

MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

FENÓMENOS TRANSITORIOS EN LÍNEAS DE CONDUCCIÓN

11



MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

FENÓMENOS TRANSITORIOS EN LÍNEAS DE CONDUCCIÓN

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento
Fenómenos Transitorios en Líneas de Conducción

ISBN: 978-607-8246-98-4

D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209 Col. Jardines en la Montaña
C.P. 14210, Tlalpan, México, D.F.

Comisión Nacional del Agua
Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco El Bajo
C.P. 04340, Coyoacán, México, D.F.
Tel. (55) 5174•4000

Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

Impreso y hecho en México

Distribución Gratuita. Prohibida su venta.

Queda prohibido su uso para fines distintos al desarrollo social.

Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material contenido en esta obra,
sin fines de lucro y citando la fuente

CONTENIDO

Presentación	VII
Objetivo general	IX
Introducción a los fenómenos transitorios en líneas de conducción	XI
1. Transitorios hidráulicos en conductos a presión	1
1.1. Regímenes posibles del flujo en tubería	1
1.2. Velocidad de propagación de la onda de presión (celeridad)	2
1.3. Pulso de Zhukovski	3
1.4. Transformaciones de las ondas de presión	4
1.5. Separación de la columna líquida en transitorios	6
1.6. Transitorio en una conducción por bombeo, generado por el paro de bombas	8
1.6.1. Casos sin separación de columna líquida	8
1.6.2. Casos con separación de la columna líquida	13
1.7. Transitorios en una conducción por gravedad	16
1.7.1. Apertura de una válvula al final de la conducción	16
1.7.2. Cierre de una válvula al final de la conducción	16
2. Medios de control de transitorios	21
2.1. Problemas que los transitorios pueden causar	21
2.2. Principios Generales en la Protección contra el Golpe de Ariete	22
2.3. Medios de control de transitorios	24
2.3.1. Torre de oscilación	24
2.3.2. Cámara de aire	25
2.3.3. Tanque unidireccional	28
2.3.4. Tanque bidireccional	29
2.3.5. Válvulas de no retorno	30
2.3.6. Válvulas de alivio (de seguridad)	34
2.3.7. Válvulas anticipadoras del golpe de ariete	37
2.3.8. Válvulas de admisión y expulsión de aire	37
2.3.9. Admisión y retención de aire	38
2.3.10. Membranas protectoras o fusibles hidráulicos	39
2.3.11. Adición de un volante de inercia al árbol del equipo de bombeo	40
2.3.12. Descarga inversa de agua en las bombas	43
2.3.13. Instalación de un paso lateral (bypass) en la planta de bombeo	44

3. Diseño de los medios de control de transitorios	47
3.1. Procedimiento general	47
3.2. Criterios de resistencia	48
3.2.1. Resistencia a las sobrepresiones	48
3.2.2. Resistencia a las presiones negativas	49
3.2.3. Resistencia a la sobrevelocidad (sobrerotación) de las máquinas hidráulicas	52
3.2.4. Resumen de los criterios de resistencia	52
3.3. Conducciones por bombeo	53
3.3.1. Condiciones de operación más desfavorables en cuanto a los transitorios	53
3.3.2. Procedimiento de diseño	53
3.3.3. Cuando en la tubería no se producen vacíos	54
3.3.4. Casos cuando en la tubería se producen vacíos	60
3.4. Conducciones por gravedad	71
3.4.1. Condiciones de operación más desfavorables	71
3.4.2. Procedimiento de diseño	72
4. Ejemplos de análisis de transitorios y selección de medios para su control	73
4.1. Ejemplo 1: Conducción Simple de Acero con Fuerte Desnivel en su Final	73
4.1.1. Condiciones de resistencia de la tubería	74
4.1.2. Análisis del flujo permanente	75
4.1.3. Análisis del flujo transitorio	77
4.1.4. Diseño de la conexión y del <i>bypass</i> en la cámara de aire	80
4.2. Ejemplo 2: Conducción Simple de Polietileno	84
4.2.1. Análisis del flujo permanente	84
4.2.2. Transitorio generado por el paro de las bombas	85
4.2.3. Condiciones de resistencia de la tubería contra presiones negativas	85
4.2.4. Conclusión para el Ejemplo 2	85
4.3. Ejemplo 3	87
4.3.1. Política de operación	89
4.3.2. Criterios de modelación	89
4.3.3. Análisis transitorio	90
5. Procedimientos aproximados que no requieren programas de cómputo	93
5.1. Generalidades	93
5.2. Líneas de bombeo	94
5.3. Conducciones por gravedad	101
6. Prontuario sobre los transitorios hidráulicos	105
6.1. Generalidades	105
6.2. Planeación y diseño	105
6.2.1. Conducciones de bombeo	106
6.2.2. Comparación entre los medios de control de transitorios en líneas a bombeo	117
6.2.3. Conducciones por gravedad	119

6.3. Problemas en la operación derivados de los transitorios	124
6.3.1. Conducciones por bombeo	124
6.3.2. Conducciones por gravedad	127
Conclusiones	129
Bibliografía	131
Tabla de conversiones de unidades de medida	133
Ilustraciones	143
Tablas	147



PRESENTACIÓN

Uno de los grandes desafíos hídricos que enfrentamos a nivel global, es dotar de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento a la población, esto se debe por un lado, al crecimiento demográfico acelerado y por otro, a las cada vez mayores dificultades técnicas que conlleva hacerlo.

Contar con estos servicios en el hogar, es un factor determinante en la calidad de vida y desarrollo integral de las familias. En México la población beneficiada ha venido creciendo los últimos años, sin embargo mientras más nos acercamos a la cobertura universal, la tarea se vuelve más compleja.

Por ello, para responder a las nuevas necesidades hídricas, la administración del Presidente de la República, Enrique Peña Nieto, está impulsado una transformación integral del sector, y como parte fundamental de esta estrategia, el fortalecimiento de los organismos operadores y prestadores de los servicios de agua potable, drenaje y saneamiento.

En este sentido, publicamos este manual, una guía técnica especializada que contiene los más recientes avances tecnológicos en obras hidráulicas y normas de calidad, con el fin de desarrollar infraestructura más eficiente, segura y sustentable, así como la formación de recursos humanos más capacitados y preparados.

Estamos seguros será de gran apoyo para orientar el quehacer cotidiano de los técnicos, especialistas y tomadores de decisiones, proporcionándoles criterios para generar ciclos virtuosos de gestión, disminuir los costos de operación, impulsar el intercambio de volúmenes de agua de primer uso por tratada en los procesos que así lo permitan, y realizar en general, un mejor aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas del país, considerando las necesidades de nueva infraestructura y el cuidado y mantenimiento de la existente.

El Gobierno de la República, tiene el firme compromiso de sentar las bases de una cultura de la gestión integral del agua. Nuestros retos son grandes, pero más grande debe ser nuestra capacidad transformadora para contribuir desde el sector hídrico a **Mover a México.**

Director General de la Comisión Nacional del Agua



OBJETIVO GENERAL

El *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS)* está dirigido a quienes diseñan, construyen, operan y administran los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento del país; busca ser una referencia sobre los criterios, procedimientos, normas, índices, parámetros y casos de éxito que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en su carácter de entidad normativa federal en materia de agua, considera recomendable utilizar, a efecto de homologarlos, para que el desarrollo, operación y administración de los sistemas se encaminen a elevar y mantener la eficiencia y la calidad de los servicios a la población.

Este trabajo favorece y orienta la toma de decisiones por parte de autoridades, profesionales, administradores y técnicos de los organismos operadores de agua de la República Mexicana y la labor de los centros de enseñanza.



INTRODUCCIÓN A LOS FENÓMENOS TRANSITORIOS EN LÍNEAS DE CONDUCCIÓN

Para cumplir con su objetivo, las líneas de conducción se diseñan y operan en condiciones de flujo permanente. Sin embargo, en su operación son inevitables los regímenes de transición de un flujo permanente a otro. Al menos una vez, en el inicio de su operación, la línea de conducción necesita ser llenada de agua. En ocasiones tiene que ser vaciada y llenada de nuevo. Cada arranque o paro de bombas y cada apertura o cierre de válvulas en la conducción, generan un régimen de transición en el que varían de forma importante los parámetros hidráulicos (velocidad y presión) en cada punto de la línea. El paro de las bombas puede ser programado y controlado (cuando se realiza por el operador de la planta de bombeo) o accidental y no controlado (cuando se interrumpe el suministro de energía eléctrica a los equipos de bombeo por una falla en el sistema eléctrico). Este último caso resulta ser mucho más peligroso y puede presentarse en cualquier conducción por bombeo.

Los regímenes de transición en las condiciones hidráulicas de la conducción tienen diferente duración. Mientras que el llenado y el vaciado de la línea son lentos y duran de varias horas a varios días, el régimen de transición hidráulica en la tubería después de un paro o arranque de las bombas o un cierre o apertura de válvulas dura apenas algunos segundos o minutos. Por esta razón, se le denomina fenómeno transitorio hidráulico rápido. A pesar de ser de corta duración, los transitorios hidráulicos rápidos pueden ser muy peligrosos, ya que por ser bruscos, generan variaciones de presión muy importantes que en ocasiones pueden llegar a reventar la tubería debido a presión alta o hacer que ésta se colapse bajo la acción de la presión atmosférica cuando dentro de la tubería se producen presiones de vacío. Se conocen muchos casos en la práctica en los que esos problemas se han presentado. A estos transitorios hidráulicos rápidos se les conoce también como golpe de ariete. En otros casos, la tubería no llega a reventarse ni a colapsar, pero se producen frecuentes sobrepresiones o depresiones fuertes por causa de los transitorios, que reducen la vida útil de la conducción por fatiga del material.

En este libro se tratan solamente los transitorios hidráulicos rápidos, a los que se les denominará como transitorios hidráulicos o transitorios, solamente.

Para garantizar la seguridad de la conducción, resulta imprescindible analizar los transitorios que pueden presentarse, definir si existe algún peligro derivado de sus efectos y tomar algunas medidas para proteger la conducción si esto resulta necesario. Las medidas pueden ser las siguientes:

- a) Usar tubos y accesorios de una clase mayor que soporten sin problema las presiones (positivas y negativas) que se producen en los transitorios
- b) Hacer los transitorios menos bruscos, por ejemplo: hacer más lentamente el paro de las bombas o el cierre de las válvulas
- c) Diseñar medios especiales que reduzcan los efectos negativos de los transitorios a los límites deseados

En la mayoría de los casos, la alternativa (c) resulta la más conveniente desde el punto de vista económico y técnico. El ingeniero diseñador de líneas de conducción necesita entonces conocer los transitorios que pueden producirse, los medios para su control y tener herramientas que le permitan analizarlos en cada caso y definir los medios de control adecuados. Se han publicado varios libros sobre los transitorios hidráulicos, tanto en México como en el extranjero. La mayor parte de ellos se centra en la parte matemática del problema, presentando las ecuaciones que describen el fenómeno y los diferentes métodos para su solución en casos específicos, basados en complicados procedimientos gráficos o métodos numéricos para la solución de ecuaciones diferenciales.

El enfoque del presente libro es diferente. Afortunadamente hoy en día existen programas de cómputo amigables y eficientes que permiten modelar los transitorios y pueden ser usados por ingenieros diseñadores que no son expertos en modelación matemática y métodos numéricos. El ingeniero diseñador necesita, entonces y ante todo, conocer la esencia física de los transitorios, los medios aplicables para su control y tener un procedimiento sistemático para analizar los posibles transitorios y su control en cada caso. Así, el libro explica de una manera sencilla y prescindiendo de desarrollos matemáticos, qué son los transitorios y cómo se manifiestan, cuáles son los medios que

pueden ser usados para su control y qué procedimientos sistemáticos usar para analizar los transitorios en cualquier conducción y diseñar los medios de control correspondientes.

De acuerdo con lo anterior, el libro se compone de seis capítulos. En el primer capítulo se describe cómo se manifiestan los transitorios más importantes en líneas de bombeo y líneas por gravedad. El segundo capítulo describe cuáles son los medios de control y cómo funcionan. En el capítulo tres se presentan los procedimientos de análisis de transitorios y diseño de los medios para su control. En el capítulo cuatro se desarrollan ejemplos de aplicación, tomados de proyectos reales, para comprender mejor la ocurrencia de fenómenos transitorios y los medios de control que se pueden utilizar. El capítulo cinco presenta alternativas para el análisis aproximado de transitorios sin la necesidad de programas de cómputo. Finalmente, el capítulo seis contiene un prontuario de los transitorios hidráulicos donde, en forma concisa, con preguntas y respuestas, se exponen los principales problemas relativos a los transitorios y su solución en las etapas de planeación, diseño y operación.



1

TRANSITORIOS HIDRÁULICOS EN CONDUCTOS A PRESIÓN

1.1. REGÍMENES POSIBLES DEL FLUJO EN TUBERÍA

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

Se distinguen tres tipos de transitorios hidráulicos:

1. Transitorio muy lento o cuasi-estático, en el que las variables del flujo varían de manera muy lenta en el tiempo (con intervalos de varias horas y hasta de varios días). Como un ejemplo se tiene el flujo no permanente en una red de agua potable, cuyos cambios se generan por la variación del consumo y de los niveles de agua en los tanques
Debido a que las variaciones en este tipo de flujo son muy lentas, no es necesario considerar en los métodos de análisis la inercia del flujo ni las propiedades elásticas del fluido y de la tubería; el flujo transitorio se puede modelar con una aplicación sucesiva de un modelo estáti-

co. Una simulación de este tipo se conoce también con el nombre de análisis de periodos extendidos

2. Transitorio lento u oscilación de masa, que se relaciona ante todo con el movimiento de la masa de agua en la conducción, semejante a la oscilación en dos vasos comunicantes. Los cambios de las variables en este tipo de transitorio son significativos, pero no tanto como para tomar en consideración las propiedades elásticas del fluido y de la tubería. El periodo de un transitorio de este tipo normalmente es de varios minutos a varias horas y es suficiente un modelo que considere solamente el movimiento y la inercia del volumen de agua en la tubería
3. Transitorio rápido o golpe de ariete, generado por cambios bruscos de la velocidad en la tubería derivados de maniobras rápidas como el paro repentino de una bomba o el cierre rápido de una válvula. Los cambios bruscos en la velocidad se acompañan de cambios bruscos en la presión que se propagan por la tubería, generando ondas de presión de periodo muy corto (apenas varios segundos). Las variaciones de presión en un transitorio

de este tipo son importantes, por lo que resulta necesario considerar los efectos elásticos de la tubería y del líquido

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

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

En los transitorios hidráulicos rápidos pueden llegar a producirse presiones muy altas o muy bajas (vacíos), por lo que es necesario considerarlas en el diseño de cualquier conducción

1.2. VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA DE PRESIÓN (CELERIDAD)

Cualquier cambio repentino en las condiciones del flujo que se origina en un punto de una tubería a presión se transmite (propaga) por la tubería con una velocidad que depende de la elasticidad del fluido y de la pared de la tubería. Esta velocidad se señala con a y se denomina celeridad, para distinguirla de la velocidad del flujo v .

Si la tubería fuera completamente indeformable (completamente rígida), la velocidad a sería igual a la velocidad de propagación del sonido

en el fluido. La deformabilidad de la tubería disminuye la velocidad de propagación, de forma tal que es válida la siguiente ecuación:

$$a = \frac{a_o}{\sqrt{1 + \frac{E_{agua} D}{E_{mat} d}}} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

donde:

- a_o = velocidad del sonido en el agua
- E_{agua} = módulo de elasticidad volumétrica del agua
- E_{mat} = módulo de elasticidad (módulo de Young) del material del tubo
- D = diámetro interior del tubo
- δ = espesor de la pared del tubo

La velocidad del sonido en el agua a_o depende de la temperatura: para las temperaturas normales del agua en conducciones tiene valores de 1 425 a 1 440 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_{mat} se toma de la tabla 1.1.

La ecuación 1.1 es válida para tubos de pared delgada. Para el cálculo de la velocidad de propagación a , se considera que un tubo es de pared delgada si su relación D/δ es igual o mayor de 25. Para tubos de pared gruesa, es decir, cuando D/δ es menor de 25, se utiliza la siguiente ecuación:

$$a = \frac{a_o}{\sqrt{1 + \frac{E_{agua} D}{E_{mat} d} C}} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

El coeficiente C se calcula de la siguiente forma:

$$C = \frac{2\delta}{D} (1 + \mu) + \frac{D(1 - \mu^2)}{D + \delta} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Tabla 1.1 Módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson μ y magnitud tentativa de la velocidad de propagación a para materiales de tubería

Material	E_{mat}	E_{mat}	μ	Magnitud de a (m/s)
	$N/m^2 \cdot 10^{-9}$	$kg/cm^2 \cdot 10^{-3}$		
Acero	200 - 212	2 030 - 2 160	0.30	1 000 - 1 250
Fibro cemento	23.5	240	0.30	900 - 1 200
Concreto presforzado	39	398	0.15	1 050 - 1 150
Hierro dúctil	166	1 690	0.28	1 000 - 1 350
Polietileno 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

donde:

μ = coeficiente de Poisson, que depende del material del tubo y se da en la tabla 1.1

Usando los valores de E_{mat} y μ de la tabla 1.1 y las dimensiones D y δ de algunos de los tubos usados en líneas de conducción de agua potable, en la última columna de la tabla 1.1, se presenta la magnitud tentativa de la velocidad de propagación a para tubos de diferentes materiales. Dos conclusiones se desprenden de los valores de esta tabla:

- Los cambios en el régimen de flujo a presión en una tubería se trasladan muy rápidamente de un punto a otro. Por esto los transitorios son bruscos y tienen una duración bastante corta
- En tubería de material flexible (PVC y polietileno), los transitorios son menos bruscos que los transitorios en tubería de material rígido (acero, fibro cemento, concreto, hierro dúctil)

1.3. PULSO DE ZHUKOVSKI

Teóricamente puede demostrarse que cualquier cambio instantáneo en la velocidad del flujo a presión, Δv en un punto de una tubería, genera una variación instantánea ΔH de la carga

hidráulica en el mismo punto según la siguiente ecuación:

$$\Delta H = \frac{a}{g} \Delta v \quad \text{Ecuación 1.4}$$

donde:

- g = aceleración de la gravedad = 9.81 m/s²
- a = velocidad de propagación de la onda en m/s

La ecuación 1.4 fue obtenida por el científico ruso Nikolai Zhukovski, por lo que se le conoce con el nombre 'fórmula de Zhukovski', y a la sobrepresión instantánea ΔH que se obtiene se le denomina pulso de Zhukovski.

La fórmula de Zhukovski muestra que las sobrepresiones que se producen en los transitorios pueden ser sumamente altas. Como un ejemplo, la detención instantánea de un flujo con una velocidad de unos 2 m/s en una tubería de acero ($a \approx 1\,000$ m/s) daría un incremento de presión del orden de los 200 metros. Un incremento de presión de esa magnitud sería destructivo para la mayoría de la tubería de conducción de agua potable. Afortunadamente los cambios del flujo no son instantáneos y las sobrepresiones normalmente no son tan altas.

Los cambios en la carga hidráulica y la velocidad ΔH y Δv se transmiten por la tubería como una onda de presión con una celeridad a , hasta que encuentren un punto de cambio ya sea de diámetro o de material, una unión con otros tramos o un extremo de la tubería. En estos puntos, las magnitudes de ΔH y Δv se transforman, como se explica más adelante en el apartado 1.4.

Una disminución de la velocidad del flujo en la tubería genera un incremento de la presión (sobrepresión) aguas arriba y una disminución de la presión (depresión) aguas abajo, y viceversa. Esta situación se muestra en la ilustración 1.1 para el cierre de una válvula intermedia en una tubería. El cierre reduce la velocidad generando variaciones de presión, las cuales se propagan en ambos sentidos. En otras palabras, la disminución repentina de la

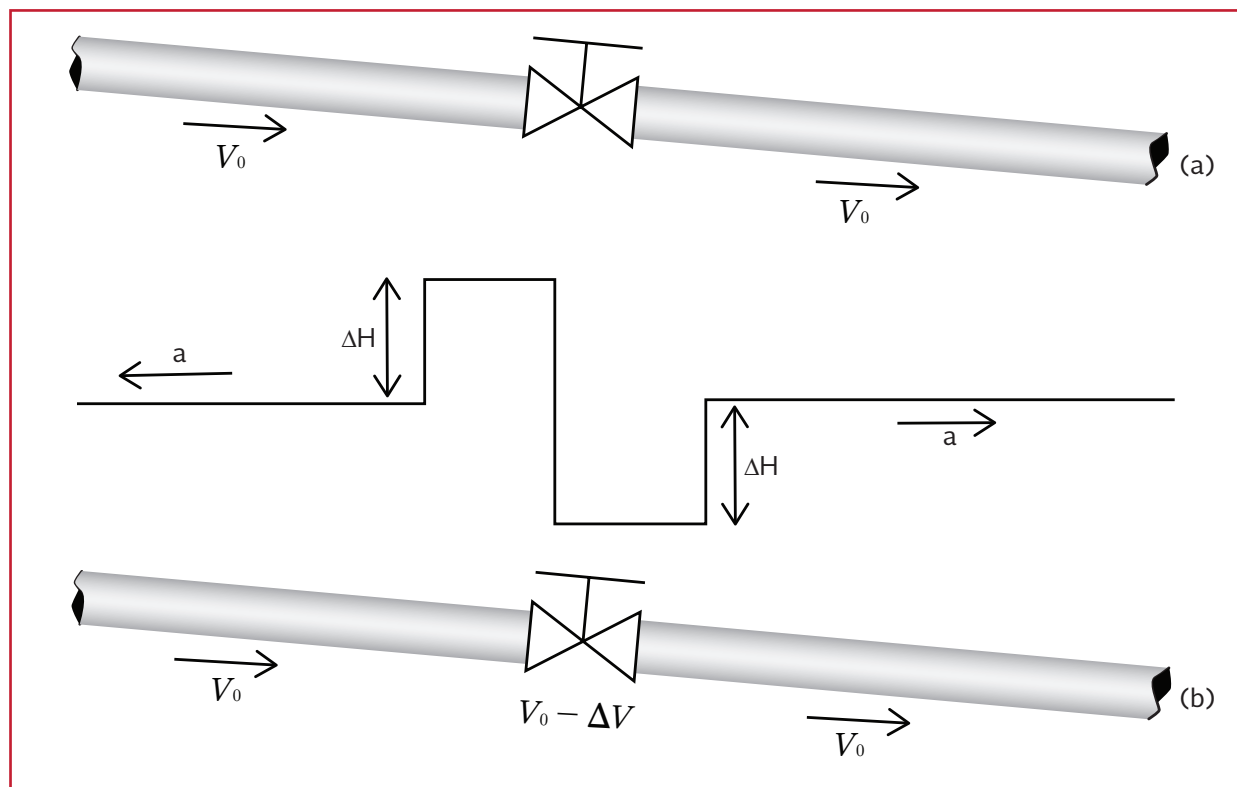
velocidad en un punto de la tubería genera una retención del flujo aguas arriba y con esto una sobrepresión repentina y una liberación del flujo y una depresión repentina aguas abajo.

1.4. TRANSFORMACIONES DE LAS ONDAS DE PRESIÓN

En su propagación por la tubería, las ondas de sobrepresión o depresión cambian su magnitud ΔH cuando encuentran un cambio del diámetro de la tubería. Una parte de la sobrepresión (o depresión) continúa después del cambio de diámetro y otra parte se regresa (se refleja).

Se denomina coeficiente de transmisión s a la relación de la sobrepresión (o depresión) que continúa propagándose después del cambio de diámetro, con respecto a la presión a la que llega.

Ilustración 1.1 Sobrepresión y depresión que genera el cierre de una válvula en un punto intermedio de una tubería



Si el área de la tubería antes del cambio de diámetro es A_1 y después del cambio A_2 , se puede demostrar que el coeficiente s se especifica con la siguiente ecuación:

$$s = \frac{2A_1}{A_1 + A_2} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

De modo análogo se define el coeficiente de reflexión r , que expresa la relación de la sobrepresión reflejada con respecto a la que llega:

$$r = 1 - s \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Para el caso general de una unión de más de dos tramos de tubería (ilustración 1.2) se tiene:

$$s = \frac{2A_i}{\sum A} \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Con i se designa la tubería desde la cual llega la sobrepresión (o depresión), el coeficiente r se define sólo para esta y el coeficiente s se refiere a las tuberías restantes.

Para n tuberías de igual diámetro:

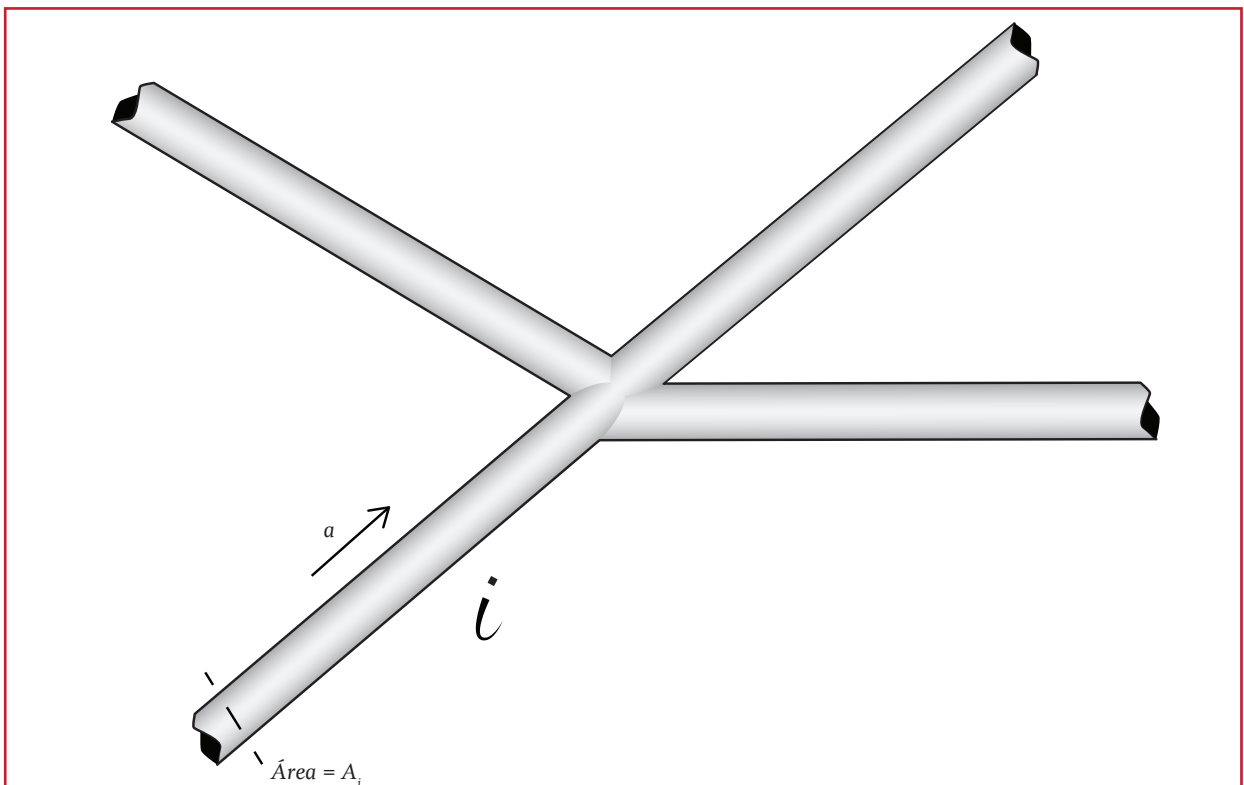
$$s = \frac{2}{n}$$

donde n es el número de tramos de tubería de igual diámetro.

Para el caso de una unión de dos tramos de tubería con áreas A_1 y A_2 y una sobrepresión (o depresión) que llega por la tubería 1, la ecuación 1.7 se escribe como:

$$s = \frac{2A_1}{A_1 + A_2}$$

Ilustración 1.2 Arribo de una onda de presión a una unión de tubos



De acuerdo con esta última ecuación, cuando una sobrepresión (o depresión) pasa de una tubería de diámetro menor a otra de diámetro mayor, la mayor parte de esta se refleja ($s < 1$).

Cuando la tubería se une con un tanque, este puede considerarse como una tubería de diámetro muy grande ($A_2 = \infty$, ilustración 1.3). Para $A_2 = \infty$, de la ecuación 1.5 y ecuación 1.6 se obtiene:

$$s = 0, r = 1$$

es decir, las sobrepresiones (o depresiones) que llegan a un tanque no se transmiten y se reflejan por completo. Este hecho también puede explicarse de la siguiente manera. En el momento en que llega una sobrepresión al tanque, se tiene en la tubería un nivel piezométrico instantáneo más alto que el nivel de agua en el tanque y el agua en la tubería se encuentra comprimida más de lo habitual debido a la sobrepresión. La diferencia en los niveles piezométricos genera un flujo de la tubería hacia el tanque, que va descomprimiendo el agua y tiende a establecer en la tubería un nivel piezométrico igual al nivel de agua existente en el tanque. La presión en la tubería va bajando desde el tanque y eso representa exactamente una onda de depresión reflejada.

Inversamente, cuando una sobrepresión pasa de una tubería de diámetro mayor a otra de diámetro menor la sobrepresión incrementa su valor. El caso límite responde a un extremo cerrado, el cual puede considerarse como transición de cierto diámetro dado a otro diámetro igual a cero. Por la ecuación 1.5 y la ecuación 1.6 se obtiene:

$$s = 2, r = -1$$

es decir, en caso de encontrarse con un extremo cerrado, la sobrepresión (o depresión) duplica su valor (ilustración 1.4). Este hecho también puede explicarse de la siguiente manera. La onda de sobrepresión se genera por una disminución de la velocidad del flujo, que va propagándose por la tubería. Utilizando el principio de la superposición, la velocidad resultante en la tubería puede considerarse como una superposición de dos velocidades: la del flujo original, antes de la sobrepresión, y otra de un flujo ficticio, en sentido contrario, con velocidad igual a la disminución de velocidad que genera la sobrepresión. En el momento de llegar la sobrepresión a un extremo cerrado, el flujo ficticio en sentido contrario se detiene instantáneamente y, según la fórmula de Zhukovski, se produce una nueva sobrepresión que se suma a la sobrepresión original, con lo que se duplica la sobrepresión de llegada.

1.5. SEPARACIÓN DE LA COLUMNA LÍQUIDA EN TRANSITORIOS

Las ondas de depresión que se producen en los transitorios reducen la presión existente y si la magnitud de la depresión es mayor (en signo absoluto) que la presión existente, es posible que se produzcan presiones negativas (presiones de vacío) dentro de la tubería. 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 metros, pero antes de alcanzar esta presión habrá 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

Ilustración 1.3 Reflejo de una onda de sobrepresión de un tanque

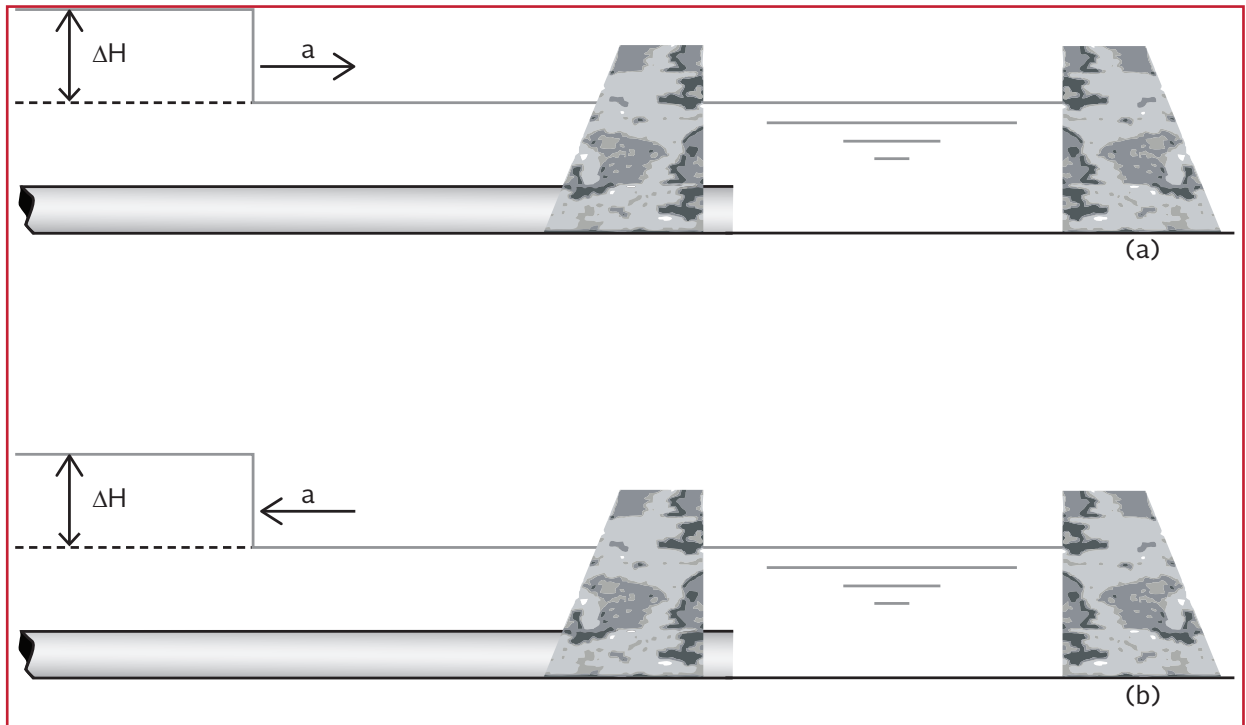
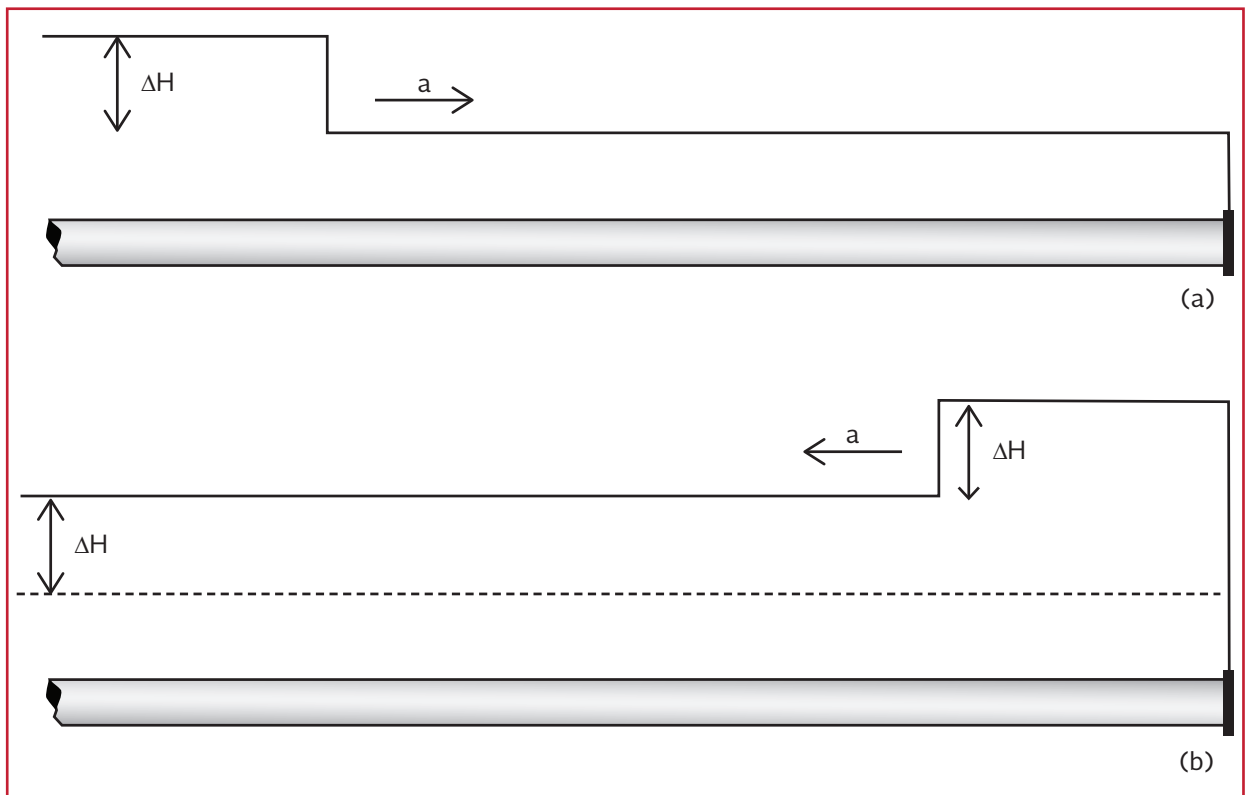


Ilustración 1.4 Reflejo de una onda de sobrepresión de un extremo cerrado



normal. 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.

Para agua pura y una temperatura de 20° C, la presión de vapor es de -9.75 metros. En la práctica, este valor puede ser un poco más bajo debido al contenido de aire disuelto en el agua.

Entonces, al presentarse una presión negativa dentro de la tubería igual a la presión de vapor, se generará una separación o ruptura de columna líquida como consecuencia de la cavitación. Dicha presión se mantiene en este valor mínimo y nunca alcanza un valor inferior a este. Esta presión fija produce que el flujo aguas arriba del punto de la separación se detenga (o se interrumpa) y que el flujo aguas abajo se incremente debido a la inercia. La continuidad del flujo se ve interrumpida y se forma un volumen que crece, compuesto por vapores y aire disuelto. Si la conducción presenta puntos más altos que el sitio del volumen formado de separación, en un momento posterior, el flujo se invierte hacia la separación y su volumen disminuye hasta cerrarse con un choque de las dos columnas de agua opuestas. Este choque produce una sobrepresión que se determina mediante la fórmula de Zhukovski (ecuación 1.4), con la velocidad de las columnas opuestas, y puede presentar valores muy altos.

De esta manera, el fenómeno de separación de columna en sí no es peligroso; el peligro viene de las sobrepresiones que pueden producirse con el cierre de esta separación.

1.6. TRANSITORIO EN UNA CONDUCCIÓN POR BOMBEO, GENERADO POR EL PARO DE BOMBAS

De los transitorios que se pueden presentar en una conducción por bombeo, el más desfavorable es el caso de un paro repentino de las bombas en operación, situación que se presenta al interrumpirse el suministro de energía eléctrica.

En esta sección se examina el caso más frecuente de bombas con válvulas de no retorno que elevan el agua de un nivel a otro ubicado más alto por medio de una tubería de longitud L . Para simplificar el análisis, la tubería se supone tanto de diámetro como de velocidad de propagación de la onda constante, y la influencia de las pérdidas de carga por fricción no se considera. Se presentan por separado los casos sin separación de columna y con separación de columna, dado que el fenómeno es muy diferente en los dos casos.

1.6.1. CASOS SIN SEPARACIÓN DE COLUMNA LÍQUIDA

Con el cese del suministro de energía eléctrica, los equipos de bombeo rápidamente disminuyen su velocidad, con lo que se reduce el gasto bombeado, lo que ocasiona depresiones sucesivas, que se propagan desde la planta de bombeo por la tubería con una velocidad a . Al llegar al final de la tubería, las depresiones sucesivas se reflejan y regresan. El tiempo en el que un cambio en la presión recorre la distancia de una ida y una

vuelta por la tubería es $2L/a$, se denomina tiempo de duración de la fase y se señala con T_f .

Si el tiempo en que las bombas dejan de impulsar agua a la tubería es menor que T_f , la velocidad en el inicio de la tubería disminuirá desde la velocidad inicial v_0 hasta cero.

Cada disminución en la velocidad Δv generará una disminución en la carga ΔH (una depresión) según la fórmula de Zhukovski (ecuación 1.4), de forma tal que la depresión total resultante se ve en la ecuación 1.8.

$$\Sigma \Delta H = \Sigma \frac{a \Delta v}{g} = \frac{a \cdot v_0}{g} \quad \text{Ecuación 1.8}$$

Si el tiempo en que las bombas dejan de impulsar agua es mayor que T_f , las variaciones en el régimen del flujo que se originan en el inicio de la tubería regresarán reflejadas al mismo punto un tiempo T_f después, y modificarán las depresiones que sigan generándose.

La ilustración 1.5a representa la línea piezométrica en la tubería en las condiciones de régimen permanente antes del transitorio.

Con el cese del suministro de energía eléctrica al inicio de la tubería se presentan depresiones que se propagan hacia el tanque (ilustración 1.5b). Al llegar a este, la onda de depresión se refleja y la onda reflejada se superpone con la onda de depresión que continúa llegando (ilustración 1.5c). La onda reflejada tiende a igualar en su recorrido la carga en la tubería con la del tanque y después del tiempo $2L/a$ llega a las bombas que aún impulsan agua. A partir de ese momento, el transitorio puede considerarse como el resultado de la superposición de tres ondas (ilustración 1.5d):

1. La onda de depresión que todavía sale del inicio de la tubería debido a la disminución continua del gasto de las bombas
2. La onda reflejada desde el tanque
3. La que resulta del reflejo de la onda 2 desde el inicio de la tubería

Una vez transcurrido el tiempo $2L/a$, las ondas 2 y 3 neutralizan en alguna medida la depresión que se genera en las bombas; esto impide que se produzca completamente la depresión que indica la fórmula de Zhukovski (ecuación 1.4).

Un golpe de ariete en que se produzca la variación total de la carga ΔH en la ecuación 1.4 se denomina golpe directo. En caso contrario, el golpe es indirecto.

Con la disminución de la velocidad de rotación de las bombas, disminuye también la carga desarrollada por estas. Cuando la carga al inicio de la tubería resulta mayor que la carga que desarrollan las bombas, las válvulas de no retorno cierran y la velocidad al principio de la tubería se hace cero. Esta variación en la velocidad se propaga hasta que en toda la tubería se establezca una velocidad aproximadamente igual a cero y un nivel piezométrico más bajo que el nivel de agua en el tanque (ilustración 1.5e). Esto genera un flujo desde el tanque a la tubería, que tiende a restablecer la carga H_0 (ilustración 1.5f).

Al llegar al principio de la tubería, este flujo se detiene bruscamente por las válvulas de no retorno que ya se encuentran cerradas, con lo que se produce una onda de sobrepresión que se propaga y detiene, en su recorrido, el movimiento del agua (ilustración 1.5g). Al llegar esta onda de sobrepresión al tanque (ilustración 1.5h), se tendrá en toda la conducción una carga hidráu-

Ilustración 1.5 Tubería en las condiciones de régimen permanente

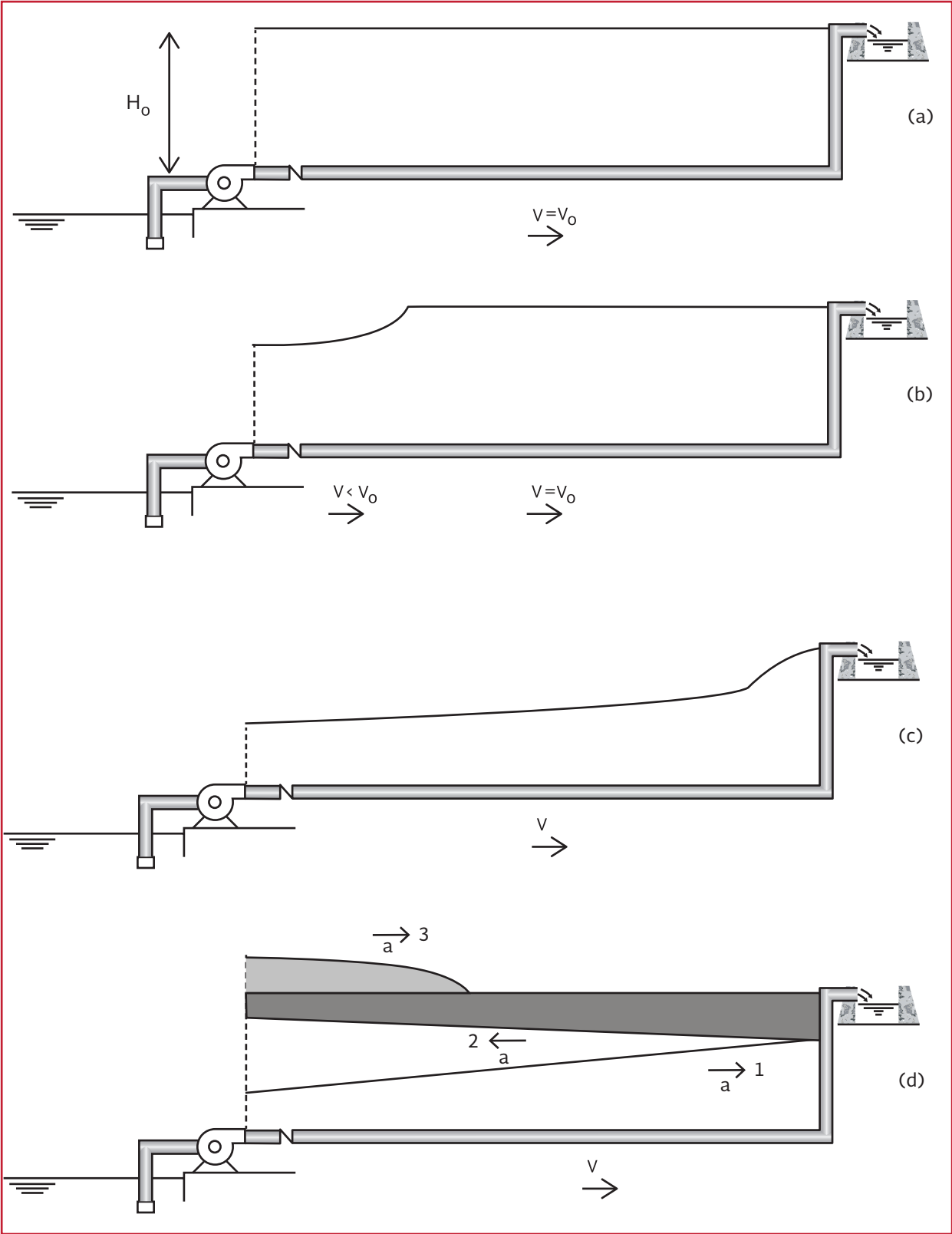


Ilustración 1.5 Tubería en las condiciones de régimen permanente (Continuación)

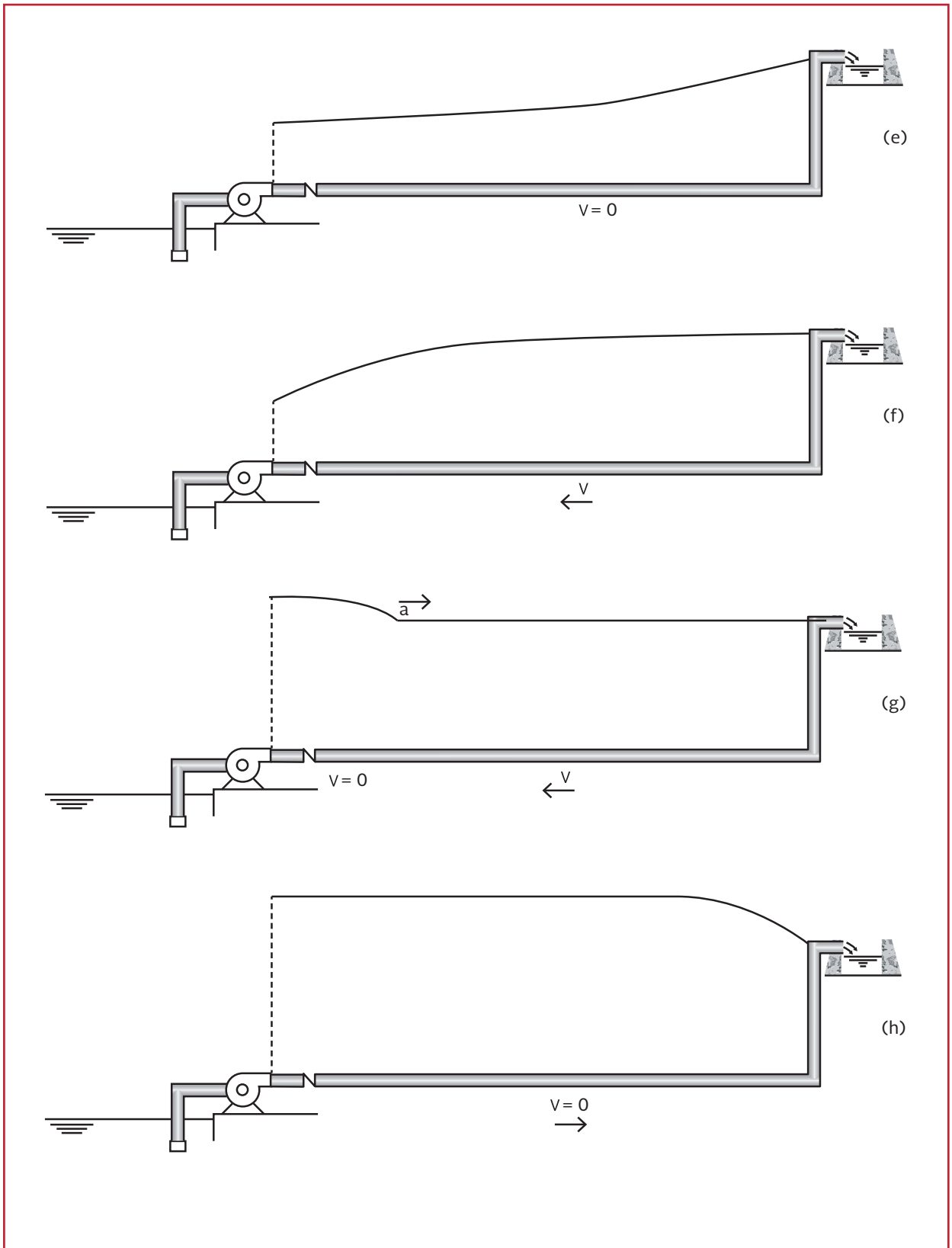
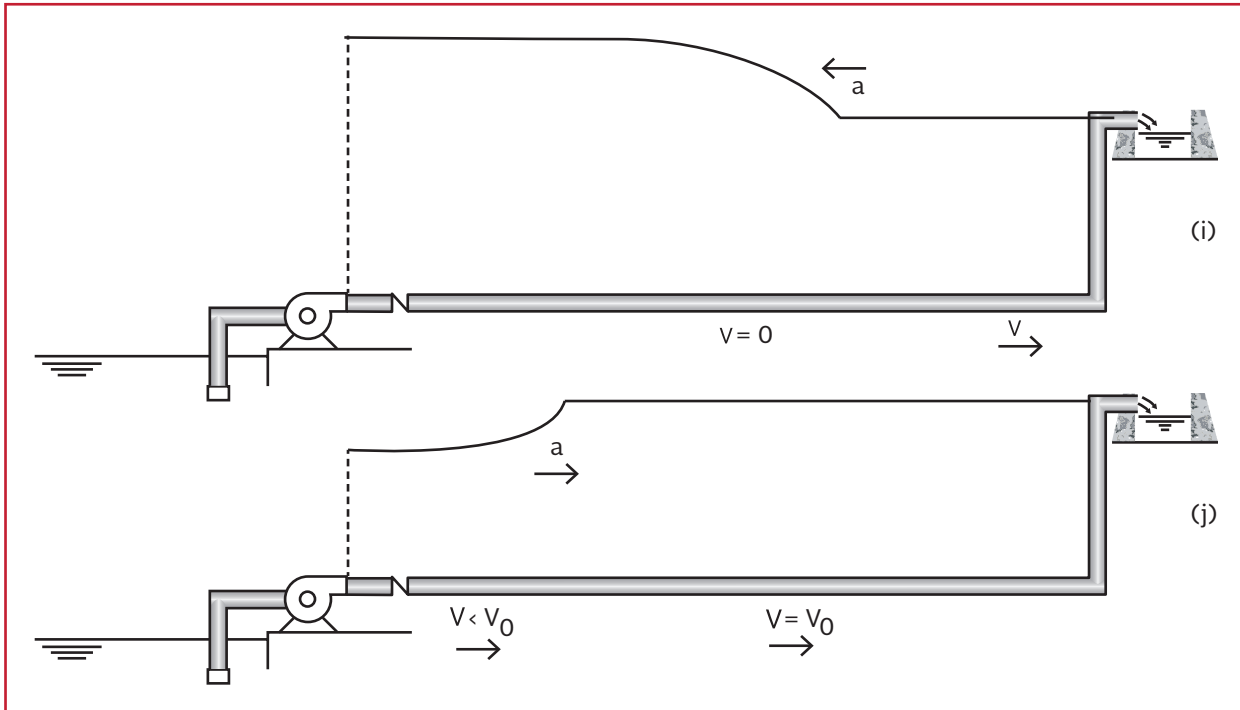


Ilustración 1.5 Tubería en las condiciones de régimen permanente (Continuación)



lica mayor de la que da el tanque, lo que genera un flujo de la tubería hacia el tanque.

Este flujo se acompaña de una depresión, que se propaga hacia el inicio de la tubería (ilustración 1.5i). Una vez que la depresión llega al inicio de la tubería, se produce una nueva depresión como una reflexión de un extremo cerrado (ilustración 1.5j). Puesto que el estado que muestra la ilustración 1.5j es similar al de la ilustración 1.5b, a partir de este momento comienza un nuevo ciclo de depresión y sobrepresión, y el transitorio presenta un carácter periódico.

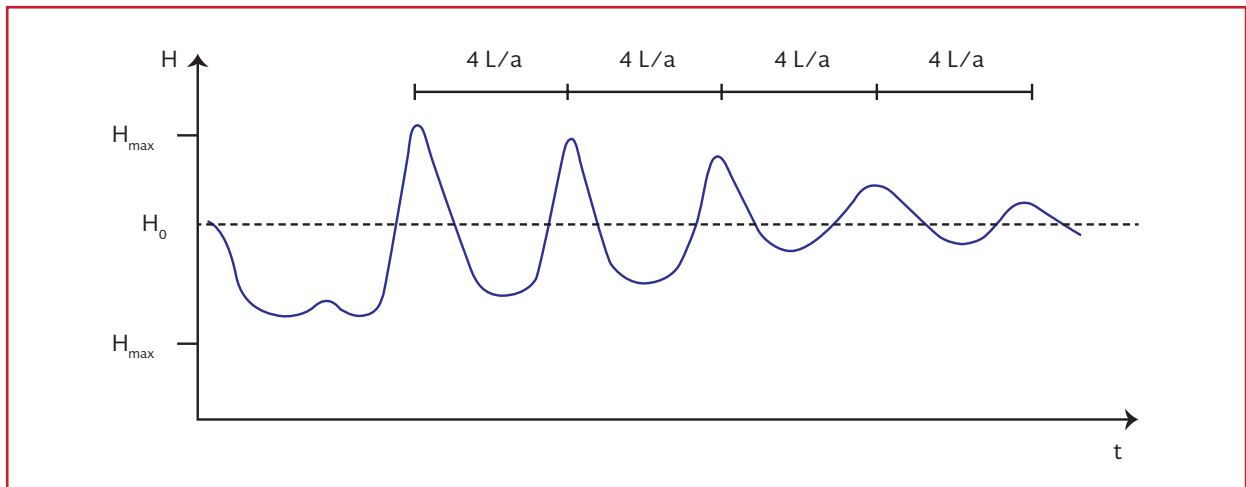
La evolución resultante de la carga hidráulica en el inicio de la tubería viene dada en la Ilustración 1.6.

Conclusiones para el caso de paro de bombas sin separación de la columna:

- La sobrepresión máxima se produce al inicio de la tubería debido a la detención del flujo inverso ocasionada por las válvulas de no retorno cerradas
- Cuanto mayor sea el valor de las depresiones al detenerse las bombas, mayores serán las sobrepresiones que se producirán después
- Las variaciones máximas de la presión se producen con un golpe directo (con un tiempo de paro de las bombas menor a $2L/a$); si el tiempo de paro es mayor que $2L/a$, el golpe es indirecto. Por lo tanto, cuanto mayor sea el tiempo de paro con respecto al de retorno $2L/a$, menores serán las depresiones y las sobrepresiones

Estas conclusiones son importantes para la selección de una protección antiarriete adecuada, como se explica en el capítulo 3 de este libro.

Ilustración 1.6 Evolución de la presión en el inicio de una línea de bombeo durante el transitorio que genera el paro de bombas, sin separación de columna en la línea



1.6.2. CASOS CON SEPARACIÓN DE LA COLUMNA LÍQUIDA

La Ilustración 1.7a representa las condiciones iniciales (estado de régimen permanente). El paro de las bombas genera en el inicio de la tubería una depresión ΔH , la cual se propaga hacia el tanque (Ilustración 1.7b). En el momento en que esta depresión llega a un punto de la tubería donde la presión en condiciones de régimen permanente es igual a ΔH (punto A de la Ilustración 1.7c), en ese punto se origina una presión negativa (un vacío). El vacío en la tubería aumenta aguas abajo del punto A hasta llegar al punto B, donde se produce la separación de la columna. Aguas abajo de la separación continúa propagándose hacia el tanque una depresión menor (Ilustración 1.7c).

El volumen de la separación aumenta hasta que el flujo en la tubería se invierte (del tanque a las bombas), después de lo cual el volumen de la separación disminuye hasta que la separación se cierra.

El cierre produce una sobrepresión (Ilustración 1.7d), la cual se propaga por la tubería en los dos sentidos. Al llegar la sobrepresión a las

válvulas de no retorno, su valor se duplica (como reflejo de un extremo cerrado) y parte hacia el tanque (Ilustración 1.7e); sigue un reflejo desde el tanque (Ilustración 1.7f) y un nuevo reflejo con depresión desde el inicio de la tubería (Ilustración 1.7g). Si la depresión producida es mayor que $H_0 + H_{vacío}$ (donde $H_{vacío}$ es la presión con la cual se produce la separación), al inicio de la tubería puede originarse una nueva separación (Ilustración 1.7g). Esta separación puede nombrarse 'surgida secundariamente' o 'secundaria', debido a que es consecuencia de una separación ocurrida anteriormente.

Conclusiones para el caso del paro de bombas con separación de columna:

- Las sobrepresiones en caso de golpe de ariete con separación de columna pueden presentar valores considerablemente mayores que aquellas que resultan de un golpe de ariete sin separaciones
- Las sobrepresiones resultantes de separaciones en la tubería al propagarse y encontrar las válvulas de no retorno cerradas duplican su valor. De este modo, se produce la sobrepresión máxima. En otras palabras, la causa

primaria para la sobrepresión máxima es el choque de las columnas en el momento de la reunificación

- Es posible la obtención de zonas de vacío y separaciones en una gran parte de la tubería

Estas conclusiones son de vital importancia para seleccionar una adecuada protección antiarriete en caso de separaciones de columna. Sobre este tema se profundiza en el capítulo 3 de este libro.

Ilustración 1.7 Transitorio con separación de la columna en una línea de bombeo

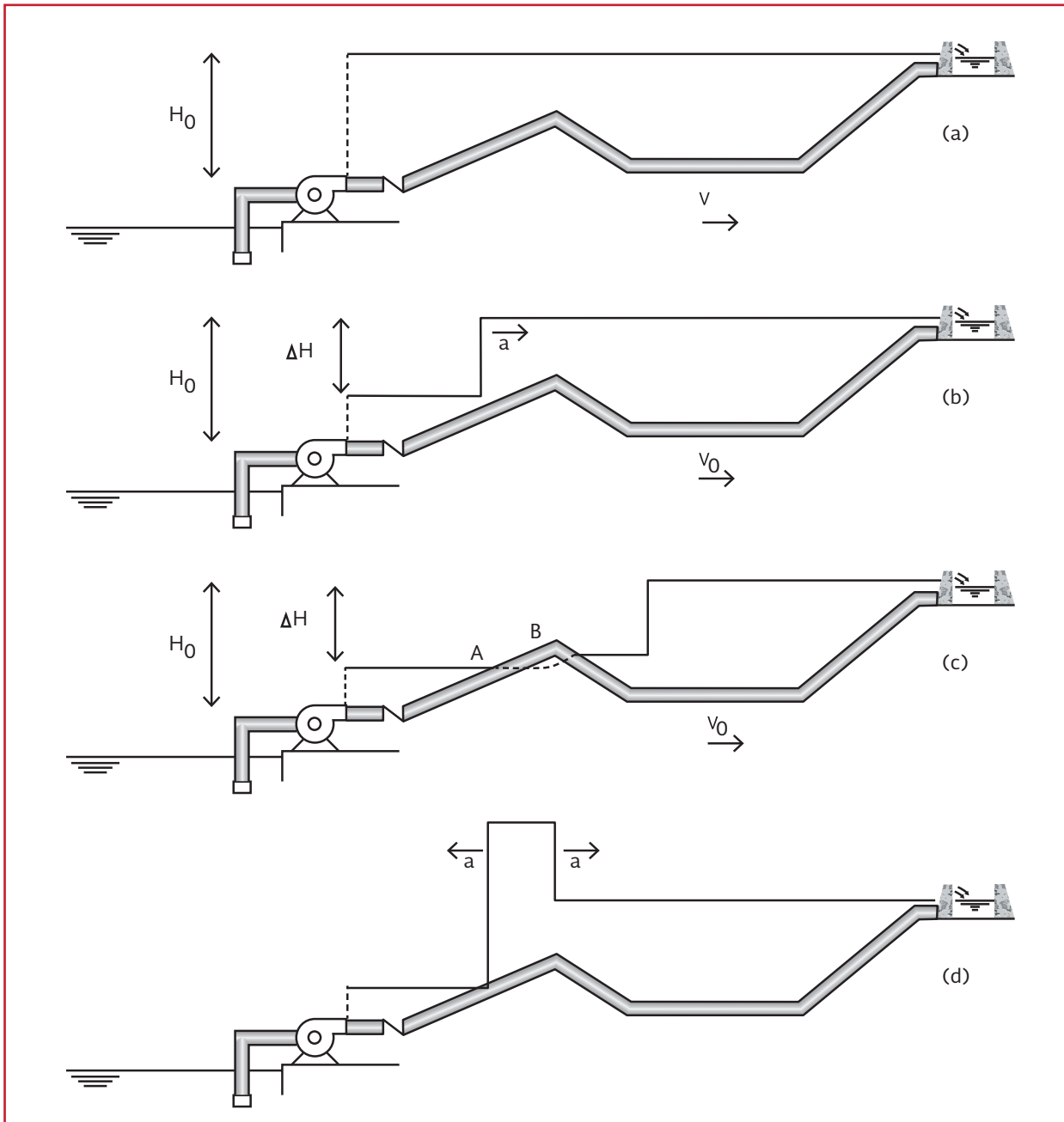
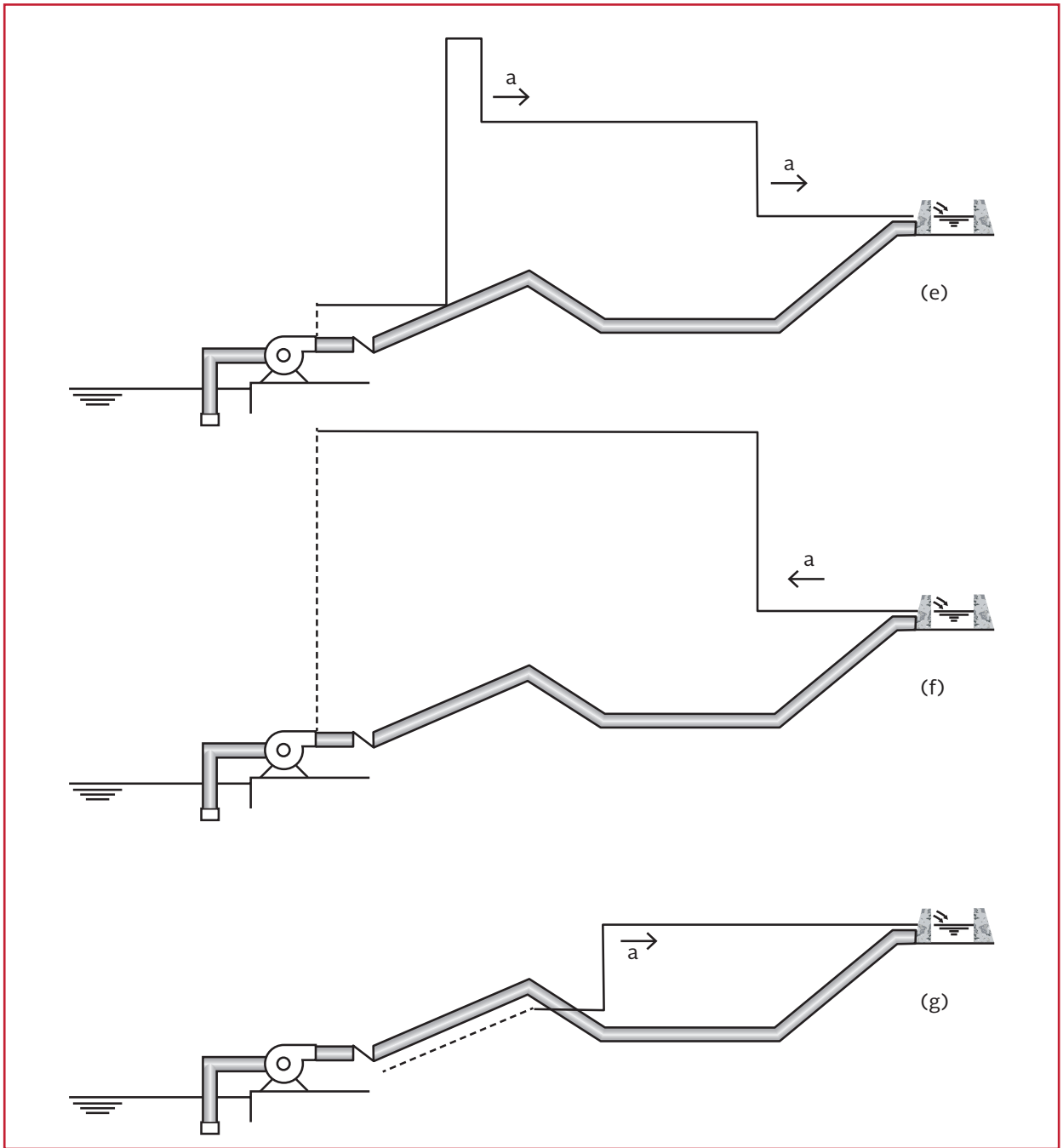


Ilustración 1.7 Transitorio con separación de la columna en una línea de bombeo (Continuación)



1.7. TRANSITORIOS EN UNA CONDUCCIÓN POR GRAVEDAD

1.7.1. APERTURA DE UNA VÁLVULA AL FINAL DE LA CONDUCCIÓN

La Ilustración 1.8a muestra las condiciones iniciales del transitorio. La válvula está cerrada, la velocidad del flujo en la tubería es igual a cero y en la tubería se tiene la presión hidrostática.

Con la apertura de la válvula comienzan a descargarse gastos al final de la tubería. El gasto descargado genera depresiones que se dirigen hacia el tanque (Ilustración 1.8b) y luego se reflejan en una onda que tiende a restaurar la carga inicial (Ilustración 1.8c). Después del tiempo $2L/a$, las ondas reflejadas desde el tanque alcanzan el final de la tubería y en alguna medida neutralizan las depresiones que continúan surgiendo como consecuencia de los aumentos del gasto. En el momento en que deja de aumentar el gasto, las ondas reflejadas aumentan la presión hasta el valor correspondiente a flujo permanente (Ilustración 1.8d).

La apertura de válvulas no suele generar sobrepresiones. Dependiendo de las formas del perfil topográfico de la tubería y de la magnitud de las depresiones, la onda de depresión que genera la apertura puede causar vacíos y separaciones de la columna de agua en el inicio del transitorio (Ilustración 1.9).

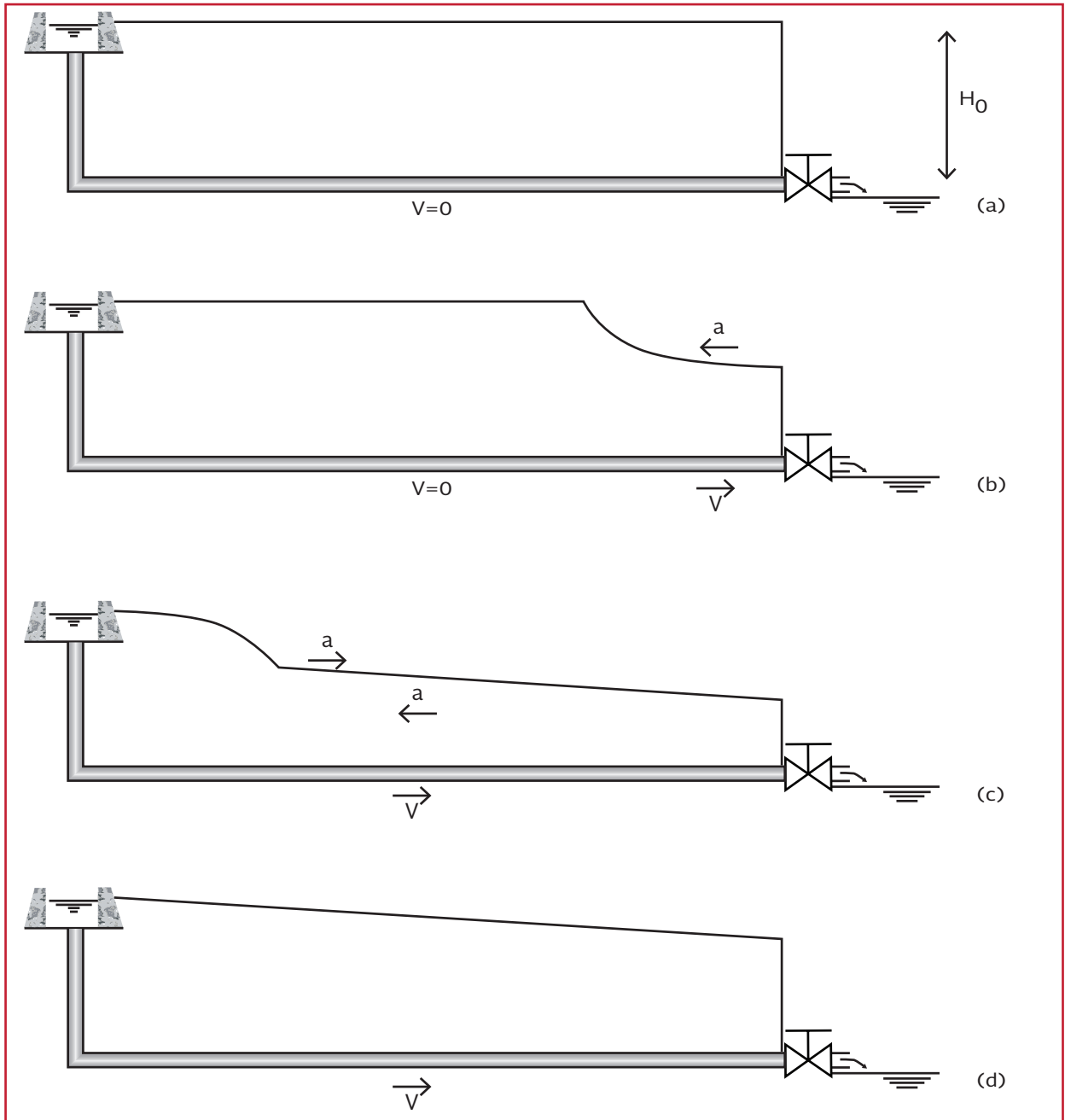
1.7.2. CIERRE DE UNA VÁLVULA AL FINAL DE LA CONDUCCIÓN

Al iniciarse el cierre de la válvula, surgen sobrepresiones que se propagan al inicio de la tubería (Ilustración 1.10a), se reflejan desde el tanque y después de un tiempo $2L/a$, neutralizan en cierta medida las nuevas sobrepresiones generadas por el cierre. En la tubería se establecen cargas hidráulicas más altas que la del tanque (Ilustración 1.10b). Luego del cierre total, se alcanza una velocidad cero del flujo en la tubería. Como consecuencia de la presión más alta en la tubería surge un flujo hacia el tanque y una onda de depresión (Ilustración 1.10c) que tiende a establecer el nivel piezométrico del tanque en la tubería. Al llegar al final de la tubería esta onda se refleja y provoca depresiones que se dirigen al tanque (Ilustración 1.10d). El transitorio continúa desarrollándose con sobrepresiones y depresiones periódicas hasta su disipación total.

Igual que en el caso de paro de bombas, si el tiempo de cierre es menor o igual al tiempo de duración de la fase del golpe de ariete ($2L/a$), el golpe es directo; en caso contrario, es indirecto. Las variaciones máximas de la presión se producen con un golpe directo; en particular, la sobrepresión al inicio del transitorio adquirirá el valor que da la fórmula de Zhukovski (ecuación 1.4).

Conclusiones para el caso de apertura o cierre de válvula en una conducción por gravedad:

Ilustración 1.8 Transitorio generado por la apertura de una válvula



- Las depresiones y sobrepresiones que se producen con la apertura o el cierre de la conducción, dependen del tiempo de cierre o apertura y de la longitud de la conducción
- Las depresiones y sobrepresiones son tanto mayores cuanto menor es el tiempo de cierre
- La sobrepresión (o depresión) máxima se obtiene con un golpe directo (con tiempo de cierre o apertura menor que $2L/a$), y se calcula con la fórmula de Zhukovski (apartado 1.3)

Ante formas de terreno desfavorables, es posible que se produzcan separaciones de la columna;

en tal caso, las sobrepresiones pueden ser mayores que las del golpe directo.

Ilustración 1.9 Generación de vacíos con la apertura de una válvula

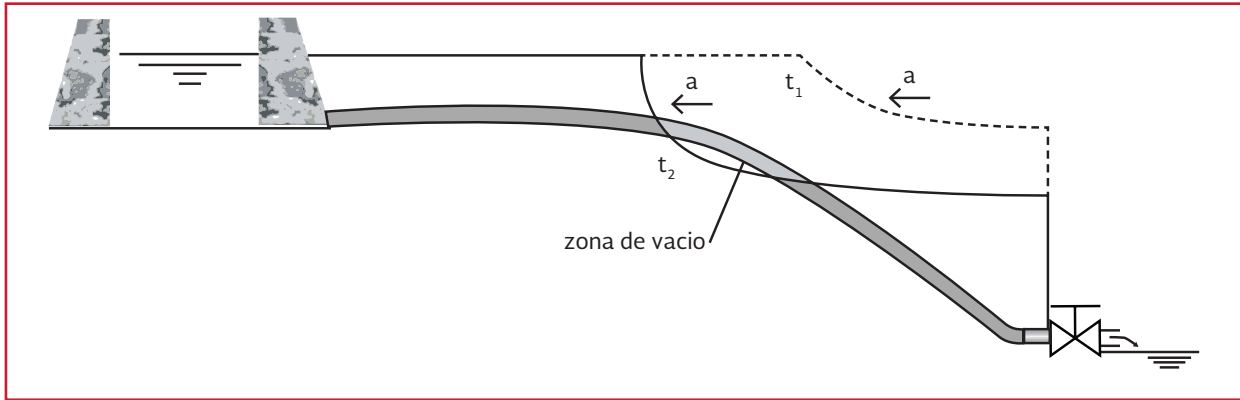


Ilustración 1.10 Transitorio generado por el cierre de una válvula al final de una conducción

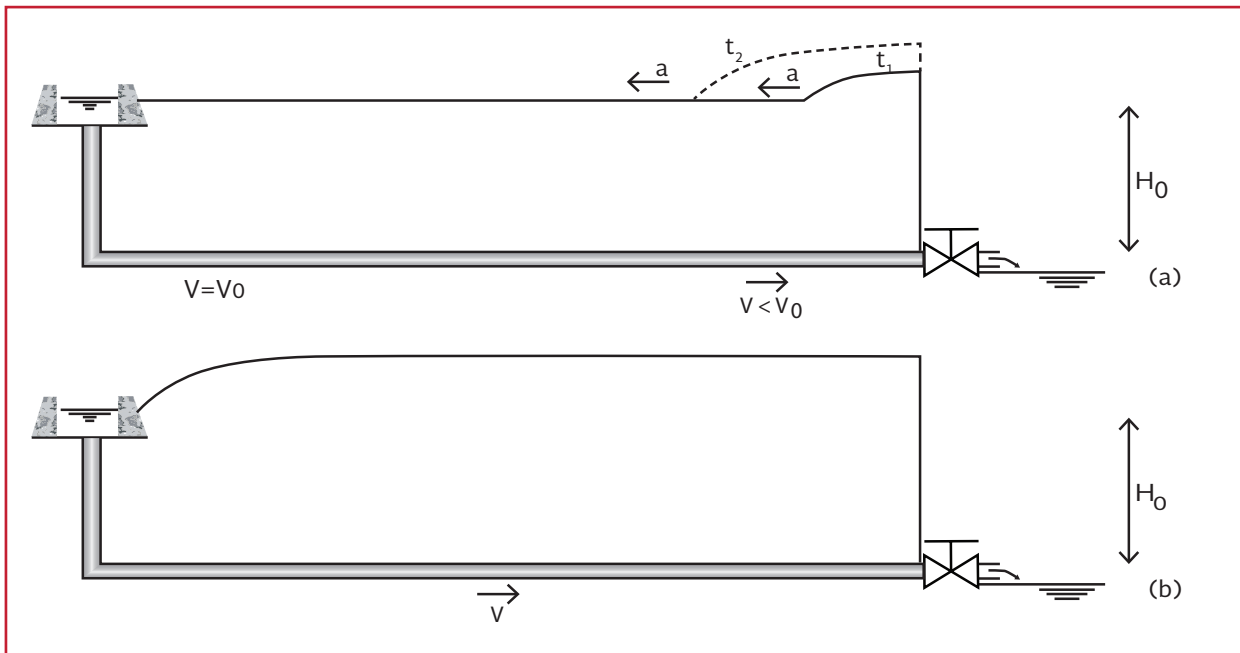
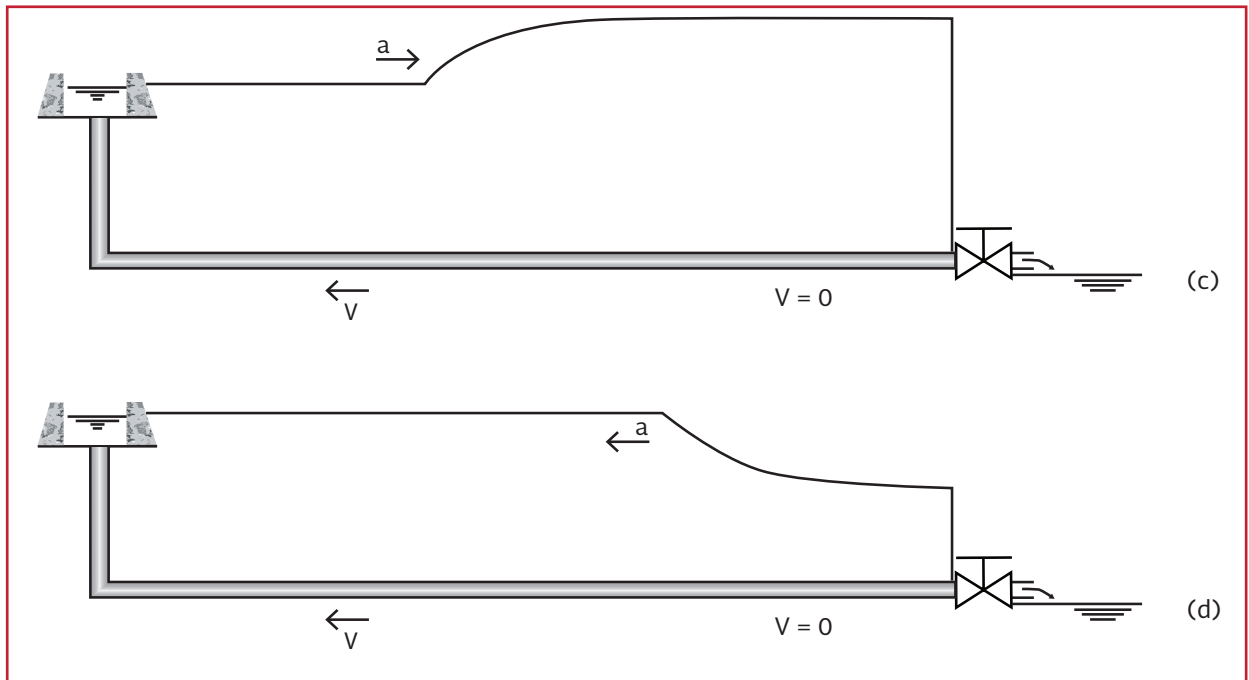


Ilustración 1.10 Transitorio generado por el cierre de una válvula al final de una conducción (Continuación)





2

MEDIOS DE CONTROL DE TRANSITORIOS

2.1. PROBLEMAS QUE LOS TRANSITORIOS PUEDEN CAUSAR

En el capítulo 1 se mostraron algunos fenómenos que se pueden presentar en líneas de conducción a presión, ya sea con la presencia de equipos de bombeo o en conducción por gravedad. De forma general, los problemas que los transitorios pueden ocasionar son:

- **Sobrepresiones.** Las altas presiones que se producen como resultado del golpe de ariete pueden llegar a ser superiores a la resistencia de la tubería hasta provocar su reventamiento o avería
- **Depresiones** (presiones negativas y separación de la columna líquida). Debido a que con el transitorio puede presentarse un vacío (presión menor que la atmosférica), dentro de la tubería se tendrá una presión inferior a la que actúa afuera. Para tubería enterrada, además de la presión atmosférica, actúa también el empuje del terreno. Si la tubería no es suficientemente rígida en su sección transversal, esta diferencia de presiones puede hacer que la sección pierda su estabilidad y se colapse la tubería. Para un material de tubería

dado, la estabilidad de una tubería frente al colapso depende de la relación entre su diámetro D y el espesor de la pared δ (llamada también relación de esbeltez).

La estabilidad es tanto mayor cuanto menor sea el valor de su relación D/δ . La tubería de plástico es más vulnerable en este sentido, al tratarse de un material más deformable. La tubería de concreto soporta bien estas condiciones

Algunos tipos de tubería tiene juntas de goma que pueden ser succionadas por el vacío, lo cual causaría fugas de agua en el sistema, aunque los tubos queden intactos

En presencia de vacíos mayores se producen separaciones de la columna líquida. Como se explicó en la sección 1.5, el cierre posterior de estas separaciones puede ser acompañado de presiones muy altas

- **Fatiga del material.** La acción repetida de cargas dinámicas fuertes durante un periodo de tiempo prolongado disminuye la resistencia del material del que está constituida la tubería y sus accesorios, lo que da origen a un fenómeno conocido como fatiga del material. Transitorios de mayor consideración pueden provocar también vibraciones en la tubería que

se transmiten a los bloques de apoyo, cimientos, etc., los que también están sujetos a una falla por fatiga

La posibilidad de falla por fatiga crea el peligro de averías y acorta la vida útil de las diferentes partes de la conducción. Al disminuir la magnitud y la frecuencia de los transitorios, puede reducirse al mínimo dicha fatiga

- **Sobrevelocidad de las máquinas.** Las piezas rodantes de las bombas y de sus motores eléctricos acoplados están sometidas a fuerzas centrífugas. Estas fuerzas son proporcionales al cuadrado de la velocidad de rotación y tienden a desprender las piezas en dirección radial

Los fabricantes diseñan sus máquinas hidráulicas y eléctricas de forma tal que puedan resistir las fuerzas centrífugas sin daño alguno, hasta una velocidad máxima predeterminada. La resistencia a la sobrevelocidad de rotación puede ser diferente para el sentido normal que para el sentido inverso de la rotación.

Como se explica más adelante en la sección 2.3.12, algunos de los medios de control de transitorios generados por el paro de bombas se basan en consentir que se descargue cierta cantidad de agua en sentido inverso a través de las bombas. En este caso, los equipos de bombeo quedan libres de la acción eléctrica y el flujo tiende a acelerarlos en sentido inverso hasta el grado máximo posible, es decir, a *embalarlos*. Es posible que se produzca en estas condiciones una velocidad superior a la máxima permisible y que se dañen las partes rodantes.

2.2. PRINCIPIOS GENERALES EN LA PROTECCIÓN CONTRA EL GOLPE DE ARIETE

Teniendo en cuenta que:

$$\Delta v = \frac{\Delta Q}{A} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

la fórmula de Zhukovski, puede ser escrita en la siguiente forma:

$$\Delta H = \frac{a \Delta Q}{A} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

donde:

A = área de la sección transversal de la tubería

ΔQ = variación instantánea del gasto

La ecuación 2.2 y el mecanismo de reducción del golpe de ariete por el reflejo de las ondas de presión conducen a las siguientes posibilidades para reducir la variación de presión en los transitorios:

- Aumento de la sección transversal de la tubería A (cambio de su diámetro a uno superior). Una solución de esta índole es cara y generalmente se buscan otras soluciones. Puede ser conveniente si algunos tramos de pequeña longitud y pequeño diámetro en la conducción son la causa de un aumento considerable del golpe de ariete
- Disminución de la velocidad de propagación de la onda de presión a . La velocidad

a depende de la elasticidad del material de la tubería y del contenido de aire dentro del agua. En esta relación, en conducciones de tubería plástica, ocurre un golpe de ariete de menor valor

- Aumento del tiempo de duración del proceso transitorio. En caso de un golpe de ariete causado por el cierre de válvulas, este aumento se efectúa mediante un retardo en el cierre. El proceso de paro de los equipos de bombeo puede retardarse adicionándoles volantes especiales que aumenten su inercia
- Limitación de la longitud de la tubería en la que se desarrolla el golpe de ariete. En una conducción por gravedad esto puede lograrse construyendo tanques intermedios que dividen la tubería en dos (o más de dos) partes y evitan el paso de las ondas de presión entre esas partes
- En una línea de bombeo esto puede lograrse cambiando el bombeo de una etapa por varias etapas con cárcamos intermedios, dado que en la tubería de cada etapa el golpe de ariete se desarrollaría de forma independiente
- Reducción de la variación del gasto ΔQ en la tubería. En los periodos de depresión se suministran gastos complementarios desde afuera para reducir las depresiones. En los periodos de sobrepresión, parte del gasto se expulsa al exterior o a un recipiente. La mayoría de los medios antiarriete conocidos y descritos más adelante en el presente capítulo ejecutan ambas o una de estas dos funciones

Con la reducción de las sobrepresiones y depresiones pueden evitarse o disminuirse las presiones negativas y las separaciones de columna. Por esta razón, las cinco alternativas señaladas pueden presentar también esta función. Si aun así se producen presiones negativas (vacíos) y separaciones inadmisibles, tendrán que tomarse medidas especiales para eliminarlos.

El vacío puede evitarse mediante la admisión de agua o aire. Debe señalarse que cuando se admite agua, el flujo dentro de la tubería se mantiene continuo, mientras que si ingresa aire a la tubería, se forma una burbuja de aire, es decir, el flujo no es continuo. Se puede decir que en el lugar de la admisión de aire se forma también una separación de columna, por tanto admitir agua es una medida más eficaz que admitir aire.

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

Excepcionalmente se dan casos en los que, en vez de emplear una protección antiarriete, resulta más conveniente usar tubería y accesorios con

una resistencia mayor o de una clase superior a la normalmente utilizada.

2.3. MEDIOS DE CONTROL DE TRANSITORIOS

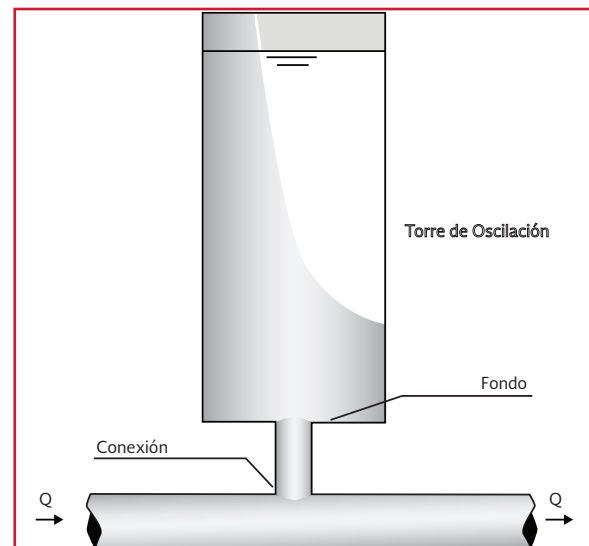
2.3.1. TORRE DE OSCILACIÓN

La torre de oscilación es un cilindro conectado con la tubería, que en cuya parte superior está abierto y se comunica directamente con la atmósfera. En un régimen permanente, la elevación del nivel de agua en la torre es igual a la carga piezométrica en la tubería. En las líneas de conducción de menor diámetro un simple tubo parado puede fungir como torre de oscilación, e incluso puede ser del mismo diámetro y del mismo material que la propia tubería.

Las torres de oscilación aseguran la entrada de agua a la tubería al bajar la presión en ésta y reciben el agua que sale de la tubería al subir la presión. El funcionamiento de la torre de oscilación es tanto más efectivo para reducir el golpe de ariete, cuanto mayor sea el área de la superficie libre de agua en ella. Ésta es la razón por la cual frecuentemente las torres de oscilación se construyen con diámetro variable. La parte donde suceden las oscilaciones del nivel de agua se construye con un diámetro mayor y se conecta con la tubería por medio de una conexión de diámetro menor (ilustración 2.1).

La torre de oscilación es un elemento de protección que presenta varias ventajas, pero cuyas desventajas pueden ser importantes. Por ejemplo, si no se tienen en cuenta los efectos secundarios que pueden generarse en la conducción por la instalación de una torre de oscilación, se

Ilustración 2.1 Torre de oscilación



pueden generar sobrepresiones incluso mayores que las que se tendrían sin torre alguna.

Las ventajas que presenta la torre de oscilación son:

- El funcionamiento tan sencillo de este dispositivo, además de que no requiere mantenimiento mecánico alguno
- No necesita mecanismo adicional alguno para llenar y reponer el volumen de agua aportado durante el transitorio. Únicamente se debe tener la precaución de dar a la torre una altura suficiente para que no rebose por su parte superior durante el proceso de arranque en la instalación
- El transitorio generado no se transmite aguas abajo de la torre si se diseña adecuadamente. Por ello, el tramo aguas abajo queda protegido sin la necesidad de instalar dispositivos secundarios adicionales

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

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

2.3.2. CÁMARA DE AIRE

Es uno de los dispositivos más utilizados para el control de transitorios, particularmente para la protección de instalaciones de bombeo frente al transitorio originado por el fallo del suministro eléctrico. Consiste en un depósito cerrado, unido a la tubería y en cuya parte superior tiene comprimido un volumen de aire (ilustración 2.2a). Durante el trabajo normal en régimen permanente, el aire en la cámara está comprimido a una presión igual a la presión del agua dentro de la tubería, por lo que no existe flujo entre la cámara y la tubería.

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

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

Cuanto mayor sea el volumen de aire tanto más eficaz resulta la cámara de aire para reducir las depresiones y sobrepresiones. Por otra parte, con un volumen de aire insuficiente, la cámara puede provocar incluso presiones más altas que

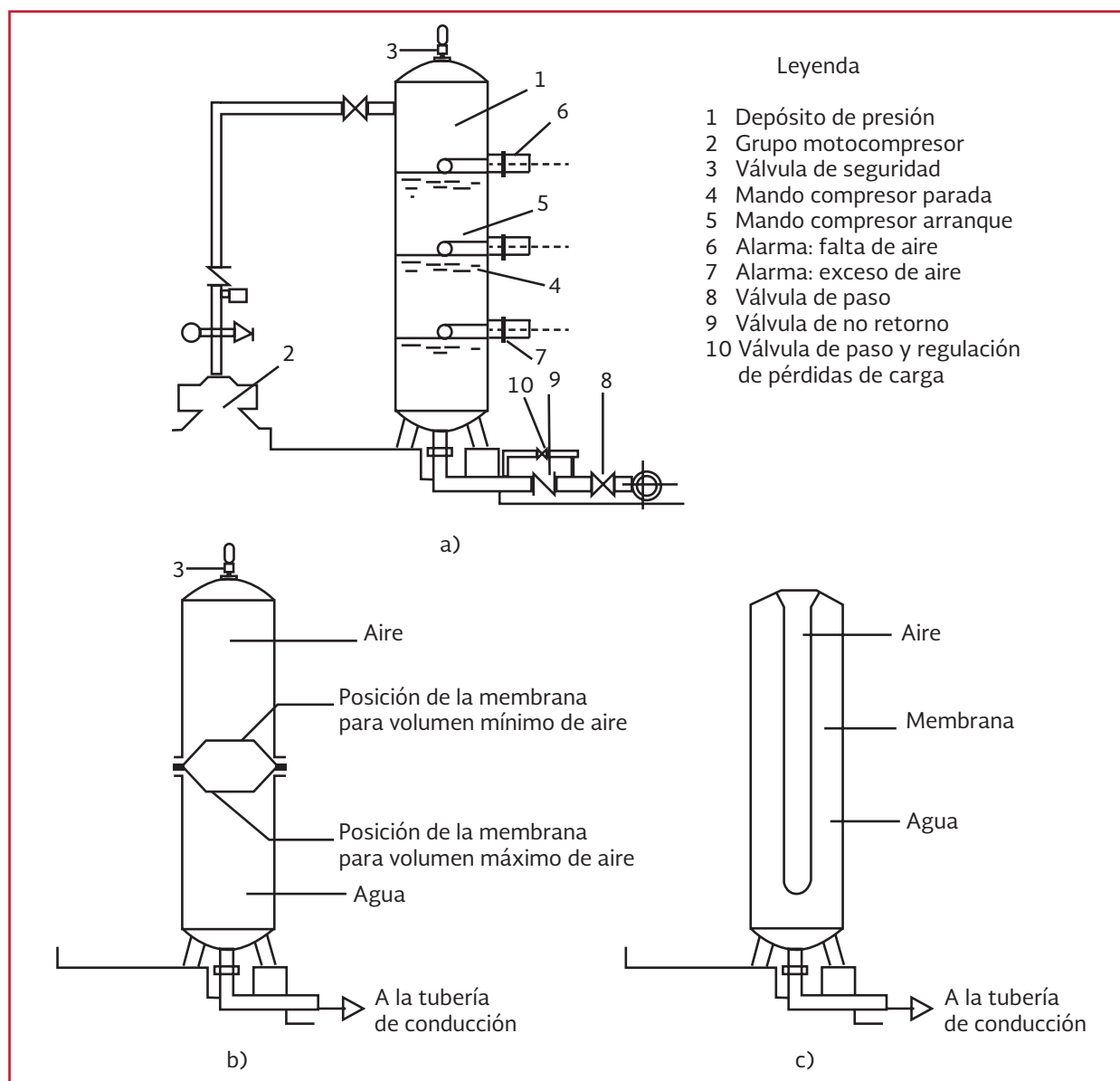
aquellas que pudieran producirse sin medio de control alguno. Por esta razón, es imprescindible mantener el volumen de aire requerido al operar el sistema. Si no se toman medidas para mantenerlo, el volumen de aire rápidamente disminuye debido a su disolución en el agua y debido a posibles fugas en las conexiones de diferentes manómetros y juntas.

El método más usado para restituir el aire perdido es mediante un compresor (ilustración

2.2a). Otra posibilidad es aislar el agua del aire mediante membranas (ilustración 2.2b) o balones elásticos especiales (ilustración 2.2c).

Cuanto mayor sea el gasto que circula de la cámara de aire a la tubería durante los periodos de depresión en la tubería, tanto menores serán las depresiones y el peligro de vacío y de separaciones. No sucede algo similar en los periodos de sobrepresión en la tubería, cuando el gasto circula de la tubería a la cámara de aire,

Ilustración 2.2 Formas de mantener el aire en cámaras de aire: a) Con un compresor; b) y c) Con una membrana



dado que la entrada rápida de un gasto grande a la cámara de aire generaría una aceleración del flujo hacia la cámara y como resultado, una compresión rápida del aire y presiones muy altas. Por esta razón resulta conveniente tener pérdidas de carga mínimas al salir el agua de la cámara y cierto valor de pérdidas al entrar el agua a esta, es decir, que se tenga una resistencia hidráulica asimétrica en la conexión de la cámara con la tubería. El método más utilizado para realizar esto consiste en la colocación de una válvula de no retorno y un paso lateral (*bypass*) de diámetro mucho menor con una válvula de regulación (ilustración 2.2a) en la conexión de la cámara con la tubería. De esta forma, la resistencia hidráulica del paso lateral puede regularse por su válvula de regulación, una vez que la instalación esté en funcionamiento. Una vez ajustada esta válvula, debe bloquearse mecánicamente para evitar que el coeficiente de pérdidas cambie de valor, de forma accidental.

Otra posibilidad para lograr la resistencia hidráulica asimétrica es la colocación en la conexión de una válvula de no retorno con plato perforado, que se cierra en caso de haber un flujo hacia la cámara. El tamaño de la perforación dependerá de la magnitud requerida para las pérdidas. De esta forma para el flujo de salida no hay resistencia hidráulica alguna, mientras que para el flujo de retorno hay cierta resistencia hidráulica controlada por el tamaño del orificio practicado. La desventaja de este método consiste en la necesidad de perforar el plato de la válvula de no retorno.

La resistencia asimétrica puede lograrse también mediante una boquilla asimétrica, que crea condiciones para un vaciado más fácil de la cámara que para su llenado (Parmakian, 1963). La ven-

taja de este método consiste en su sencillez y la ausencia de partes mecánicas móviles. Las desventajas son la necesidad de efectuar un estudio de la boquilla en laboratorio para asegurar que proporcione la resistencia hidráulica requerida, y la imposibilidad de regular la resistencia hidráulica una vez instalada la boquilla.

En la práctica, se usa también una resistencia hidráulica simétrica mediante un diafragma o válvula de regulación. La ventaja de esta consiste en su sencillez, pero es necesario un mayor volumen de la cámara debido a que la estrangulación obstaculiza la salida del agua en la fase de depresión.

Ventajas e inconvenientes que presenta una cámara de aire:

- La primera ventaja fundamental de la cámara de aire frente a la torre de oscilación y al tanque unidireccional es que el efecto sobre la onda de presión negativa inicial no depende de la cota inicial de la superficie libre de agua en la cámara de aire. Esta diferencia hace que la cámara de aire sea especialmente útil para instalaciones cuyo perfil no permite la instalación de los otros dispositivos de protección
- Atendiendo a su ubicación, la cámara de aire puede instalarse muy libremente, por lo que puede situarse, en la mayoría de las ocasiones, cerca de la planta de bombeo, lo que facilita la alimentación del compresor y reduce en muchas ocasiones los gastos de mantenimiento del mismo. Caso contrario sucedería si la cámara de aire estuviese alejada de la planta de bombeo

Si bien la cámara de aire ofrece ventajas respecto a la torre y al tanque unidireccional, también presenta una serie de desventajas:

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

2.3.3. TANQUE UNIDIRECCIONAL

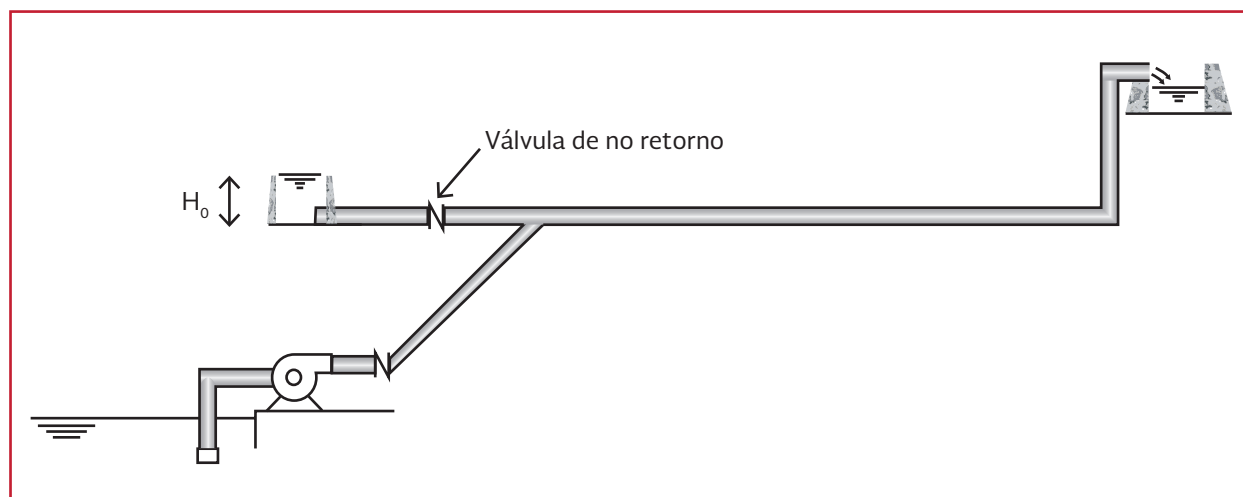
El tanque unidireccional es un dispositivo que aporta agua a la tubería en los periodos de depresión del transitorio en puntos altos de

la tubería, con el objetivo de evitar los vacíos y las separaciones de la columna líquida. Su construcción es semejante a la de una torre de oscilación, pero, a diferencia de esta, lleva una válvula de no retorno instalada en el tubo de conexión con la tubería, que impide el flujo desde la tubería hacia el tanque. Ello trae como consecuencia que el nivel libre del agua en el tanque puede estar por debajo de la línea de alturas piezométricas en régimen permanente.

El esquema de funcionamiento de un tanque unidireccional se muestra en la ilustración 2.3. En presencia de presiones en la tubería mayores que H_o , la válvula de no retorno se mantiene cerrada. Para presiones por debajo de H_o , la válvula se abre y a la tubería ingresa agua, con lo cual se evitan los vacíos y las separaciones de columna. De modo complementario se asegura el llenado reiterado del tanque con agua. De esta forma el volumen del tanque se determina solo por la cantidad de agua necesaria para entregar a la tubería y su altura es mucho menor que la de una torre de oscilación.

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

Ilustración 2.3 Esquema de funcionamiento de un tanque unidireccional abierto



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

Los problemas del tanque unidireccional son:

- La transmisión parcial de las ondas de depresión que inciden sobre el tanque origina que aguas abajo del mismo puedan aparecer problemas por depresiones excesivas en la conducción. Esto origina que deban utilizarse otros dispositivos de protección adicionales, tales como otros tanques unidireccionales o válvulas de aire. Esta desventaja, en muchos casos, resulta fundamental a la hora de realizar el análisis económico de las diferentes estrategias de protección, ya que se trata de comparar la instalación de varios tanques unidireccionales con la instalación, por ejemplo, de una sola cámara de aire

- Otro inconveniente importante de la instalación del tanque unidireccional es que requiere un adecuado mantenimiento mecánico periódico para asegurar el buen funcionamiento, tanto de la válvula de no retorno, que impide la entrada de fluido desde la conducción durante el transitorio, como de las válvulas de llenado, que reponen el volumen de agua aportado por el tanque durante el transitorio (ilustración 2.4)

2.3.4. TANQUE BIDIRECCIONAL

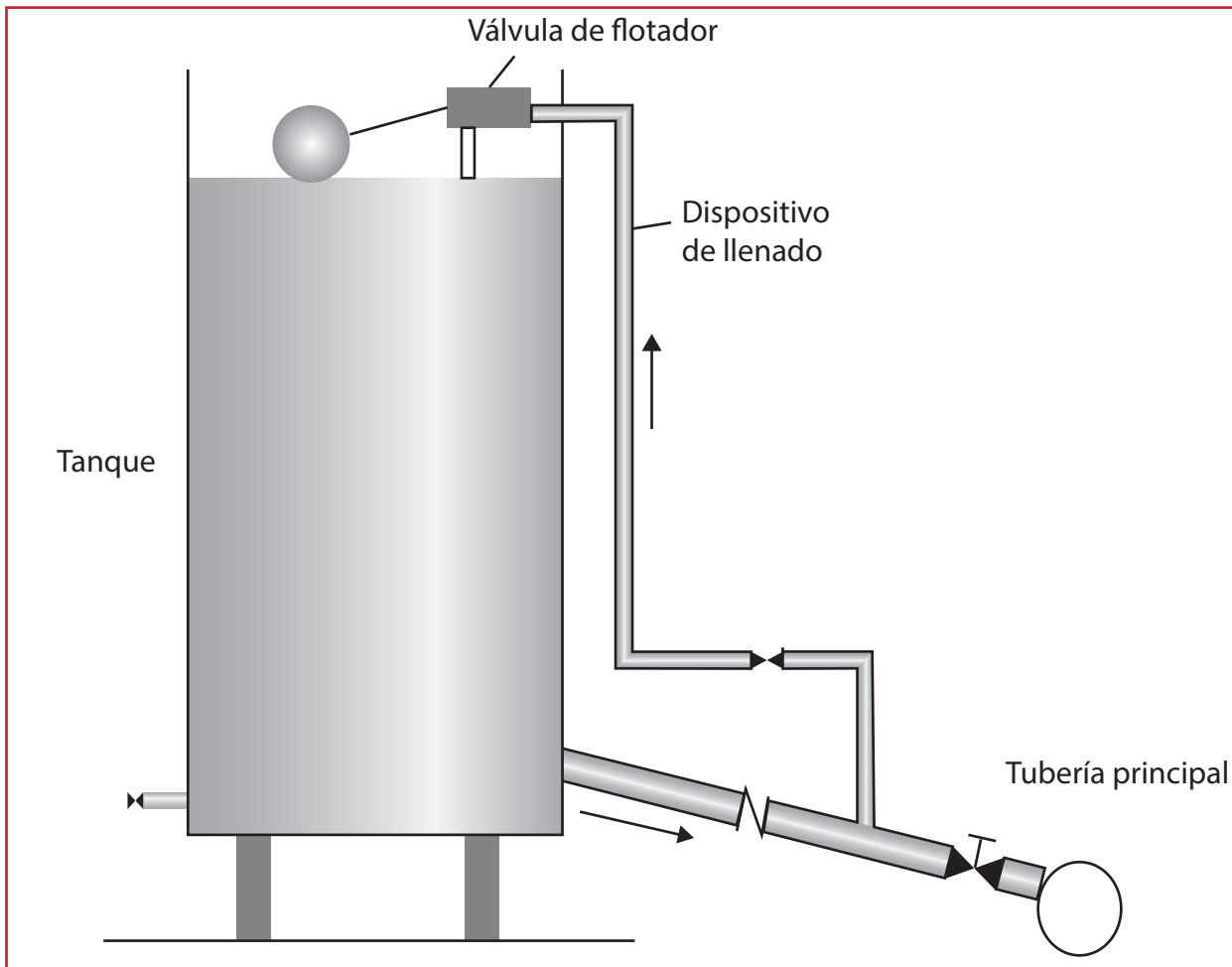
El tanque bidireccional (llamado también tanque unidireccional cerrado) consiste en un depósito cerrado conectado a la tubería, en cuya parte superior se colocan válvulas de admisión rápida y de expulsión lenta de aire. Su esquema de funcionamiento viene dado en la ilustración 2.5.

En presencia de presiones en la tubería mayores que Δz (ilustración 2.5), el tanque permanece lleno de agua y las válvulas de aire se mantienen cerradas. Al descender la presión por debajo de Δz , el agua fluye del tanque a la tubería, ingresa aire a través de las válvulas y el nivel del agua dentro del tanque desciende.

Con el posterior aumento de la presión en la tubería, el agua entra al tanque, el nivel del agua sube y el aire escapa a través de las válvulas.

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

Ilustración 2.4 Tanque unidireccional con su dispositivo de llenado



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

2.3.5. VÁLVULAS DE NO RETORNO

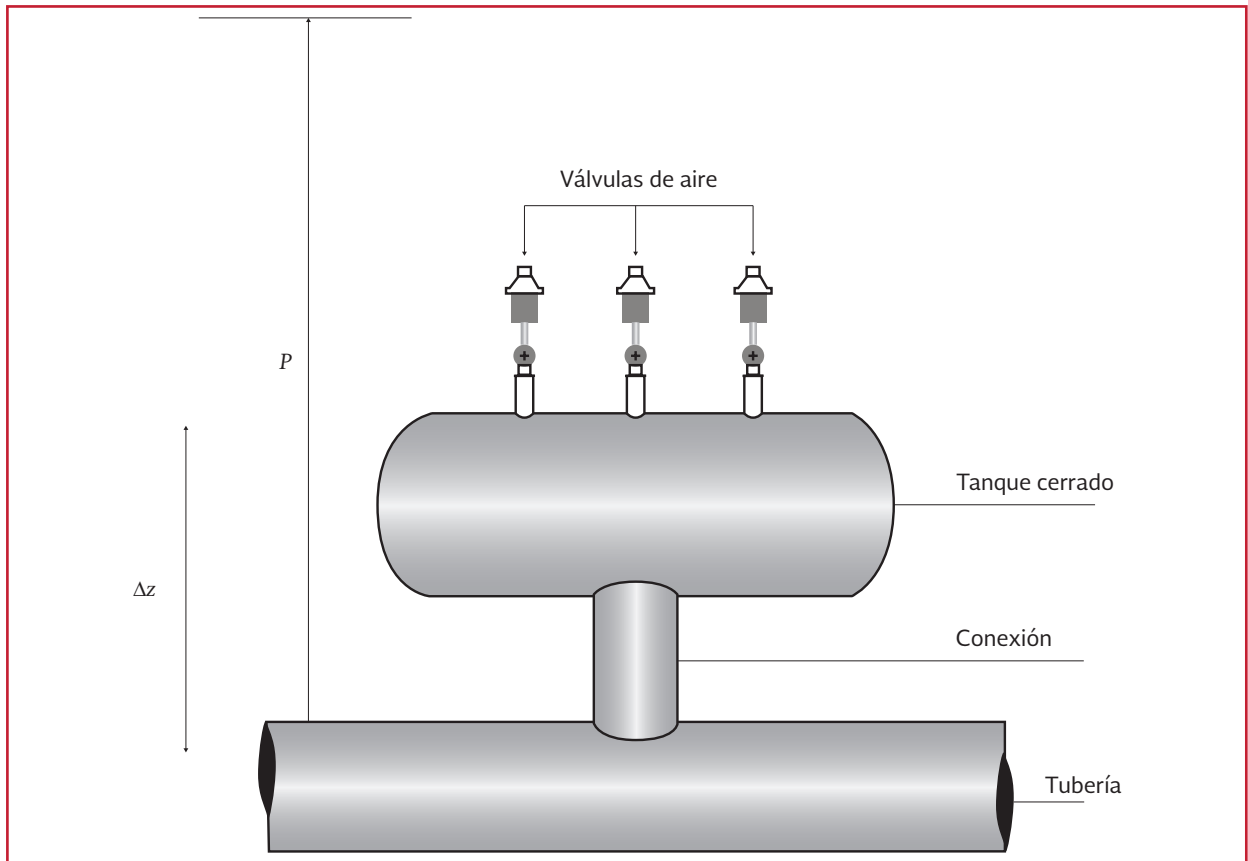
Por sí sola, la válvula de no retorno no es un medio antiarriete; sirve para hacer posible el flujo en un solo sentido. No obstante, su consideración

entre los medios de control de transitorios es necesaria por dos razones:

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

En las válvulas de no retorno reales se produce en general cierto flujo de retorno, o flujo

Ilustración 2.5 Esquema de funcionamiento de un tanque bidireccional



inverso, antes de llegar el cierre. Esto ocurre porque el obturador de la válvula se moverá en este sentido para efectuar el cierre, lo que permitirá el flujo inverso descrito. Cuando este flujo inverso se detenga bruscamente al cerrarse la válvula, se originará un pico de sobrepresión aguas abajo y otro de depresión aguas arriba.

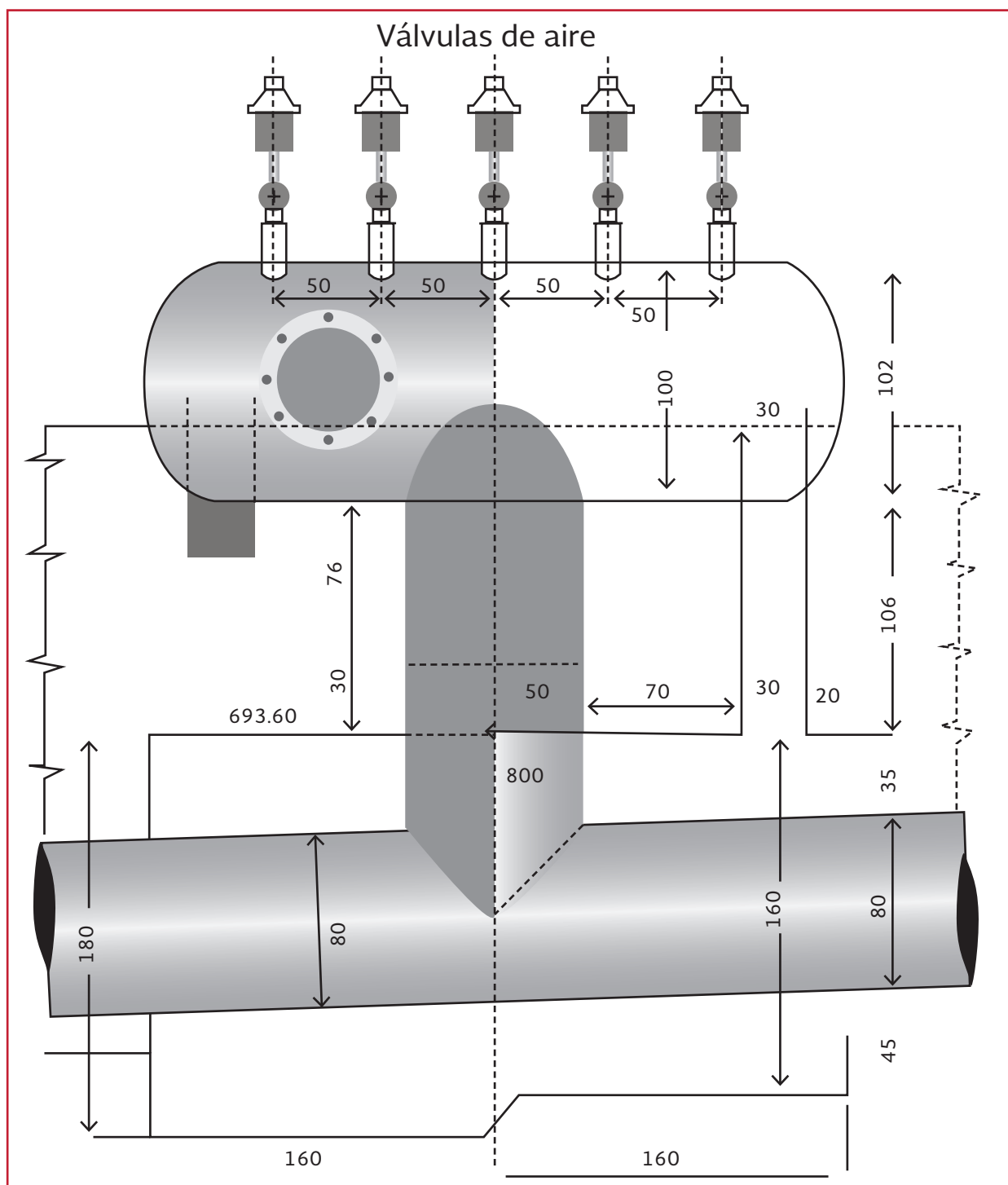
Con base en estas características, se presentan los siguientes lineamientos para escoger la válvula de no retorno más conveniente respecto de los transitorios:

- Baja inercia de las partes móviles
- Recorrido corto en válvulas deslizantes, o bien que la relación distancia-ángulo sea pequeña en las basculantes
- Resorte o palanca con contrapeso de asistencia al cierre de la válvula

Existen también otro tipo de válvulas de no retorno, en las que, con el auxilio de un sistema de palancas y un amortiguador de aceite, se procura un cierre lento. Las válvulas de este tipo se instalan con las bombas, en lugar de las válvulas de no retorno normales, con el objetivo de descargar ciertos caudales en sentido inverso a través de las bombas en la fase de presión alta en los transitorios, aliviando de esta forma las sobrepresiones (ver sección 2.3.12).

En las bombas normalmente se colocan válvulas de no retorno para evitar el vaciado de la línea después de un paro. Como se comentó en el principio de esta sección, otras válvulas de no retorno pueden colocarse como un medio antiarriete en la línea, de tal modo que detengan el flujo inverso en el transitorio y reduzcan la presión máxima que se produce.

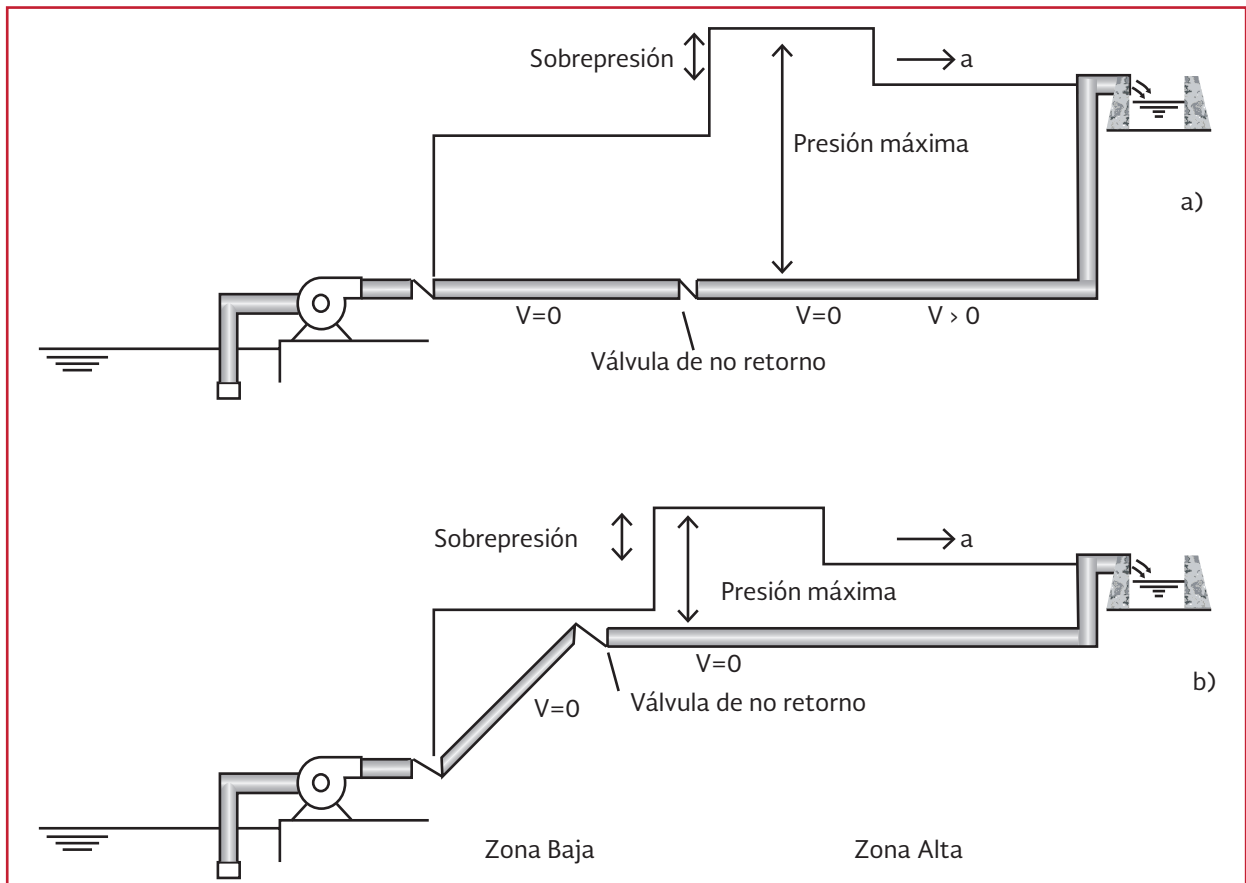
Ilustración 2.6 Tanque Bidireccional



De esta forma, la tubería se divide en zonas con transitorios independientes, una vez cerradas las válvulas de no retorno. El efecto de reducir la presión máxima dependerá de la forma del terreno. Así por ejemplo, la colocación

de válvulas de no retorno intermedias en la tubería de la ilustración 2.7a, no tendrá un gran efecto, debido a que la presión máxima se producirá después de la válvula intermedia con la misma magnitud que en el inicio de la

Ilustración 2.7 Efecto de la ubicación de una válvula de no retorno intermedia en una tubería



línea en caso de no tener una válvula de no retorno intermedia.

En el caso de la ilustración 2.7b, la válvula de no retorno está ubicada en una cota considerablemente más alta que la cota de las bombas. El desplazamiento del lugar donde se produce la sobrepresión máxima tiene sentido aquí, ya que en la planta de bombeo están presentes cargas estáticas altas que, con la sobrepresión del golpe de ariete, aumentarían inadmisiblemente. En el lugar de la válvula de no retorno están presentes cargas estáticas menores y por consiguiente, la posibilidad de admitir sobrepresiones.

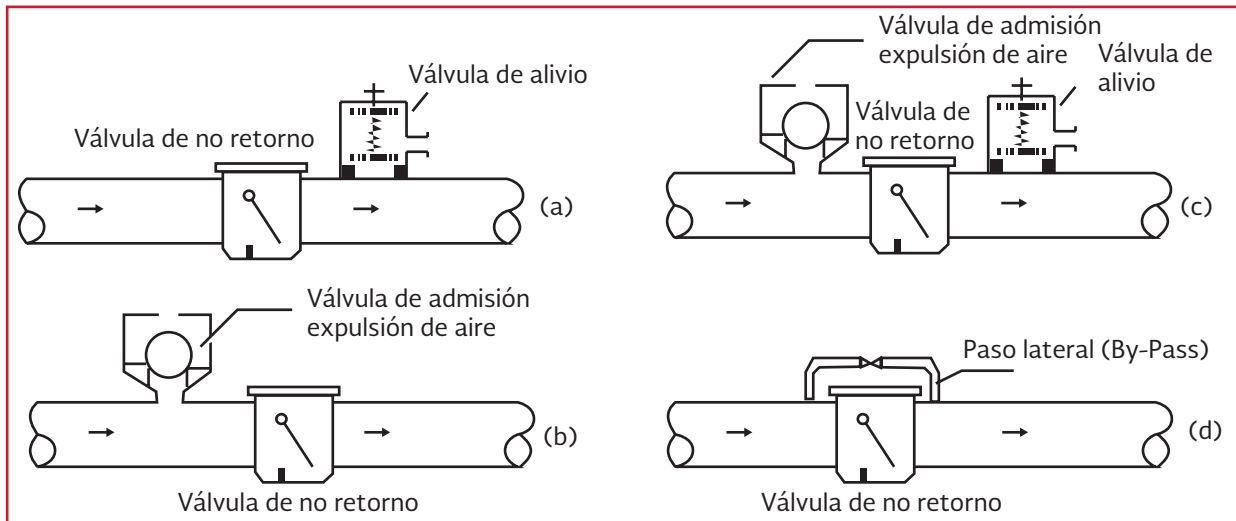
Para limitar aún más las sobrepresiones, puede colocarse una válvula de alivio aguas abajo de la válvula de no retorno (considerando el sentido

normal de circulación) (ilustración 2.8a). En caso de que se produzca un vacío aguas arriba de la válvula, se coloca una válvula de aire (ilustración 2.8b).

También se puede colocar una válvula de aire aguas arriba y una válvula de alivio aguas abajo de la válvula de no retorno (ilustración 2.8c). Las mismas funciones puede ejecutar un paso lateral (*bypass*) (ilustración 2.8d). Stephenson (1981) recomienda que el diámetro de ese *bypass* sea igual a una décima parte del diámetro de la tubería. Se puede lograr el mismo efecto perforando un orificio en el obturador de la válvula de no retorno.

En los dos últimos métodos se produce una interconexión de las zonas de la tubería: antes y

Ilustración 2.8 Diferentes combinaciones de una válvula de no retorno intermedia con otros medios de control



después de la válvula. Después de que se cierre la válvula, circulará cierto gasto por el paso lateral o por el orificio aguas arriba, donde la presión es menor. Este gasto juega un papel amortiguador en cuanto a las sobrepresiones aguas abajo de la válvula y un papel protector en cuanto a los vacíos aguas arriba.

Las válvulas de no retorno ubicadas en puntos intermedios de la conducción no tienen efecto en la fase de depresión del transitorio generado por el paro de las bombas, ya que esta se da con velocidades positivas del agua.

Otra consideración es que si las válvulas se encuentran en puntos de la tubería de difícil acceso, es posible que su mantenimiento no sea el adecuado. Por ello, si una de ellas falla y no cierra cuando debiera, el efecto del golpe de ariete en el tramo en que se encuentra instalada será mayor que el previsto, por lo que la tubería puede verse sometida a esfuerzos mayores que los calculados, con el consiguiente peligro de rotura.

Otra desventaja de las válvulas de no retorno son las pérdidas de carga adicionales generadas

en la operación normal de la línea, con el consiguiente incremento en el costo de energía eléctrica para el bombeo.

Si no se dispone de las características dinámicas de las válvulas de no retorno, en los métodos de modelación matemática se da por hecho que el cierre es instantáneo, es decir, que la válvula es ideal. En este sentido se recomienda tener precaución en sistemas con válvulas de no retorno no adecuadas, ya que las sobrepresiones que estas producen pueden ser superiores a lo que da el modelo.

2.3.6. VÁLVULAS DE ALIVIO (DE SEGURIDAD)

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

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

En la ilustración 2.9 se muestra una válvula de alivio de resorte, que es uno de los tipos más sencillos de válvula. Por medio de un vástago y un plato, el resorte mantiene tapado un orificio que está comunicado con el agua en la tubería. Si la fuerza del empuje por la presión del agua que actúa sobre el plato sobrepasa la fuerza ejercida por el resorte, el plato se levanta y a través del orificio se descarga cierto gasto directamente al exterior o hacia un recipiente. Al disminuir la presión dentro de la tubería, por la acción del resorte, la válvula se cierra. La válvula se ajusta para abrir normalmente cuando la presión en la conducción alcanza un valor entre 10 y 20 por ciento superior a la presión del régimen permanente.

El funcionamiento hidráulico de la válvula de alivio se muestra mediante su curva característica, que indica el gasto que descarga bajo diferentes presiones estáticas. En la ilustración 2.10 se presenta un ejemplo de este tipo de curva.

En su primera parte, hasta el punto A, la curva característica es poco inclinada ya que a medida que se incrementa la presión, el resorte se comprime y el plato deja descubierto un orificio mayor. El resorte se comprime hasta un grado representado por el punto A (orificio completamente abierto). En la segunda parte de la curva, después del punto A, se tiene una

Ilustración 2.9 Esquema de funcionamiento de una válvula de alivio de resorte (Soto y Guaycochea, 2007)

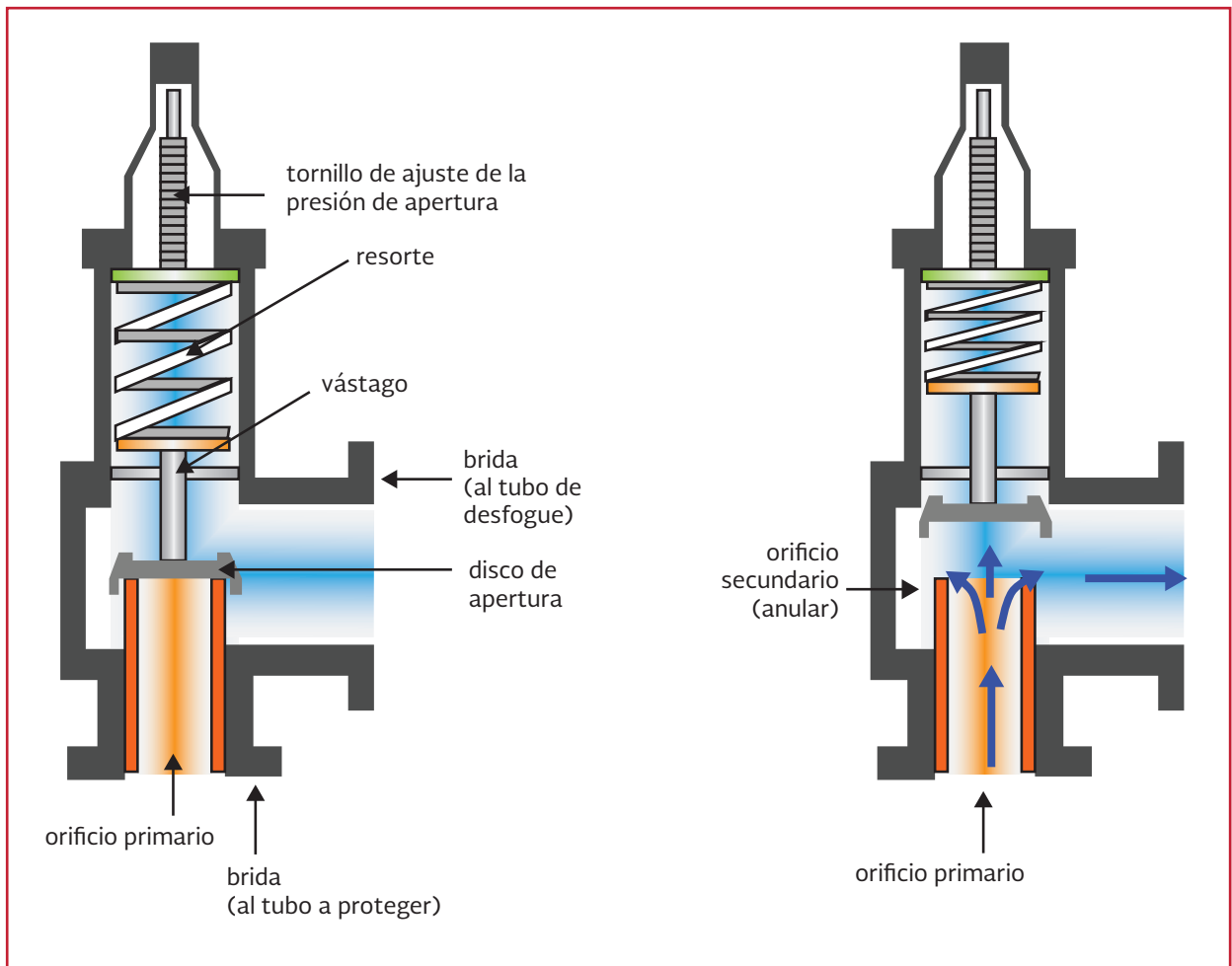
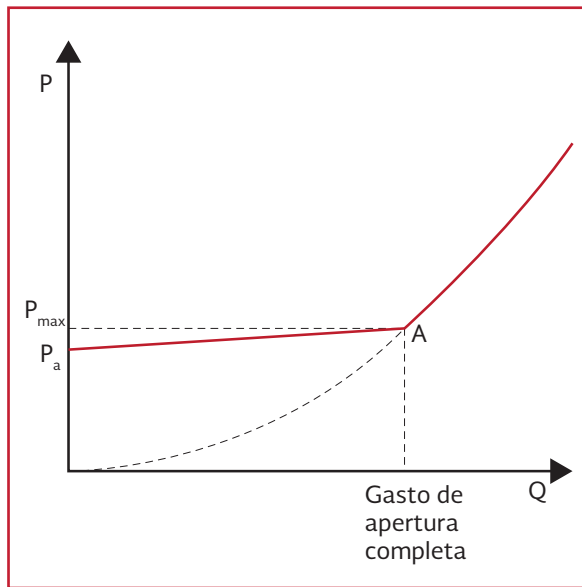


Ilustración 2.10 Curva característica de una válvula de alivio



simple descarga de orificio de área constante, para la cual las leyes de la hidráulica indican una relación cuadrática entre la presión que actúa p y el gasto que se descarga Q , es decir:

$$Q = C \sqrt{p} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

donde:

C = constante

Entonces, a falta de datos experimentales de la curva característica posterior al punto A, puede asumirse la parábola representada por la ecuación 2.3, la cual pasa por el inicio del sistema de coordenadas y por el punto A.

La presión p con la que abre la válvula puede regularse ajustando la tensión del resorte. A cada presión de apertura le corresponde una curva característica del tipo mostrado en la ilustración 2.10. Se debe señalar que esas curvas características se obtienen experimentalmente por los fabricantes de las válvulas para presiones estáticas. En los transitorios se presentan presiones dinámicas de muy poca duración.

Las válvulas de alivio del tipo más sencillo por lo general no responden inmediatamente a presiones de esa naturaleza, es decir, para abrirse necesitan una presión superior a la mostrada en sus curvas características o se abren un tiempo después de producirse la sobrepresión en la tubería. Esto constituye la principal desventaja de las válvulas de alivio al ser usadas como medio de control de transitorios, ya que si la válvula no reacciona a tiempo, las sobrepresiones se pasarían a otros puntos de la línea por ser muy rápido el transitorio. Existen válvulas de alivio más sofisticadas, especialmente fabricadas para el control de transitorios, en las que, por medio de mecanismos especiales, se asegura su apertura inmediata ante las sobrepresiones del transitorio.

Otros problemas que puede presentar la válvula de alivio son un golpeteo continuo en la válvula y la posibilidad de generar un nuevo transitorio en la conducción, cuando la válvula cierra.

El golpeteo en la válvula se da porque la válvula abre y cierra continuamente, lo que produce pulsos de descarga a través de la misma. La razón del golpeteo es la siguiente: al abrirse bruscamente la válvula y descargar cierto gasto, se genera una depresión momentánea en la válvula, la presión baja y la válvula cierra rápidamente. El cierre rápido genera a su vez una sobrepresión que abre la válvula de nuevo, y así sucesivamente.

El golpeteo se puede evitar utilizando válvulas de alivio especiales construidas con dispositivos que permiten que cierren a una presión inferior a la que abren. Por otra parte, la generación de nuevos transitorios debidos al cierre de la válvula de alivio se puede resolver utilizando válvulas que dispongan de algún tipo de mecanismo de

control para el cierre. En conclusión, de la gran variedad de válvulas de alivio que se ofrecen en el mercado, las adecuadas para el control de transitorios son aquellas que tienen aseguradas una apertura rápida y un cierre lento y suave.

Si en la planta de bombeo se instalan más de una válvula de alivio para evacuar un gasto mayor, estas deberán entrar en funcionamiento de una manera escalonada. Esto se conseguirá ajustando los resortes de una manera progresiva, con el fin de minimizar la depresión a que diera lugar la apertura de estas y la consiguiente introducción de nuevas perturbaciones.

2.3.7. VÁLVULAS ANTICIPADORAS DEL GOLPE DE ARIETE

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

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

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

Existen diversos tipos de válvulas anticipadoras en cuanto a construcción se refiere. La descrip-

ción de las mismas puede encontrarse en los catálogos de los fabricantes.

Si durante todo el transitorio, la presión no llega a bajar hasta el valor en el que está ajustada la válvula anticipadora, esta permanece inactiva.

2.3.8. VÁLVULAS DE ADMISIÓN Y EXPULSIÓN DE AIRE

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

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

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

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

choque violento de las columnas de líquido en la reunificación.

Existen en el mercado una gran variedad de tipos de válvulas de aire con formas diversas. Es importante conocer las diferencias que hay entre uno y otro tipo ya que una elección inadecuada de la válvula de aire puede generar más problemas que los que puede llegar a resolver.

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

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

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

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

- Gran capacidad de admisión de aire en los puntos críticos, para evitar la posible aparición de cavitación
- Baja capacidad de expulsión, para evitar que la bolsa de aire que existe dentro de la conducción se cierre de forma brusca,

ya que esto generaría una sobrepresión de importancia

Como puede verse, el funcionamiento de ambos tipos de válvulas de aire es diferente. Por ello, la incorrecta selección de una válvula de aire (por ejemplo, una válvula de aire de ventilación como elemento de control) puede originar transitorios no esperados.

2.3.9. ADMISIÓN Y RETENCIÓN DE AIRE

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

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

La admisión y retención de aire se puede realizar acoplado a la tubería válvulas especiales de

admisión y retención de aire, o un pedazo de tubo con una válvula de no retorno en su extremo. En la operación normal, la válvula de no retorno se mantiene cerrada por la presión del agua. Al producirse una presión de vacío en la línea, el obturador de la válvula de no retorno se levanta por la presión del aire atmosférico y el aire se introduce a la tubería. Cuando deja de existir la presión de vacío en la línea, el obturador se cierra bajo la acción de su propio peso y retiene el aire. En la ilustración 2.11 se muestra un dispositivo de este tipo, usado en Rusia (Dikarevskii et al., 1981). Si el diámetro de la conducción es menor de 600 mm, el aire puede ser introducido en la parte inferior de la tubería y en este caso el tubo 6 de la ilustración 2.11 no se necesita.

Una vez amortiguado el transitorio hay que evacuar el aire atrapado. Se puede hacer usando válvulas especiales que admiten el aire, pero lo expulsan muy lentamente. Otra posibilidad consiste en instalar cerca de la válvula de admisión y retención otra válvula de expulsión lenta de aire. En la ilustración 2.12 se muestra un arreglo de admisión y retención de aire usado en Francia, compuesto por una válvula de admisión y retención de aire y una válvula de expulsión lenta de aire. Las

dos válvulas las fabrica la compañía francesa Neyrtec (Meunier, 1980).

2.3.10. MEMBRANAS PROTECTORAS O FUSIBLES HIDRÁULICOS

Consisten en discos finos de metal u otro material, que se destruyen en presencia de una determinada presión. Se sitúan en desviaciones de la tubería, en sostenedores especiales después de una válvula de paso constantemente abierta (ilustración 2.13). Ante un peligro de sobrepresiones inadmisibles, la membrana se rompe, parte del líquido se expulsa y la presión se reduce. Posteriormente, la válvula se cierra hasta cambiar la membrana por una nueva.

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

Ilustración 2.11 Dispositivo de admisión y retención de aire usado en Rusia 1 - línea de conducción, 2 - válvula de paso, 3 - válvulas de no retorno, 4 - filtro, 5 - tubo vertical, 6 - tubo que genera presión sobre las válvulas de no retorno

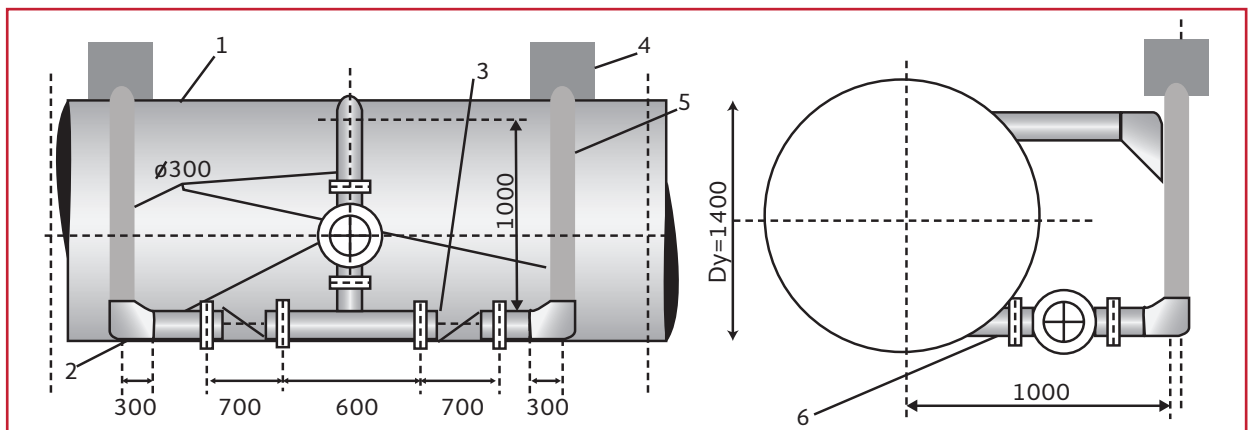
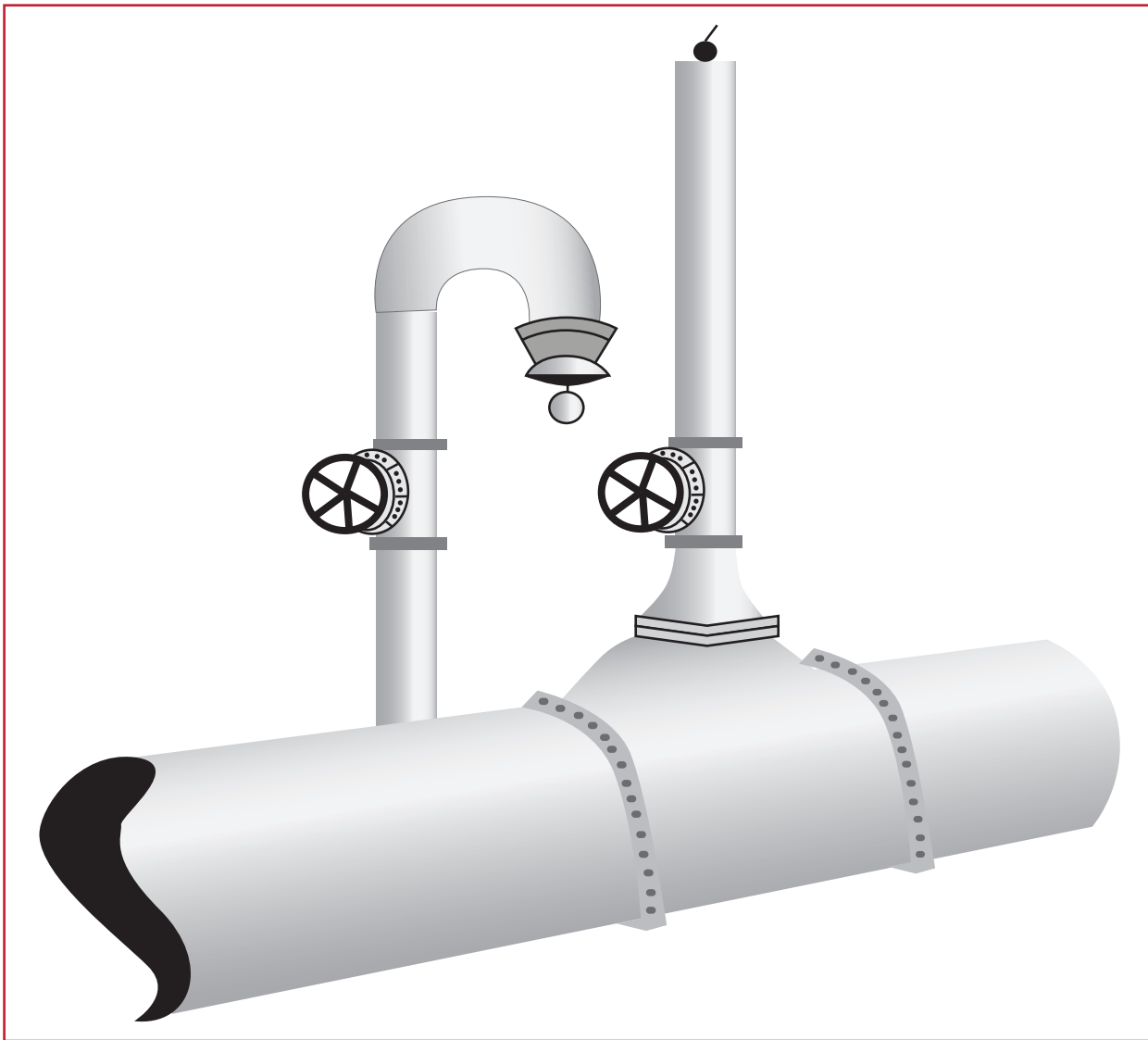


Ilustración 2.12 Arreglo de admisión y retención (expulsión lenta) de aire usado en Francia

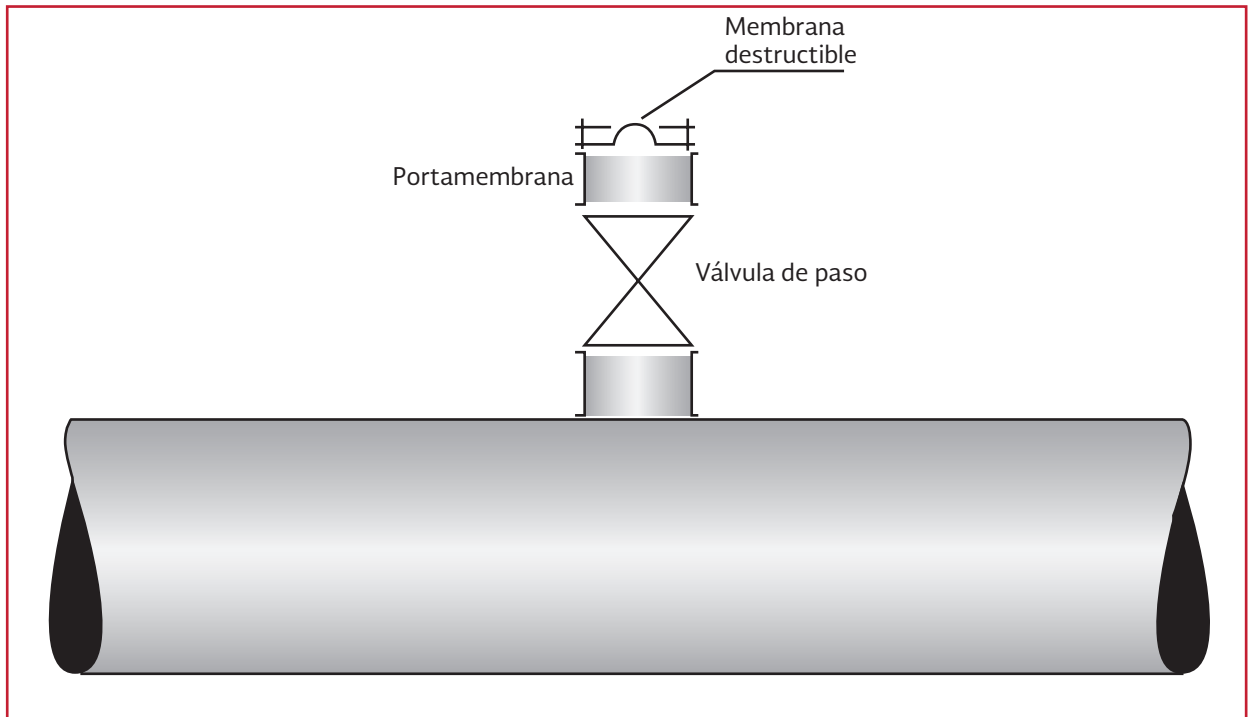


El defecto principal de las membranas protectoras consiste en que después de su accionamiento quedan abiertas y desde la tubería se descarga agua hasta sustituirlas. Esta deficiencia puede ser eliminada con la utilización de dispositivos especiales que aseguren el cierre automático de la válvula de paso posterior a la rotura de la membrana.

2.3.11. ADICIÓN DE UN VOLANTE DE INERCIA AL ÁRBOL DEL EQUIPO DE BOMBEO

Como lo muestra el análisis de la sección 1.6, cuanto más lento sea el paro de los equipos de

Ilustración 2.13 Colocación de una membrana destructible



bombeo, tanto menores son las depresiones y sobrepresiones del transitorio.

Mediante la adición de volantes especiales al árbol del equipo, puede aumentarse la inercia y hacerse más lento el paro. El momento de inercia I de las partes rodantes del equipo de bombeo se expresa mediante su momento volante GD^2 :

$$I = \frac{GD^2}{4g} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

donde:

- I = el momento de inercia
- GD^2 = el momento volante,
- g = 9.81, la aceleración de la gravedad, en m/s^2

Como su forma matemática lo indica, siendo G , peso (*Gewicht* en alemán), y D , diámetro, el momento volante es proporcional al peso y

al cuadrado del diámetro de las partes rodantes. Debido a esto serán más efectivos los volantes que presenten diámetros mayores.

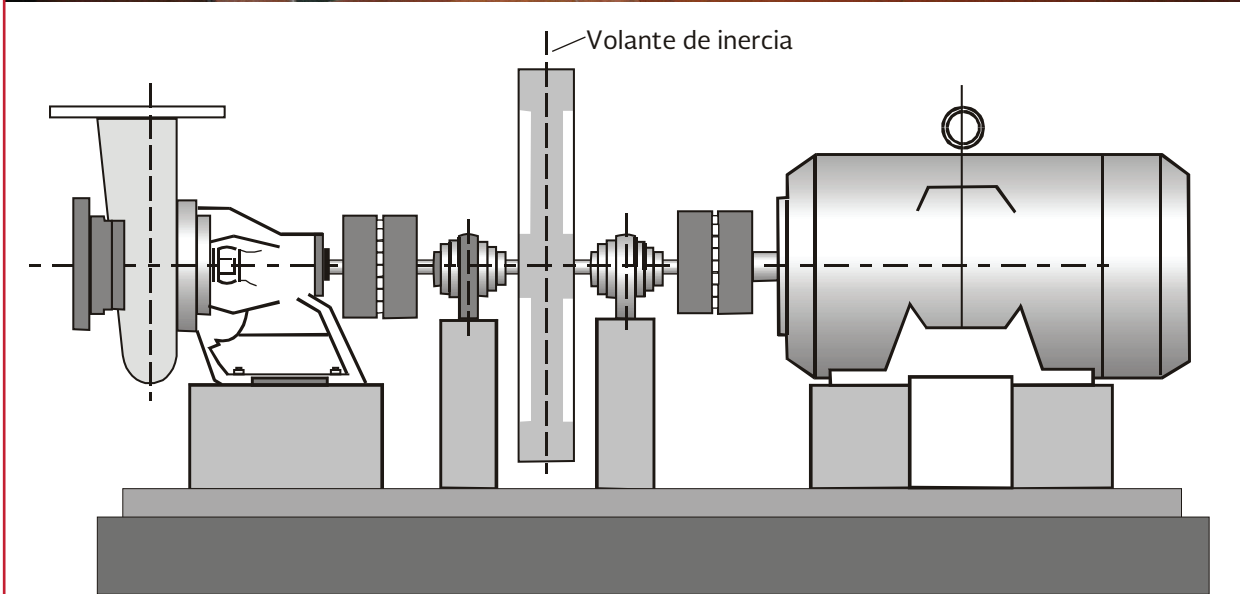
En la literatura norteamericana, en vez de GD^2 se usa la magnitud WR^2 , donde W señala el peso y R el radio. La relación entre los dos es:

$$GD^2 = 4WR^2 \quad \text{Ecuación 2.5}$$

En la ilustración 2.14 se muestra una instalación típica, con un volante de inercia adicional intercalado entre el motor y la bomba. La adición del volante de inercia es siempre posible en bombas de eje horizontal y escasamente viable en grupos en los que el eje de transmisión sea vertical.

La protección antiarriete con un volante puede utilizarse en tramos cortos de tubería, donde se puede lograr un aumento considerable del

Ilustración 2.14 Equipo de bombeo con volante de inercia (<http://www.eoi.es/blogs/merme/page/15/>)



tiempo de paro de las bombas, en comparación con la fase del golpe $2L/a$. En tramos largos, se

hacen necesarios volantes muy grandes, cuya colocación resulta inviable económicamente.

El peso del volante aumenta la fuerza de fricción en los apoyos del árbol y con esto disminuye la eficiencia del equipo de bombeo. Además, las bombas tardan más tiempo en alcanzar las revoluciones nominales después del arranque y se necesita mayor potencia del motor para el arranque.

Probablemente por las causas anteriores, los volantes de inercia no han tenido gran uso. A pesar de todo, con dimensiones aceptables, este medio antiarriete no debe descartarse ya que es sencillo, presenta un funcionamiento seguro y no requiere ningún mantenimiento.

2.3.12. DESCARGA INVERSA DE AGUA EN LAS BOMBAS

Al usar este medio de control, después de invertirse el flujo de agua en el transitorio, se descargan ciertos caudales en sentido inverso por las bombas, lo que reduce las sobrepresiones que se generarían por la detención del flujo inverso con las válvulas de no retorno.

En su forma más sencilla, la descarga inversa podría lograrse mediante una simple eliminación de las válvulas de no retorno de las bombas (ilustración 2.15, a). En ese caso, se tiene una descarga inversa no restringida.

El arranque siguiente de las bombas, después de una descarga inversa no restringida, tendría que producirse con una tubería vacía, puesto que el volumen de agua contenido en la tubería y en su caso en el tanque (según el tipo de descarga) retrocederá hacia la toma, lo que se traduce en un costo adicional para el bombeo repetido de este volumen de agua.

Por estas razones, la descarga inversa no restringida se practica sólo en casos muy especiales.

El flujo en sentido inverso puede generar una rotación de las bombas en sentido contrario, es decir, hacerlas operar como turbinas. El flujo acelerará la rotación hasta que se alcance la velocidad invertida máxima posible, llamada velocidad de embalamiento, después de lo cual la velocidad disminuye (régimen de disipación de energía) hasta que en la tubería se establezca un estado permanente, con flujo y velocidad en sentido contrario al sentido del bombeo.

La rotación invertida de los equipos de bombeo se debe evitar, o al menos limitar, fundamentalmente por dos razones:

1. No todas las bombas y los motores eléctricos están diseñados para resistir una rotación invertida. El giro del conjunto motor-bomba en sentido contrario al normal puede tener consecuencias negativas, tanto para los cojinetes que soportan el eje como para el sistema de escobillas que permite el paso de la corriente al bobinado de rotor. Por otra parte, el problema se agrava cuando, estando desconectado el rotor y el conjunto girando en sentido inverso, se proceda al arranque del grupo, sea manualmente sin haber advertido que este está girando en sentido inverso, sea porque el arranque se efectúe de forma automática. En este caso, se comunica al motor un par de arranque en sentido positivo, que actuará en contra de la rotación del grupo y del efecto del flujo que desciende por la tubería. Las consecuencias derivadas de

este sistema de fuerzas pueden ser desastrosas para el conjunto motor-bomba. El máximo giro contrario al sentido de marcha normal debe ser indicado por el fabricante del motor y de la bomba. Este valor suele ser como máximo de 30 a 40 por ciento de la velocidad de rotación en régimen normal

2. Para un gasto dado, la carga de una bomba centrífuga se incrementa con el cuadrado del incremento de la velocidad de la rotación invertida. Como resultado, con una mayor velocidad invertida de la bomba se producen mayores sobrepresiones en la tubería

Hay dos formas de restringir la rotación invertida:

1. Impedir la inversión de la rotación por medio de frenos mecánicos especiales. El flujo inverso pasará a través de la bomba con el impelente inmóvil. El gasto y la cantidad de agua que se descargan inversamente de esta forma suelen ser de gran magnitud
2. Restringir el flujo inverso, es decir, emplear una descarga inversa restringida

La descarga inversa restringida puede lograrse de diversas maneras. Una posibilidad es el empleo de válvulas de cierre gradual programado, ubicadas a la salida de las bombas (ilustración 2.15e), que comienzan a cerrarse en el momento de la desconexión de la energía eléctrica. El cierre debe producirse con la suficiente lentitud como para controlar las sobrepresiones, pero no demasiado lento para limitar la rotación invertida y el volumen de agua que retrocede. Esta forma se aplica sobre todo en tubería costosa y de diámetro grande.

Una alternativa con esta forma de operación es usar válvulas de no retorno de cierre lento en vez de válvulas de cierre programado (ilustración 2.15, d). El retardo en el cierre se efectúa mediante un sistema de palancas con un contrapeso o utilizando un amortiguador de aceite, dependiendo en gran medida de la fuerza que ejerce el flujo y resultando de este modo menos regulable. Teniendo en cuenta la gran influencia del diagrama de cierre, las válvulas de cierre programado son más confiables, pero más costosas.

Otra solución consiste en una válvula de no retorno y paso lateral (*bypass*) alrededor de la válvula (ilustración 2.15, b) o alrededor de la válvula y la bomba (ilustración 2.15, c). La capacidad de conducción del paso lateral tiene que ser tal, que no permita una velocidad inadmisibles en sentido inverso y que se asegure la reducción necesaria de las sobrepresiones. En el paso lateral se coloca una válvula de paso, que permite regular la capacidad de conducción del paso, misma que se cierra (manual o automáticamente) después de la disipación del transitorio.

2.3.13. INSTALACIÓN DE UN PASO LATERAL (BYPASS) EN LA PLANTA DE BOMBEO

El paso lateral puede ser de utilidad en las plantas en que el grupo motor-bomba dispone de cierto nivel de presión en la succión (ilustración 2.16). Al producirse el fallo de las bombas, la presión comienza a descender aguas abajo de la válvula de no retorno colocada a la salida de las bombas.

Si la presión llega a caer por debajo del nivel de agua en el depósito del cual se alimentan

las bombas, entonces se produce un flujo por el *bypass*, desde el depósito de succión hacia la conducción principal sin pasar por las bombas. Este aporte de caudal realiza una función de control similar a la que haría un tanque unidireccional instalado en dicho punto. En definitiva, se consigue evitar que las depresiones en el tramo inicial aguas abajo de la planta lleguen a ser de importancia.

Por otra parte, es importante la presencia de una válvula de no retorno en el *bypass*, que impida la descarga de la bomba hacia el propio depósito, lo que evita que la máquina funcione en circuito cerrado.

El problema que se presenta en este tipo de instalaciones es que hay que asegurar de alguna forma que la válvula de no retorno del paso lateral, que pudo haber estado una larga temporada sin funcionar, se abra en el instante adecuado.

A fin de garantizar que la válvula abra, se necesita una diferencia de presiones entre el depósito de succión y el punto aguas abajo de las bombas capaz de abrir la válvula de no retorno.

Por otra parte, en este tipo de instalaciones, el mantenimiento de la válvula de no retorno del paso lateral cobra suma importancia.

Ilustración 2.15 Diferentes formas de realizar una descarga inversa de agua en bombeos

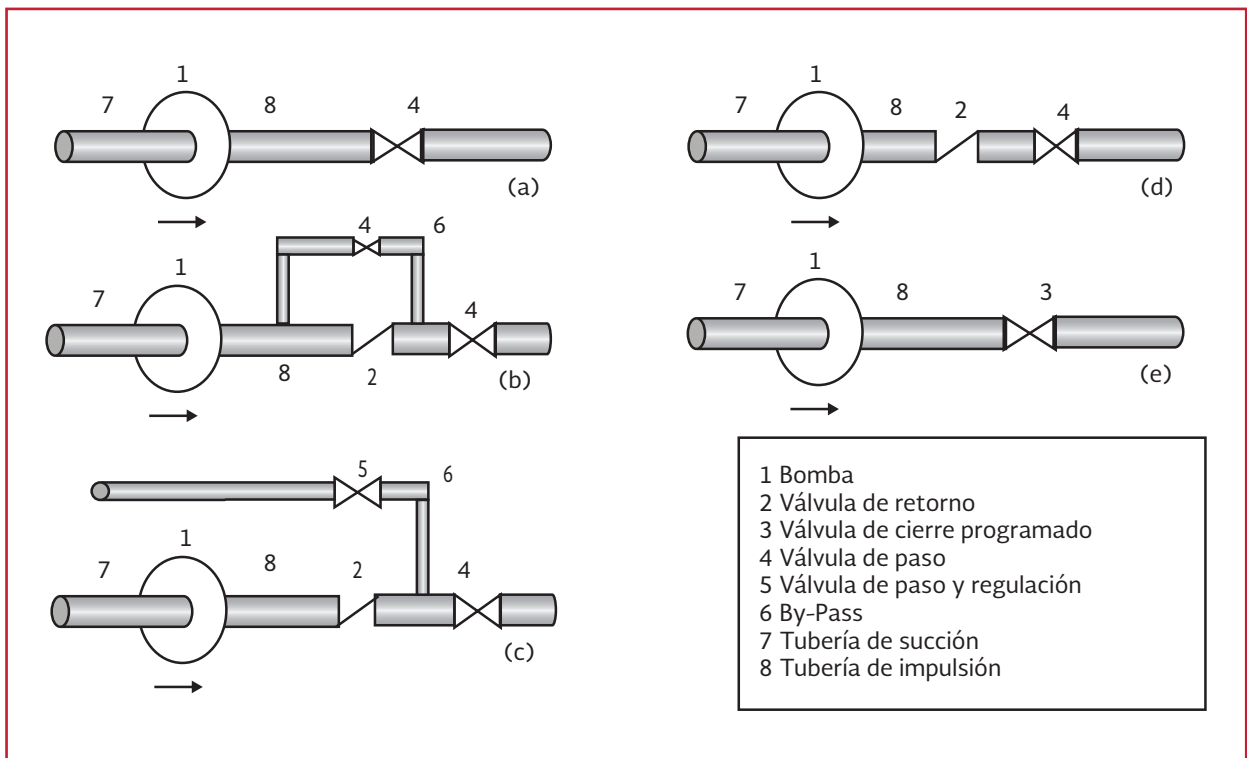
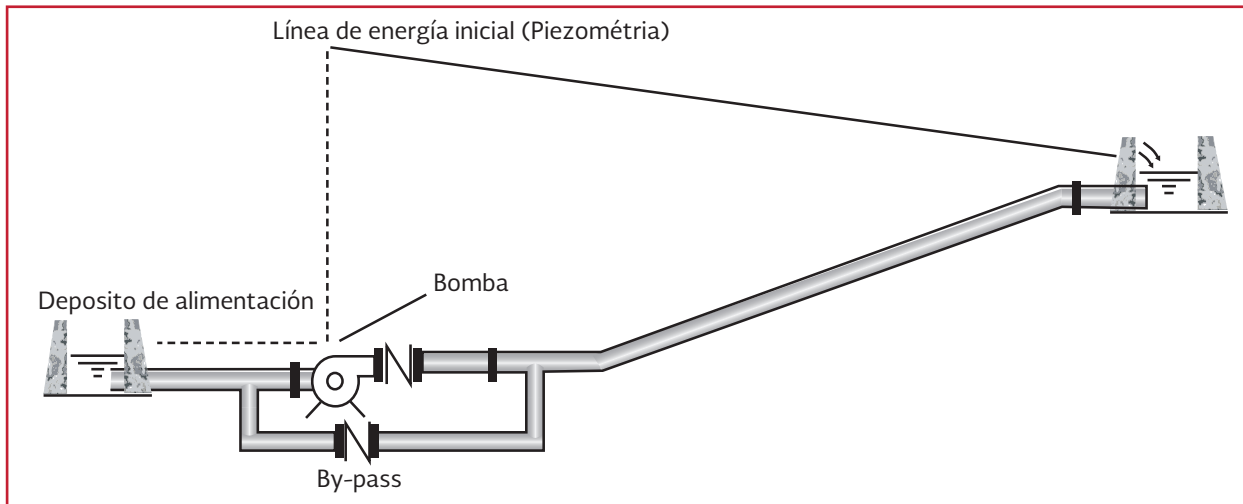


Ilustración 2.16 Paso lateral (bypass) en una planta de bombeo



3

DISEÑO DE LOS MEDIOS DE CONTROL DE TRANSITORIOS

3.1. PROCEDIMIENTO GENERAL

En este apartado se ofrecen orientaciones y recomendaciones que pueden servir a los proyectistas para analizar los transitorios y diseñar la protección de sus conducciones. Se supone que el proyectista cuenta con un programa de simulación de transitorios que puede simular los casos en los que se usan o no diferentes medios de control.

Se insiste en que el diseño de los medios de control de transitorios en los sistemas de cierta envergadura debe apoyarse en una simulación por computadora. Los métodos aproximados que se basan en nomogramas, fórmulas, tablas, etc. pueden usarse solamente en el prediseño para posteriormente hacer una revisión con el programa de simulación.

Recomendaciones:

1. Con la ayuda del programa de computación se realiza un análisis del transitorio en el sistema sin ninguna protección antiarriete. Los resultados de este primer análisis son muy importantes, ya que con ellos se determina la necesidad o no de utilizar medios de protección

en el sistema, revelan los lugares en peligro y sirven como una orientación en la búsqueda posterior de una solución adecuada

2. Dependiendo de los resultados del análisis del caso sin protección y con base en las recomendaciones del presente capítulo, se selecciona un medio de control
3. Se determinan las dimensiones del medio antiarriete. El proyectista puede definir las guiándose por las orientaciones del presente capítulo o teniendo en cuenta otras consideraciones, como: su experiencia, los criterios de prediseño, la disponibilidad de los medios antiarriete, etcétera
4. Se efectúa un análisis de los transitorios con el medio de control elegido utilizando el programa de computación. Con los resultados se presentan una de las dos posibilidades siguientes:
 - a. La protección resuelve todos los problemas. En este caso se efectúan nuevos análisis con dimensiones reducidas de los medios antiarriete con la idea de buscar una solución más económica. Como solución válida se elegirá aquella solución que requiera los medios antiarriete de costo mínimo

- b. La protección no resuelve los problemas. En este caso se realizan nuevos análisis del fenómeno aumentando las dimensiones o las cantidades de los medios antiarriete. Si se logra obtener una solución que resuelva los problemas con medios antiarriete aceptables, es decir, no demasiado caros y constructivamente razonables, esta solución se acepta como válida. En el caso contrario, la forma de protección asumida se descarta y se pasa al siguiente punto
5. Se analiza el uso de formas de protección que alternen con la ya estudiada y se repite el mismo procedimiento de los puntos 3 y 4
 6. Se escoge la variante definitiva después de una comparación entre las alternativas estudiadas teniendo en cuenta las consideraciones económicas, constructivas, de seguridad, entre otras. En la comparación debe incluirse también la variante de utilizar tubería y equipos con una resistencia mayor (de una clase superior), que resistan todos los efectos de los transitorios, en vez de incluir en el estudio los medios de control

3.2. CRITERIOS DE RESISTENCIA

Para la aplicación del procedimiento del apartado anterior, es necesario conocer si los conductos de un sistema de tubería determinado pueden resistir o no las sobrepresiones y depresiones y si una bomba determinada puede resistir a una cierta velocidad de rotación.

3.2.1. RESISTENCIA A LAS SOBREPRESIONES

Los fabricantes de tuberías ofrecen cuando menos dos datos relativos a la resistencia de sus productos a presión interna. Éstos son la llamada "clase" del producto que define para presiones de operación debe ser usada la tubería, y la presión de prueba del producto en la fábrica, que es una presión más alta que el producto soporta sin dañarse. La presión de prueba normalmente es varias veces mayor que la clase del producto (por lo general 2, 3 ó 4 veces según el material de la tubería y las normas correspondientes). La relación entre la presión de prueba y la clase de la tubería representa el factor de seguridad del producto, llamado también factor de servicio en la terminología que utilizan los fabricantes de tubos.

Dado que la presión de prueba de las tuberías (en fábrica) es mucho mayor que su clase, algunos diseñadores pueden pensar que es suficiente seleccionar la clase de la tubería para cubrir las presiones de operación normal solamente, y diseñar la protección antiarriete de forma tal que se admitan en los transitorios presiones mayores a la clase de los tubos pero sin exceder su presión de prueba en fábrica. Eso es incorrecto. La prueba de presión se ejecuta en la fábrica en condiciones ideales: con tubos nuevos, presiones hidrostáticas, para una temperatura dada, en un tiempo corto (comparado con la vida útil de las conducciones) y sin carga exterior alguna aplicada sobre el tubo. Las tuberías en operación reales, aun cuando son nuevas pasan un proceso de transporte desde la fábrica e instalación en zanja que pueden afectar en alguna medida sus propiedades.

Una vez instaladas tienen cargas externas por tierra y pueden tener carga viva por el tráfico vehicular encima de ellas, cuya magnitud máxima es difícil de estimar. Las propiedades de algunas tuberías, especialmente de las de plástico, varían considerablemente con la temperatura a que se encuentran expuestas; y la temperatura a que operan las tuberías reales es en general variable. La vida útil de las líneas de conducción es bastante larga (hasta 20 años y más), y durante este tiempo las propiedades de la tubería pueden cambiar en alguna medida debido a fatiga del material, ataque de agentes químicos contenidos en el agua, y otros efectos de largo plazo.

El factor de seguridad de las tuberías nuevas (la diferencia entre la clase y la presión de prueba) protege contra todos esos factores, cuya magnitud exacta generalmente es imposible de obtener. Por otro lado, la presión máxima que se presenta en los transitorios normalmente es de poca duración, dando razón a manejar un coeficiente de seguridad menor para las condiciones transitorias, comparado con el coeficiente de seguridad para operación normal. Para algunos de los materiales de tubería el valor de este coeficiente, o la respectiva presión admisible en condiciones transitorias, se establecen en las normas y manuales de diseño correspondientes. Para tuberías de acero, por ejemplo, la norma de diseño norteamericana AWWA C-200 establece que el esfuerzo de diseño admisible con presión transitoria es 1.5 veces mayor que el esfuerzo de diseño para la operación normal. Para tuberías de polietileno, la presión máxima admisible en condiciones transitorias es 1.5 veces mayor que la presión máxima en operación normal definida por la clase del producto. Para las tuberías de PVC, de acuerdo con la norma de diseño norteamericana AWWA C-905, se manejan dos pre-

siones máximas para cada clase de tubería: una para la presión en operación normal (llamada de largo plazo) y otra para la presión transitoria (llamada de corto plazo).

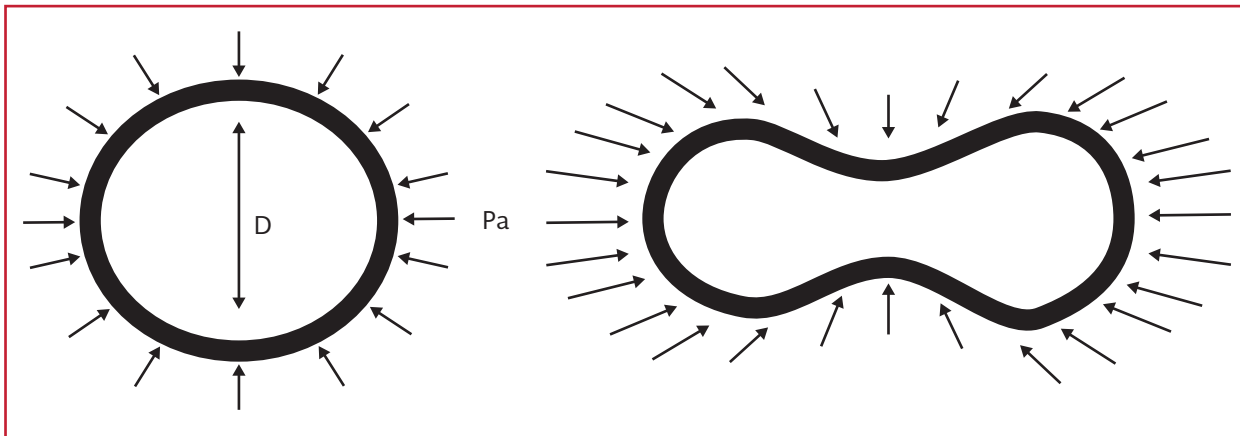
Para los materiales de tubería para los cuales en las normas de diseño correspondientes no se indica un coeficiente de seguridad específico para la presión en transitorios sería arriesgado entonces admitir en la tubería presiones en el transitorio que superan la clase de la tubería, ya que eso reduciría su factor de seguridad, y la recomendación es considerar que la tubería es segura con respecto a presión interna cuando la presión máxima en el transitorio (presión de operación normal más sobrepresión transitoria) se encuentra dentro de la presión que define la clase de la tubería y sus accesorios (como válvulas y otros)

Una vez diseñada la protección antiarriete, se recomienda también revisar si las presiones máximas que se producen en los transitorios sin protección alguna, se encuentran por debajo de la presión de prueba de la tubería en fábrica, para tener una última seguridad de que la línea resistirá aun cuando la protección antiarriete no funcione por alguna falla; esta vez sin tener el factor de seguridad habitual.

3.2.2. RESISTENCIA A LAS PRESIONES NEGATIVAS

Al presentarse una presión negativa (presión de vacío) dentro de una tubería expuesta en su exterior al aire atmosférico, la tubería se ve sometida a una presión externa aplicada radialmente a su periferia, que tiende a aplastarla (colapsarla). Los fabricantes de tubería generalmente no prueban sus productos en esas

Ilustración 3.1 Tubería en depresión y colapsada



condiciones. Por esta razón, serán muy raras las veces en que a los diseñadores se les suministren datos precisos en cuanto a la resistencia de una tubería determinada frente al colapso por presiones de vacío y, por lo general, la misma deberá determinarse por cálculos estructurales.

El colapso de una tubería es una consecuencia de la pérdida de estabilidad de su sección transversal. Un sistema elástico es estable cuando mantiene su forma bajo la presión de las fuerzas exteriores aplicadas F . Existe un valor límite o crítico F_{cr} de estas fuerzas, de modo que cuando $F < F_{cr}$, el sistema es estable. Cuando $F > F_{cr}$, el sistema pasa a ser inestable, es decir, cambia su forma o pierde su estabilidad.

Al producirse un vacío en la tubería, sobre ella actúan las fuerzas de la forma mostrada en la ilustración 3.1. La presión crítica p_{cr} para este caso se presenta en la ecuación 3.1 (ver, por ejemplo, Kiseliiov, 1972):

$$p_{cr} = \frac{24EI}{bD^3} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

donde:

E = módulo de elasticidad del material del tubo

I = momento de inercia de la pared del tubo
 b = longitud del tubo
 D = diámetro

Teniendo en cuenta que la longitud de una tubería es mucho mayor que su diámetro, se considera sólo un metro lineal de longitud ($b = 1$). En este caso, el módulo de elasticidad E se divide entre $(1 - \mu^2)$ para considerar las tensiones longitudinales, donde μ es el coeficiente de Poisson.

El momento de inercia centroidal, con respecto a su eje longitudinal, de un rectángulo de 1 m de longitud y espesor δ , es:

$$I = \frac{\delta^3}{12} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Sustituyendo en la ecuación 3.1 resulta:

$$p_{cr} = \frac{2E}{1 - \mu^2} \left(\frac{\delta}{D}\right)^3 \quad \text{Ecuación 3.3}$$

De la ecuación 3.3 se puede despejar el espesor que asegura el no colapso de la tubería:

$$\delta \geq D \left[\frac{p(1 - \mu^2)K}{2E} \right]^{1/3} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

donde:

- p = diferencia entre las presiones actuantes dentro y fuera del tubo
 K = factor de seguridad

Para un tubo de acero $\mu = 0.3$ y $E = 2.059 \times 10^5$ MPa (2.1×10^6 kg/cm²) y al asumir un vacío completo dentro de la tubería, es decir, $p = 0.098$ MPa (1 kg/cm²) y un factor de seguridad $K = 2$, de la ecuación 3.4 resulta que:

$$\delta \geq \frac{D}{130} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Para tubos de otros materiales de tubería:

$$\delta_{cr} = \frac{D}{C} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

$$C = \left[\frac{2E}{p(1 - \mu^2)K} \right]^{1/3}$$

En la tabla 3.1 se muestran los valores del coeficiente C para varios materiales que se utilizan en México, calculados con un factor de seguridad $K = 2$.

El resultado que da la ecuación 3.6 es el espesor crítico δ_{cr} , es decir, si el espesor del tubo δ es menor que δ_{cr} , existe peligro de aplastamiento, si es mayor, no existe peligro.

Tabla 3.1 Constante para el cálculo del espesor crítico en diferentes materiales

Material del tubo	Constante C
acero	130
hierro dúctil	122
fibró cemento	64
PVC	33
polietileno de alta densidad	22

En todo caso, los valores de la tabla 3.1 no son definitivos y sirven para una primera orientación. El ingeniero diseñador puede calcular solo el coeficiente C de la ecuación 3.4 con las características del material que se proporcionan en los catálogos de los fabricantes de tubería, usando también otro coeficiente de seguridad K que él estime necesario.

Claramente, el colapso es posible en el caso de tubería de diámetros grandes y espesores pequeños, como la tubería de lámina de acero de plantas de bombeo de gran caudal o tubería plástica de una clase baja. Para los tubos de concreto y fibro cemento, que se caracterizan por espesores relativamente grandes, el vacío no suele representar un peligro de aplastamiento.

La ecuación 3.4, la ecuación 3.6 y la tabla 3.1 son válidas para una tubería que se encuentre expuesta a la presión atmosférica directamente. Si la tubería está enterrada, entran en acción los siguientes factores:

- El peso de la tierra encima de la tubería que se traduce en una presión externa adicional a la presión atmosférica
- La tierra compactada alrededor del tubo da una rigidez adicional a su sección transversal

Estos dos factores podrían ser considerados en un modelo estructural más complejo en que intervendrían el peso volumétrico del suelo y su módulo de elasticidad, pero en la práctica eso normalmente no es necesario. Afortunadamente, el efecto de la rigidez adicional que le da el suelo al tubo es mucho mayor que el efecto del peso de la tierra encima. De esta manera, si los cálculos muestran que el tubo solamente expuesto al aire resiste el colapso, lo resistirá también enterrado y con un coeficiente de seguridad mayor.

En esta relación, la norma norteamericana de diseño de conducciones ANSI/AWWA C900-89 dice literalmente en su sección A.7.3. (traducción del autor de este libro):

“De acuerdo con los experimentos conducidos en la Universidad del Estado de Utah, la presión negativa (vacío) no puede aplastar una tubería plástica enterrada que se encuentra adecuadamente cubierta y expuesta a las temperaturas normales de servicio”.

3.2.3. RESISTENCIA A LA SOBREVOLUCIDAD (SOBREROTACIÓN) DE LAS MÁQUINAS HIDRÁULICAS

Ver la sección 2.3 en donde también se aborda este tema. Las revoluciones máximas que se le puede permitir a una bomba con rotación en sentido directo o inverso es un dato que debe ser suministrado por el fabricante. Para la mayoría de las bombas no se permite una rotación considerable en sentido inverso.

El límite suele ser como máximo de 30 a 40 por ciento de la velocidad de rotación en

régimen normal, aunque existen bombas especialmente construidas para permitir sin daño alguno una rotación inversa de 1.5 a 2 veces las revoluciones nominales en el sentido normal.

Si no se tienen datos sobre la velocidad permisible de una bomba, la rotación inversa debe limitarse. Experimentos efectuados en la extinta URSS muestran que si el gasto que se descarga inversamente por la bomba no sobrepasa 20 por ciento del gasto en el sentido normal, la bomba no llega a girar en el sentido inverso o, si llega a girar, su giro es insignificante.

3.2.4. RESUMEN DE LOS CRITERIOS DE RESISTENCIA

1. La presión máxima admisible, incluyendo la presión transitoria, debe suponerse igual a la establecida por la calidad de la tubería
2. La presión mínima admisible debe determinarse para cada caso concreto, según el material, el diámetro y el espesor de la tubería. En caso de no poderse determinar, el vacío se debe evitar
3. Las velocidades admisibles de rotación de las máquinas hidráulicas en sentido inverso deben ser suministradas por sus fabricantes. En ausencia de datos exactos, la velocidad de rotación admisible en sentido inverso será de 40 por ciento de la velocidad de rotación en el sentido normal, y el gasto de la bomba en el sentido inverso no deberá exceder 20 por ciento del gasto nominal en el sentido normal

3.3. CONDUCCIONES POR BOMBEO

3.3.1. CONDICIONES DE OPERACIÓN MÁS DESFAVORABLES EN CUANTO A LOS TRANSITORIOS

Los niveles de agua en los tanques de toma y de descarga de una conducción normalmente están sujetos a cierta variación, lo que hace que las bombas lleguen a operar con diferentes cargas estáticas de bombeo. Si en la planta de bombeo se tienen varias bombas, en un momento dado pueden estar operando una o varias de ellas. Las condiciones de operación se caracterizan entonces por dos parámetros: la carga estática H_g y la cantidad de bombas en operación N_b . Para garantizar la seguridad de la conducción, el análisis de transitorios debe considerar las condiciones de operación más adversas. Como un punto de partida para definir esas condiciones se puede utilizar la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Condiciones más adversas de operación de una conducción por bombeo

	Número de bombas	Carga estática H_g
Sobrepresión	N_b	$H_{g,máx}$
Depresión	N_b	$H_{g,mín}$
Sobrerotación	1	$H_{g,máx}$

Esto se explica de la manera siguiente:

Cuanto más grande sea la carga estática H_g , mayor será la velocidad del flujo inverso y, con esto, mayor la presión máxima.

Si operan con una carga estática menor, las bombas descargan mayor gasto, y mayor es la velocidad en la tubería y mayores las depresiones, después de la interrupción del bombeo. Esto,

sumado al hecho de que con cargas estáticas menores serán más pequeñas las cargas en la tubería antes de ocurrir el transitorio, lleva a afirmar que las depresiones máximas se obtienen con todas las bombas trabajando y con la $H_{g,mín}$, como se observa en la segunda fila de la tabla.

La severidad del transitorio depende directamente de la velocidad del agua en la tubería; por eso será más desfavorable que operen todas las bombas, puesto que, en este caso, circula más gasto por la tubería.

Si el paro se produce cuando se encuentra en operación una sola bomba, todo el flujo inverso (en el transitorio) se dirigirá hacia esa sola bomba y provocará una mayor rotación inversa de la bomba, pues el flujo inverso no se reparte entre varias bombas. Esto se muestra en la última fila de la tabla 3.2.

3.3.2. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Se analiza primero el transitorio sin dispositivos de control en la conducción. Pueden obtenerse cuatro resultados:

1. Las presiones máximas que se producen en el transitorio no exceden los esfuerzos admisibles en el material de la tubería y no hay presiones negativas (vacíos). No se necesitan dispositivos de control en este caso y el análisis concluye
2. Las presiones máximas que se producen en el transitorio no exceden los esfuerzos admisibles en el material de la tubería, pero hay presiones negativas (vacíos). Lo primero que se debe hacer en este caso es verificar si el vacío puede afectar la tubería, según el material de los tubos y el tipo de juntas. Si los vacíos no resul-

tan peligrosos, el análisis concluye. Si los vacíos indican problemas, se analiza el transitorio con alguno de los medios de control que se presentan más adelante en la sección 3.3.4. Varias corridas del programa con diferentes medios pueden ser necesarias para determinar el medio más adecuado para el caso

3. Las presiones máximas que se producen en el transitorio exceden la resistencia de los tubos. No hay presiones negativas. Los medios que se emplean en este caso se presentan en la sección 3.3.3. Varias corridas del programa con diferentes medios pueden ser necesarias para determinar el medio de control más adecuado para el caso
4. Las presiones máximas que se producen en el transitorio exceden la resistencia de los tubos y hay presiones negativas peligrosas. La cámara de aire es una solución universal para este caso. En principio, la cámara de aire es la solución también en los casos 2 y 3, pero es más cara y requiere mayor mantenimiento, por lo que no se usa mucho en esos dos casos.

Otros medios posibles se comentan en la siguiente sección

3.3.3. CUANDO EN LA TUBERÍA NO SE PRODUCEN VACÍOS

3.3.3.1. Generalidades

Como expone el análisis en la sección 1.6.1, en este caso la sobrepresión máxima se produce en el inicio de la tubería como consecuencia de la detención brusca del flujo inverso por las válvulas de no retorno. Por esa razón, los medios antiarriete se colocan en el mismo lugar (en la planta de bombeo) y tienen el objeto de descargar cierto gasto en la fase de sobrepresión. Esto puede lograrse con una descarga inversa del agua a través de las bombas, mediante válvulas de alivio o válvulas anticipadoras.

La protección se puede lograr también con medios antiarriete que reducen tanto las depresiones al inicio del proceso, como las sobrepresiones subsiguientes. Estos medios son la cámara de aire, la torre de oscilación y el volante de inercia.

Ilustración 3.2 Líneas piezométricas con un flujo inverso, 1) Con un diámetro menor del bypass. 2) Con un diámetro mayor del bypass

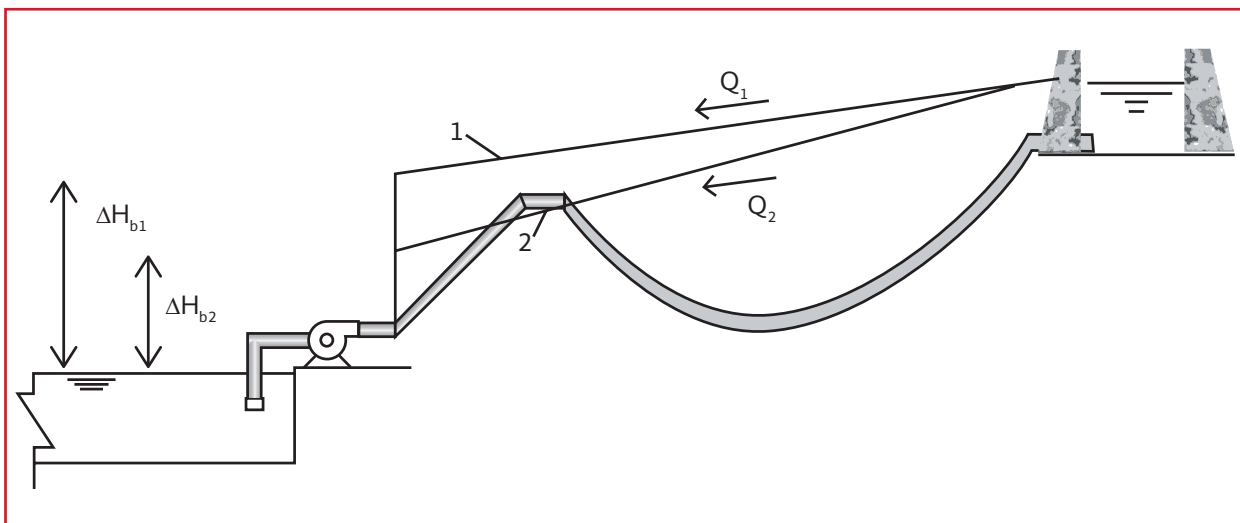
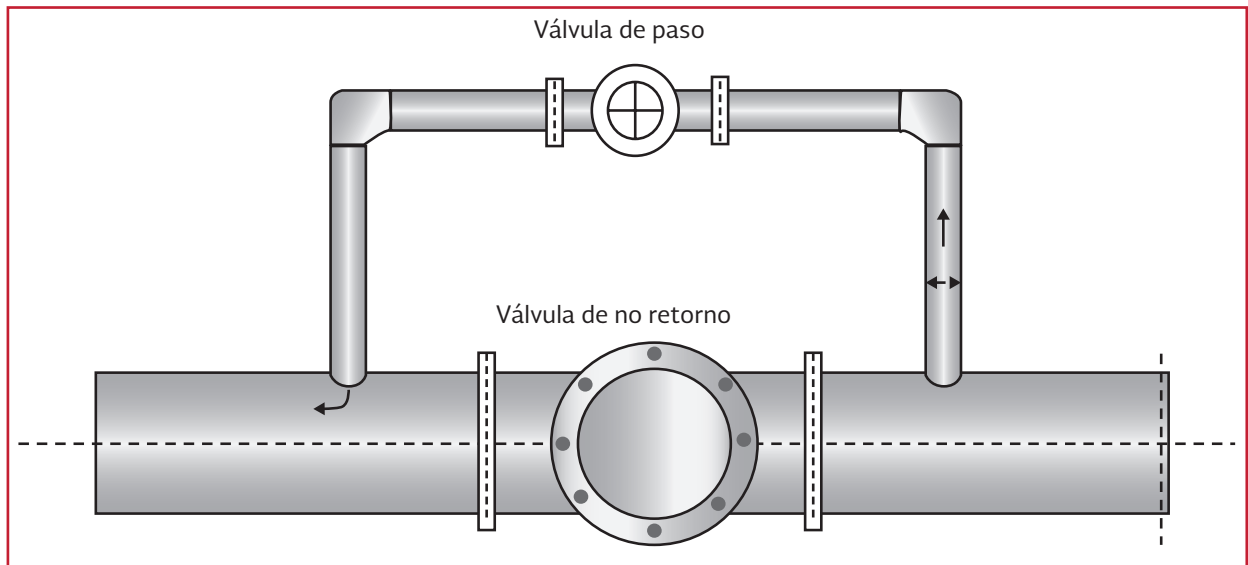


Ilustración 3.3 Bypass en una válvula de no retorno



Otra posibilidad para este caso es la ubicación de válvulas de no retorno en uno o más puntos intermedios de la tubería. De esta forma, se detienen las ondas de sobrepresión reflejadas desde el tanque, antes de llegar al inicio de la tubería, y se producen sobrepresiones menores.

Los medios antiarriete como los tanques unidireccionales y las válvulas de aire que actúan cuando la presión en la tubería tiende a descender por debajo de la presión atmosférica, no pueden utilizarse para este caso.

3.3.3.2. Protección usando paso lateral (*bypass*) en las válvulas de no retorno

El único parámetro que hay que determinar en este caso es el diámetro del tubo del paso lateral. Este diámetro debe determinarse atendiendo a las siguientes condiciones:

- Reducir la presión máxima $p_{m\acute{a}x}$ del transitorio hasta un valor admisible p_{adm}
- Que no se produzcan vacíos en la tube-

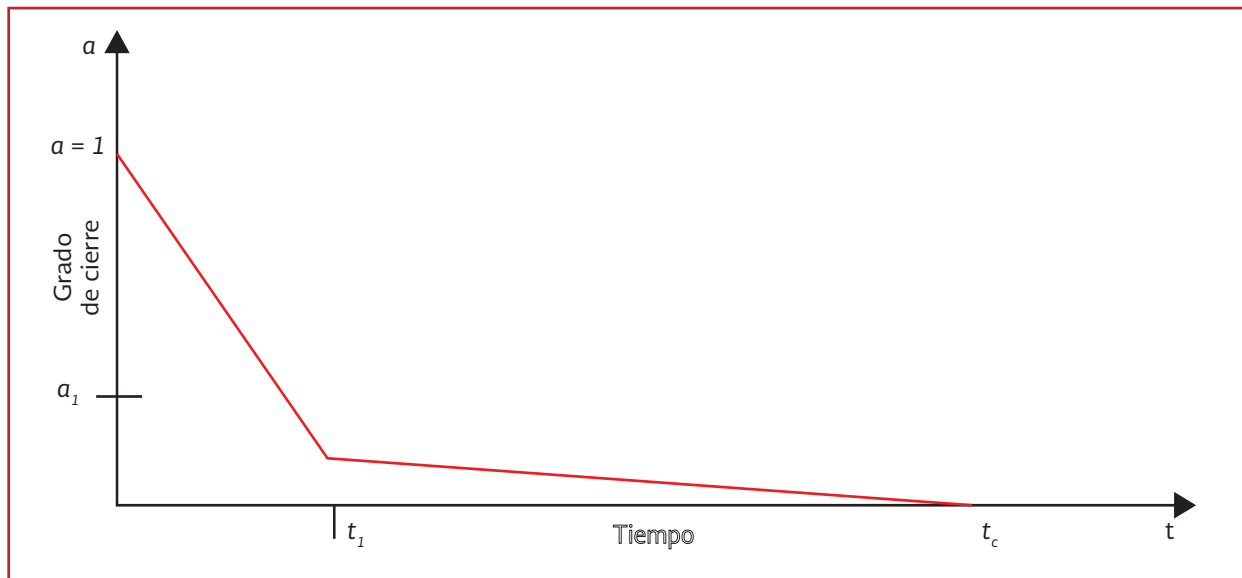
ría como producto de un gasto inverso demasiado grande. La ilustración 3.2 muestra esta situación. Con un diámetro mayor del *by-pass*, es posible que la línea piezométrica del flujo inverso corte el perfil del terreno (línea 2), lo cual genera vacíos. Con un diámetro menor, la línea piezométrica ocupa una posición más alta (línea 1) y los vacíos se evitan

- No permitir una excesiva rotación inversa de las bombas
- No descargar inversamente grandes cantidades de agua por el costo adicional de un bombeo repetido

La primera de estas cuatro condiciones exige que el diámetro sea el mayor posible, mientras que las otras tres requieren lo contrario. Como es lógico suponer, existe un valor óptimo de dicho diámetro, el cual se puede determinar efectuando varias corridas del programa con diferentes diámetros.

Está comprobado experimentalmente (Dikarevskii et al., 1981) que con velocidades muy altas (entre 10 m/s y 12 m/s) del flujo en el paso la-

Ilustración 3.4 Diagrama de cierre en dos etapas



teral, es posible que surjan fenómenos de cavitación con un brusco descenso de su capacidad de conducción. El diámetro del paso lateral debe seleccionarse de forma tal que no se produzcan velocidades tan altas.

3.3.3.3. Descarga inversa con válvulas de cierre programado

Lo esencial en el diseño de esta forma de control de transitorios es determinar el diagrama (la ley) de cierre, de forma tal que se limiten las sobrepresiones en la tubería sin descargar inversamente grandes volúmenes de agua y sin alcanzar una rotación inversa inadmisibles en las bombas. En la gran mayoría de casos resulta conveniente un cierre en dos (o más) etapas (ilustración 3.4), que se define a partir de tres parámetros, al menos:

- El momento del cambio en la velocidad de cierre t_1
- El grado de cierre en este momento
- El tiempo total de cierre t_c

Estos parámetros se determinan haciendo lo siguiente: se les da un valor, se corre el programa de simulación, se va variando los valores de acuerdo con los resultados obtenidos y se vuelve a correr el programa hasta obtener una solución adecuada. Para definir el diagrama de cierre inicial con el cual comienzan las pruebas, son útiles las siguientes observaciones:

- El tiempo t_1 debe ser aproximadamente igual al tiempo en que el flujo se invierte. Para determinar este tiempo se realiza una simulación sin medios de control. Los resultados de esta simulación indican el tiempo en que cierran las válvulas unidireccionales y con esto t_1
- El grado de cierre a_1 debe coincidir aproximadamente con el inicio de la parte efectiva del cierre de la válvula. El grado de cierre puede ser tomado de su curva de pérdidas de carga contra el grado de cierre, como el punto a partir del cual crece significativamente el coeficiente de pérdidas K de la válvula de cierre

El programa se corre con el diagrama de cierre determinado de esta forma. Debido a las aproximaciones hechas al suponer el diagrama de cierre inicial, es posible que los resultados no sean aceptables. Las posibilidades son:

1. Los resultados muestran vacíos en puntos intermedios de la tubería. En este caso, hay que determinar primero, de los resultados intermedios de la simulación, si los vacíos se producen antes o después del momento en que cambia el sentido del flujo

Los vacíos se producen antes de este momento cuando el cierre es demasiado rápido en su parte inicial e interrumpe el gasto bombeado. En este caso hay que aumentar t_1 , a_1 , o ambos

Los vacíos se producen después del cambio de la inversión del flujo cuando se produce un gasto inverso demasiado grande, por lo que la línea piezométrica cruza el nivel del terreno. En este caso hay que disminuir t_1 o a_1 , o hacer ambas modificaciones, o si la presión máxima lo permite, disminuir también el tiempo de cierre t_c

2. La presión máxima sobrepasa la admisible. Esto puede suceder por dos razones:
 - a. La segunda parte del cierre, comprendida en el intervalo (t_1, t_c) , es demasiado rápida. En este caso hay que aumentar el tiempo t_c
 - b. La segunda parte del cierre es demasiado lenta. Se produce un flujo inverso grande, que luego, al detenerse, produce una presión alta.

En este caso, hay que disminuir t_1 y t_c a la vez, o uno de ellos

3. Se obtienen velocidades demasiado elevadas en la rotación en sentido inverso de las máquinas. En este caso, hay que disminuir el gasto del flujo inverso, lo que se puede lograr disminuyendo t_c , t_1 y a_1 , o alguno de ellos
4. Se cumplen todas las condiciones en cuanto a la resistencia, pero la cantidad de agua que hay que descargar inversamente es muy grande. Las modificaciones necesarias son como las señaladas en el punto 3

Al examinar la descarga inversa como medio antiarriete, hay que tomar en cuenta los costos por concepto de energía eléctrica consumida en el bombeo repetido del volumen de agua que retrocede. Estos costos se suman a los ocasionados por los dispositivos como el *bypass* o las válvulas de cierre programado.

3.3.3.4. Uso de válvulas de alivio

Para poder analizar la protección de la red con válvulas de alivio, el proyectista tiene que disponer de sus curvas características. Las válvulas se pueden calibrar para que abran a diferentes presiones p_o , con lo que sus curvas características se trasladan paralelamente una a otra.

Las válvulas de alivio se instalan cerca de la planta de bombeo. La tarea del proyectista consiste en seleccionar el tipo de válvula adecuada, la cantidad y la presión de apertura p_o , atendiendo a las siguientes condiciones:

- La presión máxima del golpe de ariete no debe sobrepasar la presión admisible p_{adm}
- La presión de apertura p_o debe ser de tal magnitud, que la válvula no descargue agua en operación normal del sistema, es decir, p_o tiene que ser superior a todas las posibles presiones en condiciones de operación en régimen permanente

Para hacer una selección preliminar se puede utilizar el siguiente procedimiento:

1. Del análisis del transitorio sin medios de control se toma el valor de $p_{m\acute{a}x}$
2. Se determina la presión máxima admisible p_{adm}
3. Se calcula la reducción necesaria de la presión con la siguiente ecuación:

$$\Delta p_{red} = p_{m\acute{a}x} - p_{adm} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

4. Con la fórmula de Zhukovski (ecuación 1.4) se calcula el gasto que las válvulas necesitan descargar para reducir la presión una cantidad Δp_{red} :

$$Q_{va} = \frac{\Delta p_{red} A_t}{a} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

donde A_t representa el área de la sección transversal de la tubería

5. En los catálogos de los fabricantes se busca(n) la(s) válvula(s) que puede(n) dar el gasto Q_{va} con la presión de descarga Δp_{red}

Con el tipo y la cantidad de válvulas seleccionadas, se realiza una corrida del programa de simulación y a partir de sus resultados se determina si son necesarias más modificaciones.

3.3.3.5. Incremento de la inercia de las masas rodantes

Esta forma de protección es la más fácil de simular, ya que para probar distintas variantes basta con cambiar el valor de GD^2 del equipo motor - bomba en los datos de entrada y correr el programa. Para lograr un efecto apreciable sobre las presiones máximas y mínimas, el valor de GD^2 debe ser tal que dé como resultado un tiempo de paro de las bombas t_p considerablemente mayor que $2L/a$.

Se realizan varias corridas con el programa, incrementando en cada una de ellas GD^2 en los datos de entrada y empezando con el GD^2 propio del equipo hasta obtener el valor mínimo de GD^2 con el cual se controla el transitorio. La diferencia entre este valor y el GD^2 del equipo de bombeo da el GD^2 del volante de inercia que hay que adicionar.

Stephenson (1981) proporciona una expresión sencilla para saber si el momento de inercia de las masas rodantes tiene algún efecto en el control de golpe de ariete por el paro de bombas en una instalación determinada. Esta expresión es:

$$\frac{IN^2}{\rho ALH_o^2} \Rightarrow 0.01 (r/min)^2 \quad \text{Ecuación 3.9}$$

donde:

- N = velocidad de rotación nominal en r/min
- ρ = densidad del agua en kg/m^3
- A = área de la sección transversal de la tubería en m^2
- L = longitud de la tubería en m
- H_o = carga de bombeo en operación normal en m
- $I=WR^2$ = momento de inercia en N m

La condición (3.9) fue deducida con la hipótesis de que a/g es del orden de 100 s. En los casos en que se cumpla, la inercia de las masas rodantes limita el efecto del golpe de ariete en un valor cercano a 10 por ciento.

En la bibliografía sobre transitorios hidráulicos se encuentran expresiones que permiten calcular aproximadamente el momento de inercia del conjunto motor-bomba, o del motor solamente, en función de la potencia y de la velocidad de rotación. Una de ellas es la fórmula de Linton:

$$WR^2(kg \cdot m^2) = 150 \left[\frac{P(HP)}{N(r/min)} \right]^{1.435}$$

Ecuación 3.10

Esta fórmula data de 1960 y se ajustó a partir de motores situados en el intervalo de 120 a 1500 kW y con velocidades de rotación comprendidas entre 450 y 1900 r/min. No se recomienda actualmente su uso, ya que la construcción de motores en aquella época era más robusta y la fórmula da resultados con inercia mayor que las reales para los motores modernos.

Otra fórmula conocida para obtener la inercia del motor eléctrico es la del *Bureau of Reclamation*, Denver, Estados Unidos (1975):

$$WR^2 = 0.0045 P^{1.38} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

$$WR^2 = 0.00193 P^{1.38} \quad \text{Ecuación 3.12}$$

donde:

- P = potencia en kW
- WR^2 = momento de inercia en $N \cdot m^2$

La ecuación 3.11 es válida para una velocidad de 1 200 r/min y la ecuación 3.12 para una velocidad de 1 800 r/min. Las dos fórmulas proporcionan el momento de inercia del motor, y se sugiere añadir de 10 a 15 por ciento, para tomar en consideración a la bomba.

La diferencia entre el momento de inercia calculado por esas fórmulas y el real (dado en el catálogo del fabricante) es tanto más importante cuanto más moderna sea la máquina y cuanto más impulsores en serie tenga para la misma potencia. Esta diferencia puede ser crítica, pues influirá en la seguridad (ya que el cálculo da sobrepresiones menores para una inercia mayor), por lo que se recomienda buscar el momento de inercia del motor y de la bomba en el catálogo del fabricante y usar las fórmulas únicamente cuando la información de catálogos no esté disponible. El momento de inercia de la bomba es mucho menor que el del motor, y cuando no se cuenta con otra información, se puede suponer que es entre 10 y 15 por ciento del valor del momento de inercia del motor.

Otras fórmulas que dan la inercia del motor eléctrico y de la bomba por separado son las de Thorley (1991):

$$WR^2(motor) = 0.0043 \left(\frac{P}{N} \right)^{1.48} \quad \text{Ecuación 3.13}$$

$$WR^2(bomba) = 0.03768 \left(\frac{P}{N^3} \right)^{0.9556}$$

Ecuación 3.14

donde:

- P = potencia en kW
- N = velocidad de rotación nominal en r/min
- WR^2 = momento de inercia en $N \cdot m^2$

El aumento del momento de inercia es una medida de control de transitorios que el proyectista debe tener presente en instalaciones de tamaño pequeño y mediano. En instalaciones grandes, su implantación no suele ser económica.

Una consideración adicional es que al aumentar la inercia del equipo, el par resistente que se ofrece al arranque es mayor, lo que incrementa el tiempo requerido desde la puesta en marcha del equipo hasta que alcanza la velocidad de rotación de régimen. Ello se debe tener en cuenta al dimensionar el equipo auxiliar de arranque del motor.

3.3.3.6. Conclusiones para las formas de protección en el caso sin separación de columna en conducciones por bombeo

Como forma de protección más económica se recomienda, siempre y cuando sea posible, el uso de *bypass* en las válvulas de no retorno de las bombas.

La descarga inversa por medio de válvulas de cierre programado se usa en los sistemas de diámetro grande.

Las válvulas de alivio pueden ser usadas si son de tipo especial, es decir, tienen asegurada su rápida apertura y cuentan con poca inercia. No es recomendable el uso de las válvulas de alivio más sencillas ya que pueden no abrir en el momento necesario durante el transitorio.

Las válvulas de no retorno ubicadas en la línea se pueden usar en presencia de formas topográficas especiales.

El incremento de la inercia de los equipos de bombeo es factible en los casos de tramos cortos o cuando la reducción necesaria de las presiones máximas es de poca magnitud. En otros casos resultan necesarios volantes de dimensiones y peso demasiado grandes.

Como formas de protección es posible también usar la cámara de aire o la torre de oscilación, pero como estos dos medios resultan más apropiados para el caso de la separación de la columna, se presentan en la siguiente sección.

3.3.4. CASOS CUANDO EN LA TUBERÍA SE PRODUCEN VACÍOS

Los posibles medios antiarriete a utilizar se pueden dividir en dos grupos: los que tienen una acción global sobre todo el sistema hidráulico y los que tienen una acción local.

De los medios del primer grupo se instala solo uno en la planta de bombeo para proteger todo el sistema, mientras que de los medios del segundo grupo se pueden instalar varios, en los lugares donde se producen los vacíos.

Los medios del primer grupo son:

- Cámara de aire
- Torre de oscilación
- Incremento de la inercia de las masas rodantes

Los del segundo grupo son:

- Tanques unidireccionales
- Tanques bidireccionales
- Válvulas de aire

- Válvulas anticipadoras del golpe de ariete

Si la tubería puede soportar el vacío, debe verificarse si las presiones máximas que se producen exceden las permisibles. Si este es el caso, mediante una simulación del transitorio se verifica si la causa principal para las sobrepresiones es la separación de columna, ya que lo más conveniente entonces sería evitar las separaciones en el lugar de su surgimiento. Esto puede lograrse utilizando: cámara de aire, torre de oscilación, tanque unidireccional, tanque bidireccional o válvulas de admisión y retención de aire en los lugares de separación. Si con estos medios antiariete, las presiones máximas siguen inadmisiblemente altas, entonces tienen que preverse medios de control adicionales en la planta de bombeo.

3.3.4.1. Protección con cámara de aire

La localización ideal de la cámara de aire es inmediatamente aguas arriba de la planta de bombeo y tan cerca de esta como sea posible. Hay que tener en cuenta que deben colocarse válvulas de no retorno en las bombas para prevenir el flujo inverso a través de estas. En este sentido, es importante que las válvulas de no retorno tengan una respuesta dinámica adecuada, con el objeto de minimizar al máximo el choque que acompaña su cierre.

Como regla general, la conexión de la cámara de aire con la conducción debe poner poca resistencia a la salida de agua, con el fin de que rápidamente se proporcione el fluido que la bomba ha dejado de dar. Por el contrario, durante la fase de retroceso de la columna de agua puede ser conveniente que el flujo de

entrada tenga ciertas pérdidas de carga ya que de esta forma contribuye mejor a amortiguar el transitorio.

De esta manera, el caudal de salida no debería tener restricción alguna y la conexión con la tubería principal debe hacerse evitando al máximo las pérdidas. En este sentido, el tamaño de la tubería de entronque debe ser del mismo orden de magnitud que la tubería principal a fin de minimizar las pérdidas durante el flujo de salida. Es usual suponer que el diámetro de la conexión sea 0.50 a 0.60 veces el diámetro de la línea.

Un análisis cualitativo del efecto de las pérdidas en la conexión de la cámara se hace en Puech y Meunier (1978). En la ilustración 3.5, tomada de esta publicación, se muestra la evolución en el tiempo de la presión en la tubería para diferentes pérdidas. Cada curva corresponde a un valor determinado de las pérdidas en la entrada de la cámara de aire, expresadas por el parámetro K_r . Si $K_r = 0$, entonces se trata del caso sin pérdidas; si $K_r = \infty$, entonces al caso en que no se admite ingresar agua a la cámara, lo que se puede lograr con la colocación de una válvula de no retorno a la entrada.

La evolución de la presión en la tubería presenta dos máximos. El primer máximo ocurre en el momento $2L/a$, después de comenzar la fase de llenado de la cámara; el segundo máximo coincide con el máximo de la presión dentro de la cámara de aire, al final del llenado, cuando el gasto y las pérdidas de carga son nulos.

Para pérdidas mayores, el primer máximo es el que domina. Evidentemente existe un valor óptimo de las pérdidas con el que se obtiene una misma sobrepresión, que también es la mínima

Ilustración 3.5 Evolución de la presión para diferentes pérdidas de carga en la entrada del agua a la cámara de aire

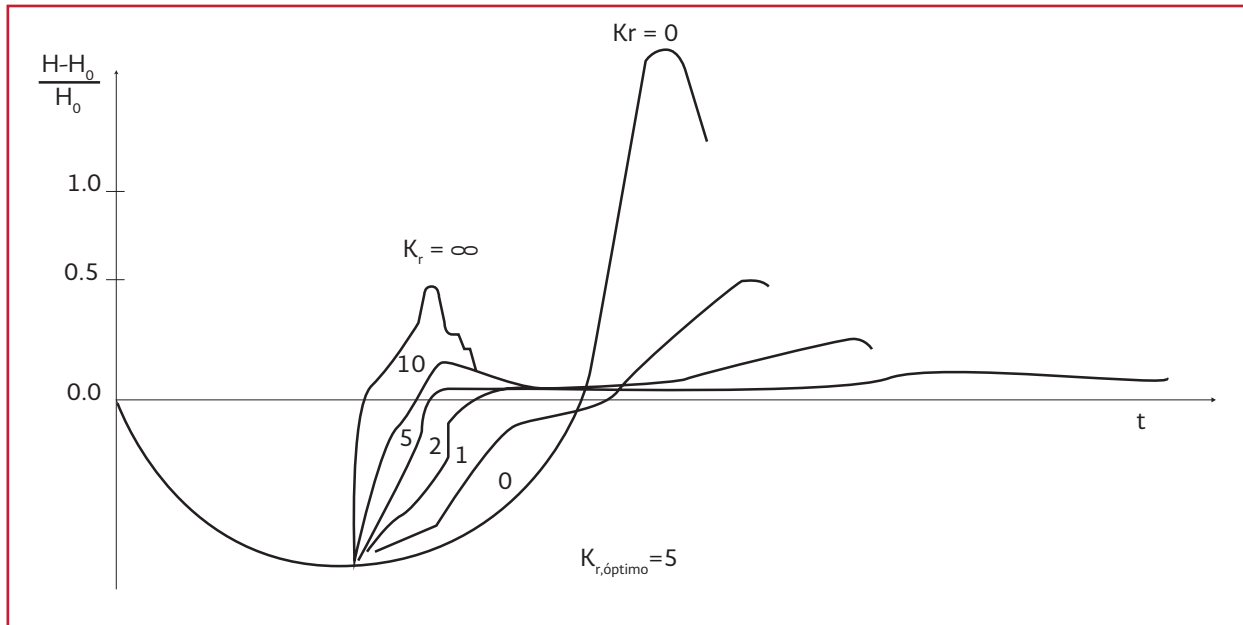
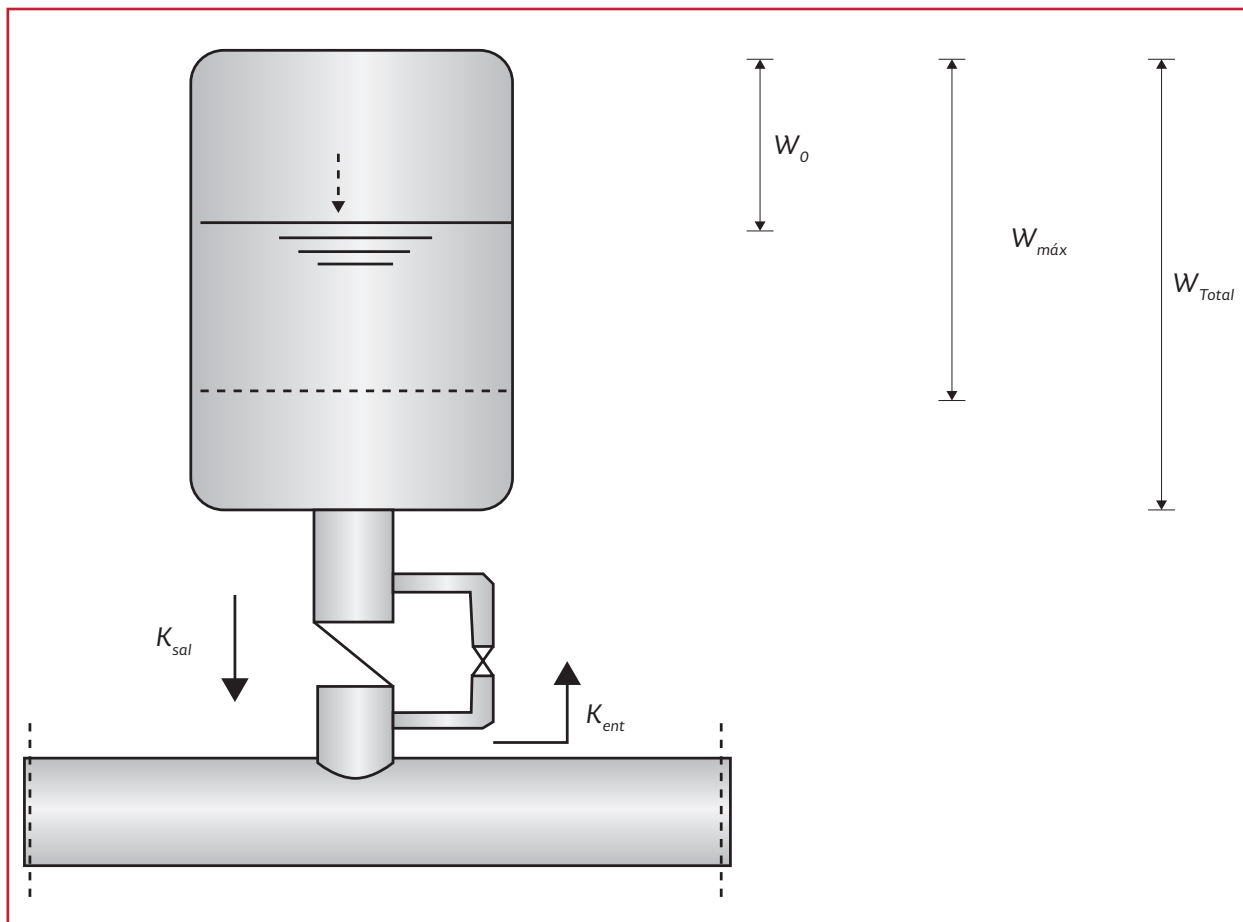


Ilustración 3.6 Parámetros de diseño de una cámara de aire



para el caso concreto. En la ilustración 3.5 esto se logra con $K_r = 5$.

El diseño de una cámara de aire se caracteriza por los siguientes parámetros: (ver ilustración 3.6.)

- El volumen de aire W_o , que hay que mantener constante durante la operación normal
- El volumen máximo de aire $W_{máx}$, que se alcanza en el transitorio, al final de la fase de vaciado
- El volumen total de la cámara W_{total} (aire más agua)
- Los coeficientes de pérdidas de carga en la conexión con la tubería K_{sal} para cuando el agua sale de la cámara y K_{ent} para cuando el agua entra

Los parámetros anteriores deben ser determinados atendiendo las siguientes condiciones:

- Que se eliminen los vacíos en la tubería
- Que se reduzcan las presiones máximas por debajo de las admisibles
- Que el volumen W_{total} sea el mínimo posible

El diseño de una cámara de aire se convierte entonces en una tarea de optimización, en la que se buscan los valores óptimos del volumen de aire W_o y del coeficiente de pérdidas K_{ent} , con los que se obtiene el valor mínimo del volumen total de la cámara, manteniendo las presiones máximas y mínimas en la tubería dentro de los límites necesarios. El coeficiente K_{sal} normalmente no es una variable del diseño, ya que tiene un valor fijo que depende de la forma de conexión de la cámara con la tubería.

W_o , $W_{máx}$ y K_{ent} se obtienen realizando varias corridas del programa de simulación. Se recomienda el siguiente procedimiento:

1. Se supone un valor para W_o y se corre el programa con $K_{ent} = 0$
2. Existen dos posibilidades en cuanto a las presiones negativas (los vacíos) en la tubería en los resultados de esta primera corrida:
 - 2.1. Los vacíos se eliminan completamente. En este caso se hacen nuevas corridas, cada vez disminuyendo W_o hasta obtener el valor mínimo de W_o con el cual no aparecen vacíos. Después se pasa al punto 3
 - 2.2. Los vacíos no se eliminan. Se hacen varias corridas aumentando W_o cada vez, hasta obtener el valor mínimo de W_o que elimina los vacíos
3. Análisis de las presiones máximas. Los resultados de la última corrida del punto 2 (de 2.1 o de 2.2) muestran una de las dos posibilidades siguientes:
 - 3.1. Las presiones máximas en toda la tubería están por debajo de las admisibles. La última solución del punto 2 queda como definitiva con su W_o y con $K_{ent} = 0$
 - 3.2. Las presiones máximas sobrepasan las admisibles. Una forma para reducirlas consiste en introducir pérdidas a la entrada de la cámara de aire. Se hacen varias corridas con distintos valores de K_{ent} , incrementándolo sucesivamente, para encontrar el valor óptimo de K_{ent} que proporciona la reducción máxima
 - 3.3. Si las presiones máximas en la simulación con el K_{ent} óptimo se reducen por debajo de las admisibles, el K_{ent}

óptimo queda como definitivo. Si no, se escoge un valor mayor de W_o y se procede desde el inicio del punto 3.2. Si las presiones máximas en la simulación con el K_{ent} óptimo se reducen por debajo de las admisibles, el K_{ent} óptimo queda como definitivo. Si no, se escoge un valor mayor de W_o y se procede desde el inicio del punto 3.2.

Al terminar este proceso iterativo quedan determinados W_o , K_{ent} y $W_{máx}$. El volumen total W_{total} se obtiene añadiéndole a $W_{máx}$ una reserva para que la cámara no se vacíe completamente en el transitorio. La magnitud de la reserva depende del valor de W_o y del diámetro del tanque. Para valores grandes de W_o se puede usar una reserva menor, y viceversa. La reserva exacta se obtiene al redondear W_o al volumen de tanque estándar mayor, pero no debe ser menor de 10 a 15 por ciento de W_o .

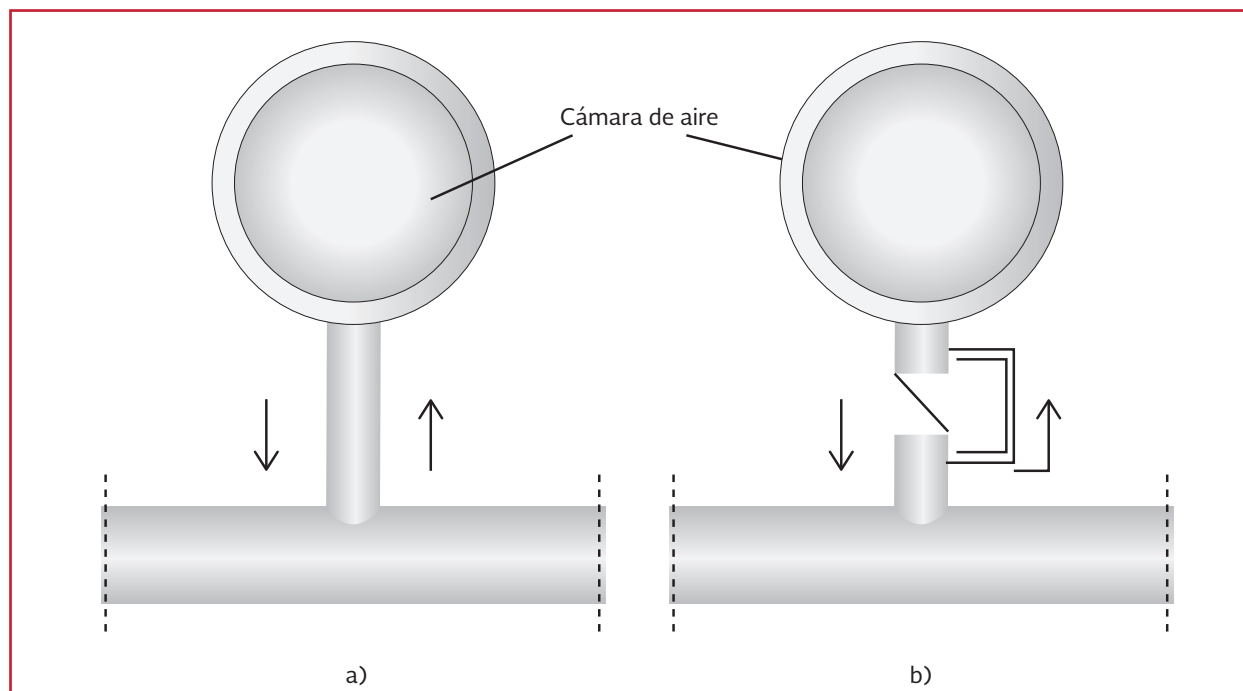
Para K_{sal} generalmente se supone un valor cero, ya que las pérdidas al salir agua del tanque son pocas y se pueden despreciar. Cuando se desea un análisis más preciso, K_{sal} se puede calcular como se muestra más adelante en este libro y se puede usar en las corridas.

La cantidad de corridas para obtener la solución definitiva se puede reducir si el análisis empieza con un buen estimado de W_o , que puede ser obtenido mediante los nomogramas correspondientes presentados en capítulo 5 de este libro, o por algún otro método de prediseño o de diseño de cámaras de aire.

Un estimado del K_{ent} se puede obtener con base en las siguientes consideraciones:

Sea $p_{máx}$ la presión máxima obtenida en el caso sin pérdidas y sea p_{adm} la presión admisible, entonces la diferencia Δp

Ilustración 3.7 Conexión de la cámara con la tubería: a) simple, b) con pérdidas asimétricas



$$\Delta p = p_{max} - p_{adm} \quad \text{Ecuación 3.15}$$

representa la presión que hay que disipar en pérdidas a la entrada de la cámara de aire.

La definición del coeficiente K_{ent} se da en la ecuación:

$$\Delta H_p = K_{ent} Q^2 \quad \text{Ecuación 3.16}$$

donde:

- ΔH_p = pérdidas en la conexión con la tubería
- Q = gasto que entra a la cámara

La ecuación 3.16 se refiere a un instante dado ya que el gasto Q varía durante el transitorio. De la corrida del programa de simulación para el caso en el que no hay resistencia hidráulica en la conexión, se toman los valores de Q y se calcula su valor promedio Q_{medio} . Considerando como una aproximación muy gruesa que ΔH_p es igual a Δp , de la ecuación 3.16, se despeja K_{ent} :

$$K_{ent} = \frac{\Delta p}{Q_{medio}^2} \quad \text{Ecuación 3.17}$$

El valor del parámetro K_{ent} se usa para diseñar la conexión de la cámara con la tubería.

Si en el análisis se obtuvo $K_{ent} = 0$, se construye una conexión simple, es decir, sin *bypass* (ilustración 3.7a).

Si $K_{ent} > 0$, se diseña una conexión con válvula de no retorno y *bypass* (ilustración 3.7, b), o con otra forma de producir pérdidas de carga asimétricas (como una boquilla asimétrica o una válvula de no retorno con obturador perforado, ver sección 2.3.2).

Las pérdidas de carga en la conexión se expresan con la siguiente ecuación:

$$\Delta H_p = \Sigma K \frac{V_b^2}{2g} \quad \text{Ecuación 3.18}$$

donde ΣK representa la suma de los coeficientes de las pérdidas de carga que se presentan en el recorrido del agua, desde el punto de unión de la conexión con la tubería hasta la entrada a la cámara. El diámetro de la conexión es considerablemente mayor que el diámetro del *bypass*; por esta razón, las pérdidas de carga por fricción en el propio tubo de conexión se pueden despreciar. Al considerar así las pérdidas en el *bypass* se tendrá:

$$\Sigma K = 2K_{codo} + K_{válv} + K_{sal} + K_{fric} \quad \text{Ecuación 3.19}$$

donde:

- K_{codo} = coeficiente de pérdidas en los codos
- $K_{válv}$ = coeficiente de pérdidas en la válvula de paso del *bypass*
- K_{sal} = coeficiente de pérdidas de la salida del *bypass* a la conexión, $K_{sal} = 1$
- K_{fric} = coeficiente de pérdidas por fricción (por longitud) en el *bypass* que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$K_{fric} = \frac{f L_b}{D_b} \quad \text{Ecuación 3.20}$$

donde:

- L_b = longitud del *bypass*
- f = el factor de fricción
- D_b = diámetro del *bypass*

Esta válvula normalmente se diseña para estar permanentemente abierta y se usa en casos de reparación, mantenimiento, etc. Se puede utilizar también para regular las pérdidas en el *bypass* y en ese caso se estrangula en el grado necesario.

Cabe señalar que, debido a que las distancias entre los elementos de la conexión y del *bypass* son cortas, las resistencias locales interactúan entre sí y las fórmulas presentadas no son del todo válidas. Por esta razón, el coeficiente de pérdidas calculado debe revisarse en ensayos con un modelo en laboratorio.

Teniendo en cuenta que:

$$V_b = \frac{Q}{A_b} \quad \text{Ecuación 3.21}$$

donde:

A_b = es el área de la sección transversal del *bypass*; la ecuación 3.18 puede representarse en la forma:

$$\Delta H_{perd} = \frac{\Sigma K}{2gA_b^2} Q^2 \quad \text{Ecuación 3.22}$$

De la comparación de la ecuación 3.16 con la ecuación 3.24 se concluye que:

$$K_{ent} = \frac{\Sigma K}{2gA_b^2} \quad \text{Ecuación 3.23}$$

Conociendo K_{ent} y ΣK , de la ecuación 3.23 se despeja A_b para calcular luego el diámetro requerido del *bypass* D_b :

$$D_b = \left(\frac{4A_b}{\pi} \right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 3.24}$$

Una problemática adicional que se presenta en las cámaras de aire de tamaño importante es la obra civil necesaria para albergar la planta de bombeo y el elemento de protección. En estos casos, podría resultar más económico y más práctico montar varias cámaras de aire de tamaño menor sobre un colector común, que después se conecta a la tubería principal.

3.3.4.2. Torre de oscilación en la planta de bombeo

Los parámetros que hay que determinar en el manejo de la torre de oscilación en la planta de bombeo son su diámetro, su altura y las eventuales pérdidas de carga en su base, considerando las siguientes condiciones:

- Eliminar los vacíos en la tubería
- Reducir las presiones máximas por debajo de las admisibles
- Evitar que se derrame agua por el borde superior de la torre
- Que el diámetro y ante todo, la altura de la torre, sean los mínimos posibles

El problema se soluciona realizando varias corridas con el programa de simulación, usando diferentes diámetros y coeficientes de pérdidas. En los resultados de cada una de las corridas aparece la elevación máxima del nivel de agua en la torre alcanzada durante el transitorio. Así se determina la altura necesaria. Se recomienda seguir el siguiente orden en el análisis:

1. Se efectúa una corrida con un diámetro pequeño de la torre que puede ser igual o incluso menor que el diámetro de la tubería y con coeficiente de pérdidas por entrada $K_{ent} = 0$. Si los resultados de esta

corrida no muestran vacíos en la tubería, se pasa al punto 3; en caso contrario se pasa al punto 2

2. Se realizan corridas sucesivas incrementando el diámetro de la torre y con $K_{ent} = 0$ hasta encontrar el diámetro mínimo con el que se eliminan los vacíos
3. Se hacen corridas sucesivas con el diámetro encontrado incrementando K_{ent} . Al aumentar K_{ent} se reduce la cota máxima de la oscilación del nivel de agua, pero también pueden subir las presiones máximas en la tubería. Como definitiva queda la variante con la altura mínima de la torre, que mantiene las presiones máximas por debajo de las admisibles

Si no es posible lograr la reducción necesaria de las presiones máximas con ninguno de los valores de K_{ent} , se escoge un diámetro mayor y se repite el punto 3.

Las pérdidas de carga en la salida de la torre deben ser mínimas, igual que en el caso de una cámara de aire visto anteriormente.

Muchas veces las torres de oscilación se unen simplemente con la tubería, es decir, no se emplean pérdidas de carga adicionales en la conexión. En esos casos el análisis se simplifica variando solamente el diámetro de la torre en las diferentes corridas.

Al concluir el análisis quedan determinadas las elevaciones mínima y máxima que alcanza el agua en la torre durante el transitorio. Puesto que la parte "activa" de la torre queda encerrada entre esas elevaciones, la parte por debajo de la elevación mínima se puede diseñar con un diámetro menor y considerarla como parte de la conexión de la torre con la línea de conducción.

3.3.4.3. Protección con tanques unidireccionales o bidireccionales

Mientras que la cámara de aire y la torre de oscilación modifican el transitorio en toda la tubería, los tanques unidireccionales o bidireccionales tienen un efecto local. Existen tres posibilidades en su empleo como medio de control:

- Es suficiente proteger la tubería solo con tanques unidireccionales o bidireccionales (uno o varios ubicados en diferentes puntos de la línea)
- Resulta más conveniente la combinación de otro medio antiarriete en la planta de bombeo (por ejemplo, una cámara de aire) con tanques unidireccionales o bidireccionales situados en puntos intermedios de la conducción
- Los tanques unidireccionales o bidireccionales no son adecuados como medio de protección antiarriete para la tubería dada

Son útiles las siguientes observaciones, suponiendo el uso de un programa de simulación:

- a) Como regla general, los tanques unidireccionales o bidireccionales se ubican en los lugares de separación de la columna que tengan los volúmenes máximos de la burbuja de cavitación que se forma, como los puntos altos del perfil de la tubería donde la pendiente del terreno cambia de mayor a menor o de positiva (ascendente) a negativa (descendente)
- b) Si los vacíos en la tubería se concentran en una pequeña parte de esta, se coloca un tanque unidireccional o bidireccional en esa parte y se ejecuta una corrida del

programa. Si con esto se eliminan los vacíos, se pasa al punto (e) análisis de las presiones máximas

- c) Si en la tubería se distingue una zona sin vacíos, seguida de una o más zonas con vacíos, se coloca un tanque unidireccional o bidireccional en el punto del primer vacío y se corre el programa. Si el tanque elimina los vacíos en toda la tubería se pasa el punto (e). Si no es así, se hace una nueva corrida con un nuevo tanque unidireccional o bidireccional en el punto del nuevo primer vacío y así sucesivamente hasta eliminar todos los vacíos. Si para eliminar los vacíos de esta forma resulta necesaria una cantidad de tanques unidireccionales o bidireccionales demasiado grande, se califica como no aceptable proteger la tubería con tanques unidireccionales o bidireccionales. Si la cantidad de tanques es aceptable, se pasa al punto (e)
- d) Si los resultados del caso sin protección muestran vacíos en toda la tubería, no se debe aplicar una protección con tanques unidireccionales. Una excepción de esta regla se tiene cuando los vacíos son producto de la presión máxima. Este es el caso cuando en la fase de depresión se producen separaciones aisladas, cuyo cierre origina sobrepresiones que, al propagarse y reflejarse, generan vacíos en toda la tubería. De esta forma, la causa primaria de los vacíos está dada por la sobrepresión resultante en el choque de las columnas líquidas. Evitando las separaciones de columna, se reducen las sobrepresiones y posiblemente se eliminan los vacíos
Se revisa entonces el volumen de las separaciones de columna en los resultados

del caso sin protección. Si sobresalen algunos puntos con volúmenes mayores, es decir, con separaciones concentradas, en dichos puntos se colocan tanques unidireccionales o bidireccionales y se corre el programa. Los resultados de la simulación muestran si esta solución elimina los vacíos

Si las separaciones están distribuidas por toda la tubería y en realidad existe una larga zona de vacío y separación, la protección con tanques unidireccionales o bidireccionales no es conveniente y hay que buscar otras soluciones.

- e) Análisis de las presiones máximas. Una vez resuelto el problema de los vacíos, queda por resolver el problema de las presiones máximas. Si los tanques unidireccionales o bidireccionales eliminan los vacíos, pero la presión máxima queda inadmisiblemente alta, no queda otra alternativa que combinar estos dispositivos con otros medios antiarriete o buscar una solución con otros medios. Una vez eliminados los vacíos en la línea, ningún incremento en el volumen o la cantidad de los tanques unidireccionales o bidireccionales puede ejercer influencia en las sobrepresiones.
- f) Combinación de tanques unidireccionales o bidireccionales con otros medios antiarriete. Esta combinación puede ser necesaria cuando:
 1. Los tanques unidireccionales o bidireccionales eliminan los vacíos, pero no las sobrepresiones. Para reducir la sobrepresión se agrega al sistema cualquiera de los medios antiarriete descritos en 3.3.3. Hay que prestar especial atención cuando se usa la combinación con descarga inversa (a través de

bypass o válvulas de cierre programado), ya que si no cesa a tiempo, la descarga inversa provoca que los tanques unidireccionales se puedan vaciar

2. Cuando los tanques unidireccionales o bidireccionales se usan para reducir el tamaño de otro medio antiarriete principal. Un caso típico se tiene cuando una cámara de aire pequeña en la planta de bombeo elimina los vacíos en casi toda la tubería, excepto en una zona aislada (que puede ser alguna loma acentuada del perfil). En este caso existen dos posibilidades: usar una cámara de aire más grande, que elimine completamente los vacíos, o mantener la cámara pequeña y resolver el vacío "localmente" con uno o varios tanques unidireccionales o bidireccionales. Dado que los tanques unidireccionales o bidireccionales son relativamente económicos, la segunda alternativa puede resultar más económica

El programa de simulación de transitorios solicita, en los datos de entrada, las dimensiones del tanque y el nivel de agua al inicio del transitorio. En los resultados se obtiene el descenso máximo de este nivel de agua dentro del transitorio. Estos datos se pueden usar para determinar las dimensiones del tanque por el procedimiento siguiente:

- a) Se suponen las dimensiones del tanque y el nivel de agua en este. El área de la sección del tanque en planta debe ser no menos de 16 veces mayor que el área de la sección transversal de la línea de conducción (SARH, 1988)

- b) Se ejecuta la simulación para obtener el descenso máximo del nivel de agua durante el transitorio. Ese descenso, multiplicado por la sección del tanque da el volumen de agua que se introduce en la tubería. Hay que tener en cuenta que no debe permitirse que el tanque se vacíe completamente, ya que en ese caso, la instalación quedaría desprotegida mientras se llene de nuevo. El criterio de seguridad que suele adoptarse para calcular el volumen total del tanque es:

$$V_T = nV_{min} \quad \text{Ecuación 3.25}$$

donde n es un coeficiente de seguridad que suele tomarse alrededor de 10, pero en ningún caso deberá ser inferior a 5.

- c) Una vez determinado el volumen del tanque se determina de nuevo la sección del mismo, que debe escogerse de forma que el descenso del nivel del agua nunca sea superior a 10-15 por ciento del nivel máximo. Por ello el área del tanque se determina con:

$$A_T = \frac{V_T}{0.1Z_T} \quad \text{Ecuación 3.26}$$

3.3.4.4. Uso de válvulas de aire

- Válvulas de admisión y expulsión de aire.

La admisión de aire tiene una acción local como medio para evitar el vacío en los transitorios. En el lugar de la admisión se forma una discontinuidad del flujo de agua en la tubería, similar a la separación de columna por cavitación. Si la conducción posee puntos más al-

tos que el sitio de admisión de aire, esta discontinuidad se cerrará en el transitorio, lo cual generará sobrepresiones por el choque de las columnas de agua en la reunificación

Por esta razón, no es adecuado emplear válvulas de aire como medio de control de transitorios en puntos de la conducción donde se pueden generar separaciones grandes, ya que las sobrepresiones provenientes de su cierre pueden ser muy altas. Las válvulas de admisión y expulsión de aire se pueden usar entonces para eliminar solamente vacíos no pronunciados en puntos aislados de la conducción

El diseño de una protección antiarriete con válvulas de aire consiste en la selección de los puntos de instalación de las mismas, así como su cantidad y tamaño para cada punto seleccionado

Por otro lado, las conducciones siempre se diseñan con cierta cantidad de válvulas de aire, ubicadas en los puntos altos, los cambios de pendiente de mayor a menor, tomando en cuenta el vaciado y el llenado de la tubería, sin pensar en su efecto sobre los transitorios

Como se señaló en el procedimiento general presentado en la sección 3.1, el primer paso del análisis consiste en analizar el transitorio sin medio de control alguno. En esta corrida, las válvulas de aire pueden no tomarse en consideración. Si los resultados muestran que no hay vacíos, las válvulas de aire pueden no considerarse hasta el final del análisis

Si se presentan vacíos y las presiones máximas no son peligrosas, se efectúa una corrida considerando las válvulas de aire previstas para el llenado y vaciado, que pueden resultar suficientes para eliminar el vacío. En caso contrario, se prueba con una mayor cantidad de válvulas. Si las válvulas de aire incrementan la presión máxima, se busca una protección con otros medios de control

- Válvulas de admisión y retención de aire. Además de reducir los vacíos, las válvulas de admisión y retención de aire producen un efecto amortiguador en la fase de sobrepresión. Cuanto mayor sea el volumen de aire atrapado, mayor será el efecto amortiguador de sobrepresión. En este sentido y a diferencia de las válvulas de admisión y expulsión, es conveniente ubicar las válvulas de admisión y retención en los puntos de mayor volumen de separación de columna en la conducción. En todo caso, la simulación del transitorio muestra lo adecuado de una u otra variante de ubicación de ese tipo de válvulas

El diseño de un sistema de protección con válvulas de admisión y retención de aire debe resolver también dos problemas complementarios:

- a. Asegurar que el aire atrapado se quede en la zona de las válvulas durante el transitorio (o sea, que no se traslade rápidamente por la tubería)
- b. Evacuar el aire una vez amortiguado el transitorio. El aire no evacuado puede causar problemas a la hora de arrancar la estación de bombeo y operar nuevamente la tubería

3.3.4.5. Resumen de las formas de protección para el caso que haya vacíos en la conducción

La cámara de aire es una solución aplicable en casi todos los casos en los que se puede presentar vacíos en la conducción, pero al mismo tiempo es una solución cara.

Las torres de oscilación son efectivas, seguras y no necesitan mantenimiento, pero limitadas en su uso por la altura requerida.

Pocas veces se puede proteger la tubería incrementando solamente la inercia de las masas rodantes de los equipos de bombeo.

Es posible lograr la protección antiarriete usando solamente tanques unidireccionales o bidireccionales. Esta variante es relativamente económica y por eso siempre se debe analizar la posibilidad de su uso. Si no es posible, entonces se usa una cámara de aire.

Cuando la zona de vacíos parte de la estación de bombeo, normalmente no queda otra alternativa que el empleo de cámaras de aire.

Cuando exista la posibilidad de proteger la línea de conducción con tanques unidireccionales o bidireccionales solamente, pero con un gran número de ellos, es preferible usar como solución una sola cámara de aire en la planta de bombeo.

Las válvulas de admisión y expulsión de aire se deben considerar como un medio antiarriete complementario.

3.4. CONDUCCIONES POR GRAVEDAD

3.4.1. CONDICIONES DE OPERACIÓN MÁS DESFAVORABLES

El cierre de una válvula al final de la conducción genera sobrepresiones que son tanto mayores, cuanto más larga sea la tubería. Por esta razón, el cierre al final de la tubería es el caso más desfavorable cuando aparecen sobrepresiones.

El cierre de una válvula intermedia genera sobrepresiones aguas arriba y depresiones aguas abajo. La apertura de la válvula al final de la conducción también genera depresiones. Cuál de los dos casos de depresión es más desfavorable depende de las características de cada conducción.

Los transitorios son tanto más violentos cuanto más rápido sea el cierre o la apertura y más alta la velocidad en la tubería. Como se señala en la sección 1.7 de este libro, cuando el tiempo de maniobra es menor de $2L/a$, se produce la sobrepresión (o depresión) máxima que da la fórmula de Zhukovski, ecuación 1.4.

Una conducción por gravedad puede trabajar con diferentes gastos, que se regulan por medio de la válvula de cierre ubicada al final de la tubería. El gasto máximo posible y con esto la velocidad máxima se tienen con una válvula completamente abierta. No obstante, puede resultar que la sobrepresión máxima que acompaña el cierre de la válvula se produzca en una operación con gastos menores, como se explica a continuación:

Cuando la conducción está operando con gastos menores, la válvula se encuentra cerrada en cierto grado, por lo que se requiere un tiempo menor para la maniobra de cierre total. Si este tiempo en particular es menor que $2L/a$, entonces se produce la sobrepresión máxima que da la fórmula de Zhukovski.

Conclusiones para el caso de una conducción por gravedad:

- La sobrepresión máxima se produce con el cierre de la válvula al final de la conducción
- La sobrepresión máxima puede producirse con el gasto máximo en la conducción o con gastos parciales si el tiempo de cierre es diferente en los dos casos
- La depresión máxima puede producirse con la apertura de la válvula al final de la tubería, o con la apertura de una válvula intermedia

3.4.2. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

- a) Se analizan los posibles gastos de operación de la conducción con flujo permanente
- b) Se simula el transitorio generado por un cierre en tiempo normal de la válvula al final de la conducción para cada uno de los gastos de flujo permanente posibles
- c) Las presiones máximas obtenidas en el punto (b) se comparan con la resistencia de la tubería. Si aquellas superan esta, se busca la forma adecuada para reducir las. La manera más sencilla consiste en hacer el cierre más lento. Para la mayoría de los tipos de válvula usados en conducciones de agua potable, el efecto predominante

se presenta al final del cierre. Por esta razón resulta efectivo un cierre en dos (o más) etapas: un cierre rápido al inicio, seguido por un cierre lento al final

El cierre más lento o en etapas se puede realizar por medio de arreglos mecánicos especiales que se adicionan a las válvulas. Las sobrepresiones pueden ser reducidas también con válvulas de alivio o de paso lateral (bypass) en las válvulas de cierre.

La cámara de aire y la torre de oscilación generalmente no se justifican en una conducción de agua potable por gravedad

- d) Una vez reducidas las presiones máximas a los límites permisibles, se revisan las presiones negativas. Si el transitorio genera presiones negativas que la tubería no puede soportar, se intenta, ante todo, eliminarlos por medio de válvulas de admisión de aire. Las presiones negativas normalmente se producen en los puntos altos de la conducción, donde se tienen válvulas de aire para el llenado y el vaciado de la línea. De esta manera primero se simula el transitorio considerando la presencia de estas válvulas de aire, que pueden resultar suficientes para eliminar los vacíos

Si el vacío se presenta en una pequeña longitud de la conducción, puede resultar más conveniente reforzar estructuralmente esta parte y permitir el vacío

Se simula el transitorio que genera la apertura de la válvula al final, y el cierre y la apertura de válvulas intermedias

Es de esperar que las sobrepresiones en estos casos sean menores. Presiones negativas son posibles; la protección contra estas se da como se indica en el punto (d)

4

EJEMPLOS DE ANÁLISIS DE TRANSITORIOS Y SELECCIÓN DE MEDIOS PARA SU CONTROL

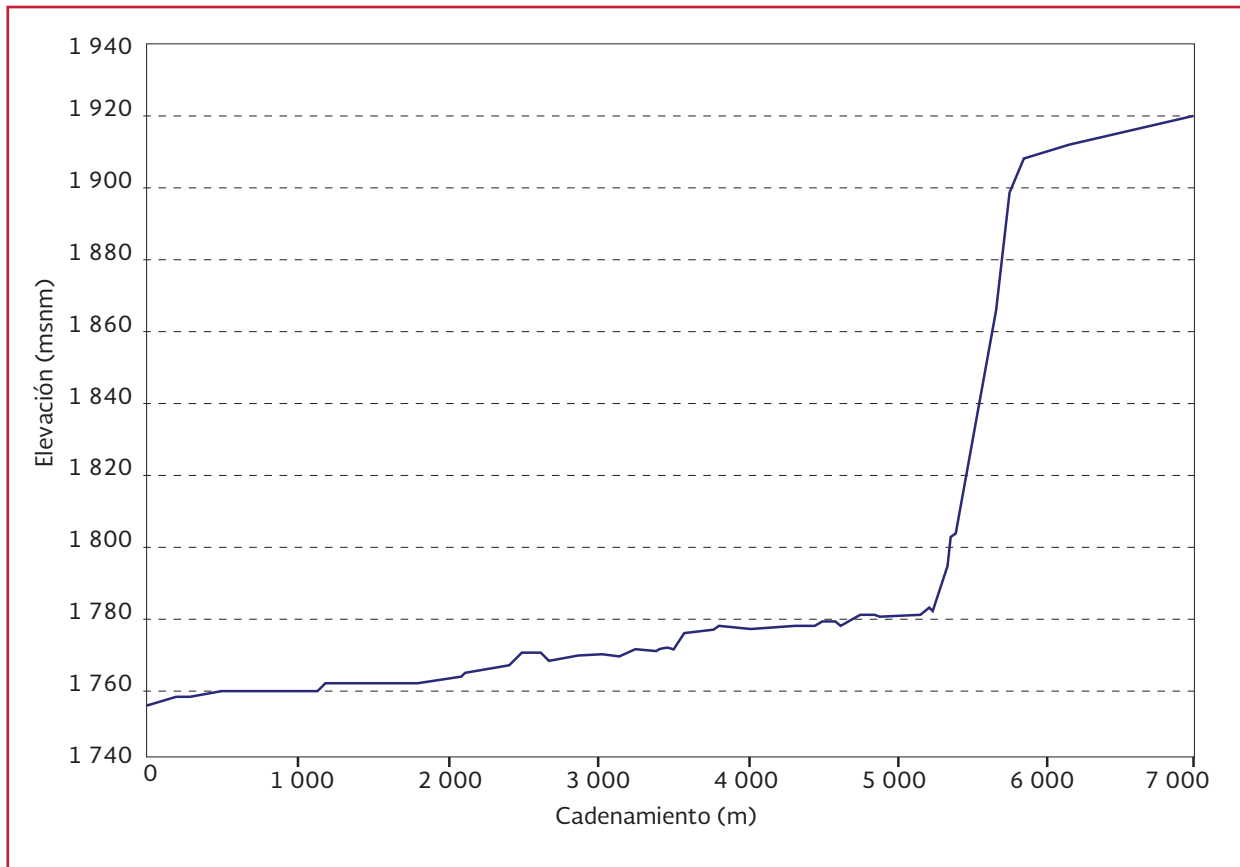
Se presentan a continuación varios ejemplos de análisis de transitorios en líneas de conducción, tomados de proyectos reales de diferentes localidades de la República Mexicana. El análisis se realiza en la siguiente secuencia:

1. Del proyecto de la conducción se toman los siguientes datos:
 - a. Perfil topográfico de la conducción con elevaciones, diámetro, material y clase de tubería y accesorios por tramos
 - b. Niveles de agua en la toma y en la descarga de las bombas
 - c. Curvas características de las bombas
 - d. Momento de inercia de bombas y motores acoplados
 - e. Gastos de diseño y forma de operación
2. Con los datos de diámetro, material, clase de tubería y accesorios, se determinan las presiones máximas y mínimas (vacío) que puede soportar la tubería por tramos
3. La conducción se analiza para flujo permanente para definir las condiciones iniciales para el análisis transitorio y los transitorios más desfavorables que deben ser analizados
4. Se realiza el análisis de transitorio sin medio de control alguno, considerando válvulas de no retorno en las bombas
5. De resultar necesarios medios de control de transitorios (por las presiones que se obtienen en el punto 4), se analiza el transitorio con diferentes medios de control, se analiza cada uno de los que puedan ser aplicables al caso y se recomienda el más adecuado
6. Con el análisis de los medios de control del punto anterior se determina la capacidad de cada medio y sus dimensiones tentativas, que se usarán luego en el proyecto mecánico y estructural
7. Se realiza un análisis de transitorios suponiendo que la protección antiarriete falla y se revisa si las presiones máximas obtenidas se encuentran por debajo de la presión de prueba en fábrica de la tubería. En caso contrario, se tendría que cambiar la clase de la tubería y volver a hacer el análisis

4.1. EJEMPLO 1: CONDUCCIÓN SIMPLE DE ACERO CON FUERTE DESNIVEL EN SU FINAL

El perfil topográfico de la tubería se presenta en la ilustración 4.1. En toda su extensión, la tubería es de acero, tipo ASTM A53 grado B, de 0.4598m (18 pulgadas) de diámetro, con un espesor de

Ilustración 4.1 Perfil topográfico de la tubería del Ejemplo 1



pared de 7.9248×10^{-3} m (0.312 pulgadas) y con un diámetro interior de 0.4414 m.

En la planta de bombeo se tienen cinco bombas verticales tipo American Turbine 12-M-70 con 11 tazones y velocidad de 1 760 r/min, de las cuales operarán cuatro y una se queda de reserva. Las bombas toman el agua de un cárcamo cuyo nivel de operación varía entre 1 752.05 msnm y 1 754.24 msnm. En su final, la conducción descarga en una planta de tratamiento con una elevación de la descarga igual a 1 924.20 msnm. El gasto de diseño es de 180 L/s.

4.1.1. CONDICIONES DE RESISTENCIA DE LA TUBERÍA

4.1.1.1. Resistencia contra sobrepresiones

Para el cálculo de la resistencia a presiones internas, se utiliza la siguiente expresión tomada de los datos que proporciona el fabricante de la tubería:

$$t = \frac{pd}{2S} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

donde:

- t = espesor de la tubería (pulgadas)
- p = presión de trabajo (psi)
- d = diámetro exterior (pulgadas)
- s = esfuerzo permisible (psi)

Para una tubería de acero ASTM A53 grado B, el valor de S es de 17 500 psi (120.66 MPa). De la expresión anterior se despeja la presión de trabajo como:

$$\begin{aligned} p &= \frac{2(175000)(0.312)}{18} \\ &= 606.67 \text{ psi} = 42.66 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 4.184 \text{ MPa} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

4.1.1.2. Resistencia contra presiones negativas

La presión crítica se obtiene por la ecuación 3.3 como:

$$\begin{aligned} P_{cr} &= \frac{2(2030000)}{(1 - 0.3^2)} \left[\frac{0.0079248}{0.4598} \right]^3 \\ &= 22.84 \text{ kg/cm}^2 = 2.24 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Ecuación 4.3

4.1.1.3. Resistencia de las válvulas de aire y otros accesorios

Según la información proporcionada por los proyectistas de la conducción, se tiene pensado usar en la línea de conducción válvulas con una resistencia de 2.491 MPa (25.4 kg/cm²).

4.1.2. ANÁLISIS DEL FLUJO PERMANENTE

Con el fin de conocer las condiciones de operación normal de la conducción, se procedió primero a la simulación hidráulica de la misma en flujo permanente. Con el objeto de simplificar la introducción de datos, se seleccionaron nueve nodos y ocho tramos. El primer nodo corresponde a la planta de bombeo y el último a la descarga libre en la planta de tratamiento. Respecto a los tramos, se tienen ocho, de tubería de acero al carbón clase ASTM A53 grado B y con un diámetro interior de 0.4414 metros.

Se corrieron dos alternativas de cálculo. La primera, considerando el nivel máximo en el cárcamo de la estación de bombeo, es decir, 1 754.24 msnm, y la segunda, considerando el nivel mínimo en el mismo cárcamo, es decir, 1 752.05 msnm. Se consideró una descarga libre al final de la conducción, como aparece en los planos del proyecto.

En la ilustración 4.1 se presentan los gastos obtenidos de las simulaciones para los dos niveles considerados. Estos gastos son ligeramente superiores al gasto de diseño, que es de 180 L/s.

En la simulación del paro de la bomba se tomará el gasto correspondiente al nivel máximo en el cárcamo (1 754.24 m), es decir, 203.91 L/s, para representar la condición de transitorio más severo. Los datos del ejercicio se muestran en la tabla 4.2 a la tabla 4.5.

Los resultados del análisis en estado permanente de la conducción se presentan en la ilustración 4.2.

Tabla 4.1 Gastos de operación para diferentes niveles

Nivel en el cárcamo	Nivel en la descarga	Gasto en la conducción
(m)	(m)	(L/s)
1 754.24	1 924.20	203.91
1 752.05	1 924.20	201.94

Tabla 4.2 Datos para los nodos

Nodo	Tipo	Cota	Nivel de agua
Cárcamo	Estación de bombeo	1 756.47	1 754.24
2	0	1 759.71	
3	0	1 762.65	
4	0	1 769.06	
5	0	1 776.24	
6	0	1 780.25	
7	0	1 909.40	
8	0	1 913.60	
Planta tratamiento	descarga libre	1 920.00	1 924.20

Tabla 4.3 Datos para la estación de bombeo

Estación de bombeo	
Cantidad de bombas	4
Pérdidas de carga en la estación de bombeo (m)	1.0
Gasto correspondiente a las pérdidas anteriores (L/s)	180.0
Cota del nivel de agua en la toma (m)	1 754.24

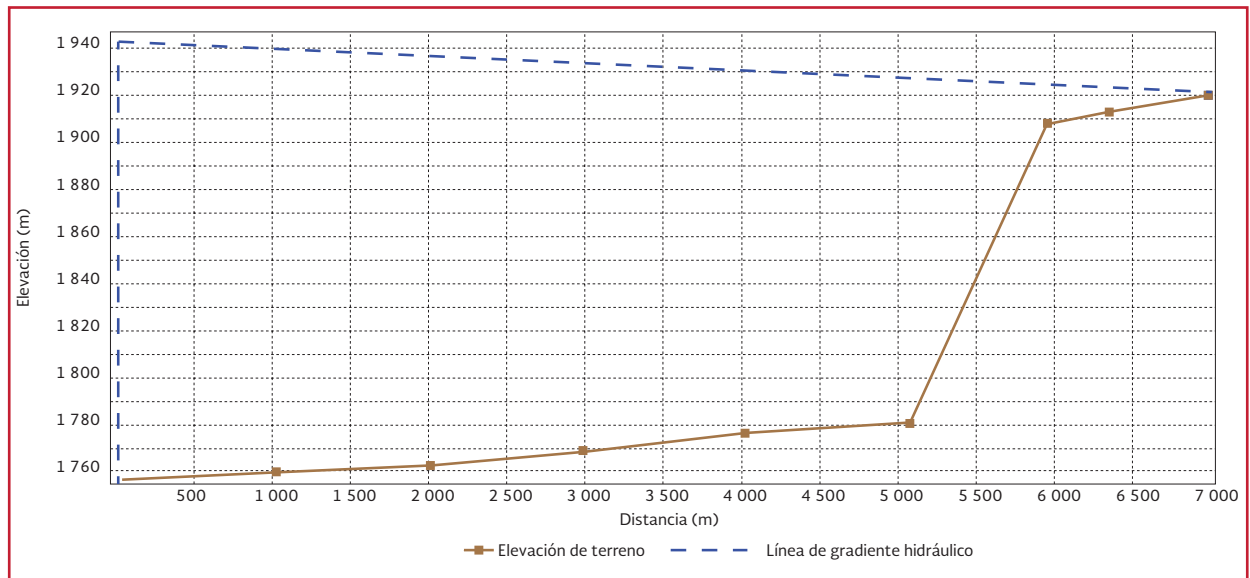
Tabla 4.4 Curva característica de la bomba

Gasto	H	Eficiencia
(L/s)	(m)	(por ciento)
0.00	288.31	0
12.62	276.65	40
25.23	261.47	70
37.85	234.74	84.5
45.00	214.61	86.2
50.46	194.48	85.4
63.08	140.80	77

Tabla 4.5 Datos para los tramos de la conducción

Tramo	Del nodo	Al nodo	Longitud	Diámetro	Rugosidad
			(m)	(mm)	(mm)
1	Cárcamo	2	1 021.0	441.4	0.050
2	2	3	990.0	441.4	0.050
3	3	4	977.5	441.4	0.050
4	4	5	1 033.5	441.4	0.050
5	5	6	1 052.5	441.4	0.050
6	6	7	863.9	441.4	0.050
7	7	8	407.5	441.4	0.050
8	8	Planta de tratamiento	654.1	441.4	0.050

Ilustración 4.2 Resultados del análisis en estado permanente



4.1.3. ANÁLISIS DEL FLUJO TRANSITORIO

Se calculan primero algunos datos adicionales, necesarios para el análisis transitorio.

4.1.3.1. Cálculo del momento de inercia del grupo motor-bomba

Los datos del momento de inercia WR^2 (o GD^2) de las partes rodantes (rotor del motor eléctrico e impulsor de la bomba) se deben tomar de los catálogos de los fabricantes del motor y de la bomba. Para el proyecto considerado, se tomaron los siguientes valores para la bomba dada y para un motor de 108.31 HP de potencia nominal y velocidad de 1 800 r/min:

- Momento de inercia WR^2 de la bomba = 6.86 N m^2 (0.70 kg m^2)
- Momento de inercia WR^2 del motor = 18.14 N m^2 (1.85 kg m^2)

- Momento de inercia del conjunto motor-bomba = $6.86 + 18.14 = 25 \text{ N m}^2$ (2.55 kg m^2)

4.1.3.2. Velocidad de propagación de la onda de presión

La velocidad de propagación se calculó con la ecuación 1.1 como:

$$a = \frac{1440}{\sqrt{1 + 0.01 \frac{0.4414}{0.0079248}}} = 1154.04 \text{ m/s}$$

4.1.3.3. Representación de la conducción en el análisis

La conducción se representó mediante ocho nodos y nueve tramos, tal como fue descrito en el análisis de flujo permanente. En este modelo se incluyeron los puntos más representa-

tivos de la conducción (estación de bombeo, la descarga libre al final de la conducción y siete puntos de importante cambio de pendiente del terreno).

4.1.3.4. Transitorio sin medios de control

Se comienza por simular el transitorio generado por el paro de las bombas, sin considerar medios de control alguno y con válvulas de no retorno en las bombas, para saber el orden de magnitud de las presiones y depresiones a las que estaría sujeta la conducción.

La ilustración 4.3 muestra las envolventes de las presiones máxima y mínima obtenidas para este caso. Se observa una presión máxima en el transitorio de 3.61 MPa (36.848 kg/cm²) al inicio de la conducción (bajo condiciones de operación normal, la presión en este punto de la conducción es de 1.83 MPa (18.69 kg/cm²).

Como se observa en la Ilustración 4.3, el transitorio genera una amplia zona de presiones negativas, principalmente en la zona alta de la conducción, en donde en muchos puntos se llega a la presión de cavitación y separación de columna (manejada como -9.75 m indicado en la sección 1.5). En el desarrollo del transitorio las separaciones de columna en estos puntos se cierran y eventualmente vuelven a abrir y cerrar, generando una sobrepresión instantánea con cada cierre (de acuerdo con el proceso que se explica en la sección 1.6.2). La propagación y superposición de estas múltiples sobrepresiones da como resultado la variación irregular de la presión instantánea (y con esto de las envolventes de presión) que se observa en la Ilustración 4.3 y la Ilustración 4.4. Tal variación irregular de la presión es típica para los transitorios con separaciones de columna en múltiples puntos de las líneas de conducción.

Ilustración 4.3 Resultados del análisis de paro de las bombas

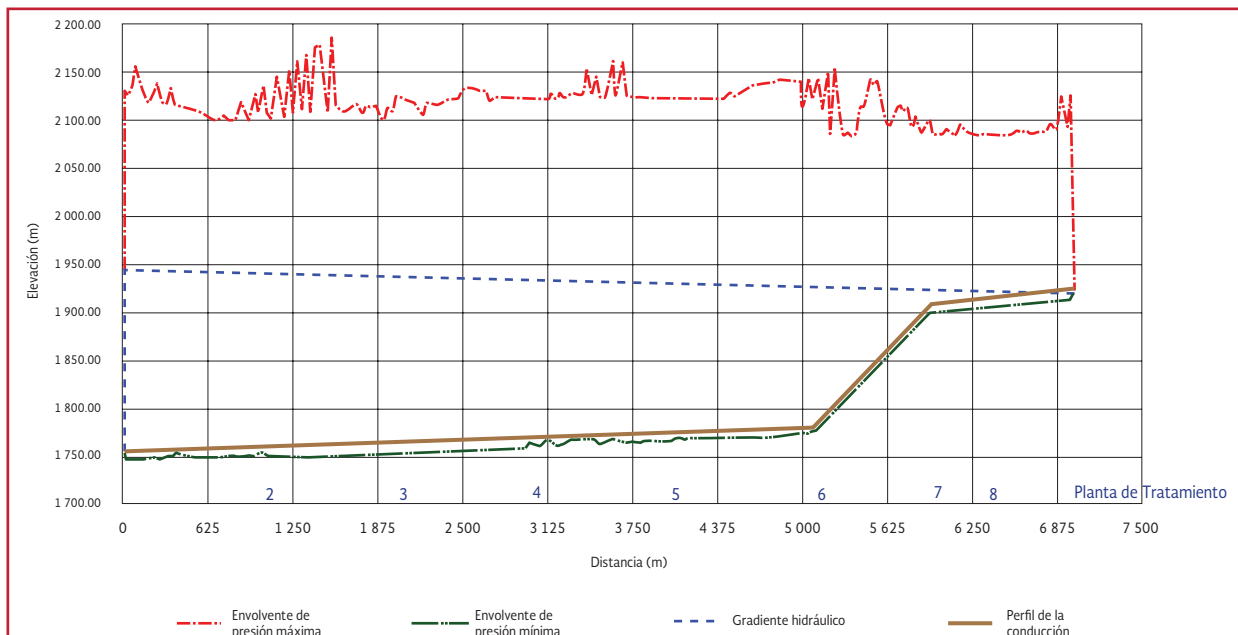
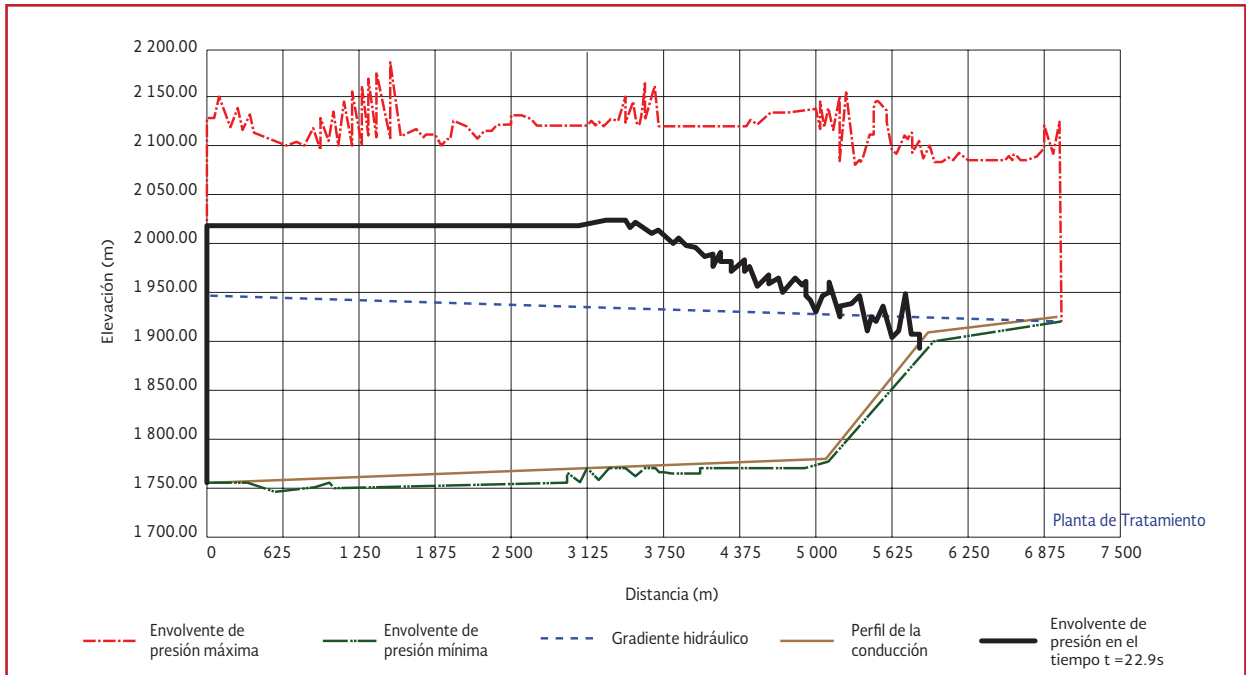


Ilustración 4.4 Presión en la conducción en el tiempo $t = 22.9$ s



La presión máxima que se produce en el transitorio es de 3.61 MPa (36.848 kg/cm²), ligeramente menor que la presión de trabajo de la tubería, igual a 4.183 MPa (42.66 kg/cm²), calculada en la sección 4.1.1.1. No obstante, esta presión es mayor a la presión que soportan las válvulas de aire y otros accesorios que se piensa usar (25.4 kg/cm² o 2.491 MPa). La tubería puede soportar las presiones negativas del transitorio sin peligro de colapso.

Se procede a analizar las variantes según el medios de control, con objeto de mantener una presión máxima durante el transitorio no superior a 2.49 MPa o 25.4 kg/cm².

4.1.3.5. Transitorio con cámara de aire en el inicio de la conducción

Para reducir eficazmente las sobrepresiones, la cámara de aire debe tener un volumen suficiente

y debe ser provista de un *bypass* en la conexión de la cámara con la conducción, que genere ciertas pérdidas de carga cuando el agua entra en la cámara durante el transitorio.

La ilustración 4.5 muestra las líneas envolventes obtenidas para este escenario; se observa que la presión máxima se presenta al inicio de la conducción (en la planta de bombeo) con un valor máximo de 2.13 MPa (21.79 kg/cm²) y las presiones máximas son ligeramente superiores a las presiones en la conducción bajo condiciones de operación normal.

En la ilustración 4.6 se presenta la evolución de la presión en la cámara de aire; nótese que la línea envolvente de presión mínima obtenida indica que en la conducción se presentan presiones negativas a partir del km 5+880. No obstante y dada la cédula de la tubería de acero de la conducción, estas depresiones pueden ser soportadas por la misma tubería.

Tabla 4.6 Arreglo de la planta de bombeo

Propiedad	Cantidad	Diagrama
Cantidad de bombas	4	
Velocidad nominal (r/min)	1 760.00	
Pérdidas en estación de bombeo (m)	1.00	
Q para esas pérdidas (L/s)	180.0	
Nivel de agua en la toma (m)	1 754.24	
Cantidad de cámaras	1	
Volumen de la cámara (L)	5 000	
Diámetro de la conexión (mm)	400.0	
Longitud de la conexión (m)	1.00	
Cota del fondo de la cámara (m)	1 757.50	
Cota del techo de la cámara (m)	1 760.50	
Nivel de agua en la cámara (m)	1 759.50	
Exponente para ley de los gases	1.2	

4.1.4. DISEÑO DE LA CONEXIÓN Y DEL BYPASS EN LA CÁMARA DE AIRE

Cuando se utiliza una cámara de aire para contrarrestar los efectos del transitorio, será

necesario determinar las dimensiones de la conexión de la cámara de aire con la conducción y del by-pass. El estudio de transitorios hidráulicos en la conducción mostró que la mejor reducción de las sobrepresiones del transitorio se produce con $K_{ent} = 10\ 000\ s^2/m^5$, donde K_{ent} es el factor

Ilustración 4.5 Envoltentes de presión máxima y mínima para el caso de que haya cámara de aire

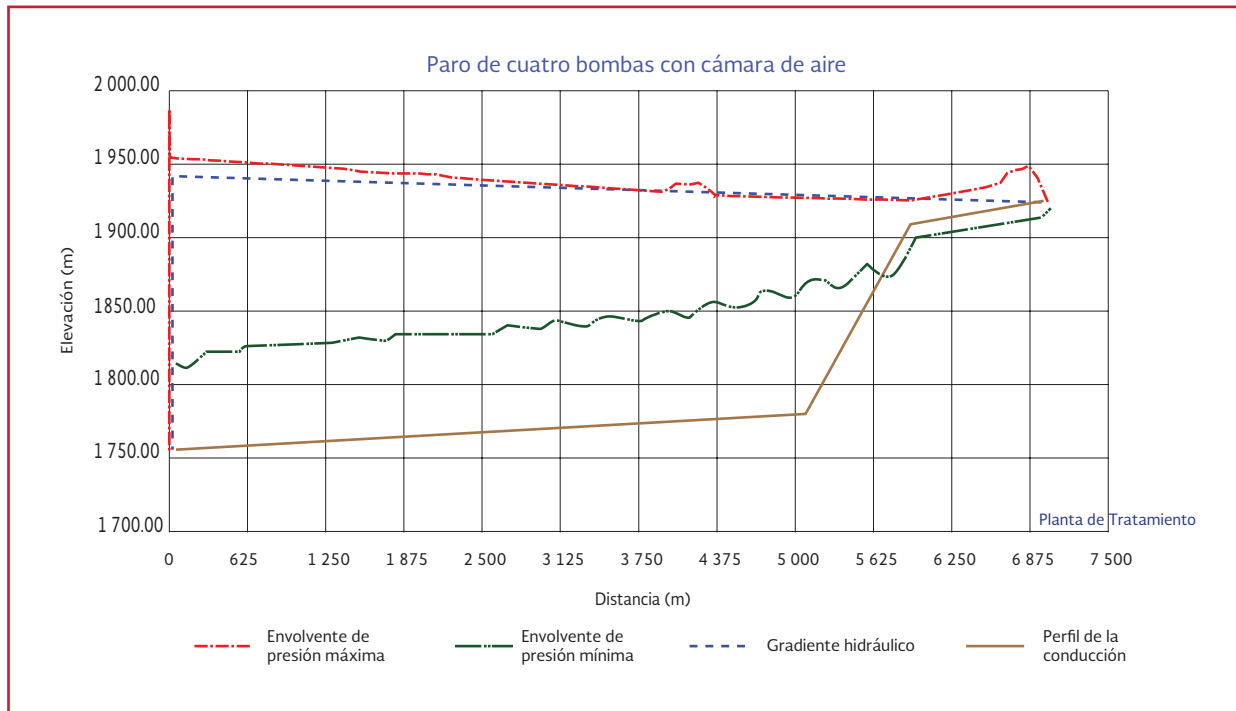
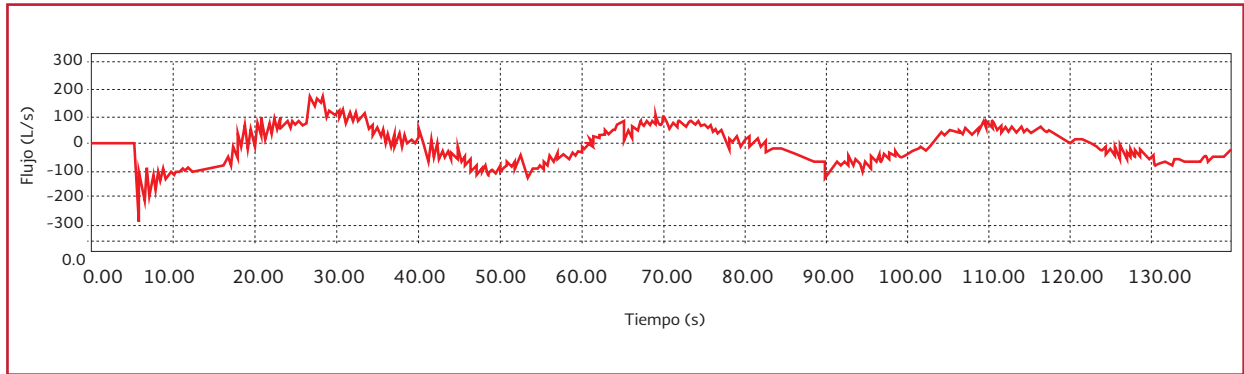


Ilustración 4.6 Variación del flujo en la cámara de aire



de pérdidas de carga para el flujo de entrada hacia la cámara definido por la Ecuación 3.20.

Para el flujo de salida de la cámara, por el contrario, las pérdidas de carga deben ser las menores posibles. Se propone entonces una solución con un *by-pass* en la conexión de la cámara con la conducción. Éste proporciona pérdidas de carga pequeñas para la salida del agua de la cámara, y pérdidas con $K_{ent} = 10\ 000\ \text{s}^2/\text{m}^5$ para el flujo de entrada. El estudio de transitorios hidráulicos en la conducción mostró que a la cámara ingresa un gasto máximo de $0.175\ \text{m}^3/\text{s}$ y un gasto promedio de $0.058\ \text{m}^3/\text{s}$ por lo que, proponiendo un *bypass* de 3" de diámetro (0.0762 m) y una longitud de 3 metros, se aplica la ecuación 3.20:

$$K_f = f \frac{L_b}{D_b} = 0.014 \frac{3}{0.0762} = 0.55$$

Con la ecuación 3.19:

$$\begin{aligned} \sum K &= K_{codo} + K_{ent} + K_{val} + K_{sal} + K_f \\ &= 2(0.9) + 0.5 + 0.2 + 1.0 + 0.55 \\ &= 4.05 \end{aligned}$$

El área de la sección transversal del *bypass* A_b es:

$$A_b = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} 0.0762^2 = 0.00456\ \text{m}^2$$

Sustituyendo en la ecuación 3.23, se obtiene:

$$\begin{aligned} K_{ent} &= \frac{\sum K}{2gA_b^2} \\ &= \frac{4.05}{2(9.81)(0.00456)^2} \\ &= 9925.59\ \frac{\text{s}^2}{\text{m}^5} \end{aligned}$$

Para no generar muchas pérdidas, la conexión debe de ser suficientemente grande, por lo que se propone de un diámetro de 0.203 m (8 pulgadas).

Con estos valores se realiza de nuevo la simulación del transitorio, y resulta una presión máxima en la tubería de 2.32 MPa (23.69 kg/cm²), lo cual es admisible.

En conclusión, se recomienda la instalación de un *bypass* en la conexión de la cámara con la conducción, con las siguientes características (ilustración 4.7):

- Diámetro de la conexión = 8 pulgadas o mayor
- Diámetro del *bypass* = 3 pulgadas (7.62 cm)
- Longitud del *bypass* = 3.0 m

Ilustración 4.7 Arreglo de la cámara de aire sobre la conducción

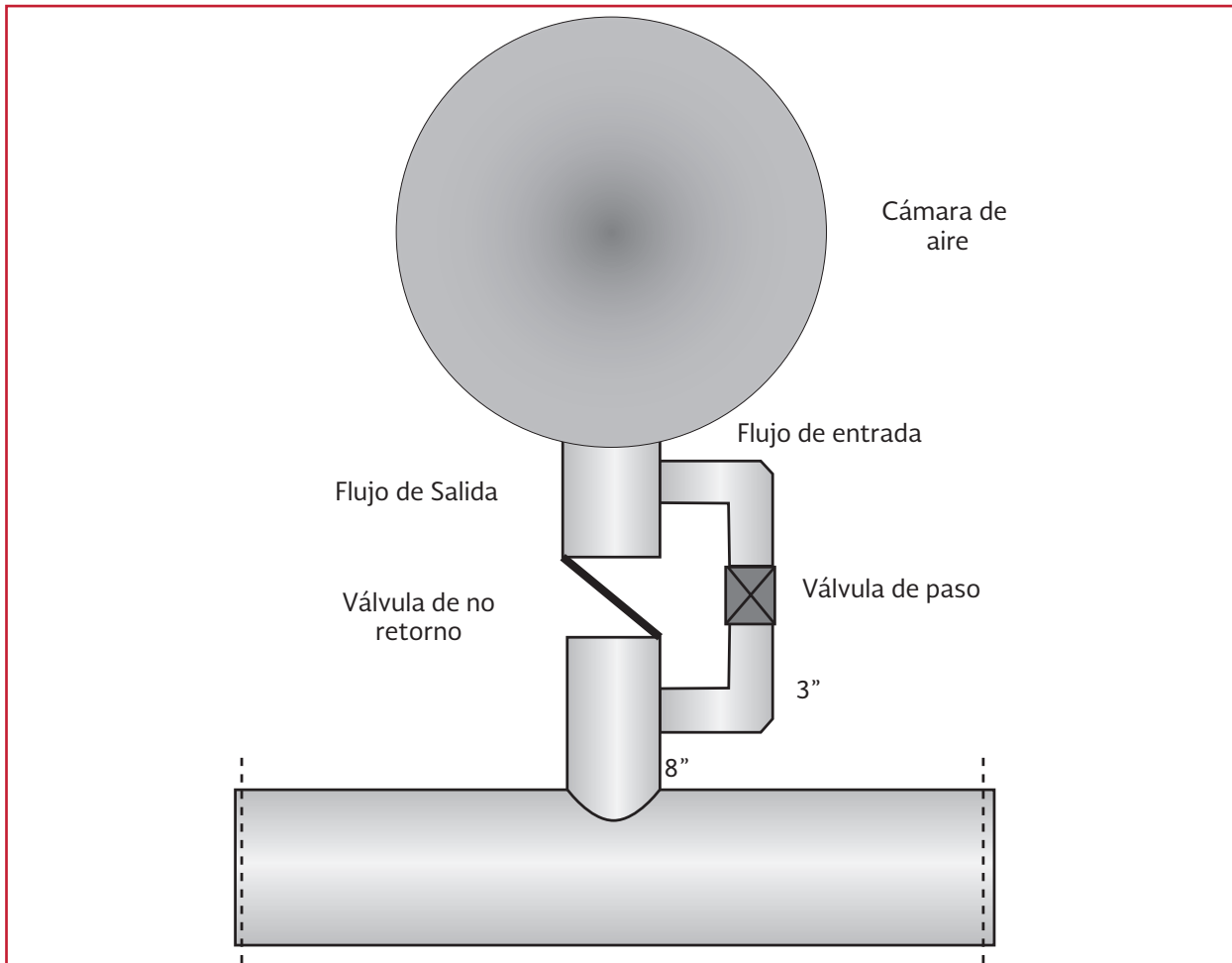


Tabla 4.7 Datos para los nodos

Nodo	Tipo	Cota	Nivel de agua
Cárcamo	Planta de bombeo	2 343.39	2 345.46
2	0	2 343.90	
3	0	2 345.00	
4	0	2 346.19	
5	0	2 346.53	
6	0	2 348.56	
7	0	2 349.07	
8	0	2 348.73	
9	0	2 350.76	
10	0	2 354.32	
11	0	2 357.20	
12	0	2 356.10	
13	0	2 361.78	
Tanque	Descarga libre	2 364.15	2 365.00

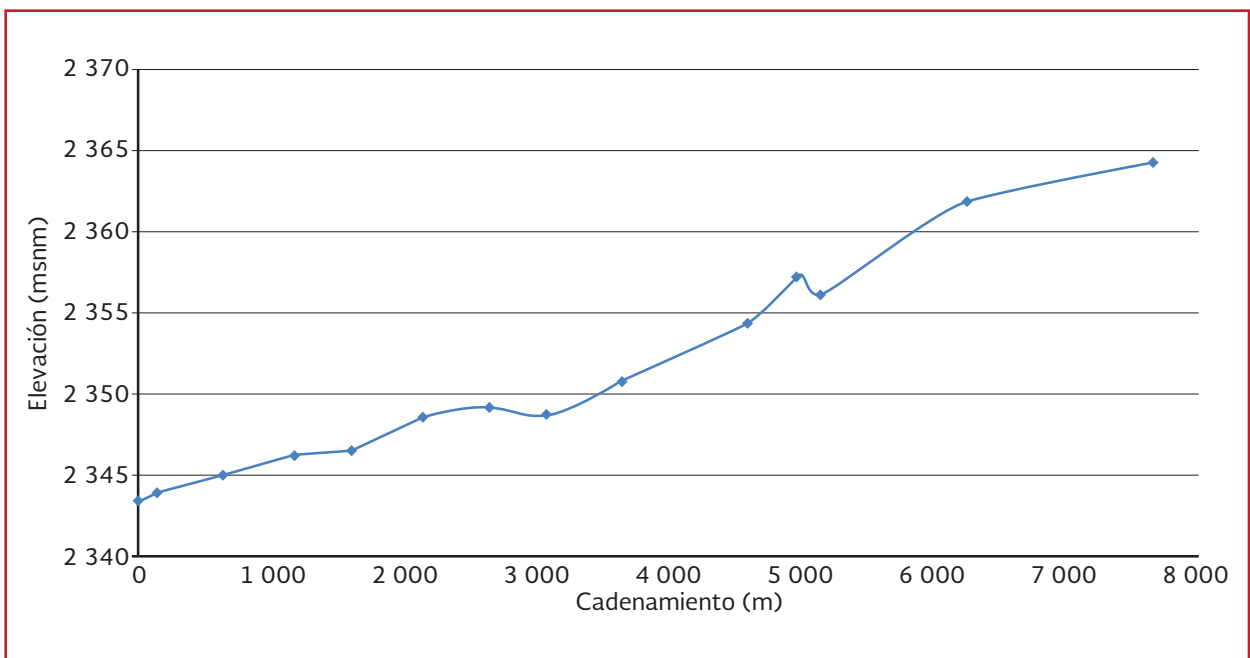
Tabla 4.8 Datos para la estación de bombeo

Estación de bombeo	
Cantidad de bombas	3
Velocidad de rotación (r/min)	1 770.00
Potencia de motor (HP)	200
Gasto de diseño por bomba (L/s)	167
Pérdidas de carga en la estación de bombeo (m)	0.8
Gasto correspondiente a las pérdidas anteriores (L/s)	500.0
Cota del nivel de agua en la toma (m)	1 754.24

Tabla 4.9 Datos para los tramos de la conducción

Tramo	Del nodo	Al nodo	Longitud	Resistencia nominal	Diámetro exterior	Diámetro interior	Espesor
			m	kg/cm ²	mm	mm	mm
1	Cárcamo	2	150.00	9.00	609.6	519.30	45.15
2	2	3	500.00	8.00	609.6	531.00	39.30
3	3	4	533.33	7.00	609.6	537.80	35.90
4	4	5	433.33	7.00	609.6	537.80	35.90
5	5	6	533.34	5.60	609.6	551.60	29.00
6	6	7	500.00	5.60	609.6	551.60	29.00
7	7	8	433.33	5.60	609.6	551.60	29.00
8	8	9	566.67	4.50	609.6	562.80	23.40
9	9	10	950.01	4.50	609.6	562.80	23.40
10	10	11	366.68	3.60	609.6	572.20	18.70
11	11	12	183.34	3.60	609.6	572.20	18.70
12	12	13	1 100.01	3.60	609.6	572.20	18.70
13	13	Tanque	1 400.00	3.60	609.6	572.20	18.70

Ilustración 4.8 Perfil longitudinal de la tubería del Ejemplo 2



4.2. EJEMPLO 2: CONDUCCIÓN SIMPLE DE POLIETILENO

El perfil topográfico de la tubería se presenta en la ilustración 4.8 y los datos se presentan en la Tabla 4.7. La conducción tiene una longitud de 7 650 m y vence un desnivel de aproximadamente 21 m. La tubería es de polietileno de 24 pulgadas de diámetro nominal y de una relación de diámetro (*RD*) que varía desde 13.5 a la salida de la planta, hasta 32.5 al final de la conducción. La Tabla 4.9 presenta los datos de la tubería, por tramos de igual clase de tubo, empezando desde la planta de bombeo. Los datos de la estación de bombeo se presentan en la Tabla 4.8.

4.2.1. ANÁLISIS DEL FLUJO PERMANENTE

Con el fin de conocer las condiciones de operación normal de la conducción, se procede a efectuar la simulación hidráulica de la misma en flujo permanente. El gasto y la presión en la planta obtenidos se muestran en la tabla 4.10.

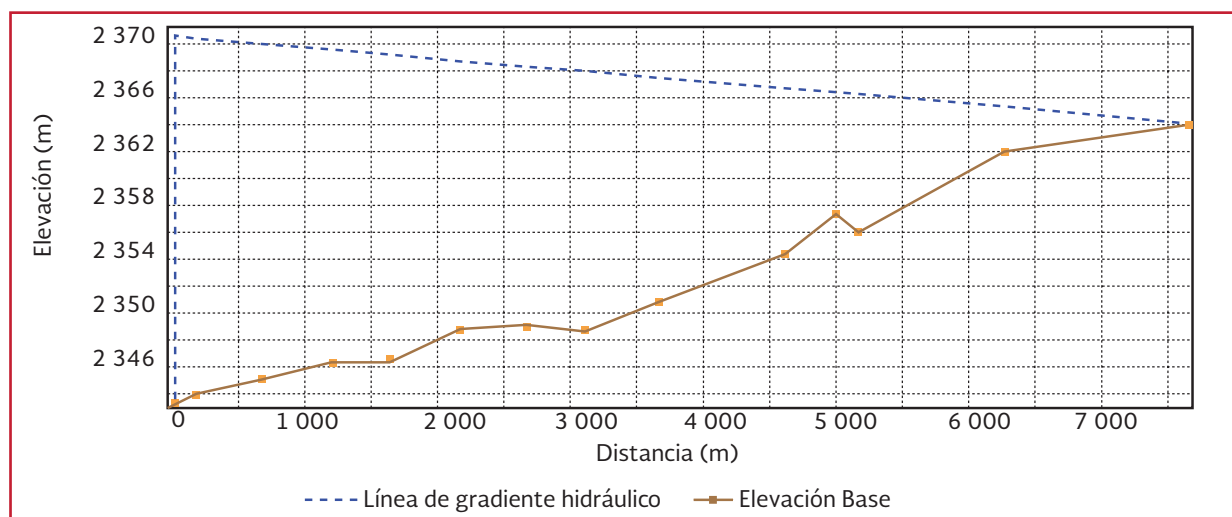
Como se observa en la tabla 4.10, el gasto de bombeo con tres bombas en operación es muy cercano al gasto de diseño de 500 L/s, lo que significa que la bomba está bien seleccionada.

Los resultados obtenidos de la simulación de flujo permanente (ilustración 4.9) fueron usados como condiciones iniciales para la simulación del transitorio.

Tabla 4.10 Gastos y presión obtenidos para flujo permanente

Número de bombas	Elevación del nivel de agua msnm	Gasto L/s	Presión en la planta de bombeo m
3	2 343.46	505	44.73
2	2 343.46	412	37.17
1	2 343.46	247	27.13

Ilustración 4.9 Resultados del análisis en estado permanente



4.2.2. TRANSITORIO GENERADO POR EL PARO DE LAS BOMBAS

4.2.2.1. Cálculo de la velocidad de propagación de la onda de presión

Puesto que la tubería de polietileno de la conducción es de pared gruesa (su relación D/d es menor de 25), para el cálculo de la velocidad de propagación de la onda de presión a se utiliza la ecuación 1.2. La tabla 4.11 muestra los valores calculados de a para los diferentes tramos de tubería presentes en la conducción, usando los siguientes valores:

$$\begin{aligned} E_{\text{agua}} &= 2\,074.1 \text{ MPa (21\,150 kg/cm}^2\text{)} \\ E_{\text{mat}} &= 1\,667.1 \text{ MPa (17\,000 kg/cm}^2\text{)} \\ \mu &= 0.41 \end{aligned}$$

4.2.2.2. Cálculo del momento de inercia del grupo motor-bomba

Los datos del momento de inercia WR^2 (o GD^2) de las partes rodantes (rotor del motor eléctrico e impulsor de la bomba) deben tomarse de los catálogos del fabricante. Para este caso, el momento de inercia se calculó con la ecuación 4.4, de Linton:

$$\begin{aligned} GD^2 &= 600 \frac{P(\text{HP})^{1.435}}{N(\text{r/min})} \\ &= 600 \frac{200^{1.435}}{1800} \quad \text{Ecuación 4.4} \\ &= 25.63 \text{ kg m}^2 = 251.34 \text{ N m}^2 \end{aligned}$$

4.2.2.3. Simulación del transitorio

Se simuló el transitorio sin medio de control alguno y suponiendo válvulas de no retorno en las bombas. La ilustración 4.10 muestra las líneas de presiones máximas y mínimas resultantes del transitorio en la conducción.

La tabla 4.12 presenta un resumen de las presiones máximas obtenidas y su comparación con la presión nominal (la resistencia) de la tubería. Como se observa en esta tabla, las presiones máximas quedan siempre por debajo de la resistencia de los tubos y la tubería es segura para las sobrepresiones del transitorio, sin que se requiera medios de control.

Se observa también que prácticamente en toda la conducción se presentan presiones negativas, que en la parte final llegan a la presión de vaporización del agua, de -0.95 Mpa (-9.75 kg/m², indicado en la sección 1.5). Se requiere entonces analizar si la tubería puede soportar estas presiones negativas.

4.2.3. CONDICIONES DE RESISTENCIA DE LA TUBERÍA CONTRA PRESIONES NEGATIVAS

La tabla 4.13 muestra los valores de P_{cr} calculados por la ecuación 3.3 para las diferentes clases de tubo presentes en la conducción con $E = 1\,667.13$ MPa ($17\,000$ kg/cm²) y $\mu = 0.41$ (polietileno). La máxima presión externa posible sería de 0.098 MPa (1 kg/cm²), suponiendo un vacío absoluto, -0.098 MPa (-1.0 kg/cm²) dentro de la tubería y una presión externa atmosférica (0 MPa). Como se observa en la tabla, la presión crítica es mayor para todas las clases de tubería presentes en la conducción y la conducción es segura contra las presiones negativas, sin que se requiera medio de control alguno.

4.2.4. CONCLUSIÓN PARA EL EJEMPLO 2

Las presiones máximas durante en el transitorio más adverso no sobrepasan la resistencia de la tubería. Las presiones mínimas que se presentan no pueden colapsar la tubería. La conducción no requiere medios de control de transitorios.

Tabla 4.11 Cálculo de la velocidad de propagación para una tubería de polietileno

Tramo	Longitud	Diámetro exterior	Diámetro interior	Espesor	D/d	a
	m	mm	mm	mm		m/s
1	150.00	609.6	519.30	45.15	11.5017	368.0299
2	500.00	609.6	531.00	39.30	13.5115	341.2185
3	533.33	609.6	537.80	35.90	14.9805	324.9521
4	433.33	609.6	537.80	35.90	14.9805	324.9521
5	533.34	609.6	551.60	29.00	19.0207	289.9552
6	500.00	609.6	551.60	29.00	19.0207	289.9552
7	433.33	609.6	551.60	29.00	19.0207	289.9552
8	566.67	609.6	562.80	23.40	24.0513	258.9550
9	950.01	609.6	562.80	23.40	24.0513	258.9550
10	366.68	609.6	572.20	18.70	30.5989	230.3818
11	183.34	609.6	572.20	18.70	30.5989	230.3818
12	1 100.01	609.6	572.20	18.70	30.5989	230.3818
13	1 400.00	609.6	572.20	18.70	30.5989	230.3818

Ilustración 4.10 Ejemplo 2: líneas envolventes de presiones máximas y mínimas en el transitorio

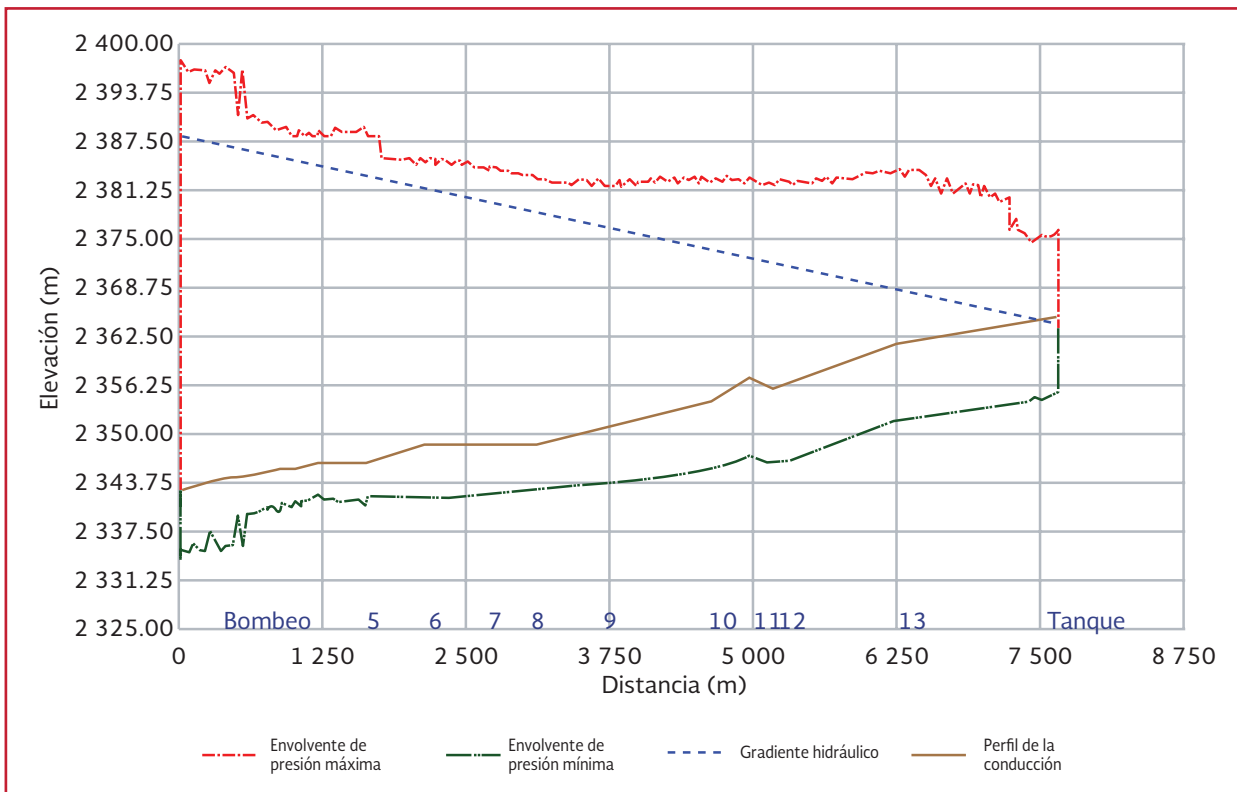


Tabla 4.12 Presiones máximas del transitorio y resistencia de la tubería

Cadenamiento	Presión normal de operación	Presión máxima	Presión negativa	Resistencia nominal
m	m	m	m	m
20	44.7	53.8	-8.9	90
170	43.7	53	-9.4	80
670	41.1	45.8	-5.2	70
1 204	38.2	42.8	-5.6	70
1 637	36.6	41.1	-6.8	56
2 170	32.8	36.6	-7	56
2 706	30.7	35.3	-7	56
3 104	29.8	34.2	-7.1	45
3 818	24.9	31.3	-8.9	45
4 620	19.4	28.4	-10	36
5 170	15.9	25.9	-10	36
5 229	15.4	26.2	-10	36
6 330	6.5	22.3	-10.1	36

4.3. EJEMPLO 3

Se quiere diseñar la línea de conducción cuyo trazo se muestra en la ilustración 4.11 para abastecer a los fraccionamientos A y B que se indican. La fuente de abastecimiento es un pozo profundo con una capacidad máxima de explotación de 90 L/s, a una profundidad del nivel dinámico de 30 m. El gasto de diseño para la conducción es igual a 79.86 L/s. A partir del equipo de bombeo y a lo largo de 4 000 m existe un tubo de fibrocemento de 300 mm de diámetro, clase A-10, con una velocidad de la onda de presión de 1 108 m/s y una rugosidad absoluta de 0.025 mm. A partir del cadenamiento 4+000 hasta el tanque B existe un tubo de fibrocemento de 300 mm de diámetro, clase A-7, con una

velocidad de la onda de presión de 1 038 m/s y una rugosidad absoluta de 0.025 mm.

En el cadenamiento 7+300 se tiene la interconexión hacia el tanque A, con un tubo de fibrocemento de 100 mm de diámetro, clase A-7, con una longitud de 10 m, una velocidad de la onda de presión de 1 135 m/s y una rugosidad absoluta de 0.030 mm.

En el pozo opera una bomba vertical marca Nassa Johnston de 4 pasos, impulsor número NJ 050320 y 11 pulgadas de diámetro, trabajando a 1 770 r/min. El momento de inercia del grupo motor-bomba es de 44.12 N m² (4.5 kg m²). Los datos de la curva de la bomba se preentan en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Cálculo de la presión crítica de colapso por clase de tubo

RD	Diámetro medio	Espesor e	P_{cr}
	mm	mm	kg/cm ²
32.5	581	45.2	1.37
26	575	39.3	2.77
21	566	35.9	5.48
17	556	29.0	11.09

Ilustración 4.11 Trazo de la red de conducción para abastecer de agua a los fraccionamientos A y B

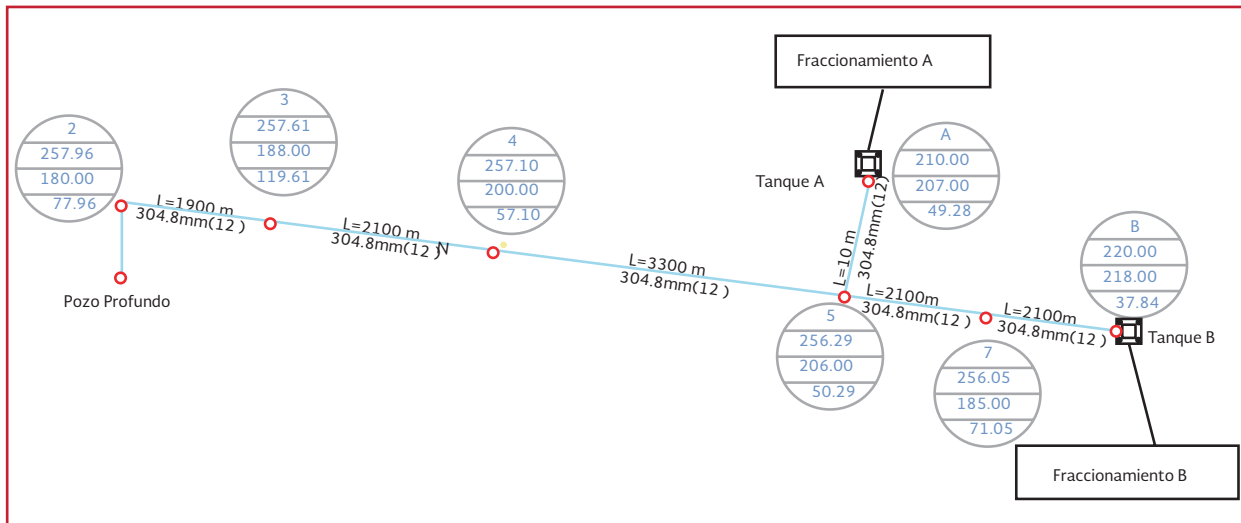


Ilustración 4.12 Funcionamiento hidráulico con el equipo seleccionado, con la derivación al tanque A, para tubo de fibrocemento de 300 mm de diámetro nominal

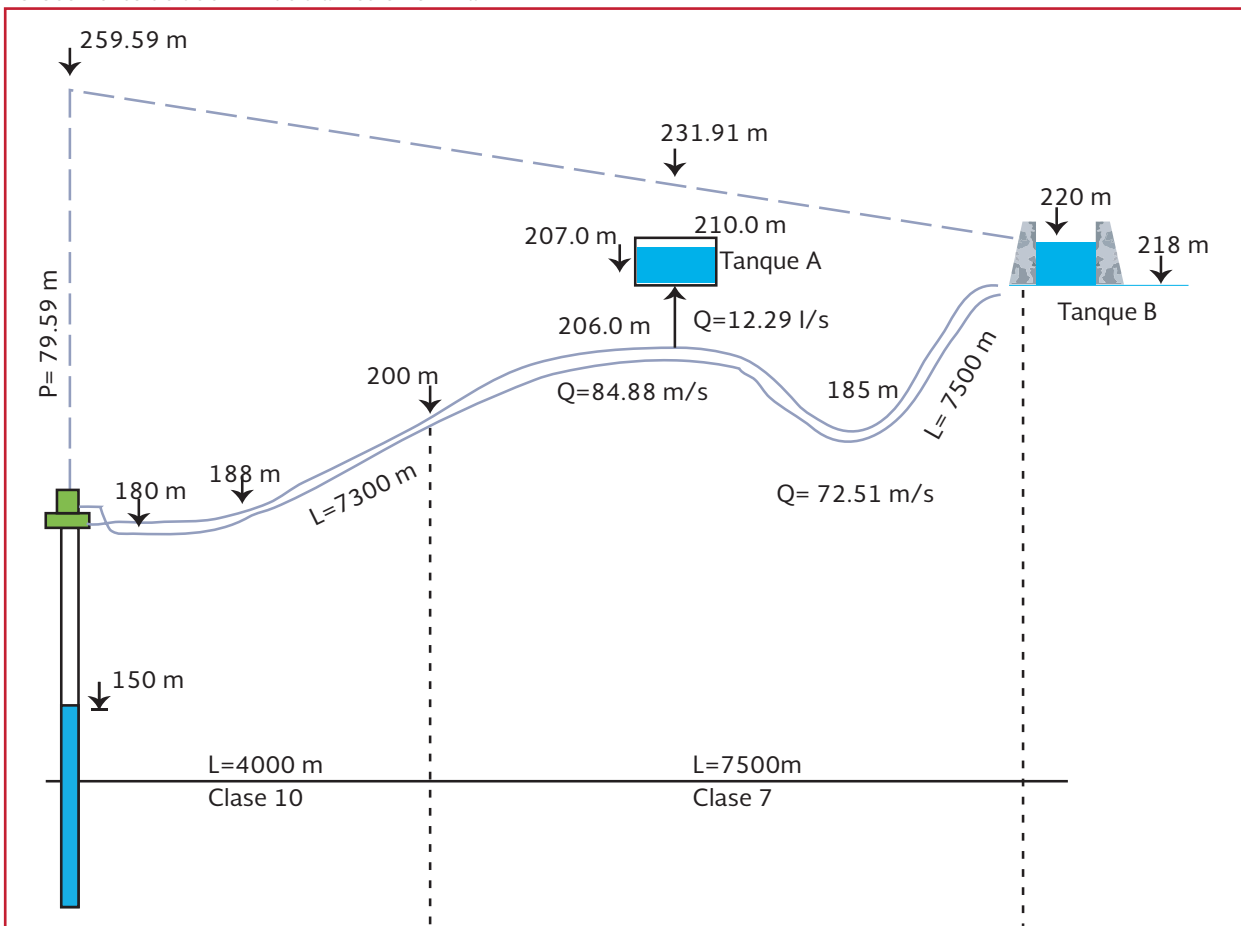


Tabla 4.14 Curva de bomba para el ejemplo

Por paso		Curva para cuatro pasos	
Carga	Gasto	Carga	Gasto
m	L/s	m	L/s
32.61	63.08	130.45	63.08
24.87	75.7	119.48	75.70
26.21	88.31	104.85	88.31
21.95	100.93	87.78	100.93

4.3.1. POLÍTICA DE OPERACIÓN

Es difícil garantizar que en todo momento las dos descargas funcionen simultáneamente; hay que tomar eso en cuenta en caso de que todo el gasto se vaya hacia una sola descarga. Por razón de seguridad se debe definir que el gasto total de bombeo se va exclusivamente hacia la entrega con mayor gasto de demanda.

El mayor gasto de derivación se presenta hacia el fraccionamiento B, por lo que la derivación se diseña de tal manera que el tanque A se llene primero que el B. Así, podrá suspenderse el bombeo cuando este último esté lleno.

El corte del servicio hacia el tanque B se hará apagando el equipo de bombeo de la planta, es decir, en el tanque B no se operarán válvulas de control ni seccionamiento.

El desplante del tanque A tiene una elevación menor a la del tanque B. Si el fenómeno transitorio lo requiere, se propone conectar este tanque para que funcione como un tanque unidireccional, colocando un tubo de vaciado de 300 mm de diámetro y 10 m de longitud, con una válvula de no retorno y paralelo al de llenado.

4.3.2. CRITERIOS DE MODELACIÓN

De acuerdo con la política de operación, se propone modelar el transitorio considerando en todos los casos que el tanque A puede funcionar como un tanque unidireccional, en las siguientes situaciones:

1. Paro accidental del equipo de bombeo sin dispositivo de alivio, considerando el bombeo total al tanque B, situación que se presenta cuando el tanque A se ha llenado
2. Si en la situación 1 se presentan presiones inadecuadas, se buscará el dispositivo de alivio más adecuado para resolver el problema. Esto se logra incluyendo repetidas veces el dispositivo y corriendo el programa para simular el transitorio debido a un paro accidental del equipo de bombeo
3. Si en la situación 1 se presentan presiones inadecuadas, se simula el transitorio para el caso de paro accidental del equipo de bombeo, con el dispositivo de alivio encontrado en el paso número 2, considerando las descargas a los tanques A y B
4. Si en el paso número 3 las presiones son inadecuadas, se buscará el dispositivo de alivio más apropiado para resolver el problema. Esto se logra incluyendo repetidas veces el dispositivo y corriendo el programa para simular el transitorio debido a un paro accidental del equipo de bombeo

El dispositivo que se escoja en este punto también deberá resolver adecuadamente el transitorio para el caso de paro de equipo con bombeo total al tanque B.

La ilustración 4.12 muestra la línea piezométrica con flujo permanente hacia los tanques A y B a la vez, que es el escenario para las corridas del programa de cómputo de análisis transitorio. Se consideró en todos los casos un paro repentino del equipo de bombeo y una válvula de no retorno en el equipo de bombeo.

4.3.3. ANÁLISIS TRANSITORIO

En la ilustración 4.13 se muestran las envolventes de presiones máximas y mínimas para cuando no existe dispositivo de alivio, considerando entrega del agua únicamente al tanque B, situación que se presenta cuando el tanque A se ha llenado. En este caso se presentan presiones inadecuadas tanto positivas como negativas. Por consiguiente, debe buscarse un dispositivo aliviador del fenómeno transitorio.

La ilustración 4.14 muestra el transitorio del pozo profundo al tanque A, cuando ambos tanques están en operación.

Para evitar las presiones negativas, se propone una cámara de aire junto al equipo de bombeo con las siguientes características: un tubo de conexión de 300 mm de diámetro, longitud de 10 m, sin pérdidas especiales de entrada o salida del flujo; un desplante de la cámara a una elevación de 182 m, un diámetro de la cámara de 2.0 m con una altura de 3.0 m, un tirante de agua de 2.0 m y 1.0 m de aire. En la ilustración 4.15 se muestra la envolvente de cargas, donde se observa que las cargas no causan problemas de presiones positivas ni negativas. En la cámara se obtiene un tirante mínimo de agua de 0.61 m y un tirante máximo de 2.0 m, indicando que la cámara propuesta es la solución al fenómeno transitorio.

En la ilustración 4.16 se muestra también la envolvente de cargas correspondiente al caso de que la cámara de aire propuesta funcione con descargas a los tanques A y B. En este caso, tampoco se presentan problemas en las presiones, y en la cámara se muestran aproximadamente los mismos valores del tirante máximo y mínimo generados en la corrida anterior.

Ilustración 4.13 Envoltorio de presiones, paro de bomba con descarga al tanque B

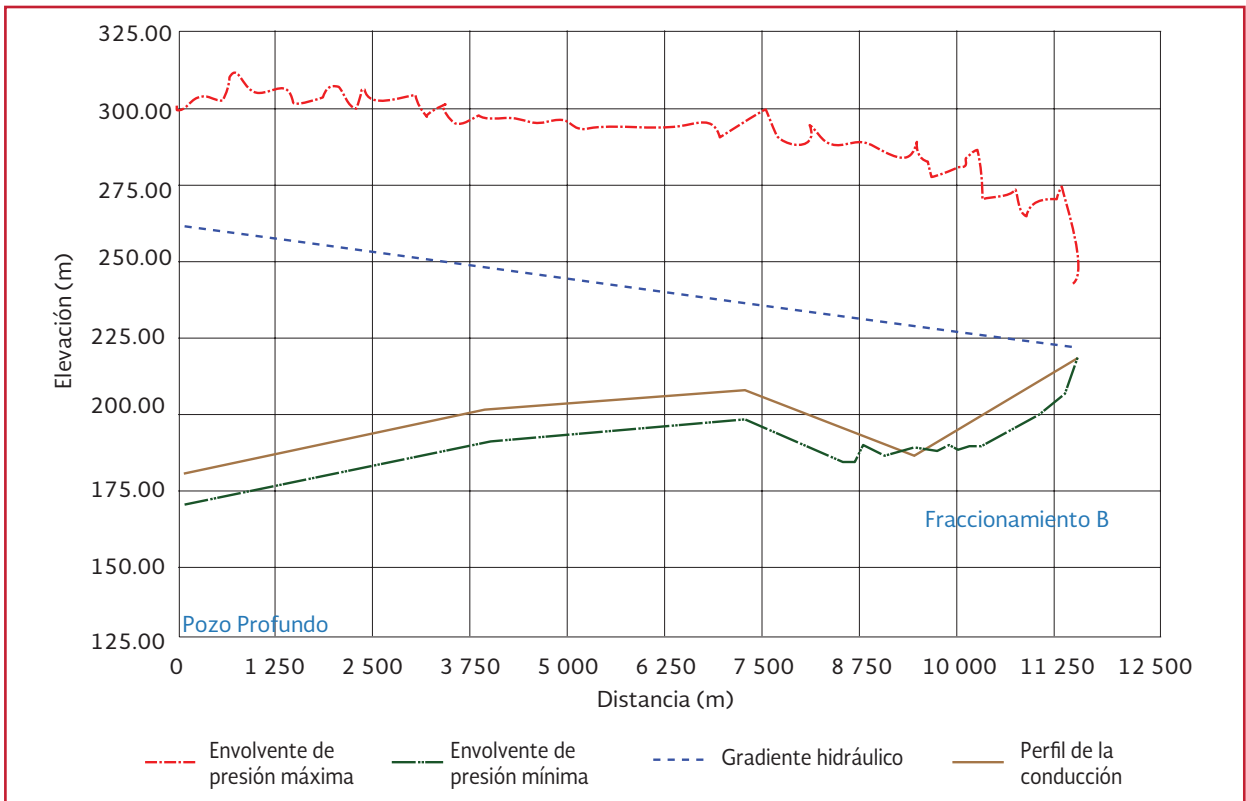


Ilustración 4.14 Envoltorio de presiones, paro de bomba con descarga al tanque A

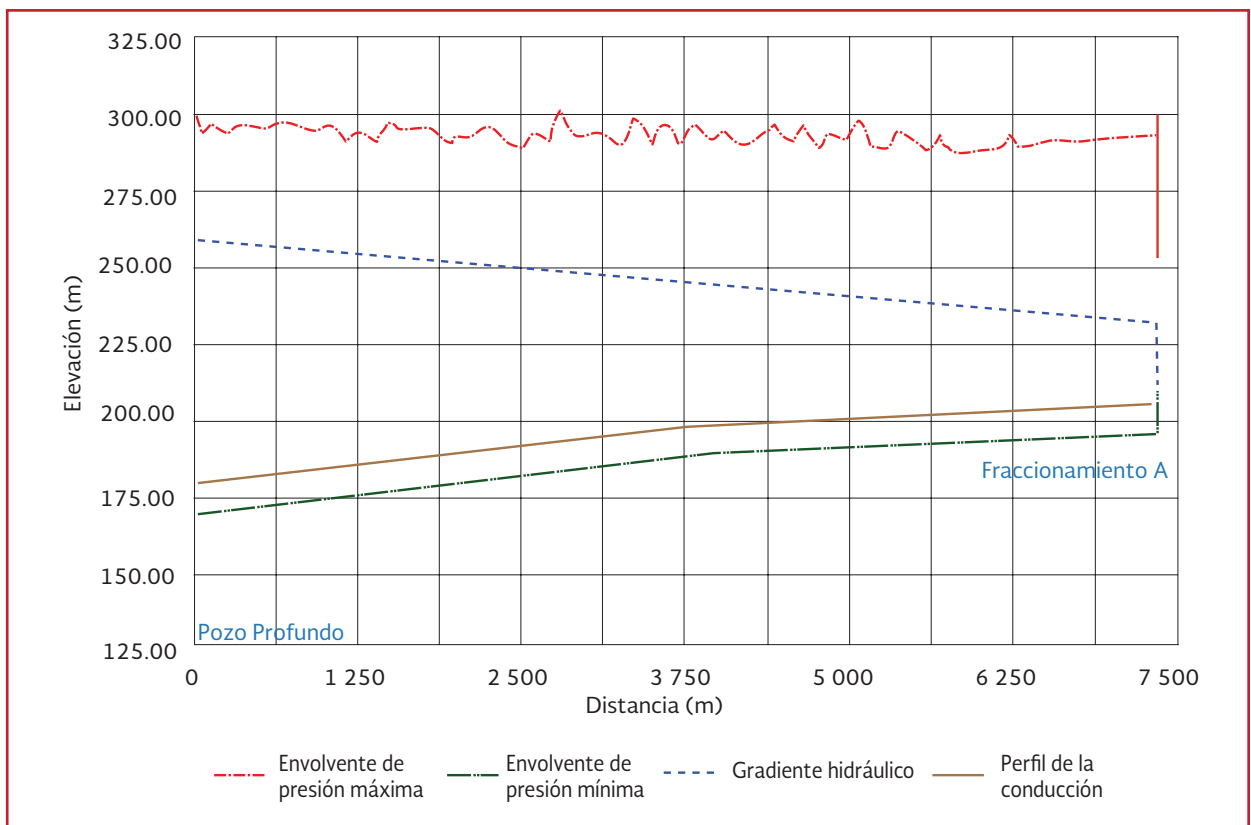


Ilustración 4.15 Envoltente de presiones, paro de bomba con cámara de aire y descarga al tanque B

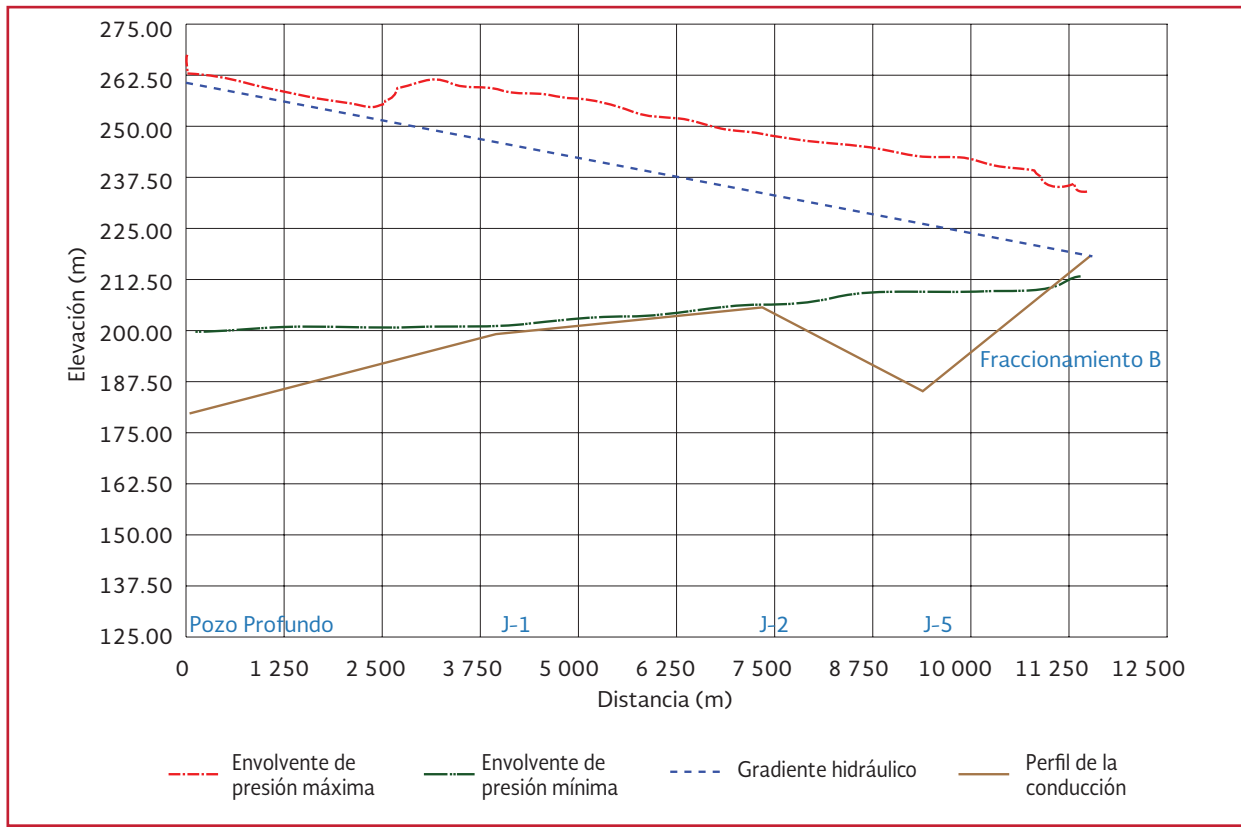
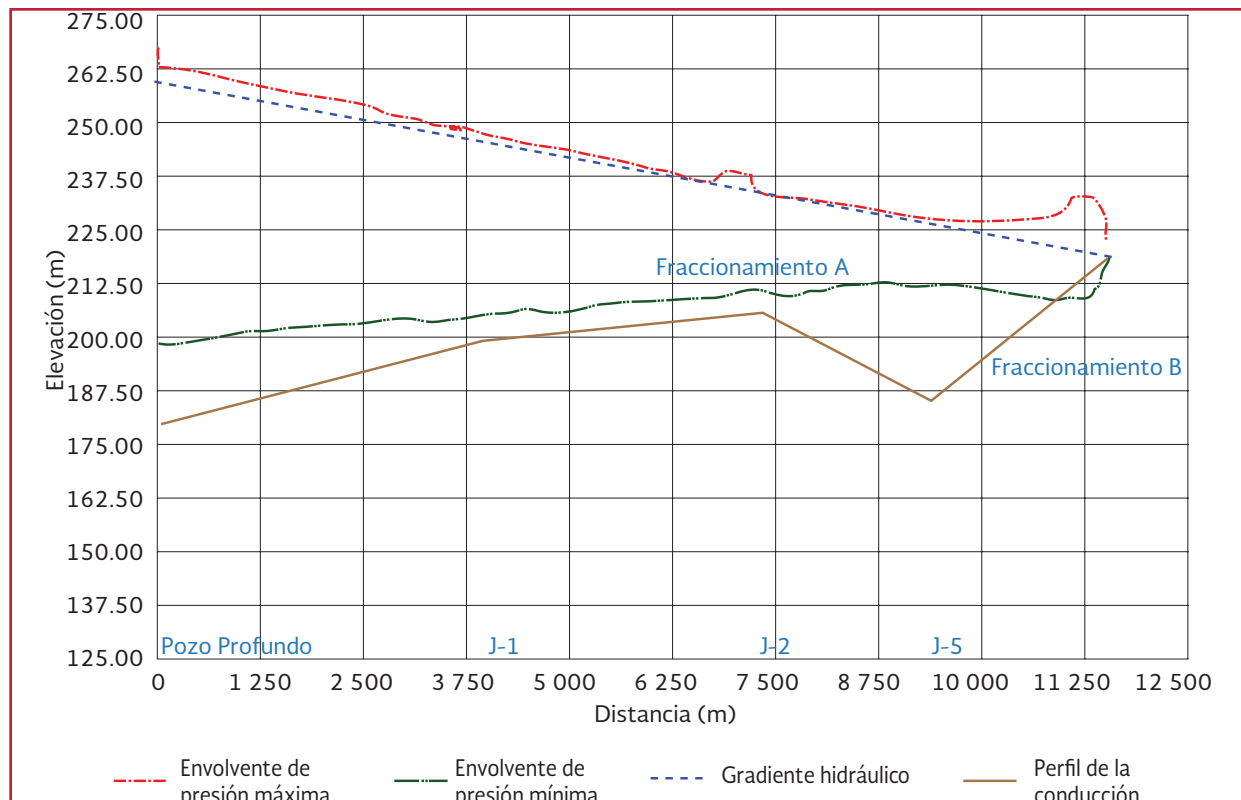


Ilustración 4.16 Envoltente de presiones, paro de bomba con cámara de aire y descargas a los tanques A y B



5

PROCEDIMIENTOS APROXIMADOS QUE NO REQUIEREN PROGRAMAS DE CÓMPUTO

5.1. GENERALIDADES

Se ha publicado gran número de procedimientos aproximados para estimar los efectos de los transitorios hidráulicos, expresados mediante fórmulas, gráficas y nomogramas que resuelven la sobrepresión o la depresión máxima del transitorio y otros parámetros del transitorio. Esos procedimientos son aproximados porque no toman en cuenta algunos de los factores que intervienen en el transitorio, o los simplifican. Por ejemplo, no consideran alguno o varios de los siguientes factores:

- Separaciones de columna líquida y sus efectos de sobrepresión adicional
- Influencia de las pérdidas de carga sobre el transitorio
- La inercia de los equipos de bombeo en su paro (suponen que paran instantáneamente)
- El tiempo de cierre de una válvula (suponen que cierra instantáneamente) y la variación del coeficiente de pérdidas en el cierre
- No pueden considerar transitorios en redes (consideran una tubería simple)
- Estiman los efectos del transitorio en un solo punto, por ejemplo, en un extremo de la tubería

- Consideran un solo medio de control de transitorios, por ejemplo, una cámara de aire solamente

Al no considerar esos factores, en algunos casos se puede llegar a resultados muy alejados de la realidad, en particular:

- Como muestra el análisis presentado en la primera parte de este libro, las separaciones de columna pueden generar sobrepresiones muy altas, mucho mayores que las que se producirían en un transitorio sin separaciones. Usar un método aproximado que no considera separaciones de columna tiene entonces el riesgo de subestimar la presión máxima que se presentaría en el transitorio y poner en peligro la conducción
- Las pérdidas de carga influyen de manera importante sobre los transitorios cuando la conducción es larga y la velocidad del flujo alta
- Gracias a la inercia de los equipos de bombeo, el transitorio generado por el paro de los mismos se hace más lento y las depresiones y sobrepresiones son menores. En ocasiones, la sola inercia de esos equipos puede ser suficiente para controlar los transitorios y no serán

necesarios otros medios de control. El efecto de la inercia de los equipos de bombeo es mayor cuando el desnivel entre la toma de las bombas y la descarga es bajo

- El cierre de una válvula nunca es instantáneo. En ocasiones la sola consideración del tiempo real del cierre en el análisis da como resultado que no se necesitan medios de control.

Por estas razones, los métodos aproximados pueden ser usados únicamente cuando se tiene la seguridad de que en el transitorio real se cumplen los supuestos del método y que la influencia de los factores que se desprecian es verdaderamente poca. Dado que esto pocas veces se puede asegurar, los métodos aproximados se usan ante todo en las etapas de prediseño.

5.2. LÍNEAS DE BOMBEO

En la ilustración 5.1 y la ilustración 5.2 se muestran los diagramas de Parmakian (1963), que proporcionan la sobrepresión y depresión máximas generadas por el paro de las bombas en una planta de bombeo cuando las bombas no están equipadas con válvulas de no retorno. Los diagramas se usan de la siguiente manera:

1. Se calcula la magnitud 2ρ con la expresión:

$$2\rho = \frac{av_o}{gH_o} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

donde:

v_o = velocidad de operación normal en la tubería (m/s)

H_o = carga en la operación normal (m)
 g = aceleración de la gravedad (m/s²)
 a = velocidad de la onda de presión (m/s²)

2. Se calcula la magnitud $K2L/a$, donde L es la longitud de la tubería en m , y K se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$K = \frac{137000N}{GD^2n} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

donde:

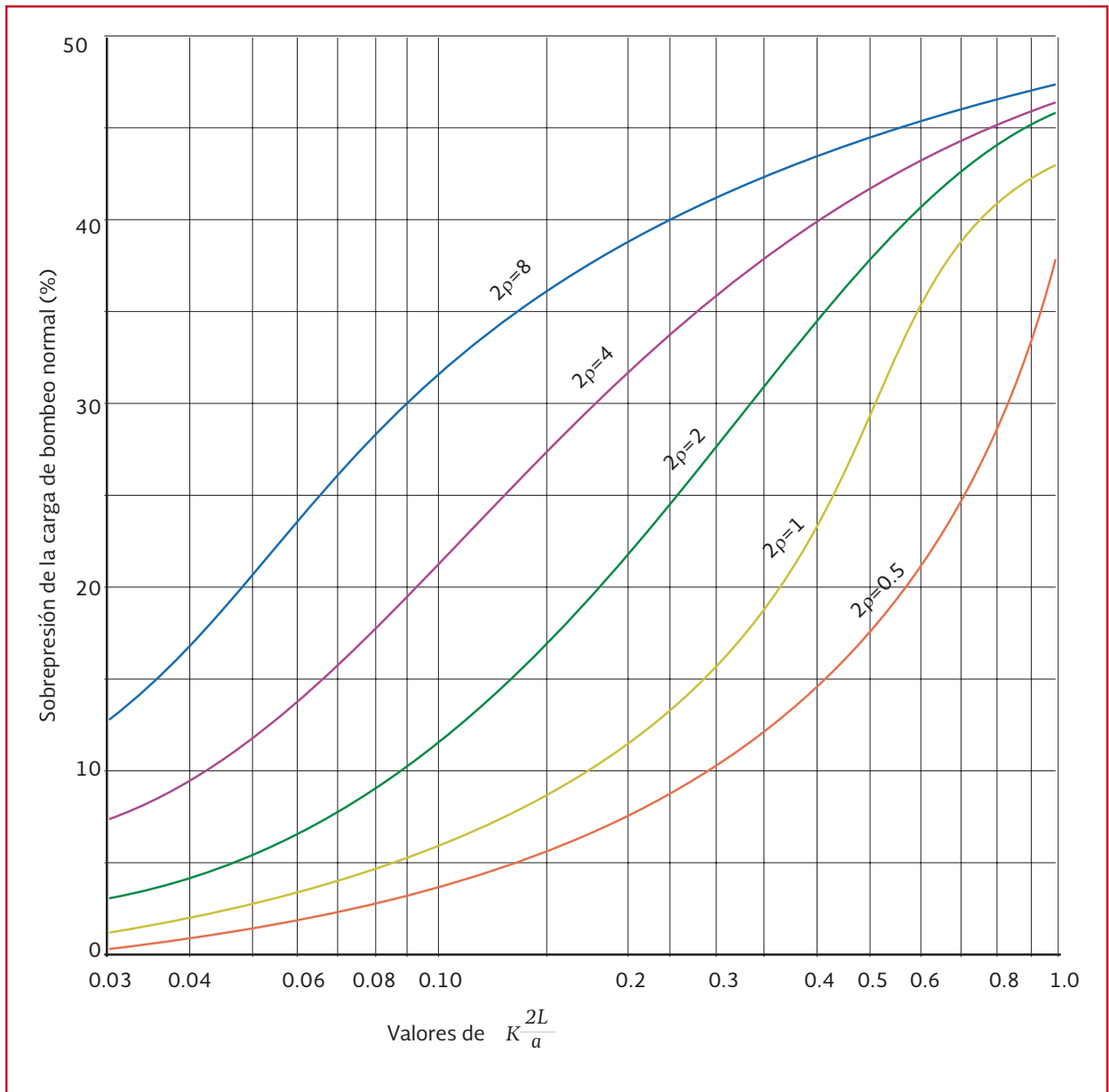
N = potencia de la bomba en operación normal (HP)
 GD^2 = momento de inercia de las partes rodantes del equipo de bombeo
 n = velocidad nominal de la bomba en r/min

3. Se encuentra sobre el eje horizontal el punto con abscisa igual al valor de $K2L/a$ calculado. Se traza una línea vertical por este punto hasta cruzar la curva correspondiente al valor 2ρ calculado. Se lee la ordenada del punto de cruce. Sea el valor leído A
4. El valor de la sobrepresión o depresión se encuentra como:

$$\Delta h = \frac{AH_o}{100} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Según Parmakian (1963), las sobrepresiones y depresiones para el punto de la mitad de la tubería se calculan como la mitad de las que se presentan en la planta. Los diagramas de

Ilustración 5.1 Diagrama de Parmakian: Sobrepresión en la bomba sin medios de control

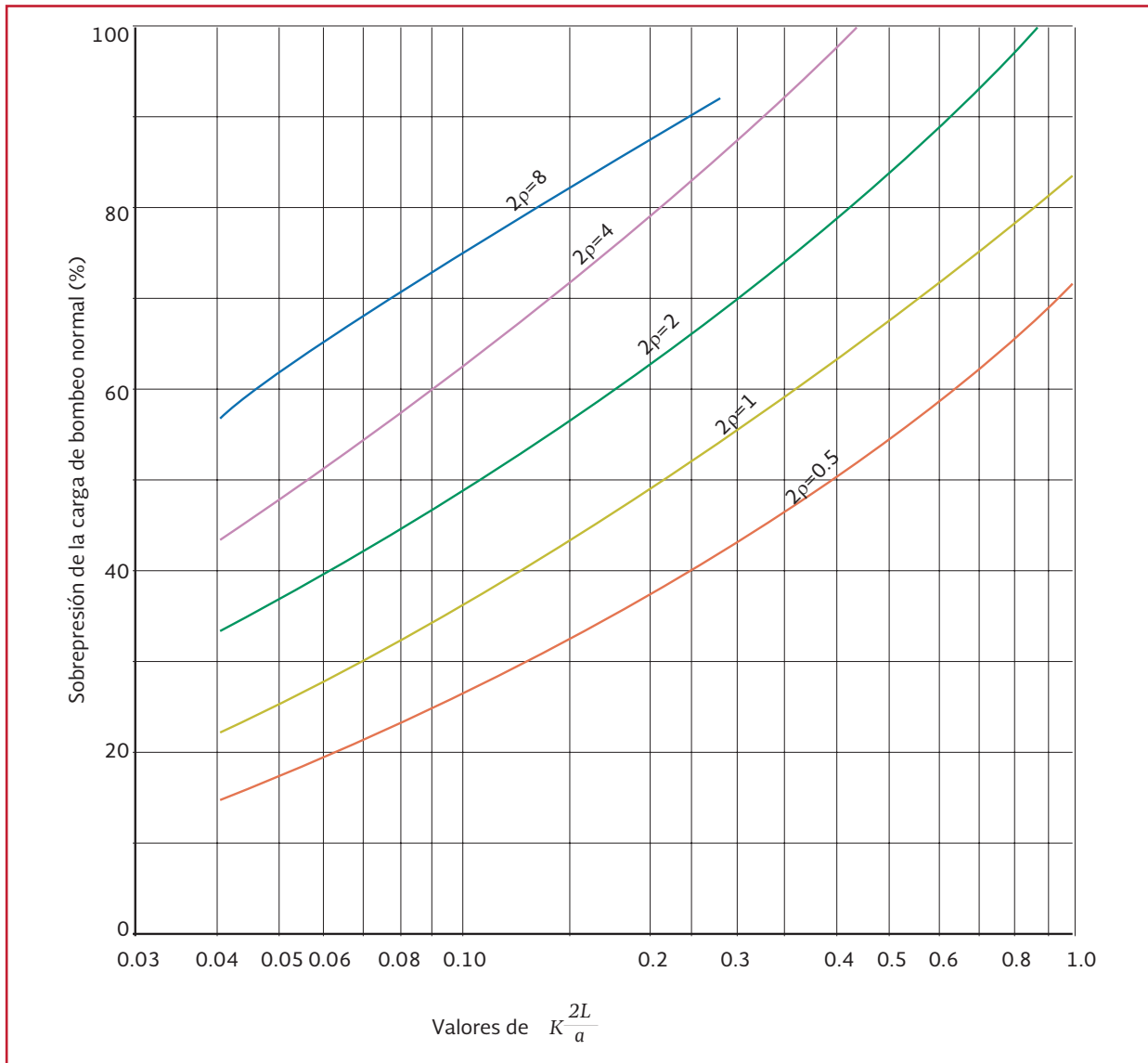


Parmakian desafortunadamente tienen poca aplicación, dado que en la mayoría de los casos las bombas en las plantas de bombeo sí tienen válvulas de no retorno.

El diagrama de la ilustración 5.3 da el gasto que descarga un tanque unidireccional y la sobrepresión en el punto de su ubicación (Stephenson, 1981). Con A se señala el área de la sección transversal de

la tubería. Los parámetros restantes se observan claramente en la ilustración. La parte superior proporciona la sobrepresión h' y la parte inferior, el gasto descargado Q . Para obtenerlos, se calculan primero $\frac{gh}{AV_0}$ y $\frac{\ell}{L}$, se localiza luego el valor de $\frac{gh}{AV_0}$ sobre el eje horizontal y se traza una línea vertical hasta que cruce las curvas correspondientes a $\frac{\ell}{L}$, para leer en el eje vertical los valores proporcionales a h' y Q .

Ilustración 5.2 Diagrama de Parmakian: depresión en la bomba sin medios de control



En los diagramas de la ilustración 5.4 a la ilustración 5.6 se dan las líneas envolventes de presión máxima y mínima en una tubería con cámara de aire (Stephenson, 1981). Los parámetros adimensionales asociados con estos diagramas son:

Parámetro de la tubería:

$$P = \frac{aV_0}{gH_0}$$

Parámetro de la cámara de aire:

$$B = \frac{V_0^2 AL}{gH_{AB} S}$$

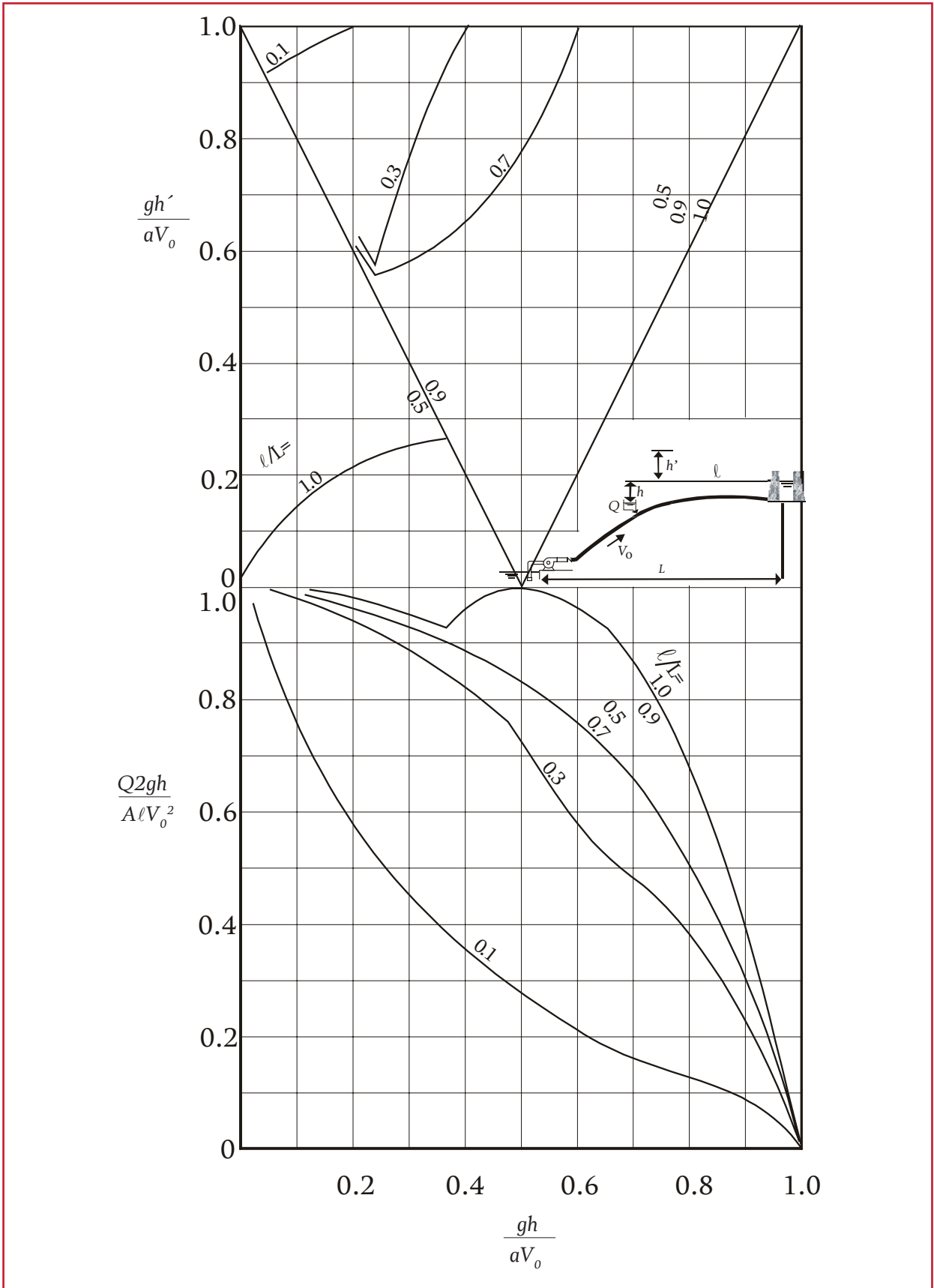
Parámetro de las pérdidas en la conexión de la cámara de aire:

$$C = \frac{Z}{H_0}$$

donde:

S = volumen de aire inicial en la cámara de aire

Ilustración 5.3 Diagrama de gasto descargado y sobrepresión en una línea con tanque unidireccional



Z = pérdidas de carga a la entrada de la cámara de aire correspondiente a una velocidad en la tubería igual a v_o . La pérdida de carga en la salida se desprecia

H_{ab} = la carga absoluta (incluyendo la presión atmosférica) en la cámara en operación normal:

Ilustración 5.4 Envoltentes de presión máxima y mínima en una línea de conducción con cámara de aire para $P=0.5$

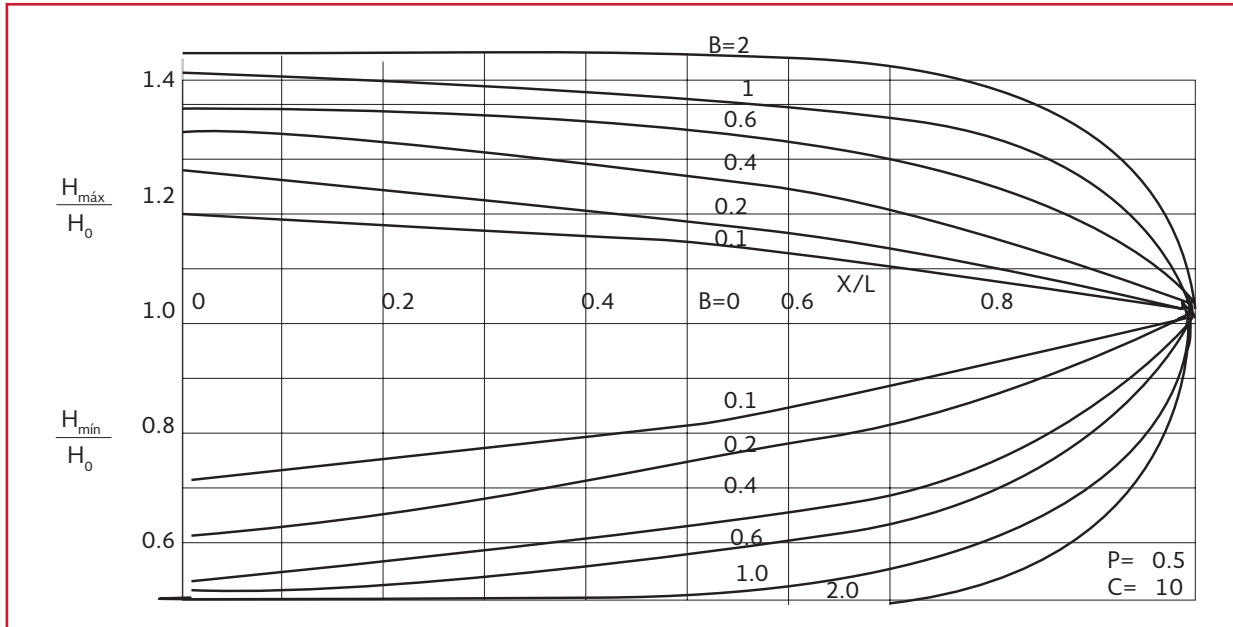


Ilustración 5.5 Envoltentes de presión máxima y mínima en una línea de conducción con cámara de aire para $P=1.0$

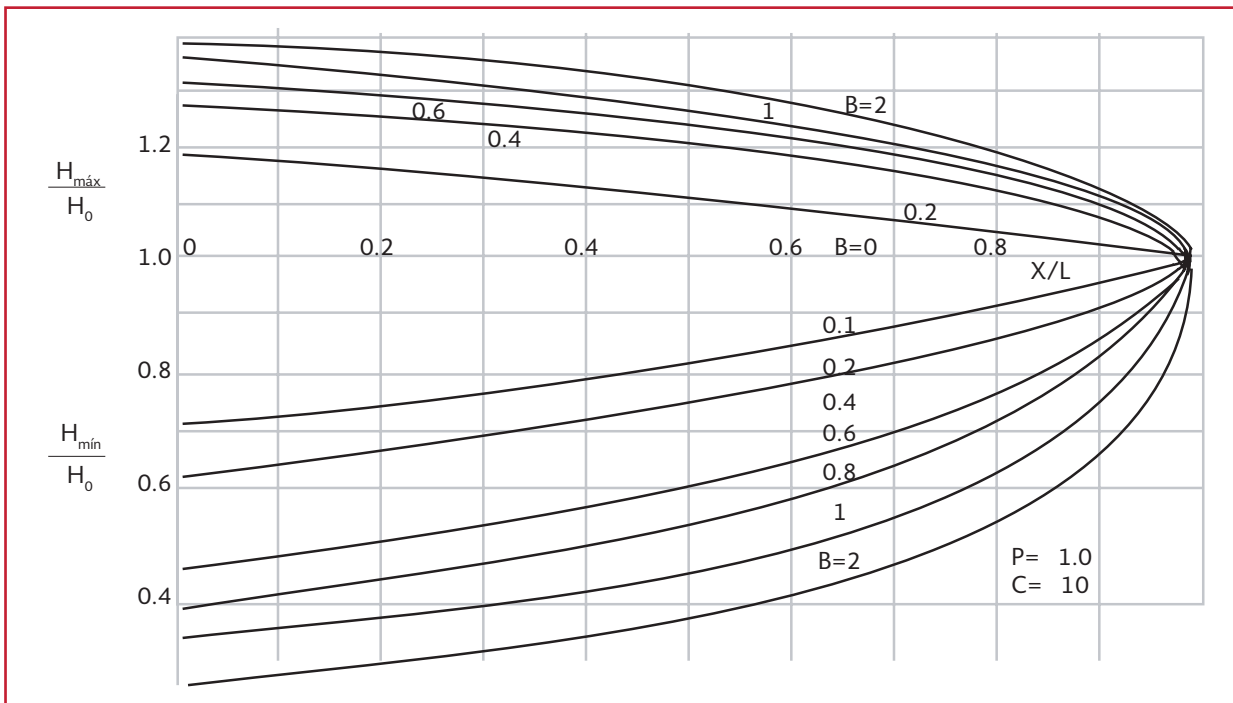
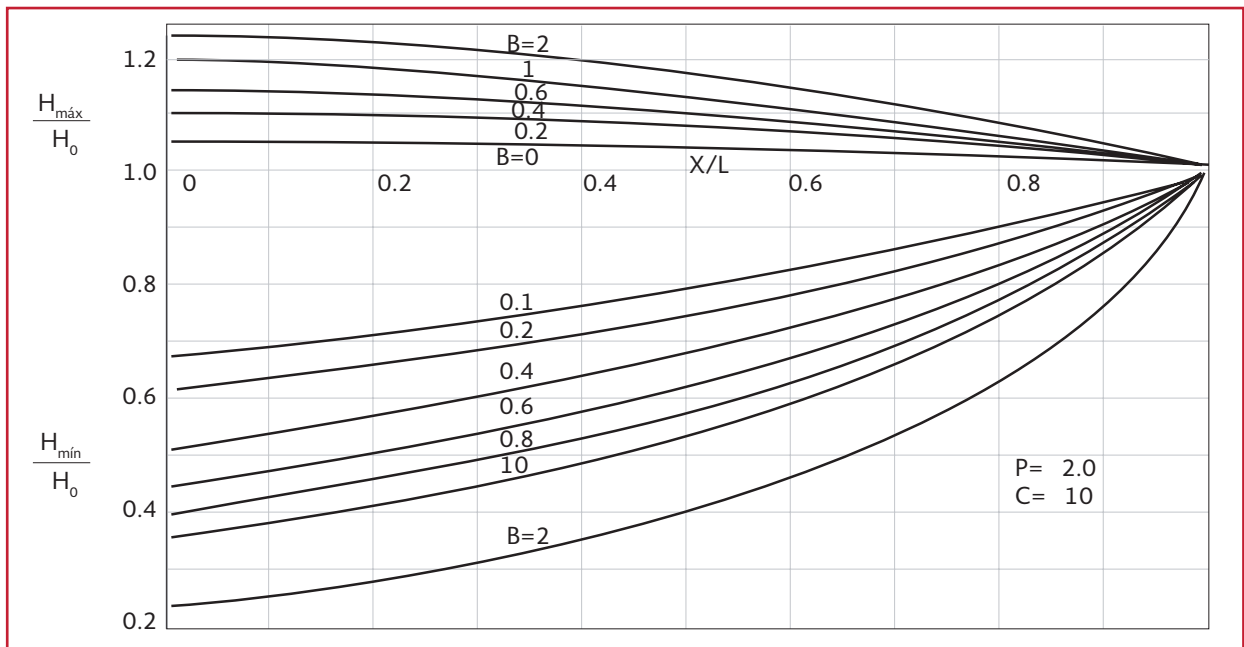


Ilustración 5.6 Envoltentes de presión máxima y mínima en una línea de conducción con cámara de aire para P=2.0



$$H_{ab} = H_0 + 10 \quad \text{Ecuación 5.4}$$

donde:

H_0 = carga en la cámara en operación normal (altura de presión en m)

Los restantes parámetros son los mismos que se usan en los diagramas de Parmakian. Los diagramas se usan de la siguiente forma:

- Se calcula el parámetro P
- Se considera un valor de la pérdida de carga en la conexión Z , se calcula C y se selecciona el diagrama correspondiente
- Se grafica el perfil de la conducción sobre el diagrama seleccionado
- Se selecciona la curva envolvente de presión mínima que se encuentra más cerca de la línea del perfil sin cruzarlo. Se lee el valor de B y la curva de sobrepresiones que le corresponde
- El valor de B obtenido se usa para despejar el volumen de aire inicial S

Las sobrepresiones dependen de las pérdidas a la entrada de la cámara representadas por C . El proceso en el diseño es minimizar las sobrepresiones, suponiendo C aproximadamente igual a 10 (o más). Si la sobrepresión obtenida no puede ser tolerada, se selecciona un valor de B más pequeño (correspondiente a un mayor volumen de aire) que el indicado para controlar las presiones mínimas. El volumen máximo del aire se presenta con presión mínima en la cámara y es igual a:

$$S \left(\frac{H_{ab}}{H_{ab,min}} \right)^{\frac{1}{1.2}}$$

donde $H_{ab,min}$ es la carga mínima absoluta en la cámara. La capacidad de la cámara debe ser mayor que este valor para evitar que el aire escape a la tubería.

En la ilustración 5.4, ilustración 5.5 e ilustración 5.6 el eje horizontal representa la longitud de la tubería, y cada curva representa una envolvente que corresponde a un diferente valor de B , P y

B son parámetros numéricos que se definen en el texto.

Fórmula de Gandenberger para conducción con cámara de aire:

$$W_{max} = \frac{Q_o^2}{gA_T} L \left[\frac{H_o + H_a}{H_g + H_a} \right]^2 \frac{H_{min} + H_a}{(H_o - H_{min})^2}$$

Ecuación 5.5

donde:

- W_{max} = volumen máximo que alcanza el aire en la cámara en el transitorio en m^3
- Q_o = el gasto en la tubería en operación normal en m^3/s
- g = aceleración de la gravedad en m/s^2
- L = longitud de la tubería en m
- A_T = área de la sección transversal de la tubería en m^2
- H_o = carga de las bombas en la operación normal en m
- H_g = carga estática en m
- H_{min} = carga mínima que se pretende en la planta de bombeo, en m
- H_a = presión atmosférica en kg/cm^2 (0.098 MPa)

El volumen del aire en operación normal W_o se obtiene aplicando la ley de Boyle-Mariotte:

$$W_o = \frac{W_{max} (H_{min} + H_a)}{H_o + H_a} \quad \text{Ecuación 5.6}$$

En la ecuación 5.6 se desprecia la diferencia de cotas entre la cámara y el nivel del agua en la toma.

Para una conducción con torre de oscilación en la planta de bombeo, pueden usarse las siguientes expresiones aproximadas (Meunier, 1980):

$$\frac{H_d}{H_{max}} = 1 - \frac{2}{3}k + \frac{1}{9}k^2 \quad \text{Ecuación 5.7}$$

$$\frac{H_m}{H_{max}} = 0.973 - 1.326k + 0.654k^2 \quad \text{Ecuación 5.8}$$

donde H_d y H_m son, respectivamente, el descenso y el ascenso máximos del nivel de agua en la torre con respecto al nivel estático (ilustración 5.7). $H_{máx}$ y k se calculan mediante:

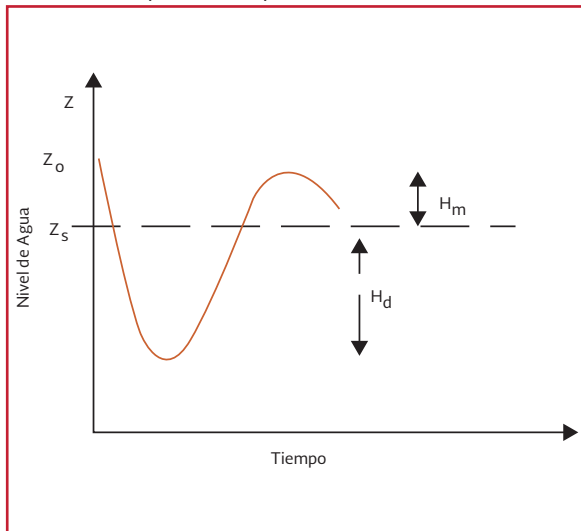
$$H_{max} = V_o \left[\frac{A_{tub} L}{g A_{torre}} \right]^{0.5} \quad \text{Ecuación 5.9}$$

$$k = \frac{\Delta H_{perd}}{H_{max}} \quad \text{Ecuación 5.10}$$

donde V_o es la velocidad del flujo permanente en la tubería, A_{tub} y A_{torre} son, respectivamente, las áreas de las secciones transversales de la tubería y de la torre, L es la longitud de la tubería, ΔH_{perd} las pérdidas de carga en esta y g es la aceleración de la gravedad.

$H_{máx}$ representa la amplitud de la variación sinusoidal que tendría el nivel de agua en la torre con respecto al nivel estático, al despreciar la influencia de las pérdidas de carga.

Ilustración 5.7 Variación del nivel de agua en una torre de oscilación después de un paro de bombas



5.3. CONDUCCIONES POR GRAVEDAD

En los diagramas mostrados en la ilustración 5.8 e ilustración 5.9 se da la sobrepresión adimensional generada por el cierre total de dos tipos de válvula al final de una tubería. Se supone que al inicio del cierre, la válvula está completamente abierta y que el cierre es lineal. No se consideran las pérdidas de carga por

fricción en la tubería. Se emplean los siguientes parámetros adimensionales:

$$t_c = \frac{aT_c}{2L} \quad \text{Ecuación 5.11}$$

$$\alpha = \frac{gH_o}{aV_o} \quad \text{Ecuación 5.12}$$

$$\Delta h_m = \frac{g(H_m - H_o)}{aV_o} \quad \text{Ecuación 5.13}$$

donde:

- H_o = carga de presión en la válvula
- H_m = carga de presión máxima en el transitorio
- V_o = velocidad en la tubería en flujo permanente
- a = velocidad de propagación de la onda de presión
- L = longitud de la tubería
- T_c = tiempo de cierre
- g = la aceleración de la gravedad

Ilustración 5.8 Incremento máximo de presión en una tubería debido al cierre de una válvula de compuerta en su final

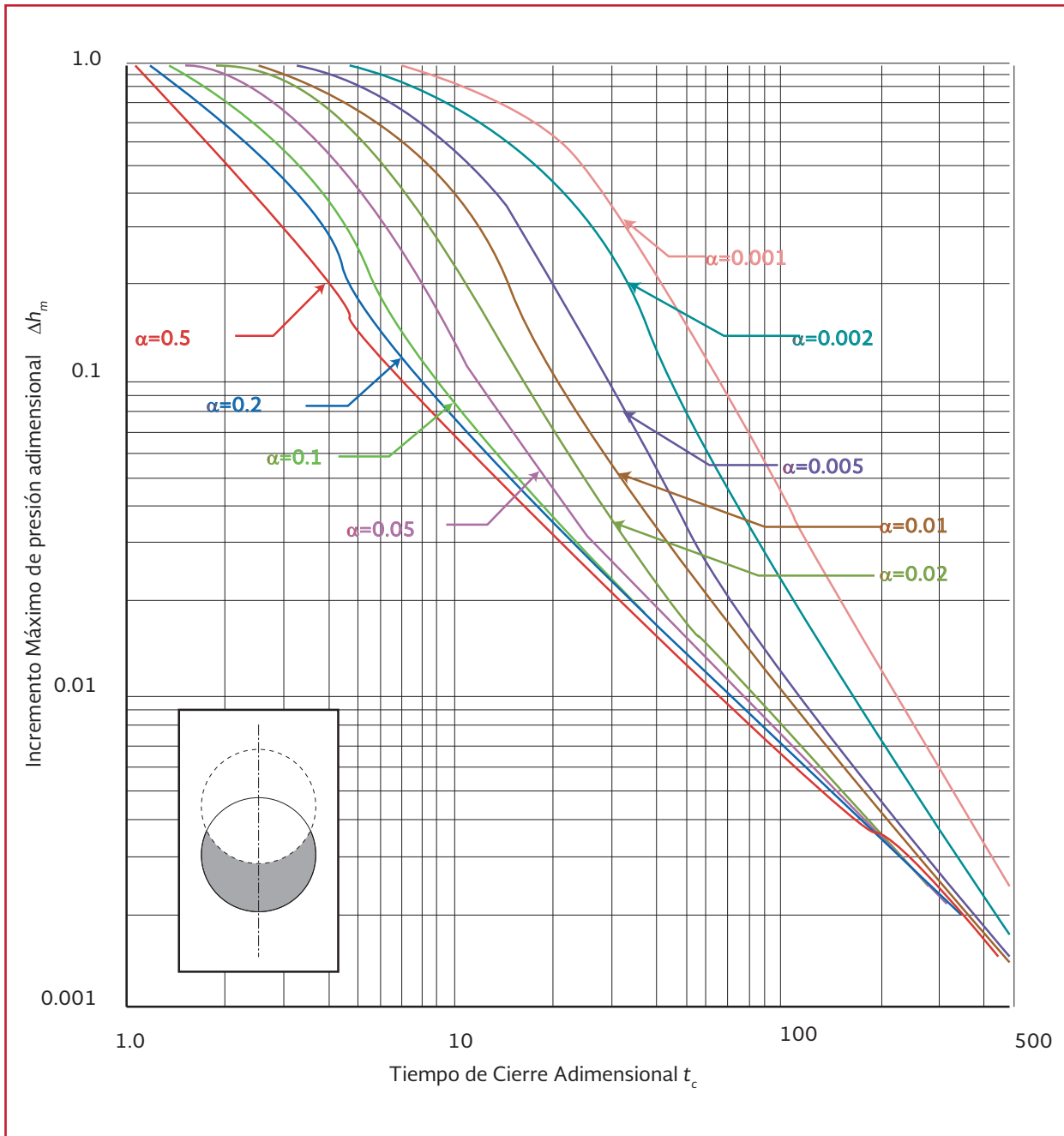
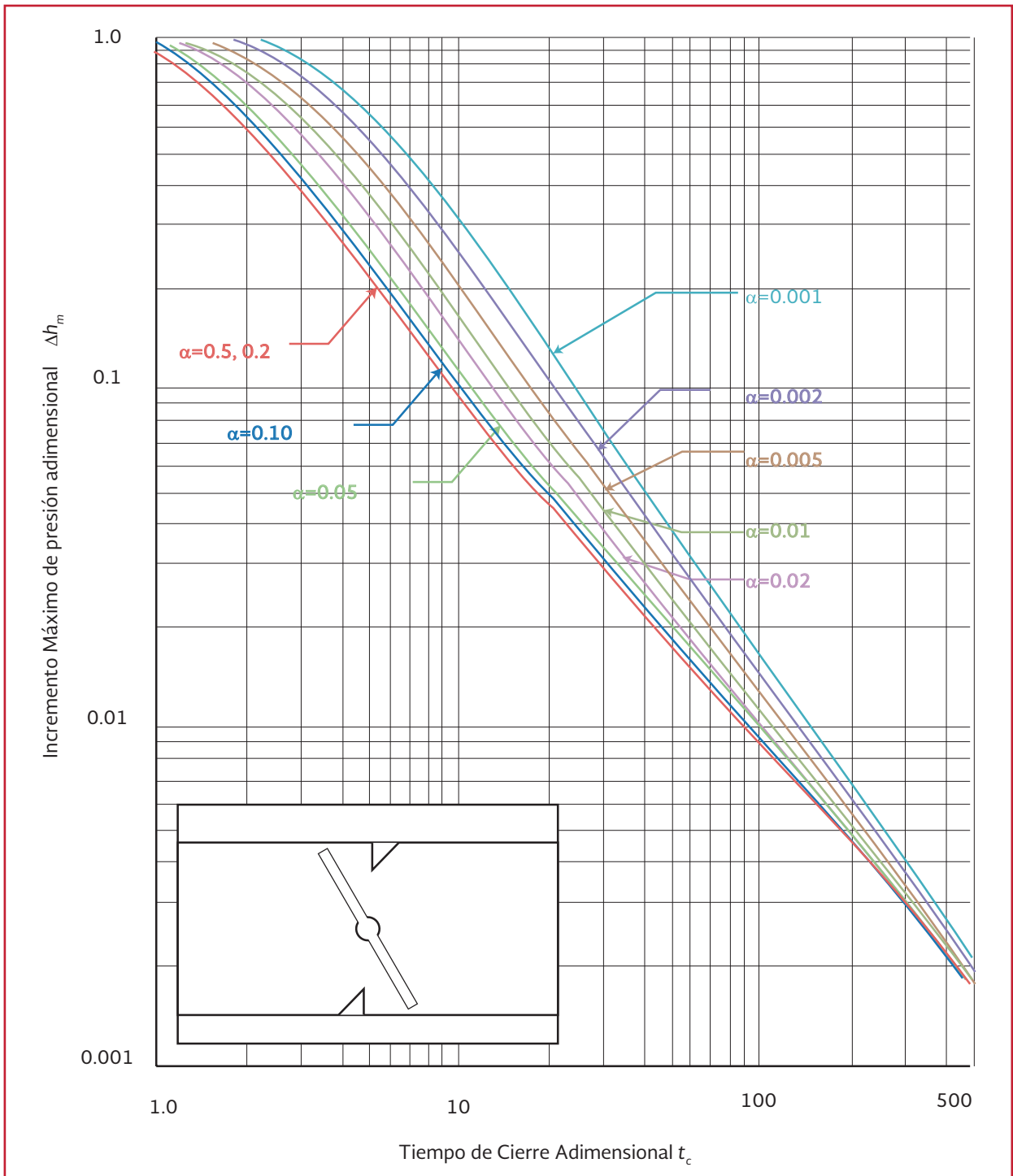


Ilustración 5.9 Incremento máximo de presión en una tubería al cierre de una válvula de maripapa en su final





6

PRONTUARIO SOBRE LOS TRANSITORIOS HIDRÁULICOS

6.1. GENERALIDADES

Con base en el material contenido en los capítulos anteriores, se presenta un prontuario cuyo objetivo es dar una primera orientación rápida en las diferentes tareas, dudas y problemas relativas a los transitorios, que más frecuentemente tienen los diseñadores y operadores de conducciones a presión en las etapas de planeación, diseño y operación.

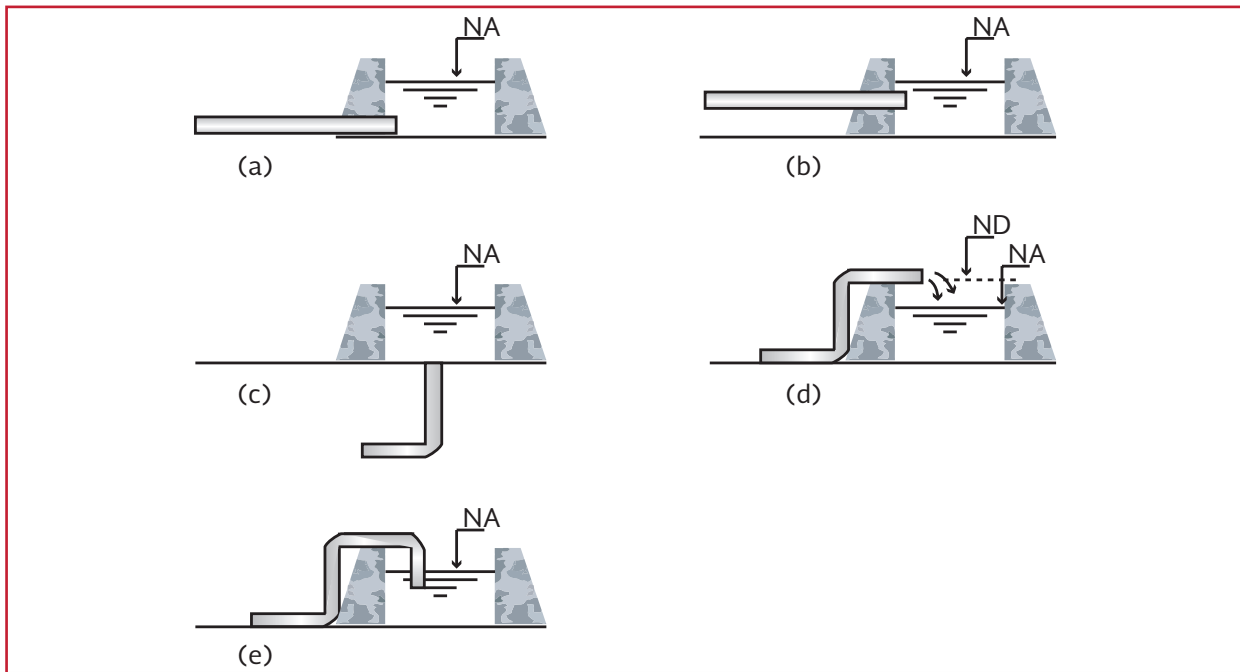
Muchas de las ilustraciones que se presentan en este libro contienen una representación gráfica de la unión de una tubería con un tanque. En la mayoría de los casos la unión está representada como se muestra en las ilustración 6.1a (entrada de un lado al tanque) y 6.1c (entrada por el fondo del tanque). Esta representación es esquemática, para simplificar el dibujo, y no tiene el objetivo de indicar que las uniones de tuberías con tanques se deben de diseñar en esta forma. La forma real en que las tuberías se unen con los tanques depende de otras consideraciones que no se tratan en este libro. Para los efectos de los análisis de los transitorios hidráulicos el punto de unión de una tubería con un tanque significa un punto en que se mantiene una carga piezométrica fija durante el transitorio. En este sentido, son equivalentes los tipos de unión tubería-tanque que se presentan en las ilustracio-

nes 6.1a (entrada de un lado al fondo del tanque), 6.1b (entrada de un lado por encima del fondo del tanque), 6.1c (entrada por el fondo del tanque), 6.1d (descarga libre en el tanque) y 6.1e (descarga tipo sifón). Para los casos de las ilustraciones 6.1a, 6.1b, 6.1c y 6.1e la carga piezométrica fija se define por la elevación del nivel de agua N.A. en el tanque, y para el caso de la ilustración 6.1d por la elevación del punto de la propia descarga N.D. (se asume que la tubería no se vacía en el transitorio).

6.2. PLANEACIÓN Y DISEÑO

El proyecto integral de un sistema de conducción de agua incluye una serie de estudios y análisis en la que hay que determinar el trazo de la conducción y su forma de operación, se selecciona el material y el diámetro de las tuberías y se diseñan medios de control de transitorios, de forma tal que el costo del proyecto sea el mínimo posible. Normalmente se analizan varias alternativas para encontrar la solución más económica. El estudio de transitorios hidráulicos no debe ser considerado como una parte separada de este proceso de análisis técnico económico, ya que define el material y la clase de los tubos a emplear y los medios de control, y con esto en gran medida el costo del proyecto. Como un ejemplo, la conducción puede ser diseñada con tubos más

Ilustración 6.1 Diferentes formas de unión de una tubería con un tanque



resistentes (y más caros) pero con una protección contra transitorios más económica (o sin protección alguna), o bien con una protección cara pero con tubos más económicos. El análisis técnico económico de alternativas mostrará en todo caso cuál es la mejor alternativa.

En este capítulo se señalan los factores más importantes relativos a transitorios hidráulicos, a

considerar en las diferentes tareas que normalmente se enfrentan en la planeación y diseño de conducciones.

6.2.1. CONDUCCIONES DE BOMBEO

En la Tabla 6.1, se muestra una serie de recomendaciones para conducciones por bombeo.

Tabla 6.1 Tareas y recomendaciones para conducciones de bombeo

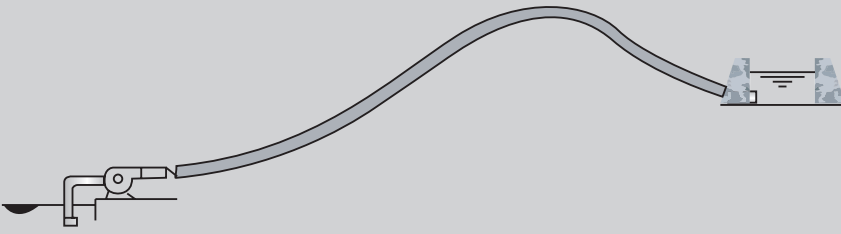
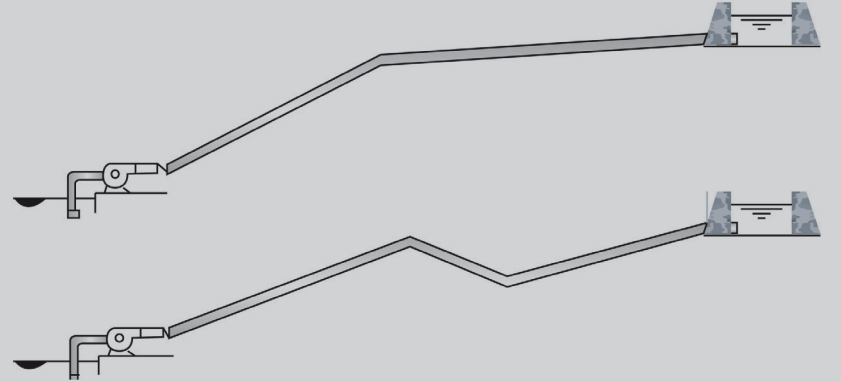
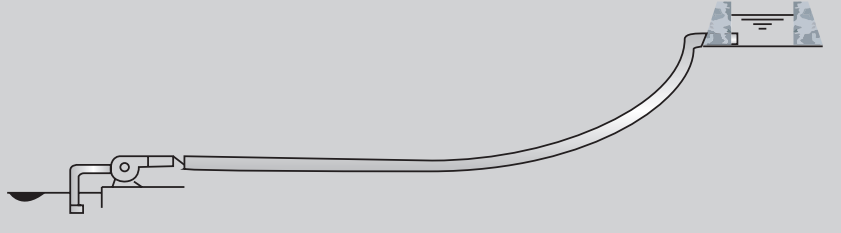
Tarea	Recomendación
<p>Trazo de una conducción por bombeo</p>	<p>Normalmente el trazo es definido por la ubicación de las fuentes y de los puntos de entrega, tratando de unirlos por la distancia más corta entre ellos. Existen no obstante ocasiones en que es conveniente desviarse de las líneas de distancia más corta para evitar, dentro de lo posible, que la tubería pase por puntos altos acentuados, ya que en estos lugares se pueden producir separaciones de columna en el transitorio. Hay que evitar que la tubería pase por puntos más altos que el punto de descarga, ya que con el paro de las bombas la tubería siempre se vaciará en el tramo desde esos puntos hasta la descarga.</p> <p>Ejemplo de perfiles topográficos que hay que evitar:</p>  <p>Ejemplos de perfiles topográficos que son admisibles pero desfavorables en cuanto a los transitorios:</p>  <p>Ejemplo de un perfil topográfico favorable en relación con los transitorios:</p> 

Tabla 6.1 Tareas y recomendaciones para conducciones de bombeo

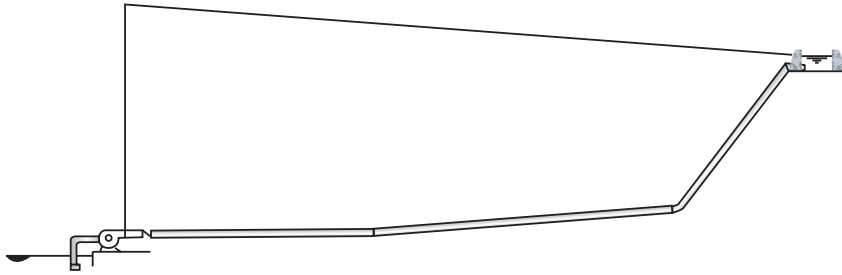
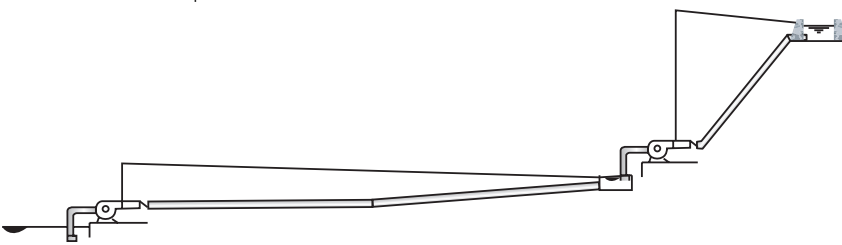
Tarea	Recomendación
Escoger entre bombeo en una etapa y en varias etapas	<p>Mientras más larga es la conducción, más fuertes son los transitorios. Con bombeo en varias etapas (rebombes intermedios) el transitorio se desarrolla de manera independiente en las tuberías de cada etapa (que son más cortas) y los transitorios son menos severos.</p> <p>Bombeo en una etapa:</p>  <p>Bombeo en dos etapas:</p> 
Determinar el diámetro de la conducción	<p>Se determina por un análisis técnico económico en que se busca minimizar la suma de los costos de construcción y de operación. Para los efectos de los transitorios hidráulicos, mientras mayor sea el diámetro menor es la velocidad del flujo y menos bruscos son los transitorios, y con esto son menores las variaciones de presión en los transitorios y los costos relacionados por clase de tubos y medios de control.</p>
Seleccionar el material de la tubería	<p>Se determina junto con el diámetro de la conducción por un análisis técnico económico en que se busca minimizar la suma de los costos de construcción y de operación considerando el costo de los tubos y su coeficiente de pérdidas de carga por fricción. Para los efectos de los transitorios hidráulicos, mientras más flexible (menos rígido) sea el material de la tubería menor es la velocidad de propagación de las ondas (celeridad), y con esto menos intensos son los transitorios y menores los costos relacionados por clase de tubos y medios de control.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Material de tubería muy flexible: Polietileno - Material de tubería flexible: PVC - Material poco flexible: Fibro cemento - Materiales rígidos: acero, hierro fundido, hierro dúctil, concreto <p>Aparte del material, la rigidez (flexibilidad) de la tubería depende de su relación Diámetro/Espesor. Mientras menor sea ese valor, más rígida (menos flexible) es la tubería.</p>
Definir si se requiere tomar medidas de control de transitorios	<p>Se necesita efectuar un análisis de transitorios. El resultado más importante de ese análisis son las líneas envolventes de presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio. Las presiones obtenidas se comparan con los datos de resistencia de la tubería (contra presiones altas y presiones bajas) para ver si se necesitan medios de control.</p>

Tabla 6.1 Tareas y recomendaciones para conducciones de bombeo

Tarea	Recomendación
¿Cómo realizar el análisis de transitorios?	<p>La manera más confiable y completa es usar un programa de cómputo especializado que simula los transitorios con base en un modelo numérico.</p> <p>Existen diferentes métodos aproximados dados en forma de diferentes fórmulas, gráficas y nomogramas. Si el proyectista decide usar algunos de ellos, tiene que asegurarse primero si éstos son aplicables para su caso. Cada método aproximado asume algunas condiciones o desprecia algunos factores, y el error puede ser muy grande si un método aproximado se aplica a un caso en que no se cumplen las condiciones supuestas. Por esta razón el proyectista debe de conocer las condiciones que supone el método aproximado. Muchos de los métodos aproximados dan resultados para un solo punto de la conducción, por ejemplo para el inicio de la conducción, y dejan sin considerar el resto de la tubería. Los métodos aproximados por lo general no toman en cuenta la topografía de la conducción, y no consideran las posibles separaciones de columna en los transitorios. Por todas estas razones los métodos aproximados no son recomendables.</p>
¿Qué datos se necesitan para el análisis de transitorios?	<p>En principio, los datos que se requieren dependen del programa de cómputo que se usará para el análisis. En todo caso, se necesita cuando menos de los siguientes datos:</p> <ol style="list-style-type: none"> a) Elevaciones de la tubería en todos los puntos de cambio de pendiente del terreno b) Elevaciones de nivel de agua en la obra de toma de las bombas y en la descarga c) Diámetro, material, clase y espesor de pared de la tubería d) Curvas características de las bombas e) Velocidad de rotación de la bomba en r/min f) Momento de inercia WR^2 del rotor del motor eléctrico g) Momento de inercia WR^2 del rotor del impulsor de la bomba h) Gastos y políticas de operación de la conducción.
¿En que casos puede omitirse el análisis de transitorios?	<p>En los siguientes casos las sobrepresiones que produce el transitorio normalmente son poco importantes, y la conducción puede dejarse sin medios de control de transitorios (Sanks, 1989):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Gastos de diseño menores de unos 6 L/s - Velocidad media del flujo menor de unos 0.60 m/s - Desnivel entre la toma y la entrega menor de 9 m <p>Aun en estos casos el análisis de transitorios es indispensable cuando sean posibles separaciones de columna líquida, ya que las sobrepresiones subsecuentes pueden ser muy importantes.</p>
Seleccionar un programa de cómputo para simulación y análisis de transitorios hidráulicos.	<p>Primero tiene que asegurarse si el programa puede simular el caso de su proyecto, en cuanto a tipo de conducción (conducción simple, interconexión de pozos o una red de conducciones), tipo de transitorios que se necesita analizar (paro y arranque de bombas, cierre y apertura de válvulas) y medios de control que se quieran considerar.</p> <p>Un buen programa de análisis de transitorio debe de tener la capacidad de modelar las separaciones de columna que puedan presentarse, dado que las separaciones de columna cambian drásticamente las presiones máximas que se producen en el transitorio.</p> <p>Otros factores a considerar son la facilidad de manejo del programa, el idioma en que se maneja y el costo. Es importante que el programa tenga la capacidad de representar los resultados en forma gráfica dado que los análisis de transitorios generan una gran cantidad de información difícil de manejar de otra forma. En el análisis de transitorios normalmente se utiliza un gran número de términos específicos relativos a los transitorios en las bombas y a las diferentes componentes de los medios de control considerados, difíciles de entender en otro idioma por no expertos en el tema; por esta razón es preferible que programa esté en español.</p>

Tabla 6.1 Tareas y recomendaciones para conducciones de bombeo

Tarea	Recomendación
<p>¿Cuáles de los posibles transitorios hidráulicos hay que analizar?</p>	<p>En la mayoría de los casos es suficiente con analizar solamente el paro del máximo número de bombas que pueden estar en operación, ya que los demás transitorios son menos peligrosos.</p> <p>Si los niveles de toma de las bombas y de entrega varían considerablemente en operación, entonces hay que analizar el transitorio con diferentes niveles para estar seguro de que se consideró el caso más desfavorable.</p> <p>Para los casos en que se admita un flujo invertido a través de las bombas, hay que analizar adicionalmente el transitorio que se genera con el paro de una sola bomba en operación, ya que este caso es el más desfavorable con respecto a la rotación invertida de la bomba que se puede alcanzar en el transitorio.</p>
<p>El análisis muestra que en el transitorio se producen presiones negativas. ¿Cómo definir si eso representa algún peligro?</p>	<p>Los peligros potenciales son dos:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Aplastamiento de la tubería por la acción de la presión atmosférica que actúa sobre el perímetro exterior del tubo b) Para algunos tipos de tubería el vacío puede succionar las juntas de goma que unen los tubos <p>El aplastamiento por presión atmosférica es factible sólo en tuberías altamente deformables, y puede ser analizado con cálculos estructurales. La deformabilidad de la tubería depende de su material y de su relación Diámetro/Espesor. Como una primera aproximación, para una tubería no enterrada, se puede considerar que no hay peligro de aplastamiento si:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tubos de acero: Diámetro/Espesor < 130 - Tubos de hierro dúctil: Diámetro/Espesor < 122 - Tubos de fibro cemento: Diámetro/Espesor < 64 - Tubos de PVC: Diámetro/Espesor < 33 - Tubos de polietileno: Diámetro/Espesor < 22
<p>¿Qué clases de tubos son propensos a aplastamiento por vacío?</p>	<p>Derivado de los valores de Diámetro/Espesor de la recomendación anterior y de las dimensiones de los tubos usados en México, las siguientes clase de tubos resultan vulnerables a aplastamiento por la acción del vacío:</p> <p>Tubos de polietileno: RD41, RD32.5, RD26</p> <p>Tubos de PVC: RD64, RD41</p> <p>Tubos de acero: Hay que evaluar cada caso calculando la relación Diámetro/Espesor.</p>

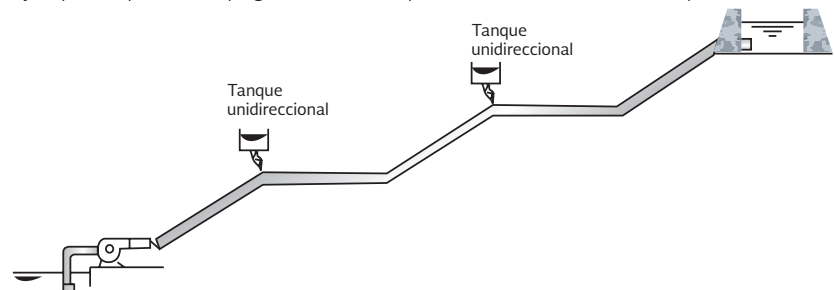
Tabla 6.1 Tareas y recomendaciones para conducciones de bombeo

Tarea	Recomendación
Escoger el(los) medio(s) de protección más adecuado(s)	<p>La protección puede lograrse con diferentes medios. Cuál es el medio más adecuado para una conducción dada depende primero del objetivo que se persigue con la protección, que es uno de los siguientes tres:</p> <ol style="list-style-type: none"> Reducir las presiones máximas que se producen en el transitorio y eliminar las presiones negativas Reducir las presiones máximas solamente Eliminar las presiones negativas (para los casos cuando el transitorio no produce sobrepresiones importantes) <p>La selección del (los) medio(s) de control para cada uno de estos dos casos se explica a continuación:</p>

Medios de protección que eliminan presiones negativas y reducen presiones máximas.	<ul style="list-style-type: none"> - Cámara de aire - Tanque unidireccional - Torre de oscilación - Admisión y retención de aire - Volante de inercia
--	--

Escoger el(los) medio(s) de protección más adecuado(s) para eliminar presiones negativas y reducir presiones máximas.	<p>Depende mucho de la topografía del terreno. Se distinguen dos casos:</p> <ol style="list-style-type: none"> Debido a las presiones negativas se producen separaciones de columna concentradas en uno o varios puntos de la tubería. El cierre de esas separaciones en el transitorio produce las presiones máximas. Se busca entonces un medio de control que elimine primero las presiones negativas, y con esto bajan las presiones máximas también. El medio típico para esa función es el tanque unidireccional ubicado en el punto de la separación de columna concentrada.
---	--

Ejemplo de perfiles topográficos en los que es conveniente usar tanque unidireccional:



b)	Las separaciones de columna líquida se producen en toda o casi en toda a conducción de manera aproximadamente uniforme. La cámara de aire es la solución típica para este caso.
----	---

Ejemplo de perfiles topográficos en los que es conveniente usar una cámara de aire:

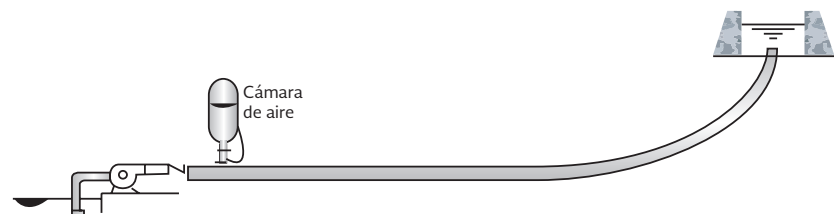


Tabla 6.1 Tareas y recomendaciones para conducciones de bombeo

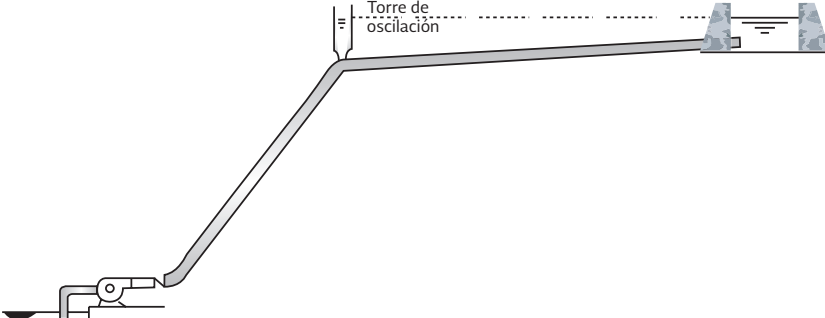
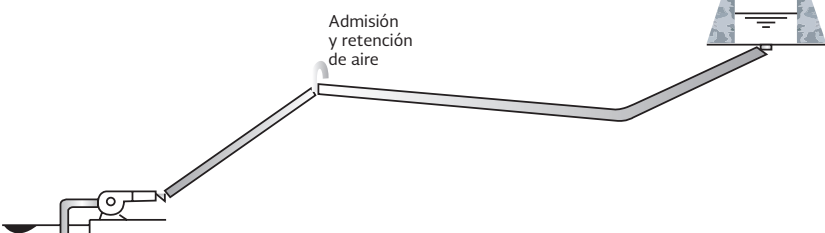
Tarea	Recomendación
<p>Escoger el(los) medio(s) de protección más adecuado(s) para reducir presiones máximas solamente.</p>	<p>La aplicación de la torre de oscilación se limita por la altura necesaria, que depende del desnivel topográfico existente entre el punto de su ubicación y el punto de la descarga. Ejemplo de perfiles topográficos en los que es conveniente usar una torre de oscilación:</p>
	<p>Ejemplo de perfiles topográficos en los que es conveniente usar una torre de oscilación:</p>  <p>Torre de oscilación</p>
	<p>La admisión y retención de aire es efectiva en puntos altos acentuados de la tubería donde se admitiría un buen volumen de aire que luego actuaría como un colchón (similar a una cámara de aire). Al aplicar este medio hay que asegurar la expulsión lenta de aire una vez transcurrido el transitorio.</p>
	<p>Ejemplo de perfiles topográficos en los que es conveniente usar admisión y retención de aire:</p>  <p>Admisión y retención de aire</p>
	<p>Los volantes de inercia se aplican pocas veces, dado que en la mayoría de los casos se necesitarían volantes demasiado grandes.</p>
<p>Medios de protección que reducen presiones máximas solamente</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Válvulas de alivio - Tubo de paso lateral (by-pass) en las válvulas de no retorno de las bombas - Permitir un flujo invertido a través de las bombas eliminando las válvulas de no retorno y utilizando válvulas de cierre programado - Válvulas de no retorno ubicadas en la tubería (aparte de las válvulas en las bombas) - Membranas destructibles (fusibles hidráulicos)

Tabla 6.1 Tareas y recomendaciones para conducciones de bombeo

Tarea	Recomendación
<p>Escoger el(los) medio(s) de protección más adecuado(s) para reducir presiones máximas solamente.</p>	<p>Las válvulas de alivio se ubican en los puntos más bajos de la conducción donde se presentan las presiones más altas. Existe una gran variedad de válvulas de alivio y hay que tener cuidado en seleccionar el tipo de válvula. Las válvulas de alivio más sencillas no son adecuadas para el control de los transitorios hidráulicos, ya que por lo general no responden rápidamente a sobrepresiones instantáneas. Para servir como medio de control de transitorios las válvulas deben ser especiales, que abran rápidamente y que cierren lentamente.</p>

Ubicación de las válvulas de alivio:

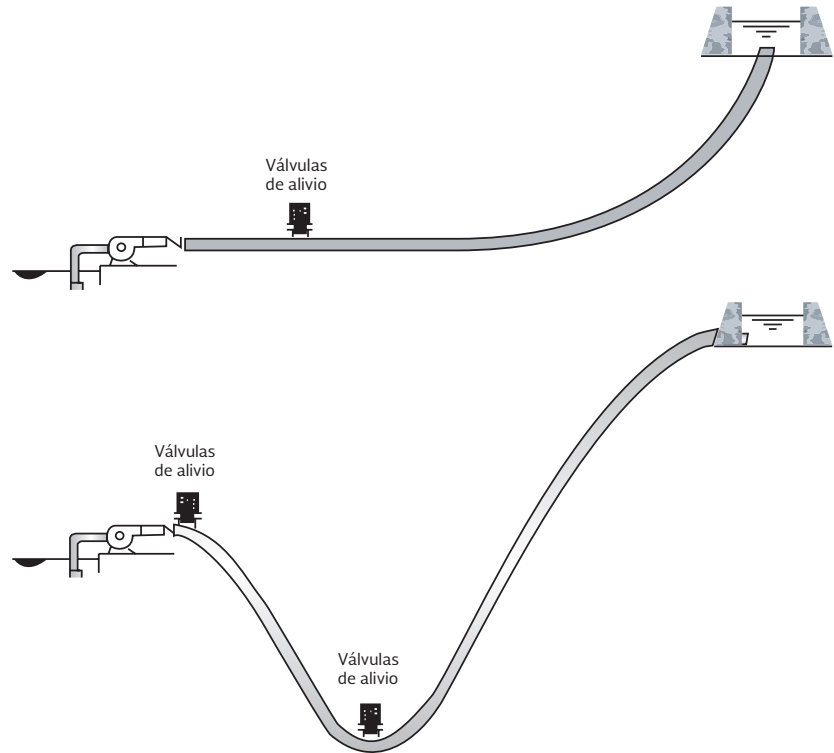


Tabla 6.1 Tareas y recomendaciones para conducciones de bombeo

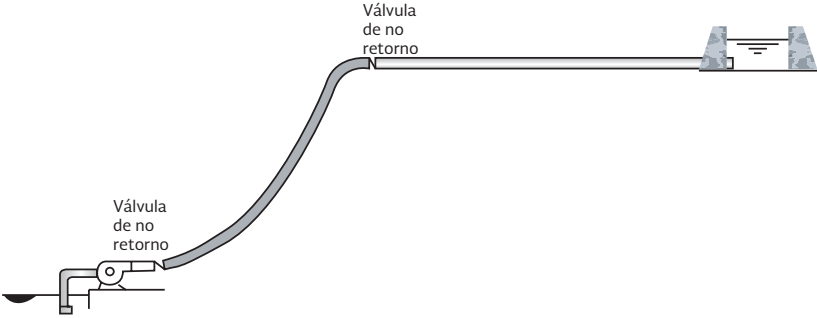
Tarea	Recomendación
<p>Escoger el(los) medio(s) de protección más adecuado(s) para reducir presiones máximas solamente.</p>	<p>El paso lateral (by-pass) en las válvulas de no retorno de las bombas es un medio eficaz y económico, pero hay que asegurar su cierre (automático o manual) una vez transcurrido el transitorio.</p> <p>Las válvulas de cierre programado se utilizan en bombas grandes, dado el costo del mecanismo de cierre programado. Frecuentemente son el único medio en instalaciones con bombas grandes dado que se evita usar válvulas de no retorno muy grandes.</p> <p>Las válvulas de no retorno ubicadas en la tubería (aparte de las bombas) se utilizan en partes de la tubería que tienen cargas estáticas bajas.</p> <p>Ejemplo de perfiles topográficos en los que son aplicables válvulas de no retorno:</p>  <p>Las membranas destructibles (fusibles hidráulicos) se aplican como un medio de seguridad adicional solamente.</p>
<p>Medios de protección que eliminan presiones negativas solamente</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Válvulas de admisión de aire - Paso lateral (by-pass) en la planta de bombeo.
<p>Escoger el(los) medio(s) de protección más adecuado(s) para eliminar presiones negativas solamente.</p>	<p>En el diseño de cualquier conducción normalmente se considera cierto número de válvulas de aire con el objeto de asegurar la expulsión del aire en su llenado y la admisión de aire en el vaciado. Estas válvulas tienen un efecto local para eliminar la presión negativa en los transitorios, por lo que se necesitaría ubicar una (o varias) de ellas en cada punto donde se produce tal presión. Por esta razón frecuentemente no resulta factible eliminar las presiones negativas sólo con válvulas de aire.</p> <p>El paso lateral (by-pass) en la planta de bombeo se puede usar cuando el nivel del agua en la toma de las bombas está ubicado mas alto que la planta y en el transitorio se produce un nivel piezométrico en la conducción mas bajo que ese nivel.</p>
<p>Otros medios de control de transitorios en líneas de bombeo</p>	<p>Válvula anticipadora. Se abre al producirse las depresiones en la fase inicial del transitorio y permanece abierta en la fase de sobrepresiones descargando ciertos gastos que reducen la sobrepresión. Se instala normalmente en la planta de bombeo. Se puede usar cuando se tiene la certeza que la presión bajara lo suficiente para que se active.</p>

Tabla 6.1 Tareas y recomendaciones para conducciones de bombeo

Tarea	Recomendación
Diseño hidráulico de una cámara de aire	<p>Consiste en determinar el volumen de aire que se debe mantener en la cámara, el volumen total de la cámara y el coeficiente de pérdidas de carga (resistencia hidráulica) en la conexión de la cámara con la conducción. Es conveniente que esa resistencia hidráulica sea asimétrica, es decir, que sea la mínima posible cuando el agua sale de la cámara y que tenga cierto valor cuando el agua entra. Esto reduce el volumen requerido para la cámara. Existe un valor óptimo del coeficiente de resistencia hidráulica que corresponde al volumen mínimo requerido de la cámara.</p> <p>La manera más confiable y completa de obtener esos parámetros es mediante un programa de cómputo especializado capaz de simular los transitorios con cámara de aire con base en un modelo numérico. El programa se alimenta con el volumen de aire en el inicio del transitorio y con el coeficiente de resistencia hidráulica en la conexión. Como resultados se obtienen, entre otras cosas, las presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio y el volumen máximo de aire que se alcanza en la cámara. Ese volumen máximo se utiliza para definir el volumen total requerido de la cámara adicionándole cierto volumen de reserva. El programa se corre varias veces con diferentes volúmenes y coeficientes de resistencia hidráulica para buscar una mejor solución.</p> <p>La resistencia hidráulica se puede lograr de varias formas: con una válvula de no retorno y línea de paso lateral (<i>by-pass</i>) en la conexión, con una válvula de no retorno perforada o con una boquilla de salida en el fondo de la cámara.</p>
Diseño hidráulico de un tanque unidireccional	<p>Consiste en determinar el volumen de agua que se debe de introducir y el nivel de agua a mantener en el tanque. La manera mas confiable y completa de obtenerlos es mediante un programa de cómputo especializado capaz de simular los transitorios con tanques unidireccionales con base en un modelo numérico. El programa se alimenta con el nivel de agua en el tanque en el inicio del transitorio y con sus dimensiones. Como resultados se obtienen, entre otras cosas, las presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio y el nivel mínimo de agua que se alcanza en el tanque. El programa se corre varias veces con diferentes niveles y dimensiones para buscar una mejor solución.</p>
Diseño hidráulico de una torre de oscilación	<p>Consiste en definir el diámetro de la torre y los niveles máximo y mínimo que en ésta se alcanzan durante el transitorio. La manera mas confiable y completa de obtenerlos es mediante un programa de cómputo especializado capaz de simular los transitorios con torres de oscilación con base en un modelo numérico. El programa se alimenta con el diámetro de la torre y como resultados se obtienen, entre otras cosas, las presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio y los niveles de agua máximo y mínimo que se alcanzan en la torre. El programa se corre varias veces con diferente diámetro para buscar una mejor solución.</p>
Diseño de una protección con válvulas de admisión y retención de aire	<p>Consiste en definir el diámetro de la(s) válvula(s) de admisión de aire y su ubicación en la línea. La manera mas confiable y completa de obtenerlo es mediante un programa de cómputo especializado capaz de simular los transitorios con válvulas de admisión y retención de aire con base en un modelo numérico. El programa se alimenta con el diámetro de admisión de aire y como resultados se obtienen, entre otras cosas, las presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio y el volumen de aire que se introdujo. El programa se corre varias veces con diferente diámetro para buscar una mejor solución.</p> <p>Se requiere de una especial atención para asegurar expulsión del aire introducido una vez transcurrido el transitorio. Esto puede lograrse con válvulas de expulsión lenta de aire.</p>
Diseñar un volante de inercia	<p>Consiste en definir su momento volante WR^2 (peso por radio al cuadrado). La manera más confiable y completa de obtenerlo es mediante un programa de cómputo especializado capaz de simular los transitorios por paro de bombas con base en un modelo numérico. El programa se alimenta con el WR^2 de las partes rodantes del equipo de bombeo (motor y bomba), incrementado con cierto valor que sería el WR^2 del volante de inercia. Como resultados se obtienen, entre otras cosas, las presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio. El programa se corre varias veces con diferente valor de WR^2 hasta obtener las presiones máximas y mínimas deseadas.</p> <p>Una vez definido el WR^2 requerido del volante se deducen su diámetro y peso.</p>

Tabla 6.1 Tareas y recomendaciones para conducciones de bombeo

Tarea	Recomendación
Seleccionar válvulas de alivio	Se seleccionan de los catálogos de fabricantes. Los parámetros con que se seleccionan son la presión de apertura, el gasto máximo que puede expulsar la válvula y la presión con que se expulsa ese gasto (presión máxima). La presión de apertura (y con esto la presión máxima) normalmente puede ser ajustada en campo, así que el gasto máximo es el único parámetro a emplear. Los datos de las válvulas seleccionadas se introducen en el programa de simulación de los transitorios para obtener, entre otras cosas, las presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio.
Diseñar un paso lateral (by-pass) en las válvulas de no retorno de las bombas	Consiste en definir el diámetro del paso lateral de forma tal que se logre la reducción deseada de las sobrepresiones del transitorio sin generar una rotación invertida inadmisibles en las bombas por el flujo invertido, y sin que se regresen hacia la toma grandes volúmenes de agua. La manera más confiable y completa de obtenerlos es mediante un programa de cómputo especializado capaz de simular los transitorios con flujo invertido en las bombas con base en un modelo numérico. El programa se alimenta con el diámetro de la línea y como resultados se obtienen, entre otras cosas, las presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio, la velocidad de rotación máxima en sentido inverso en las bombas y el volumen de agua que se regresa. El programa se corre varias veces con diferente diámetro para buscar una mejor solución.
Diseñar un control de los transitorios por medio de válvulas de cierre programado en las bombas	<p>Consiste en definir el diagrama del cierre, de forma tal que se logre la reducción deseada de las sobrepresiones del transitorio sin generar una rotación invertida inadmisibles en las bombas por el flujo invertido, y sin que se regresen hacia la toma grandes volúmenes de agua. La manera más confiable y completa de obtenerlo es mediante un programa de cómputo especializado capaz de simular los transitorios con flujo invertido en las bombas con válvula de cierre programado con base en un modelo numérico. El programa se alimenta con el diagrama de cierre y como resultados se obtienen, entre otras cosas, las presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio, la velocidad de rotación máxima en sentido inverso en las bombas y el volumen de agua que se regresa. El programa se corre varias veces con diferentes diagramas para buscar una mejor solución.</p> <p>Resulta conveniente un diagrama de cierre en dos etapas. En la primera etapa que abarca la fase inicial de depresión del transitorio la válvula cierra rápidamente hasta cierto grado, y después en la fase de sobrepresión cierra lentamente para no generar sobrepresiones excesivas.</p>
Diseñar una protección con válvulas de no retorno ubicadas en la tubería (aparte de las válvulas en las bombas)	<p>Consiste en definir la ubicación de las válvulas de no retorno. La manera más confiable y completa de obtenerla es mediante un programa de cómputo especializado capaz de simular los transitorios con válvulas de no retorno en línea con base en un modelo numérico. El programa proporciona, entre otras cosas, las presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio, y con esto el efecto de las válvulas de no retorno en línea.</p> <p>Las válvulas de no retorno en línea pueden ser combinadas con válvulas de alivio aguas abajo para reducir sobrepresiones, o con válvulas de admisión de aire aguas arriba para eliminar presiones negativas. Otra posibilidad para lograr esos dos efectos es colocar un paso lateral (by-pass) en las válvulas, o perforar el plato de éstas.</p> <p>Al diseñar esta forma de protección hay que considerar las pérdidas de carga adicionales que generan las válvulas de no retorno, y su repercusión sobre el costo del proyecto por la mayor carga de bombeo requerida.</p>
Diseñar una protección adicional con membranas destructibles (fusibles hidráulicos)	Consiste en definir la ubicación de las membranas y su diámetro. Se ubican en los lugares donde se producen las presiones máximas, sin que el agua que se descargaría al romperse las membranas provocara problemas. El diámetro (el área) de la membrana se obtiene de la condición de que el gasto descargado alivie lo suficiente la presión producida en el transitorio.
Diseño de una protección con válvulas de admisión de aire	Consiste en definir el diámetro de la(s) válvula(s) de admisión de aire y su ubicación. La manera más confiable y completa de obtenerlo es mediante un programa de cómputo especializado capaz de simular los transitorios con válvulas de admisión de aire con base en un modelo numérico. El programa se alimenta con el diámetro de admisión de aire y como resultados se obtienen, entre otras cosas, las presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio y el volumen de aire que se introdujo. El programa se corre varias veces con diferente diámetro para buscar una mejor solución.

Tabla 6.1 Tareas y recomendaciones para conducciones de bombeo

Tarea	Recomendación
Diseñar un paso lateral (by-pass) en la planta bombeo	Consiste en definir el diámetro del paso lateral de forma tal que se eviten las presiones negativas en la conducción. La manera más confiable y completa de obtenerlo es mediante un programa de cómputo especializado capaz de simular los transitorios con base en un modelo numérico. El programa se alimenta con el diámetro de la línea y como resultados se obtienen, entre otras cosas, las presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio. El programa se corre varias veces con diferente diámetro para buscar una mejor solución.
Diseñar una protección con válvulas anticipadoras	Se seleccionan de los catálogos de fabricantes con la presión de apertura, el gasto máximo que puede expulsar la válvula y la presión con que se expulsa ese gasto (presión máxima). La presión de apertura normalmente puede ser ajustada en campo, así que el gasto máximo es el único parámetro a emplear. Hay que asegurarse que en el transitorio la presión bajara hasta la presión de apertura, en caso contrario la válvula permanecerá inactiva. La manera más confiable y completa de asegurarse de eso es mediante un programa de cómputo especializado capaz de simular los transitorios con base en un modelo numérico, ya que ese programa proporciona, entre otras cosas, las presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio.

6.2.2. COMPARACIÓN ENTRE LOS MEDIOS DE CONTROL DE TRANSITORIOS EN LÍNEAS A BOMBEO

La Tabla 6.2 resume los dispositivos de control de transitorios más importantes en conducciones de bombeo y las condiciones de su aplicación.

Las variables usadas en la tabla son:

- GD^2 = momento de inercia de las partes rotantes ($t \text{ m}^2$)
- n = velocidad de rotación nominal, en rpm
- γ = el peso volumétrico del agua (t/m^3)
- A = área de la sección transversal de la tubería (m^2)
- V_o = la velocidad de operación normal en la tubería (m/s)
- H = la carga en la operación normal (m)
- L = longitud de la tubería
- g = la aceleración de la gravedad
- a = velocidad de la onda de presión (m/s)
- h = carga de presión en el tanque (m)

Tabla 6.2 Métodos de protección contra transitorios y condiciones de su aplicación

Método de protección	Condiciones	Observaciones
Membranas destructibles (fusibles hidráulicos)	Se ubican en lugares donde el agua descargada no afecta.	Se descarga cierto volumen de agua Hay que asegurar su reemplazo Se usa como medio complementario, principalmente
Volante de inercia	$\frac{GD^2 n^2}{\gamma ALH_0^2} > 0.04$	Pocas veces resulta práctico, ya que para obtener un efecto apreciable se requerirían volantes muy grandes.
Paso lateral (bypass) en las válvulas de no retorno de las bombas	$\frac{aV_0}{gH_0} \gg 1$ Hay que analizar si se llega a un giro inverso en las bombas y si las bombas pueden soportarlo sin daño.	Cierto volumen de agua se descarga en sentido inverso por las bombas. Hay que asegurar su cierre después del transitorio
Válvulas de admisión y retención de aire	Puntos pico donde la tubería está cerca de la línea piezométrica.	Hay que asegurar la expulsión lenta de aire después del transitorio Eficaz cuando es grande el volumen de aire introducido Se combina a veces con una válvula de no retorno
Válvulas de no retorno en línea	$\frac{aV_0}{gh} > 1$ La tubería debe estar cerca de la línea piezométrica.	Normalmente se usa combinado con otros métodos de protección. Es posible la separación de columna.
Válvulas de cierre programado en las bombas	$\frac{av_0}{gH_0} \gg 1$ Hay que analizar si se llega a un giro inverso en las bombas, y si las bombas pueden soportarlo sin daño.	Las bombas descargan cierto volumen de agua en sentido inverso.
Torre de oscilación	La tubería debe estar cerca de la línea piezométrica para que la torre no sea demasiado alta.	
Válvula de alivio.		- Exigen mantenimiento - No protegen contra presiones negativas
Válvula anticipadora	$\frac{av_0}{gH_0} \gg 1$	- Es posible la separación de la columna
Tanque unidireccional	$\frac{av_0}{gh} > 1$ Se ubica en puntos pico de la tubería	Exige mantenimiento de la válvula de no retorno y del dispositivo de llenado
Paso lateral (bypass) en la planta de bombeo que une directamente la toma de las bombas con la tubería de descarga	Nivel en la toma más alto que en las bombas	Exige mantenimiento de la válvula de no retorno.
Cámara de aire	$\frac{av_0}{gh} > 1$	Son muy importantes las condiciones de entrada y de salida Exige mantenimiento para conservar el aire y para la válvula de no retorno

6.2.3. CONDUCCIONES POR GRAVEDAD

En la Tabla 6.3, se muestra una serie de recomendaciones para conducciones por gravedad.

Tabla 6.3 Tareas y recomendaciones para conducciones de gravedad

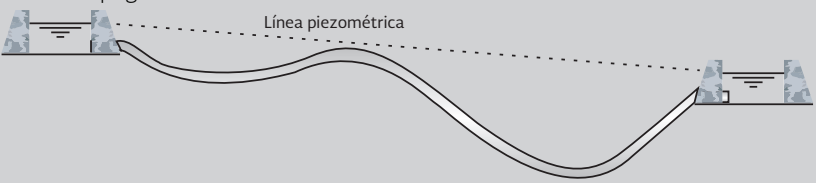
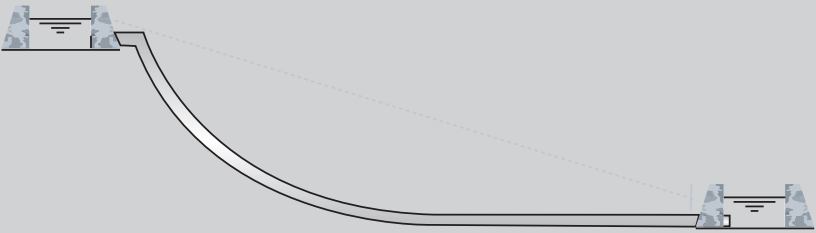
Tarea	Recomendación
<p>Trazo de una conducción por gravedad</p>	<p>Normalmente el trazo es definido por la ubicación de las fuentes y de los puntos de entrega, tratando de unirlos por la distancia más corta entre ellos. Existen no obstante ocasiones en que es conveniente desviarse de las líneas de distancia más corta para evitar, dentro de lo posible, que la tubería pase por puntos altos acentuados, ya que en estos lugares se pueden producir separaciones de columna en el transitorio.</p> <p>Perfiles topográficos no recomendables en relación con los fenómenos transitorios:</p>  <p>Perfiles topográficos recomendables en relación con los fenómenos transitorios:</p> 
<p>Escoger entre conducción en una sola etapa o en varias etapas (con tanques o cajas rompedoras de presión intermedios)</p>	<p>Mientras más larga es la conducción, más fuertes son los transitorios. Con una conducción en varias etapas (con tanques o cajas rompedoras de presión intermedios) el transitorio se desarrolla de manera independiente en las tuberías de cada etapa (que son más cortas) y los transitorios son menos severos.</p>
<p>Determinar el diámetro de la conducción</p>	<p>Se determina por el desnivel topográfico disponible y el gasto de diseño. Para los efectos de los transitorios hidráulicos, mientras mayor sea el diámetro menor es la velocidad del flujo, y con esto son menores las variaciones de presión en los transitorios y los costos relacionados por clase de tubos y medios de control.</p>
<p>Seleccionar el material de la tubería</p>	<p>Se determina junto con el diámetro de la conducción considerando el costo de los tubos y su coeficiente de pérdidas de carga por cortante. Para los efectos de los transitorios hidráulicos, mientras más flexible (menos rígido) sea el material de la tubería menor es la velocidad de propagación de las ondas (celeridad), y con esto menos intensos son los transitorios y menores los costos relacionados por clase de tubos y medios de control.</p> <p>Material de tubería muy flexible: Polietileno Material de tubería flexible: PVC Material poco flexible: Fibro cemento Materiales rígidos: acero, hierro fundido, hierro dúctil, concreto.</p> <p>Aparte del material, la rigidez (flexibilidad) de la tubería depende de su relación Diámetro/ Espesor. Mientras menor sea ese valor, más rígida (menos flexible) es la tubería.</p>

Tabla 6.3 Tareas y recomendaciones para conducciones de gravedad

Tarea	Recomendación
Definir si se requiere tomar medidas de control de transitorios	Se necesita efectuar un análisis de transitorios. El resultado más importante de ese análisis son las líneas envolventes de presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio. Las presiones obtenidas se comparan con los datos de resistencia de la tubería (contra presiones altas y presiones bajas) para ver si se necesitan medios de control.
¿Qué datos se necesitan para el análisis de transitorios?	<p>En principio, los datos que se requieren dependen del programa de cómputo que se usará para el análisis. En todo caso, se necesita cuando menos de los siguientes datos:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Elevaciones de la tubería en todos los puntos de cambio de pendiente del terreno b) Elevaciones en la toma y en la descarga del agua c) Diámetro, material, clase y espesor de pared de la tubería d) Tipo de válvula de cierre y tiempo de cierre e) Gastos y políticas de operación de la conducción
¿Cómo realizar el análisis de transitorios?	<p>La manera más confiable y completa es usar un programa de cómputo especializado que simula los transitorios con base en un modelo numérico.</p> <p>Existen diferentes métodos aproximados dados en forma de diferentes fórmulas, gráficas y nomogramas. Si el proyectista decide usar algunos de ellos, tiene que asegurarse primero si éstos son aplicables para su caso. Cada método aproximado asume algunas condiciones o despreja algunos factores, y el error puede ser muy grande si un método aproximado se aplica a un caso en que no se cumplen las condiciones supuestas. Por esta razón el proyectista debe de conocer las condiciones que supone el método aproximado. Muchos de los métodos aproximados dan resultados para un solo punto de la conducción, por ejemplo para el final de la conducción, y dejan sin considerar el resto de la tubería. Los métodos aproximados por lo general no toman en cuenta la topografía de la conducción, y no consideran las posibles separaciones de columna en los transitorios. Por todas estas razones los métodos aproximados no son recomendables.</p>
Seleccionar un programa de cómputo para simulación y análisis de transitorios hidráulicos.	<p>Primero tiene que asegurarse si el programa puede simular el caso de su proyecto, en cuanto a tipo de conducción (conducción simple o una red de conducción), tipo de transitorios que se necesita analizar (cierre y apertura de válvulas) y medios de control que se quieran considerar. Un buen programa de análisis de transitorio debe de tener la capacidad de modelar las separaciones de columna que puedan presentarse, dado que las separaciones de columna cambian drásticamente las presiones máximas que se producen en el transitorio. Otros factores a considerar son la facilidad de manejo del programa, el idioma en que se maneja y el costo. Es importante que el programa tenga la capacidad de representar los resultados en forma gráfica dado que los análisis de transitorios generan una gran cantidad de información difícil de manejar de otra forma. En el análisis de transitorios normalmente se utiliza un gran número de términos específicos relativos a los transitorios y a las diferentes componentes de los medios de control considerados, difíciles de entender en otro idioma por no expertos en el tema; por esta razón es preferible que programa esté en español.</p>
¿Cuáles de los posibles transitorios hidráulicos hay que analizar?	<p>El cierre y la apertura de las válvulas al final de la conducción. Normalmente el cierre se analiza para definir las presiones máximas a las cuales estará sujeta la tubería, y la apertura para definir las presiones mínimas. El cierre se debe analizar para condiciones iniciales de operación a gasto máximo (válvulas completamente abiertas) y a gastos parciales (válvulas parcialmente abiertas), dado que en los dos casos el tiempo de cierre puede ser diferente. Si los niveles en la toma y en la entrega varían considerablemente en la operación, entonces hay que analizar el transitorio con diferentes niveles para estar seguro de que se consideró el caso más desfavorable.</p>

Tabla 6.3 Tareas y recomendaciones para conducciones de gravedad

Tarea	Recomendación
<p>El análisis muestra que en el transitorio se producen presiones negativas. ¿Cómo definir si eso representa algún peligro?</p>	<p>Los peligros potenciales son dos:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Aplastamiento de la tubería por la acción de la presión atmosférica que actúa sobre el perímetro exterior del tubo b) Para algunos tipos de tubería el vacío puede succionar las juntas de goma que unen los tubos <p>El aplastamiento por presión atmosférica es factible sólo en tuberías altamente deformables, y puede ser analizado con cálculos estructurales. La deformabilidad de la tubería depende de su material y de su relación Diámetro/Espesor. Como una primera aproximación, para tubería no enterrada, se puede considerar que no hay peligro de aplastamiento si:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tubos de acero: Diámetro/Espesor < 130 - Tubos de hierro dúctil: Diámetro/Espesor < 122 - Tubos de fibro cemento: Diámetro/Espesor < 64 - Tubos de PVC: Diámetro/Espesor < 33 - Tubos de polietileno: Diámetro/Espesor < 22
<p>¿Qué clases de tubos son propensos a aplastamiento por vacío?</p>	<p>Derivado de los valores de Diámetro/Espesor de la recomendación anterior, las siguientes clase de tubos resultan vulnerables a aplastamiento por efecto del vacío:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tubos de polietileno: RD41, RD32.5, RD26 - Tubos de PVC: RD64, RD41 - Tubos de acero: Hay que evaluar cada caso calculando la relación Diámetro/Espesor.
<p>Escoger el(los) medio(s) de protección más adecuado(s)</p>	<p>La protección puede lograrse con diferentes medios. Cuál es el medio mas adecuado para una conducción dada depende primero del objetivo que se persigue con la protección, que es uno de los siguientes tres:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Reducir las presiones máximas que se producen en el transitorio y eliminar las presiones negativas b) Reducir las presiones máximas solamente c) Eliminar las presiones negativas (para los casos cuando el transitorio no produce sobrepresiones importantes). <p>La selección del (los) medio(s) de control para cada uno de estos dos casos se explica a continuación:</p>
<p>Medios de protección que eliminan presiones negativas y reducen presiones máximas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Hacer más lentos el cierre y la apertura de las válvulas - Torre de oscilación

Tabla 6.3 Tareas y recomendaciones para conducciones de gravedad

Tarea	Recomendación
-------	---------------

Escoger el(los) medio(s) de protección más adecuado(s) para eliminar presiones negativas y reducir presiones máximas.

El medio más sencillo es hacer el cierre o apertura más lentos. Las sobrepresiones más importantes se producen en la última parte del cierre, por esta razón el control de sobrepresiones es mucho más eficaz si el cierre se realiza en dos etapas: un cierre rápido en el principio seguido de un cierre lento al final.

La aplicación de la torre de oscilación se limita por la altura necesaria, que depende del desnivel topográfico existente entre el punto de su ubicación y la toma de agua.

Ejemplo de perfiles topográficos en los que es conveniente usar una torre de oscilación:



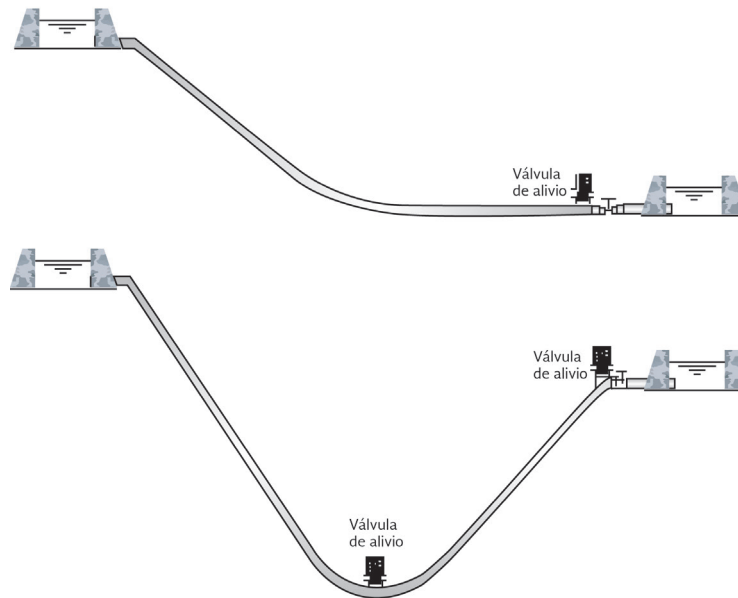
Medios de protección que reducen presiones máximas solamente

- Válvulas de alivio
- Paso lateral (by-pass) en las válvulas de cierre
- Membranas destructibles (fusibles hidráulicos)

Escoger el(los) medio(s) de protección más adecuado(s) para reducir presiones máximas solamente.

Las válvulas de alivio se ubican en los puntos más bajos de la conducción donde se presentan las presiones más altas. Existe una gran variedad de válvulas de alivio y hay que tener cuidado en seleccionar el tipo de válvula. Las válvulas de alivio más sencillas no son adecuadas para el control de los transitorios hidráulicos, ya que por lo general no responden rápidamente a sobrepresiones instantáneas. Para servir como medio de control de transitorios las válvulas deben ser especiales, que abran rápidamente y que cierren lentamente.

Ubicación de las válvulas de alivio:



El paso lateral (by-pass) en las válvulas de cierre es un medio eficaz y económico, pero hay que asegurar su cierre (automático o manual) una vez transcurrido el transitorio.

Las membranas destructibles (fusibles hidráulicos) se aplican como un medio de seguridad adicional solamente.

Tabla 6.3 Tareas y recomendaciones para conducciones de gravedad

Tarea	Recomendación
Medios de protección que eliminan presiones negativas solamente	- Válvulas de admisión de aire
Escoger el(los) medio(s) de protección más adecuado(s) para eliminar presiones negativas solamente.	El diseño de cualquier conducción normalmente considera cierto número de válvulas de aire con el objeto de asegurar la expulsión del aire en su llenado y la admisión de aire en el vaciado. Estas válvulas tienen un efecto local para eliminar la presión negativa en los transitorios, por lo que se necesitaría ubicar una (o varias) de ellas en cada punto donde se produce tal presión. Por esta razón frecuentemente no resulta factible eliminar las presiones negativas que se producen en los transitorios solo con válvulas de aire, ya que se necesitaría un gran número de esas.
Diseño hidráulico de una torre de oscilación	Consiste en definir el diámetro de la torre y los niveles máximo y mínimo que en ésta se alcanzan durante el transitorio. La manera más confiable y completa de obtenerlos es mediante un programa de cómputo especializado capaz de simular los transitorios con torres de oscilación con base en un modelo numérico. El programa se alimenta con el diámetro de la torre y como resultados se obtienen, entre otras cosas, las presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio y los niveles de agua máximo y mínimo que se alcanzan en la torre. El programa se corre varias veces con diferente diámetro para buscar una mejor solución.
Seleccionar válvulas de alivio	Se seleccionan de los catálogos de fabricantes. Los parámetros con que se seleccionan son la presión de apertura, el gasto máximo que puede expulsar la válvula y la presión con que se expulsa ese gasto (presión máxima). La presión de apertura (y con esto la presión máxima) normalmente puede ser ajustada en campo, así que el gasto máximo es el único parámetro a emplear. Los datos de las válvulas seleccionadas se introducen en el programa de simulación de los transitorios para obtener, entre otras cosas, las presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio.
Diseñar un paso lateral (by-pass) en las válvulas de cierre	Consiste en definir el diámetro del paso lateral y el tiempo de cierre de este, de forma tal que se logre la reducción deseada de las sobrepresiones. La manera más confiable y completa de obtenerlos es mediante un programa de cómputo especializado capaz de simular los transitorios que genera el cierre de válvulas con paso lateral. El programa se alimenta con el diámetro de la línea y el tiempo de cierre, y como resultados se obtienen, entre otras cosas, las presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio. El programa se corre varias veces con diferente diámetro del paso lateral y tiempo de cierre para buscar una mejor solución.
Diseñar una protección adicional con membranas destructibles (fusibles hidráulicos)	Consiste en definir la ubicación de las membranas y su diámetro. Se ubican en los lugares donde se producen las presiones máximas, y donde el agua que se descargaría al romperse las membranas no provocaría problemas. El diámetro (el área) de la membrana se obtiene de la condición de que el gasto descargado alivie lo suficiente la presión producida en el transitorio.
Diseño de una protección con válvulas de admisión de aire	Consiste en definir el diámetro de la(s) válvula(s) de admisión de aire y su ubicación. La manera más confiable y completa de obtenerlo es mediante un programa de cómputo especializado capaz de simular los transitorios con válvulas de admisión de aire con base en un modelo numérico. El programa se alimenta con el diámetro de admisión de aire y como resultados se obtienen, entre otras cosas, las presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio y el volumen de aire que se introdujo. El programa se corre varias veces con diferente diámetro para buscar una mejor solución.

6.3. PROBLEMAS EN LA OPERACIÓN DERIVADOS DE LOS TRANSITORIOS

6.3.1. CONDUCCIONES POR BOMBEO

En la Tabla 6.4, se muestra una serie de problemas para conducciones por bombeo y recomendación para su solución.

Tabla 6.4 Problemas en la operación derivados de los transitorios en conducciones por bombeo

Problema	Solución
Se reventó la tubería, ¿cómo definir cuál es la causa?	<p>En principio, la avería puede deberse, entre otras causas, a las siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Tubos defectuosos, estropeados o juntas defectuosas entre los tubos b) Sobrepresiones en los transitorios c) Falta o insuficiencia de atraques en codos, tees y extremos cerrados <p>Para definir si la causa está en los transitorios, es de suma importancia saber si la avería se produjo inmediatamente después de un paro accidental repentino de las bombas, por ejemplo, inmediatamente después de una interrupción en el suministro de energía eléctrica. Si se produjo en ese momento, entonces los transitorios son la causa más probable y se continúa con el análisis que se explica a continuación.</p>
La causa de la avería son los transitorios, ¿cómo evitar que vuelva a ocurrir?	<p>Hay que revisar, primero, si la conducción está provista de algún medio de control de transitorios.</p> <p>Si no hay medios de control, hay que efectuar un estudio de transitorios y proponer medios de control, de la misma manera como se hace en el diseño.</p> <p>Si hay medios de control, hay que inspeccionarlos para ver si funcionan adecuadamente. Para ello, es posible:</p>
La conducción está provista de una cámara de aire, ¿qué hacer para ver si funciona?	<ul style="list-style-type: none"> a) Revisar si está cerrada la válvula de seccionamiento en la conexión de la cámara con la conducción b) Revisar si se mantiene el volumen de aire requerido en la cámara. El aire en la cámara se pierde por disolución en el agua. Hay dos formas de mantenerlo: por medio de un compresor controlado por niveles de arranque y paro en la cámara, o por medio de un diafragma de goma o de plástico que separa el agua del aire dentro de la cámara c) En la conexión de la cámara con la conducción puede haber una válvula de no retorno con un paso lateral que tiene una válvula de cierre. Hay que revisar si la válvula de no retorno no está atorada por falta de mantenimiento y si está abierta la válvula de cierre en el paso lateral
La conducción está provista de una torre de oscilación, ¿qué hacer para ver si funciona?	<p>Revisar si está abierta la válvula de seccionamiento en la conexión de la torre con la conducción.</p>
La conducción está provista de tanques unidireccionales, ¿qué hacer para saber si funcionan?	<ul style="list-style-type: none"> a) Revisar si está abierta la válvula de seccionamiento en la conexión del tanque con la conducción b) Revisar si funciona el dispositivo de llenado del tanque y si mantiene el nivel de agua requerido en el tanque c) Revisar si la válvula de no retorno no está atorada por falta de mantenimiento

Tabla 6.4 Problemas en la operación derivados de los transitorios en conducciones por bombeo

Problema	Solución
La conducción está provista de válvulas de admisión y retención de aire, ¿qué hacer para saber si funcionan?	<ul style="list-style-type: none"> a) Revisar si está abierta la válvula de seccionamiento en la conexión de las válvulas con la conducción b) Revisar si el mecanismo que realiza la entrada de aire no está atorado por falta de mantenimiento c) Revisar si se expulsa (lentamente) el aire introducido
La conducción está provista de válvulas de alivio, ¿qué hacer para saber si funcionan adecuadamente?	<ul style="list-style-type: none"> a) Revisar si el mecanismo que realiza la descarga de agua no está atorado por falta de mantenimiento b) Revisar si la válvula está ajustada a una presión de apertura correcta
Las válvulas de no retorno de las bombas están provistas de paso lateral (<i>bypass</i>), ¿qué hacer para saber si funcionan?	Revisar si está abierto permanentemente el paso lateral
Las bombas están provistas de válvulas de cierre programado, ¿qué revisar?	Revisar si por falta de mantenimiento se desajustó el mecanismo de cierre por lo que no cierra en el tiempo y con el programa previsto.
La conducción está provista de válvulas de no retorno ubicadas en la tubería (además de las válvulas en las bombas), ¿qué hacer para saber si funcionan adecuadamente?	Revisar si las válvulas de no retorno están atoradas por falta de mantenimiento.
La conducción está provista de membranas destructibles (fusibles hidráulicos) que no se rompieron. ¿Qué revisar para saber por qué no funcionan?	<ul style="list-style-type: none"> a) Revisar si está abierta la válvula de seccionamiento en la conexión de las membranas con la conducción b) Revisar si se instalaron membranas con la presión de rotura adecuada
La conducción está provista de válvulas anticipadoras, ¿qué hacer para saber si funcionan adecuadamente?	<ul style="list-style-type: none"> a) Revisar si la válvula está ajustada a una presión de apertura correcta y si se llega a esa presión en el inicio del transitorio b) Revisar si la válvula cierra demasiado rápido por no estar bien ajustada
No se detecta un funcionamiento inadecuado de los medios de control existentes, ¿qué hacer?	Llevar a cabo un estudio de transitorios con los medios de control existentes, para ver si su capacidad es suficiente. Proponer una nueva capacidad de los medios si no resultan suficientes, o nuevos medios de control, utilizando el procedimiento de diseño explicado en el apartado 6.2.1.
Se detectó un funcionamiento inadecuado de los medios de control existentes, ¿qué hacer?	Corregir el funcionamiento no adecuado y llevar a cabo un estudio de transitorios con los medios de control existentes, para asegurarse de que controlan lo suficiente.
Se aplastó la tubería. ¿Cómo definir cuál es la causa?	<p>En principio, se puede deber a una de las siguientes cuatro causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Tubos defectuosos b) Presiones negativas en los transitorios c) Presiones negativas en un vaciado de la línea d) Tráfico pesado sobre una tubería que no tiene un colchón de recubrimiento suficiente. <p>Para definir cuál fue la causa, es de suma importancia saber si la falla se produjo inmediatamente después de un paro accidental de las bombas, por ejemplo, inmediatamente después de una interrupción en el suministro de energía eléctrica, o en un vaciado de la línea. Si se produjo en ese momento, entonces las presiones negativas son la causa más probable y se continua con el análisis que se explica a continuación.</p>

Tabla 6.4 Problemas en la operación derivados de los transitorios en conducciones por bombeo

Problema	Solución
<p>La tubería se aplastó inmediatamente después de una interrupción en el suministro de energía eléctrica.</p>	<p>Hay que revisar primero si la conducción está provista de algún medio de control de transitorios.</p> <p>Si no hay medios de control, hay que efectuar un estudio de transitorios y proponer medios de control, de la misma manera como se hace en el diseño.</p> <p>Si hay medios de control, hay que inspeccionarlos para ver si funcionan adecuadamente. La inspección de los varios tipos de medios de control fue descrita anteriormente. A continuación se describe la inspección de otros medios, cuyo objetivo es reducir (o eliminar) las presiones negativas solamente:</p>
<p>La conducción está provista de válvulas de admisión de aire, ¿qué hacer para saber si funcionan?</p>	<p>a) Revisar si está abierta la válvula de seccionamiento en la conexión de las válvulas con la conducción</p> <p>b) Revisar si el mecanismo que realiza la entrada de aire no está atorado por falta de mantenimiento</p> <p>c) Revisar si se expulsa el aire introducido</p>
<p>La planta de bombeo está provista de tubos de paso lateral (<i>bypass</i>) que conectan el nivel en la toma con la línea de conducción, ¿qué hacer para saber si funcionan?</p>	<p>Revisar si está abierta la válvula de seccionamiento en el tubo de paso lateral</p>
<p>La torre de oscilación derrama agua.</p>	<p>Hay que efectuar un estudio de transitorios para definir los niveles de agua que se alcanzan en la torre y proponer una solución, de la misma manera como se hace en el diseño.</p>
<p>Las válvulas de no retorno de las bombas están provistas de paso lateral (<i>bypass</i>). La tubería se vacía cada vez que se desconectan las bombas.</p>	<p>Hay que revisar si se cierra (manual o automáticamente) el tubo de paso lateral con el paro de las bombas.</p>
<p>Pocos segundos después de cada interrupción del suministro de la energía eléctrica de las bombas se escucha un ruido fuerte (golpes) en la tubería de la planta de bombeo.</p>	<p>Las causas pueden ser principalmente dos:</p> <p>a) Sobrepresiones del transitorio hidráulico. Hay que revisar si la conducción está provista de medios de control de transitorios y si estos funcionan, como fue explicado. Si no hay medios de control, hay que efectuar un estudio de transitorios y proponer medios de control.</p> <p>b) El tipo de válvulas de no retorno en las bombas no es adecuado, ya que produce un golpe fuerte en su cierre. En este caso, hay que cambiar el tipo de válvula.</p>

6.3.2. CONDUCCIONES POR GRAVEDAD

En la Tabla 6.5, se muestra una serie de problemas para conducciones por gravedad, con recomendaciones para su solución

Tabla 6.5 Problemas en la operación derivados de los transitorios en conducciones por gravedad

Problema	Solución
Se reventó la tubería. ¿Cómo definir cuál es la causa?	<p>En principio, la avería se puede deber a dos causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Tubos o juntas entre los tubos defectuosos b) Sobrepresiones en los transitorios <p>Para definir si la causa fueron transitorios, es de suma importancia saber si la avería se produjo inmediatamente después de un cierre de válvulas. Si se produjo en ese momento, entonces los transitorios son la causa más probable y se continua con el análisis que se explica a continuación:</p>
La causa de la avería son los transitorios. ¿Cómo evitar que vuelva a ocurrir?	<p>Hay que revisar primero si la conducción está provista de algún medio de control de transitorios.</p> <p>Si no hay medios de control, hay que efectuar un estudio de transitorios y proponer medios de control, de la misma manera como se hace en el diseño.</p> <p>Si hay medios de control, hay que inspeccionarlos para ver si funcionan adecuadamente, como se describe a continuación para cada caso:</p>
La conducción está provista de torre de oscilación. ¿Qué hacer para saber si esta funciona?	Revisar si está abierta la válvula de seccionamiento en la conexión de la torre con la conducción.
La conducción está provista de válvulas de alivio. ¿Qué hacer para saber si funcionan adecuadamente?	<ul style="list-style-type: none"> a) Revisar si el mecanismo que realiza la descarga de agua no está atorado por falta de mantenimiento. b) Revisar si la válvula está ajustada a una presión de apertura correcta.
Las válvulas de cierre están provistas de tubos de paso lateral (<i>bypass</i>). ¿Qué hacer para saber si funcionan?	Revisar si está abierta permanentemente la línea de paso.
La conducción está provista de membranas destructibles (fusibles hidráulicos) que no se rompieron, ¿qué revisar?	<ul style="list-style-type: none"> a) Revisar si está abierta la válvula de seccionamiento en la conexión de las membranas con la conducción. b) Revisar si se instalaron membranas con la presión de rotura adecuada.
No se detecta un funcionamiento inadecuado de los medios de control existentes. ¿Qué hacer?	Llevar a cabo un estudio de transitorios con los medios de control existentes, para ver si su capacidad es suficiente. Proponer una nueva capacidad de los medios si no resultan suficientes, o nuevos medios de control, utilizando el procedimiento de diseño.
Se detectó un funcionamiento inadecuado de los medios de control existentes. ¿Qué hacer?	Corregir el funcionamiento no adecuado. Llevar a cabo, de todas formas, un estudio de transitorios con los medios de control existentes, para asegurarse de que controlarán lo suficiente.

Tabla 6.5 Problemas en la operación derivados de los transitorios en conducciones por gravedad

<p>Se aplastó la tubería. ¿Cómo definir cuál es la causa?</p>	<p>En principio, puede ser una de las siguientes cuatro:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Tubos defectuosos b) Presiones negativas en los transitorios c) Presiones negativas en un vaciado de la línea d) Tráfico pesado sobre una tubería que no tiene un colchón de recubrimiento suficiente <p>Para definir cuál fue la causa, es de suma importancia saber si la falla se produjo inmediatamente después de un cierre de válvulas. Si se produjo en ese momento, entonces las presiones negativas son la causa más probable de la falla y se continúa con el análisis que se explica a continuación.</p>
<p>La tubería se aplastó inmediatamente después de un cierre de válvulas.</p>	<p>Hay que revisar primero si la conducción está provista de algún medio de control de transitorios.</p> <p>Si no hay medios de control, hay que efectuar un estudio de transitorios y proponer medios de control, de la misma manera como se hace en el diseño.</p> <p>Si hay medios de control, hay que inspeccionarlos para ver si funcionan adecuadamente. La inspección de los medios de control fue descrita anteriormente. A continuación se describe la inspección de otros medios, cuyo objetivo es reducir (o eliminar) las presiones negativas solamente</p>
<p>La conducción está provista de válvulas de admisión de aire, ¿qué hacer para saber si funcionan?</p>	<ul style="list-style-type: none"> a) Revisar si está abierta la válvula de seccionamiento en la conexión de las válvulas con la conducción. b) Revisar si el mecanismo que realiza la entrada de aire no está atorado por falta de mantenimiento. c) Revisar si se expulsa el aire introducido.
<p>La planta de bombeo está provista con tubos de paso lateral (<i>bypass</i>) en las válvulas de cierre, ¿qué hacer para saber si funcionan?</p>	<p>Revisar si está abierta la válvula de seccionamiento en el tubo de paso lateral.</p>
<p>La torre de oscilación derrama agua.</p>	<p>Hay que efectuar un estudio de transitorios para definir los niveles de agua que se alcanzan en la torre y proponer una solución, de la misma manera como se hace en la fase de diseño.</p>

CONCLUSIONES

El objetivo de este material es informar a los diseñadores y personal de operación acerca de los fenómenos transitorios en líneas de conducción y las implicaciones que puede tener la ocurrencia de estos.

Se dan recomendaciones para considerar en el diseño de líneas de conducción y mitigar la intensidad de un fenómeno transitorio. En general, la base del análisis se apoya en el uso de los modelos de simulación matemática, pero el libro procura brindar la información necesaria para una adecuada interpretación de los resultados arrojados por el modelo.

Una vez realizada la simulación, el libro busca guiar al diseñador en la toma de decisiones para seleccionar el mecanismo de alivio más adecuado para cada situación presentada. A diferencia de un manual de usuario de algún programa de simulación, en este documento se aborda cómo estimar los diversos parámetros, obtener mejores resultados y conocimiento adecuado de los fenómenos; también se describe el proceso de evaluación y las consideraciones de diseño para cada situación.

Recuerde que los procedimientos, datos, modelos matemáticos y programas de cómputo presentados en este libro obedecen a la experiencia vertida a lo largo del tiempo por parte de los especialistas en la materia y de los proyectos en que han trabajado. Sin embargo, en ningún caso debe considerarse esta información como regla o norma oficial, más bien debe ser considerada una guía para el proceso de diseño de una línea de conducción. Al igual que una línea de conducción, ningún modelo de simulación es igual a otro; los procedimientos, datos y resultados obtenidos rara vez pueden exportarse de uno a otro. Por eso, la implementación de un modelo es un proceso de aprendizaje y retroalimentación.



BIBLIOGRAFÍA

- Chaudhry, M.H. (1979), *Applied Hydraulics Transients*, Van Nostrand Reinhold Company, British Columbia, Canada.
- Dikarevskii, V.S., Zirianov, V.P. y Tatura A. E. (1981), *Protección antiarriete de las redes de riego*, Editorial Kolos, Moscú, (en ruso).
- Kiseliov, V.A. (1972), *Mecánica de construcción*, Moscú, Mir.
- Meunier, M. (1980), *Les coups de bélier et la protección des reseaux d'eau sous pression*, Ecole Nationale du Genie Rural des Eaux et des Forest, Paris.
- Parmakian, J. (1963). *Waterhammer Analysis*. Nueva York: Dover Publications.
- Puech, C., y Meunier, M. (1978). Etude du fonctionnment et du dimensionnement des balons d'air anti- bélier. *Bulletin Technique du Genie Rural*, No. 124.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (1988). *Diseño y operación hidráulicos de conducciones de agua a presión (en acueductos)*. México: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Soto, G., y Guaycochea, D. (2007). *Diplomado en Flujo de fluidos y fonómenos transitorios en tuberías a presión o*. México: UAM Azc.
- Stephenson, D. (1981). *Pipeline Design for Water Engineers*. Elsevier Scientific Publishing Company.
- Thorley, A. (1991). *Fluid Transients in Pipeline Systems*. D.&L. George Ltd.
- Tullis, P. (1989). *Hydraulics of Pipelines*. John Wiley & Sons.



TABLA DE CONVERSIONES DE UNIDADES DE MEDIDA

Sigla	Significado	Sigla	Significado
mg	miligramo	kg/m ³	kilogramo por metro cúbico
g	gramo	l/s	litros por segundo
kg	kilogramo	m ³ /d	metros cúbicos por día
mm	milímetro	Sm ³ /h	condiciones estándar de metro cúbico por hora
cm	centímetro	Scfm	condiciones estándar de pies cúbicos por minuto
m	metro	°C	grados Celsius
ml	mililitro	psia	libra-fuerza por pulgada cuadrada absoluta
l	litro	cm/s	centímetro por segundo
m ³	metro cúbico	m/s	metro por segundo
s	segundo	HP	caballo de fuerza (medida de energía)
h	hora	kW	kilowatt
d	día	UNT	unidades nefelométricas de turbiedad
mg/l	miligramo por litro		

Longitud

Sistema métrico	Sistema Inglés	Siglas
1 milímetro (mm)	0.03	in
1 centímetro (cm) = 10 mm	0.39	in
1 metro (m) = 100 cm	1.09	yd
1 kilómetro (km) = 1 000 m	0.62	mi
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 pulgada (in)	2.54	cm
1 pie (ft) = 12 pulgadas	0.30	m
1 yarda (yd) = 3 pies	0.91	m
1 milla (mi) = 1 760 yardas	1.60	km
1 milla náutica (nmi) = 2 025.4 yardas	1.85	km

Superficie

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm ² = 100 mm ²	0.15	in ²
1 m ² = 10 000 cm ²	1.19	yd ²
1 hectárea (ha) = 10 000 m ²	2.47	acres
1 km ² = 100 ha	0.38	mi ²
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 in ²	6.45	cm ²
1 ft ² = 144 in ²	0.09	m ²
1 yd ² = 9 ft ²	0.83	m ²
1 acre = 4 840 yd ²	4 046.90	m ²
1 milla ² = 640 acres	2.59	km ²

Volumen/capacidad

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm ³	0.06	in ³
1 dm ³ = 1 000 cm ³	0.03	ft ³
1 m ³ = 1 000 dm ³	1.30	yd ³
1 litro (L) = 1 dm ³	1.76	pintas
1 hectolitro (hL) = 100 L	21.99	galones
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 in ³	16.38	cm ³
1 ft ³ = 1 728 in ³	0.02	m ³
1 onza fluida EUA = 1.0408 onzas fluidas RU	29.57	mL
1 pinta (16 onzas fluidas) = 0.8327 pintas RU	0.47	L
1 galón EUA = 0.8327 galones RU	3.78	L

Masa/peso

Sistema métrico	Sistema inglés	
1 miligramo (mg)	0.0154	grano
1 gramo (g) = 1 000 mg	0.0353	onza
1 kilogramo (kg) = 1 000 g	2.2046	libras
1 tonelada (t) = 1000 kg	0.9842	toneladas larga
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 onza (oz) = 437.5 granos	28.35	g
1 libra (lb) = 16 oz	0.4536	kg
1 stone = 14 lb	6.3503	kg
1 hundredweight (cwt) = 112 lb	50.802	kg
1 tonelada larga = 20 cwt	1.016	t

Temperatura

$$^{\circ}C = \frac{5}{9}(^{\circ}F -$$

$$^{\circ}F = \frac{9}{5}(^{\circ}C) + 32$$

Otros sistemas de unidades		Multiplicado por	Sistema Internacional de Unidades (SI)	
Unidad	Símbolo	Factor de conversión	Se convierte a	
Longitud				
Pie	pie, ft.,'	0.30	metro	m
Pulgada	plg, in,"	25.40	milímetro	mm
Presión/esfuerzo				
Kilogramo fuerza/cm ²	kg _f /cm ²	98 066.50	pascal	Pa
Libra/pulgada ²	lb/ plg ² , PSI	6 894.76	pascal	Pa
atmósfera técnica	at	98 066.50	pascal	Pa
metro de agua	m H ₂ O (mca)	9 806.65	pascal	Pa
mm de mercurio	mm Hg	133.32	pascal	Pa
bar	bar	100 000.00	pascal	Pa
Fuerza/ peso				
kilogramo fuerza	kg _f	9.80	newton	N
Masa				
libra	lb	0.45	kilogramo	kg
onza	oz	28.30	gramo	g
Peso volumétrico				
kilogramo fuerza/m ³	kg _f /m ³	9.80	N/m ³	N/m ³
libra /ft ³	lb/ft ³	157.08	N/m ³	N/m ³
Potencia				
caballo de potencia	CP, HP	745.69	watt	W
caballo de vapor	CV	735.00	watt	W
Viscosidad dinámica				
poise	μ	0.01	pascal segundo	Pa s
Viscosidad cinemática				
viscosidad cinemática	v	1	stoke	m ² /s (St)
Energía/ Cantidad de calor				
caloría	cal	4.18	joule	J
unidad térmica británica	BTU	1 055.06	joule	J
Temperatura				
grado Celsius	°C	tk=tc + 273.15	grado Kelvin	K

Nota: El valor de la aceleración de la gravedad aceptado internacionalmente es de 9.80665 m/s²

Longitud								
de / a	mm	cm	m	km	mi	milla náutica (nmi)	ft	in
mm	1.000	0.100	0.001					
cm	10000	1.000	0.010				0.033	0.394
m	1 000.000	100.000	1.000	0.001			3.281	39.370
km			0.001	1.000	0.621	0.540	3 280.83	0.039
mi			1 609.347	1.609	1.000	0.869	5 280.000	
nmi			1 852.000	1.852	1.151	1.000	6 076.115	
ft		30.480	0.305				1.000	12.000
in	25.400	2.540	0.025				0.083	1.000

Superficie								
de / a	cm ²	m ²	km ²	ha	mi ²	acre	ft ²	in ²
cm ²	1.00						0.001	0.155
m ²	10 000.00	1.00					10.764	1 550.003
km ²			1.000	100.000	0.386	247.097		
ha		10 000.00	0.010	1.000	0.004	2.471		
mi ²			2.590	259.000	1.000	640.000		
acre		4 047.00	0.004	0.405	0.002	1.000		
ft ²	929.03	0.09					1.000	0.007
in ²	6.45						144.000	1.000

Volumen								
de / a	cm ³	m ³	L	ft ³	gal. EUA	acre-ft	in ³	yd ³
cm ³	1.000		0.001				0.061	
m ³		1.000	1 000.000	35.314	264.200			1.307
L	1 000.000	0.001	1.000	0.035	0.264		61.023	
ft ³		0.028	28.317	1.000	7.481			0.037
gal. EUA		0.004	3.785	0.134	1.000		230.974	
acre-ft		1 233.490				1.000		
in ³	16.387		0.016		0.004		1.000	
Yd ³		0.765		27.000				1.000

Gasto								
de / a	l/s	cm ³ /s	gal/día	gal/min	l/min	m ³ /día	m ³ /h	ft ³ /s
l/s	1.000	1 000.000		15.851	60.000	86.400	3.600	0.035
cm ³ /s	0.001	1.000	22.825	0.016	0.060	0.083		
gal/día		0.044	1.000			0.004		
gal/min	0.063	63.089	1 440.000	1.000	0.000	5.451	0.227	0.002
l/min	0.017	16.667	0.000	0.264	1.000	1.440	0.060	
m ³ /día	0.012	11.570	264.550	0.183	0.694	1.000	0.042	
m ³ /h	0.278		6 340.152	4.403	16.667	24.000	1.000	0.010
ft ³ /s	28.316			448.831	1 698.960	2 446.590	101.941	1.000

Eficiencia de pozo			
de	a	gal/min/pie	l/s/m
gal/min/pie		1.000	0.206
l/s/m		4.840	1.000

Permeabilidad							
de	a	cm/s	gal/día/Pie ²	millones gal/día/acre	m/día	pie/s	Darcy
cm/s		1.000	21 204.78		864.000	0.033	
gal/día/pie ²			1.000		0.041		0.055
millón gal/día/acre				1.000	0.935		
m/día		0.001	24.543	1.069	1.000		1.351
pie/s		30.480			26 334.72	1.000	
Darcy			18.200		0.740		1.000

Peso									
de	a	grano	gramo	kilogramo	libra	onza	tonelada corta	tonelada larga	tonelada métrica
Grano (gr)		1.000	0.065						
Gramo (g)		15.432	1.000	0.001	0.002				
Kilogramo (kg)			1 000.000	1.000	2.205	35.273			0.001
Libra (lb)			453.592	0.454	1.000	16.000			
Onza (oz)		437.500	28.350			1.000			
t corta				907.180	2 000.000		1.000		0.907
t larga				1 016.000	2 240.000		1.119	1.000	1.016
t métrica				1 000.000	2 205.000		1.101	0.986	1.000

Potencia									
de	a	CV	HP	kW	W	ft lb/s	kg m/s	BTU/s	kcal/s
CV		1.000	0.986	0.736	735.500	542.500	75.000	0.697	0.176
HP		1.014	1.000	0.746	745.700	550.000	76.040	0.706	0.178
kW		1.360	1.341	1.000	1 000.000	737.600	101.980	0.948	0.239
W				0.001	1.000	0.738	0.102		
ft lb/s					1.356	1.000	0.138	0.001	
kg m/s		0.013	0.013	0.009	9.806	7.233	1.000	0.009	0.002
BTU/s		1.434	1.415	1.055	1 055.000	778.100	107.580	1.000	0.252
kcal/s		5.692	5.614	4.186	4 186.000	3 088.000	426.900	3.968	1.000

Presión								
de	a	atmósfera	Kg/cm ²	lb/in ²	mm de Hg	in de Hg	m de H ₂ O	ft de H ₂ O
atmósfera		1.000	1.033	14.696	760.000	29.921	10.330	33.899
kg/cm ²		0.968	1.000	14.220	735.560	28.970	10.000	32.810
lb/in ²		0.068	0.070	1.000	51.816	2.036	0.710	2.307
mm de Hg		0.001	0.001	0.019	1.000	0.039	0.013	0.044
in de Hg		0.033	0.035	0.491	25.400	1.000	0.345	1.133
m de agua		0.096	0.100	1.422	73.560	2.896	1.000	3.281
ft de agua		0.029	0.030	0.433	22.430	0.883	0.304	1.000

Energía									
de	a	CV hora	HP hora	kW hora	J	ft.lb	kgm	BTU	kcal
CV hora		1.000	0.986	0.736				2 510.000	632.500
HP hora		1.014	1.000	0.746				2 545.000	641.200
kW hora		1.360	1.341	1.000				3 413.000	860.000
J					1.000	0.738	0.102		
ft.lb					1.356	1.000	0.138		
kgm					9.806	7.233	1.000		
BTU					1 054.900	778.100	107.580	1.000	0.252
kcal					4 186.000	3 087.000	426.900	426.900	1.000

Transmisividad				
de	a	cm ² /s	gal/día/pie	m ² /día
cm ² /s		1.000	695.694	8.640
gal/día/ft		0.001	1.000	0.012
m ² /día		0.116	80.520	1.000

Conversión de pies y pulgadas, a metros												
ft, in/m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0.000	0.025	0.051	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.279
1	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584
2	0.610	0.635	0.660	0.686	0.711	0.737	0.762	0.787	0.813	0.838	0.864	0.889
3	0.914	0.940	0.965	0.991	1.016	1.041	1.067	1.092	1.117	1.143	1.168	1.194
4	1.219	1.245	1.270	1.295	1.321	1.346	1.372	1.397	1.422	1.448	1.473	1.499
5	1.524	1.549	1.575	1.600	1.626	1.651	1.676	1.702	1.727	1.753	1.778	1.803
6	1.829	1.854	1.880	1.905	1.930	1.956	1.981	2.007	2.032	2.057	2.083	2.108
7	2.134	2.159	2.184	2.210	2.235	2.261	2.286	2.311	2.337	2.362	2.388	2.413
8	2.438	2.464	2.489	2.515	2.540	2.565	2.591	2.616	2.642	2.667	2.692	2.718
9	2.743	2.769	2.794	2.819	2.845	2.870	2.896	2.921	2.946	2.972	2.997	3.023
10	3.048	3.073	3.099	3.124	3.150	3.175	3.200	3.226	3.251	3.277	3.302	3.327
11	3.353	3.378	3.404	3.429	3.454	3.480	3.505	3.531	3.556	3.581	3.607	3.632
12	3.658	3.683	3.708	3.734	3.759	3.785	3.810	3.835	3.861	3.886	3.912	3.937
13	3.962	3.988	4.013	4.039	4.064	4.089	4.115	4.140	4.166	4.191	4.216	4.242
14	4.267	4.293	4.318	4.343	4.369	4.394	4.420	4.445	4.470	4.496	4.521	4.547
15	4.572	4.597	4.623	4.648	4.674	4.699	4.724	4.750	4.775	4.801	4.826	4.851
16	4.877	4.902	4.928	4.953	4.978	5.004	5.029	5.055	5.080	5.105	5.131	5.156
17	5.182	5.207	5.232	5.258	5.283	5.309	5.334	5.359	5.385	5.410	5.436	5.461
18	5.486	5.512	5.537	5.563	5.588	5.613	5.639	5.664	5.690	5.715	5.740	5.766
19	5.791	5.817	5.842	5.867	5.893	5.918	5.944	5.969	5.994	6.020	6.045	6.071
20	6.096	6.121	6.147	6.172	6.198	6.223	6.248	6.274	6.299	6.325	6.350	6.375
21	6.401	6.426	6.452	6.477	6.502	6.528	6.553	6.579	6.604	6.629	6.655	6.680
22	6.706	6.731	6.756	6.782	6.807	6.833	6.858	6.883	6.909	6.934	6.960	6.985
23	7.010	7.036	7.061	7.087	7.112	7.137	7.163	7.188	7.214	7.239	7.264	7.290
24	7.315	7.341	7.366	7.391	7.417	7.442	7.468	7.493	7.518	7.544	7.569	7.595
25	7.620	7.645	7.671	7.696	7.722	7.747	7.772	7.798	7.823	7.849	7.874	7.899
26	7.925	7.950	7.976	8.001	8.026	8.052	8.077	8.103	8.128	8.153	8.179	8.204
27	8.230	8.255	8.280	8.306	8.331	8.357	8.382	8.407	8.433	8.458	8.484	8.509
28	8.534	8.560	8.585	8.611	8.636	8.661	8.687	8.712	8.738	8.763	8.788	8.814
29	8.839	8.865	8.890	8.915	8.941	8.966	8.992	9.017	9.042	9.068	9.093	9.119
30	9.144	9.169	9.195	9.220	9.246	9.271	9.296	9.322	9.347	9.373	9.398	9.423
31	9.449	9.474	9.500	9.525	9.550	9.576	9.601	9.627	9.652	9.677	9.703	9.728
32	9.754	9.779	9.804	9.830	9.855	9.881	9.906	9.931	9.957	9.982	10.008	10.033
33	10.058	10.084	10.109	10.135	10.160	10.185	10.211	10.236	10.262	10.287	10.312	10.338
34	10.363	10.389	10.414	10.439	10.465	10.490	10.516	10.541	10.566	10.592	10.617	10.643
35	10.668	10.693	10.719	10.744	10.770	10.795	10.820	10.846	10.871	10.897	10.922	10.947

La segunda columna es la conversión de pies a metros; las siguientes columnas son la conversión de pulgadas a metros que se suman a la anterior conversión.

Tabla de conversión de pulgadas a milímetros								
Pulgadas	0	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8
0	0	3.175	6.35	9.525	12.7	15.875	19.05	22.225
1	25.4	28.575	31.75	34.925	38.1	41.275	44.45	47.625
2	50.8	53.975	57.15	60.325	63.5	66.675	69.85	73.025
3	76.2	79.375	82.55	85.725	88.9	92.075	95.25	98.425
4	101.6	104.775	107.95	111.125	114.3	117.475	120.65	123.825
5	127.0	130.175	133.35	136.525	139.7	142.875	146.05	149.225
6	152.4	155.575	158.75	161.925	165.1	168.275	171.45	174.625
7	177.8	180.975	184.15	187.325	190.5	193.675	196.85	200.025
8	203.2	206.375	209.55	212.725	215.9	219.075	222.25	225.425
9	228.6	231.775	234.95	238.125	241.3	244.475	247.65	250.825
10	254.0	257.175	260.35	263.525	266.7	269.875	273.05	276.225
11	279.4	282.575	285.75	288.925	292.1	295.275	298.45	301.625
12	304.8	307.975	311.15	314.325	317.5	320.675	323.85	327.025
13	330.2	333.375	336.55	339.725	342.9	346.075	349.25	352.425
14	355.6	358.775	361.95	365.125	368.3	371.475	374.65	377.825
15	381.0	384.175	387.35	390.525	393.7	396.875	400.05	403.225
16	406.4	409.575	412.75	415.925	419.1	422.275	425.45	428.625
17	431.8	434.975	438.15	441.325	444.5	447.675	450.85	454.025
18	457.2	460.375	463.55	466.725	469.9	473.075	476.25	479.425
19	482.6	485.775	488.95	492.125	495.3	498.475	501.65	504.825
20	508.0	511.175	514.35	517.525	520.7	523.875	527.05	530.225
21	533.4	536.575	539.75	542.925	546.1	549.275	552.45	555.625
22	558.8	561.975	565.15	568.325	571.5	574.675	577.85	581.025
23	584.2	587.375	590.55	593.725	596.9	600.075	603.25	606.425
24	609.6	612.775	615.95	619.125	622.3	625.475	628.65	631.825
25	635.0	638.175	641.35	644.525	647.7	650.875	654.05	657.225
26	660.4	663.575	666.75	669.925	673.1	676.275	679.45	682.625
27	685.8	688.975	692.15	695.325	698.5	701.675	704.85	708.025
28	711.2	714.375	717.55	720.725	723.9	727.075	730.25	733.425
29	736.6	739.775	742.95	746.125	749.3	752.475	755.65	758.825
30	762.0	765.175	768.35	771.525	774.7	777.875	781.05	784.225

Fórmulas generales para la conversión de los diferentes sistemas

Centígrados a Fahrenheit	$^{\circ}\text{F}=9/5^{\circ}\text{C}+32$
Fahrenheit a Centígrados	$^{\circ}\text{C}=5/9 (^{\circ}\text{F}-32)$
Réaumur a Centígrados	$^{\circ}\text{C}=5/4 ^{\circ}\text{R}$
Fahrenheit a Réaumur	$^{\circ}\text{R}=4/9 (^{\circ}\text{F}-32)$
Réaumur a Fahrenheit	$^{\circ}\text{F}=(9/4^{\circ}\text{R})+32$
Celsius a Kelvin	$^{\circ}\text{K}=273.15+^{\circ}\text{C}$
Fahrenheit a Rankine	$^{\circ}\text{Ra}=459.67+^{\circ}\text{F}$

Rankine a Kelvin

 $^{\circ}\text{K}=5/9^{\circ}\text{Ra}$

Factores químicos de conversión					
	A	B	C	D	E
Constituyentes	epm a ppm	ppm a epm	epm a gpg	gpg a epm	ppm a ppm CaCO ₃
calcio Ca ⁺²	20.04	0.04991	1.1719	0.8533	2.4970
hierro Fe ⁺²	27.92	0.03582	1.6327	0.6125	1.7923
magnesio Mg ⁺²	12.16	0.08224	0.7111	1.4063	4.1151
potasio K ⁺¹	39.10	0.02558	2.2865	0.4373	1.2798
sodio Na ⁺¹	23.00	0.04348	1.3450	0.7435	2.1756
bicarbonato (HCO ₃) ⁻¹	61.01	0.01639	3.5678	0.2803	0.8202
carbonato (CO ₃) ⁻²	30.00	0.03333	1.7544	0.5700	1.6680
cloro (Cl) ⁻¹	35.46	0.02820	2.0737	0.4822	1.4112
hidróxido (OH) ⁻¹	17.07	0.05879	0.9947	1.0053	2.9263
nitrate (NO ₃) ⁻¹	62.01	0.01613	3.6263	0.2758	0.8070
fosfato (PO ₄) ⁻³	31.67	0.03158	1.8520	0.5400	1.5800
sulfato (SO ₄) ⁻²	48.04	0.02082	2.8094	0.3559	1.0416
bicarbonato de calcio Ca(HCO ₃) ₂	805.00	0.01234	4.7398	0.2120	0.6174
carbonato de calcio (CaCO ₃)	50.04	0.01998	2.9263	0.3417	1.0000
cloruro de calcio (CaCl ₂)	55.50	0.01802	3.2456	0.3081	0.9016
hidróxido de calcio Ca(OH) ₂	37.05	0.02699	2.1667	0.4615	1.3506
sulfato de calcio (CaSO ₄)	68.07	0.01469	3.9807	0.2512	0.7351
bicarbonato férrico Fe(HCO ₃) ₃	88.93	0.01124	5.2006	0.1923	0.5627
carbonato férrico Fe ₂ (CO ₃) ₃	57.92	0.01727	3.3871	0.2951	0.8640
sulfato férrico Fe ₂ (CO ₄) ₃	75.96	0.01316	4.4421	0.2251	0.6588
bicarbonato magnésico Mg(HCO ₃) ₂	73.17	0.01367	4.2789	0.2337	0.6839
carbonato magnésico (MgCO ₃)	42.16	1.02372	2.4655	0.4056	1.1869
cloruro de magnesio (MgCl ₂)	47.62	0.02100	2.7848	0.3591	1.0508
hidróxido de magnesio Mg(OH) ₂	29.17	0.03428	1.7058	0.5862	1.7155
sulfato de magnesio (MgSO ₄)	60.20	0.01661	3.5202	0.2841	0.6312

epm = equivalentes por millón

ppm = partes por millón

gpg = granos por galón

p.p.m. CaCO₃ = partes por millón de carbonato de calcio



ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1 Sobrepresión y depresión que genera el cierre de una válvula en un punto intermedio de una tubería	4
Ilustración 1.2 Arribo de una onda de presión a una unión de tubos	5
Ilustración 1.3 Reflejo de una onda de sobrepresión de un tanque	7
Ilustración 1.4 Reflejo de una onda de sobrepresión de un extremo cerrado	7
Ilustración 1.5 Tubería en las condiciones de régimen permanente	10
Ilustración 1.6 Evolución de la presión en el inicio de una línea de bombeo durante el transitorio que genera el paro de bombas, sin separación de columna en la línea	13
Ilustración 1.7 Transitorio con separación de la columna en una línea de bombeo	14
Ilustración 1.8 Transitorio generado por la apertura de una válvula	17
Ilustración 1.9 Generación de vacíos con la apertura de una válvula	18
Ilustración 1.10 Transitorio generado por el cierre de una válvula al final de una conducción	18
Ilustración 2.1 Torre de oscilación	24
Ilustración 2.2 Formas de mantener el aire en cámaras de aire: a) Con un compresor; b) y c) Con una membrana	26
Ilustración 2.3 Esquema de funcionamiento de un tanque unidireccional abierto	28
Ilustración 2.4 Tanque unidireccional con su dispositivo de llenado	30
Ilustración 2.5 Esquema de funcionamiento de un tanque bidireccional	31
Ilustración 2.6 Tanque Bidireccional	32
Ilustración 2.7 Efecto de la ubicación de una válvula de no retorno intermedia en una tubería	33
Ilustración 2.8 Diferentes combinaciones de una válvula de no retorno intermedia con otros medios de control	34
Ilustración 2.9 Esquema de funcionamiento de una válvula de alivio de resorte (Soto y Guaycochea, 2007)	35
Ilustración 2.10 Curva característica de una válvula de alivio	36
Ilustración 2.11 Dispositivo de admisión y retención de aire usado en Rusia 1 - línea de conducción, 2 - válvula de paso, 3 - válvulas de no retorno, 4 -filtro, 5 - tubo vertical, 6 - tubo que genera presión sobre las válvulas de no retorno	39
Ilustración 2.12 Arreglo de admisión y retención (expulsión lenta) de aire usado en Francia	40
Ilustración 2.13 Colocación de una membrana destructible	41

Ilustración 2.14 Equipo de bombeo con volante de inercia (http://www.eoi.es/blogs/merme/page/15/)	42
Ilustración 2.15 Diferentes formas de realizar una descarga inversa de agua en bombeos	45
Ilustración 2.16 Paso lateral (bypass) en una planta de bombeo	46
Ilustración 3.1 Tubería en depresión y colapsada	50
Ilustración 3.2 Líneas piezométricas con un flujo inverso, 1) Con un diámetro menor del bypass. 2) Con un diámetro mayor del bypass	54
Ilustración 3.3 Bypass en una válvula de no retorno	55
Ilustración 3.4 Diagrama de cierre en dos etapas	56
Ilustración 3.5 Evolución de la presión para diferentes pérdidas de carga en la entrada del agua a la cámara de aire	62
Ilustración 3.6 Parámetros de diseño de una cámara de aire	62
Ilustración 3.7 Conexión de la cámara con la tubería: a) simple, b) con pérdidas asimétricas	64
Ilustración 4.1 Perfil topográfico de la tubería del Ejemplo 1	74
Ilustración 4.2 Resultados del análisis en estado permanente	77
Ilustración 4.3 Resultados del análisis de paro de las bombas	78
Ilustración 4.4 Presión en la conducción en el tiempo $t = 22.9$ s	79
Ilustración 4.5 Envoltentes de presión máxima y mínima para el caso de que haya cámara de aire	80
Ilustración 4.6 Variación del flujo en la cámara de aire	81
Ilustración 4.7 Arreglo de la cámara de aire sobre la conducción	82
Ilustración 4.8 Perfil longitudinal de la tubería del Ejemplo 2	83
Ilustración 4.9 Resultados del análisis en estado permanente	84
Ilustración 4.10 Ejemplo 2: líneas envoltentes de presiones máximas y mínimas en el transitorio	86
Ilustración 4.11 Trazo de la red de conducción para abastecer de agua a los fraccionamientos A y B	88
Ilustración 4.12 Funcionamiento hidráulico con el equipo seleccionado, con la derivación al tanque A, para tubo de fibrocemento de 300 mm de diámetro nominal	88
Ilustración 4.13 Envoltente de presiones, paro de bomba con descarga al tanque B	91
Ilustración 4.14 Envoltente de presiones, paro de bomba con descarga al tanque A	91
Ilustración 4.15 Envoltente de presiones, paro de bomba con cámara de aire y descarga al tanque B	92
Ilustración 4.16 Envoltente de presiones, paro de bomba con cámara de aire y descargas a los tanques A y B	92
Ilustración 5.1 Diagrama de Parmakian: Sobrepresión en la bomba sin medios de control	95
Ilustración 5.2 Diagrama de Parmakian: depresión en la bomba sin medios de control	96
Ilustración 5.3 Diagrama de gasto descargado y sobrepresión en una línea con tanque unidireccional	97
Ilustración 5.4 Envoltentes de presión máxima y mínima en una línea de conducción con cámara de aire para $P=0.5$	98
Ilustración 5.5 Envoltentes de presión máxima y mínima en una línea de conducción con cámara de aire para $P=1.0$	98

Ilustración 5.6 Envoltentes de presión máxima y mínima en una línea de conducción con cámara de aire para $P=2.0$	99
Ilustración 5.7 Variación del nivel de agua en una torre de oscilación después de un paro de bombas	101
Ilustración 5.8 Incremento máximo de presión en una tubería debido al cierre de una válvula de compuerta en su final	102
Ilustración 5.9 Incremento máximo de presión en una tubería al cierre de una válvula de mariposa en su final	103
Ilustración 6.1 Diferentes formas de unión de una tubería con un tanque	106



TABLAS

Tabla 1.1 Módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson μ y magnitud tentativa de la velocidad de propagación a para materiales de tubería	3
Tabla 3.1 Constante para el cálculo del espesor crítico en diferentes materiales	51
Tabla 3.2 Condiciones más adversas de operación de una conducción por bombeo	53
Tabla 4.1 Gastos de operación para diferentes niveles	76
Tabla 4.2 Datos para los nodos	76
Tabla 4.3 Datos para la estación de bombeo	76
Tabla 4.4 Curva característica de la bomba	76
Tabla 4.5 Datos para los tramos de la conducción	76
Tabla 4.6 Arreglo de la planta de bombeo	80
Tabla 4.7 Datos para los nodos	82
Tabla 4.8 Datos para la estación de bombeo	83
Tabla 4.9 Datos para los tramos de la conducción	83
Tabla 4.10 Gastos y presión obtenidos para flujo permanente	84
Tabla 4.11 Cálculo de la velocidad de propagación para una tubería de polietileno	86
Tabla 4.12 Presiones máximas del transitorio y resistencia de la tubería	87
Tabla 4.13 Cálculo de la presión crítica de colapso por clase de tubo	87
Tabla 6.1 Tareas y recomendaciones para conducciones de bombeo	107
Tabla 6.2 Métodos de protección contra transitorios y condiciones de su aplicación	118
Tabla 6.3 Tareas y recomendaciones para conducciones de gravedad	119
Tabla 6.4 Problemas en la operación derivados de los transitorios en conducciones por bombeo	124
Tabla 6.5 Problemas en la operación derivados de los transitorios en conducciones por gravedad	127

