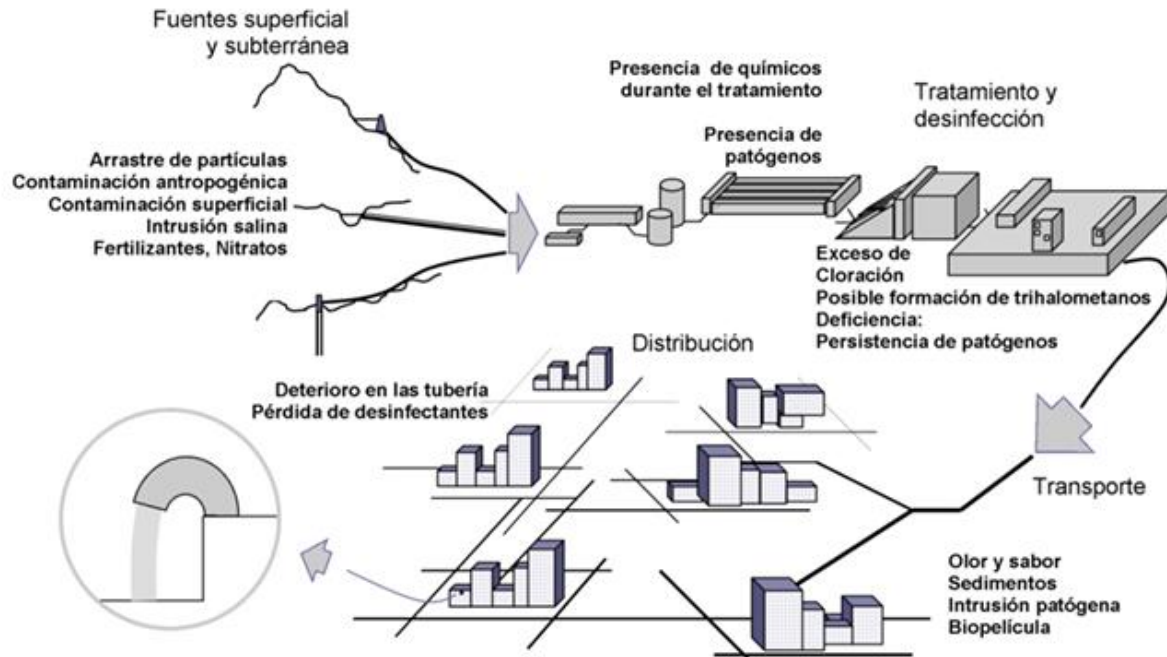


Figura 5.1. Adversidades de la calidad del agua en la distribución (fuente (Rodríguez, 2011))

En la Tabla 5.1 se presenta un resumen de posibles intrusiones que puede tener un acueducto en funcionamiento.

Tabla 5.1. Problemas relacionados con la calidad de agua que aparece en acueductos

Captación	Subterránea	<i>Contaminación superficial</i>	Pesticidas
			Detergentes
	Nitratos		
	Superficial	<i>Contaminación Salina</i>	intrusión de agentes externos en el acuífero
Contaminación de origen antropogénico			
Tratamiento y desinfección	Planta de tratamiento	Presencia de agentes químicos	
		Presencia de flóculos o patógenos	
	Cloración	<i>Exceso</i>	Presencia de Trihalometanos
		<i>Escasez</i>	Presencia de patógenos
Trasporte	Red General	Mal sabor y olor	
		Sedimentos en el agua	
		Intrusión patógena	
		Biopelícula	
	Red Interior	Disminución de la desinfección	
		Deterioro de las cañerías	

En la captación depende mucho si es una captación subterránea o si es superficial, se aprecia que en cada una hay alguna posible intrusión. Existen más posibilidades de intrusión cuando es una captación subterránea por ejemplo cuando existe una *contaminación superficial* algunos materiales externos que pueden llegar a depositarse en las paredes o pisos de las tuberías se depositan de manera libre y una *contaminación salina* a veces se producen porque el agua salada que es más densa, se introduce desde el mar hacia los acuíferos.

Los niveles de calidad de agua que circula por los acuíferos dependen de manera importante de la calidad de agua que sale de la planta de potabilización. Los errores en este punto pueden producirse por algún fallo en la aplicación del tratamiento de cloración con algún exceso o escasez de la misma. Los tratamientos convencionales de agua actuales no garantizan la calidad del agua suministrada todo el tiempo, esto puede ocasionar

enfermedades de origen patógeno si el sistema de desinfección no funciona de manera óptima.

A veces se originan condiciones donde la calidad del agua que sale de la planta de tratamiento durante su recorrido por la línea de conducción hasta los consumidores existe intrusión patógena. El problema puede ocurrir en la tubería, si se habla del estado de las tuberías, puede existir corrosión, biopelículas, deposición de sustancias transportadas.

La contaminación microbiana de los sistemas de distribución se debe a dos fuentes principales: un inadecuado tratamiento y la intrusión aguas abajo de la planta de potabilizadora (Romero Chapa, 2013).

5.1.1 Condiciones para que pueda existir una intrusión patógena

Existen muchos factores que pueden favorecer a que exista un transitorio hidráulico como ser las paradas y arranques en las conducciones, cuando existe un corte de suministros debido a restricciones, cuando existen sequías y se tiene que hacer un paro de los equipos de bombeo, todo lo anteriormente mencionado puede ocasionar una entrada de flujo externo en las redes de distribución.

Algo que comúnmente llega a pasar es que exista fuga por alguna rotura de tubería, entonces se puede generar una intrusión en las tuberías, cuando existe un decremento de la presión por debajo de la cota, lo que favorece la entrada de contaminantes, lo que ocasiona una disminución de confiabilidad de la calidad de agua. En la Figura 5.2 se muestra un esquema de factores requeridos para una intrusión patógena.

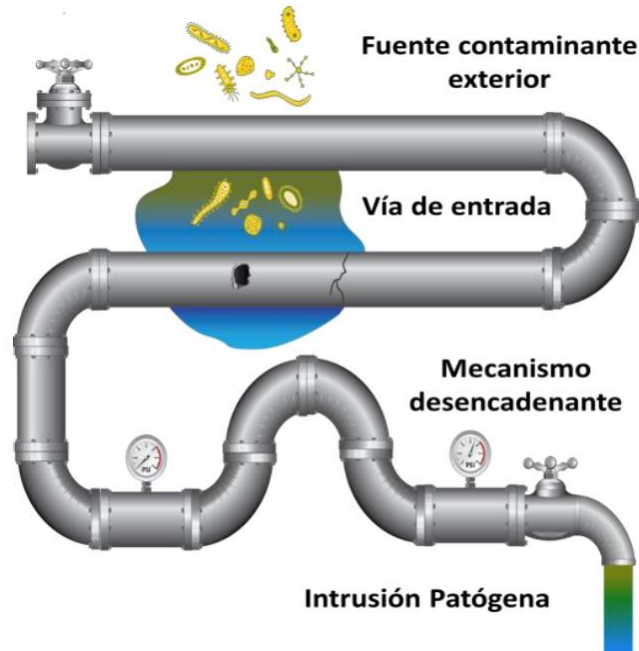


Figura 5.2. Factores requeridos para el fenómeno de la intrusión patógena (fuente: (Martínez Pujol, 2014))

Existen condiciones que llegan a generar los fallos en las tuberías, se consideran tres aspectos principales:

- El acueducto de forma estructural en la que se incluye a los materiales para analizarlos, como la interacción entre suelo y las tuberías, la calidad de instalación y mantenimiento de la misma.
- Cargas internas y cargas externas; debido a la presión de operación y una posible sobrecarga del suelo, por ejemplo, las cargas de tráfico que podrían llegar a pasar por la línea de conducción o las cargas por congelación y por intrusión de terceros.
- Deterioro del material debido a gran parte a químicos externos e internos, ambientes bioquímicos y electroquímicos.

En la Figura 5.3 se observan los mecanismos para que se ocasione fallos en tuberías.

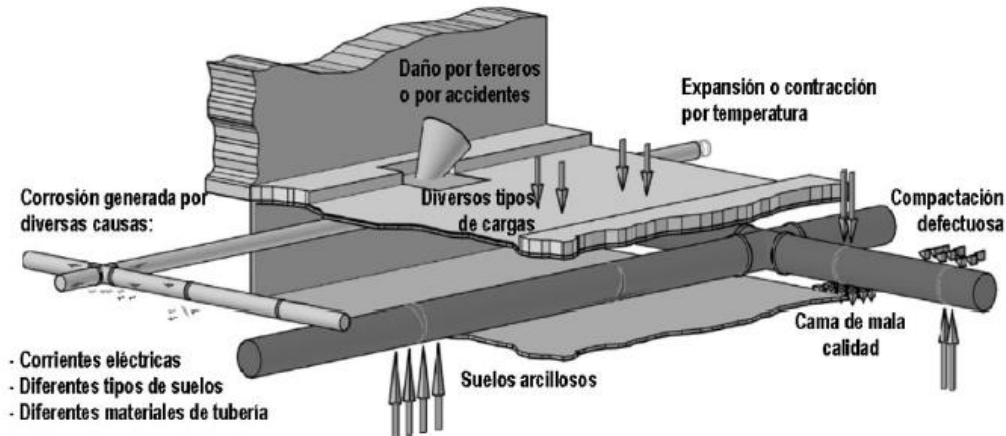


Figura 5.3. Mecanismos que generan fallos en tuberías (fuente: (Romero Chapa, 2013))

Existen algunos casos donde se dejan los tanques de almacenamiento descubiertos y esto hace que sean susceptibles a organismos patógenos desde fuentes difusas.

- Fuentes Difusas

Fuentes de contaminación que están dispersas y no tienen un único punto de origen o que no acceden a un curso receptor desde un desagüe concreto. Los contaminantes suelen ser arrastrados de la tierra por la escorrentía del agua de lluvia. Son fuentes no localizadas de contaminación destacadas la agricultura, zonas urbanas y minerías (Glosario General, 2009).

Entre las fuentes contaminantes más comunes tenemos desechos de roedores y aves que como se sabe son portadoras de enfermedades, también se encuentran organismos patógenos en el polvo, algas y desechos en general.

Las instalaciones de almacenamiento cubiertas están mejor protegidas que los tanques abiertos, lo descrito no evita que se puedan contaminar por organismos patógenos suspendidos en el aire y que entren a través de ventilaciones, también en una tapa o juntas mal instaladas que no tengan cierre adecuado. Los patógenos pueden ingresar por infiltración desde el subsuelo o por agua estancada sobre la superficie.

En lo referente a las tuberías se tiene que verificar que se encuentren en buen estado, pero no solo eso, se tienen que mantener durante el almacenamiento en lugares limpios,

mucha de la contaminación proviene de la suciedad del lugar donde las almacenan por ejemplo barro, desechos y agua contaminada. La Figura 5.4 muestra el proceso de la intrusión en una línea de conducción.

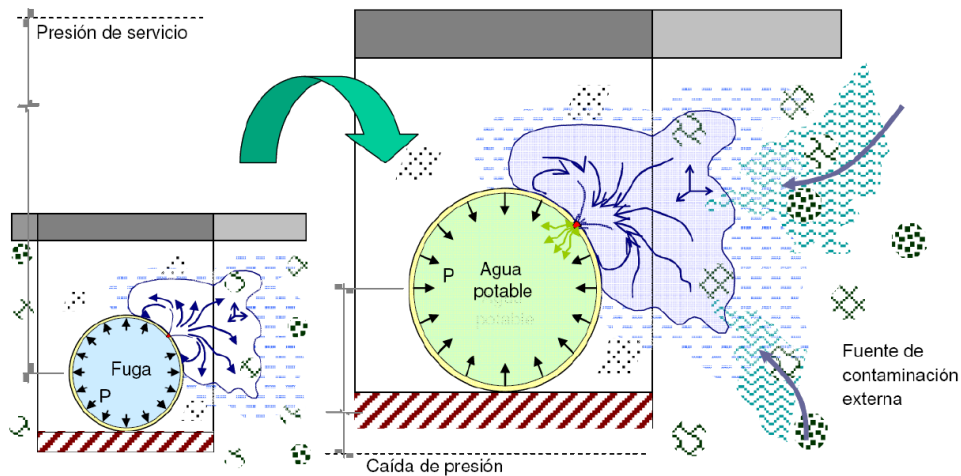


Figura 5.4. Proceso de intrusión patógena en líneas de conducción (fuente: (Martínez Pujol, 2014))

En cuanto a la construcción y mantenimiento los problemas se dan en las juntas y zanjas que son susceptibles a contaminación, junto a esto la humedad del suelo que es provocada por una fuga de agua es claramente una fuente de contaminación de agua.

Existen desastres naturales todo el tiempo y es un factor bastante importante de contaminación en una red de distribución de agua:

- Los sismos causan un gran movimiento de tierra muchas veces esto causan fallos en las tuberías y almacenamientos, en algunas ocasiones no sólo fallas sino también roturas. La Figura 5.5 se muestra una serie de fallas debido a efectos sísmicos.

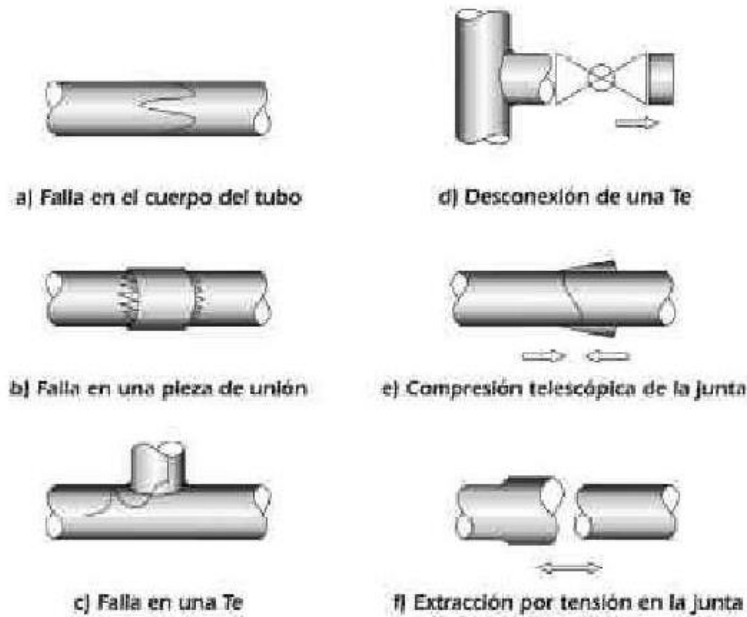


Figura 5.5. Tipos de fallas en tuberías debido a efectos sísmicos (fuente: (Ballantyne, 2005))

- Las corrientes de agua durante las inundaciones pueden arrastrar suelos hacia conducciones causando roturas, además que esto causa arrastre de agua contaminada con agua residual u otro tipo de contaminante.
- Los tornados y ciclones pueden dañar las líneas de conducción cuando el suelo se ve alterado debido a las caídas de árboles u postes eléctricos.

La ocurrencia de los eventos transitorios de presiones negativas en las tuberías de los sistemas de distribución es causada por cambios repentinos en la velocidad de agua, típicamente causados por paros en equipos de bombeo, roturas principales o flujos contra incendios. Durante un evento de presión negativa, el agua contaminada y los suelos exteriores pueden entrar a la tubería a través de grietas, sellos o fugas en las tuberías (Romero Chapa, 2013).

5.1.2 Fallas en tuberías

En un acueducto ya sea a gravedad o por bombeo existen fugas de diferentes formas y dimensiones que se encuentran a lo largo de las tuberías, evidentemente habrá tramos

donde existen más fugas y otros menos, todo esto depende del material de las tuberías y condiciones de suelos. La Figura 5.6 muestra diversos fallos en tuberías.

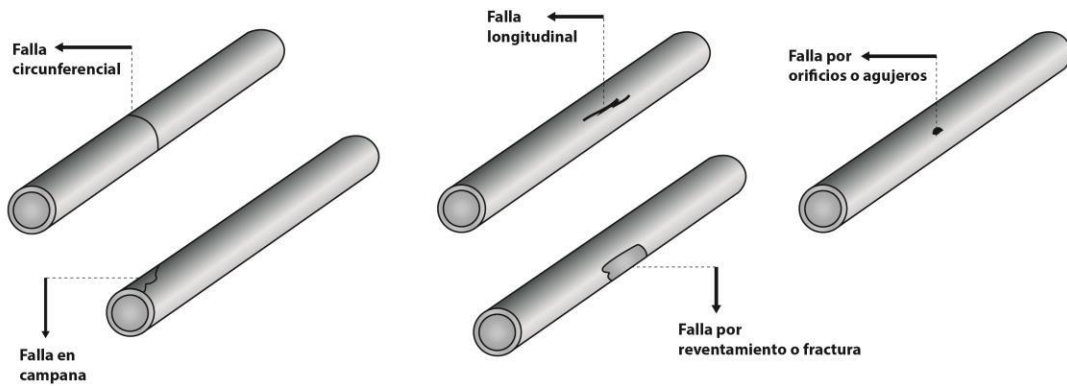


Figura 5.6. Diversos tipos de fallas en tuberías (fuente: página AIMPLAS)

Existen muchas fuerzas externas a las cuales están expuestas las tuberías que tienen influencia en los fallos en las tuberías. Algunos ejemplos podemos observarlos en la Figura 5.7.

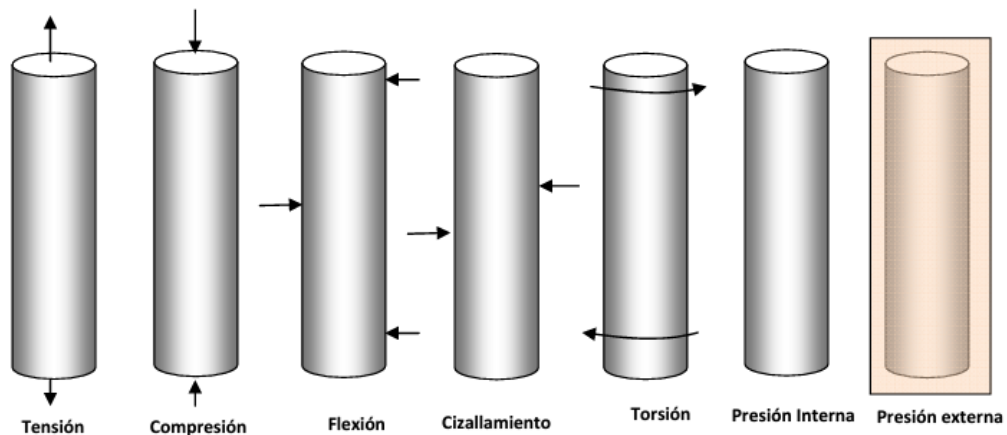


Figura 5.7. Cargas tipo, aplicadas en tuberías (fuente: Penspen Defect Assesment)

5.1.3 Fuentes contaminantes

Cuando existe un incremento de bacterias dentro de un sistema de distribución tiene una serie de fuentes probables para que exista el fenómeno de la intrusión. Algunas de las fuentes donde existe la intrusión son:

- Los niveles freáticos superficiales que perjudican en muchas formas a la línea de conducción ya que sus paredes están muy cerca de la superficie, pueden causar presión en las paredes de tuberías y estructuras que están en constante exposición.
- Las zonas de inundación donde se forman aguas estancadas que van acumulando de forma constante varios tipos de bacterias.
- El mismo caudal que se llega a fugar por la misma línea de conducción.
- El agua que proviene del saneamiento y que llega a fluir por los medios porosos de las zonas donde pueden existir fugas en las tuberías de distribución. En muchos países existen normas para la instalación de las diversas tuberías como de agua potable, saneamiento, transporte de gas, etc., pero por la excavación muchas veces es complicado cumplir estas normas y se llegan a cruzar varias de estas tuberías, tanto las de saneamiento como las de gas que pueden ser fuentes contaminantes. En la Figura 5.8 se muestra una disposición común de tuberías en zonas urbanas.



Figura 5.8. Disposición común de tuberías en una zona urbana (fuente: (Martínez Pujol, 2014))

- Si la línea de conducción llega a pasar por algún tipo de riego llega a adoptar contaminantes como fertilizantes, nitratos, etc.

5.1.4 Situación de depresión

Los eventos transitorios tienen una gran importancia en la calidad del agua y sobre todo en la salud. Cuando existe un evento transitorio con baja presión como un fallo en la

impulsión o una rotura de una tubería, esto tiene el potencial de causar una intrusión de patógenos en el agua y ocasionar una contaminación subterránea hacia la tubería por las fugas en juntas o roturas. Las presiones negativas introducen el retorno de agua no potable. La Figura 5.9 muestra una intrusión patógena gráficamente.

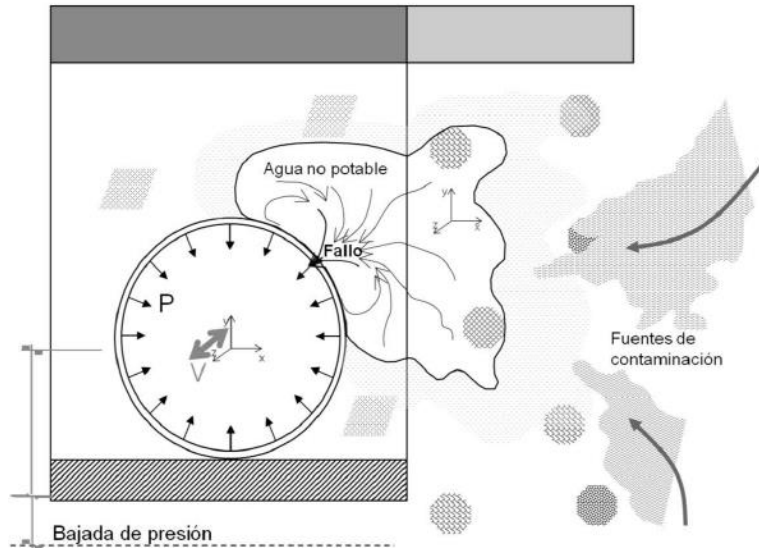


Figura 5.9. intrusión patógena a través de una fuga por presiones negativas

La intrusión puede ocurrir como consecuencia de escenarios transitorios, muchos de ellos ocasionados por fallos debajo del nivel freático.

La depresión también aparece en líneas de conducción y no está ligada a fenómenos transitorios, por ejemplo, si se llega a diseñar una línea de conducción en la que los caudales de diseño están generando grandes pérdidas de carga y las cotas de algunos puntos son altos, obviamente aparecen presiones negativas en el interior de la línea de conducción de forma permanente esto es conocido como sifón.

Entre los eventos de intrusión que han sido mencionado los que se consideran de alto riesgo se presentan en los eventos transitorios de presión y también en las zonas de rotura.

5.2 Inconvenientes de intrusión patógena

El incremento de bacterias dentro del sistema de distribución tiene diversos factores ya después que ocurrió el fenómeno de intrusión, estos factores están atados a un mal proceso

de desinfección y una gran posibilidad de crecimiento de bacterias una vez que son parte de las aguas distribuidas.

Cuando las bacterias llegan a ingresar a los acueductos causan enfermedades, cuando las bacterias coliformes se encuentran dentro llegan a sobrevivir y ser trasportados con el agua distribuida o en su defecto se pegan en las paredes de las tuberías.

En la Tabla 5.2 se presentan algunos efectos a la salud que representan estos organismos patógenos que llegan a ser distribuidos por la línea de conducción, y como pueden llegar a afectar a la salud de la población si se ocasiona un evento de intrusión patógena.

Tabla 5.2. Microorganismos potenciales para riesgo de la población debido a intrusión patógena (Organización Mundial de Salud, WHO, 2004)

Microorganismo	Efectos en la Salud
Cryptosporidium	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).
Giardia	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.
Norovirus	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.
E.Coli O157:H7	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
Campylobacter jejuni	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)	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)
Legionella	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).
Salmonella typhimurium	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.

Una de las enfermedades que se presenta es la Legionella o enfermedad del legionario, esta bacteria a niveles bajos se encuentra en ambientes hídricos. El problema que existe con

esta bacteria es cuando se encuentra en grandes cantidades se produce como un agente aerosol por aguas contaminadas. Esta bacteria existe en ambientes acuáticos naturales.

La *Camylobacter jejuni* es el agente causal más frecuente identificado en gastroenteritis de los seres humanos, debido a que la mayoría de los casos ocurre en los hogares por el consumo de agua sin hervirla, por eso se recomienda buenas prácticas de higiene.

5.3 Posibles soluciones a intrusión patógena

Existen parámetros que se establecen en cada país con valores permisibles de calidad de agua que usualmente se basan en las recomendaciones de la Organización Mundial (OMS) y en condiciones preventivas para mantener la salud de la población estable. La calidad de agua siempre será verificada por una entidad competente.

El principal mecanismo que desata la intrusión patógena es evidentemente una falta de mantenimiento en los acueductos para luego tener una adecuada distribución del agua, las subidas y bajadas de presión, cambios de velocidad, etc.

Una forma para solucionar dicho problema es determinar cuál es la cantidad de volumen de agua por intrusión patógena, así se sabrá qué tan afectada esta la línea de conducción.

5.3.1 Volumen de agua por intrusión patógena

Se sabe que en las tuberías existen subidas y bajadas de presiones en los acueductos, esto puede ocasionar la entrada de una fuente externa de contaminación.

A lo largo de los años se han realizado estudios, tanto en laboratorios, como en modelaciones numéricas para calcular la intrusión patógena, las diferencias entre las estimaciones de ambos métodos son muchas veces producidas por errores de laboratorio, es decir errores involuntarios o errores de medición. Si todo esto se lleva a un sistema real de abastecimiento existen muchos factores diferentes que van a determinar el volumen introducido, como el número de lugares con presiones mayores o menores internas que hacen el cambio en la línea de distribución, también la cantidad y tamaño de los orificios que existan, lugares donde existe esta interacción tan cercana con el suelo contaminado, duración de eventos climáticos, etc.

Mora (2011) cómo se explicó en el estado de arte, realizó una modelación con el propósito de obtener valores cuantificables donde resume todo a tres puntos específicos, que vamos a volver a citar por la importancia de los mismos.

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.

Para determinar el caudal de intrusión por transitorios hidráulicos se presentan varias consideraciones, los tres puntos anteriormente mencionados y junto con el trabajo de Basner et al. (2011) ayuda a una mejor comprensión.

Esta revisión proporciona una caracterización de las causas, magnitudes, duraciones y frecuencias de los eventos de presiones bajas y negativas; vías de entrada de patógenos; ocurrencia de patógenos en fuentes externas de contaminación; volúmenes de agua que puede ingresar por las diferentes vías, destino y transporte de patógenos de las vías de entrada hasta los grifos de los clientes; exposición a patógenos de las poblaciones que consumen agua potable y el riesgo asociado con la exposición de patógenos (Besner et al., 2011).

Se tienen varios pasos para determinar un caudal de intrusión:

- PRIMERO: Se tiene que hacer una modelación precisa de eventos de presiones negativas por los transitorios con aire atrapado, toda esta parte esta detallada en el capítulo 4 de este documento, es decir el encontrar los puntos donde existe aire atrapado.
- SEGUNDO: En un sistema real de distribución hay diferentes factores que determinen un volumen introducido, el número y tamaño de los orificios es impredecible en un acueducto, pero se determinó que para poder estimar volúmenes de intrusión la Ecuación 5-1 que es la de orificios es muy conveniente para estos casos.

$$Q_{intrusión} = C_D A \sqrt{2g\Delta h} \quad \text{Ecuación 5-1}$$

Donde:

$Q_{intrusión}$ = caudal de intrusión (m^3/s)

C_D = coeficiente de descarga (diferente en cada caso)

A = área del orificio (m^2)

Δh = diferencia entre las cargas de presión externa e interna (m)

Al usar la Ecuación 5-1 se verifica que el volumen de intrusión no depende tanto del cambio de presiones, sino depende más del tiempo que llega a durar el evento, es decir que mientras más dure el cambio de presiones el volumen de intrusión será mayor lógicamente.

Como conclusión podríamos decir que los acueductos que tienen bajas presiones de mayor duración son más expuestos a tener una intrusión patógena.

- TERCERO: Con la finalidad de poder calcular el volumen de intrusión la mayor parte de los modelos de transitorios establecen que el tamaño de cada nodo del sistema y del diámetro se calculan de acuerdo a un porcentaje de fuga; por ejemplo, se usa el 20% de pérdida por fugas.

5.4 Caso de estudio para Intrusión patógena

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. Se realizó las simulaciones en el programa Allievi. 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 5.10 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. (2010) (Ecuación 4-2), se encontraron 3 puntos que podrían acumular aire.



Figura 5.10. Perfil del acueducto a bombeo del caso de estudio

Haciendo uso de la información del Capítulo 4, aplicando la Ecuación 4-2 y la Ecuación 4-3 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.

Tabla 5.3. Ubicación y volumen de las bolsas de aire en la conducción, Gasto $Q= 2.1 \text{ m}^3/\text{s}$

Cadenamiento (m)	Elevación (m)	Vol. de Aire (m^3)	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

5.4.1 Análisis de transitorios con aire atrapado

El efecto de diferentes bolsas de aire en transitorios hidráulicos generados por el paro simultaneo de las unidades de bombeo, sin considerar dispositivos supresores de transitorios, son analizados en esta sección. Los volúmenes de aire presentados en la Tabla 5.3 son colocados en los puntos altos del sistema identificados durante el análisis. Posteriormente, una serie de simulaciones numéricas son llevadas a cabo con los datos de la Tabla 5.3 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 5.11 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

cadenaamientos mostrados en la Tabla 5.3 se observa que la envolvente de cargas piezométricas mínimas corta 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.

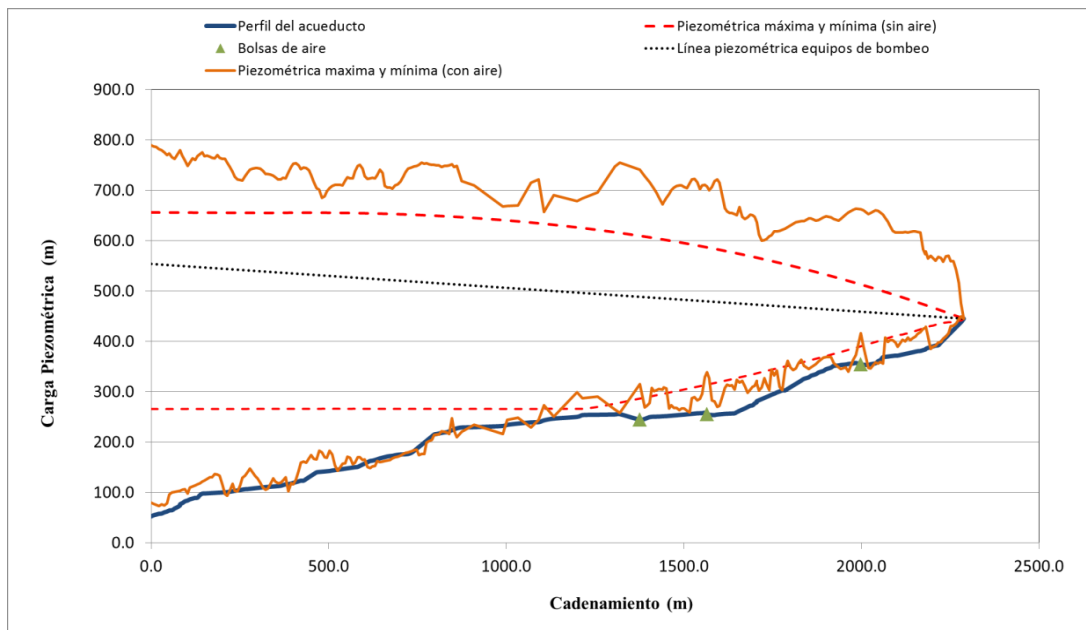


Figura 5.11. Envolventes de las líneas piezométricas máximas y mínimas $Q=2.1 \text{ m}^3/\text{s}$

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.

5.4.2 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 5.11 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 acompañadas a las bajas presiones se localizan fallas como fracturas, oficios, válvulas rotas o en mal funcionamiento tenemos el riesgo latente de una intrusión patógena. En la Figura 5.12 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.

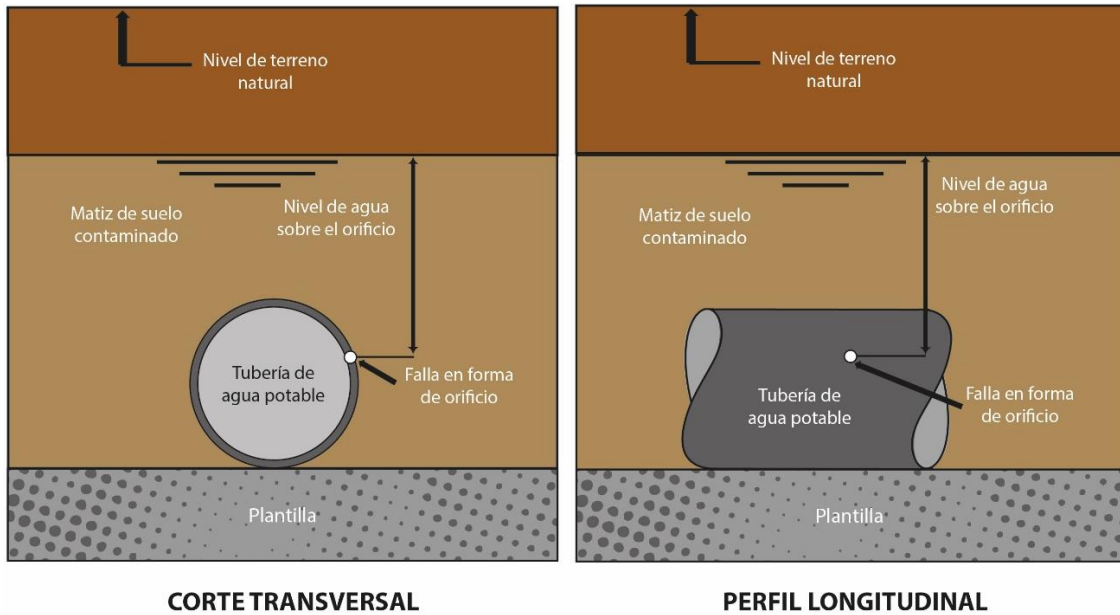


Figura 5.12. Falla en forma de orificio en una conducción

En la Figura 5.13 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 de admisión de aire succionará el líquido circundante, siendo una posible vía de entrada de organismos patógenos.

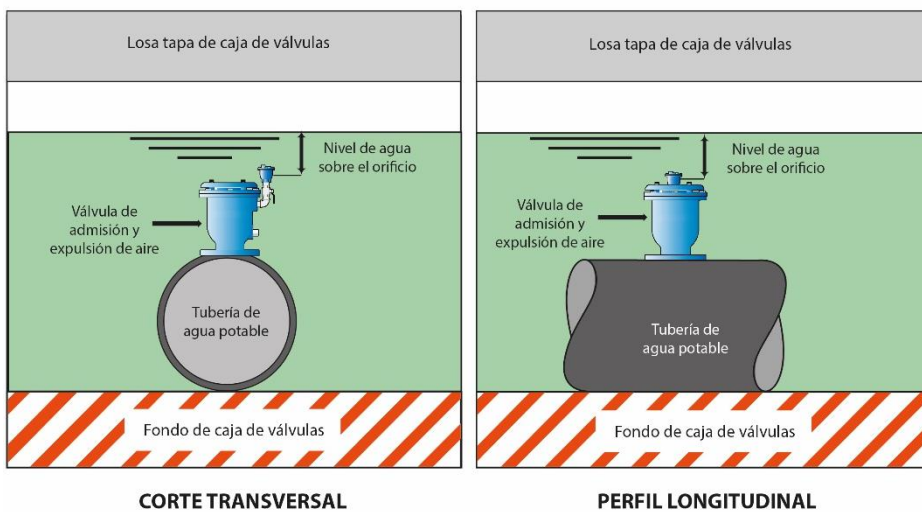


Figura 5.13. Falla de una válvula de admisión-expulsión de aire en una conducción

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 la Figura 5.12 y la Figura 5.13 las cuales tendrán repercusiones directas en la conducción.

Asimismo, se propondrá la carga hidráulica sobre la válvula u orificio según sea el caso y la duración del evento de baja presión. En la Tabla 5.4 se muestran los puntos y sus características.

Tabla 5.4. Ubicación y características de los puntos sujetos al fenómeno de intrusión patógena

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

Tomando en cuenta la información mostrada de la conducción se analizó el caudal y volumen de intrusión patógena según la Ecuación 5-1, los resultados se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Ubicación y características de los puntos sujetos al fenómeno de intrusión patógena

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

En la Figura 5.14 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.

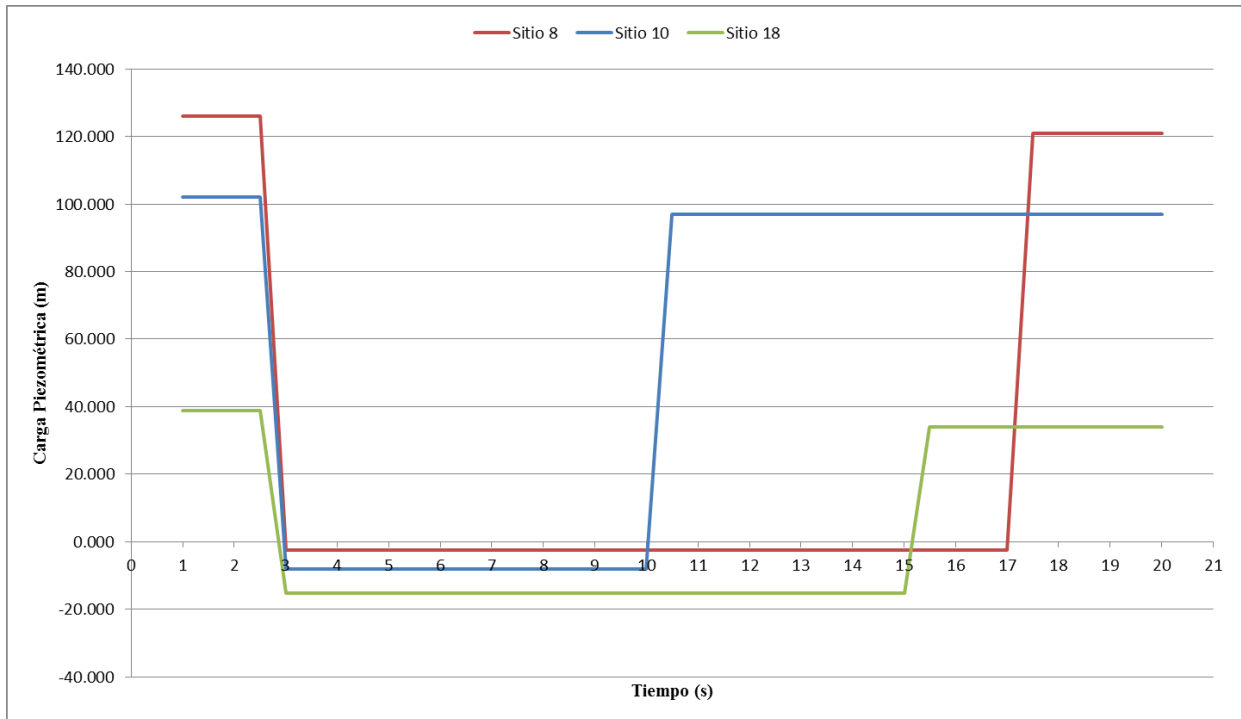


Figura 5.14. Duración de la baja presión en algunos sitios de la conducción

5.4.3 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.

Lo anterior 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 los 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 éste 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.

5.5 Recomendaciones

Se pudo observar que son indispensables tres factores para la presencia de la intrusión patógena.

- Un ambiente contaminado.
- Una vía de entrada.
- Un mecanismo desencadenante.

Entonces una buena forma de poder saber si existe o no por los mecanismos desencadenantes es usando la metodología de determinación de caudales de intrusión y volumen total de agua que llego a introducirse en la conducción, tratándolos como orificios.

Si en algún caso no llegara a existir un sistema de desinfección de efecto residual el volumen de intrusión llegaría a ser mucho mayor en la calidad de agua y esto llegaría a afectar de forma potencial al ser humano.

Con toda la información obtenida se puede concluir que las técnicas numéricas en las que se usa la base de mecánica de fluidos y sobre todo la hidráulica nos ayuda a una mejor comprensión de eventos como la intrusión patógena.

Se considera que un buen mantenimiento siempre será la mejor opción para poder verificar la calidad de las tuberías a lo largo de las líneas de conducción, si bien en muchos casos se hace imposible porque se encuentran enterradas, se recomienda el uso de radares que nos ayudan en la detección de tuberías y objetos enterrados.

6. Conclusiones

En esta tesis se presenta parte de la problemática que experimentan los acueductos que transportan agua potable. Una de las dificultades poco abordadas por los diseñadores de acueductos y los encargados del mantenimiento de estos sistemas, es el aire atrapado en conductos a presión.

El aire atrapado en acueductos es uno de los aspectos que menos se toman en cuenta, la mayoría de las veces por efectos desconocidos, por lo que se les presta poca o nula atención.

Un problema que se presenta comúnmente durante la operación de acueductos es la presencia de aire localizado en algunos puntos altos de los mismos. Esto puede generar efectos adversos en flujo establecido y transitorio.

El aire atrapado en acueductos no puede ser siempre expulsado completamente, pero al entender de qué forma entra el aire a éstos, los ingenieros pueden proponer soluciones para que la cantidad que se introduce sea menor y de ser posible nula.

En esta tesis se presentan las causas por las cuales el aire puede entrar a los acueductos y los daños que éste puede causar a los mismos. Además, se expone ampliamente una serie de estudios hechos por varios investigadores, los cuales pueden utilizarse para analizar el comportamiento del aire en las tuberías. Además, se describen los dispositivos mecánicos para expulsar el aire de las conducciones.

El análisis de un acueducto a bombeo sin dispositivos reductores de transitorios fue mostrado para explicar el efecto potencial de bolsas de aire en transitorios hidráulicos. Para el estudio sólo se simularon los transitorios generados por la falla repentina de los equipos de bombeo.

La presencia de las pequeñas bolsas de aire causa un incremento importante de las presiones transitorias máximas y mínimas a lo largo del perfil del acueducto. La simulación numérica muestra 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.

Otro problema relevante es la calidad del agua potable, que depende de la integridad de la conducción y 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. 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.

El principal problema asociado con la calidad del agua suministrada, es la posibilidad de que ésta llegue a contaminarse durante la distribución debido a la intrusión patógena. Esto puede ocurrir al existir roturas en una conducción, conjugado con la ocurrencia de depresiones en el sistema y la presencia de agentes externos, que provocan la intrusión patógena.

Siempre es indispensables considerar estos tres factores para que se dé la intrusión patógena.

1. Un entorno contaminado
2. Una vía de entrada
3. 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 (transitorios hidráulicos) 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 mínimas, como se muestra en el trabajo, son amplificadas por la presencia de bolsas de aire atrapado en el acueducto. Mediante el método de las características se determinaron las envolventes de las líneas piezométricas.

Por medio de la modelación numérica también se determinaron los caudales de intrusión y el volumen total de agua que penetró en la conducción.

Como resultados, se tiene un promedio de intrusión de $0.6109 \text{ m}^3/\text{s}$, con duración promedio de 11.96 s de los eventos de baja presión y un volumen de intrusión en la conducción de 210 m^3 , lo que representa el 29% del gasto de diseño.

Bibliografía

- Babbitt H.E. Caldwell D. H. (1939). *Laminar flow of sludge in pipes with special reference to sewage sludge*. University of Illinois Engineering Experiment Station.
- Ballantyne, O. D. (2005). *Observations on water systems and pipelines performance in the Limon area of Costa Rica due to the April 22, 1991 earthquake*.
- Besner Marie-Claude, Prevost Michèle, Regli Stig. (2011). *Assessing the public health risk of microbial intrusion events in distribution systems: Conceptual model, available data, and challenges*.
- Carlos A. Gonzales Rodriguez; Oscar Pozos Estrada. (1990). *Análisis experimental del ingreso de aire en un acueducto*.
- Clases de tubería, D. (2011). *Buenas Tareas*. Obtenido de <https://www.buenastareas.com/ensayos/Clase-De-Tuberias/1975104.html>
- Claval, V. (s.f.). *Válvulas claval*. Obtenido de <https://www.valvulasclaval.com/productos-valvulascombinadasexpulsorasdeaireyrompedorasdevacio.html>
- CONAGUA, C. N. (2 de Enero de 2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Conducción*.
- Corresponsables. (23 de MARZO de 2023). *Corresponsables*. Obtenido de <https://colombia.corresponsables.com/opinion/estrategias-para-una-gestion-del-agua-de-manera-segura-sustentable-y-responsable>
- Dominguez B.; Souyris R.; Errazuriz J. (1994). *Análisis energético del transporte hidráulico de sólidos en tuberías*. Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- Durand, R. (1953). *Basic relationship of the transport of solid in pipes - experimental research*. 5th Congress of the IAHR.
- Falvey, H. T. (1980). *Air Water Flow in Hydraulic Structures. Engineering Monograph No 41*.
- Förster, G. (1997). *Druckstosdämpfung durch große Luftblasen in Hochpunkten von Rohrleitungen. Mitteilungen des Institutes für Wasserbau der Universität Stuttgart*.
- Franco, V. (1991). *Trasporte de sólidos por tuberías, estado actual del conocimiento*.
- GEOSAI, S. A. (2021). <https://geosai.com/es/tuberia-pead/>.
- Glosario General. (2009). *Boletín Agrario*. Obtenido de <https://boletinagrario.com/ap-6,contaminacion+de+fuentes+difusas,4899.html>
- Haro, C. (s.f.). *Valvulas y termoplásticos industriales, S.A. de C.V.* Obtenido de <https://www.tuberiadepvc.com.mx/>
- HR Wallingford, W. w. (2005). *Air Problems in pipelines a design manual*.

- Idelchik, I. (1966). *Handbook of hydraulic resistance*. CRC PRESS.
- Jesús Mora Rodríguez; Helena M. Ramos; Amparo López Jiménez. (2013). Eventos de Intrusión Patógena en sistemas de distribución de agua Potable. *Ciencia del agua*.
- Kent J., C. (1952). *The entrainment of air by water flowing in circular conduits with*. Universidad de California, Berkley.
- Kimeyer G. J.; Friedman M.; Howie D.; LeChevalier M.; Abbaszadegan M.; Karim M.; Funk J. (2001). Pathogen Intrusion Into Distribution Systems. *American Water Works Association Research Foundation (AWWARF)*.
- Kottmann, A. (1992). Druckstosermittlung in der Wasserversorgung. *Ehningen, Expert-Verlag*.
- López P.A.; Mora J. J.; Martínez F. J. . (2008). Modelling external intrusion into water distribution systems. International Congress on Environmental Modelling and Software 2008. *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs)*.
- Luis Alfonso Ortiz Nuñez; Rafael Carmona Paredes. (2000). *Pérdidas por fricción en la conducción de agua con contenido de sólidos*. Ingeniería del Agua.
- Martin C., S. (1976). Entrapped air in pipelines. *British Hydromechanics Research Association*.
- Martín, 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*.
- Martínez Pujol, A. R. (2014). Intrusión Patógena en conductos a presión causada por transitorios con aire atrapado. México.
- Matousek, V. (1997). *Flow Mechanism of Sand - Water Mixtures in Pipelines*. Stellingen.
- Metcalf L. ; Eddy H. P. (1991). *Wastewater engineering, treatment disposal and reuse*. McGraw Hill.
- Miller, D. S. (1936). *Internal Flow Systems* .
- Mora, J. J. (2011). *Modelación de la Intrusión patógena a través de fallos y su implicación en la red de distribución de agua*. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- Mulbarguer M. C.; Copas S. R. Kordic J. R.; Cash F. M. (1991). *Pipe friction losses for wastewater sludges*. Journal of Water Pollution Control Federation.
- Ning Chien; Zhaohui Wan. (1999). *Mechanics of sediment transport*. ASCE Press.
- Ortiz, L. A. (2002). *Pérdidas de capacidad de conducción en tubos con transporte de sólidos*.
- Oscar Pozos Estrada; Yuri Fairuzov Alejandro Sanchez Huerta; Eduardo A. Rodal Canales. (2012). *Manual de Análisis de la problemática del aire atrapado en acueductos para mejorar su eficiencia*.

- PAm, S. c. (s.f.). *Soluciones completas de canalización PAm*. Obtenido de <https://www.pamline.es/valvulas/seccionamiento/valvulas-compuerta-asiento-elastico>
- PIECSA. (s.f.). *PIECSA*. Obtenido de <https://piecsa.mx/conozcan-los-tipos-de-tubos-de-acero-que-hay/>
- Rafael Carmona Paredes; Lius Alfonso Ortiz Nuñez; Alejandro Sanchez Huerta. (5-16 de abril-junio de 2002). Efectos dinámicos y temporales en la redicción de las capacidades de conducción en grandes acueductos. pág. 12.
- Rodríguez, J. d. (2011). *Modelación de la Intrusión Patógena a través de fallos y su implicación en la red de distribución de agua*.
- Romero Chapa, M. A. (2013). Problema en Redes de abastecimiento de agua potable.
- Rosales Rice; Roberto C.; James O. (2002). Manual de Mantenimiento Industrial. Tomo III. México.
- Sanchez A., Sanches J.A., Gonzales C., . (Diciembre de 2000). Mediciones posteriores a la limpieza de la tubería del tramo de gravedad del Acueducto Chapala - Guadalajara. *Reporte técnico II*.
- Stephenson, D. (1997). Effects of air valves and pipework on water hammer pressure. *Journal of Transportation Engineering*.
- Swamee, P. (1995). *Design of sediment transporting pipeline*. Journal of hydraulics engineering.
- Thomas, S. (2003). Air Management in Water Distribution Systems A New Understanding of Air Transfer.
- TRABER, G. (2011). *Grupo TRABER*. Obtenido de <https://www.grupotraber.com/tubos-concreto/>
- Turian R.; Ma T; Hsu F.; Sung D.; Plackmann G. (1998). *Flow of concentrated non-Newtonian Slurries: Friction losses in bends, fittings, valves and venturii meters*. International Journal of Multiphase Flow.
- VAYREMEX. (s.f.). Válvulas eliminadoras de aire. México.
- Walski, T. M. (1994). Predicting Pipe Failure Effects in Water Distribution Networks.