



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

ANÁLISIS DE LA UTILIZACIÓN DE BOLSAS DE AIRE PARA REDUCIR LOS EFECTOS
TRANSITORIOS EN CONDUCTOS A PRESIÓN.

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

PRESENTA:
FERNANDO RUEDA RUBIO

TUTOR
DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Ramón Domínguez Mora
Secretario: Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles
1er Vocal: Dr. Óscar Pozos Estrada
2do Vocal: Dr. Adrián Pedrozo Acuña
3er Vocal: Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez

Lugar donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Óscar Pozos Estrada

FIRMA

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	8
1. Descripción y diseño de acueductos o líneas de conducción.	9
1.1. Consideraciones técnicas.	9
1.2. Componentes de un acueducto o línea de conducción	11
1.3. Problemas que se presentan en tuberías	16
1.4. Diseño de acueductos.	19
1.4.1. Ecuación para flujo permanente.	19
1.4.2. Pérdidas de energía por fricción en la conducción.	20
1.4.2.1. Ecuación de Darcy-Weisbach.	20
1.4.2.2. Ecuación modificada de Colebrook-White.	20
1.4.3. Pérdidas locales.	21
1.5. Diseño hidráulico.	22
1.5.1. Línea de conducción por bombeo.	22
1.5.2. Línea de conducción por gravedad.	23
1.6. Análisis de diámetro económico.	24
1.7. Transitorios hidráulicos.	27
1.7.1. Regímenes que se pueden presentar en tuberías a presión.	27
1.7.2. Celeridad. Velocidad de propagación de la onda de presión.	29
1.7.3. Dispositivos supresores de transitorios.	30
1.7.4. Separación de columna líquida.	33
1.7.5. Método de las características.	35
2. Aire atrapado en tuberías.	37
2.1. Causas del aire atrapado.	37
2.2. Efectos ocasionados por el aire atrapado.	37
2.3. Métodos de remoción de aire.	38
2.3.1. Medios hidráulicos.	38
2.3.2. Medios mecánicos.	42
2.3.2.1. Válvulas de aire.	42
2.3.2.2. Válvulas de aire no cinéticas.	44
2.3.2.3. Válvulas de aire cinéticas.	45
2.4. Localización de los posibles puntos de acumulación de bolsas de aire en conductos a presión.	46
2.5. Comportamiento del aire en conductos a presión.	48
3. Fenómenos transitorios con aire atrapado.	49
3.1. Efecto de las bolsas de aire en transitorios hidráulicos	49
3.2. Modelo numérico para el efecto de bolsas de aire en transitorios hidráulicos.	50

3.2.1.	Procedimiento de cálculo.	53
4.	Caso de estudio: Acueducto El Cuchillo-Monterrey.	56
4.1.	Análisis transitorios.	58
4.1.1	Momento de inercia de las bombas.	59
4.1.2	Operación transitoria de las bombas.	60
4.1.3	Válvulas de movimiento controlado.	61
4.1.4	TRANS 2010.1.0: descripción del software	63
4.1.5	Modelo del transitorio hidráulico para el paro de cinco bombas por planta.	66
4.2	Adecuación temporal del sistema de control de transitorios.	69
4.2.1	Modelo del transitorio hidráulico para paro de dos bombas por planta.	69
4.3	Discusión de resultados	76
5.	Conclusiones y recomendaciones.	82
	Bibliografía	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de una conducción por bombeo.	10
Figura 1.2. Esquema de una conducción por gravedad.	10
Figura 1.3. Junta tipo Dresser	11
Figura 1.4. Carrete de tubería.....	11
Figura 1.5. Extremidad campana de PVC.....	12
Figura 1.6. Tee reducción de fo. fo.....	12
Figura 1.7. Cruce de PVC.....	12
Figura 1.8. Codo de 45° de fo.fo.	13
Figura 1.9. Reducción de fo.fo.	13
Figura 1.10. Cople de PVC CED-40.	13
Figura 1.11 Tapón de PVC.....	14
Figura 1.12. Válvula de admisión y expulsión de aire.	14
Figura 1.13. Válvula expulsión de aire.	14
Figura 1.14 Válvula de aire combinada de doble cuerpo.....	15
Figura 1.15 Válvula de no retorno o tipo “check”.....	15
Figura 1.16. Válvula de mariposa	16
Figura 1.17. Derrame de una torre de oscilación localizada en la línea alterna del Sistema Cutzamala (Pozos et al., 2012).	18
Figura 1.18. Esquema de una conducción por bombeo.	25
Figura 1.19. Comportamiento de los costos en función de los diámetros.	26
Figura 1.20. Descripción gráfica del fenómeno del golpe de ariete ante un cierre instantáneo.	28
Figura 1.21. Cámara de oscilación.....	31
Figura 1.22. Cámara de aire.	32
Figura 1.23. Esquema del funcionamiento de un tanque unidireccional.	32
Figura 1.24. Instalación con válvulas anticipadoras de presión.	33
Figura 1.25. Separación de columna producida por el cierre rápido de una válvula.	34
Figura 1.26. Separación de columna en un dispositivo experimental por el cierre rápido de una válvula.	34
Figura 1.27. Diagrama x,t.	35
Figura 1.28. Método de las características por elementos finitos.	36
Figura 2.1. Velocidad mínima para la remoción de bolsas de aire, Gandenberger (1957).	41
Figura 2.2. Movimiento de burbujas y bolsas de aire en conductos cerrados fluyendo llenos, Falvey (1980).	41
Figura 2.3. Fuerzas que se presentan durante el movimiento de una bolsa de aire, Pozos et al. (2010).	46
Figura 2.4. Bolsa de aire en una sección de control.	48
Figura 3.1. Esquema y notaciones para el análisis.	51
Figura 3.2. Ejemplo del cálculo de la pendiente.	54
Figura 4.1. Perfil del Acueducto El Cuchillo-Monterrey.....	58
Figura 4.2. Coeficiente de pérdida de carga en función del porcentaje de apertura de las válvulas de control del acueducto El Cuchillo-Monterrey.	62
Figura 4.3. Ajuste de un polinomio de grado 5 a los puntos de $\log(k/k_{min})$ vs τ para la obtención de los coeficientes a_i	63
Figura 4.4. Pantalla de inicio del TRANS 2010.1.0	64
Figura 4.5. Captura de pantalla del TRANS 2010.1.0. Carga de datos para la simulación.	65
Figura 4.6. Pantalla al término de la simulación	65
Figura 4.7. Piezométricas presentadas durante la simulación en el tramo PB0.	66
Figura 4.8. Envolventes de las piezométricas del tramo PB0.....	67
Figura 4.9. Envolventes de las piezométricas del tramo PB1.....	67

<i>Figura 4.10. Envolvertes de las piezométricas del tramo PB2.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 4.11. Envolvertes de las piezométricas del tramo PB3.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 4.12. Envolvertes de las piezométricas del tramo PB4.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4.13. Envolverte de las piezométricas tramo PB0 sin admisión de aire.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 4.14. Envolverte de las piezométricas tramo PB1 sin admisión de aire.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 4.15. Envolverte de las piezométricas tramo PB2 sin admisión de aire.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 4.16. Envolverte de las piezométricas tramo PB3 sin admisión de aire.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 4.17. Envolverte de las piezométricas tramo PB4 sin admisión de aire.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 4.18. Envolvertes de las piezométricas del tramo PB0 con admisión de aire.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 4.19. Envolvertes de las piezométricas del tramo PB1 con admisión de aire.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 4.20. Envolvertes de las piezométricas del tramo PB2 con admisión de aire.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 4.21. Envolvertes de las piezométricas del tramo PB3 con admisión de aire.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 4.22. Envolvertes de las piezométricas del tramo PB4 con admisión de aire.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 4.23. Presiones calculadas y registradas en la descarga de las bombas del tramo PB0.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4.24. Presiones calculadas y registradas en la válvula propuesta del tramo PB0.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.25. Presiones calculadas y registradas en la descarga de las bombas del tramo PB1.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.26. Presiones calculadas y registradas en la válvula propuesta del tramo PB1.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 4.27. Presiones calculadas y registradas en la descarga de las bombas del tramo PB2.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 4.28. Presiones calculadas y registradas en la válvula propuesta del tramo PB2.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4.29. Presiones calculadas y registradas en la descarga de las bombas del tramo PB3.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4.30. Presiones calculadas y registradas en la válvula propuesta del tramo PB3.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.31. Presiones calculadas y registradas en la descarga de las bombas del tramo PB4.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.32. Presiones calculadas y registradas en la válvula propuesta del tramo PB4.....</i>	<i>81</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1. Parámetros de diagnóstico de incrustación (MAPAS-CONAGUA 2007).</i>	19
<i>Tabla 1.2. Parámetros de diagnóstico de corrosión.</i>	19
<i>Tabla 1.3. Valores de k.</i>	22
<i>Tabla 1.4. Valores de k_c para una contracción brusca.</i>	22
<i>Tabla 1.5. Módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y celeridad para diferentes materiales de tuberías.</i>	30
<i>Tabla 4.1. Resumen de características por tramos del acueducto El Cuchillo-Monterrey.</i>	58
<i>Tabla 4.2. Características de los equipos de bombeo de la planta PBO.</i>	59
<i>Tabla 4.3. Valores del momento de inercia: los especificados por el fabricante y los utilizados en el diseño original.</i>	60
<i>Tabla 4.4. Curvas características de las bombas del acueducto El Cuchillo-Monterrey.</i>	61
<i>Tabla 4.5. Dimensionamiento y localización de las válvulas adicionales de admisión de aire.</i>	72

RESUMEN

El diseño de las líneas de conducción es una de las partes más importantes de un sistema de abastecimiento de agua potable. Hacerlo bien implica generar un sistema eficiente y eficaz. Para esto es necesario estudiar adecuadamente todas las aristas que el correcto diseño de la conducción implica. Una de ellas involucra el análisis de la problemática del ingreso de aire en este tipo de sistemas.

Operaciones tales como el llenado y vaciado del agua en los acueductos provocan que cantidades significativas de aire entren al sistema, las cuales junto a las variaciones de presión durante la operación, son algunas de las causas posibles de la aparición de bolsas de aire dentro del mismo.

Las bolsas de aire en los acueductos pueden amortiguar o amplificar de las presiones durante los fenómenos transitorios, esto dependiendo de distintos factores.

Los efectos que las bolsas de aire puedan tener durante los transitorios están en función del volumen de aire, la localización del mismo, la configuración del sistema y las causas del transitorio.

Cuando las bolsas son de gran tamaño pueden llegar a reducir las sobrepresiones durante los transitorios. Las bolsas alcanzan mayor tamaño cuando la velocidad que lleva el agua es baja.

Con el objetivo de determinar la manera en cómo afectan las bolsas de aire durante los fenómenos transitorios, se toma como caso de estudio el acueducto el Cuchillo-Monterrey. Los dispositivos supresores de transitorios colocados a lo largo de la línea de conducción fueron subdimensionados, esto porque el momento de inercia de los equipos de bombeo fue considerado incorrectamente.

Con el fin de iniciar la operación del acueducto lo más pronto posible, se puso en marcha una solución basada en el ingreso de aire a través de las válvulas de admisión con el fin de disminuir las presiones negativas que se podrían presentar. Además, se colocaron nuevas válvulas de admisión de aire para complementar a las ya existentes en zonas donde se presentaban presiones negativas.

Se realizaron mediciones de campo en cada una de las plantas de bombeo con las que cuenta el acueducto para el transitorio hidráulico producido por el paro simultáneo de dos de las cinco bombas que hay en cada planta. Las comparaciones de las mediciones en campo con el modelo numérico, demostraron que los resultados de este último son confiables cuando se simulan transitorios hidráulicos con admisión de aire.

Los resultados indican que el aire atrapado puede tener efectos beneficios durante los transitorios hidráulicos. Sin embargo, resulta importante estudiar el fenómeno de una manera más exhaustiva, para poder definir con más claridad las condiciones dentro de las cuales las bolsas de aire pueden ser usadas para mitigar los efectos de los transitorios.

Palabras clave: aire atrapado, acueductos, acueducto el Cuchillo-Monterrey.

1. Descripción y diseño de acueductos o líneas de conducción.

Entendiendo como un sistema de abastecimiento de agua potable al conjunto de diversas obras que tienen por objeto suministrar agua a una población en cantidad suficiente, calidad adecuada, presión necesaria y en forma continua, la conducción en los acueductos, es la parte del sistema que transporta el agua desde la fuente de abastecimiento o captación hasta el punto de entrega; y ésta tiene que ser realizada de manera eficiente y eficaz.

Una descripción adecuada de una línea de conducción o un acueducto dentro de un sistema de abastecimiento de agua potable es dada por el manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento (MAPAS 2007) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Se define como el conjunto integrado por tuberías, estaciones de bombeo y dispositivos de control, que permiten el transporte del agua desde una sola fuente de abastecimiento, hasta un solo sitio donde será distribuida en condiciones adecuadas de calidad, cantidad y presión.

1.1. Consideraciones técnicas.

Algunas cuestiones a considerar antes de iniciar el diseño de acueductos son los siguientes:

Por lo general se recomienda que el punto de entrega sea en un tanque de regulación, ya que así se facilita el procedimiento de diseño hidráulico de los sistemas de agua potable, se tiene un mejor control en la operación de los mismos y se asegura un funcionamiento adecuado del equipo de bombeo.

En algunas zonas rurales la entrega puede ser directamente a la red de distribución, esto cuando se ahorre una distancia considerable en la conducción y se logren presiones adecuadas en la red.

La conducción puede ser por bombeo o gravedad.

La conducción por bombeo es necesaria cuando se requiere adicionar energía para obtener la carga dinámica asociada con 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 debe proporcionar la energía necesaria para lograr la conducción del agua. Ver Figura 1.1.

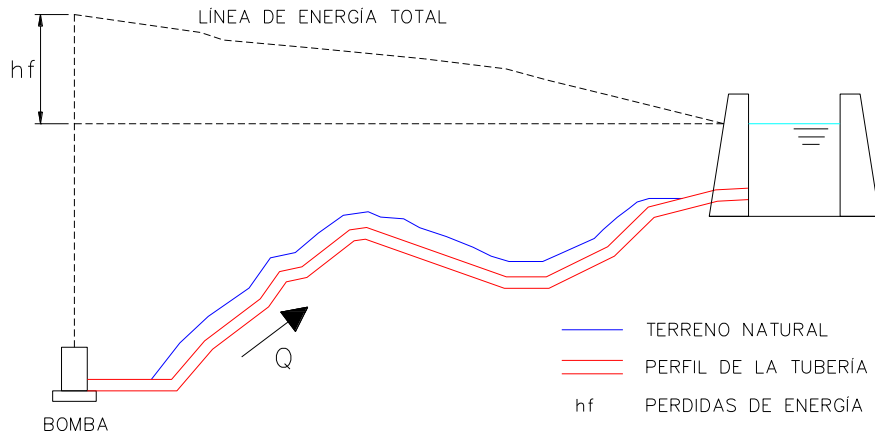


Figura 1.1. Esquema de una conducción por bombeo.

La 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, la conducción de la misma se logra por la diferencia de energías disponible. Ver Figura 1.2.

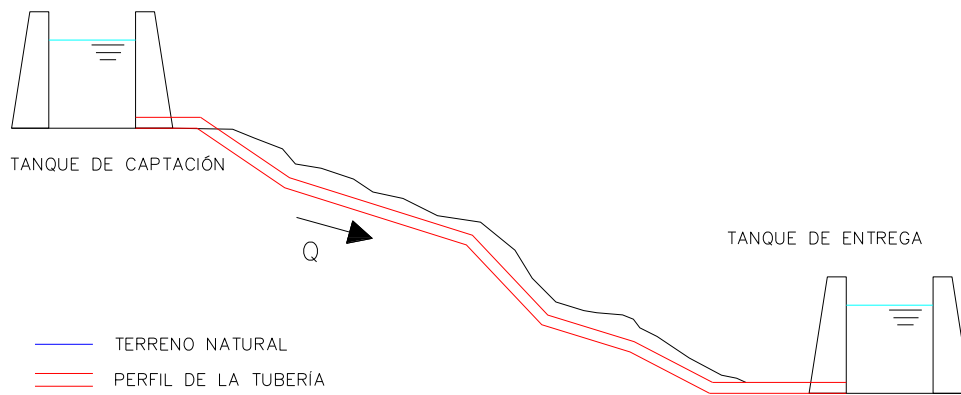


Figura 1.2. Esquema de una conducción por gravedad.

Es común el empleo combinado de estas dos formas de conducción. Esto sucede cuando la topografía del terreno obliga a que el trazo de la conducción cruce por partes más altas que la elevación de la superficie del agua en el tanque de regulación, es aquí donde conviene analizar la colocación de un tanque intermedio o de cambio de régimen para lograr la interconexión adecuada entre ambos regímenes.

Otra de las características que debe tener cualquier conducción es que sea de fácil acceso, esta puede ser paralela a algún camino existente o el construido para el mantenimiento del acueducto.

La conducción de agua por gravedad en acueductos puede efectuarse trabajando a superficie libre o a presión, siendo esta última más conveniente y la más utilizada cuando el agua es con fines de consumo humano.

La conducción por bombeo se realiza generalmente de un pozo o un cárcamo. Éstas son estructuras diseñadas para recibir y contener la cantidad de agua requerida por el equipo de bombeo, en la cual debe considerarse la velocidad de aproximación del agua, la sumergencia mínima y su geometría en relación con la localización del equipo que permita el adecuado bombeo del gasto de diseño.

1.2. Componentes de un acueducto o línea de conducción

Tuberías: En la fabricación de tuberías utilizadas en los sistemas de agua potable, los materiales de mayor uso son: acero, fibrocemento, concreto presforzado, poli (cloruro de vinilo) (PVC), hierro dúctil y polietileno de alta densidad.

Piezas especiales, tales como:

Juntas: usadas para unir dos tramos de tuberías.



Figura 1.3. Junta tipo Dresser

Carretes: son tubos de longitud corta que cuentan con bridas en los extremos para su unión. Son fabricados en fierro fundido y acero con longitudes de 25, 50 y 75 cm.



Figura 1.4. Carrete de tubería.

Extremidades: son tubos de longitud corta que se colocan sobre alguna descarga por medio de una brida en uno de sus extremos. Se fabrican en longitudes de 40, 50 y 75 cm. Para PVC, las extremidades son usualmente de espiga o campana.



Figura 1.5. Extremidad campana de PVC.

Tees: son usadas para unir tres conductos, los cuales pueden ser del mismo diámetro, o dos de igual diámetro y uno menor, en este último caso son llamadas “te reducción”.



Figura 1.6. Tee reducción de fo. fo.

Cruces: se utilizan para unir cuatro conductos, donde las cuatro uniones pueden ser del mismo diámetro, o dos mayores de igual diámetro y dos menores de igual diámetro, en este último caso son llamadas “cruz reducción”.



Figura 1.7. Cruce de PVC.

Codos: tienen la función de unir dos conductos del mismo diámetro en un cambio de dirección ya sea horizontal o vertical. Estos pueden tener deflexiones de 22.5, 45 y 90 grados.



Figura 1.8. Codo de 45° de fo.fo.

Reducciones: son usadas para unir dos tubos de diferente diámetro.



Figura 1.9. Reducción de fo.fo.

Coples: son tramos cortos de tubos de PCV o fibrocemento que se utilizan para unir las espigas de dos conductos del mismo diámetro. Pueden ser también usados en la reparación de tramos dañados.



Figura 1.10. Cople de PVC CED-40.

Tapones y tapas: se colocan en los extremos de un conducto con la función de evitar la salida de agua.



Figura 1.11 Tapón de PVC.

Válvulas, tales como:

Válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA): se usan básicamente para expulsar grandes cantidades de aire durante la puesta en marcha de los equipos de bombeo y el proceso de llenado del acueducto.



Figura 1.12. Válvula de admisión y expulsión de aire.

Válvulas de expulsión de aire (VEA): su uso está enfocado a la expulsión de pequeñas cantidades de aire durante la operación del acueducto.



Figura 1.13. Válvula expulsión de aire.

Válvulas de aire combinadas (VAC): cuentan con dos orificios, uno grande y uno pequeño, para la expulsión de aire acumulado y para proteger a la tubería de fallas por aplastamiento, cuando se presentan presiones por debajo de la atmosférica.



Figura 1.14 Válvula de aire combinada de doble cuerpo.

Válvulas de no retorno: tiene la función de evitar la circulación del flujo en el sentido contrario al definido en el diseño.



Figura 1.15 Válvula de no retorno o tipo "check".

Válvulas de seccionamiento: son usadas para controlar el flujo dentro del tubo, ya sea para impedir el paso del agua o reducir el gasto a un valor requerido. Comúnmente, son las válvulas de bola, esfera, mariposa, y compuerta.



Figura 1.16. Válvula de mariposa

Otro tipo de componentes son los utilizados para el control de fenómenos transitorios, estos son descritos en el apartado 1.7.3.

1.3. Problemas que se presentan en tuberías

Es importante considerar algunas situaciones a las que nos podemos enfrentar durante la operación de los acueductos a fin de que éstas puedan ser prevenidas lo más posible durante su diseño. Algunos problemas que se presentan en los acueductos son los siguientes:

Colapso de la tubería: este tipo de falla ocurre por lo general en tuberías de acero cuando se presentan presiones negativas, las cuales pueden ser producidas por un vaciado rápido de la tubería.

Aplastamiento de la tubería: este ocurre cuando falla el apoyo de la tubería (una silleta o un atraque) tanto en tuberías superficiales como enterradas; esta falla se produce cerca de la unión tubería-atraque.

Otra causa por la que se presenta el aplastamiento en la tubería es por un golpe accidental o vandalismo.

Desgarre de la tubería: se produce cuando la presión con la que se opera el acueducto es mayor que la de diseño, por lo que se genera un agrietamiento o fractura en la misma.

Separación de tramos de tubería: hay diversas causas como:

- *Sismos.* Se produce cuando las ondas sísmicas generan esfuerzos y deformaciones en las tuberías enterradas. Este tipo de fallas son más comunes si las juntas en las tuberías son rígidas o el material es poco dúctil o resistente. Otra falla que producen los sismos son los desplazamientos permanentes en el suelo, originado por la licuación de suelos localizadas en arenas o suelos granulares saturados, o el desplazamiento masivo del terreno en zonas topográficas con cierta inclinación del mismo.
- *Fenómenos hidrometeorológicos.* Se producen cuando la tubería está en un cauce y debido a que no está correctamente protegida se genera la socavación de la tubería durante la avenida del río; esto mismo ocurre con tuberías cercanas al mar durante algún evento meteorológico, como un huracán.

- *Fallas geológicas.* Es la que se produce en el terreno por efecto sobreexplotación de mantos acuíferos, lo que produce cavidades y posteriores colapsos; o el movimiento del terreno en una falla durante un sismo, ocasionando el desplazamiento del mismo. También puede presentarse una falla en el terreno donde se localiza un atraque o silleta.
- *Causas de origen humano.* Como el vandalismo, principalmente cuando la líneas se encuentra superficial o sin protección.

Falla de la tubería en una intersección: puede deberse al esfuerzo que se presenta en la intersección de las tuberías mal proyectadas o construidas: o falta de un atraque o mal diseño del mismo.

Falla en un codo: puede deberse al deslizamiento de la tubería en un cambio de dirección horizontal o vertical, a causa de una falla en el atraque o falla de éste.

Tubería cubierta: Se refiere al riesgo que corre una tubería construida superficialmente de quedar enterrada cuando se encuentra en una zona de materiales sueltos, como puede ser arenas, zonas desérticas, etc., o bien, debido a una falla del terreno.

En las tuberías enterradas es importante que la zona del trazo se encuentre seca ya que la humedad puede ser causa de una fuga. Esto sucede en las tuberías de acero, donde al estar en contacto con el agua y oxígeno se produce la corrosión, la cual debilita la tubería y puede generar fallas en ella.

Disminución del gasto: puede ser provocado por fugas u obstrucciones dentro de la tubería.

Las fugas pueden darse por diversas causas, como roturas o separación de tubería, o bien, a causa del derrame de las estructuras de protección.

El derrame de las estructuras de protección puede ocurrir por la presencia de aire atrapado en algún punto del perfil de la línea. Pozos et al. (2012) estudia un caso en la línea alterna del Sistema Cutzamala donde se presenta esto. Se analiza el caso de una torre de oscilación que presentó un derrame a través de su corona (Figura 1.17) después de que se incrementara el gasto en la línea de conducción.

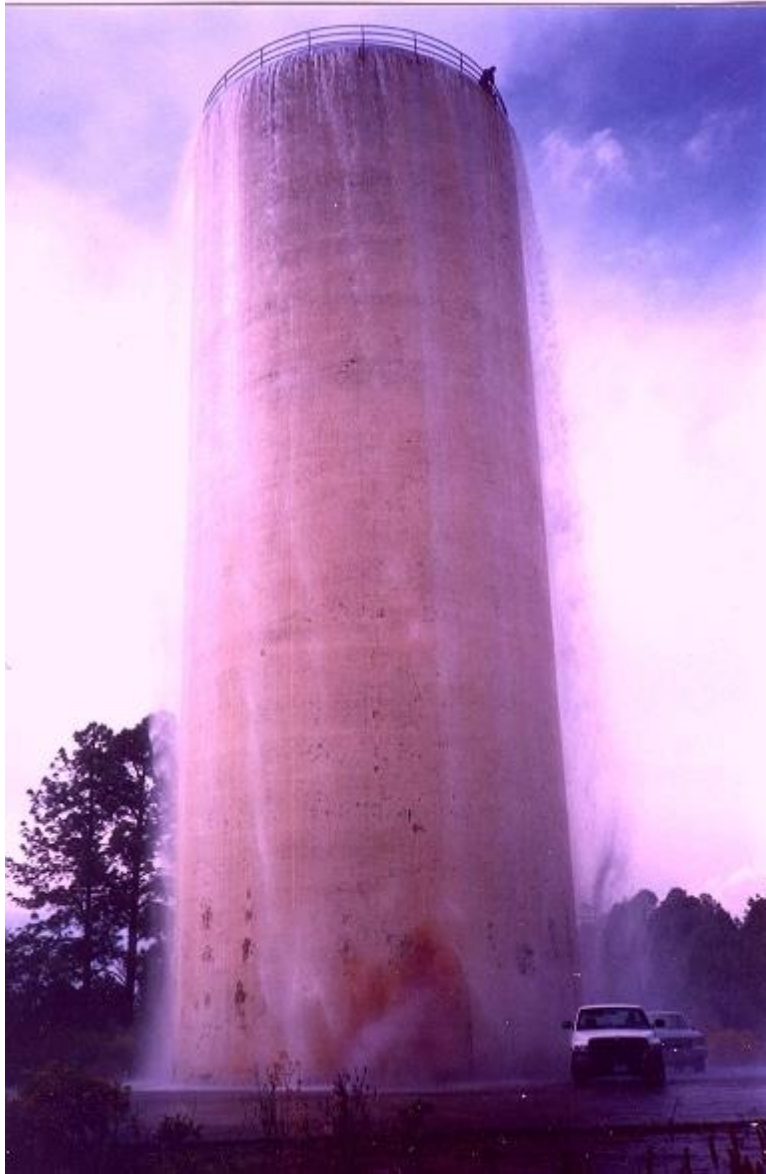


Figura 1.17. Derrame de una torre de oscilación localizada en la línea alterna del Sistema Cutzamala (Pozos et al., 2012).

La obstrucción se da comúnmente por incrustaciones o adherencias en las paredes de la tubería originadas por causas biológicas, esto sucede debido a la calidad del agua que transporta. Las incrustaciones ocasionan una disminución en el diámetro de la tubería y un cambio en el coeficiente de rugosidad de la misma, originando así una variación del gasto en el acueducto. En la tabla 1.1 se muestran los principales parámetros que causan la incrustación.

Tabla 1.1. Parámetros de diagnóstico de incrustación (MAPAS-CONAGUA 2007).

Incrustación		
características	Concentración	Efecto
Dureza total de carbonato	<300 ppm	Depósito de carbonatos de calcio
Total de hierro (Fe)	>2 ppm	Precipitación de hierro
Total de manganeso (Mn)	>1 ppm	Precipitación de manganeso
pH	Alto	
Oxígeno	Presencia	
pH	>7.5	Aguas incrustantes

Corrosión: esta consiste en la destrucción de las partes metálicas, causada por reacciones electroquímicas con el medio circundante. El oxígeno contenido en el agua o aire, que se encuentra en contacto con el metal, se transforma en óxidos que reaccionan con la estructura de metal y lo destruyen en forma gradual. En la tabla 1.2 se presentan los principales parámetros que causan corrosión.

Tabla 1.2. Parámetros de diagnóstico de corrosión.

Incrustación		
características	Concentración	Efecto
Ph	<7	Aguas corrosivas
Ácido sulfhídrico H ₂ S	Fuerte olor	Corrosión fuerte
Sólidos totales	>1000 ppm	Corrosión Electrolítica
Bióxido de carbono (CO ₂)	>50 ppm	Aguas corrosivas
Cloruros (como Cl)	>500 ppm	Aguas corrosivas
Oxígeno disuelto O ₂	Presencia	Ayuda a la corrosión

1.4. Diseño de acueductos.

1.4.1. Ecuación para flujo permanente.

En el caso del diseño en acueductos o líneas de conducción se aplica la ecuación de la energía.

La ecuación de la energía aplicada a una conducción se expresa de la siguiente forma:

$$E_1 + \sum H = E_2 + \sum h_{f,1-2} + \sum h \quad (1.1)$$

E_1 , E_2 son, respectivamente, la energía total ($z_i + \frac{p_i}{\gamma} + \frac{V_i^2}{2g}$) en el puntos que representan las condiciones de frontera.

$\sum h_{f,1-2}$ Es la suma de pérdidas por fricción que se presentan en el recorrido,

$\sum H$ Es la suma de la carga de las bombas.

$\sum h$ Es la suma de pérdidas locales de energía provocadas por dispositivos como válvulas, codos, reducciones, etc.

1.4.2. Pérdidas de energía por fricción en la conducción.

Para el cálculo de pérdidas por fricción en conducción se usan, entre otras las ecuaciones de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams y Manning, siendo la primera la que mejor representa el fenómeno para conductos cerrados.

1.4.2.1. Ecuación de Darcy-Weisbach.

La ecuación se expresa:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (1.2)$$

Donde

- h_f pérdida de energía por fricción, en m.
- f coeficiente de pérdidas adimensional.
- L longitud del tubo, en m.
- D diámetro interior de la tubería, en m.
- V velocidad media del flujo, en m/s.
- g aceleración de la gravedad, en m/s^2 .

Bajo el régimen de flujo turbulento f depende del número de Reynolds (R_e) y de la rugosidad relativa ε/D . Sus valores se pueden obtener aplicando la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.71 D} + \frac{2.51}{R_e \sqrt{f}} \right) \quad (1.3)$$

Donde

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (1.4)$$

Siendo

- ε rugosidad absoluta de la pared interior del tubo, en mm.
- ν Viscosidad cinemática del fluido, en m^2/s .

1.4.2.2. Ecuación modificada de Colebrook-White.

El cálculo del coeficiente de pérdidas f se puede realizar de manera explícita con la siguiente ecuación:

$$f = \frac{0.25}{\left(\log \left(\frac{\varepsilon}{3.71D} + \frac{G}{R_e^T} \right) \right)^2} \quad (1.5)$$

Donde

G=4.555 y T=0.8764 para $4000 \leq R_e \leq 10^5$

G=6.732 y T=0.9104 para $10^5 \leq R_e \leq 3 \times 10^6$

G=8.982 y T=0.9300 para $3 \times 10^6 \leq R_e \leq 10^8$

Sustituyendo la ecuación (1.5) en la de Darcy-Weisbach podemos calcular las pérdidas de energía por fricción:

$$h_f = \frac{0.203L}{gD^5 \left(\log \left(\frac{\varepsilon}{3.71D} + \frac{G}{R_e^T} \right) \right)^2} Q^2 \quad (1.6)$$

1.4.3. Pérdidas locales.

Estas son las que son generadas en distancias relativamente cortas, por accesorios de la conducción como los son los codos, tees, cruces, válvulas, etc.

Las pérdidas locales son calculadas con la siguiente ecuación:

$$h = k \frac{V^2}{2g} \quad (1.7)$$

Siendo

k coeficiente de pérdida que depende del tipo de accesorio que la genera

g es la aceleración de la gravedad, 9.81 m/s².

V velocidad media del flujo aguas abajo del dispositivo, en m/s.

En el caso de que se presente un aumento en el área de la sección de la tubería el valor de k es igual a uno, y el valor de V en la ecuación (1.7) se sustituye por la diferencia de velocidades existente en la tubería aguas arriba y aguas abajo del incremento de sección.

En la tabla 1.3 se muestran algunos valores de k en función del tipo de accesorio.

Tabla 1.3. Valores de k.

ACCESORIO	COEFICIENTE k
1. De depósito a tubería (pérdida en la entrada)	
-Conexión a ras de la pared	0.5
-Tubería entrante	1
-Conexión abocinada	0.05
2. De tubería a depósito (pérdida en la salida)	1
3. Contracción brusca (ver Tabla 1.4)	kc
4. Codos y tees	
-Codo de 45°	0.35 a 0.45
-Codo de 90°	0.50 a 0.75
-tees	1.50 a 2.0

Tabla 1.4. Valores de k_c para una contracción brusca.

D1/D2	k_c
1.2	0.08
1.4	0.17
1.6	0.26
1.8	0.34
2	0.37
2.5	0.41
3	0.43
4	0.45
5	0.46

1.5. Diseño hidráulico.

Para el diseño hidráulico es necesario tener el gasto de diseño. Este se obtiene en función de los gastos que deben entregarse a los tanques y los gastos que se pueden obtener de las fuentes de abastecimiento.

1.5.1. Línea de conducción por bombeo.

Se debe calcular el diámetro económico del tubo, como se muestra en el apartado 1.6. Es probable que el diámetro calculado no sea comercial, por lo que este se debe determinar mediante una selección directa y calculando enseguida la carga H requerida de la bomba que resulta de aplicar la ecuación (1.1).

$$H = E_2 - E_1 + \sum h_{f,1-2} + \sum h \quad (1.8)$$

1.5.2. Línea de conducción por gravedad.

Para este tipo de conducciones se debe presentar un modelo para encontrar el tubo necesario que transporta al gasto de diseño sobre una topografía que proporciona un desnivel favorable hacia el punto de entrega. Se tiene un desnivel disponible dado entre las cargas hidráulicas existentes en el inicio (en la fuente) y el final (la descarga) de la conducción. A este desnivel se le denominará H_{disp} . El problema consiste en determinar el diámetro del tubo que conducirá el gasto de diseño Q con una pérdida de carga en la conducción igual a H_{disp} .

De la fórmula de pérdidas de carga para un $h = H_{disp}$. y un Q dados, se despeja un valor teórico para el diámetro. Del valor obtenido se propone usar un diámetro inmediato inferior comercial en combinación con el superior inmediato, de tal manera que la pérdida de carga total en los dos tramos sea igual al valor de H_{disp} .

Para definir los diámetros se utiliza la ecuación (1.6) para calcular la pérdida de carga en la conducción, utilizando para esto varios pares de diámetros hasta encontrar que para el menor diámetro se obtenga una pérdida de carga mayor que H_{disp} y para el mayor diámetro se obtenga una carga menor que H_{disp} .

De igual manera se puede utilizar la ecuación propuesta por Swamee y Jain para el cálculo del diámetro teórico.

$$D = 0.66 \left(\frac{Q^2}{gS_f} \right)^{0.2} \left(\varepsilon^{1.25} \left(\frac{gS_f}{Q^2} \right)^{0.25} + v \left(\frac{1}{gS_f Q^3} \right)^{0.2} \right)^{0.04} \quad (1.9)$$

Siendo S_f es el gradiente hidráulico, igual a H_{disp}/L . Recomendada para $3 \times 10^3 \leq Re \leq 3 \times 10^8$ y $2 \times 10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 2 \times 10^{-2}$.

La pérdida de carga total en la conducción puede ser representada como

$$H_{disp} = \frac{f_1 L_1 V_1^2}{D_1 2g} + \frac{f_2 L_2 V_2^2}{D_2 2g} \quad (1.10)$$

Donde las magnitudes con subíndices 1 y 2 corresponden a los tramos con diámetro D_1 Y D_2 respectivamente.

Considerando por continuidad que $V_1=Q/A_1$ y $V_2=Q/A_2$, donde A_1 y A_2 son las áreas de la sección transversal de los tubos con diámetro D_1 y D_2 respectivamente; la ecuación (1.10) puede ser escrita como:

$$H_{disp} = K_1 L_1 Q^2 + K_2 L_2 Q^2 \quad (1.11)$$

Donde

$$K_1 = \frac{f_1}{2gD_1A_1^2}; \quad K_2 = \frac{f_2}{2gD_2A_2^2} \quad (1.12)$$

Se debe considerar que la suma de las longitudes L_1 y L_2 debe dar la longitud total L de la conducción.

$$L = L_1 + L_2 \quad (1.13)$$

Las ecuaciones (1.11) y (1.13) forman un sistema de dos ecuaciones con las dos incógnitas L_1 y L_2 . La solución es:

$$L_1 = \frac{H_{disp} - K_2 L}{K_1 - K_2}; \quad L_2 = L - L_1 \quad (1.14)$$

En caso de que L_1 o L_2 resulten muy próximas a la longitud total de la conducción, puede colocarse ese único diámetro comercial correspondiente.

1.6. Análisis de diámetro económico.

Una vez obtenido el trazo y el gasto de diseño es necesario determinar el diámetro, el cual se determina mediante condiciones económicas a partir de hacer mínimos el costo de la tubería y su colocación, así como el costo correspondiente a la energía requerida para el bombeo.

Con diámetros menores se disminuye el costo de la tubería y su colocación, pero aumentan las pérdidas de cargas y por lo tanto el costo de bombeo, ocurre lo opuesto con diámetros mayores. Por lo anterior es necesario determinar el diámetro D que minimice la suma de costos de la inversión inicial y de la operación.

El costo del suministro y colocación de la tubería (C_T) se obtendrá a partir del costo por unidad de diámetro y longitud, que incluye la tubería, la excavación de las zanjas en su caso y su posterior colocación.

$$C_T = C_1 D L \quad (1.15)$$

Donde

C_1 costo de suministro e instalación por unidad de diámetro y longitud

L longitud de la conducción, en m.

D diámetro de la conducción, en m.

Cabe señalar que la ecuación (1.15) es una aproximación del costo real, el cual depende del diámetro de forma no lineal.

El costo de la energía en operación por bombeo (C_E) en un período anual se obtiene a partir del costo de consumo de energía por unidad de potencia para bombear el gasto de diseño durante un año al tanque de entrega o descarga.

$$C_E = \frac{(H_2 - H_1)\gamma Q}{76\eta} C_2 \quad (1.16)$$

Donde

C_2 costo de la energía anual para el bombeo por unidad de potencia

Q gasto de diseño, en m^3/s .

H_1 y H_2 cargas totales de succión y descarga en la bomba, en m.c.a.

γ peso específico del agua en kg/m^3

η eficiencia de la bomba

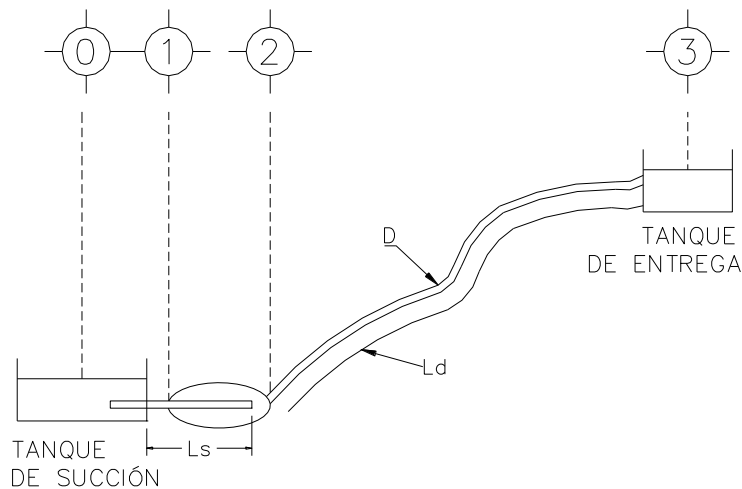


Figura 1.18. Esquema de una conducción por bombeo.

La ecuación de la energía aplicada entre el tanque de succión (0) y la succión de la bomba (1), y entre la descarga (2) y el tanque de entrega (3) (ver figura 1.19), considerando nula la presión atmosférica y velocidades en las superficies de los tanques, así como diámetros y coeficientes de rugosidad iguales en las tuberías de succión y descarga, se tiene como:

$$H_2 - H_1 = f \frac{L V^2}{D 2g} + z_3 - z_0 \quad (1.17)$$

Donde

$L=L_s+L_d$ longitud de la succión y descarga, en m.

$V=V_s=V_d$ velocidad en las tuberías de succión y descarga, en m/s.

f coeficiente de pérdidas.

z_0 elevación del nivel de agua en el tanque de succión, en m.

z_3 elevación del nivel de agua en el tanque de descarga, en m.

Es necesario expresar el término de pérdida de carga por fricción en función del diámetro. Para esto se expresa la velocidad en función del gasto

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (1.18)$$

Y se tiene que

$$f \frac{L V^2}{D 2g} = 8f \frac{LQ^2}{g\pi^2 D^5} \quad (1.19)$$

Sustituyendo la ecuación (1.17), que indica $H_2 - H_1$ con el término de pérdida de carga en función del diámetro, en la ecuación de costo anual de energía por bombeo C_E (ecuación 1.16) y sumándola a la expresión del costo de la tubería y su instalación C_T (ecuación 1.15) resulta una expresión de costos integrados en función del diámetro.

$$C_I = C_1 DL + C_2 \left(8f \frac{LQ^2}{g\pi^2 D^5} + z_3 - z_0 \right) \frac{\gamma Q}{76\eta} \quad (1.20)$$

En la figura 1.19 se representa el comportamiento de los costos en función del diámetro.

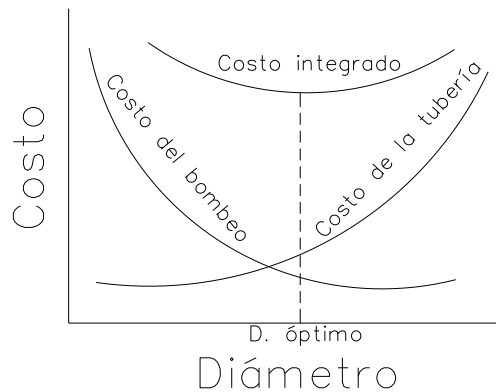


Figura 1.19. Comportamiento de los costos en función de los diámetros.

El diámetro óptimo D_0 se obtiene al minimizar el costo integrado $C_I = C_T + C_E$, por lo tanto la derivada con respecto al diámetro de la función del costo integrado C_I , igualada a cero permite la obtención del D_0 . La derivada resulta:

$$\frac{dC_I}{dD} = C_1 L - C_2 \frac{40fLQ^3\gamma}{76\eta g\pi^2 D^6} \quad (1.21)$$

La segunda derivada es positiva, por lo que al igualar la primera a cero, el diámetro corresponde al del costo mínimo. La expresión resultante es llamada la fórmula de Bresse.

$$D_o = \sqrt[6]{\frac{10C_2f\gamma}{19C_1\eta g\pi^2g}} \sqrt{Q} \quad (1.22)$$

Se ha encontrado que el radical $\sqrt[6]{\frac{10C_2f\gamma}{19C_1\eta g\pi^2g}}$ en el sistema MKS es aproximadamente 1.2, por lo que tenemos

$$D_o(m) = 1.2 \sqrt{Q\left(\frac{m^3}{s}\right)} \quad (1.23)$$

1.7. Transitorios hidráulicos.

Se les conoce como flujos transitorios a los fenómenos de variación de presiones en las conducciones a presión, motivadas en variaciones proporcionales a las velocidades.

1.7.1. Regímenes que se pueden presentar en tuberías a presión.

Todos los flujos transitorios son variaciones, de larga o corta duración, de un estado de flujo permanente a otro.

Hay dos tipos de flujo transitorio: flujo quasi-permanente y flujo transitorio real.

El flujo quasi-permanente se caracteriza por la ausencia de efectos de inercia o elásticos en el comportamiento del flujo. En este tipo de flujo la variación en el gasto y presiones con el tiempo es gradual, y después de poco tiempo se muestra como un flujo permanente.

El flujo transitorio real es en el que los efectos de inercia y de elasticidad son factores esenciales en su comportamiento. Si los efectos de inercia son significativos pero los efectos de compresibilidad en la tubería y el fluido son despreciables, entonces tenemos un flujo transitorio real que se le denominará flujo de columna rígida. Si en adición a lo anterior tenemos que conservar los efectos elásticos del fluido y la tubería en orden de obtener una caracterización más precisa del transitorio, se le llamará golpe de ariete.

La distinción entre el flujo de columna rígida y el golpe de ariete no es fácil y por lo general depende en que tan rápido los eventos cambien en el sistema. Cuando la variación es tal que implica el impedimento de escurrir, es decir, velocidad final nula, y cuando además, las oscilaciones de presión por ese motivo son grandes, al fenómeno se le denomina "golpe de ariete".

La figura 1.20 muestra de forma gráfica el comportamiento del golpe de ariete en un sistema formado por un conducto de diámetro D y longitud L, conectado a un tanque de carga constante. La conducción es regulada por una válvula aguas abajo del sistema.

El primer esquema representa las condiciones previas al cierre instantáneo de la válvula. El segundo representa el sistema en el tiempo cero. El resto representan situaciones posteriores al cierre.

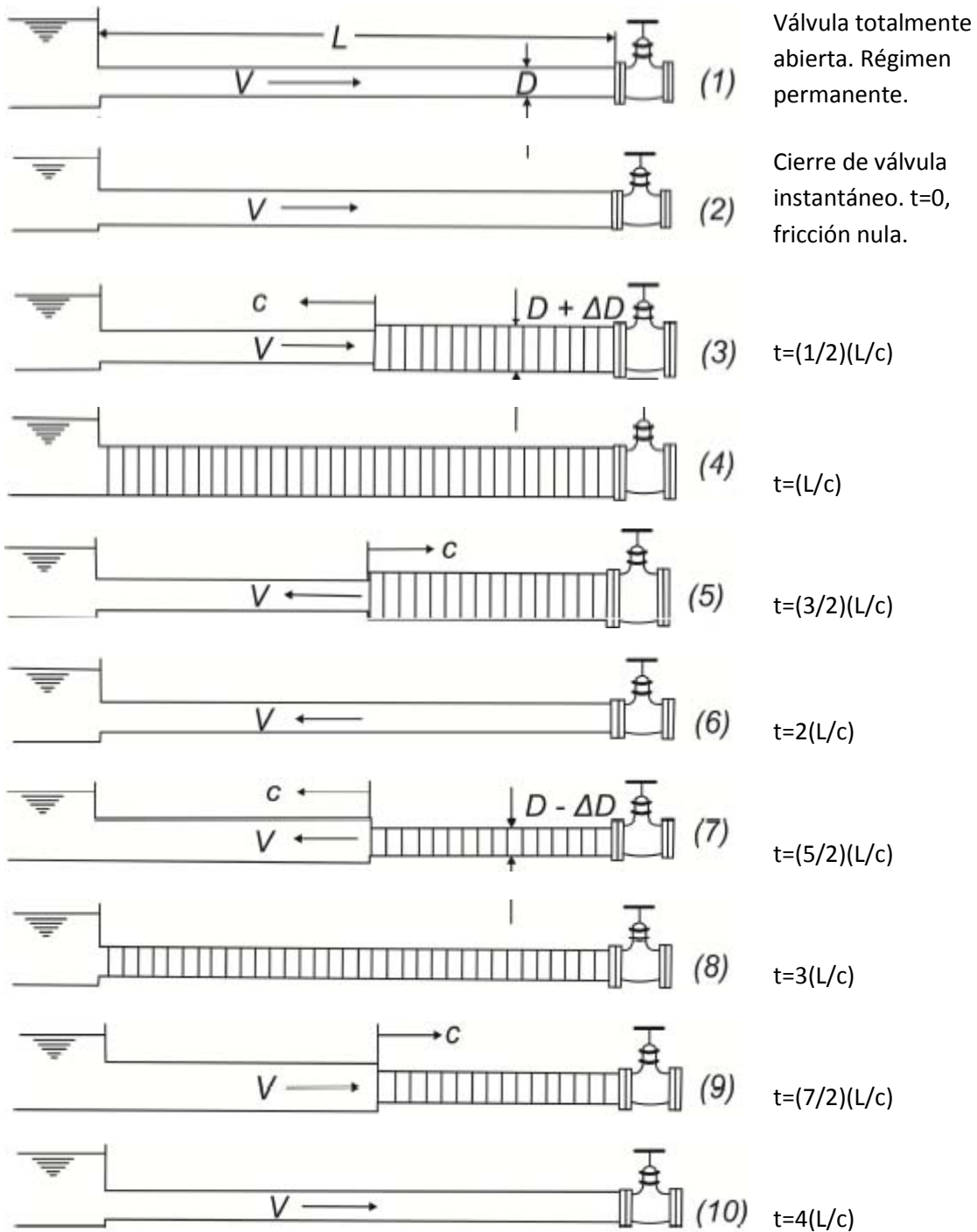


Figura 1.20. Descripción gráfica del fenómeno del golpe de ariete ante un cierre instantáneo.

En un primer instante, la primera capa del líquido en contacto con la válvula pasa de una velocidad V a una velocidad nula. La energía cinética se transforma en potencial, de tal manera que la presión aumenta y el líquido se comprime.

Para un instante posterior se repite el mismo fenómeno, de tal manera que el fenómeno se propaga hacia aguas arriba del sistema con una cierta velocidad c , conocida como celeridad.

Debido a que el conducto cuenta con elasticidad, el mismo se deformara con el aumento de la presión.

Transcurrido el tiempo $t=(L/c)$ el fenómeno alcanzará toda la longitud L de la conducción, alcanzando esta un diámetro de $D+\Delta D$.

Al presentarse una sobrepresión en la conducción distinta a la del tanque se genera un desequilibrio en el sistema. Esta situación generará una nueva conversión de energía, esta vez de potencial a cinética.

En el instante $t=(3/2)(L/c)$ habrá un tramo con diámetro D , puesto que la sobrepresión ha desaparecido, y el líquido a una velocidad $-V$, propagándose el fenómeno de descompresión a una celeridad c .

En el instante infinitesimal antes del $t=2(L/c)$ se encuentra en un estado igual al que se estaba antes del cierre de la válvula, pero con la velocidad de signo contrario. Al llegar al $t=2(L/c)$ la velocidad no puede propagarse debido a que la válvula se encuentra cerrada, por lo que ocurre un fenómeno similar al descrito al instante del cierre, solo que ahora se genera una depresión en la conducción llegando alcanzar un diámetro $D-\Delta D$.

De esta manera el ciclo se repite infinitas veces. En la práctica es la fricción la que amortigua la onda hasta alcanzar la condición de equilibrio, pudiendo ocasionar graves daños a la tubería durante el proceso.

1.7.2. Celeridad. Velocidad de propagación de la onda de presión.

Cualquier cambio repentino en las condiciones del flujo que se origina en un punto de una tubería a presión se propaga por la tubería con una velocidad que depende de la elasticidad del fluido y de la pared de la tubería, a esta velocidad se le denomina celeridad (c).

La elasticidad de la tubería disminuye la velocidad de propagación de la onda, esto se expresa en la siguiente ecuación:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{1 + \frac{E_{agua} D}{E_{material} \delta}}} \quad (1.24)$$

Donde

c_0 velocidad del sonido en el agua, en m/s.

E_{agua} módulo de elasticidad volumétrica del agua, en Pa.

$E_{material}$ módulo de elasticidad (módulo de Young) del material del tubo, en Pa.

D diámetro interior del tubo, en m.

δ espesor de la pared del tubo, en m.

La velocidad del sonido en el agua c_0 depende de la temperatura; para las temperaturas normales del agua en conducciones tiene valores de 1450 a 1440 m/s. El módulo de elasticidad del agua es igual a 2.074×10^9 N/m² (2.115×10^4 kg/cm²). El valor de E_{material} se toma de la tabla 1.5.

La ecuación (1.24) es válida para tubos de pared delgada. Se considera que un tubo es de pared delgada si su relación D/δ es igual o mayor a 25. Para tubos de pared gruesa se utiliza la siguiente ecuación:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{1 + \frac{E_{\text{agua}} D}{E_{\text{material}} \delta} C}} \quad (1.25)$$

Siendo C un coeficiente que se calcula con la siguiente ecuación:

$$C = \frac{2\delta}{D} (1 + \mu) + \frac{D(1 - \mu^2)}{D + \delta} \quad (1.26)$$

Donde μ es el coeficiente de Poisson que depende del material del tubo y se da en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5. Módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y celeridad para diferentes materiales de tuberías.

Material	E material N/m ² . 10-9	E material kg/cm ² . 10-3	μ	a (m/s)
Acero	200-212	2030-2160	0.3	1000-1250
Fibro cemento	23.5	240	0.3	900-1200
Concreto presforzado	39	398	0.15	1050-1150
Hierro dúctil	166	1690	0.28	1000-1350
Polietileno de alta densidad	0.59-1.67	6-17	0.45	230-430
PVC	2.4-2.75	2.45-2.81	0.45	300-500

1.7.3. Dispositivos supresores de transitorios.

Cámaras de oscilación

Transforma las ondas de presión en oscilaciones de masa mucho más lentas y con menor amplitud. La cámara se puede utilizar en plantas hidroeléctricas o de bombeo. Ver figura 1.21.

En un régimen permanente el nivel del agua en la torre es igual a la carga piezométrica en la tubería. Al ocurrir un evento fuera de la operación normal, un paro de bombas por ejemplo, el nivel del agua dentro de la cámara empieza a bajar cuando la presión dentro del sistema baja, y a subir cuando la presión sube.

Una gran desventaja del uso de este dispositivo en acueductos es que la altura de la cámara debe ser mayor que la altura piezométrica en el punto donde se instale, lo cual resulta poco práctico cuando el desnivel entre la zona de succión y el tanque de entrega es muy grande.



Figura 1.21. Cámara de oscilación.

Cámaras de aire

Hay ocasiones en las que el costo de una cámara de oscilación hace que su utilización no sea práctica. La cámara puede ser reemplazada por una cámara cerrada, de dimensiones reducidas, que disponga de un cierto volumen de aire que sirve como amortiguador, ver figura 1.22.

Las cámaras de aire implican también una oscilación de masa acotada, pero con una condición de borde distinta.

El flujo entre la cámara y la tubería se da cuando ocurre el transitorio. Durante el mismo entra un gasto al sistema que reduce las presiones negativas que produce el transitorio; el volumen de la cámara de aire se expande y reduce su presión. Cuando ocurren las sobrepresiones del transitorio es cuando fluye un gasto hacia adentro de la cámara, el volumen de aire dentro de la misma disminuye y la presión aumenta.

Las desventajas que tiene es que implica un costo de mantenimiento mayor que al de una cámara de oscilación y no suprime por completo la onda de depresión inicial, lo que implica la necesidad de instalación de otros dispositivos.



Figura 1.22. Cámara de aire.

Tanques unidireccionales

El tanque unidireccional es muy semejante al tanque de oscilación, con la diferencia que en el entronque con la tubería lleva una válvula unidireccional, lo que hace que desde el punto de vista del funcionamiento sea totalmente distinto, ya que en este el nivel del tanque puede estar por debajo del nivel de cotas piezométricas, ver figura 1.23.

La válvula unidireccional impide el flujo del agua hacia el tanque, por lo que solo aporta agua en los períodos de presiones negativas del transitorio, de esta manera ayuda a evitar vacíos y separación de columna.

El principio de funcionamiento es el que sigue: la onda de depresión que le llega es transmitida aguas abajo pero con una amplitud que es la diferencia entre la cota piezométrica del estacionario y la altura del tanque, siendo reflejada una onda aguas arriba con la diferencia restante.

Requiere mantenimiento periódico y no abate completamente las ondas de depresión, por lo que podría ser necesaria la instalación de otros dispositivos junto con este, lo que incrementa el costo.

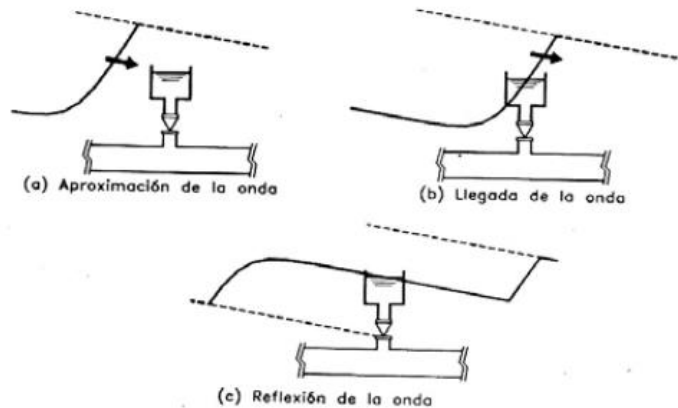


Figura 1.23. Esquema del funcionamiento de un tanque unidireccional.

Protección con válvulas de aire y válvulas anticipadoras de presión

Esta solución consiste en la instalación de una válvula anticipadora de presión poco después de la bomba para contrarrestar la onda positiva y negativa. Esta última se complementa en toda la conducción con las válvulas de aire, cuyo objetivo es que no sea superada una depresión fijada como pauta de selección, ver figura 1.24.

Las válvulas anticipadoras de presión son válvulas que se abren en el periodo inicial de presión baja en la tubería, comunicando el agua con la atmósfera de tal manera que entrará aire de ser necesario. Una vez abierta, la válvula anticipadora se cierra lentamente de manera que en las siguientes fases de sobrepresión desaloje cierto gasto.

Este tipo de válvulas son útiles solo en sistemas en que el transitorio comienza con presiones negativas, como es el caso accidental de bombas en una línea de bombeo.

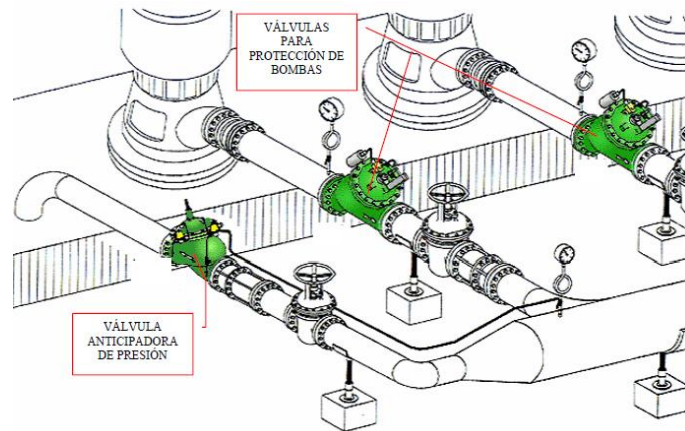


Figura 1.24. Instalación con válvulas anticipadoras de presión.

1.7.4. Separación de columna líquida.

La separación de columna se refiere al rompimiento de columna líquida en conductos totalmente llenos (ver figuras 1.25 y 1.26). Este puede ocurrir durante un evento de golpe de ariete donde la presión decae hasta la presión de vapor en lugares específicos del sistema, tales como en puntos altos o cambios de pendientes.

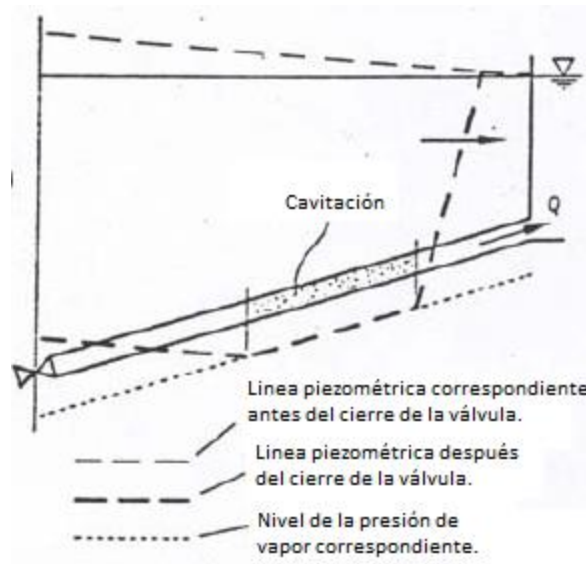


Figura 1.25. Separación de columna producida por el cierre rápido de una válvula.



Figura 1.26. Separación de columna en un dispositivo experimental por el cierre rápido de una válvula.

La mínima presión (vacío absoluto) que físicamente se puede alcanzar en el agua, tomando como nivel de referencia la presión atmosférica, es de una atmósfera con signo negativo, equivalente a - 10.33 m.c.a. Pero antes de llegar a ésta se presentará la vaporización del agua por cavitación.

La cavitación es una ebullición prematura del agua, que se vaporiza a temperaturas muy inferiores a los 100°C, su punto de ebullición a presión atmosférica. Cada líquido hierve cuando su presión de vapor se iguala a la presión exterior que soporta, cuando por cualquier circunstancia la presión desciende por debajo de la presión atmosférica y alcanza el valor de la presión de vapor. Es aquí cuando puede ocurrir este fenómeno.

Entonces, una cavidad de vapor, generada por un fenómeno transitorio, impulsado por la inercia de la separación de la columna líquida, empezará a crecer. La cavidad actúa como vacío, un punto de baja presión, disminuyendo la velocidad de la columna líquida; finalmente empieza a disminuir en tamaño cuando la dirección de la columna líquida cambia. La colisión de dos columnas líquidas, moviéndose a través de la cavidad que se contrae, puede ocasionar un gran aumento en la presión

de manera casi instantánea. Este gran aumento en la presión viaja a través de todo el conducto y genera importantes cargas que afectarán la maquinaria hidráulica, la tubería y las estructuras de soporte. En un solo evento de golpe de ariete pueden suceder muchas repeticiones de este fenómeno y el colapso puede llegar a ocurrir.

1.7.5. Método de las características.

Es un método que se puede usar para la resolución de transitorios en acueductos. El método parte de las ecuaciones de continuidad y dinámica. Consiste esencialmente en la resolución numérica con las condiciones de frontera impuestas para cada problema.

Tenemos que las ecuaciones características son

C+

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (1.27)$$

$$\text{Si } \frac{dx}{dt} = a$$

C-

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (1.28)$$

$$\text{Si } \frac{dx}{dt} = -a$$

Para comprender físicamente estas cuatro ecuaciones, es conveniente considerar que la solución se obtiene en un diagrama x, t (Figura 1.27).

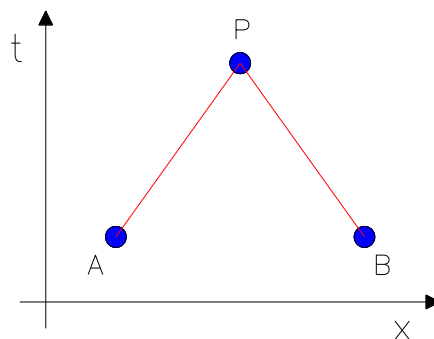


Figura 1.27. Diagrama x,t.

Por lo tanto, se obtienen así las soluciones a lo largo de las características, partiendo de condiciones conocidas y hallando nuevas intersecciones de forma de obtener alturas y velocidades para tiempos posteriores (Figura 1.28).

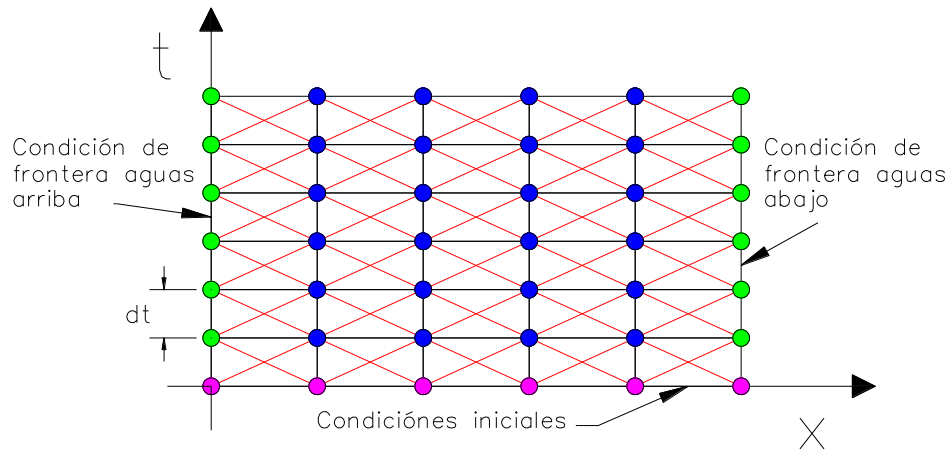


Figura 1.28. Método de las características por elementos finitos.

Sustituyendo las diferencias finitas en las ecuaciones características y despejando tenemos que

$$Q_p = C_p - C_a H_p \quad (1.29)$$

$$Q_p = C_n + C_a H_p \quad (1.30)$$

Siendo que

$$C_p = Q_A + \frac{gA}{a} H_A - \frac{f \Delta t}{2DA} Q_A |Q_A| \quad (1.31)$$

$$C_n = Q_B - \frac{gA}{a} H_B - \frac{f \Delta t}{2DA} Q_B |Q_B| \quad (1.32)$$

En el caso de los puntos intermedios Q_p y H_p se pueden encontrar con las siguientes ecuaciones

$$Q_p = 0.5(C_p + C_n) \quad (1.33)$$

$$H_p = \frac{C_p - C_n}{2C_a} \quad (1.34)$$

Se debe cumplir con la condición de estabilidad de Courant

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{a} \quad (1.35)$$

Posteriormente, este método será utilizado para simular transitorios hidráulicos con aire atrapado en un acueducto a bombeo.

2. Aire atrapado en tuberías.

Es necesario el estudio del comportamiento de las bolsas de aire atrapado en tuberías para poder prevenir comportamientos no deseables en la operación del sistema, y para poder eliminar o disminuir la cantidad de las mismas.

2.1. Causas del aire atrapado.

Operaciones tales como el llenado y vaciado de agua en una instalación conllevan desplazamientos de grandes cantidades no sólo de agua, sino también de aire. Esto aunado a las alteraciones de la presión en el fluido durante su operación son causas por las que pueden aparecer bolsas de aire atrapadas en el sistema.

La presencia de aire en las tuberías puede tener orígenes muy diversos. Puede ser resultado de una instalación mal diseñada, de vórtices en la aspiración de las bombas, operación de válvulas admisión de aire, roturas o pequeñas fisuras en puntos o regiones de presión negativa.

En muchas ocasiones las conducciones deben pasar a través de desniveles importantes del terreno, causando un perfil irregular, lo cual facilita la concentración de bolsas de aire en los puntos altos de las mismas. Esto ocurre puesto que el aire tiene mucha menor densidad que el agua y por lo tanto tiende a concentrarse en los puntos altos del sistema. Este tipo de situaciones son muy comunes en los sistemas de abastecimientos de agua donde el recurso es escaso y hay cortes continuos en el suministro.

El agua contiene aproximadamente un 2% de aire disuelto, esto a presión atmosférica y temperatura ambiente, cuando se presenta una caída de presión en el sistema, parte de este aire puede ser liberado.

Otra causa puede ser la temperatura. El aumento de la misma ocasiona también el aumento de la presión de vapor de agua, por ejemplo a 15 °C la presión es de 1.7 kN/m², cuando la temperatura aumenta a 30 °C la presión llega a 4.24 kN/m². Esto significa que la cantidad de aire que puede ser liberada es mayor al incrementarse la temperatura.

2.2. Efectos ocasionados por el aire atrapado.

El problema de aire atrapado es algo que se presenta con frecuencia en los sistemas de conducción de agua, y la formación de bolsas a lo largo de la conducción puede agravar los efectos producidos durante los fenómenos transitorios, incrementando la sobrepresión sobre la tubería. Esta sobrepresión puede producir rupturas importantes tanto en la propia tubería como en los accesorios y válvulas a lo largo de la misma.

Las bolsas de aire en el sistema también reducen la sección transversal efectiva de la tubería, por lo tanto reduce la eficiencia del sistema al reducir la capacidad de la tubería de transportar agua.

El problema del aire atrapado se presenta tanto en sistemas a bombeo como en los de gravedad, generando una disminución en la eficiencia de los mismos. En los sistemas a bombeo provoca un

incremento en el consumo de energía eléctrica de los equipos. En los de gravedad provoca la disminución de la sección efectiva del paso del agua y puede generar derrames en estructuras tales como las torres de oscilación o cajas rompedoras de presión.

Otro problema que genera la presencia de las bolsas de aire es la pérdida de carga. Cuando una bolsa de aire queda atrapada en el sistema provoca un flujo a superficie libre a lo largo de ésta, lo que ocasiona que la línea piezométrica sea paralela a la pendiente de la tubería en ese tramo.

Es importante señalar que también las propiedades del fluido cambian cuando la cantidad de aire es importante:

- La densidad del flujo disminuye y la elasticidad del mismo aumenta.
- Cambia la estructura de la turbulencia del flujo y modifica la fricción que tiene con la pared.
- Al desplazarse las burbujas de aire a través de la tubería pueden modificar el campo de velocidades del flujo.

También ocasiona vibraciones que pueden producir daños estructurales en el sistema, y en el caso de los filtros de arena el aire puede quedar atrapado entre los granos, reduciendo la eficiencia del mismo.

Una de las soluciones más extendidas para evitar los problemas que conlleva el aire atrapado es la instalación de válvulas a lo largo del sistema. Las funciones de éstas son admitir aire para eliminar las presiones negativas, expulsar grandes cantidades de aire durante el llenado y expulsar pequeñas cantidades de aire durante la operación normal del sistema.

Algunos problemas que se presentan en las válvulas son: sellados deficientes a causa de que los flotadores no son completamente esféricos, y dado que estos son huecos también son susceptibles a presentar deformaciones y a quedar atascados dentro de los orificios. Otro problema es el llamado cierre dinámico, éste se presenta cuando hay diferenciales de presión muy bajos lo que ocasiona que se cierre la válvula aun cuando no se ha expulsado la totalidad del aire. El efecto Venturi se presenta durante la admisión de aire, los flotadores tienden a sellar parcialmente el orificio debido a una zona de baja presión en la parte superior del flotador comparada con la que hay en la línea.

2.3. Métodos de remoción de aire.

2.3.1. Medios hidráulicos.

Este tipo de medios consiste en utilizar la inercia del agua para remover el aire que entra al sistema. El problema al que nos enfrentamos es que el diseño de sistemas con este tipo de medios resulta de fórmulas semiempíricas. Muchas de las recomendaciones que se expiden no son generales, y por lo tanto, pueden no ser aplicables para el diseño de ciertos acueductos.

Es necesario empezar definiendo el concepto de velocidad de remoción; ésta se define como la velocidad mínima del agua necesaria para remover burbujas o bolsas de aire de un acueducto. La gama de valores para la velocidad de remoción es amplia y varía según los autores. Una incorrecta elección del mismo puede generar la no remoción del aire atrapado.

Los criterios adoptados para definir la velocidad de barrido son variados. Algunos autores parten de suponer bolsas de aire estacionarias en flujo a tubo lleno; también están los que consideran el agua estacionaria y usan la velocidad de ascensión de las bolsas de aire en la tubería.

Hay una velocidad mínima para mantener estacionaria una burbuja de aire, según encontraron Veronese (1937) y Lara (1955). Observaron que hay velocidades mayores a la mínima que reducen el tamaño de las burbujas de aire por medio del salto hidráulico y el arrastre de las burbujas en dirección al flujo, hasta llegar a un tamaño estable conocido como *burbuja límite*. Después de este punto el tamaño de la burbuja no disminuye, sino que cualquier aumento en la velocidad del agua terminaría por removerla de la conducción. La velocidad para mantener estable la burbuja límite se le denomina velocidad límite, cuyo valor es, según lo observado por los autores de 0.59 m/s; sugieren que esa velocidad es suficiente para remover las burbujas de aire de cualquier conducción con un diámetro mayor a 100 mm.

Kalinske y Robertson (1943) llevaron a cabo experimentos para determinar la cantidad de aire que se introduce por un salto hidráulico producido por pendientes pronunciadas en la tubería. Pudieron observar que el salto tiende a formar una bolsa de aire, la cual se puede extender hasta el extremo aguas debajo de la tubería, permanecer estable o remontar al flujo a través del salto. Si el gasto y la pendiente son pequeños lo que se forma son una serie de burbujas de aire las cuales avanzan en dirección al flujo.

Según estos análisis, el gasto del agua, la intensidad de la turbulencia al inicio del salto hidráulico (la cual depende del número de Froude), y, en menor medida, la pendiente de la tubería, son parámetros que influyen en la cantidad de aire drenado a causa del salto hidráulico. La relación adimensional de estos parámetros se presenta como sigue:

$$\frac{Q_{aire}}{Q_{agua}} = f(F_1, y_1/D, S) \quad (2.1)$$

Siendo

Q_{aire} gasto de aire drenado por el salto hidráulico en la conducción, en m^3/s .

Q_{agua} gasto de agua que lleva la conducción, en m^3/s .

F_1 número de Froude.

S pendiente de la tubería.

Estudios posteriores revelan que el cociente Q_{aire}/Q_{agua} varía de manera importante con respecto al número de Froude, y no varía con respecto a y_1/D ó S .

Con la información obtenida en el laboratorio pudieron obtener la siguiente ecuación experimental para condiciones donde la tubería expulsó todo el aire ingresado por el salto hidráulico:

$$\beta = \frac{Q_{aire}}{Q_{agua}} = 0.0066(F_1 - 1)^{1.4} \quad (2.2)$$

Kalinske y Bliss (1943) encontraron que la relación entre el gasto de aire removido y el gasto de agua está en función de la pendiente de la tubería y el término Q_{agua}^2/gD^5 , denominado parámetro de gasto adimensional, siendo g la aceleración de la gravedad.

Se determinó una ecuación que representa la tendencia de los datos experimentales:

$$Q_{agua}^2/gD^5 = 0.707S \quad (2.3)$$

Se encontró que para pendientes menores de 2.5% los datos experimentales no pueden ser expresados con la ecuación (2.3), por lo que se requieren mayores gastos de agua para iniciar la remoción de agua.

Kent (1952) dice que la velocidad de remoción es efectiva cuando la velocidad media del agua es igual o mayor que la velocidad mínima (v_{min}). Propone una relación semiempírica para obtener ese valor que está en función de la pendiente de la tubería y su diámetro:

$$v_{min} = C_0^{1/2} \sqrt{gDS} \quad (2.4)$$

Siendo $C_0^{1/2}$ un valor que está en función de la forma de la bolsa de aire, se encontró que su valor se vuelve constante cuando la longitud de la bolsa es mayor a 1.5D. Se ha demostrado que esta ecuación muestra una desviación con respecto a los resultados experimentales.

Gandenberger (1957) realizó experimentos para estudiar el movimiento del aire en acueductos. En la Figura 2.1 se pueden observar los resultados; se muestran valores de velocidad mínima del agua requerida para remover un determinado volumen de aire acumulado en algún punto alto del perfil, con un diámetro unitario y una pendiente descendente dada.

Gandenberger también define un parámetro adimensional denominado n , el cual busca caracterizar el tamaño de las burbujas y bolsas de aire, se define en la siguiente ecuación:

$$n = 4V/\pi D^3 \quad (2.5)$$

Siendo V el volumen de la bolsa de aire.

La Figura 2.1 cubre un intervalo de $n=0.02$ a $n>1$.

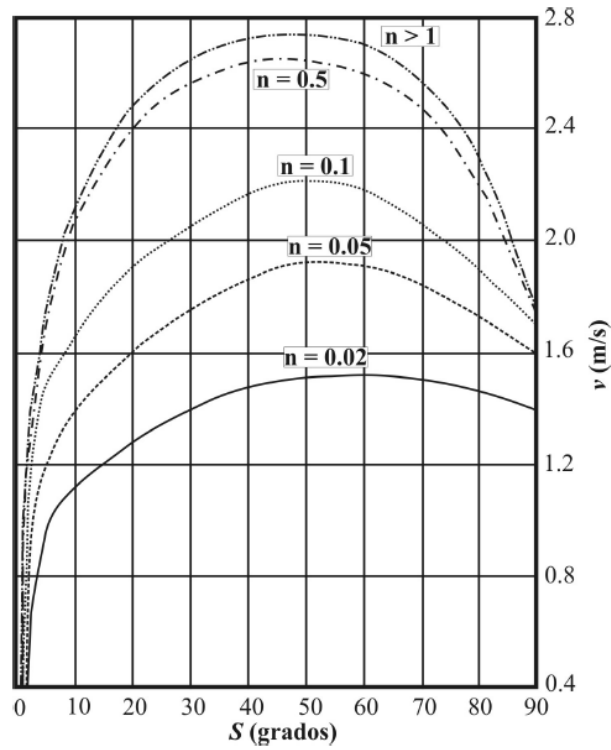


Figura 2.1. Velocidad mínima para la remoción de bolsas de aire, Gandenberger (1957).

La gráfica de la Figura 2.1 es válida para diámetros mayores a 0.1 m y para bolsas de aire con $n > 1$.

La siguiente gráfica mostrada en la Figura 2.2 fue elaborada por Falvey (1980), y muestra los límites de movimiento de burbujas y bolsas de aire en conductos cerrados.

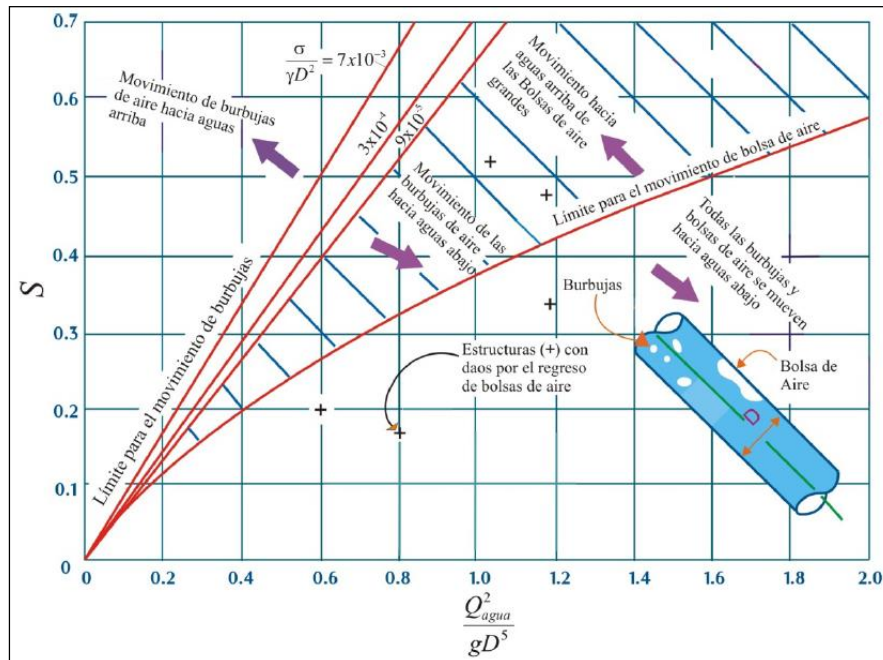


Figura 2.2. Movimiento de burbujas y bolsas de aire en conductos cerrados fluyendo llenos, Falvey (1980).

González y Pozos (2000) proponen una ecuación para estudiar el comportamiento de las burbujas y bolsas de aire aguas abajo del salto hidráulico localizado al final de una gran bolsa de aire.

$$Q_{\text{agua}}^2 / gD^5 = S \quad (2.6)$$

El parámetro de gasto adimensional (PGA) debe ser comparado con todas las pendientes descendentes del perfil del acueducto con las siguientes consideraciones:

PGA>S	Las burbujas y bolsas de aire son removidas hacia aguas abajo
PGA<S	Las burbujas y bolsas de aire se moverán hacia aguas arriba
PGA=S	Las burbujas y bolsas de aire permanecerán estacionarias

Con base a experimentaciones desarrolladas por Escaramela et al. (2005) proponen una ecuación para analizar el comportamiento del aire en acueductos:

$$v / (gD)^{0.5} = SF [0.56(\text{sen } S)^{0.5} + a] \quad (2.7)$$

Donde a tiene los siguientes valores

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

$$a=0.5 \text{ para } 0.06 \leq n < 0.12$$

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

$$a=0.61 \text{ para } 0.3 \leq n < 2$$

Siendo v la velocidad mínima requerida en el flujo para mover una bolsa de aire, n el valor definido en la ecuación (2.7) y SF un factor de seguridad igual a 1.1.

La ecuación (2.7) es válida para pendientes suaves, no mayores a 40° , y diámetros menores de 1.5 metros.

2.3.2. Medios mecánicos.

Era común la utilización de venteos a inicios del siglo pasados, cuando los ingenieros todavía no entendían bien la interacción del agua-aire en los sistemas de conducción de agua. Ahora se sabe que estos sólo se pueden considerar cuando la línea piezométrica es cercana al nivel del terreno, entre 6 y 10 m. Los venteos consisten en una válvula de control manual localizada sobre la conducción con un tubo puesto de manera vertical.

2.3.2.1. Válvulas de aire.

Este tipo de dispositivos son los más usados como respuesta a la problemática de aire atrapado en las conducciones. Las válvulas representan una solución para evitar las sobrepresiones producidas en conducciones de agua debido a la compresión del aire atrapado durante los transitorios hidráulicos. Pueden expulsar grandes cantidades de aire durante el llenado y la operación del acueducto. De igual manera son capaces de admitir aire cuando las condiciones de presiones negativas se presentan.

Sin embargo, en la práctica es necesario el correcto dimensionamiento y colocación de las válvulas, ya que no son raros los problemas que se presentan con las mismas. Tan perjudicial como la no utilización de las válvulas puede ser el mal funcionamiento de estos dispositivos.

Los ingenieros se enfrentan a la falta de documentación acerca del comportamiento de las válvulas tanto en condiciones estáticas como dinámicas. Por ejemplo, es difícil establecer el tiempo de respuesta en las válvulas que se produce cuando la columna de agua llega al flotador.

Se pueden dividir las válvulas en tres tipos en función de su manera de operar:

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

Las **VAEA** expulsan y admiten grandes volúmenes de aire. Se usan básicamente para expulsar aire durante la puesta en marcha de los equipos de bombeo y el proceso de llenado del acueducto. La evacuación debe ser lenta para evitar así el golpe de ariete. Admiten aire cuando es necesario drenar la línea u ocurre algún fenómeno capaz de generar presiones negativas en la conducción, como la separación de columna.

Este tipo de válvulas están provistas de un orificio de gran tamaño (>2.5 cm) que permanece cerrado una vez que la tubería está completamente llena y en funcionamiento normal, por lo que impide la expulsión de pequeñas cantidades de aire durante la operación.

Cuando el aire es expulsado de la conducción el agua eleva el flotador de la válvula para sellar el orificio. La velocidad de expulsión está en función de la presión ejercida hacia el orificio.

Cuando el sistema requiere la entrada de aire, el flotador de la válvula bajará para dejar el orificio abierto y así prevenir que se genere un vacío en la conducción. Esto permite proteger el acueducto de un posible colapso que puede ocurrir durante el paro de equipos de bombeo, vaciado del acueducto, ruptura de tubería o separación de columna.

Son usadas en puntos donde hay un decremento de la pendiente ascendente, en tramos ascendentes y descendentes largos, en el lado de la descarga de la bomba, antes de válvulas check o de retención.

El uso de las **VEA** está enfocado a la expulsión de pequeñas cantidades de aire durante la operación del acueducto. Cuentan con orificios pequeños (<2.5 cm) para cumplir con este propósito.

El diámetro del orificio se dimensiona en función de la presión de trabajo en el punto que se encuentra. Las válvulas cuentan con un flotador hidromecánico que detecta la presencia de aire en la conducción permite su expulsión cuando éstas trabajan a presiones mayores a la atmosférica.

El aire disuelto aparece como consecuencia de los cambios de presión y temperatura a los que se ve expuesta el agua a lo largo del acueducto. El aire va a desplazar el volumen de líquido dentro de la válvula, provocando así que el flotador baje y el aire sea expulsado a la atmósfera. Una vez

expulsado el aire, es la misma agua la que empuja al flotador hasta su posición inicial, sellando el orificio.

Por lo general se utilizan en puntos donde se generan bolsas de aire y donde hay incremento de la pendiente descendente.

Dado el tamaño del orificio este tipo de válvulas no son recomendadas para la expulsión de grandes cantidades de aire.

Las **VAC** son una combinación de los dos tipos de válvulas expuestos anteriormente, por lo que cuentan con dos orificios, uno grande y uno pequeño, para la expulsión de aire acumulado. De esta manera, las válvulas son capaces de expulsar pequeñas o grandes cantidades de aire durante el funcionamiento normal y el llenado de la instalación respectivamente, al mismo tiempo que son capaces de admitir grandes cantidades de aire en el proceso de vaciado de la instalación.

Este tipo de válvulas se pueden encontrar en el mercado con uno o dos cuerpos. Se les llama de un cuerpo cuando el flotador grande y el pequeño se encuentran instalados en un mismo espacio, y tienen la ventaja de ser más baratas por lo general. Las de dos cuerpos cuentan con los flotadores instalados en espacios separados, y tiene la ventaja de tener una amplia gama de VEA en cuanto al tamaño del orificio.

Se instalan en los puntos altos a lo largo del acueducto o donde hay cambios de pendiente negativa a positiva (como se establece en la convención de signos de las pendientes en hidráulica), que es donde se requieren válvulas de expulsión para evacuar el aire acumulado, y las de admisión y expulsión para proteger la tubería de fallas por aplastamiento.

También se usan en tramos horizontales largos (al inicio y al final de éstos), tramos ascendentes largos y tramos descendentes largos

Hay dos tipos principales de diseño en las válvulas de orificio grande: no cinéticas y cinéticas.

2.3.2.2. Válvulas de aire no cinéticas.

Este tipo de válvulas cuentan con un flotador esférico y hueco, y tienen la característica de que tienen una tendencia a cerrar de manera prematura. Este cierre es ocasionado principalmente porque la densidad del flotador es igual o menor que la densidad del fluido.

A este tipo de fenómeno caracterizado por el cierre debido a las fuerzas aerodinámicas que genera el fluido de aire se le conoce como *cierre dinámico*.

Este tipo de válvulas presentan otra serie de limitaciones, las cuales fueron enumeradas por Balutto (1996 y 1998), y que a continuación se definen:

Sellado deficiente. En teoría, el flotador de la válvula debe ser perfectamente esférico con el fin de sellar adecuadamente el orificio, sin embargo, esto no ocurre en la práctica. Este problema se intenta corregir con materiales de sello blandos. Pero sucede que a menudo el flotador se adhiere a este tipo de materiales blandos, dificultando así su correcto funcionamiento.

Deformación y atascamiento del flotador. Las deformaciones pueden ocurrir cuando la válvula está sometida a altas presiones. Debido a esto, se corre el riesgo de que el flotador quede estancado.

Cierre prematuro o dinámico. Es la tendencia que tiene el flotador a cerrar de forma prematura debido a las presiones diferenciales entre el exterior y el interior de la conducción relativamente bajas. Esto ocasiona que queden bolsas de aire atrapadas dentro de la instalación.

Limitaciones del tamaño del orificio y su efecto en el funcionamiento de la válvula. Tanto la admisión como la expulsión de aire se ven afectadas por el tamaño del orificio. Algunas recomendaciones de los fabricantes van en el sentido de que el diámetro del flotador no debe ser inferior a tres veces el diámetro del orificio, ya que de no ser así el flotador podría deformarse y quedar atascado. Esto puede resultar en un incremento en los costos que puede ser importante.

Efecto venturi. Así se le denomina al cerrado parcial del flotador durante la admisión de aire hacia la conducción por efecto de una zona de baja presión en la parte superior del flotador comparada con la existente en el acueducto. Este fenómeno suele ocurrir a diferenciales de presión muy bajos, por lo que el funcionamiento de las válvulas se ve afectado de manera importante.

2.3.2.3. Válvulas de aire cinéticas.

Fueron desarrolladas con el objetivo de eliminar el problema del cierre dinámico que se presenta en las válvulas no cinéticas. Estas tienen la capacidad de expulsar aire sin que se desplace el flotador a causa del flujo de aire. Están diseñadas para que cierren únicamente cuando el flotador entra en contacto con el agua. Funcionan de manera que el flotador es empujado hacia el orificio de entrada de la válvula, lo que evita el cierre dinámico

Este tipo de válvulas permite la expulsión de aire a grandes velocidades, lo que puede ocasionar problemas durante su funcionamiento. Estos son descritos por Balutto (1998):

Golpe de ariete. Si la velocidad con la que la columna de agua llega a la ventosa es elevada, es posible que se produzcan transitorios hidráulicos que generen presiones muy altas en la línea de conducción. Con el fin de evitar el fenómeno se recomienda limitar el diferencial de presión a 0.05 bar.

Derrame de agua. Cuando la reacción del flotador es a destiempo en el momento en el que entra el agua a gran velocidad a la cámara puede ocasionar que la válvula permanezca abierta. Es así como se pueden producir fugas de agua importantes. Este efecto puede ocasionar fenómenos transitorios al generar que la columna de agua disminuya su velocidad al alcanzar el orificio de salida debido a la mayor densidad de ésta con respecto al aire.

Falla de las juntas. Generado por las presiones transitorias durante el cierre rápido del orificio. Esto puede ocasionar fugas de agua entre la válvula de aire y la de seccionamiento.

Limitaciones del gran orificio. Son las mismas consideraciones económica y de diseño que se deben tomar como en el caso de las no cinéticas.

Subdimensionamiento. Suelen enfrentar este problema debido a que se le da más importancia a los requerimientos de expulsión de aire a altos diferenciales de presión, que a los problemas que se pueden producir por las presiones negativas en el sistema.

Efecto venturi. Se produce de la misma manera que en las válvulas no cinéticas.

2.4. Localización de los posibles puntos de acumulación de bolsas de aire en conductos a presión.

El fenómeno del aire atrapado en acueductos ha sido estudiado por diferentes investigadores con anterioridad, sin embargo, no hay todavía una expresión analítica que sea aceptada de manera universal para el análisis del comportamiento del aire en los acueductos. En este capítulo se presenta un método propuesto por Pozos et al. (2012) el cual fue validado mediante una investigación teórica-experimental y ya ha sido usado con anterioridad para el análisis de problemas relacionados con el aire atrapado en acueductos en México de manera exitosa (González y Pozos, 2000; Pozos, 2002; Pozos, 2007).

Una relación analítica es presentada por González y Pozos (2002) para estudiar el comportamiento de las bolsas de aire y burbujas que se generan aguas abajo del salto hidráulico que se localiza al final de una gran bolsa de aire que se encuentra en el cambio de una pendiente adversa, horizontal o descendente suave a una pendiente descendente pronunciada. Para validar dicha ecuación se analizó el movimiento de una bolsa de aire en una tubería fluyendo a tubo lleno; se buscó balancear la fuerza de arrastre del flujo de agua y la componente de la fuerza de flotación en dirección contraria al flujo, tal como se muestra en la Figura 2.3.

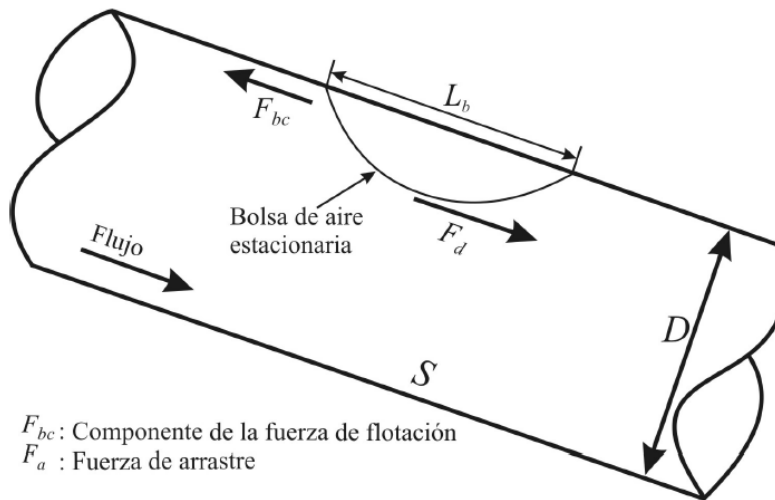


Figura 2.3. Fuerzas que se presentan durante el movimiento de una bolsa de aire, Pozos et al. (2010).

El balance de estas fuerzas se describe como

$$C_a L_b^2 \rho \frac{v^2}{2} = L_b^3 \rho g S \quad (2.8)$$

Siendo

C_a	coeficiente de arrastre.
L_b	dimensión lineal de la bolsa de aire.
ρ	densidad del agua.
v	velocidad media del agua que actúa sobre la burbuja de aire estacionaria.
g	aceleración de la gravedad.
S	pendiente del tubo.

La Ecuación (2.8) también puede ser expresada como

$$\frac{v^2}{2gL_b} = \frac{S}{C_a} \quad (2.9)$$

Es necesario hacer una consideración con respecto a la dimensión lineal de la burbuja. Si L_b depende del diámetro de la tubería, D , entonces L_b/D se vuelve constante. Por lo que L_b puede ser remplazado por D en la Ecuación (2.9).

$$\frac{v^2}{2gD} = \frac{S}{C_a} \quad (2.10)$$

En conductos circulares $Q=v(\pi D^2/4)$, por lo que la Ecuación (2.10) queda

$$\frac{Q^2}{gD^5} = \frac{\pi^2}{8} \left(\frac{S}{C_a} \right) \quad (2.11)$$

Se le denomina parámetro de gasto adimensional (PGA) al término del lado izquierdo de la ecuación (2.11).

Kent (1952) propone encontrar el valor del coeficiente de arrastre, C_a , mediante la siguiente ecuación

$$C_a = 0.76 \left(\frac{L_b}{D} \right)^{1.11} \quad (2.12)$$

Kent encontró un valor límite en $L_b/D=1.5$ para el cual el coeficiente de arrastre permanece constante y las burbujas y bolsas de aire se mantienen estacionarias en una tubería con pendiente descendente. Con el valor límite calcula el coeficiente de arrastre en 1.2.

El cociente del término $\pi^2/8C_a$, de la ecuación (2.11) se puede redondear a la unidad, quedando

$$\frac{Q^2}{gD^5} = S \quad (2.13)$$

La ecuación (2.13) se puede reescribir en términos de la velocidad media como

$$\frac{v}{\sqrt{gD}} = \frac{4\sqrt{S}}{\pi} \quad (2.14)$$

2.5. Comportamiento del aire en conductos a presión.

En la Figura 2.4 se muestra como grandes bolsas de aire pueden acumularse hacia los dos lados de una sección de control localizada en el cambio de pendiente subcrítica a supercrítica (Mosvell, 1976; Walski et al, 1994; Pozos, 2007).

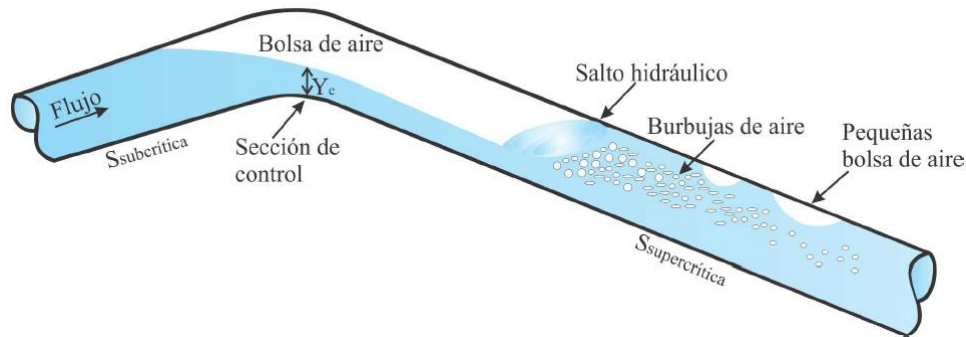


Figura 2.4. Bolsa de aire en una sección de control.

Según Rodal et al. (2000) el tirante crítico, Y_c , necesario para remover una bolsa de aire de una sección de control debe ser igual o mayor que el 90% del diámetro de la tubería.

El salto hidráulico que se encuentra al final de la bolsa introduce aire en forma de burbujas. Estas se mueven hacia el techo de la tubería formando burbujas o bolsas de aire de mayor tamaño, las cuales pueden terminar regresando a contraflujo. Las variables que influyen en este fenómeno son la fuerza de flotación, la pendiente, el diámetro y el gasto en la tubería. En el caso de que la pendiente sea ascendente el aire se moverá hacia aguas abajo, y si la tubería es horizontal la fuerza de flotación no influirá en el movimiento de las burbujas y bolsas de aire, por lo que estas serían removidas por el flujo del agua.

3. Fenómenos transitorios con aire atrapado.

El aire puede introducirse a un acueducto de diversas formas. Puede entrar por vórtices formados en la succión de las bombas, el cual puede llegar hasta un 10% por volumen de agua. Hay ocasiones que al presentarse presiones por debajo de la atmosférica producen que el aire entre por sellos defectuosos en juntas y válvulas. Además de esto, es sabido que normalmente el agua contiene 2% de aire disuelto, el cual puede ser liberado cuando se producen presiones negativas o cuando aumenta la temperatura, provocando la formación de bolsas de aire en la conducción. Todo esto hace ver la importancia de considerar el aire atrapado en el análisis de fenómenos transitorios.

3.1. Efecto de las bolsas de aire en transitorios hidráulicos

El aire atrapado en la conducción puede tener tanto efectos benéficos como perjudiciales, esto está en función del volumen de aire, la localización del mismo, la configuración del sistema y las causas del transitorio

Las bolsas de aire de gran tamaño pueden llegar a reducir el valor de las sobrepresiones causadas por los fenómenos transitorios. En el caso de que el flujo de agua lleve baja velocidad tienden a formarse bolsas de aire de gran tamaño (Kottmann, 1992; Horlacher y Ludecke, 1992; Thorley, 2004).

Uno de los efectos perjudicial está relacionado con las aparición de sobrepresiones importantes en la descargad de las bombas, y además el aire puede ocasionar una mayor velocidad de giro en reversa de los impulsores de las bombas.

Brown (1968) realizó un análisis teórico basado en el método de las características. Para esto consideró que las bolsas de aire se encontraban a una distancia equidistante a lo largo del acueducto. Concluye que es muy importante considerar el efecto del aire atrapado en los acueductos.

Martin (1976) concluye con sus simulaciones que la situación más crítica ocurre cuando la columna de agua se acelera rápidamente hacia un volumen de aire que se encuentra confinado contra una válvula cerrada u otra columna de agua.

Jönsson (1985) concluyó con sus investigaciones teóricas y experimentales realizadas en plantas de bombeo de aguas residuales que los pequeños volúmenes de aire generan mayores presiones, y recomienda que los picos importantes de presión sean considerados en la etapa de diseño de los acueducto.

Hashimo et al. (1988) realizaron estudios de transitorios hidráulicos ocasionados por la apertura rápida de una válvula con una bolsa de aire localizada en el extremo aguas arriba de la tubería. Encontraron presiones máximas 2.4 veces más grandes a las de operación normal sin aire atrapado.

Larsen y Burrows (1992) compararon las mediciones de presiones transitorias tomadas de tres sistemas de bombeo de aguas residuales con un programa llamado WHPS. Concluyen que las bolsas

de aire pueden reducir o amplificar las presiones durante los transitorios, esto en función del volumen de aire y de las causas del transitorio.

Qiu (1995), Burrows y Qiu (1995) y Qiu y Burrows (1996) estudiaron casos reales donde se observa la influencia de las bolsas de aire en transitorios hidráulicos. En algunos de estos casos los efectos pueden ser catastróficos, tal como la ruptura del acueducto. Las presiones pueden tener un incremento entre 1.6 y 2 veces las que se tienen en régimen establecido. Afirman que cuando hay una interrupción del flujo por un paro en los equipos de bombeo, las bolsas de aire pequeñas pueden ser muy perjudiciales.

Förster (1997) investigó el efecto de las grandes bolsas de aire en acueductos de manera analítica y experimental. Propone una expresión adimensional para estudiar el efecto de éstas durante los transitorios en los acueductos.

Fuertes (2001) propone un modelo matemático para el estudio de transitorios en acueductos con bolsas de aire atrapadas en puntos altos. El modelo es el de parámetros concentrados con la movilidad de las interfaces aire-agua. Obtuvo buena concordancia al compararlo con investigaciones experimentales realizadas posteriormente.

Zhou (2000) estudió un caso donde una fuerte tormenta generó daños al sistema que transporta el agua de lluvia y residual de la ciudad de Edmonton, Canadá. Una tapa de un registro salió disparada por los aires a causa de la compresión de una bolsa de aire. Se utilizó un programa computacional basado en la teoría de columna rígida, calibrando este con datos experimentales. Se concluyó que una onda de sobrepresión provocada por el flujo en reversa causó los daños estructurales en el sistema.

Burrows (2003) se enfrenta a un caso en el Reino Unido donde el perfil de una conducción fue modificada por la construcción de una carretera, esto, aunado a que la cámara de aire instalada había dejado de funcionar, provocaron fracturas en la línea cuando se produjo un paro en los equipos de bombeo. Concluyó que una bolsa de aire pequeña se localizaba cerca del corte hecho para la construcción de una carretera, lo que generó un aumento en la magnitud de las sobrepresiones.

Ochoa (2005), con el objetivo de determinar el comportamiento del aire atrapado en conductos a presión, desarrolló un modelo matemático. Este modelo está basado en las ecuaciones de flujo separado para dos componentes. En flujo transitorio, calculó velocidades de volúmenes de aire durante la remoción hidráulica y las sobrepresiones cuando se reduce el flujo de agua a través del sistema.

3.2. Modelo numérico para el efecto de bolsas de aire en transitorios hidráulicos.

Tiene el objetivo de demostrar el efecto del aire atrapado en acueductos cuando se presentan transitorios hidráulicos provocados por el paro repentino de los equipos de bombeo.

Se basa en el método de las características, y en la teoría y procedimientos presentados por Wylie y Streeter (1978), Chaudhry (1987), Wylie et al. (1993) y Burrows y Qiu (1995).

Consideraciones tomadas en cuenta para la implementación del modelo numérico:

- El método de las características es usado para obtener las ecuaciones diferenciales ordinarias. Estas son evaluadas a lo largo de las líneas características con una aproximación de primer orden y sin interpolación.
- Las bolsas de aire tienen un tamaño predeterminado, no ocupan la totalidad de la sección transversal de la tubería, permanecen en su posición original durante el fenómeno transitorio y pueden estar localizadas en los nodos de la línea.
- La celeridad es constante durante el análisis.
- El comportamiento de la bolsa de aire es según la relación politrópica.
- Se consideran las pérdidas por fricción, por accesorios y las de las estaciones de bombeo.
- Las bolsas de aire se localizan en nodos coincidentes entre los tramos adyacentes de las tuberías.
- La bolsa de aire se localiza en el i -ésimo nodo (ver Figura 3.1).

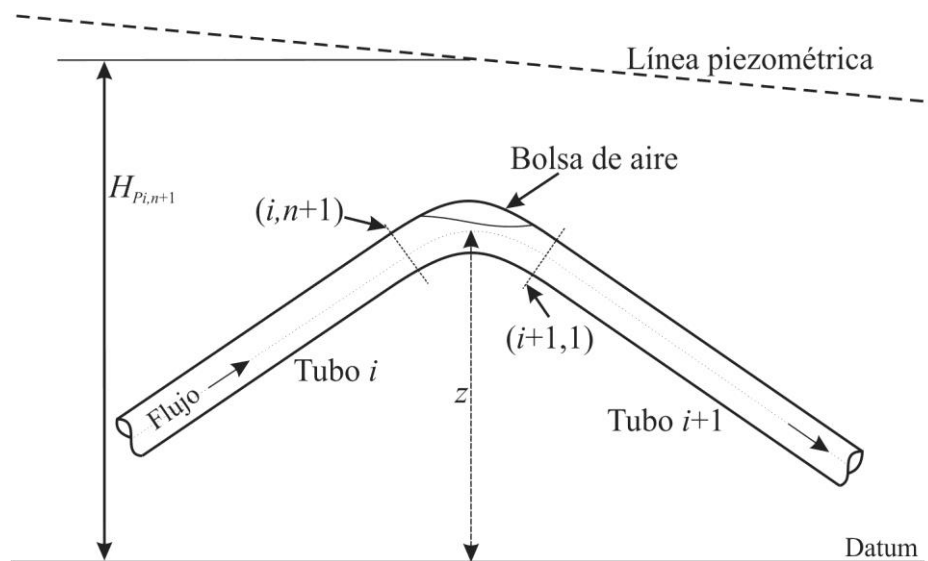


Figura 3.1. Esquema y notaciones para el análisis.

La ecuación (3.1) es la relación politrópica que describe el proceso de expansión y compresión del aire, relacionando la presión y el volumen. Considerando la carga piezométrica como $H = (p/\rho g) + z$.

$$HV^\Psi = C \quad (3.1)$$

Siendo

- H carga piezométrica
V volumen de aire

Ψ índice politrópico
 C constante

La ecuación (3.1) también puede escribirse como:

$$(H_{P_{i,n+1}} - z + H_b) V_{P_i}^\Psi = C \quad (3.2)$$

Siendo

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

Variando el valor del índice politrópico de 1.0 a 1.4 dependiendo de si es un proceso isotérmico lento o un proceso adiabático rápido, respectivamente.

La ecuación (3.3) es la expresión de continuidad para la bolsa de aire.

$$V_{P_i} = V_i + \frac{1}{2} \Delta t [(Q_{P_{i+1,1}} Q_{i+1,1}) - (Q_{P_{i,n+1}} + Q_{i,n+1})] \quad (3.3)$$

Siendo

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

Las variables desconocidas al final del intervalo $t+\Delta t$, son las que tienen el subíndice P . Las variables conocidas al inicio del intervalo t , son las que no tienen el subíndice P .

Las ecuaciones de las características positivas y negativas que se presentan al final de cada intervalo de tiempo son las ecuaciones (3.4) y (3.5), respectivamente.

$$Q_{P_{i,n+1}=C_{(+)}-C_{a_i} H_{P_{i,n+1}}} \quad (3.4)$$

$$Q_{P_{i+1,1}=C_{(-)}-C_{a_{i+1}} H_{P_{i+1,1}}} \quad (3.5)$$

Siendo

$$C_{(+)} = Q_{i,n+1} + C_{a_i} H_{i,n+1} - R_i Q_{i,n+1} |Q_{i,n+1}| \quad (3.6)$$

$$C_{(-)} = Q_{i+1,1} + C_{a_{i+1}} H_{i+1,1} - R_i Q_{i+1,1} |Q_{i+1,1}| \quad (3.7)$$

$$R_i = \frac{f_i \Delta t_i}{2D_i A_i} \quad (3.8)$$

$$R_{i+1} = \frac{f_{i+1} \Delta t_{i+1}}{2D_{i+1} A_{i+1}} \quad (3.9)$$

$$C_{a_i} = \frac{g A_i}{a_i} \quad (3.10)$$

$$C_{a_{i+1}} = \frac{g A_{i+1}}{a_{i+1}} \quad (3.11)$$

Siendo

- f factor de fricción de Darcy-Weisbach.
- Δt intervalo de tiempo
- D diámetro de la tubería
- A área de la sección transversal de la tubería
- g aceleración de la gravedad
- a celeridad

Cuando las pérdidas producidas por la unión de los tubos no son consideradas:

$$H_{P_{i,n+1}} = H_{P_{i+1,1}} \quad (3.12)$$

$H_{P_{i,n+1}}, V_{P_i}, Q_{P_{i+1,1}}, Q_{P_{i,n+1}}$ y $H_{P_{i+1,1}}$ forman un sistema de cinco ecuaciones con cinco incógnitas. La ecuación (3.13) puede resolverse mediante un método iterativo para $H_{P_{i,n+1}}$, por ejemplo, por el método de la bisección.

$$(H_{P_{i,n+1}} + H_b - z) \left[C_{aire} + \frac{1}{2} \Delta t (C_{a_i} + C_{a_{i+1}}) H_{P_{i,n+1}} \right]^\Psi = C_1 \quad (3.13)$$

$$C_{aire} = V_i + \frac{1}{2} \Delta t (Q_{i+1,1} - Q_{i,n+1} + C_{(-)} - C_{(+)}) \quad (3.14)$$

Es importante que la condición de Courant se cumpla en todo momento

$$\Delta x \geq a \Delta t \quad (3.15)$$

3.2.1. Procedimiento de cálculo.

Los datos de entrada y las condiciones son: el perfil del acueducto, propiedades del fluido (densidad y viscosidad) y las características de los tubos, tales como la longitud, diámetro, factor de fricción y celeridad.

Necesitan ser identificados los puntos donde el aire se podría acumular. Para la localización de las bolsas se necesita primero definir dos conceptos:

- La pendiente de la tubería. Para el cálculo de la pendiente es necesario tener el cadenamiento y la elevación de la línea de conducción. Con estos datos se calcula la pendiente del tubo entre cada dos puntos $P_n(x_n, y_n)$ y $P_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1})$. Es importante recordar que en hidráulica la pendiente descendente se considera positiva. Por lo tanto, está definida como $S = \frac{y_n - y_{n+1}}{x_{n+1} - x_n}$, siendo y_n y y_{n+1} puntos de elevaciones en el perfil del acueducto, y siendo x_{n+1} y x_n puntos del cadenamiento (Figura 3.2).

	A	B	C	D
1	Cadenamiento (m)	Elevación sub-Rasante (m)	S	
2	0	1316.66		
3	20	1316.	$=(B2-B3)/(A3-A2)$	
4	40	1316.4	0.013	
5	60	1314.99	0.0705	
6	80	1314.2	0.0395	
7	100	1313.13	0.0535	
8	120	1311.36	0.0885	
9	140	1309.17	0.1095	
10	160	1306.71	0.123	
11	180	1306.01	0.035	

Figura 3.2. Ejemplo del cálculo de la pendiente.

- El gasto adimensional, definido como $\frac{Q^2}{gD^5}$, siendo Q el gasto de operación del sistema, D el diámetro de la tubería y g la aceleración de la gravedad, se utiliza 9.81 m/s^2 como valor estándar

Una vez calculados los parámetros de gasto adimensional (PGA) y las pendientes del perfil se procede a compararlos de la siguiente manera: el aire avanzará cuando el PGA sea mayor que el valor de la pendiente, y en caso contrario, cuando la pendiente tenga un valor mayor que el PGA el aire regresará; en caso de que el PGA y la pendiente tengan el mismo valor las bolsas de aire permanecerán estacionarias

En caso de que no se identifiquen puntos donde el aire pueda quedar atrapado, la simulación de transitorios hidráulicos se realizará sin considerar las bolsas de aire. En caso contrario, el aire debe considerarse en la simulación y se procede al cálculo del volumen de las bolsas de aire.

Para calcular el volumen necesitamos primero calcular el perfil del flujo en los tramos donde se presenta el aire atrapado. Para esto se debe suponer que el comportamiento del flujo debajo de las bolsas de aire es muy similar al flujo que se presenta en canales, por lo que la teoría del flujo gradualmente variado resulta adecuada para el análisis.

En este caso se utiliza el método del paso directo (MPD) para el cálculo de los perfiles.

Se considera que el tirante que se presenta en la transición entre las dos pendientes como el crítico.

Los perfiles aguas arriba de la sección de control se calcularon en dirección contraria al flujo hasta que el tirante fuese igual al diámetro interno de la tubería. Por el otro lado, los perfiles aguas abajo se calcularon de la sección de control en dirección al flujo hasta que el tirante calculado fuese igual al tirante normal.

Metodología para el método del paso directo

- Calcular el tirante crítico, según Swamee (1993) este se puede calcular con $\frac{y_c}{D} = \left[1 + 0.77 \left(\frac{Q^2}{gD^2} \right)^{-3} \right]^{-0.085}$ esto para cuando la tubería está entre el 2% y 100% llena.
- Cálculo del tirante normal, se propone $\frac{AR_h^{2/3}}{D^{8/3}} = \frac{nQ}{D^{8/3}S^{1/2}}$ y por medio de gráficas encontrar la relación $\frac{y}{D}$ y así encontrar el tirante normal.
- Para el cálculo de este método es necesario adoptar un incremento del tirante, para el perfil aguas arriba, y un decremento, para el perfil aguas abajo; de tal manera que el análisis se haga hasta las condiciones de frontera previamente establecidas para aguas arriba (diámetro interno de la tubería) y aguas abajo (tirante normal).

El incremento se define como:

$$\Delta Y = \frac{Y_m - Y_i}{k} \quad (3.16)$$

El decremento se define como

$$\Delta Y = \frac{Y_i - Y_n}{k} \quad (3.17)$$

Donde

ΔY 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.

- Cálculo del área hidráulica A_i , velocidad media del agua v_i , perímetro mojado P_i y radio hidráulico R_i para cada Y_i ,

$$A_i = \frac{D^2}{4} (\theta - \sin \theta \cos \theta) \quad (3.18)$$

$$v_i = \frac{Q_{wi}}{A_i} \quad (3.19)$$

$$P_i = \theta D \quad (3.20)$$

$$R_i = \frac{A_i}{P_i} \quad (3.21)$$

Siendo $\theta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2Y_i}{D} \right)$

- Cálculo de la pendiente de fricción correspondiente con Manning.

$$S_f = \left(\frac{nv}{R^{2/3}} \right)^2 \quad (3.22)$$

- Cálculo de la longitud de los tramos de la tubería $\Delta x_{i,i+1}$ entre las secciones consecutivas i e $i+1$. Los tramos de tubería siempre son positivos.

$$\begin{aligned} \Delta x_{i,i+1} &= \frac{E_i - E_{i+1}}{S - S_{fm}} = \frac{E_i - E_{i+1}}{S - 0.5(S_{fi} + S_{fi+1})} \\ &= \frac{(Y_i + v_i^2/2g) - (Y_{i+1} + v_{i+1}^2/2g)}{S - 0.5n^2 \left(v_i^2/R_i^{4/3} + v_{i+1}^2/R_{i+1}^{4/3} \right)} \end{aligned} \quad (3.23)$$

- Se calcula el volumen de aire tanto aguas arriba como aguas abajo de la sección de control,

$$\begin{aligned} V = \left\{ \left[A - \frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right] \Delta x_{i,i+1} + \left[A - \frac{A_{i+1} + A_{i+2}}{2} \right] \Delta x_{i+1,i+2} + \dots \right. \\ \left. + \left[A - \frac{A_{i-m} + A_m}{2} \right] \Delta x_{i-m,m} \right\} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Finalmente se realiza la simulación de los transitorios hidráulicos con aire atrapado.

En el siguiente capítulo se utiliza el modelo numérico antes descrito, para simular transitorios con aire atrapado en el acueducto el Cuchillo-Monterrey.

4. Caso de estudio: Acueducto El Cuchillo-Monterrey.

El acueducto El Cuchillo-Monterrey tiene el fin de llevar el agua desde la presa El Cuchillo hasta la zona metropolitana de Monterrey. Los primeros análisis efectuados arrojaron resultados que comprometían el adecuado funcionamiento del sistema. Se encontró que el sistema de control de

transitorios por corte de bombeo, el cual estaba formado por tanques unidireccionales y torres de oscilación, era insuficiente. Esto ocurrió debido a que se consideró un momento de inercia erróneo de los equipos de bombeo de todas las plantas.

Debido a lo anterior, la puesta en marcha del acueducto se hizo por etapas, en función del número de equipos en operación por planta de bombeo. El análisis arrojaba que desde la operación con un equipo de bombeo por planta los transitorios por corte de bombeo generarían presiones negativas en algunas secciones de la conducción en cuatro de los cinco tramos de bombeo. Se determinó que era conveniente agregar un sistema de 3 cámaras de aire en la descarga de cada planta de bombeo que complementarían al sistema de control de transitorios ya existente.

Pero dada la urgencia de iniciar con la operación del acueducto se puso en marcha una forma no convencional de protección contra presiones transitorias negativas, la cual permitió operar con dos de las cinco bombas con las que cuenta cada planta de bombeo. Esta solución se basó en el ingreso de aire a través de válvulas de admisión y expulsión distribuidas a lo largo del acueducto.

El Acueducto El Cuchillo-Monterrey cuenta con una longitud total de 90 km, trabaja completamente a presión y tiene que sortear un desnivel topográfico de 326 m, por lo que cuenta con cinco estaciones de bombeo (denominadas PB0 hasta PB4). Cada estación cuenta con cinco bombas, más una de reserva, con capacidad para impulsar hasta 6 m³/s. Funcionan con cargas de bombeo que van desde los 79.32 m en PB2, hasta los 100.76 m en PB4, esto para un gasto de 1.2 m³/s por bomba. El material de la tubería es de acero con diámetros de 2.5 y 2.13 m en los tramos de succión, que comprenden entre el tanque de sumergencia y la planta de bombeo, y de descarga, que corresponden a los que se encuentran entre la planta de bombeo y el tanque de sumergencia de la siguiente planta, respectivamente. El perfil del acueducto, que va desde la presa El Cuchillo hasta la planta potabilizadora de San Roque, cerca de la ciudad de Monterrey, se muestra en la Figura 4.1.

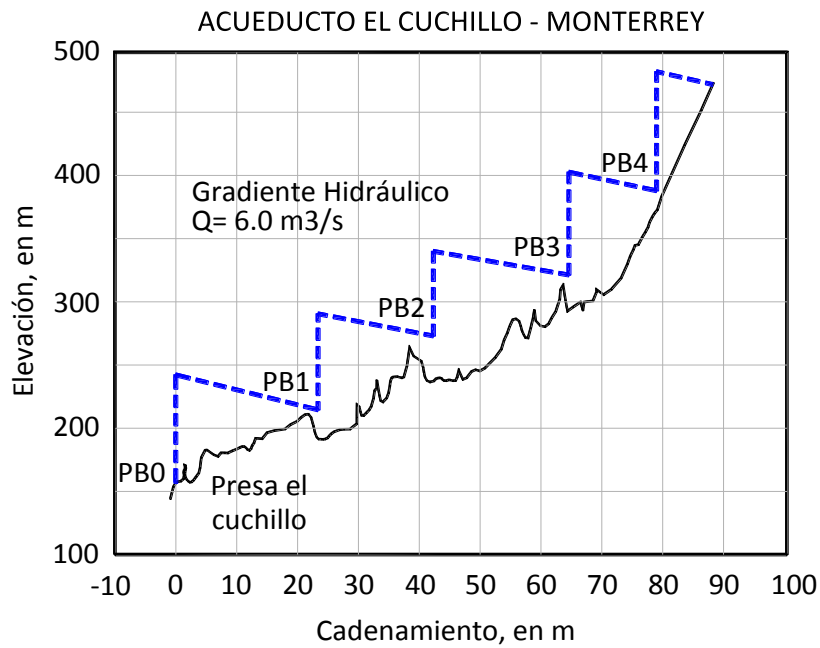


Figura 4.1. Perfil del Acueducto El Cuchillo-Monterrey.

Originalmente el sistema contaba con 11 tanques unidireccionales, que van desde los 17 hasta los 34 m de altura con diámetros desde los 4.5 m hasta los 7 m, y 3 torres de oscilación, con alturas desde 11 hasta 20 m y diámetros entre los 4.1 m y 6 m, para el control de transitorios. En la Tabla 4.1 se muestran algunos datos del acueducto por tramos.

Tabla 4.1. Resumen de características por tramos del acueducto El Cuchillo-Monterrey.

Planta	Longitud (m)	Carga (m)	Tanques unidireccionales	Torres de oscilación
PB0	23,200	80.12	3	1
PB1	18,200	81.82	2	1
PB2	23,000	79.32	2	-
PB3	15,700	83.42	2	1
PB4	9,800	100.76	2	-

4.1. Análisis transitorios.

En los cálculos de transitorios hidráulicos por corte de bombeo que se realizaron, el momento de inercia de las bombas es uno de los parámetros de mayor importancia. Esto se acentúa más cuando se observa que los valores del momento de inercia usados para el diseño original son cuatro veces más grandes que los especificados por los fabricantes de las bombas (ver Tabla 4.2). Esto resulta en que las presiones mínimas calculadas son significativamente menores a las especificadas en el diseño.

4.1.1 Momento de inercia de las bombas.

Se define al momento de inercia del conjunto motor-bomba como la suma de los momentos de inercia del motor y la bomba. Thorley (1991) propone las siguientes ecuaciones para calcularlos

$$I(\text{bomba}) = 0.03769 \left(\frac{P}{N^3} \right)^{0.9556} \quad (4.1)$$

$$I(\text{motor}) = 0.043 \left(\frac{P}{N} \right)^{1.48} \quad (4.2)$$

Siendo

N velocidad de giro de las bombas, en miles de rpm.

P Potencia mecánica, en kW.

La potencia mecánica se calcula con la siguiente ecuación

$$P = \frac{\rho g Q H}{\eta} \quad (4.3)$$

Siendo

ρ densidad del fluido, en kg/m^3 .

g la aceleración de la gravedad, en m/s^2 .

Q el gasto en el punto de operación de máxima eficiencia, en m^3/s .

H la carga en el punto de operación de máxima eficiencia, en m .

η la eficiencia.

En la Tabla 5.2 se muestran algunos datos de los equipos de bombeo de la planta PBO del acueducto El Cuchillo-Monterrey.

Tabla 4.2. Características de los equipos de bombeo de la planta PBO.

Carga nominal	81.82	m
Gasto nominal	1.2	m^3/s
Eficiencia nominal	89.1	%
Velocidad de giro	1180	rpm
Momento de inercia motor	98.75	kg/m^2
Momento de inercia bomba	15.00	kg/m^2
Momento de inercia total	113.75	kg/m^2

En la tabla 4.3 se muestran los momentos de inercia de los conjuntos bomba-motor para cada planta de bombeo, especificados por el fabricante y los calculados durante el diseño.

Tabla 4.3. Valores del momento de inercia: los especificados por el fabricante y los utilizados en el diseño original.

Planta	Datos de los fabricantes			Datos de diseño	Valores estimados		
	Bomba wk ²	Motor GD ²	Total wk ²		Bomba wk ²	Motor GD ²	Total wk ²
PB0	13.19	405	114.44	460	21.7	132.1	153.8
PB1	15	395	113.75	510	18.6	104	122.6
PB2	15	395	113.75	510	18	98.7	116.7
PB3	15	395	113.75	510	18.9	106.7	125.6
PB4	22	415	125.75	510	22.9	144	166.9

4.1.2 Operación transitoria de las bombas.

La operación transitoria de las bombas se define a través de las siguientes tres ecuaciones:

Carga en la bomba

$$f_h(\theta) = \frac{h}{v^2 + \alpha^2} \quad (4.4)$$

Par aplicado al eje de la bomba

$$f_\beta(\theta) = \frac{\beta}{v^2 + \alpha^2} \quad (4.5)$$

Ecuación dinámica o de las masas rotantes

$$T = -I \frac{dN}{dt} \quad (4.6)$$

Las variables de estas ecuaciones se definen como

- h carga adimensional, $h = H/H_R$.
- v gasto adimensional, $v = Q/Q_R$.
- α velocidad de rotación adimensional, $\alpha = N/N_R$.
- β momento de la bomba adimensional, $\beta = H/H_R$.
- I momento de inercia del conjunto motor-bomba, en $kg\cdot m^2$.

Refiriéndose el subíndice R al valor de la variable correspondiente a la operación de la bomba a máxima eficiencia.

Otra definición que se usa para describir la operación transitoria de las bombas es

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha}{v} \right) \quad (4.7)$$

De tal manera que apoyándose en estas definiciones, y con las curvas de la operación transitoria de las bombas para la carga y para el torque, se obtienen los siguientes resultados que se resumen en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Curvas características de las bombas del acueducto El Cuchillo-Monterrey.

θ	F_h	F_β
0	-0.694	-0.44
15	-0.379	-0.088
30	0.03	0.304
45	0.5	0.5
60	0.895	0.633
75	1.262	0.59
90	1.428	0.459
105	1.361	0.38
120	1.327	0.37
135	1.183	0.497
150	1.109	0.731
165	1.039	0.862
180	0.933	0.845
195	0.829	0.732
210	0.652	0.483
225	0.481	0.241
240	0.49	0.003
255	0.417	-0.288
270	0.342	-0.644
285	0.171	-1.075
300	-0.068	-1.379
315	-0.359	-1.532
330	-0.6	-1.377
345	-0.75	-0.953
360	-0.694	-0.44

4.1.3 Válvulas de movimiento controlado.

La apertura o el cierre de este tipo de válvulas pueden ser operados manualmente o por medio de un motor, el tiempo de apertura o cierre es programable.

La pérdida de carga que se produce en las válvulas de control que se localizan en las descargas de las bombas del Acueducto El Cuchillo-Monterrey se muestra en la figura 4.2.

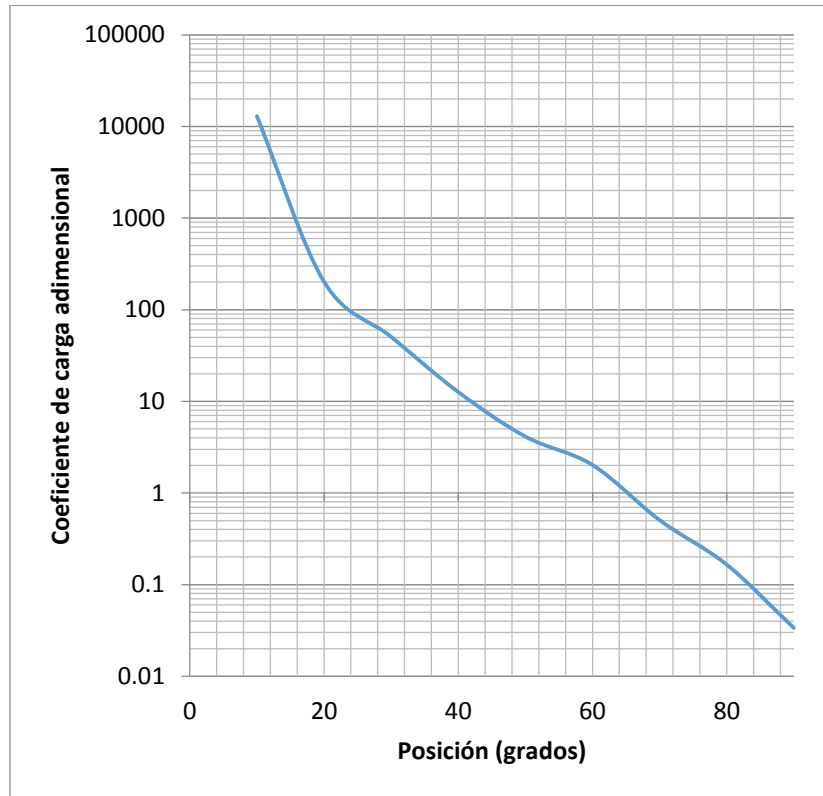


Figura 4.2. Coeficiente de pérdida de carga en función del porcentaje de apertura de las válvulas de control del acueducto El Cuchillo-Monterrey.

Para el modelo matemático es necesario representar de manera analítica la curva proporcionada por el fabricante. Cada válvula se caracteriza por el coeficiente mínimo de pérdida K_{min} , el cual corresponde a la válvula totalmente abierta con dimensiones en s^2/m^5 , y un polinomio de 5° grado

$$K = K_{min} 10^{P(\tau)} \quad (4.8)$$

$$P(\tau) = a_0 + a_1\tau + a_2\tau^2 + a_3\tau^3 + a_4\tau^4 + a_5\tau^5 \quad (4.9)$$

Donde $K_{min} = k_{min}/2gA^2$, siendo A el área correspondiente al diámetro de la válvula y k_{min} el valor adimensional proporcionado por el fabricante.

Se calcula el coeficiente de pérdida para cada instante de tiempo. La relación entre el valor del coeficiente de pérdida y el tiempo se determina con la ecuación 4.10, cuando la válvula cierra y con la ecuación 4.11 cuando la válvula abre.

$$\tau = 1 - \frac{t}{t_{cierre}} \quad (4.10)$$

$$\tau = \frac{t}{t_{apertura}} \quad (4.11)$$

Los coeficientes a_i se obtienen ajustando un polinomio de 5° grado a los puntos que resultan de graficar τ contra el logaritmo en base 10 de los cocientes k/k_{min} , tal como se muestra en la figura 4.3.

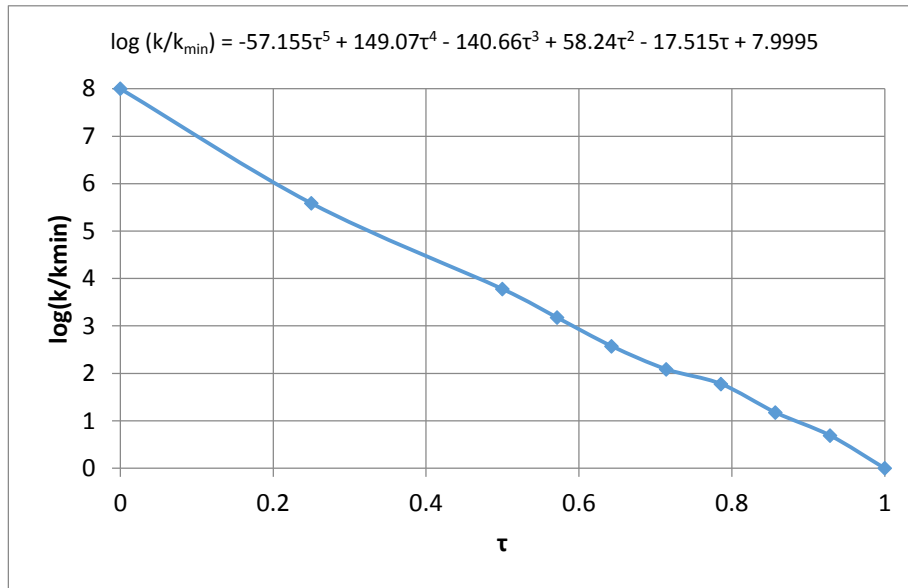


Figura 4.3. Ajuste de un polinomio de grado 5 a los puntos de $\log(k/k_{min})$ vs τ para la obtención de los coeficientes a_i .

4.1.4 TRANS 2010.1.0: descripción del software

Es un sistema de simulación de transitorios hidráulicos en tuberías a presión desarrollado por el Grupo de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIUNAM).

La simulación del estado transitorio es el resultado de la simulación conjunta de los elementos y estructuras que forman a la conducción y los eventos que suceden en ella. Los elementos, estructuras hidráulicas y eventos que se pueden simular con la versión 2010.1.0 del sistema Trans, son las siguientes:

- Apertura y cierre de válvulas.
- Aportaciones.
- Batería de tubos en paralelo.
- By pass.
- Cámaras de aire.
- Derivaciones.
- Descarga a carga constante.
- Operación de equipos de bombeo.
- Paro no programado e equipos de bombeo.

- Paro programado de equipos de bombeo.
- Tanques de carga constantes.
- Tanques de oscilación
- Tanques unidireccionales.
- Tuberías.
- Uniones.
- Válvulas aliviadoras de presión.
- Válvulas de admisión y expulsión de aire.
- Válvulas de retención.

Trans genera 5 archivos de resultados, en tres de ellos graba las variaciones a través del tiempo de la presión, el gasto, la velocidad de las bombas, los niveles de agua en los tanques y los volúmenes de aire admitidos por las válvulas de admisión y expulsión de aire. En otro registra las variaciones máximas de la presión a lo largo de la conducción durante el periodo de simulación, estos 4 archivos son tipo ASCII con valores separados por coma. En el archivo restante, graba información del archivo de datos e información de las operaciones en estado establecido y transitorio.

A continuación se hace una descripción del uso del software junto al ejemplo de simulación del tramo PBO sin aire incluido.

En la Figura 4.4 se muestra la pantalla de inicio del TRANS 2010.1.0 que aparece al ejecutar el programa.



Figura 4.4. Pantalla de inicio del TRANS 2010.1.0

Al dar click al botón de “simula transitorio” aparece la pantalla de la Figura 4.5, donde se cargará el archivo de datos necesario para correr la simulación.

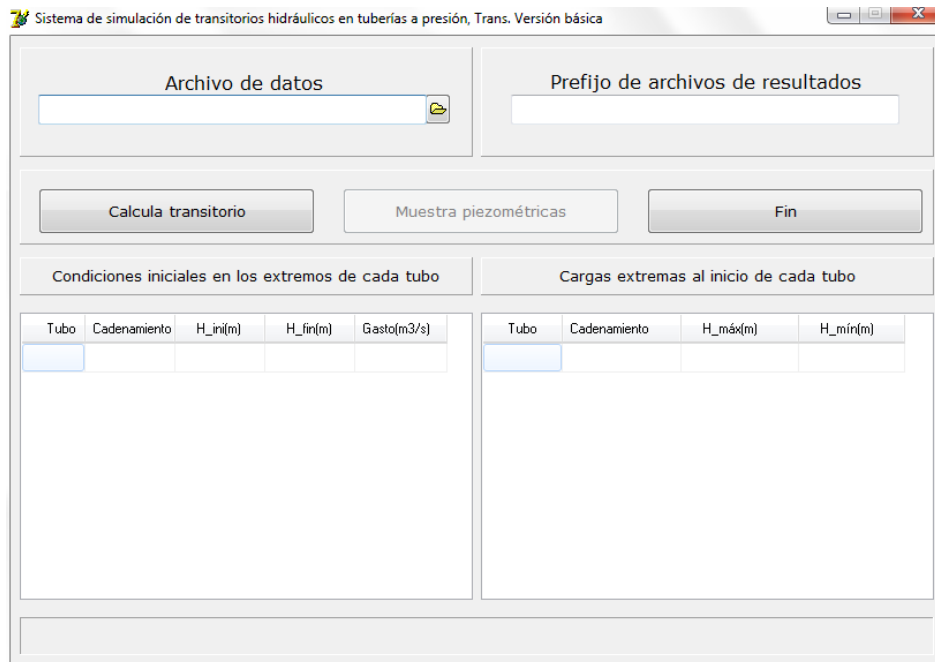


Figura 4.5. Captura de pantalla del TRANS 2010.1.0. Carga de datos para la simulación.

El archivo de datos de la simulación contiene los datos de entrada necesarios y está en formato TXT. En este se describen las características físicas, hidráulicas y las maniobras de operación particulares de cada sistema de conducción.

Al hacer click al botón “Calcula transitorio” se lleva a cabo la simulación, arrojando resultados que se muestran en el TRANS tal como se aprecia en la Figura 4.6.

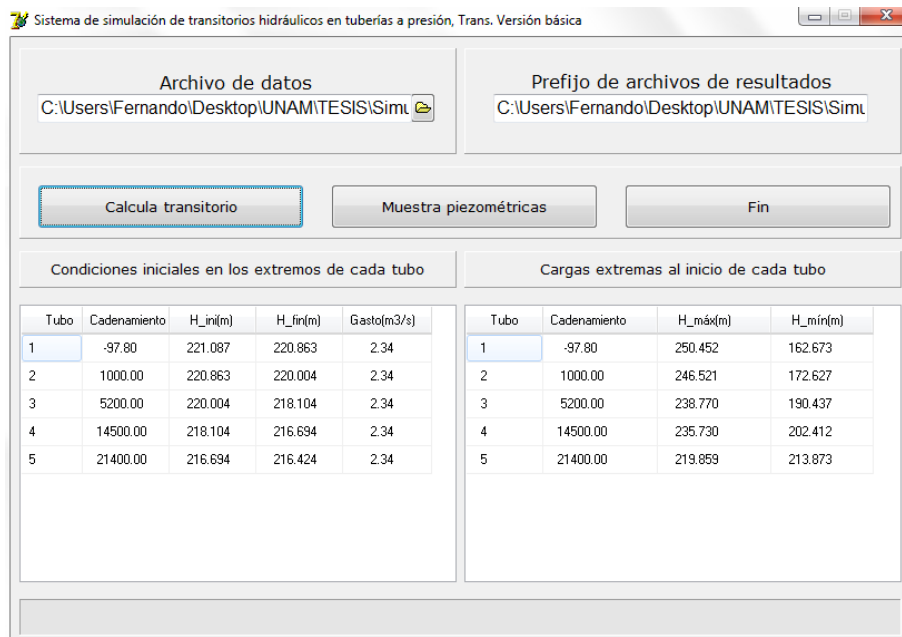


Figura 4.6. Pantalla al término de la simulación

Al término de la simulación se activa el botón “Muestra piezométricas” que al seleccionarlo se abre una nueva pantalla que muestra las piezométricas con las presiones máximas y mínimas obtenidas en la simulación y la de operación a gasto establecido, tal como se muestra en la Figura 4.7.

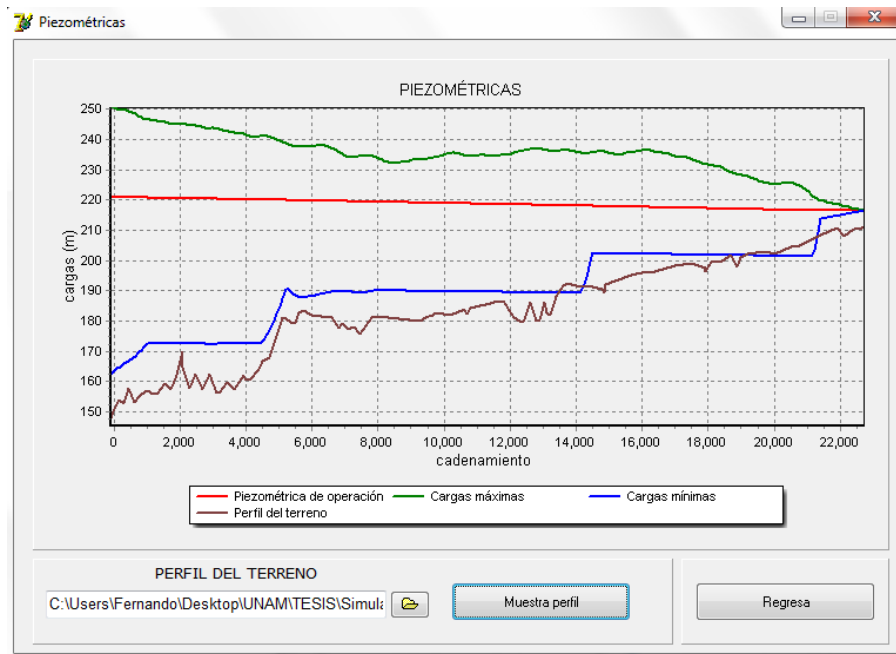


Figura 4.7. Piezométricas presentadas durante la simulación en el tramo PB0.

4.1.5 Modelo del transitorio hidráulico para el paro de cinco bombas por planta.

Para el modelo se utilizó el software de simulación de transitorios hidráulicos en tuberías a presión, TRANS, en su versión 2010.1.0.

Se llevó a cabo una primera simulación para flujo transitorio en un paro de cinco bombas en operación por cada planta.

Las envolventes obtenidas de las piezométricas máximas y mínimas por tramo de bombeo son presentadas en las figuras 4.8 a 4.12.

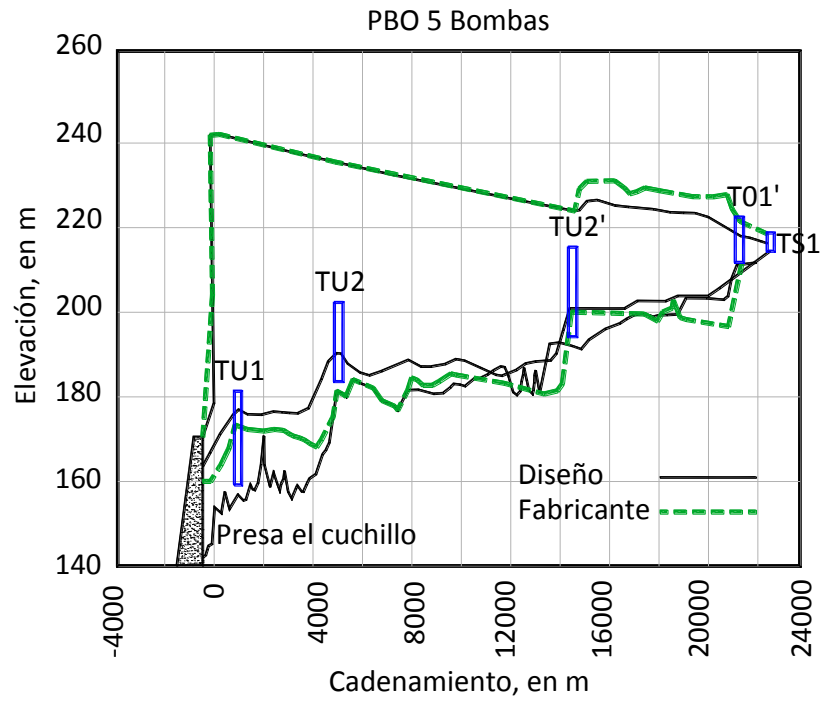


Figura 4.8. Envoltentes de las piezométricas del tramo PB0.

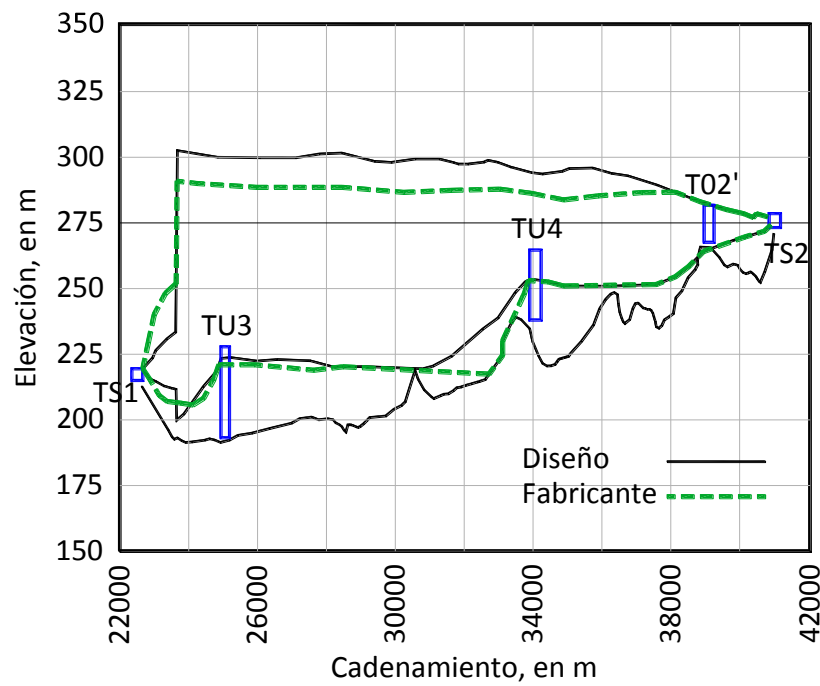


Figura 4.9. Envoltentes de las piezométricas del tramo PB1.

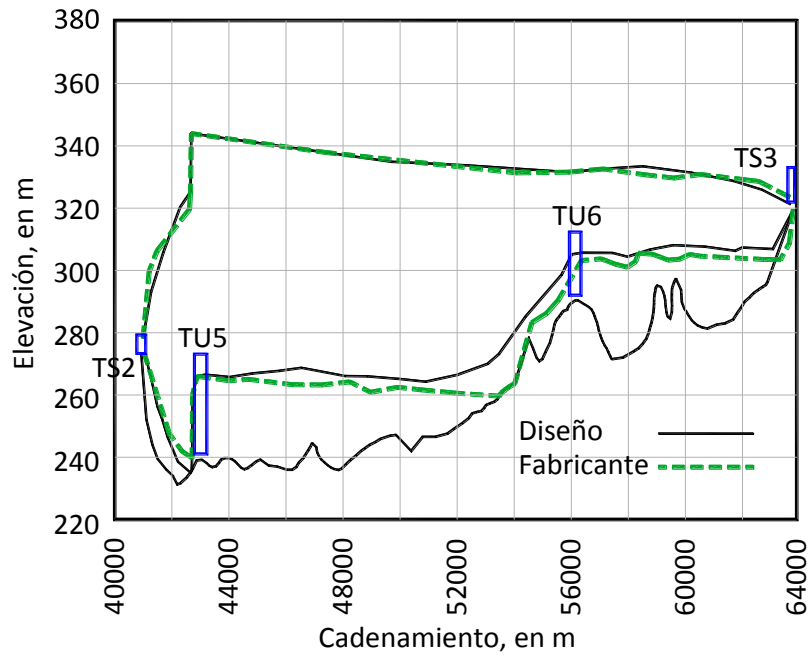


Figura 4.10. Envoltentes de las piezométricas del tramo PB2.

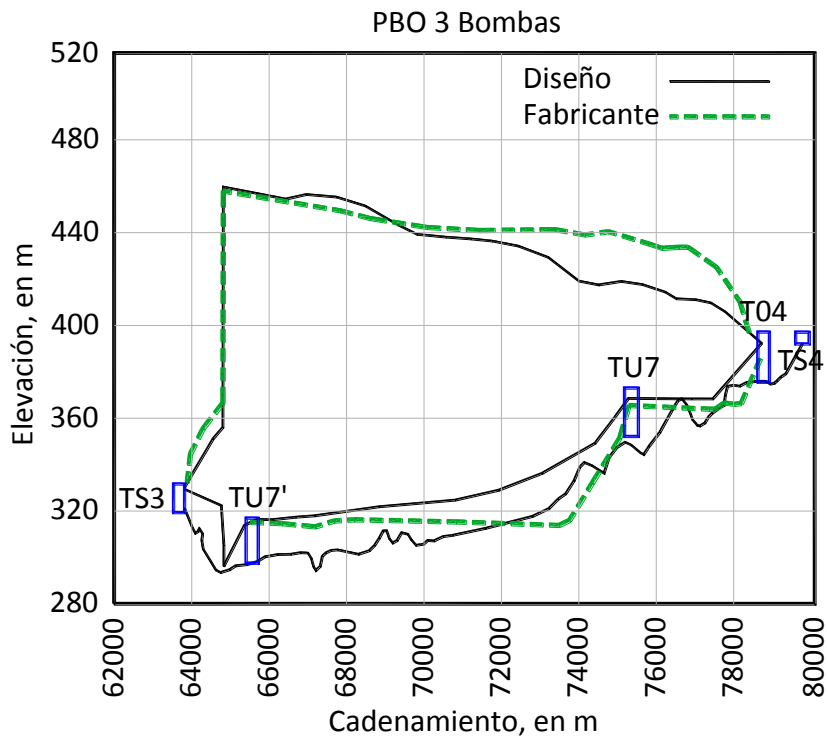


Figura 4.11. Envoltentes de las piezométricas del tramo PB3.

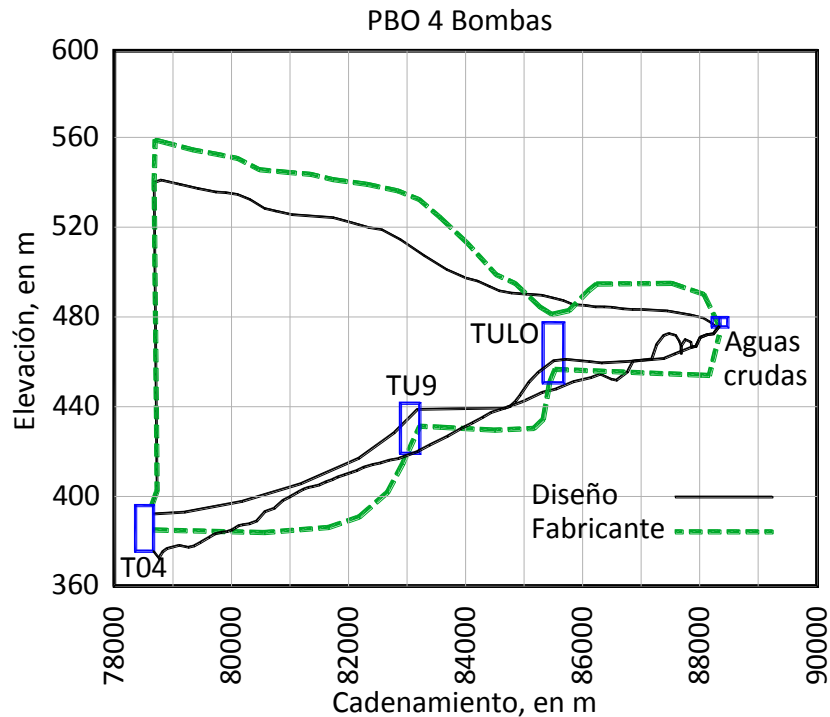


Figura 4.12. Envolventes de las piezométricas del tramo PB4.

Al comparar las envolventes de diseño con las que se generan al usar el momento de inercia del fabricante, se pudo observar una gran diferencia entre ellas, y se presenta el problema de presiones negativas en casi todos los casos.

Fue por esto que se propuso el sistema de tres cámaras de aire en la descarga de cada planta de bombeo, como complemento al sistema de control de transitorios existente.

4.2 Adecuación temporal del sistema de control de transitorios.

La adecuación se realizó reforzando la capacidad de admisión de aire del sistema con la colocación de válvulas de admisión de aire en determinados puntos.

4.2.1 Modelo del transitorio hidráulico para paro de dos bombas por planta.

De igual manera que en el caso anterior se utilizó el software de simulación de transitorios hidráulicos en tuberías a presión, TRANS, en su versión 2010.1.0.

En un inicio se realizó una simulación de los transitorios por cada tramo sin considerar aire en el sistema, considerando que sólo operan dos bombas por planta y ocurre el paro simultáneo de los equipos. Las envolventes de las piezométricas máximas y mínimas de los tramos se muestran en las figuras 4.13 a 4.17.

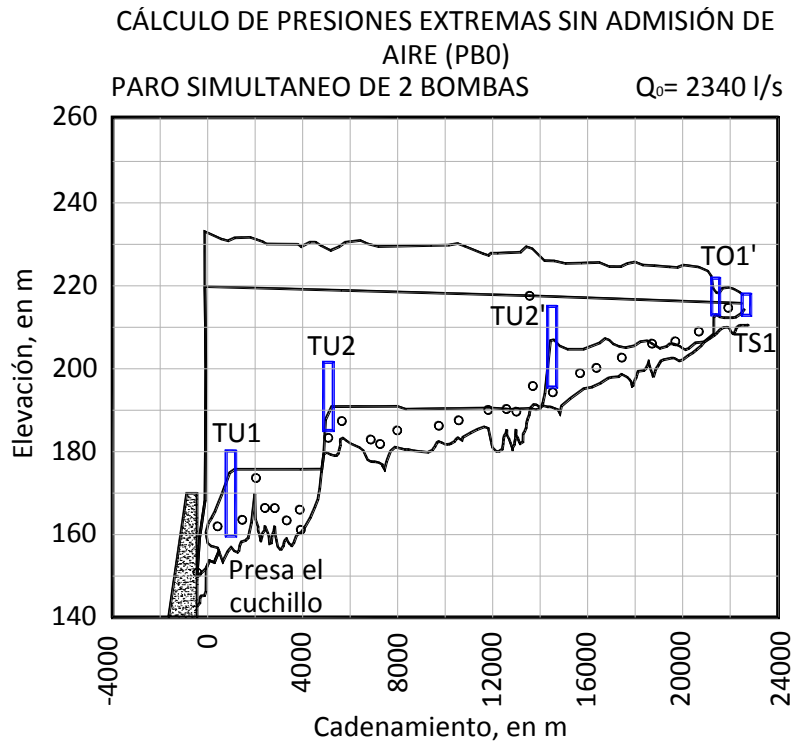


Figura 4.13. Envoltura de las piezométricas tramo PB0 sin admisión de aire.

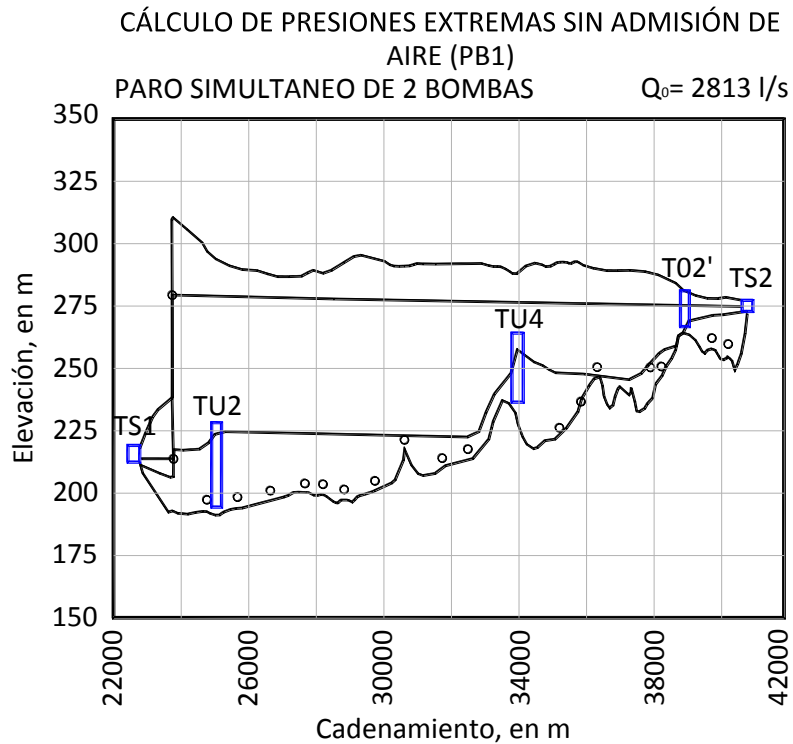


Figura 4.14. Envoltura de las piezométricas tramo PB1 sin admisión de aire.

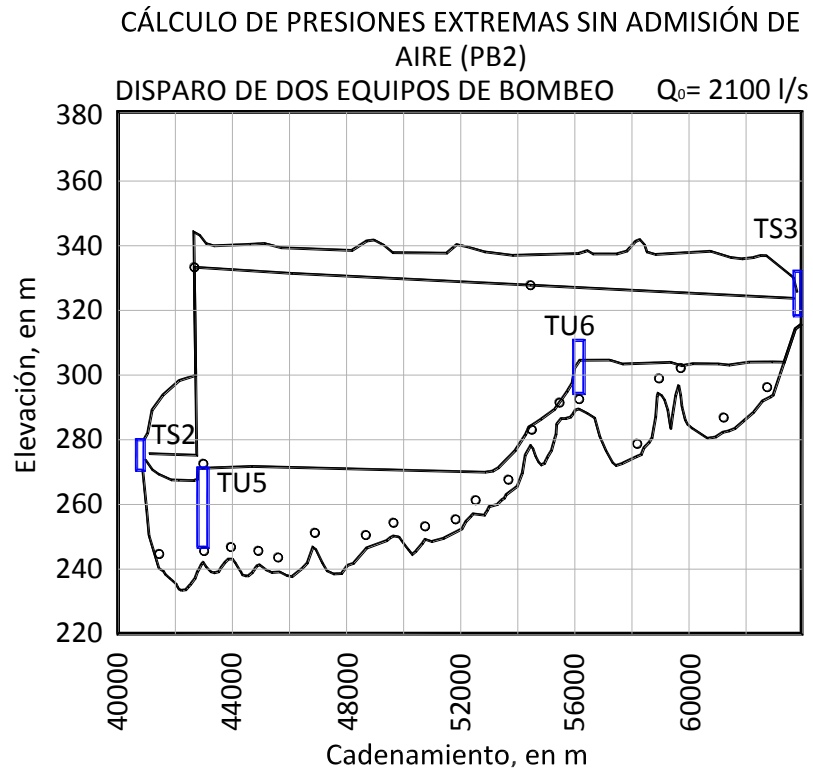


Figura 4.15. Envoltura de las piezométricas tramo PB2 sin admisión de aire.

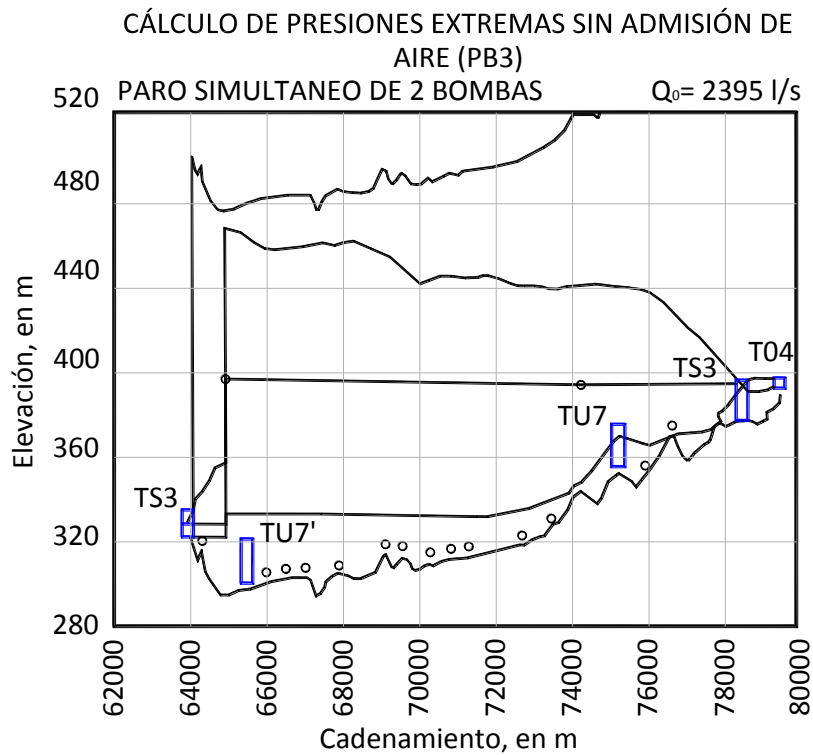


Figura 4.16. Envoltura de las piezométricas tramo PB3 sin admisión de aire.

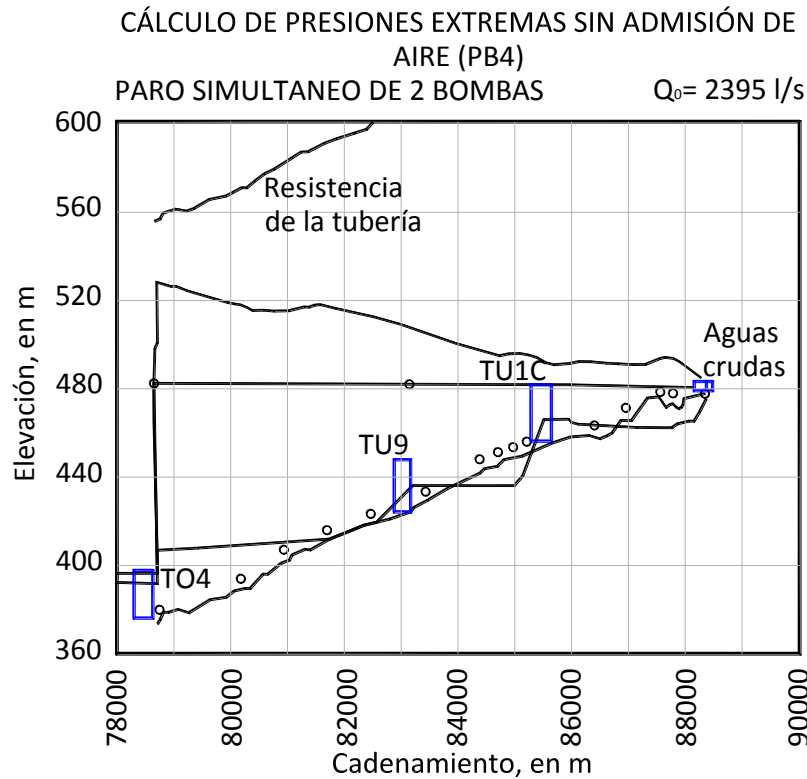


Figura 4.17. Envoltorio de las piezométricas tramo PB4 sin admisión de aire.

Se observó que existían zonas donde la envoltorio de piezométricas mínimas corta el perfil del acueducto, lo cual indica presiones negativas.

Después se continuó con la simulación del transitorio considerando la entrada de aire al sistema por medio de las válvulas de admisión existentes. Ésta se realizó utilizando un modelo numérico propuesto por el Instituto de Ingeniería, el cual representa los transitorios hidráulicos con separación de columna líquida.

Por último, para los tramos en donde todavía se presentaban presiones negativas, se ubicaron y dimensionaron nuevas válvulas de admisión y expulsión de aire (ver Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Dimensionamiento y localización de las válvulas adicionales de admisión de aire.

Planta	Cadenamiento (m)	Gasto de admisión (m^3/s)	Diámetro de la válvula (in)	Número de válvulas
PB0	13+600	0.293	4	1
PB1	38+800	0.704	6	2
PB2	54+560	1.003	6	2
PB3	74+236	0.049	4	1

En las figuras 4.18 a 4.22 se muestran las envolventes de las piezométricas máximas y mínimas de los diferentes tramos considerando el ingreso de aire durante el transitorio.

Se realizaron mediciones de campo después de la instalación de las válvulas de admisión de aire adicionales. Estas se realizaron en cada una de las plantas para el transitorio hidráulico producido por el paro simultáneo de dos equipos en operación al bombear un gasto cercano a los $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$.

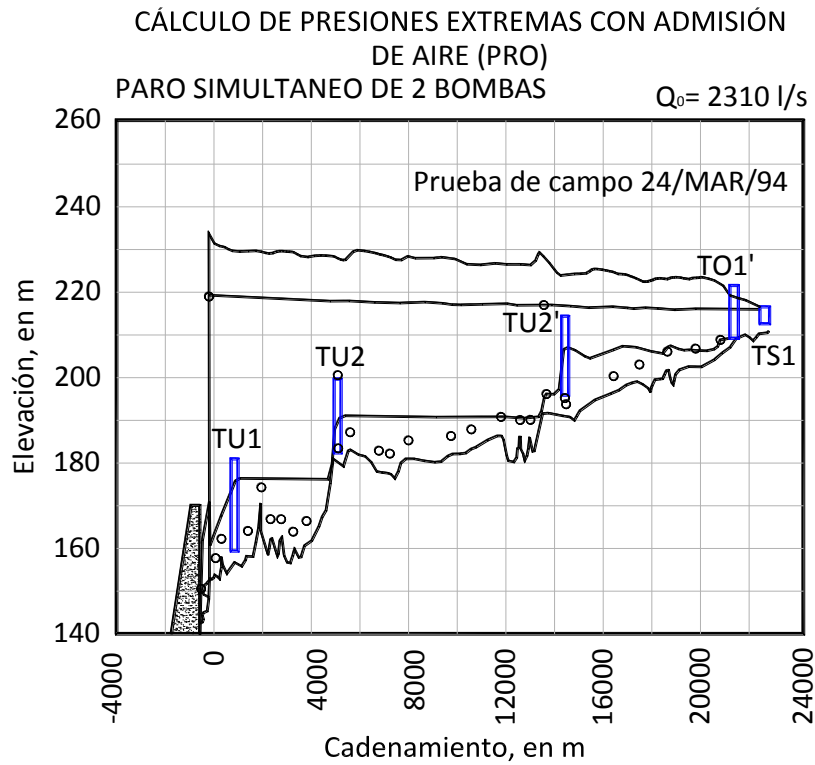


Figura 4.18. Envolventes de las piezométricas del tramo PB0 con admisión de aire.

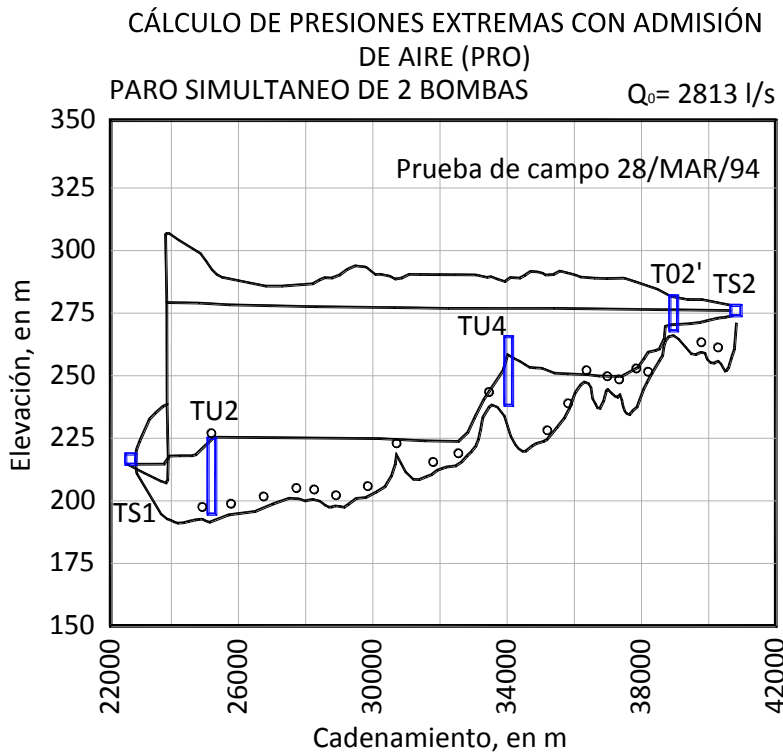


Figura 4.19. Envolventes de las piezométricas del tramo PB1 con admisión de aire.

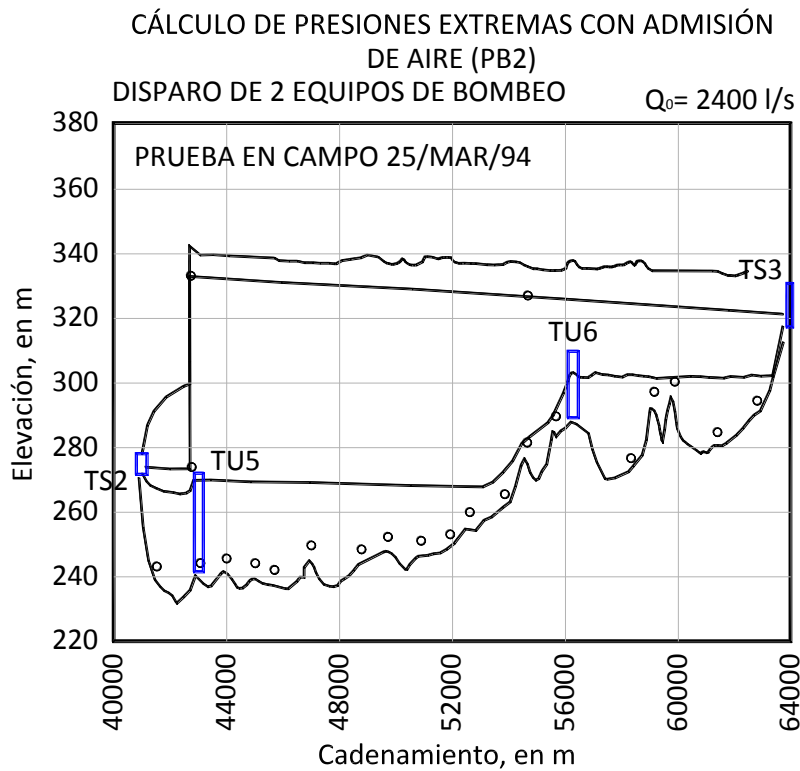


Figura 4.20. Envolventes de las piezométricas del tramo PB2 con admisión de aire.

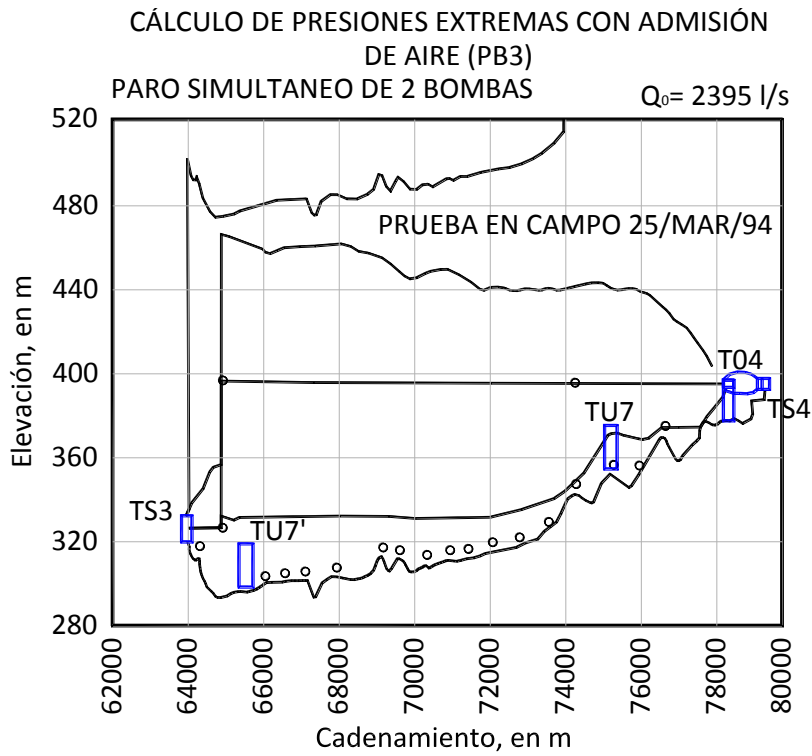


Figura 4.21. Envolventes de las piezométricas del tramo PB3 con admisión de aire.

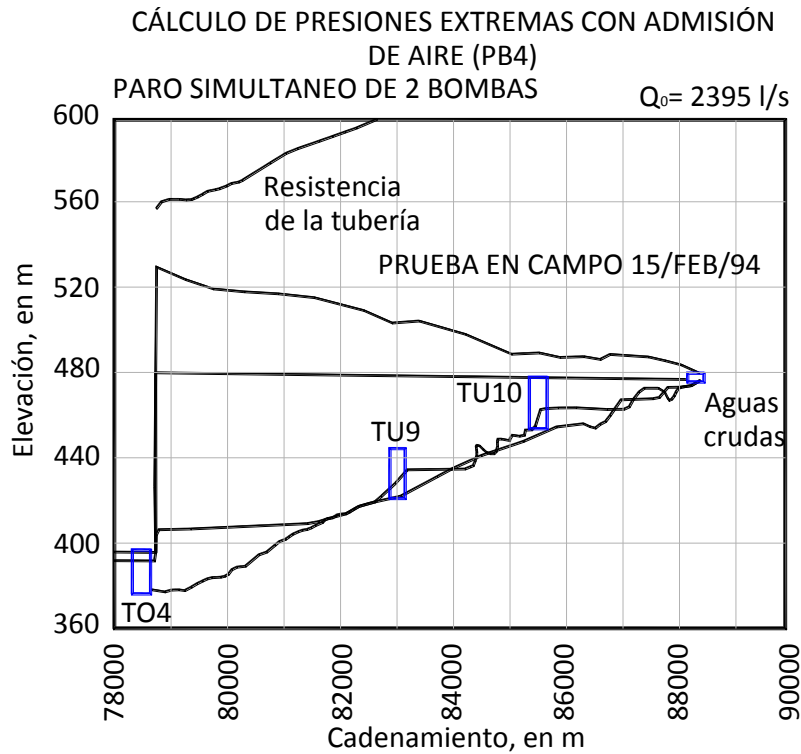


Figura 4.22. Envolventes de las piezométricas del tramo PB4 con admisión de aire.

4.3 Discusión de resultados

Se observa como esta solución permite operar hasta con 2 de las 5 bombas con las que cuenta cada planta sin que se presenten las presiones negativas importantes detectadas antes de la colocación de las válvulas de admisión y expulsión de aire.

La inclusión de aire en el sistema resulta ser una protección satisfactoria para el control de las presiones mínimas en la conducción, y de esta manera, operando con dos bombas por planta, evitar riesgos de colapso.

Es importante que el mantenimiento a las válvulas sea continuo, puesto que el aire que ingresa durante el fenómeno transitorio debe de ser expulsado por las mismas válvulas al regresar el sistema a la operación normal.

En las figuras 4.23 a 4.32 se pueden apreciar las presiones máximas y mínimas, tanto las calculadas como las medidas en campo, presentadas tanto en la descarga de las bombas como en las válvulas propuestas.

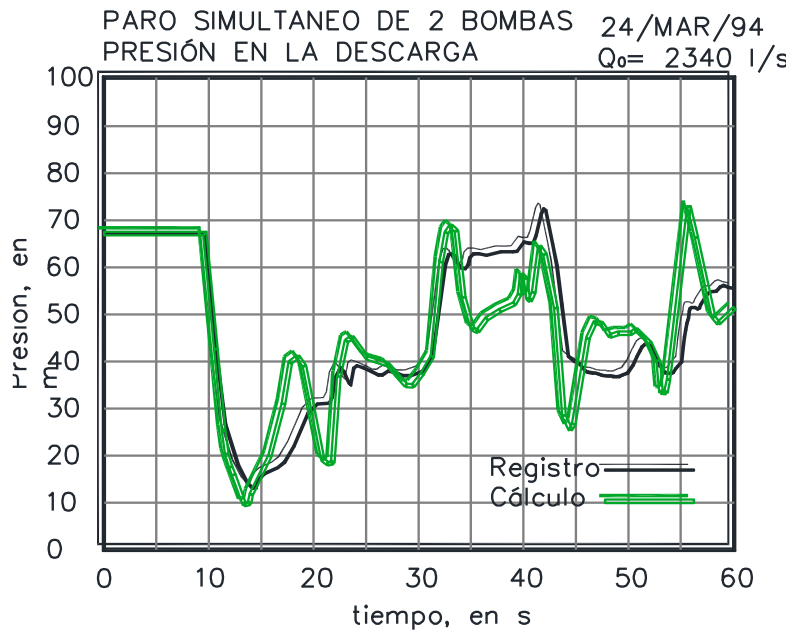


Figura 4.23. Presiones calculadas y registradas en la descarga de las bombas del tramo PB0.

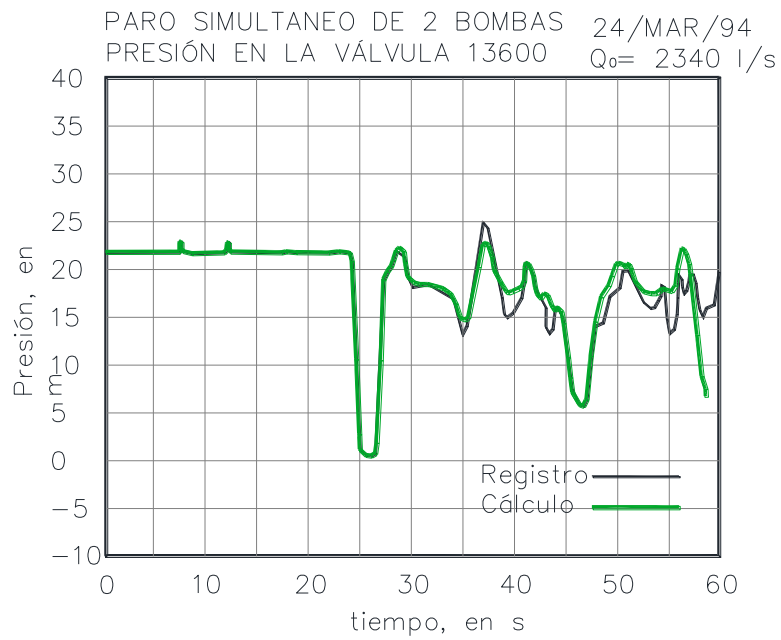


Figura 4.24. Presiones calculadas y registradas en la válvula propuesta del tramo PB0.

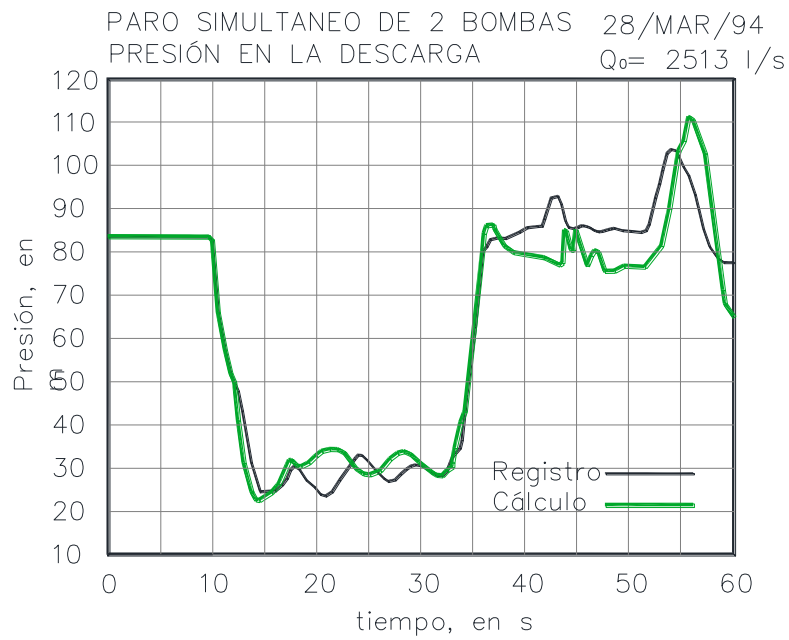


Figura 4.25. Presiones calculadas y registradas en la descarga de las bombas del tramo PB1.

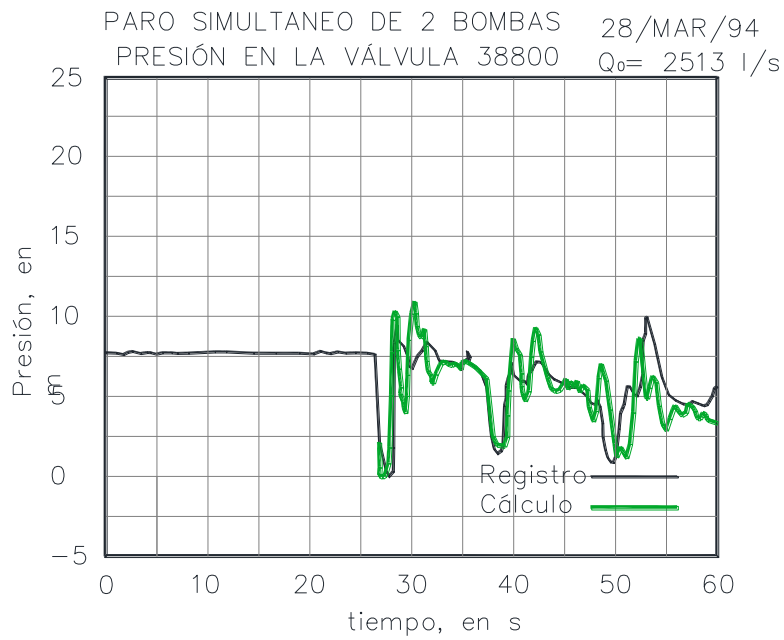


Figura 4.26. Presiones calculadas y registradas en la válvula propuesta del tramo PB1.

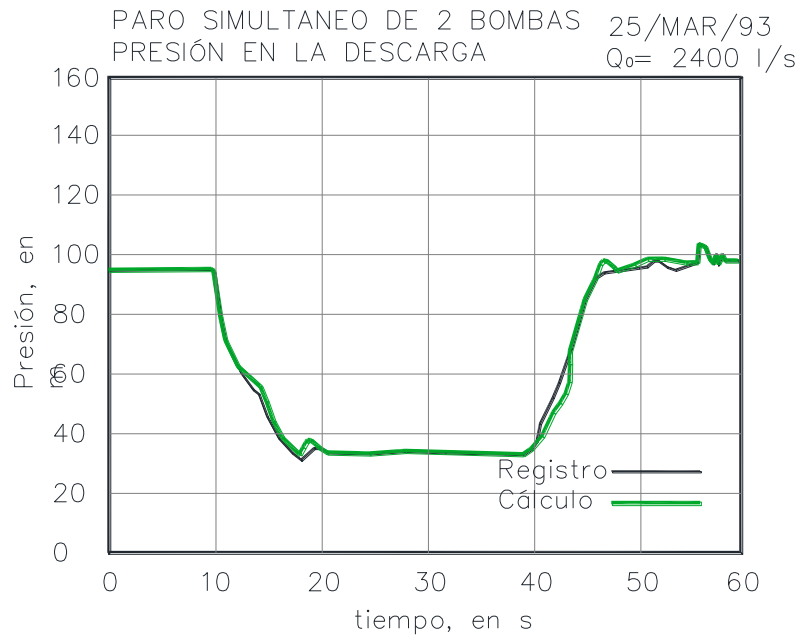


Figura 4.27. Presiones calculadas y registradas en la descarga de las bombas del tramo PB2.

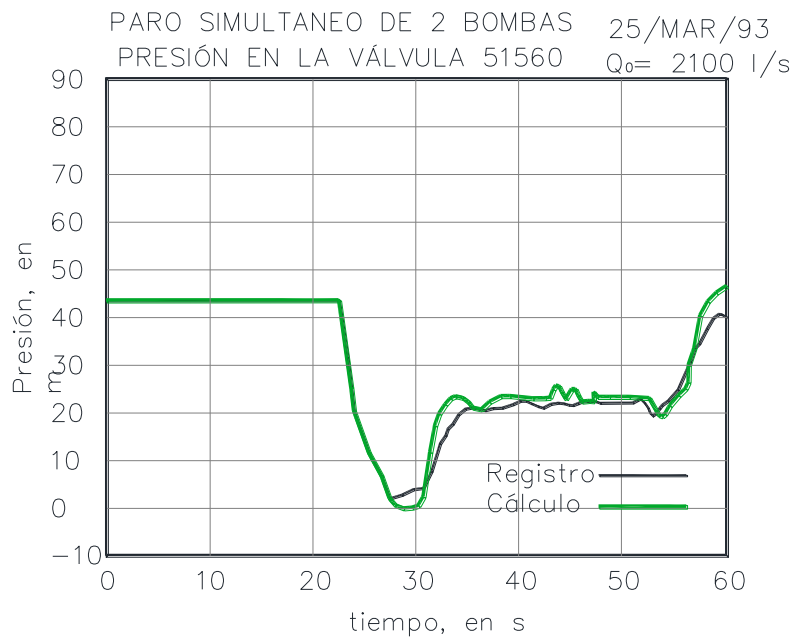


Figura 4.28. Presiones calculadas y registradas en la válvula propuesta del tramo PB2.

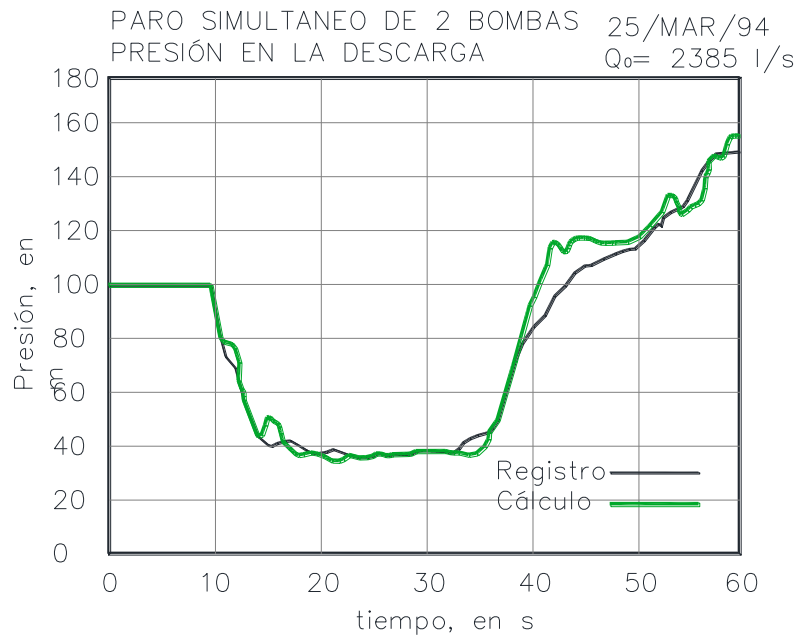


Figura 4.29. Presiones calculadas y registradas en la descarga de las bombas del tramo PB3.

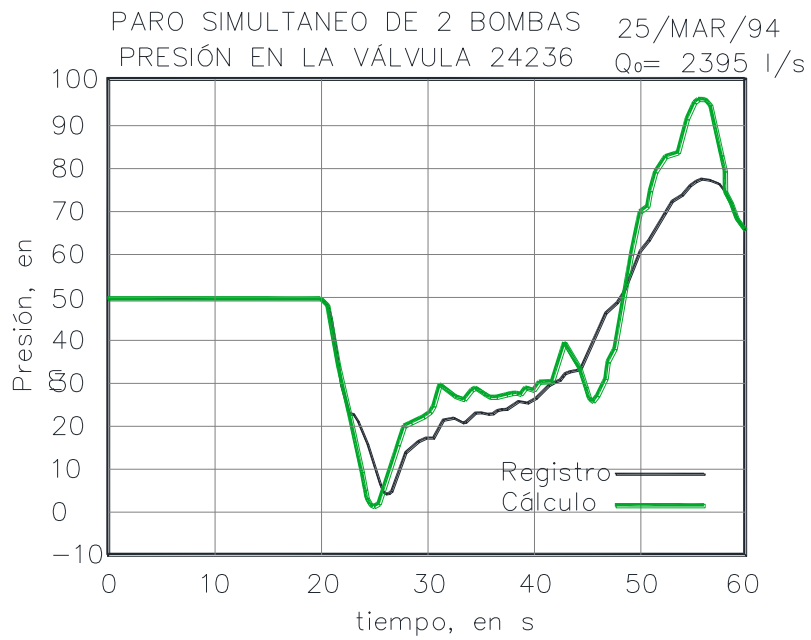


Figura 4.30. Presiones calculadas y registradas en la válvula propuesta del tramo PB3.

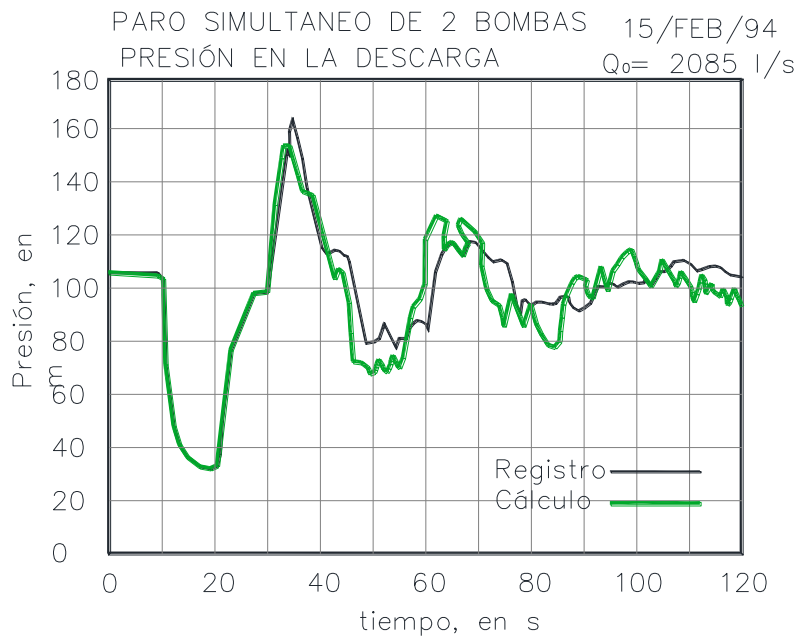


Figura 4.31. Presiones calculadas y registradas en la descarga de las bombas del tramo PB4.

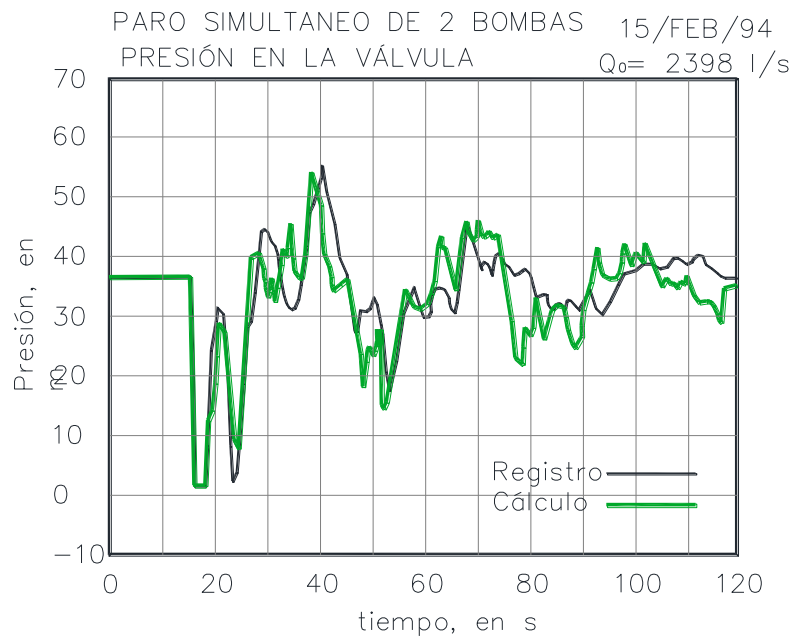


Figura 4.32. Presiones calculadas y registradas en la válvula propuesta del tramo PB4.

Los registros en campo muestran que las variaciones con respecto al modelo numérico son mínimas, por lo que éstas reafirman la confiabilidad del modelo para la simulación de transitorios con aire incluido.

5. Conclusiones y recomendaciones.

En ocasiones, ya sea por desconocimiento o por querer disminuir los costos, las recomendaciones generadas del diseño por fenómenos transitorios son dejadas de lado, y los efectos de estas acciones son subestimadas por los constructores y las personas que se ven involucradas en la toma de decisiones.

La labor de diseño de líneas de conducción resulta de vital importancia en los sistemas de abastecimiento de agua potable. Es por eso que es importante que se tomen todas las consideraciones posibles para que el diseño de las mismas no sólo se enfoque en optimizar los costos, sino que también se busque cumplir cabalmente con todos los lineamientos de seguridad establecidos.

El aire atrapado en las líneas de conducción de agua y las implicaciones que éste tiene, es un fenómeno que ha ido cobrando importancia en las últimas décadas en el diseño de las mismas. Por ser un fenómeno que se ha estudiado desde hace relativamente poco tiempo, es común que los que se ven involucrados en el diseño de los sistemas de conducción de agua desconozcan tanto las causas como los efectos del aire atrapado.

Normalmente, cuando se analizan los efectos que el aire atrapado conlleva, se enumeran éstos de manera negativa, tales como: agravante de las sobrepresiones durante los fenómenos transitorios, reducción de la eficiencia en la conducción, incremento en el consumo de energía eléctrica de los equipos de bombeo y pérdida de carga en el tramo con presencia de bolsas de aire. Sin embargo, queda plasmado en este trabajo que los efectos del aire atrapado pueden ser positivos bajo ciertas condiciones.

Fueron Larsen y Burrows (1992) quienes concluyeron que los efectos de los transitorios pueden verse mitigados por la inclusión de aire, esto en función del volumen del mismo y de las causas del transitorio. Sin embargo, como advierten múltiples investigaciones previas, pequeños volúmenes de aire atrapado pueden ocasionar mayores presiones durante los transitorios.

Es por lo anterior que resulta de suma importancia que las válvulas de admisión y expulsión de aire se encuentren en óptimas condiciones y que el mantenimiento que reciban sea constante.

El modelo numérico usado en este trabajo se basó en el Método de las Características para la resolución de fenómenos transitorios. Y las consideraciones tomadas para la inclusión de aire consistieron, entre otras, en que las bolsas de aire nunca ocupen la totalidad de la sección transversal de la tubería y que permanezcan en la posición original durante el fenómeno transitorio, estas consideraciones arrojaron buenos resultados al ser comparados con las mediciones en campo.

En el caso del Acueducto El Cuchillo-Monterrey el problema se presentó por un error de diseño. Al haberse sobreestimado en más de cuatro veces el valor del momento de inercia generó una subestimación de las estructuras supresoras de transitorios. Y esto quedaba en evidencia al momento de que el análisis arrojaba presiones negativas desde el paro por corte de bombeo con un solo equipo.

Apoyado en el TRANS 2010.1.0 se llevó a cabo la simulación del transitorio en un paro con cinco bombas en operación por cada planta, simulando así la condición más crítica que se puede presentar durante la operación del sistema. Como resultado, quedó en evidencia la incapacidad de la infraestructura existente contra fenómenos transitorios para proveer la seguridad de operación necesaria.

En un inicio, en respuesta a los resultados arrojados por el análisis transitorio para la operación con cinco bombas por planta, la solución planteada era apegada a la implementación de un sistema de supresión de transitorio ya probado: la instalación de tres cámaras de aire en la descarga de cada planta de bombeo. De esta manera complementarían el sistema de control de transitorios existentes.

Sin embargo, dado las condiciones del proyecto, existía la necesidad de poner en marcha el acueducto lo más pronto posible. Ante ésta situación la decisión fue implementar una forma de protección no convencional contra las presiones negativas generadas por los transitorios: la inclusión de aire dentro del sistema de conducción.

A raíz de lo anterior se propuso que la puesta en marcha del acueducto se iniciará con dos bombas por planta en operación, colocando válvulas de admisión y expulsión de aire en puntos donde se presentarían presiones negativas a lo largo de los diferentes tramos de la conducción.

Con el fin de validar la solución propuesta se llevan a cabo simulaciones, usando nuevamente el TRANS 2010.1.0, para los diferentes tramos del acueducto. El primer grupo de simulaciones se llevó a cabo sin considerar el ingreso de aire en el sistema, constatando con los resultados que se seguían presentando presiones negativas en los diferentes tramos del acueducto. El segundo grupo de simulaciones incluyó el ingreso de aire a través de seis válvulas colocadas a lo largo de la conducción con resultados favorables.

Los resultados de las simulaciones con aire incluido muestran una consistencia con lo esperado: las presiones negativas se vieron mitigadas por la inclusión de aire en la conducción.

Finalmente, las simulaciones realizadas fueron comparadas con mediciones de presiones tomadas en campo, tanto en la descarga de las bombas, como en las válvulas colocadas. Estas comparaciones demuestran la confiabilidad del modelo usado para simular fenómenos transitorios con aire atrapado.

A pesar de que los resultados arrojados por el modelo, y por las mediciones en campo, presentan resultados positivos, éstos no son concluyentes, puesto que al no ser una solución de uso común, hacen falta más investigaciones teóricas y prácticas al respecto para que pueda ser implementado de manera generalizada tanto para mejorar la seguridad en conducciones existentes como para mejorar el diseño de proyectos futuros.

Bibliografía

Balutto, A., 1996. Air valve technology reviewed, Introducing controlled air transferred technology, VENT-O-MAT, <http://internationalvalve.com>.

Balutto, A., 1998. The application of controlled air transfer technology to new and existing pipeline systems, <http://www.ventomat.com>.

Brown, R.J., 1968. *Water column separation at two pumping plants*, Journal of Basic Engineering, ASME, Vol. 90, N° 4, pp. 521-531.

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

Burrows, R. and Qiu, D.Q., 1995. *Effect of air pockets on pipeline surge pressure*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Journal of Water, Maritime and Energy, Volume 112, December, Paper 10859, pp. 349-361.

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

Cohen de Lara, G. 1955. Degazage naturel dans les puits inclines reliant les adductions secondaires aux galeries en charge. In Proceedings of the 6th International Association for Hydraulic Research Congress, La Haye, Vol. 3(C19), pp. 1-20.

CONAGUA, 2007, *Conducción*, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, México.

Förster, G., 1997. *Druckstoßdämpfung durch große Luftblasen in Hochpunkten von Rohrleitungen*. In: Mitteilungen des Institutes für Wasserbau der Universität Stuttgart, Heft 1994.

Fuertes, V.S., 2001. *Transitorios hidráulicos con aire atrapado*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, España.

Gandenberger, W., 1957. *Über die wirtschaftliche und betriebssichere Gestaltung von Fernwasserleitungen*, R. Oldenbourg Verlag, Munich, Germany Design of overland water supply pipelines for economy and operational reliability (rough translation by W.A. Mechler, discussion of "Factors influencing flow in large conduits.", Report of the Task Force on Flow in Large Conduits of the Committee on Hydraulic Structures, ASCE, Vol. 92, No. HY4, 1966.

González, C.A., Pozos, O., 2000. Análisis experimental del ingreso de aire en un acueducto, Thesis, Univesidad Nacional Autónoma de México, México.

Hashimoto, K., Imaeda, M., Osayama, A., 1988. *Transients of fluid lines containing and air pocket or liquid column*, Journal of Fluid Control, Vol. 18, N° 4, pp. 38-54.

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

Jönsson, L., 1985. *Maximum transient pressures in a conduit with check valve and air entrainment*, Proceeding of the International Conference on the Hydraulics of Pumping Stations, British Hydromechanics Research Association, Manchester, pp. 55-76.

Kalinske, A.A, Robertson, J.M., 1943. Closed conduit flow, ASCE Vol. 108, pp. 1453-1516.

Kalinske, A.A. and Bliss, P.H., 1943. Removal of air from pipelines by flowing water, ASCE Vol. 13, No. 10, pp. 480-482.

Kent, J.C., 1952. The entrainment of air by water flowing in circular conduits with downgrade slopes. Doctoral thesis, University of California, Berkley, California, USA.

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

Larsen, T., Burrows, R., 1992. *Measurements and computations of transients in pumped sewer plastic mains*, Proceedings of the BHR Group / IAHR International Conference on Pipeline Systems, Manchester, pp. 117-123.

Martin, C.S., 1976. *Entrapped air in pipelines*, Proceedings of the Second International Conference on Pressure Surges, British Hydromechanics Research Association, The City University, London, September 22nd - 24th, Paper F2, F2-15 - F2-28.

Mosvell, G., 1976. Luft i utslippsledninger (Air at outfalls), Prosjektkomiteen for rensingavavkrpssvann (Project committee on sewage), PRA report 8, NIVA (Norwegian Water Institute), Oslo, 1976.

Ochoa, L H (2005), Modelación de aire atrapado en flujo de agua en conductos, tesis doctoral, Universidad Oacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería

Pozos Estrada, O., 2002. Desarrollo de un programa de cómputo para detectar las posibles zonas de acumulación de aire en acueductos, y ejemplos de su aplicación. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, DEPMI, Universidad Nacional Autónoma de México.

Pozos O., González C.A., Giesecke J., Marx W. and Rodal, E.A. 2010. Air entrapped in gravity pipeline systems. *Journal of Hydraulic Research*, 48(3), 338-347.

Pozos Estrada O., Fairuzov Y., Sánchez Huerta A., Rodal Canales E.A. 2012. *Manual de análisis de la problemática del aire atrapado en acueductos para mejorar su eficiencia (SM 13)*. México, D.F. Series del Instituto de Ingeniería, UNAM.

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

Qiu, D.Q., Borrows, R., 1996. *Prediction of pressure transients with entrapped air in a pipeline*, Proceedings of the 7th International Conference on Pressure Surge and Fluid Transients in Pipelines and Open Channels, BHRA, Harrogate, UK, pp. 251-263.

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

Swamee, P.K. (1993), *Critical depth equations for irrigation canals*, J. Irrig Drain Eng. ASCE, 119(2), pp. 400-409.

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

Veronese, A (1937), Sul mottodelle bolle d'arianelled'acqua. Estrato del fascicolo X, XIV, oct, pp XV.

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

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

Zhou, F., 2000. *Effects of trapped air on flow transients in rapidly filling sewers*, Doctor of Philosophy Thesis, University of Alberta, Canada.