

Comisión Nacional del Agua

**MANUAL DE AGUA POTABLE,
ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO**

CONDUCCIÓN

Diciembre de 2007

www.cna.gob.mx

ADVERTENCIA

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

Esta publicación forma parte de los productos generados por la Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, cuyo cuidado editorial estuvo a cargo de la Gerencia de Cuencas Transfronterizas de la Comisión Nacional del Agua.

Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.

Edición 2007

ISBN: 978-968-817-880-5

Autor: Comisión Nacional del Agua
Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco El Bajo
C.P. 04340, Coyoacán, México, D.F.
Tel. (55) 5174-4000
www.cna.gob.mx

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

Impreso en México
Distribución gratuita. Prohibida su venta.

Comisión Nacional del Agua

Ing. José Luis Luege Tamargo
Director General

Ing. Marco Antonio Velázquez Holguín
Coordinador de Asesores de la Dirección General

Ing. Raúl Alberto Navarro Garza
Subdirector General de Administración

Lic. Roberto Anaya Moreno
Subdirector General de Administración del Agua

Ing. José Ramón Ardavín Ituarte
Subdirector General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

Ing. Sergio Soto Priante
Subdirector General de Infraestructura Hidroagrícola

Lic. Jesús Becerra Pedrote
Subdirector General Jurídico

Ing. José Antonio Rodríguez Tirado
Subdirector General de Programación

Dr. Felipe Ignacio Arreguín Cortés
Subdirector General Técnico

Lic. René Francisco Bolio Halloran
Coordinador General de Atención de Emergencias y Consejos de Cuenca

M.C.C. Heidi Storsberg Montes
Coordinadora General de Atención Institucional, Comunicación y Cultura del Agua

Lic. Mario Alberto Rodríguez Pérez
Coordinador General de Revisión y Liquidación Fiscal

Dr. Michel Rosengaus Moshinsky
Coordinador General del Servicio Meteorológico Nacional

C. Rafael Reyes Guerra
Titular del Órgano Interno de Control

Responsable de la publicación:
Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

Coordinador a cargo del proyecto:
Ing. Eduardo Martínez Oliver
Subgerente de Normalización

La Comisión Nacional del Agua contrató la Edición 2007 de los Manuales con el

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA según convenio
CNA-IMTA-SGT-GINT-001-2007 (Proyecto HC0758.3) del 2 de julio de 2007
Participaron:

Dr. Velitchko G. Tzatchkov
M. I. Ignacio A. Caldiño Villagómez

ELABORACIÓN

1ª Edición

Dr. Velitchko G. Tzatchkov ⁽¹⁾

M. I. José Oscar Guerrero Angulo ⁽¹⁾

Ing. Reynaldo Vilchis Vilchis ⁽¹⁾

2ª Edición

Dr., Velitchko G. Tzatchkov ⁽¹⁾

REVISIÓN 2ª Edición

Ing. Eduardo Martínez Oliver ⁽²⁾

Ing. Héctor E. Álvarez Novoa ⁽²⁾

⁽¹⁾ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)

⁽²⁾ Comisión Nacional del Agua (CNA)

CONTENIDO

Página

INTRODUCCION	1
PRIMERA PARTE: CONCEPTOS BASICOS Y ASPECTOS TEORICOS.....	3
1 DEFINICIONES.....	3
2 CLASIFICACION DE LAS CONDUCCIONES.....	6
2.1 LÍNEA DE CONDUCCIÓN	6
2.1.1 Tipo de entrega	6
2.1.2 Conducción por bombeo	7
2.1.3 Conducción por gravedad	7
2.1.4 Conducción por bombeo-gravedad	7
2.1.5 Red de conducción.....	8
2.1.6 Líneas paralelas	8
2.2 COMPONENTES DE UNA LINEA DE CONDUCCION	8
2.2.1 Tuberías	8
2.2.2 Piezas especiales.....	8
2.2.3 Válvulas.....	9
2.2.4 Medios para control de transitorios	10
3 TEORIA.....	14
3.1 HIDRAULICA DE TUBOS	14
3.1.1 Ecuaciones para flujo permanente	14
3.1.2 Pérdidas de energía por fricción en la conducción	16
3.1.3 Pérdidas locales	18
3.2 CONSIDERACIONES TECNICAS	19
3.2.1 Topografía y cruzamientos	19
3.2.2 Válvulas, uso y ubicación	19
3.3 GASTO DE DISEÑO	23
3.4 DISEÑO HIDRAULICO.....	23
3.4.1 Línea de conducción por bombeo	25
3.4.2 Línea de conducción por gravedad	25
3.4.3 Red de conducción.....	27
3.5 ANALISIS ECONOMICO DEL DIAMETRO	28
3.6 LLENADO Y VACIADO DE LA CONDUCCION	31
3.6.1 Llenado programado	31
3.6.2 Vaciado programado	32
3.7 OPERACION ESTACIONARIA DE LA CONDUCCION	33
3.7.1 Vaciado accidental a gasto nulo.....	33
3.7.2 Vaciado accidental a gasto parcial	36
3.7.3 Operación de las bombas.....	38
3.8 TRANSITORIOS HIDRAULICOS EN CONDUCTOS A PRESION.....	41
3.8.1 Regímenes posibles del flujo en tuberías a presión	41
3.8.2 Velocidad de propagación de la onda de presión (celeridad).....	43
3.8.3 La fórmula de Joukowski	44

3.8.4	Coefficientes de transmisión y reflexión de las ondas de presión	45
3.8.5	Separación de la columna líquida en transitorios	47
3.8.6	Transitorio en una conducción de bombeo generado por el paro de bombas..	48
3.9	MEDIOS DE CONTROL DE TRANSITORIOS	64
3.9.1	Problemas que pueden causar los transitorios.....	64
3.9.2	Principios generales en la protección contra el golpe de ariete.....	65
3.9.3	Dispositivos de control de transitorios	67
3.9.4	Resumen de los medios de control	88
3.10	PROTECCION DE LAS CONDUCCIONES	90
3.10.1	Protección contra sismo	90
3.10.2	Protección contra la corrosión	93
	SEGUNDA PARTE: PROCEDIMIENTOS Y GUIAS DE DISEÑO	96
1	DATOS BASICOS	96
1.1	DATOS GENERALES	96
1.2	INFORMACION DE LA FUENTE DE ABASTECIMIENTO.....	96
1.3	DATOS DE PROYECTO	96
1.4	COSTOS DE CONSTRUCCION Y OPERACION	96
2	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	97
2.1	ESQUEMA DE LA CONDUCCION	97
2.2	PROYECCION DE LA POBLACION	97
2.3	VARIACION DE LA DEMANDA	97
2.4	GASTO DE DISEÑO	97
2.4.1	Un solo tanque	97
2.4.2	Varios tanques	99
2.5	POLITICA DE OPERACION.....	103
2.5.1	Conducción con una sola entrega	103
2.5.2	Red de conducción con derivaciones.....	103
2.5.3	Criterios de modelación transitoria	104
2.6	ANALISIS DE ALTERNATIVAS	104
2.6.1	Alternativa de trazos.....	104
2.6.2	Línea de conducción por bombeo	105
2.6.3	Línea de conducción por gravedad	115
2.6.4	Selección de la alternativa más viable	116
2.7	DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS DE CONTROL DE TRANSITORIOS	116
2.7.1	Procedimiento general.....	116
2.7.2	Criterios de resistencia	117
2.7.3	Conducciones por bombeo.....	120
2.7.4	Conducciones por gravedad.....	143
2.8	GASTO DE LLENADO	148
2.9	DISEÑO Y UBICACION DE VALVULAS	149
2.9.1	Válvulas.....	149
2.9.2	Válvulas de control	149
2.9.3	Válvulas reguladoras de presión	155
2.9.4	Válvulas de no retorno.....	156
2.9.5	Válvulas de aire.....	158

3 EJEMPLO DE DISEÑO DE UNA CONDUCCION	161
3.1 GASTOS DE DISEÑO.....	162
3.2 POLITICA DE OPERACION.....	163
3.3 CRITERIO DE MODELACION	164
3.4 DIAMETRO ECONOMICO	165
3.5 DISEÑO DE LA DERIVACION	174
3.6 SELECCION DE LA BOMBA	175
3.6.1 Operación del equipo de bombeo	176
3.6.2 Carga neta positiva de succión	179
3.7 ANALISIS TRANSITORIO.....	180
TERCERA PARTE: PROGRAMAS DE CÓMPUTO.....	184
1 PROGRAMAS DE ANALISIS DE FLUJO PERMANENTE	184
1.1 GENERALIDADES.....	184
1.2 EL PROGRAMA AH (ANALISIS HIDRAULICO).....	185
1.3 EL PROGRAMA EPANET	187
2 PROGRAMAS DE ANALISIS DE TRANSITORIOS HIDRAULICOS	189
2.1 GENERALIDADES.....	189
2.2 EL PROGRAMA ARIETE	192
2.3 PROGRAMAS DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM.....	197
2.4 PROGRAMAS EXTRANJEROS.....	199

INTRODUCCION

El abastecimiento del agua a un poblado se logra mediante el transporte de este importante líquido desde la fuente de abastecimiento hasta un sitio ubicado en el poblado para su posterior distribución.

Las obras de conducción forman parte de un sistema de agua potable que de acuerdo a su diseño tienen un impacto económico en la operación del mismo.

El objetivo de este manual es proporcionar guías sobre el diseño de las conducciones, tratando de dar una visión general para cubrir diferentes casos de conducciones y establecer el empleo de modelos de simulación hidráulica para el diseño. El presente manual está estructurado en tres partes.

La primera parte contiene los conceptos y aspectos teóricos relevantes al diseño de conducciones. Se presentan las definiciones de los términos usados en el diseño de conducciones, y la clasificación de los tipos de conducción y de las componentes de ésta; seguidos de las ecuaciones usadas para el cálculo hidráulico y la consideración en el diseño de la operación estacionaria, llenado, vaciado y transitorios (golpe de ariete). Se describen cualitativamente los transitorios más importantes en líneas de bombeo y por gravedad; y los dispositivos de control de transitorios con su objetivo y funcionamiento en el transitorio.

En la segunda parte se desarrollan las propias guías de diseño. Se indican los datos básicos necesarios y el procedimiento del diseño recomendado, considerando las posibles políticas de operación y un análisis de alternativas. Se recomienda un procedimiento para la selección y dimensionamiento de los dispositivos de control en los casos que pueden presentarse en conducciones, apoyándose en un programa de simulación. La segunda parte termina con un ejemplo del diseño completo de una conducción.

La tercera parte proporciona información sobre programas de cómputo para análisis de flujo permanente y simulación de transitorios, que pueden ser usados en los procedimientos de diseño que se indican en la parte dos.

Entre los aspectos para la práctica del diseño de conducciones se pueden señalar los siguientes más importantes:

- a) Para el cálculo de las pérdidas de energía por conducción se recomienda el uso de la ecuación de Darcy-Weisbach y una ecuación modificada de Colebrook-White con una presentación explícita.

- b) Se introduce y utiliza el concepto de red de conducción.

- c) De una forma práctica se indican los factores que influyen en los transitorios y se proporcionan los criterios y procedimientos de selección y dimensionamiento de los dispositivos de control.

- d) Se incluyen varios dispositivos para el control de transitorios que pueden resolver el problema de una forma sencilla, segura y económica.

- e) En el diseño de la conducción a flujo establecido y transitorio se considera la operación de las bombas y la política de servicio de la conducción, caso que toma principal importancia cuando operan simultáneamente varios equipos de bombeo o existen derivaciones a varios poblados.

- f) Se propone una metodología general para obtener los gastos de diseño, tanto con una línea de conducción como en una red de conducción.

PRIMERA PARTE: CONCEPTOS BASICOS Y ASPECTOS TEORICOS

1 DEFINICIONES

Línea de conducción

Dentro de un sistema de abastecimiento de agua potable se llama línea de conducción, al conjunto integrado por tuberías, estaciones de bombeo y dispositivos de control, que permiten el transporte del agua desde una sola fuente de abastecimiento, hasta un solo sitio donde será distribuida en condiciones adecuadas de calidad, cantidad y presión.

Red de conducciones

Es un sistema, integrado por un conjunto de tuberías interconectadas, debido a la existencia de dos o más fuentes de abastecimiento o sitios de distribución.

Estación de bombeo

Es la obra electromecánica, hidráulica y civil, constituida por una subestación eléctrica, cárcamo de bombeo, rejillas, bombas, equipo eléctrico, tuberías, válvulas y accesorios requeridos para la operación; que proporciona las condiciones energéticas de diseño para que la conducción transporte adecuadamente el agua, de un nivel topográfico generalmente menor en la fuente a uno mayor del sitio de distribución.

Cárcamo de bombeo

Estructura diseñada para recibir y contener la cantidad de agua requerida por el equipo de bombeo, en la cual se considera la velocidad de aproximación del agua, la sumergencia mínima y su geometría en relación con la localización del equipo que permita el bombeo adecuado del gasto de diseño.

Sumergencia mínima

Es la altura medida desde la superficie del liquido a nivel mínimo a la campana de succión en una bomba vertical o al eje del impulsor en una horizontal, la cual es requerida para prever vórtices y entrada de aire a la succión de la bomba y está asociada a cumplir con la carga neta positiva de succión (NPSH) para garantizar una operación adecuada del equipo de bombeo.

Tren de piezas especiales

Es el conjunto formado por válvulas, carretes, tes, y demás accesorios, ubicados según el diseño de la conducción. Este conjunto permite conectar adecuadamente los equipos de bombeo con la tubería, ofreciendo a los mismos control y protección.

Tuberías

Es el conjunto de tubos interconectados para formar una tubería principal, con una variedad de diámetros y materiales.

Válvulas

Son dispositivos que permiten el control del flujo en la conducción, atendiendo a situaciones de: corte y control de flujo, acumulación de aire, por llenado y vaciado de la conducción, depresiones y sobrepresiones generadas por fenómenos transitorios, y retroceso del agua por paro del equipo de bombeo, entre otras.

Piezas especiales

Son elementos de unión entre los componentes de una conducción de agua, se utilizan para efectuar intersecciones de conductos, variación de diámetros, cambios de dirección, conexiones con válvulas y equipos de bombeo, etc. Este grupo es constituido por juntas, carretes, extremidades, tes, cruces, codos y reducciones, entre otros.

Caja rompedora de presión

Estructura contenedora, utilizada en sistemas por gravedad para comunicar a la conducción con la atmósfera, disminuyendo así las cargas piezométricas ejercidas sobre la tubería.

Tanque de cambio de régimen

Estructura contenedora utilizada para efectuar la interconexión cuando la conducción se efectúa por ambos regímenes bombeo-gravedad.

Tanque de regulación o distribución

Estructura ubicada generalmente al final de la conducción y diseñada para almacenar agua acorde con las extracciones de la fuente de abastecimiento y demandas de los usuarios.

Dispositivos de control de transitorios

Estructuras diseñadas para controlar depresiones, sobrepresiones, burbujas de aire y demás perturbaciones en la conducción, ocasionadas por fenómenos transitorios.

Carga de la bomba

También llamada "carga dinámica total" la cual se mide en metros e indica la energía suministrada al agua por la bomba, para vencer el desnivel desde la succión hasta el sitio de alimentación al tanque y las pérdidas por fricción debido a la conducción en los tubos y en elementos locales.

Carga hidráulica disponible

Es la energía en metros de columna de agua que poseen los sistemas, al encontrarse la fuente de abastecimiento a un nivel superior respecto de un sitio sobre el trazo de la conducción en dirección al área de distribución.

Flujo estacionario

También llamado "flujo permanente" ó "flujo establecido", se caracteriza por la presencia de un gasto constante en el tiempo.

Sobrepresión y Depresión

Son las cargas de presión en exceso y por abajo de la presión a flujo estacionario respectivamente, que existen después de presentarse los fenómenos transitorios.

2 CLASIFICACION DE LAS CONDUCCIONES

2.1 LÍNEA DE CONDUCCIÓN

2.1.1 Tipo de entrega

Las conducciones deberán entregar el agua a un tanque de regularización, como se indica en la figura 1.2.1, y así facilitar el procedimiento de diseño hidráulico de los sistemas de agua potable, tener un mejor control en la operación de los mismos, y asegurar un funcionamiento adecuado del equipo de bombeo.

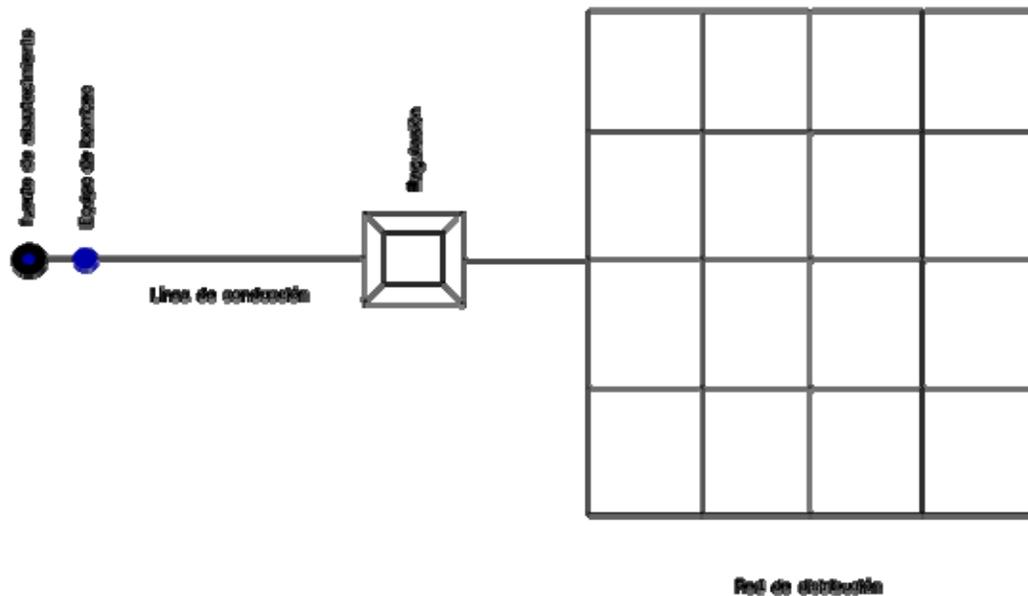


Figura 1.2.1 Línea de conducción con entrega del agua a un tanque de regulación.

En zonas rurales, se podrán aceptar conducciones con entrega del agua a la red de distribución, únicamente cuando se logre un ahorro considerable en la distancia de conducción y un aumento en las presiones de la red de distribución. Esto se consigue cuando el tanque de regularización se conecta a la red de distribución en un punto opuesto a la conexión de la conducción, como se indica en la figura 1.2.2.

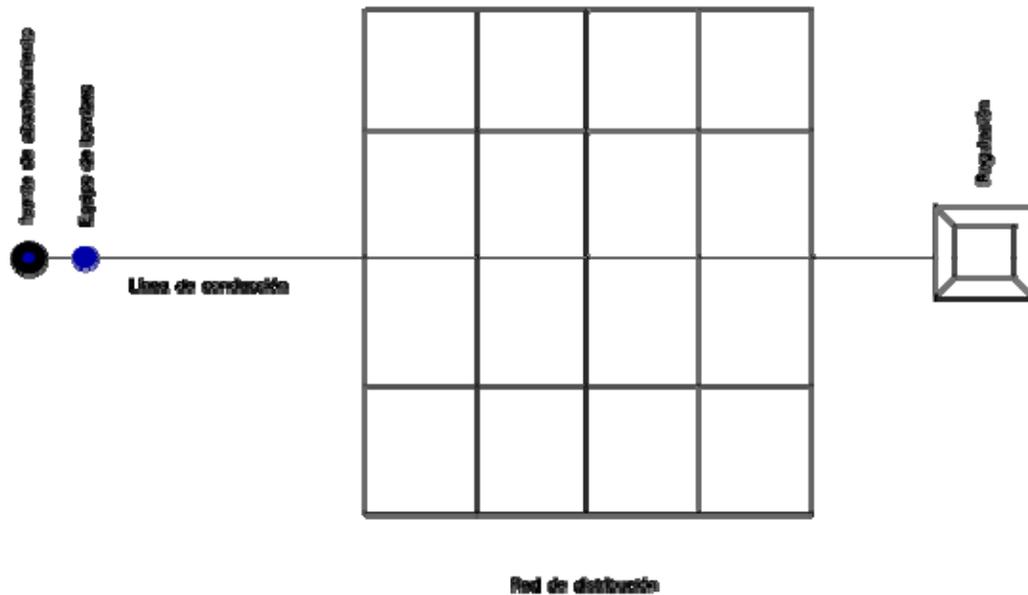


Figura 1.2.2 Línea de conducción con entrega del agua a la red de distribución.

En zonas urbanas, se podrán aceptar conducciones con entrega del agua a la red de distribución, para el único caso en que el sistema sea existente y cuando se demuestre que el diseño se fundamenta estrictamente en una modelación hidráulica correspondiente al tipo de entrega. No obstante, en la medida de lo posible, en estos sistemas se deberán hacer los cambios necesarios para entregar el agua a un tanque de regularización.

2.1.2 Conducción por bombeo

La conducción por bombeo es necesaria cuando se requiere adicionar energía para obtener el gasto de diseño. Este tipo de conducción se usa generalmente cuando la elevación del agua en la fuente de abastecimiento es menor a la altura piezométrica requerida en el punto de entrega. El equipo de bombeo proporciona la energía necesaria para lograr el transporte del agua.

2.1.3 Conducción por gravedad

Una conducción por gravedad se presenta cuando la elevación del agua en la fuente de abastecimiento es mayor a la altura piezométrica requerida o existente en el punto de entrega del agua, el transporte del fluido se logra por la diferencia de energías disponible.

2.1.4 Conducción por bombeo-gravedad

Si la topografía del terreno obliga al trazo de la conducción a cruzar por partes más altas que la elevación de la superficie del agua en el tanque de regularización, conviene analizar la colocación de un tanque intermedio en ese lugar. La instalación

de dicho tanque ocasiona que se forme una conducción por bombeo-gravedad, donde la primera parte es por bombeo y la segunda por gravedad.

2.1.5 Red de conducción

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

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

2.1.6 Líneas paralelas

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

2.2 COMPONENTES DE UNA LINEA DE CONDUCCION

2.2.1 Tuberías

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

2.2.2 Piezas especiales

2.2.2.1. Juntas

Las juntas se utilizan para unir dos tuberías; las de metal pueden ser de varios tipos, por ejemplo, Gibault, Dresser, etc.

2.2.2.2. Carretes

Los carretes son tubos de pequeña longitud provistos de bridas en los extremos para su unión. Se fabrican de fierro fundido con longitudes de 25, 50, y 75, cm.

2.2.2.3. Extremidades

Las extremidades son tubos de pequeña longitud que se colocan sobre alguna descarga por medio de una brida en uno de sus extremos. Se fabrican en longitudes

de 40, 50, y 75 cm. Para materiales de PVC, las extremidades pueden ser campana o espiga.

2.2.2.4. Tees

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

2.2.2.5. Cruces

Las cruces se utilizan para unir cuatro conductos en forma de cruz, donde las cuatro uniones pueden ser del mismo diámetro, o dos mayores de igual diámetro y dos menores de igual diámetro. En el segundo caso se llama cruz reducción.

2.2.2.6. Codos

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

2.2.2.7. Reducciones

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

2.2.2.8. Coples

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

2.2.2.9. Tapones y tapas

Los tapones y las tapas se colocan en los extremos de un conducto con la función de evitar la salida de flujo. En materiales de PVC, es costumbre llamarlos tapones, pudiendo ser en forma de campana o espiga. En materiales de fierro fundido, se acostumbra llamarlos tapas ciegas.

2.2.3 Válvulas

2.2.3.1. Válvula eliminadora de aire

La válvula eliminadora de aire cumple la función de expulsar el aire del tubo que continuamente se acumula en las partes altas sobre el trazo de la conducción, cuando ésta se encuentra en operación.

2.2.3.2. Válvula de admisión y expulsión de aire

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

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

2.2.3.3. Válvula de no retorno

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

2.2.3.4. Válvula de seccionamiento

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

Las válvulas de seccionamiento pueden ser, por ejemplo, tipo compuerta, de mariposa, o de esfera.

2.2.4 Medios para control de transitorios

2.2.4.1. Válvula aliviadora de presión

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

Es un dispositivo provisto de un resorte calibrado para abrir una compuerta cuando la presión sobrepasa un valor determinado.

Se recomienda colocar este tipo de elemento, en conducciones con diámetros pequeños; sin embargo, no debe olvidarse que las presiones negativas tendrán que resolverse con algún otro dispositivo.

2.2.4.2. Válvula anticipadora del golpe de ariete

La válvula anticipadora del golpe de ariete protege al equipo de bombeo de la onda de sobrepresión causada por el paro de la bomba o falla de la energía.

Esta válvula opera con la presión de la línea de conducción, y el nombre de anticipadora se debe a que entra en funcionamiento antes de la llegada de la onda de sobrepresión.

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

2.2.4.3. Torre de oscilación

La torre de oscilación es un depósito a menudo de forma circular en contacto con la atmósfera por la parte superior, cuyo diámetro por lo general es relativamente grande con relación al diámetro de la conducción.

Cumple la función de aliviar las sobrepresiones y depresiones causadas por un fenómeno transitorio.

Para evitar los derrames de agua cuando la conducción se encuentra funcionando, la elevación de la corona de la torre de oscilación debe ser mayor al nivel del agua del punto de descarga, y para evitar los derrames cuando el gasto de la conducción es igual cero, el nivel de la corona debe ser mayor a los niveles del agua de cualquier depósito conectado a la conducción.

La torre de oscilación es de las estructuras más confiables para el control de los transitorios, sin riesgos de funcionamiento al no contener dispositivos de control mecánico.

2.2.4.4. Tanque unidireccional

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

La elevación de la corona es menor a la carga piezométrica del punto de conexión del tanque con la conducción.

La función de un tanque unidireccional es aliviar fundamentalmente las depresiones causadas por un fenómeno transitorio, provocado por un paro repentino de la bomba.

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

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

Debe contener un conducto de vaciado y otro de llenado. En el de vaciado se instala una válvula de no retorno para permitir el flujo únicamente del tanque hacia la

conducción. En el conducto de llenado debe existir una válvula para cortar automáticamente el flujo cuando se alcance el nivel máximo del agua.

2.2.4.5. Cámara de aire

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

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

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

Una cámara de aire contiene normalmente dos conductos, uno de vaciado y otro de llenado, el primero contiene una válvula de no retorno para permitir la circulación del flujo únicamente del tanque hacia la conducción. El segundo conducto contiene un dispositivo disipador de energía el cual puede ser, por ejemplo, un orificio, cuya función es evitar un incremento de presión cuando la cámara se esta llenando.

2.2.4.6. Instalación de un by-pass en la válvula de no retorno

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

2.2.4.7. Instalación de un by-pass en la planta de bombeo

Cuando la fuente de abastecimiento dispone de un cierto nivel de presión en la succión, como en el caso de un depósito a superficie libre o un tanque elevado, el by-pass puede ser de utilidad en las plantas de bombeo para contrarrestar las presiones negativas provocadas por un paro accidental del equipo de bombeo.

El by-pass se construye colocando un tubo paralelo al equipo de bombeo que se conecta aguas abajo y aguas arriba del equipo de bombeo. En este tubo se instala una válvula de no retorno para impedir la descarga de la bomba hacia el depósito, cuando la operación de la misma es a flujo permanente.

2.2.4.8. Otros medios para el control de transitorios

En el subcapítulo 3.9 de esta primera parte, se ofrecen mayores detalles sobre los medios para el control de transitorios anteriormente señalados. Asimismo, se describen otros medios para el control de transitorios, como son: adición de un volante de inercia al árbol del equipo de bombeo, membranas protectoras o fusibles, etc.

3 TEORIA

3.1 HIDRAULICA DE TUBOS

3.1.1 Ecuaciones para flujo permanente

Las ecuaciones fundamentales de la hidráulica que aquí se aplican son dos, la de continuidad y la de energía, las cuales en este capítulo se presentan para el caso de un flujo permanente.

Definición de conceptos

Se presenta enseguida la definición de tres conceptos básicos para entender mejor la aplicación de las ecuaciones fundamentales de la hidráulica y tener una visión general en la solución de cualquier tipo de línea o red de conducción.

Elemento: es cualquier componente de una red de tubos; éstos pueden ser: tubos, bombas, tanques, pozos, etc. Se llama elemento frontera, aquél donde se genera la entrada o salida del agua de la tubería. Un elemento frontera puede ser, por ejemplo, una descarga libre, un pozo, un tanque en contacto con la atmósfera, un tanque hidroneumático, etc.

En toda red de tubos debe definirse la ubicación de al menos un elemento frontera, por ejemplo, en un sistema cerrado como el que se muestra en la Figura 1.3.1, habrá que definir la existencia de uno de estos elementos.

Nodo: Es el punto donde se unen dos o más elementos.

Recorrido: Es una trayectoria a través de los elementos del sistema de tubos con un sentido arbitrario, pasando por un punto sólo una vez. Los puntos inicial y final pueden ser uno mismo, o diferentes si en los dos puntos se conecta un elemento frontera (véase referencia 1).

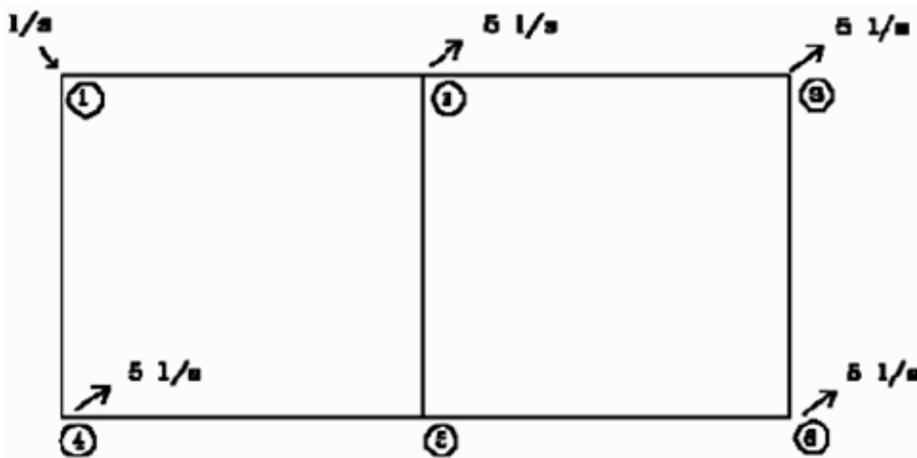


Figura 1.3.1 Sistema de tuberías cerrado en el cual es necesario definir la ubicación de un elemento frontera

La ecuación de continuidad se aplica en los nodos y la de energía en los recorridos.

La ecuación de continuidad establece que la suma de gastos en un nodo es igual a cero, observando si entran o salen del nodo. En forma matemática se tiene:

$$\sum Q = 0 \quad (1.3.1)$$

El sistema de ecuaciones que se forma con la ecuación de continuidad, puede prescindir de las ecuaciones en los nodos donde se une un elemento frontera.

En la Figura 1.3.2 se muestran varios casos de nodos donde se unen elementos frontera y que no es necesario plantear la ecuación de continuidad.

La ecuación de la energía aplicada en los recorridos se expresa:

$$E_1 + \sum H = E_2 + \sum h_{f,1-2} + \sum h \quad (1.3.2)$$

donde E_1 y E_2 son, respectivamente, la energía total ($z_i + \frac{p_i}{\gamma} + \frac{V_i^2}{2g}$) en el punto

donde inicia y termina el recorrido, $\sum h_{f,1-2}$ es la suma de pérdidas de energía que existen en el recorrido, $\sum H$ la suma de cargas de las bombas, y $\sum h$ la suma de pérdidas locales de energía provocadas por dispositivos como válvulas, codos, reducciones, etc.

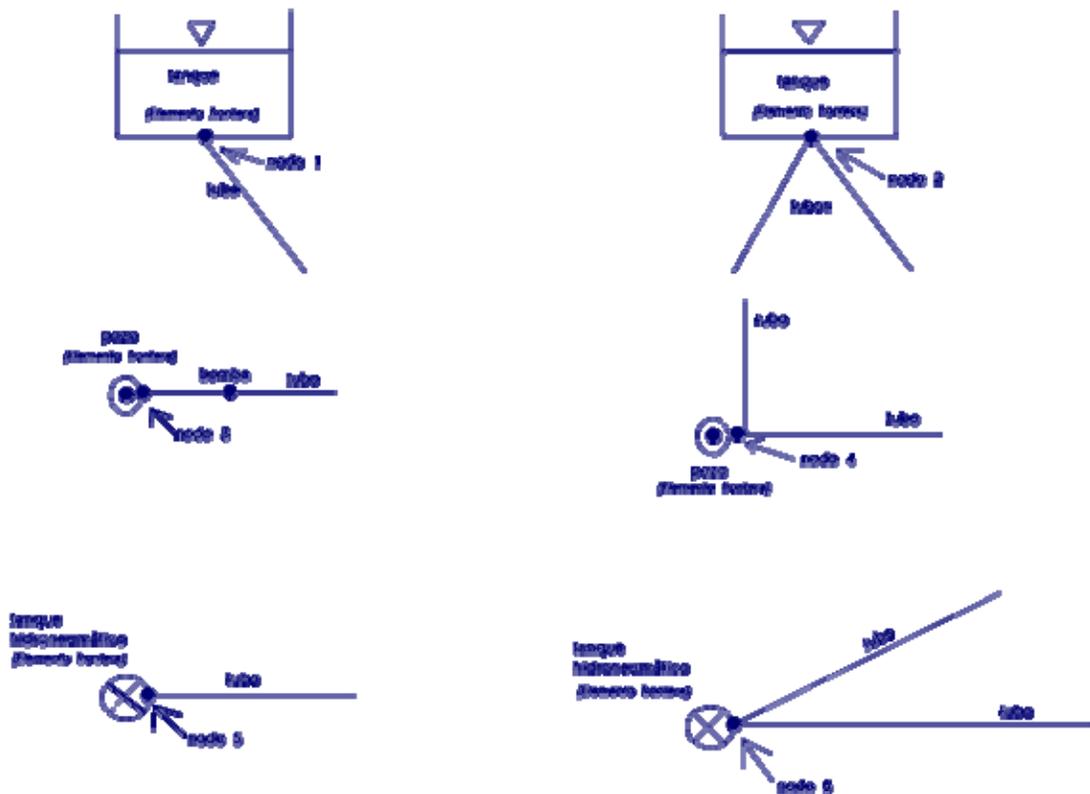


Figura 1.3.2 Nodos en los cuales no es necesario plantear la ecuación de continuidad dentro del sistema de ecuaciones.

3.1.2 Pérdidas de energía por fricción en la conducción

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

3.1.2.1. Ecuación de Darcy-Weisbach

La ecuación de Darcy-Weisbach se expresa:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (1.3.3)$$

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

El flujo en régimen turbulento es el caso que normalmente se presenta en los conductos de sistemas de agua potable. En este régimen de flujo, f depende del

número de Reynolds y de la rugosidad relativa ε/D ; sus valores se obtienen aplicando la siguiente ecuación de Colebrook-White.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (1.3.4)$$

donde:

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (1.3.5)$$

ε es la rugosidad absoluta de la pared interior del tubo expresado en mm, y ν es la viscosidad cinemática del fluido en m²/s.

3.1.2.2. Ecuación modificada de Colebrook-White

Se han efectuado varios estudios para obtener expresiones explícitas para el cálculo del coeficiente de pérdidas f ajustado a los resultados de la ecuación de Colebrook-White y poder así aprovechar las ventajas que tiene esta ecuación (véase referencia 2).

$$f = \frac{0.25}{\left(\log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{G}{Re^T}\right)\right)^2} \quad (1.3.6)$$

tiene ventajas sobre otras presentaciones explícitas para calcular el valor de f , donde:

$$\begin{aligned} G &= 4.555 \text{ y } T = 0.8764 \text{ para } 4000 \leq Re \leq 10^5 \\ G &= 6.732 \text{ y } T = 0.9104 \text{ para } 10^5 \leq Re \leq 3 \times 10^6 \\ G &= 8.982 \text{ y } T = 0.93 \text{ para } 3 \times 10^6 \leq Re \leq 10^8 \end{aligned}$$

Sustituyendo la ecuación 1.3.6 en la de Darcy-Weisbach, se tiene

$$h_f = \frac{0.203L}{g D^5 \left(\log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{G}{Re^T}\right)\right)^2} Q^2 \quad (1.3.7)$$

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

3.1.3 Pérdidas locales

Las pérdidas locales de energía se generan en distancias relativamente cortas, por accesorios de la conducción tales como codos, tes, cruces, válvulas, etc.

Para calcular las pérdidas locales de energía se utiliza la expresión general

$$h = k \frac{V^2}{2g} \quad (1.3.8)$$

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

En la Tabla 1.3.1 se muestran algunos valores de k en función del tipo de accesorio.

En el caso de un ensanchamiento brusco el valor de k es igual a 1.0 y el valor de V de la Ecuación 1.3.8 se sustituye por la diferencia de velocidades existente en los tubos aguas arriba y aguas abajo del ensanchamiento.

Tabla 1.3.1 Valores de k para la ecuación 1.3.8

ACCESORIO	COEFICIENTE k
1. De depósito a tubería (pérdida a la entrada)	
- Conexión a ras de la pared	0.50
- Tubería entrante	1.00
- Conexión abocinada	0.05
2. De tubería a depósito (pérdida a la salida)	1.00
3. Contracción brusca (véase tabla 1.3.2)	k_c
4. Codos y tes	
- Codo de 45o	0.35 a 0.45
- Codo de 90o	0.50 a 0.75
- Tes	1.50 a 2.00

Tabla 1.3.2 Valores de k_c para una contracción brusca

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

3.2 CONSIDERACIONES TECNICAS

3.2.1 Topografía y cruzamientos

Para llevar a cabo el proyecto de una conducción resulta útil apoyarse sobre cartas topográficas del INEGI para estudiar los posibles trazos.

Sobre el trazo de la conducción, será necesario obtener un levantamiento topográfico en planimetría y altimetría, marcando las elevaciones del terreno natural a cada 20 metros, en los puntos donde existen cambios importantes de la pendiente del terreno y, en los puntos donde cambia el trazo horizontal de la conducción.

Es importante localizar sobre el trazo los cruces importantes de la conducción, tales como ríos, arroyos, canales, carreteras, y vías del ferrocarril.

El proyecto ejecutivo de la conducción se presenta en planta y en perfil. En el perfil se dibuja la línea de energías a flujo establecido y además las envolventes de energías máximas y mínimas para el flujo transitorio.

3.2.2 Válvulas, uso y ubicación

Cada vez que la conducción se pone en funcionamiento, es necesario expulsar el aire de la tubería para permitir que el tubo pueda llenarse de agua; en ocasiones esto no es necesario, ya que el perfil puede ser tal que la tubería puede mantenerse llena.

Cuando la conducción se encuentra fuera de funcionamiento y que ésta requiere desaguar, por ejemplo, para realizar alguna reparación de la tubería, es necesario abrir las válvulas de desagüe colocadas en los puntos bajos de la tubería, y en los puntos altos es preciso admitir aire a la tubería.

Para que se logre el llenado y el vaciado de la tubería, se colocan válvulas de admisión y expulsión de aire, las cuales hacen la doble función, expulsar el aire

cuando la tubería se está llenando, o admitir aire a la tubería cuando ésta se está vaciando.

Cuando la conducción se encuentra en funcionamiento, en las partes altas de la conducción tiende a acumularse el aire que viene disuelto en el agua. Se estima que el agua que se transporta en los tubos contiene aproximadamente un 2% de aire.

Para desalojar el aire que se va acumulando por esta situación, se colocan válvulas eliminadoras de aire en los puntos altos de la conducción.

Se recomienda colocar válvulas eliminadoras de aire y válvulas de admisión y expulsión de aire en todos los puntos altos de la conducción y en los tramos largos sensiblemente planos a distancias de 400 a 800 m. Las válvulas de desagüe se colocan en los puntos bajos.

El diámetro necesario de la válvula de admisión y expulsión de aire se obtiene con base en las curvas de funcionamiento de las válvulas (ver Figuras 1.3.3 y 1.3.4).

El diámetro de expulsión se obtiene con el *gasto de llenado* de la tubería y una presión máxima de aire en la válvula de 0.14 Pa. En el subcapítulo 2.8 de la segunda parte de este tema se indica la forma de obtener el gasto de llenado.

El diámetro de admisión se obtiene con base al gasto máximo de vaciado considerando una depresión máxima admisible de 0.35 Pa y un adecuado tiempo de vaciado. Además, debe tomarse en cuenta la presión mínima permitida por el material del tubo donde se coloca la válvula.

El gradiente hidráulico S_f , con el cual se empieza a desaguar la tubería, se obtiene de:

$$S_f = \frac{E_v - D_m - E_d}{L} \quad (1.3.9)$$

donde:

E_v = Diferentes elevaciones que puede tomar la superficie del agua en el tubo.

D_m = Depresión máxima admisible en la tubería, en m.c.a.

E_d = Elevación a la que se encuentra la válvula de desagüe.

L = Longitud del tubo de la conducción, medida desde el punto donde se encuentra la superficie del agua en el tubo hasta la válvula de desagüe.

Cabe señalar que para el cálculo de S_f , se han considerado despreciables las pérdidas menores por accesorios, los cambios de diámetro y de rugosidad de los tubos.

Cuando sea importante el número de accesorios y las pérdidas se consideren significativas, se deberán contemplar en una longitud equivalente al tubo de la línea de conducción, sumando este valor a la longitud L ya definida.

En general, el gradiente hidráulico puede variar en cada momento al ir vaciándose la tubería, por ello, es importante contemplar las situaciones de máximo gradiente hidráulico.

Una vez definido el gradiente hidráulico máximo que se presenta en el tramo que existe entre la válvula de admisión y la de desagüe, con la ecuación de la Hydraulics Research Station, [3] (que se obtiene combinando las ecuaciones de Darcy-Weisbach y de Colebrook-White) se calcula el gasto máximo de vaciado.

$$Q = - \frac{\pi}{2} D^{5/2} \sqrt{2 g S_f} \log \left(\frac{\varepsilon / D}{3.71} + \frac{2.51 \nu}{D^{3/2} \sqrt{2 g S_f}} \right) \quad (1.3.10)$$

Con este gasto máximo de vaciado, se podrá revisar el tiempo de vaciado. Luego se puede examinar la opción de colocar una válvula de desagüe con un diámetro tal que produzca la pérdida suficiente para incrementar el tiempo de vaciado que se crea conveniente y reducir al mismo tiempo el diámetro de la válvula de admisión.

En el caso de que las válvulas de desagüe operen todas al mismo tiempo, el gasto de aire que admite una válvula de admisión se obtiene sumando los gastos máximos de vaciado de los tramos que parten aguas abajo y aguas arriba de la válvula de admisión que se analiza.

Una vez que se calculan los diámetros necesarios tanto para expulsión como para admisión, se escoge el mayor diámetro de los dos.

El diámetro del orificio de una válvula eliminadora de aire se obtiene también, con base a la curva de funcionamiento que proporciona el fabricante (ver Figuras 1.3.5 y 1.3.6), en función de la presión de trabajo y el gasto de expulsión de aire que se puede estimar como igual al 2% del gasto de bombeo.

Las válvulas eliminadoras de aire se pueden instalar sobre la válvula de admisión y expulsión, en cuyo caso el conjunto se llama válvula combinada.



Figura 1.3.3 Curvas de funcionamiento de válvulas de admisión y expulsión de aire con orificios de 1" a 3"

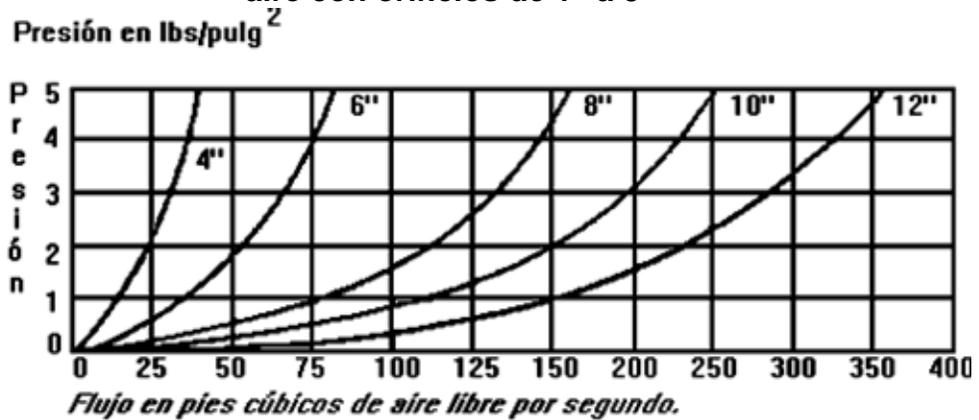


Figura 1.3.4 Curvas de funcionamiento de válvulas de admisión y expulsión de aire con orificios de 4" a 12".

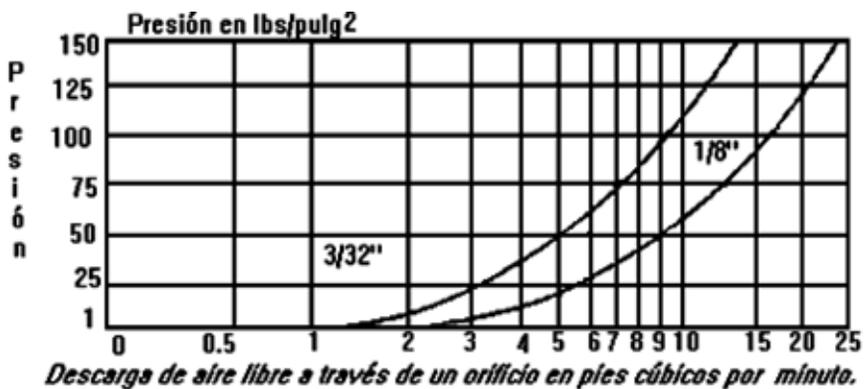


Figura 1.3.5 Curvas de funcionamiento de válvulas eliminadoras de aire con orificios de 3/32" y 1/8".

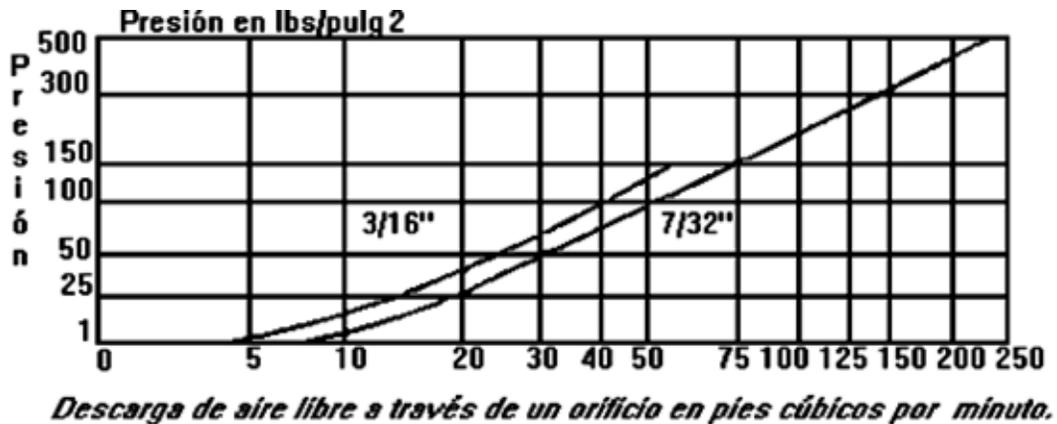


Figura 1.3.6 Curvas de funcionamiento de válvulas eliminadoras de aire con orificios de 3/16" y 7/32".

3.3 GASTO DE DISEÑO

El gasto con el que se diseñan los tubos de una conducción, se obtiene en función de los gastos que deben entregar a los tanques y de los gastos que pueden proporcionar las fuentes de abastecimiento.

Una conducción con entrega directa a tanques, puede ser conectada a uno o a varios tanques. En el subcapítulo 2.4 de la segunda parte de este tema se verán los dos casos, independientemente si la conducción es por bombeo, gravedad, o bombeo-gravedad.

3.4 DISEÑO HIDRAULICO

Las conducciones por bombeo pueden ser líneas o redes de conducción por bombeo como se muestra en las Figuras 1.3.7 y 1.3.8. De la misma manera las conducciones por gravedad pueden ser líneas o redes de conducción por gravedad (ver Figuras 1.3.9 y 1.3.10). Si se combinan los aspectos de bombeo y gravedad se forman las redes de conducción mixtas.

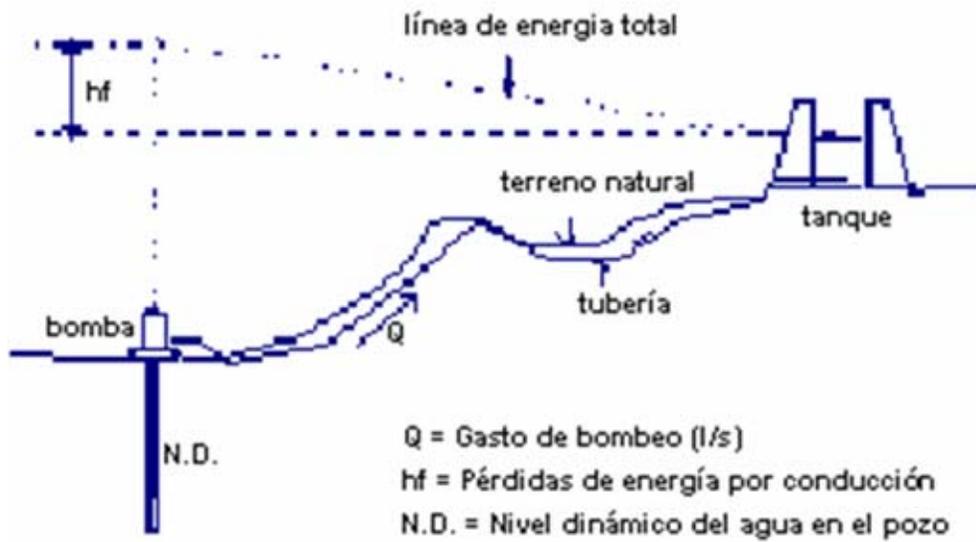


Figura 1.3.7 Esquema de una línea de conducción por bombeo

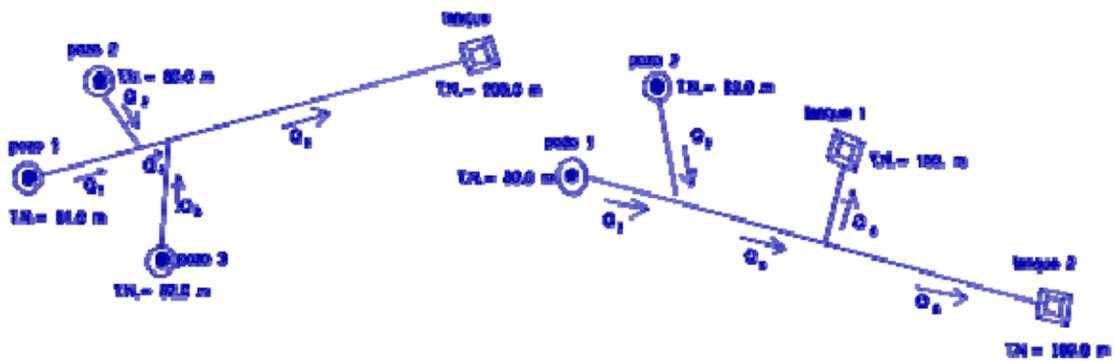


Figura 1.3.8 Esquema de dos redes de conducción por bombeo.

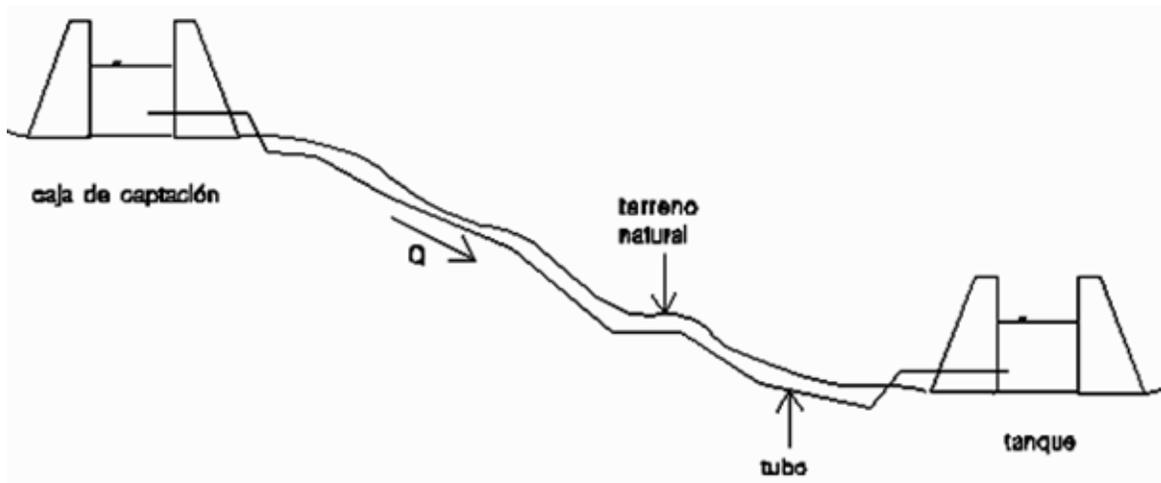


Figura 1.3.9 Esquema de una línea de conducción por gravedad

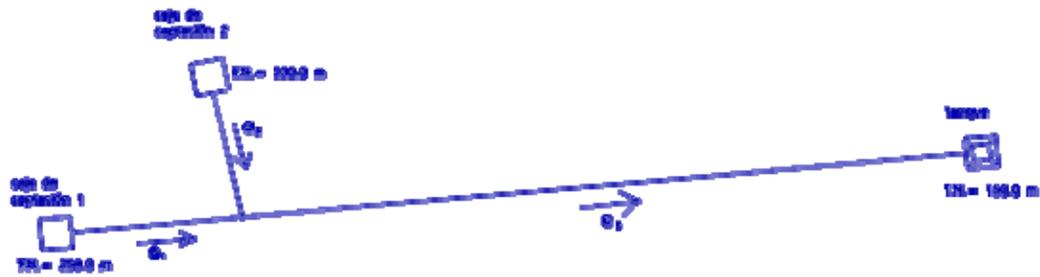


Figura 1.3.10 Esquema de una red de conducción por gravedad.

3.4.1 Línea de conducción por bombeo

Para el caso de líneas de conducción por bombeo (Figura 1.3.7), en el subcapítulo 3.5 de esta primera parte se plantean fórmulas para obtener el diámetro económico. No obstante, el diámetro calculado seguramente no será comercial, por lo tanto, se aconseja utilizarlo como un dato aproximado donde la solución final debe obtenerse con un procedimiento directo, proponiendo repetidas veces el diámetro del tubo y calculando enseguida la carga H requerida de la bomba.

$$H = E_2 - E_1 + \sum h_{f,1-2} + \sum h \quad (1.3.11)$$

que resulta de aplicar la Ecuación 1.3.2.

El diámetro que se obtiene con la Ecuación 1.3.26 se utiliza para proponer los primeros tres diámetros comerciales, el más próximo, el inmediato superior, y el inmediato inferior a éste.

3.4.2 Línea de conducción por gravedad

Para una línea de conducción por gravedad (Figura 1.3.9), se presenta un modelo para encontrar el tubo necesario que transporta al gasto de diseño sobre una topografía que proporciona un desnivel favorable hacia el punto de descarga. En este tipo de conducción se tiene un desnivel disponible dado entre las cargas hidráulicas existentes en el inicio (en la fuente) y el final (la descarga) de la conducción. Sea el valor de este desnivel H_{disp} . El problema consiste entonces en determinar el diámetro del tubo, que conducirá el gasto deseado Q con una pérdida de carga en la conducción igual a H_{disp} .

En principio, de la fórmula de pérdidas de carga (Ecuaciones 1.3.3, 1.3.4 y 1.3.5) para una $h=H_{disp}$ y un Q dados, podría despejarse un valor teórico para el diámetro, que daría la pérdida de carga H_{disp} . Ese diámetro seguramente no corresponderá a un diámetro comercial. Para salvar el inconveniente, se propone construir una parte de la conducción con el diámetro inmediato inferior comercial y el resto con el diámetro inmediato superior; de forma tal que la pérdida de carga total en los dos tramos diera el valor de H_{disp} .

Para definir los diámetros inmediato inferior e inmediato superior al teórico, bastaría calcular por la Ecuación 1.3.7 la pérdida de carga en la conducción para varios pares de diámetros comerciales vecinos, hasta encontrar que para el menor diámetro se obtenga una pérdida de carga mayor que H_{disp} y para el mayor diámetro se obtenga una pérdida de carga menor que H_{disp} .

Otra posibilidad consiste en calcular el diámetro teórico con la siguiente ecuación:

$$D = 0.66 \left(\frac{Q^2}{g S_f} \right)^{0.20} \left(\varepsilon^{1.25} \left(\frac{g S_f}{Q^2} \right)^{0.25} + \nu \left(\frac{I}{g S_f Q^3} \right)^{0.20} \right)^{0.04} \quad (1.3.12)$$

propuesta por Swamee y Jain [4] para aproximar las Ecuaciones 1.3.3 y 1.3.4, en base a un ajuste a las ecuaciones de Darcy-Weisbach y de Colebrook-White, con errores dentro del $\pm 2\%$ y recomendada para $3 \times 10^3 \leq Re \leq 3 \times 10^8$ y $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 2 \times 10^{-2}$. S_f es el gradiente hidráulico, igual a H_{disp}/L .

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

$$H_{disp} = \frac{f_1 L_1 V_1^2}{D_1 2g} + \frac{f_2 L_2 V_2^2}{D_2 2g} \quad (1.3.13)$$

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

Considerando por continuidad que $V_1 = Q/A_1$ y $V_2 = Q/A_2$, donde A_1 y A_2 son las áreas de la sección transversal de los tubos con diámetro D_1 y D_2 respectivamente; la Ecuación 1.3.13 puede ser escrita como

$$H_{disp} = K_1 L_1 Q^2 + K_2 L_2 Q^2 \quad (1.3.14)$$

donde

$$K_1 = \frac{f_1}{2g D_1 A_1^2}; \quad K_2 = \frac{f_2}{2g D_2 A_2^2} \quad (1.3.15)$$

Por otro lado, la suma de las longitudes L_1 y L_2 debe dar la longitud total L de la conducción:

$$L = L_1 + L_2 \quad (1.3.16)$$

Las Ecuaciones 1.3.14 y 1.3.16 forman un sistema de dos ecuaciones con las dos incógnitas L_1 y L_2 . La solución es:

$$L_1 = \frac{H_{disp} - K_2 L}{K_1 - K_2}; \quad L_2 = L - L_1 \quad (1.3.17)$$

Cuando L_1 o L_2 resulta muy próximo a la longitud total de la conducción, puede colocarse solamente el diámetro comercial correspondiente.

Cabe señalar que en el caso de un escaso desnivel entre la fuente y la entrega o un gradiente hidráulico insuficiente, puede requerirse de un diámetro grande en la conducción. En este caso, deberá realizarse un análisis económico para determinar si la conducción conviene que sea por bombeo o por gravedad.

3.4.3 Red de conducción

Una red de conducción puede ser por bombeo, por gravedad, o mixta, como se indica en las Figuras 1.3.8, 1.3.10, y 1.3.11.

Con las Ecuaciones 1.3.1 y 1.3.2 se puede modelar el funcionamiento hidráulico de cualquier línea o red de conducción, tanto para los problemas de revisión como de diseño.

Cabe señalar que para el caso de diseño, es decir, cuando se busca el dimensionamiento de los elementos que conforman a la red de conducción, son mayor el número de incógnitas que ecuaciones, provocando que se puedan tener varias soluciones.

Para obtener la solución más conveniente, se deben considerar valores adecuados de las presiones, restricciones de las dimensiones, posibles fallas, reparaciones y costo mínimo de la obra.

Se han desarrollado técnicas de diseño con optimización del costo con el empleo de programación lineal, programación dinámica, programación no lineal y otros. Sin embargo, en el caso de redes estos procedimientos no han sido muy usados. El procedimiento que normalmente se usa en la práctica para dimensionar una red de conducción, ha sido el de correr repetidas veces un programa de análisis de flujo permanente (ver la parte 3) probando con diferentes diámetros, hasta encontrar una solución adecuada.

Algunos procedimientos de diseño óptimo son planteados en las referencias 5, 6 y 7.

3.5 ANALISIS ECONOMICO DEL DIAMETRO

En este subcapítulo se plantea un procedimiento analítico para el cálculo del diámetro óptimo de una conducción por bombeo.

Una vez obtenido el trazo y el gasto de diseño, un aspecto importante en el proyecto de líneas de conducción a presión, es la determinación del diámetro, cuya solución se decide por condiciones económicas a partir de hacer mínimos el costo de la tubería y su colocación, así como, el costo correspondiente a la energía para el bombeo (referencia 8), los demás costos de la conducción no intervienen en el análisis por no ser función del diámetro.

Conforme el diámetro seleccionado sea menor, disminuye el costo de la tubería y su colocación, pero se incrementan las pérdidas de carga y con ello el costo de bombeo, al requerir bombas de carga elevada con mayores consumos de energía. Ocurriría lo contrario si se incrementa el diámetro. Por lo anterior, se requiere determinar el diámetro D que haga mínima la suma de los costos de inversión inicial y de operación antes mencionados.

El costo de suministro de la tubería y su colocación C_T , se obtendrá a partir de C_1 que es el costo por unidad de diámetro y longitud, incluye la tubería, la excavación de las zanjas en su caso y su posterior colocación.

$$C_T = C_1 D L \quad (1.3.18)$$

donde:

- C_1 = Costo de suministro e instalación por unidad de diámetro y longitud
- L = Longitud de la conducción
- D = Diámetro de la conducción

El costo de la energía en operación por bombeo C_E en un período anual, se obtiene a partir de C_2 que es el costo de consumo de energía por unidad de potencia, para bombear el gasto Q de diseño durante un año al tanque de descarga.

$$C_E = \frac{(H_2 - H_1) \gamma Q}{76 \eta} C_2 \quad (1.3.19)$$

donde:

- C_2 = Costo de energía anual para bombeo por unidad de potencia
- H_1 y H_2 = Cargas totales de succión y descarga en las máquinas, en m.c.a
- γ = Peso específico del agua en N/m^3
- η = Eficiencia de la bomba

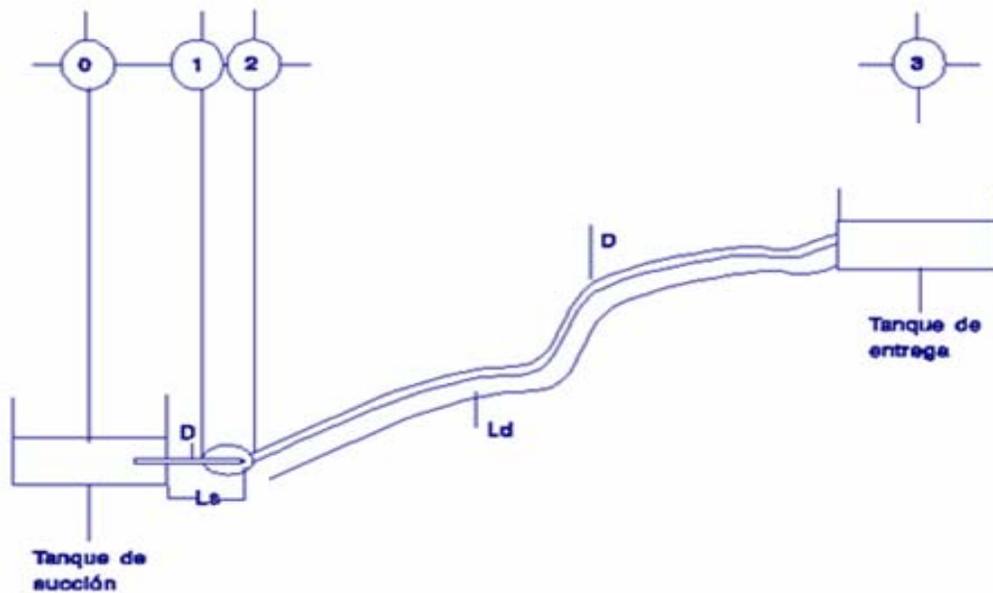


Figura 1.3.11 Esquema de una conducción por bombeo.

La ecuación de la energía aplicada entre el tanque de succión (0) y la succión de la bomba (1), y entre la descarga (2) y el tanque de descarga (3), Figura (1.3.11), considerando nulas la presión atmosférica y velocidades en las superficies de los tanques, así como, diámetros y coeficientes de rugosidad iguales en las tuberías de succión y descarga, se tiene como:

$$H_2 - H_1 = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} + z_3 - z_0 \quad (1.3.20)$$

donde:

$L = L_s + L_d$ (succión y descarga respectivamente)

$V = V_s = V_d$ - velocidad en las tuberías de succión y descarga

f = el factor de fricción

z_0 = elevación del nivel de agua en el tanque de succión

z_3 = elevación del nivel de agua en el tanque de descarga.

Acorde con los objetivos planteados, es necesario expresar el término de pérdida de carga por cortante en función del diámetro. Expresando la velocidad V en función del gasto, es decir,

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

se tiene

$$f \frac{L V^2}{D 2g} = 8f \frac{L Q^2}{g \pi^2 D^5} \quad (1.3.21)$$

Sustituyendo la expresión (1.3.20) que indica $H_2 - H_1$ con el término de pérdida de carga en función del diámetro, en la ecuación de costo anual de energía por bombeo C_E (ecuación 1.3.19) y sumándola a la expresión del costo de la tubería y su instalación C_T (1.3.18), resulta una expresión de costos integrados C_I , en función del diámetro. En la Figura 1.3.12 se presenta el comportamiento de estos costos en función del diámetro. Cabe señalar que la ecuación (1.3.18) que expresa el costo de la tubería como una función lineal del diámetro, es una aproximación al costo real que depende del diámetro de forma no lineal, como se muestra en la Figura 1.3.12.

$$C_I = C_1 D L + C_2 \left(8 \frac{f L Q^2}{g \pi^2 D^5} + z_3 - z_0 \right) \frac{\gamma Q}{76 \eta} \quad (1.3.22)$$

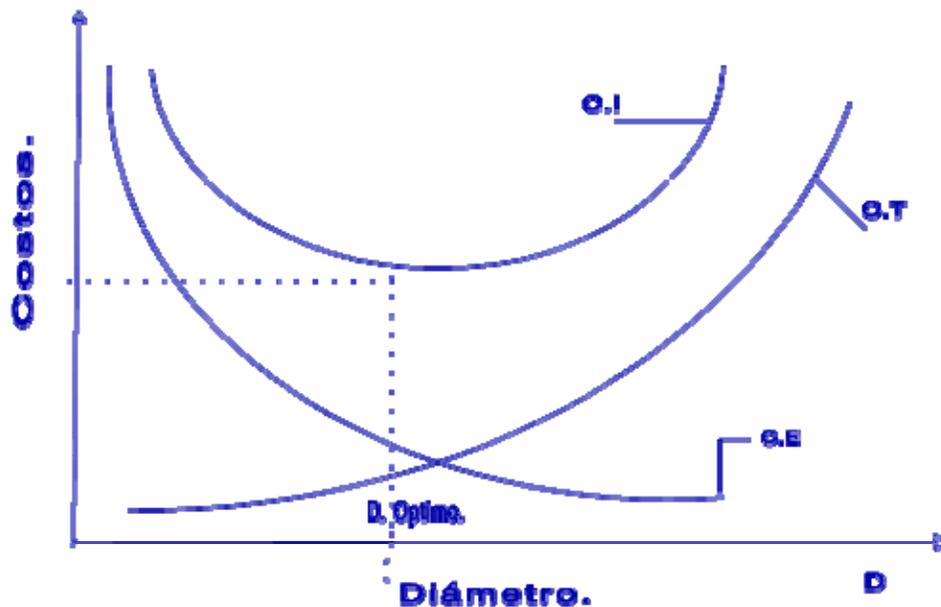


Figura 1.3.12 Comportamiento de los costos en función del diámetro.

El diámetro óptimo D_o se obtiene al hacer mínimo el costo integrado $C_I = C_T + C_E$, por lo tanto la derivada con respecto al diámetro de la función costo integrado C_I (ecuación 1.3.22), igualada a cero permite la obtención de D_o . A saber, la derivada resulta

$$\frac{d C_I}{d D} = C_1 L - C_2 \frac{40 f L Q^3 \gamma}{76 \eta g \pi^2 D^6} \quad (1.3.23)$$

La segunda derivada es positiva, lo cual indica que al igualarla a cero el diámetro corresponde al costo mínimo.

$$D_o = \sqrt[6]{\frac{10}{19} \frac{C_2 f \gamma}{C_1 \eta \pi^2 g}} \sqrt{Q} \quad (1.3.24)$$

La expresión (1.3.24) es llamada fórmula de Bresse.

Para el sistema de unidades MKS se ha encontrado que el radical

$$\sqrt[6]{\frac{10}{19} \frac{C_2 \gamma f}{C_1 \eta \pi^2 g}} \quad (1.3.25)$$

es aproximadamente igual a 1.2. Cuando el diámetro se calcula en pulgadas y el gasto se da en l/s resulta un valor de 1.5 y entonces la fórmula de Bresse es conocida también con el nombre de fórmula de Dupuit, obteniéndose respectivamente:

$$D_o(m) = 1.2 \sqrt[6]{Q(m^3/s)} \quad (1.3.26)$$

3.6 LLENADO Y VACIADO DE LA CONDUCCION

3.6.1 Llenado programado

El llenado programado considera la evacuación del aire existente en las tuberías, a través de válvulas de expulsión ubicadas a lo largo de la conducción en los sitios donde el aire puede quedar atrapado. La expulsión genera sobrepresiones, debidas a la alteración súbita que sufre el gasto con que se llena la conducción al cerrarse las válvulas. Estas válvulas cierran cuando el agua llega hasta ellas y empuja el flotador contra el orificio. Cuando esto ocurre el gasto en la tubería se modifica con ΔQ generándose un incremento de presión Δh en m.c.a. que se propaga por la tubería; proporcional a $\Delta Q/A$, con una constante de proporcionalidad igual a a/g (ver 3.8.3), donde A señala el área de la sección transversal de la tubería, a es la velocidad de propagación de las ondas de presión en la conducción, y $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ es la aceleración de la gravedad.

El gasto máximo posible a emplear en el llenado de la conducción Q_{max} , se determina entonces a partir de la resistencia de la tubería. Para una tubería con resistencia Δh en m.c.a. de presión manométrica interior, se tiene:

$$\Delta Q_{max} = \Delta h \frac{g A}{a} \quad (1.3.27)$$

y el gasto máximo de llenado queda definido por

$$Q_{\max} = \Delta h \frac{g A}{a} \quad (1.3.28)$$

admitiendo que (Figura 1.3.13) el gasto expulsado $Q_e =$ gasto de llenado Q y el gasto restante aguas abajo de la válvula $Q_r = 0$. En la expresión (1.3.28) Δh es la resistencia menor de las tuberías en el tramo.

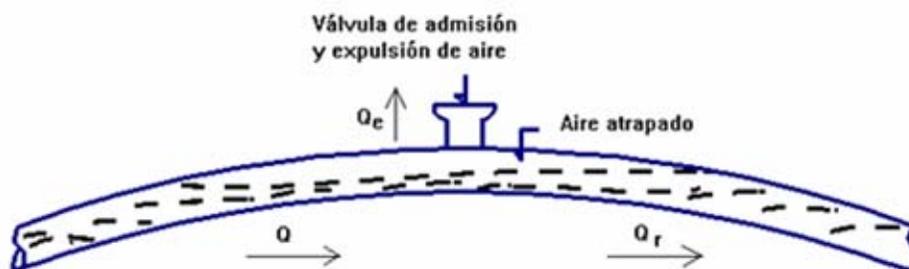


Figura 1.3.13 Llenado de la conducción.

En consecuencia, el gasto máximo de llenado determina la capacidad mínima de expulsión de aire de la o las válvulas del tramo. Sin embargo, dado que las válvulas son de admisión y expulsión de aire es necesario revisar las necesidades de admisión para su dimensionamiento.

3.6.2 Vaciado programado

El vaciado programado considera la entrada de aire por medio de válvulas de admisión que eviten depresiones en la conducción; la ubicación de éstas deberá ser en los puntos altos del trazo. El vaciado se efectúa mediante válvulas de compuerta ubicadas en las partes bajas y en todo sitio donde sea posible el estancamiento de agua a lo largo de la conducción (Figura 1.3.14).

Si al vaciar un tramo de la conducción con desnivel Δz (figura 1.3.14), no se previera la admisión de aire atmosférico, podrían generarse depresiones con valor Δz en m.c.a. por debajo de la presión atmosférica, mientras se tenga:

$$\Delta z \leq \frac{P_a - P_v}{\gamma} \quad (1.3.29)$$

donde:

P_a = Presión atmosférica absoluta

P_v = Presión de vapor absoluta a la temperatura de trabajo

γ = Peso específico del agua

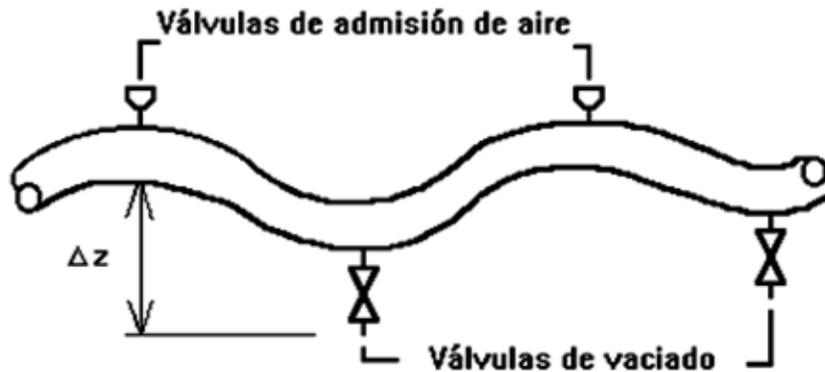


Figura 1.3.14 Localización de las válvulas de vaciado en una conducción.

Los tramos de conducción que no cumplan la condición (1.3.29) tendrán evaporación de agua estableciéndose la presión de vapor P_v . En esta situación la tubería podría colapsar, si no resiste la depresión impuesta.

De esta manera las válvulas de admisión deben de tener suficiente capacidad para admitir el aire que pueda suplir el gasto que sale por las válvulas de vaciado, sin llegar a producirse depresiones inadmisibles. Deberá observarse por seguridad que las depresiones sean menores de 0.350 Pa abajo de la presión atmosférica. El cálculo se hace considerando las válvulas de vaciado completamente abiertas.

El dimensionamiento de la válvula de vaciado está en función del Δz que presenta el tramo y del tiempo de vaciado acorde a la operación. Los valores más grandes de Δz en el tramo implican mayores cargas y gastos de descarga, que hacen necesarias válvulas de vaciado de menor tamaño para el mismo tiempo de vaciado. Considerar esto puede evitar la descarga de gastos grandes que obliguen la implementación de válvulas de admisión de capacidades muy grandes (referencia 8).

3.7 OPERACION ESTACIONARIA DE LA CONDUCCION

3.7.1 Vaciado accidental a gasto nulo

Este tipo de vaciado ocurre en tramos de la conducción que presentan curva vertical ubicada en puntos más altos que el tanque de descarga (Figura 1.3.15), cuando la operación es interrumpida por un paro accidental (corte de energía, daños en la

conducción, etcétera), generándose por efecto de la gravedad y la topografía, la división de la columna de agua a partir de la válvula de admisión y expulsión de aire.

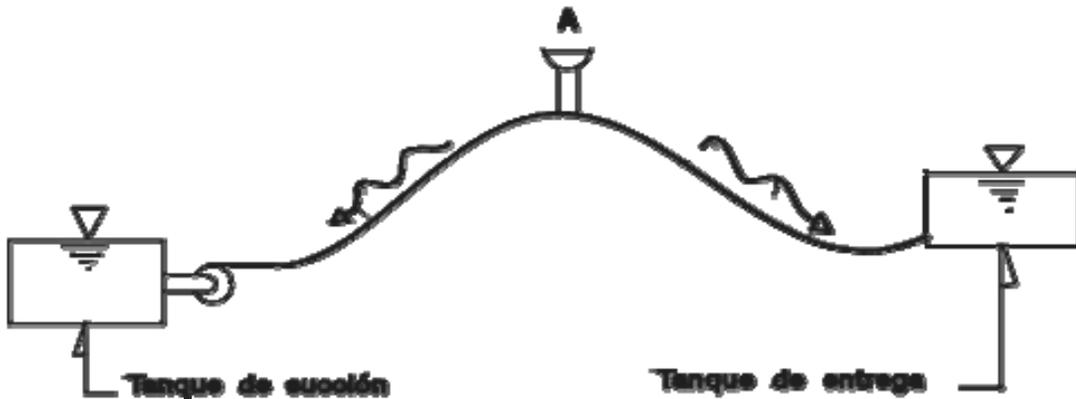


Figura 1.3.15 Vaciado accidental a gasto nulo.

El aire introducido al retroceder el agua, hace necesario un llenado cuidadoso de la conducción cuando se reinicie la operación, razón por la cual deberán evitarse vaciados accidentales, lo cual se logra con la colocación de válvulas de no retorno controladas, una después de la bomba y la otra aguas abajo del punto A, esta última ubicada a un nivel inferior al nivel de superficie libre del tanque de entrega (Figura 1.3.16).

Los tiempos de cierre de las válvulas de no retorno están relacionados con fenómenos transitorios en la conducción ante los cambios del gasto, problemática que deberá ser considerada en el diseño.

Otro problema que puede generarse a partir de la solución propuesta para el vaciado accidental, es la sobrepresión a gasto nulo, que ocurre cuando la válvula de control aguas abajo del punto A no abre cuando las bombas entran en operación. En consecuencia, las presiones en la conducción podrían ser mucho más altas que las de trabajo, con el riesgo de producir un accidente de gran magnitud.

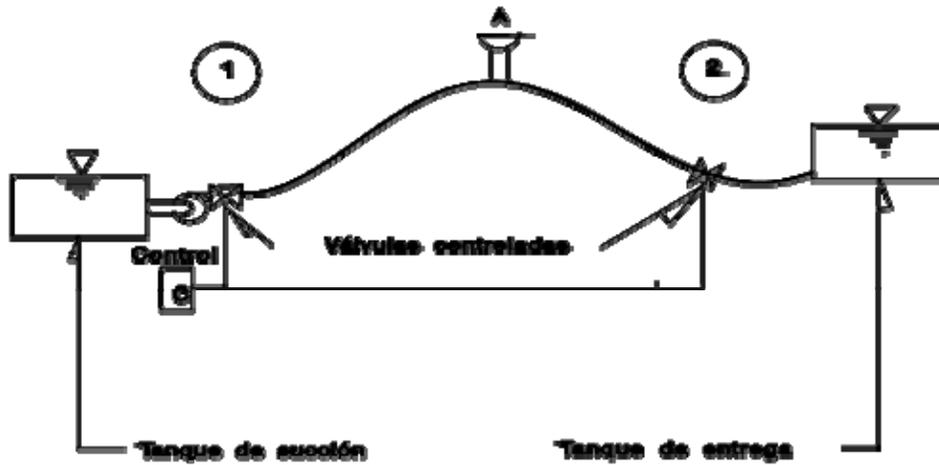


Figura 1.3.16 Ubicación de válvulas para controlar el vaciado accidental a gasto nulo.

La anterior situación puede solucionarse con la implementación de sistemas de vertido en la conducción, tales como, cajas vertedoras o válvulas de alivio (Figura 1.3.17). Los sistemas de vertido controlan la sobrepresión y evitan vertidos accidentales al hacer un vertido programado cuando la presión en la línea supere un valor preestablecido en un punto determinado.

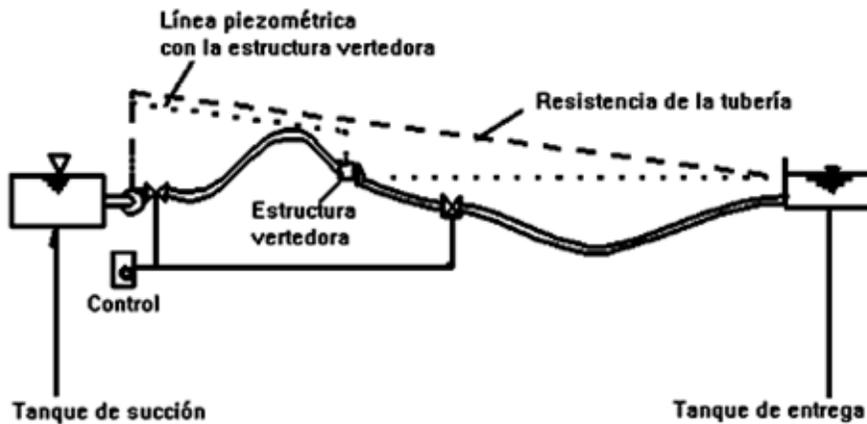


Figura 1.3.17 Estructura vertedora.

3.7.2 Vaciado accidental a gasto parcial

La necesidad de operar la conducción con gastos menores al de diseño Q y el arranque uno por uno de los equipos de bombeo en plantas con bombas en paralelo, son las principales causas que inducen el vaciado accidental a gasto parcial Q' .

La operación del acueducto a gasto parcial Q' puede presentar una piezométrica que corte el perfil de la conducción (Figura 1.3.18), en cuyo caso queda un tramo en depresión que hace necesaria la entrada de aire por las válvulas de admisión y expulsión.

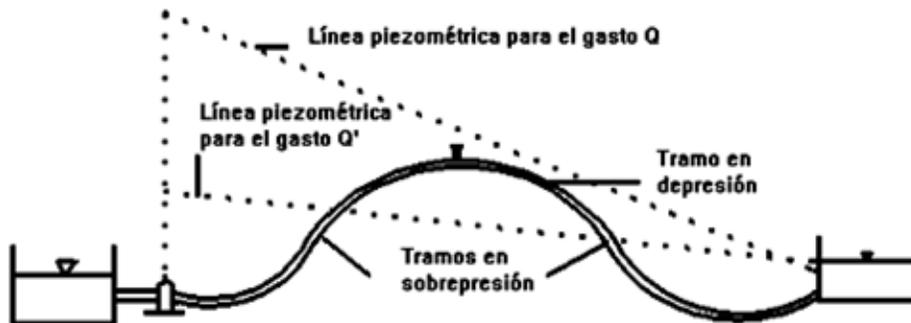


Figura 1.3.18 Vaciado accidental a gasto parcial.

Lo anterior genera que el tramo inmediato aguas abajo de la válvula de admisión y expulsión de aire, opere como canal (Figura 1.3.19) induciendo un flujo de aire por arrastre en la parte superior del conducto.



Figura 1.3.19 Operación como canal de una sección.

El aire introducido, al pasar a la zona de sobrepresión se transforma en burbujas que generarán perturbación en la conducción, hasta ser expulsadas por las válvulas de admisión y expulsión. Estas perturbaciones no presentan mayores problemas, si el gasto parcial Q' es menor que el gasto máximo de llenado $Q_{máx}$ (referencia 8), en caso contrario pueden presentarse fuertes ondas de sobrepresión que se propagarán en la conducción.

La operación del sistema a gasto parcial es necesaria por diversas razones. No obstante, por la nocividad de sus efectos deberá evitarse desde el diseño el vaciado accidental a gasto parcial. Una solución a este problema es la implementación de orificios disipadores de energía, que al sobre elevar la piezométrica eliminan los tramos en depresión evitando así el vaciado accidental (Figura 1.3.20). El cálculo de la pérdida de carga para un orificio con diámetro D_o hecho en una tubería de diámetro D se obtiene con:

$$H_1 - H_2 = K \left(Re, \frac{D_o}{D} \right) \frac{V^2}{2g} \quad (1.3.30)$$

donde:

H_1 y H_2 = cargas totales

K = coeficiente en función de condiciones geométricas del orificio

Re = número de Reynolds

V = velocidad en la tubería.

La implementación de los orificios para cada gasto parcial se hace sobre ramales paralelos al eje del acueducto (Figura 1.3.21).



Figura 1.3.20 Ubicación de orificios disipadores en flujos con gasto parcial.

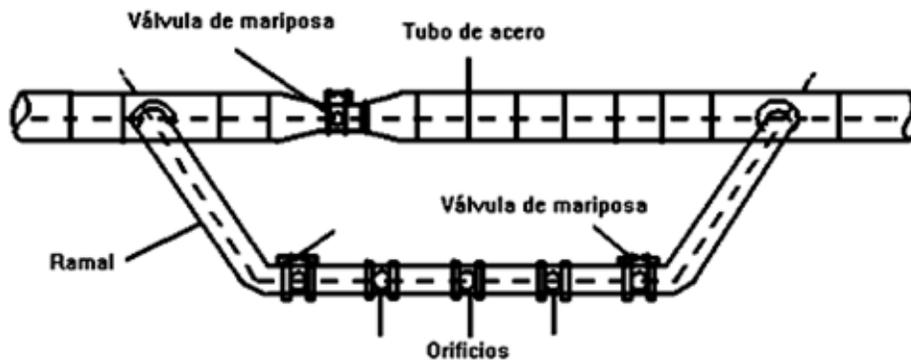


Figura 1.3.21 Ubicación de orificios en una estructura ramal en una conducción

3.7.3 Operación de las bombas

En la operación de las bombas, la energía entregada al fluido bombeado por unidad de peso es H y se denomina carga dinámica total con unidades m.c.a. Esta carga H es función del gasto Q que se bombea y de la velocidad angular N del rotor del equipo.

$$H = H(Q, N) \quad (1.3.31)$$

La operación estacionaria de una bomba puede ser descrita a partir de las curvas de: carga dinámica total H , eficiencia η y carga neta positiva en la succión $CNPS$ (Figura 1.3.22).

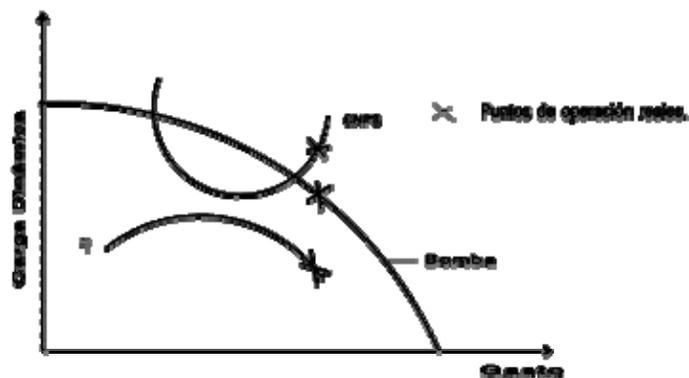


Figura 1.3.22 Curvas descriptivas de la operación de la bomba.

La operación en paralelo de varias bombas puede representarse a partir de las curvas características de ellas en un diagrama H - Q ; el cual, se obtiene al trazar las curvas características en forma consecutiva multiplicando las abscisas por un factor igual al número de equipos en paralelo (Figura 1.3.23).

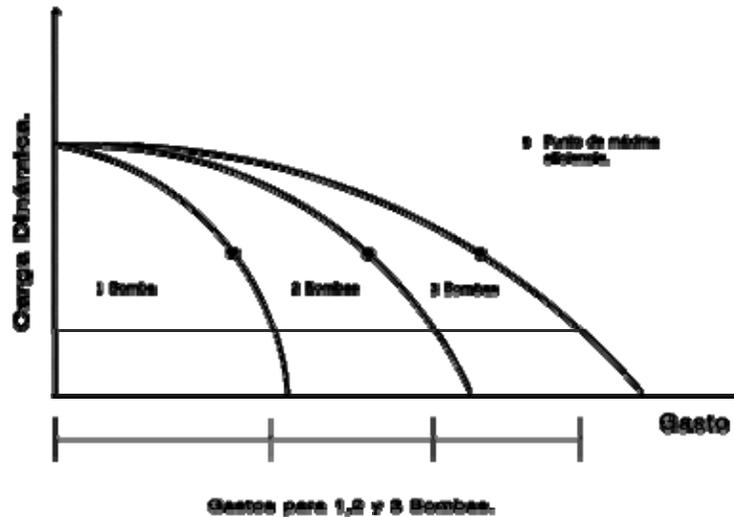


Figura 1.3.23 Diagrama carga/gasto para tres equipos.

En una línea de conducción, la carga dinámica total H integrada por h_f carga de fricción y H_e carga de elevación, da origen a la denominada curva característica de la conducción, que de forma aproximada puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$H = H_e + K Q^2 \quad (1.3.32)$$

donde:

K = valor para cada conducción, en función de geometría y Re .

En la Figura 1.3.24 se muestra con línea discontinua la forma de una curva de la conducción.

Las maniobras de arranque para acueductos grandes con operación de bombas en paralelo se realiza una a una, lo que implica gastos parciales, donde la eficiencia real de trabajo para una bomba o dos es significativamente menor que la eficiencia para gasto máximo de diseño, Figura 1.3.24. En esta figura puede verse el comportamiento de un acueducto con operación en paralelo de tres bombas, al intersectarse las curvas características de las bombas con la curva característica del acueducto.

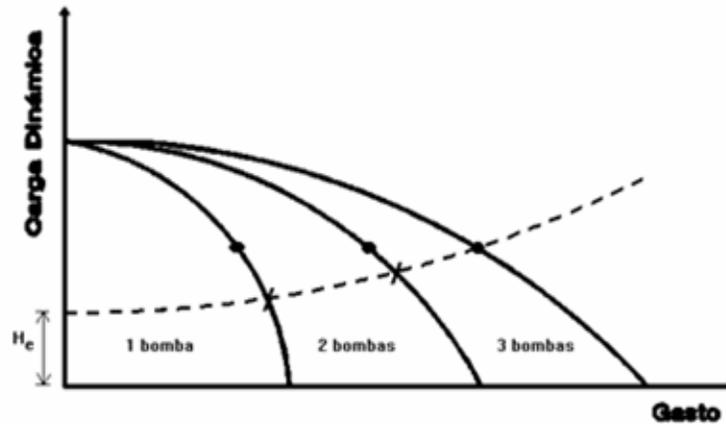


Figura 1.3.24 Comportamiento de la operación en paralelo de tres equipos.

Una situación similar se tiene al comparar las curvas de eficiencia, carga neta positiva en la succión y característica de una bomba contra la curva característica de la conducción (Figura 1.3.25). Se observa por ejemplo, que la CNPS requerida aumenta mientras que la de eficiencia η disminuye con relación al punto de máxima eficiencia de la bomba. Esta situación puede dejar fuera de rango a la CNPS imposibilitando el arranque de la bomba.

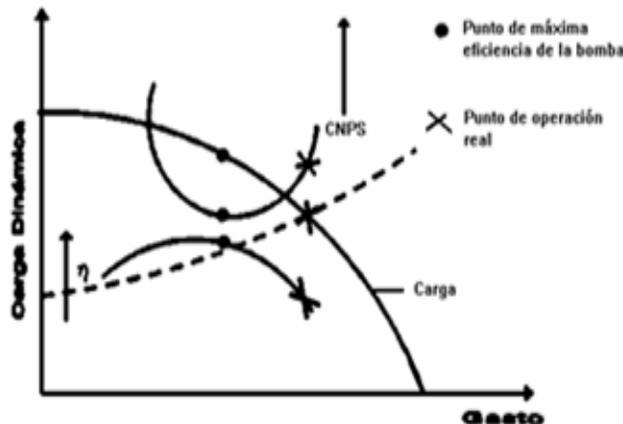


Figura 1.3.25 Variación de las curvas descriptivas de la conducción en función del gasto.

Para solucionar esta problemática, desde el diseño se procede de manera conveniente, en principio, con equipos de bombeo bien seleccionados que cubran todas las condiciones que imponga la conducción.

Una segunda solución, dada la imposibilidad de la anterior, sería un aumento en el diámetro de la tubería, lo que disminuye la relación hf/H y en consecuencia K , teniendo así menor separación de los puntos de operación a gasto parcial.

Por último, la implementación de orificios disipadores de energía o válvulas de regulación de gasto, permiten el control total de K y la posibilidad de trabajar en los

puntos de máxima eficiencia con cada gasto parcial, aunque en consecuencia disminuya el rendimiento global del sistema que sería lo menos deseable.

El uso de orificios debe determinarse feacientemente, lográndose a través de la relación de consumo de energía RCE:

$$RCE = \frac{\frac{\gamma_s H_s Q_s t_s}{\eta_s}}{\frac{\gamma_d H_d Q_d t_d}{\eta_d}} \quad (1.3.33)$$

donde el subíndice *s* corresponde a la carga *H*, el gasto *Q*, al tiempo *t* y a la eficiencia mecánica η de la energía consumida sin disipación adicional y el subíndice *d* corresponde a los componentes de la energía con disipación ocasionada por el uso de orificios o válvulas de regulación.

El producto $\gamma_s Q_s t_s = \gamma_d Q_d t_d$ por lo que estas variables se eliminan y resulta

$$RCE = \frac{H_s \eta_d}{H_d \eta_s} \quad (1.3.34)$$

Un dispositivo disipador de energía solo se justifica cuando $RCE > 1$, dicho de otra manera cuando

$$\frac{\eta_d}{\eta_s} > \frac{H_d}{H_s} \quad (1.3.35)$$

3.8 TRANSITORIOS HIDRAULICOS EN CONDUCTOS A PRESION

3.8.1 Regímenes posibles del flujo en tuberías a presión

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, éste es no estacionario, no permanente o transitorio.

Se distinguen 3 tipos de transitorios hidráulicos:

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

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

En el libro Redes de distribución de este Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la Comisión Nacional del Agua, se incluye el programa de cómputo AHPE (Análisis Hidráulico de Períodos Extendidos) que puede ser usado para una simulación de períodos extendidos en conducciones y en redes.

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 significativas pero no tanto como para tomar en consideración las propiedades elásticas del fluido y de las tuberías. El período de un transitorio de este tipo normalmente es de varios minutos, y es suficiente un modelo que considere solamente el movimiento y la inercia del volumen de agua en las tuberías.
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 período muy corto (apenas varios segundos). Las variaciones de presión en un transitorio de este tipo son importantes, por lo que resulta necesario considerar los efectos elásticos de la tubería y del líquido.

En México, el Instituto de Ingeniería de la UNAM (1985) y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (1994) han desarrollado modelos matemáticos y programas de computadora para simular transitorios hidráulicos rápidos. Otros modelos similares se ofrecen en el mercado internacional, principalmente en los Estados Unidos de América y en Inglaterra. Al usar un modelo de este tipo el usuario da al programa los datos de la conducción, de las bombas y válvulas, y el tipo de transitorio a simular. El programa simula el transitorio con base en su modelo matemático y muestra las presiones máximas y mínimas resultantes. En el capítulo 2 de la parte 3 de este manual se da más información sobre un programa de este tipo.

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

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

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

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

Las perturbaciones en el régimen del flujo que se originan en un punto de una tubería a presión se transmiten (propagan) por la tubería con una velocidad que depende de la elasticidad del fluido y de la pared de la tubería. Esta velocidad se señala con a y se denomina también celeridad, para distinguirla de la velocidad del flujo v .

Si la tubería fuera completamente indeformable (completamente rígida), la velocidad a sería igual a la velocidad de propagación del sonido en el fluido. La deformabilidad de la tubería disminuye la velocidad de propagación, y es válida la siguiente ecuación:

$$a = \frac{a_o}{\sqrt{1 + \frac{E_{\text{agua}} D}{E_{\text{mat}} \delta}}} \quad (1.3.36)$$

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 1425 a 1440 m/s. El módulo de elasticidad del agua es igual a 2.074×10^9 N/m² (2.115×10^4 Pa). El valor de E_{mat} se toma de la Tabla 1.3.3.

Tabla 1.3.3 Módulo de elasticidad de materiales de tuberías

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

3.8.3 La fórmula de Joukowski

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

$$\Delta H = \frac{a}{g} \Delta v \quad (1.3.37)$$

donde g es la aceleración de la gravedad ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$) y a es la velocidad de propagación de la onda.

Una vez producida la perturbación, las variaciones de carga y velocidad ΔH y Δv se transmiten por la tubería con una celeridad a , hasta que encuentren alguna singularidad en que se transforman (ver sección 3.8.4).

Una disminución de la velocidad en la tubería genera un incremento de la presión (sobrepresión) aguas arriba y una disminución de la presión (depresión) aguas abajo, y viceversa. Esta situación se ilustra en la Figura 1.3.26 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 de la velocidad genera una retención del flujo agua arriba de la válvula y con esto una sobrepresión, produciéndose aguas abajo una liberación del flujo y una depresión.

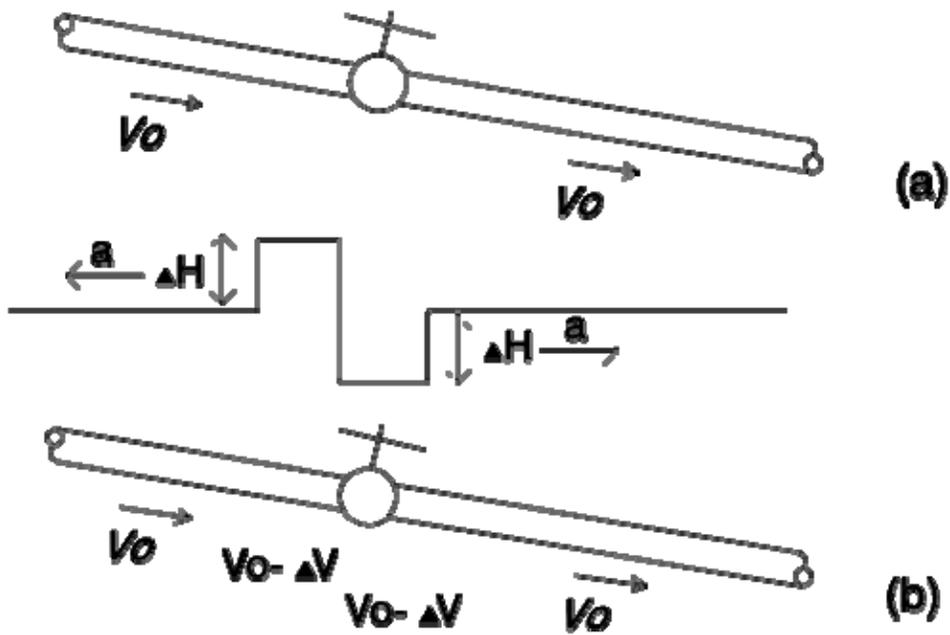


Figura 1.3.26 Sobrepresión y depresión con el cierre de una válvula intermedia.

3.8.4 Coeficientes de transmisión y reflexión de las ondas de presión

Cuando en su propagación por la tubería una sobrepresión (o subpresión) ΔH encuentre un cambio de diámetro, ésta cambia su valor. Una parte de la sobrepresión (subpresión) continúa después del cambio de diámetro, y otra parte se refleja. Se puede definir entonces se define como un coeficiente de transmisión s , a la relación de la sobrepresión (subpresión) que se trasmite con respecto a la que llega. Si el área de la tubería antes del cambio de diámetro es A_1 , y después del cambio A_2 , el coeficiente s se da por la siguiente ecuación:

$$s = \frac{2A_1}{A_1 + A_2} \quad (1.3.38)$$

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

$$r = 1 - s \quad (1.3.39)$$

Para el caso general de una unión de más de dos tuberías (Figura 1.3.27) se tiene:

$$s = \frac{2A_i}{\Sigma A} \quad (1.3.40)$$

$$r = 1 - s \quad (1.3.41)$$

Con i se designa la tubería desde la cual llega la sobrepresión; el coeficiente r se define sólo para ésta, mientras que el coeficiente s se refiere a las restantes tuberías.

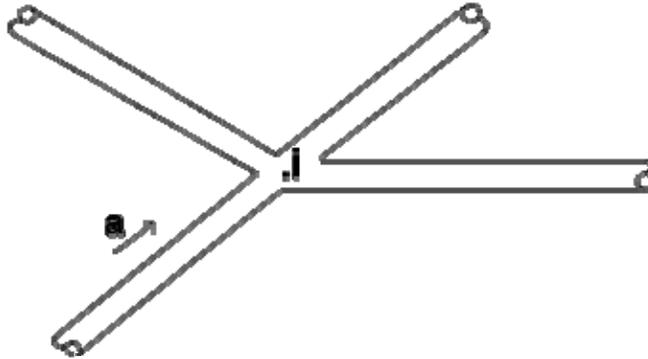


Figura 1.3.27. Arribo de una onda de presión a una unión de tubos.

Según las ecuaciones (1.3.38) y (1.3.39), cuando una sobrepresión pasa de una tubería de diámetro menor a otra de diámetro mayor, la mayor parte de ésta se refleja. Cuando la tubería se une con un tanque, éste puede considerarse como una tubería de diámetro muy grande ($A_2 = \infty$, Figura 1.3.28). Para $A_2 = \infty$ de las ecuaciones (1.3.38) y (1.3.39) se obtiene:

$$s = 0, \quad r = 1$$

es decir, las sobrepresiones que llegan al tanque no se transmiten y se reflejan por completo.

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 un diámetro a otro donde el segundo diámetro es igual a cero. Por las fórmulas (1.3.38) y (1.3.39) se obtiene:

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

es decir, en caso de encontrarse con un extremo cerrado la sobrepresión duplica su valor (Figura 1.3.29).

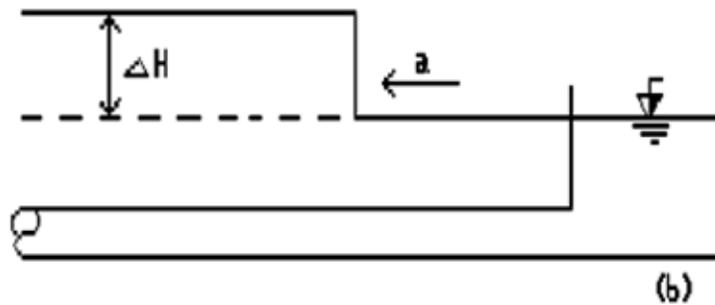
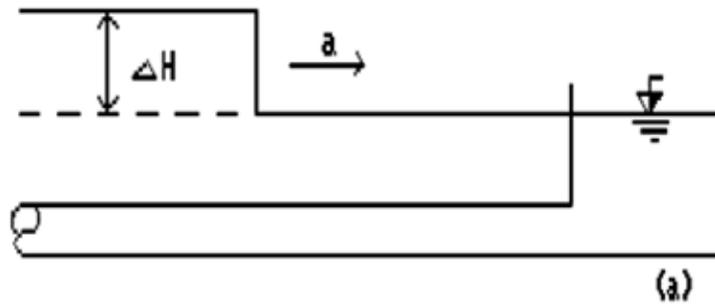


Figura 1.3.28. Reflejo de la onda de presión de un tanque.

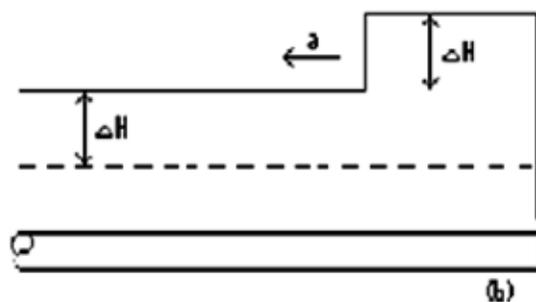
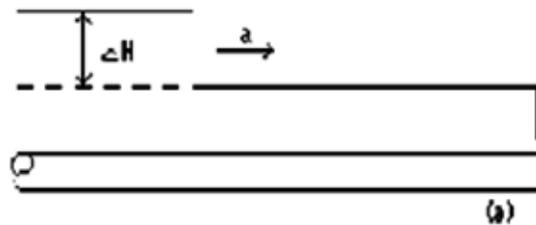


Figura 1.3.29. Reflejo de la onda de presión de un extremo cerrado

3.8.5 Separación de la columna líquida en transitorios

Durante los transitorios en una serie de casos es posible que se produzcan presiones negativas dentro de las tuberías. Obviamente la mínima presión (vacío absoluto) que físicamente se puede alcanzar en el agua, tomando como nivel de referencia la

presión atmosférica, es de una atmósfera con signo negativo, equivalente a -10,33 m.c.a. Pero antes de llegar al vacío absoluto se producirá la vaporización del agua por cavitación.

La cavitación, como es bien sabido, no es más que una ebullición prematura del agua, que se vaporiza a temperaturas muy inferiores a los 100°C, su punto de ebullición 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 m.c.a. En la práctica este valor puede ser un poco más bajo debido al contenido de aire disuelto en el agua, impurezas y otros factores.

Y es que, sin ninguna duda una presión negativa dentro de la tubería igual a la presión de vapor, va a comportar una separación o ruptura de la columna líquida como consecuencia de la cavitación. Con posterioridad dicha presión se mantiene en este valor mínimo no pudiendo alcanzar un valor inferior. Se forma un volumen compuesto por vapores y aire disuelto, que crece debido a que los caudales de agua que ingresan al lugar de la separación son menores de los salen. 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 el volumen disminuye hasta que cerrarse con un choque violento. Producto de este choque se obtienen en la tubería sobrepresiones que pueden presentar valores muy altos.

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

3.8.6 Transitorio en una conducción de bombeo generado por el paro de bombas

De los posibles transitorios de una conducción por bombeo el más desfavorable es el caso de un paro repentino de las bombas en operación, situación se manifiesta 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 asume de diámetro y velocidad de propagación de la onda constantes (caso de una tubería simple) y la influencia de las pérdidas de carga por fricción no se considera.

3.8.6.1. Casos sin separación de la columna líquida

Con el cese del suministro de energía eléctrica los equipos de bombeo rápidamente disminuyen su velocidad y con esto el gasto entregado, lo que ocasiona depresiones conforme con la ecuación (1.3.38), las cuales se propagan desde la planta de bombeo por la tubería con una velocidad a . Al llegar al final de la tubería éstas se transforman (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 $2L/a$, y se nombra tiempo de duración de la fase y se señala con la letra T_f .

Si el tiempo de paro de las bombas es menor que T_f las variaciones del régimen del flujo al inicio de la tubería dependerán sólo del propio paro de las bombas y la velocidad disminuirá (por cualquier ley) desde la velocidad inicial v_o hasta cero. Cada disminución en la velocidad Δv generará una disminución en la carga ΔH (una depresión) según la fórmula de Joukowski (1.3.37), de forma tal que la depresión resultante tendrá el valor:

$$\sum \Delta H = \sum \frac{a \cdot \Delta v}{g} = \frac{a \cdot v_o}{g} \quad (1.3.42)$$

Si el tiempo de paro de las bombas es mayor que T_f las variaciones en el régimen del flujo regresarán reflejadas al inicio de la tubería y modificarán las depresiones generadas por el paro de las bombas.

La Figura 1.3.30-(a) representa la operación del sistema en régimen permanente.

Con el cese del suministro de energía eléctrica al inicio de la tubería surgen depresiones, que se propagan hacia el tanque (Figura 1.3.30-(b)). Al llegar a éste, la onda de depresión se refleja y la onda reflejada se superpone con la onda de depresión que continúa llegando (Figura 1.3.30-(c)). 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 aun están funcionando. A partir de este momento el transitorio puede considerarse como el resultado de la superposición de tres ondas (Figura 1.3.30-(d)):

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.

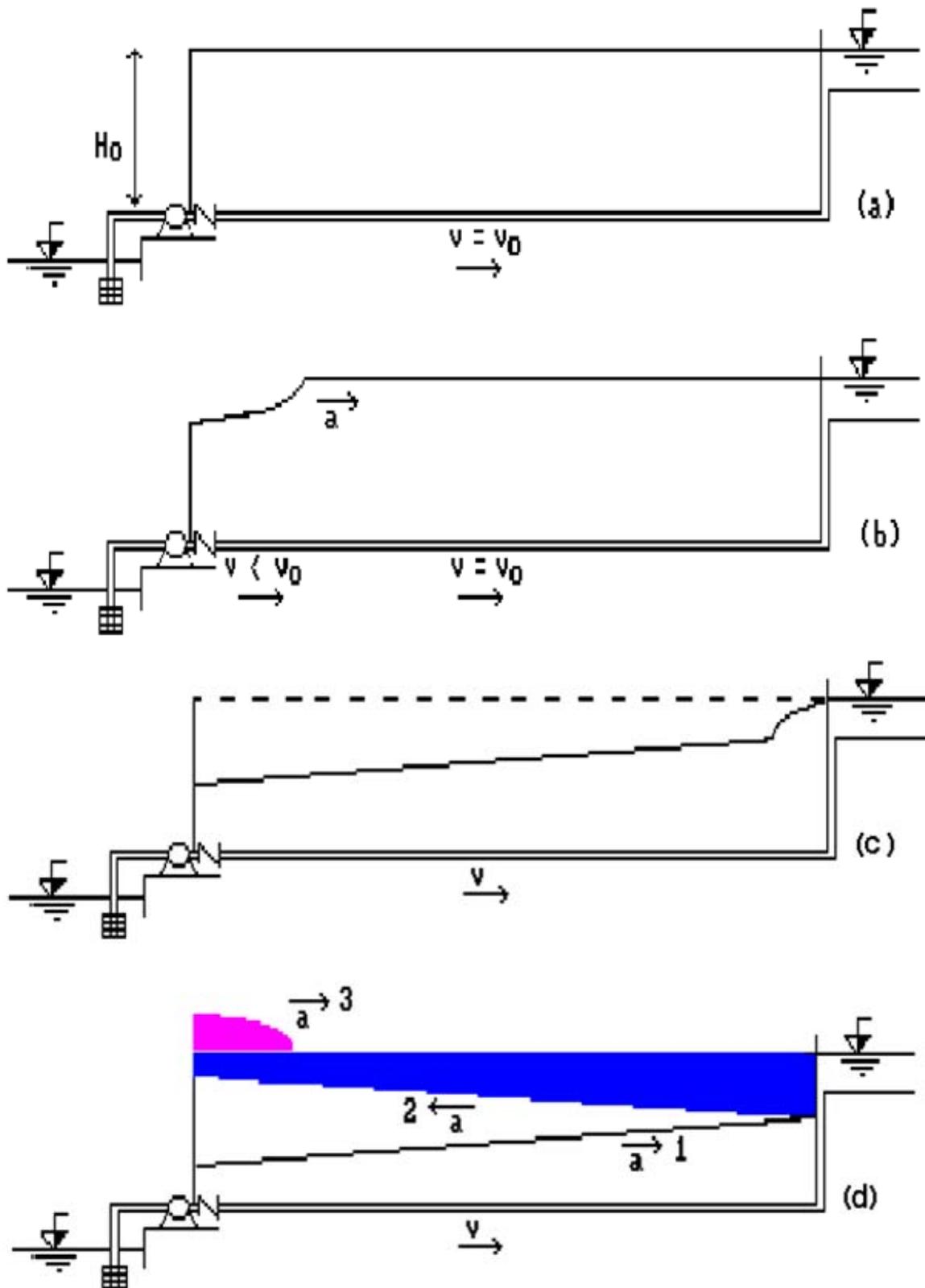


Figura 1.3.30 Transitorio sin separación de columna en una línea de bombeo

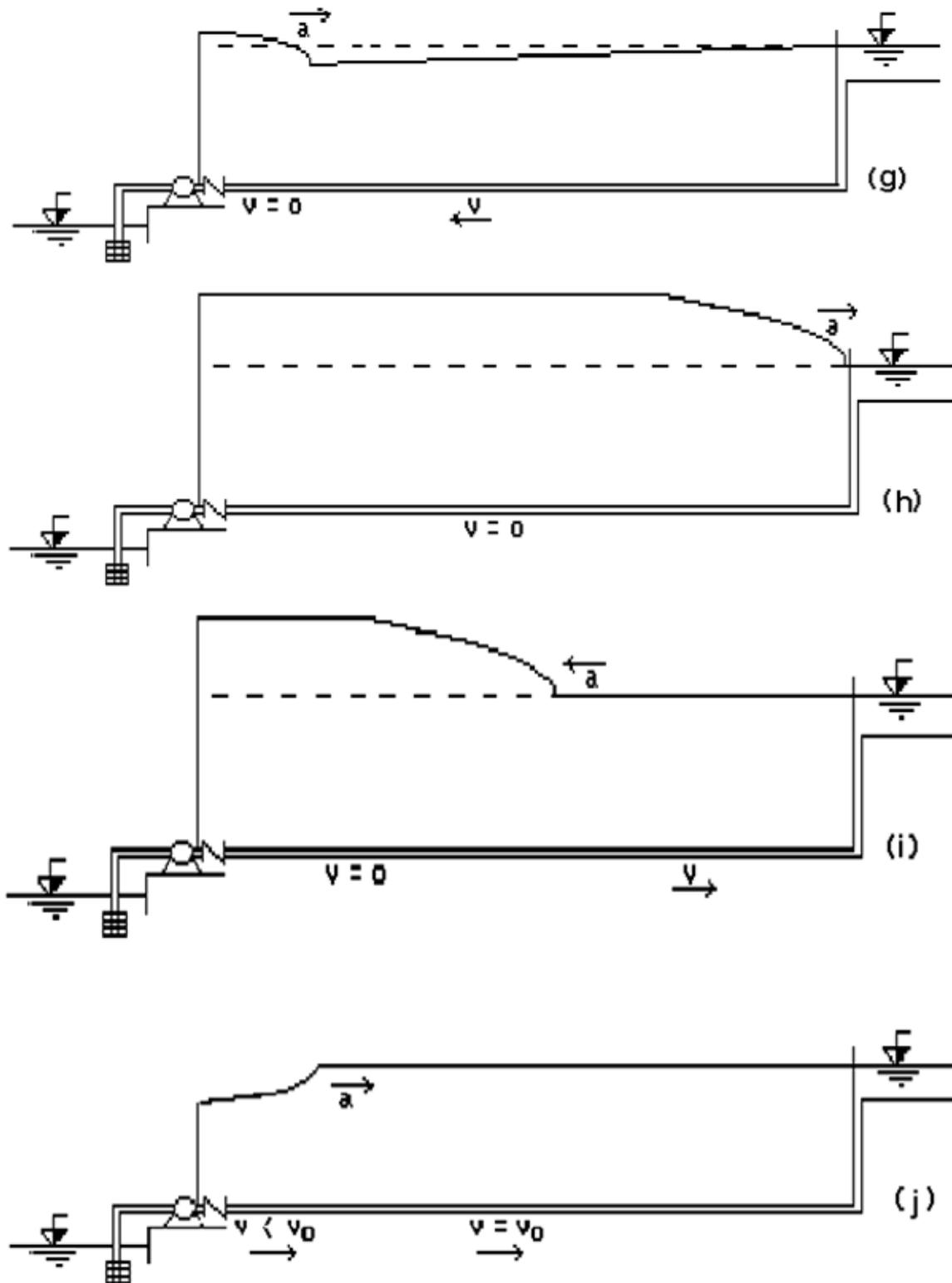


Figura 1.3.30 Transitorio sin separación de columna en una línea de bombeo (continuación)

Después del tiempo $2L/a$ las ondas 2 y 3 neutralizan en alguna medida la depresión. Esto impide que se produzca completamente la depresión que indica la fórmula de Joukowski (1.3.37).

Un golpe de ariete, en que se produzca la variación total de la carga ΔH de (1.3.42) 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 éstas. Cuando la carga al inicio de la tubería resulta mayor que la carga que dan 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 la tubería se establezca una velocidad cero y una presión baja (Figura 1.3.30-(e)). La presión baja existente en la tubería genera un flujo desde el tanque, que tiende a restablecer la carga H_0 (Figura 1.3.30-(f)). Al llegar al principio de la tubería este flujo se detiene bruscamente por las válvulas de no retorno que ya se encuentran cerradas, produciéndose una onda de sobrepresión que se propaga deteniendo en su recorrido el movimiento del agua (Figura 1.3.30-(g)). Al llegar esta onda de sobrepresión al tanque (Figura 1.3.30-(h)) en toda la conducción se tendrá una carga hidráulica 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 (Figura 1.3.30-(i)). Una vez que la depresión llega al inicio de la tubería, se produce una nueva depresión como una reflexión de un extremo cerrado (Figura 1.3.30-(j)). Puesto que el estado que demuestra la Figura 1.3.30-(j) es similar a el de la Figura 1.3.30-(j), a partir de este momento comienza un nuevo ciclo de depresión y sobrepresión y el transitorio presenta un carácter periódico.

La evolución de la carga al inicio de la tubería viene dada en la Figura 1.3.31



Figura 1.3.31 Evolución de presión en un transitorio sin separación de columna

Conclusiones para el caso sin separación de la columna

1. La sobrepresión máxima se produce al inicio de la tubería debido a la detención del flujo inverso por las válvulas de no retorno.
2. Mientras mayor sea el valor de las depresiones al detenerse las bombas, mayores serán las sobrepresiones que se producen después.

3. Las variaciones máximas de la presión resultan con un golpe directo (con un tiempo de paro de las bombas menor de $2L/a$). Para un tiempo de paro mayor de $2L/a$ (golpe indirecto), mientras mayor sea este tiempo tanto menores serán las depresiones y sobrepresiones.

Estas conclusiones son importantes para la selección de una protección antiarriete adecuada.

3.8.6.2. Casos con separación de la columna líquida

Un ejemplo se muestra en la Figura 1.3.32. La Figura 1.3.32-(a) representa las condiciones iniciales (estado de régimen permanente). Con el paro instantáneo de las bombas en el inicio de la tubería se genera una depresión ΔH , la cual se propaga hacia el tanque (Figura 1.3.32-(b)). En el momento en que esta depresión llega a un punto la tubería, donde la presión en condiciones de régimen permanente es igual a ΔH (punto A de la Figura 1.3.32-(c) en la tubería se origina una presión de vacío.

El vacío aumenta hasta alcanzar el valor de $H_{vacío}$ (punto B), después de lo cual se produce una separación de la columna de agua. Aguas abajo de la separación, continúa propagándose una depresión menor (lamina 1.3.32-(c)) y con esto un cambio menor Δv_1 en la velocidad. Del punto B hasta el final de la tubería se va estableciendo una velocidad $v_o - \Delta v_1$. La diferencia en las velocidades aumenta el volumen de la separación en el punto B.

En un momento dado el flujo en la tubería se invierte y luego la separación en el punto B se cierra. Esto produce una sobrepresión (Figura 1.3.32-(d)), la cual se propaga por la tubería desde el punto B 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 (Figura 1.3.32-(e)). Sigue un reflejo desde el tanque (Figura 1.3.32-(f)) y un nuevo reflejo con depresión desde el inicio de la tubería (Figura 1.3.32-(g)). Si la depresión producida es mayor que $H_o + H_{vacío}$, al inicio de la tubería puede originarse una nueva separación (Figura 1.3.32-(g)). Estas separaciones pueden nombrarse surgidas secundariamente o secundarias, debido a que son una consecuencia de otras separaciones ocurridas anteriormente.

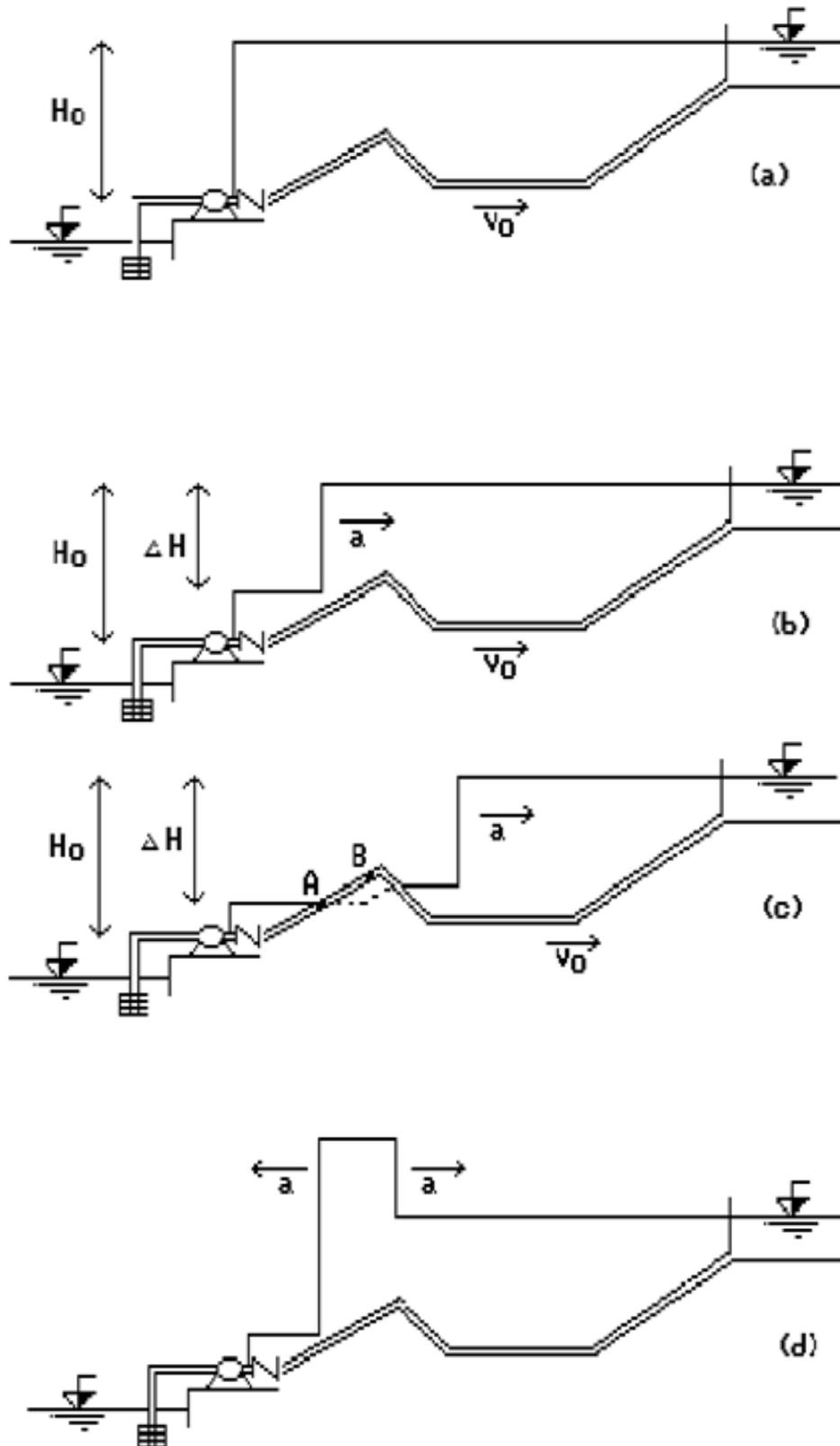


Figura 1.3.32 Transitorio con separación de la columna en una línea de bombeo

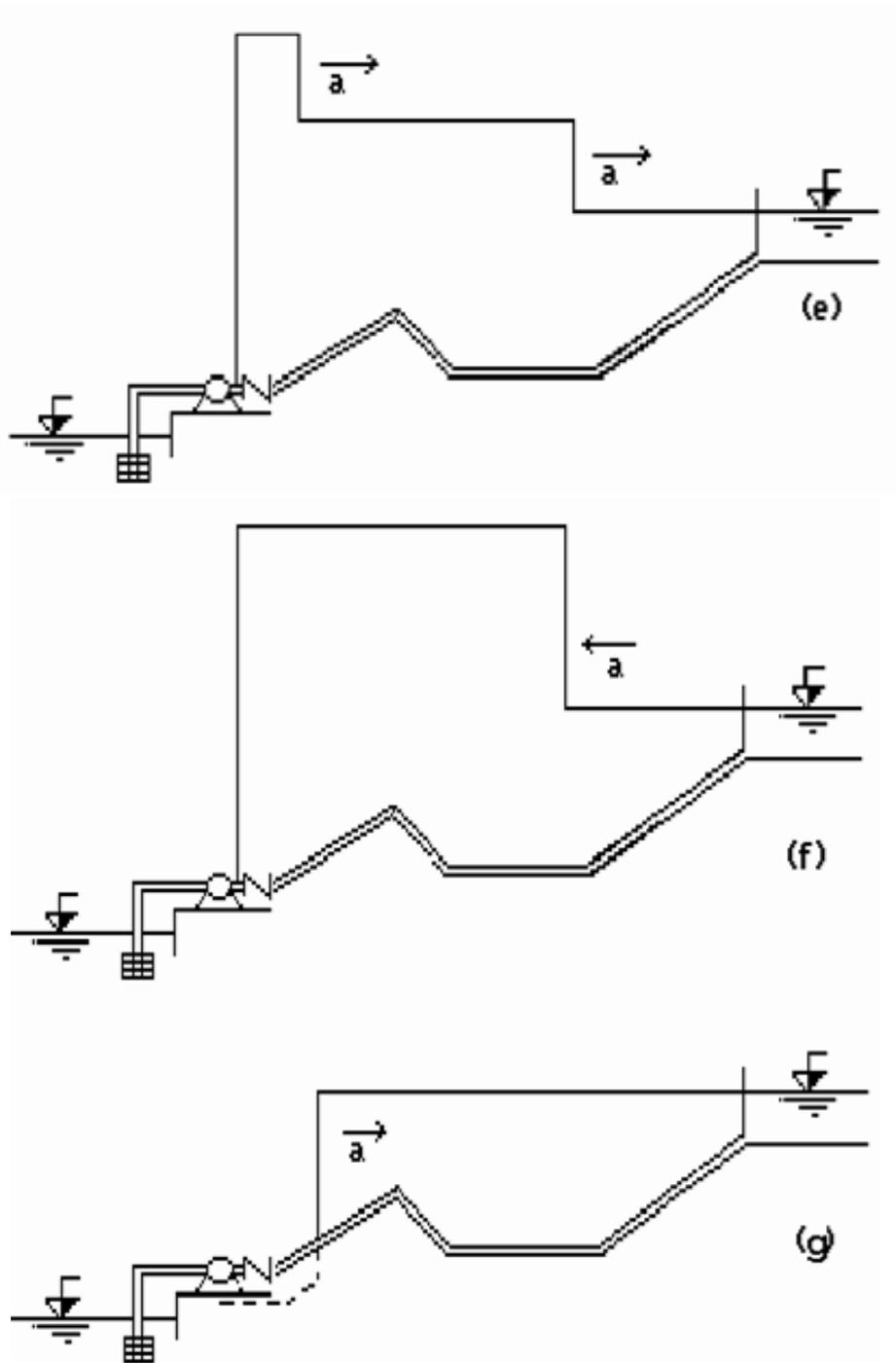


Figura 1.3.32 Transitorio con separación de la columna en una línea de bombeo (continuación)

Conclusiones para el caso con separación de columna:

1. Las sobrepresiones en caso de golpe de ariete con separación de la columna de agua pueden presentar valores considerablemente mayores que aquellos que resultan de un golpe de ariete sin separaciones.
2. 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 que se produzca la sobrepresión máxima es el choque de las columnas en el momento de la reunificación.
3. Es posible la obtención de zonas de vacío y separaciones en una gran parte de la tubería.

Estas conclusiones son de vital importancia para la selección de una protección antiarriete en caso de separaciones. Sobre este aspecto se profundiza en el subcapítulo 2.7 de la parte dos del presente tema.

3.8.6.3. Bombas sin válvulas de no retorno. Operación de las bombas en los cuatro cuadrantes

Si las bombas no tienen válvulas de no retorno, es posible que durante los transitorios se invierta el sentido del gasto y de la rotación y con esto se entre en regímenes de operación especiales. Cada máquina hidráulica de reacción (bomba o turbina) puede operar en una de las 3 formas siguientes:

Trabajando como bomba, cuando la potencia mecánica de la máquina se transfiere a potencia hidráulica del flujo.

Trabajando como turbina, cuando la potencia hidráulica del flujo se transfiere a potencia mecánica de la máquina.

Disipación de energía, cuando la potencia mecánica de la máquina y la potencia hidráulica del flujo se disipan en el líquido en forma de calor.

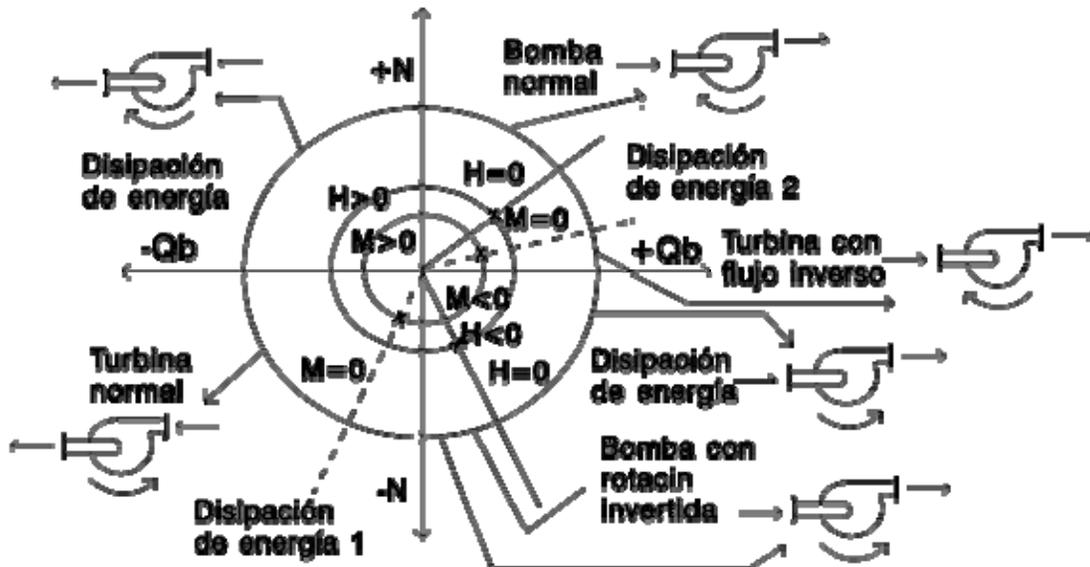


Figura 1.3.33 Diagrama de cuatro cuadrantes de una bomba centrífuga.

Se distingue un total de ocho posibles regímenes de operación de una máquina hidráulica. En la Figura 1.3.33 se presentan las zonas que corresponden a estos ocho regímenes en el sistema de coordenadas velocidad de rotación N y gasto Q_b . Puesto que los regímenes de operación se presentan en los cuatro cuadrantes de este sistema de coordenadas, se habla de operación de la bomba en los cuatro cuadrantes y al diagrama de la Figura 1.3.33 se le llama diagrama de los cuatro cuadrantes de una bomba.

La teoría de las bombas plantea que los regímenes semejantes de una máquina hidráulica cumplen con la condición:

$$\frac{Q_b}{N} = Const. \quad (1.3.43)$$

La expresión (1.3.43) es la ecuación de una línea recta en el sistema de coordenadas de la Figura 1.3.33 y que comienza en el inicio de las coordenadas. Todos los puntos de operación sobre esta línea corresponden a puntos semejantes entre sí. Esto, entre otras cosas, significa que las líneas de los regímenes con carga $H_b = 0$ y con momento de rotación $M = 0$ son líneas rectas, como se muestra en la figura.

Los ocho regímenes son:

1. Régimen normal de bomba. Se caracteriza por signos positivos de todos los parámetros, es decir $+Q_b$, $+H_b$, $+N$, $+M$.

Este régimen está presente en la operación normal de la bomba y en los primeros instantes después de su paro (antes de invertirse el flujo).

2. Disipación de energía con flujo contrario, $(-Q_b, +H_b, +N, +M)$. En este régimen la máquina gira en el sentido normal, mientras que el gasto corre en sentido contrario. Dos posibles casos de este régimen son:

Cuando una bomba sin válvula de no retorno se instala a operar contra una altura geodésica mayor que la máxima carga que la bomba puede desarrollar (mayor que H_b para $Q_b = 0$). En este caso se forma un flujo por gravedad desde el tanque de descarga hacia la toma de la bomba en sentido contrario de la rotación. La energía del motor eléctrico de la bomba se disipa en forma de calor en el flujo.

En el paro de la bomba después de invertirse el sentido del gasto y antes de invertirse la rotación.

3. Régimen normal de turbina, $(-Q_b, +H_b, -N, +M)$. Este es el régimen en que operan normalmente las turbinas. Para bombas se tiene después de invertirse el sentido del gasto y la rotación. El momento de rotación positivo M tiende a acelerar la rotación de la máquina en sentido invertido.

4. Disipación de energía 1, $(-Q_b, +H_b, -N, -M)$. Este régimen se diferencia del régimen normal de turbina solamente en el signo de M , que aquí es negativo, es decir que tiende a retardar la rotación inversa. Se tiene cuando la velocidad de rotación en el régimen de turbina aumenta tanto que la energía del flujo ya no puede mantener esta velocidad. En este caso las fuerzas de resistencia desaceleran la máquina.

5. Régimen inverso de bomba $(+Q_b, +H_b, -N, -M)$. En este régimen la máquina opera como bomba pero con sentido invertido de rotación. La eficiencia de este régimen de bombeo es muy baja. Se tendría si el motor de la bomba se conectara incorrectamente (si girara al revés).

6. Disipación de energía con rotación inversa $(+Q_b, -H_b, -N, -M)$. Este régimen se tiene cuando la velocidad no es suficiente para crear una carga positiva. La bomba actúa como una resistencia hidráulica. Este régimen, igual que el anterior ocurre muy pocas veces en la práctica.

7. Disipación de energía 2 $(+Q_b, -H_b, +N, +M)$. Al operar la máquina en el régimen normal de bomba con una velocidad fija, la carga disminuye con el aumento del gasto. Si el gasto de la bomba se hace mayor que el gasto para el punto A (figura I.3.35), la carga de la bomba pasa a ser negativa. La bomba actúa como una pérdida de carga.

8. Régimen inverso de turbina $(+Q_b, -H_b, +N, -M)$. Si, encontrándose la máquina en el régimen anterior, el gasto sigue aumentando se llega a un momento en que el flujo acelera la rotación en el sentido normal ($M < 0$). La bomba opera como una turbina con sentido inverso del gasto.

Los dos últimos regímenes se presentan muy pocas veces en la práctica. Un posible caso se tiene con dos bombas trabajando en serie, la primera de las cuales tiene una capacidad mayor que la otra. La bomba de capacidad mayor puede hacer operar a la otra en estos dos regímenes.

En las Figuras 1.3.34 y 1.3.35 se muestra la forma de las curvas características y las zonas de los distintos regímenes en el sistema de coordenadas (H_b-Q_b) . La Figura 1.3.34 se refiere a una velocidad positiva y la Figura 1.3.35 a una velocidad negativa (rotación inversa) de la máquina.

Los regímenes así descritos se refieren a bombas de velocidad específica baja (bombas centrífugas) que son las utilizadas en conducciones de agua potable.

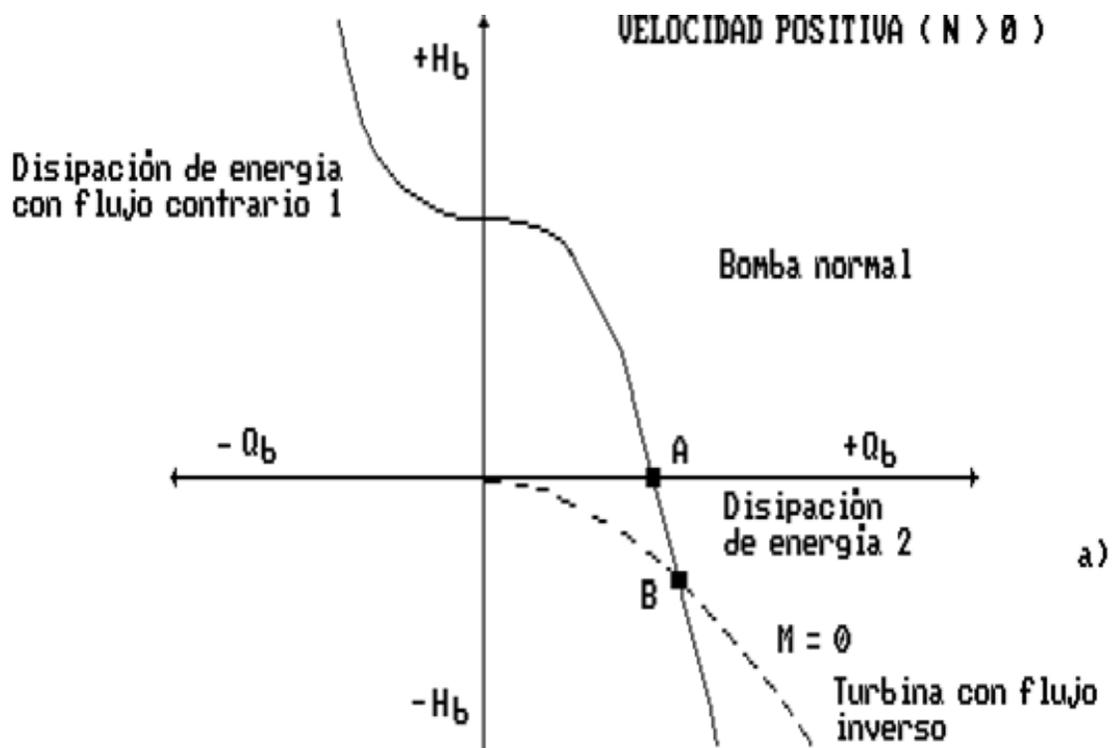


Figura 1.3.34 Curvas características de una bomba con velocidad positiva

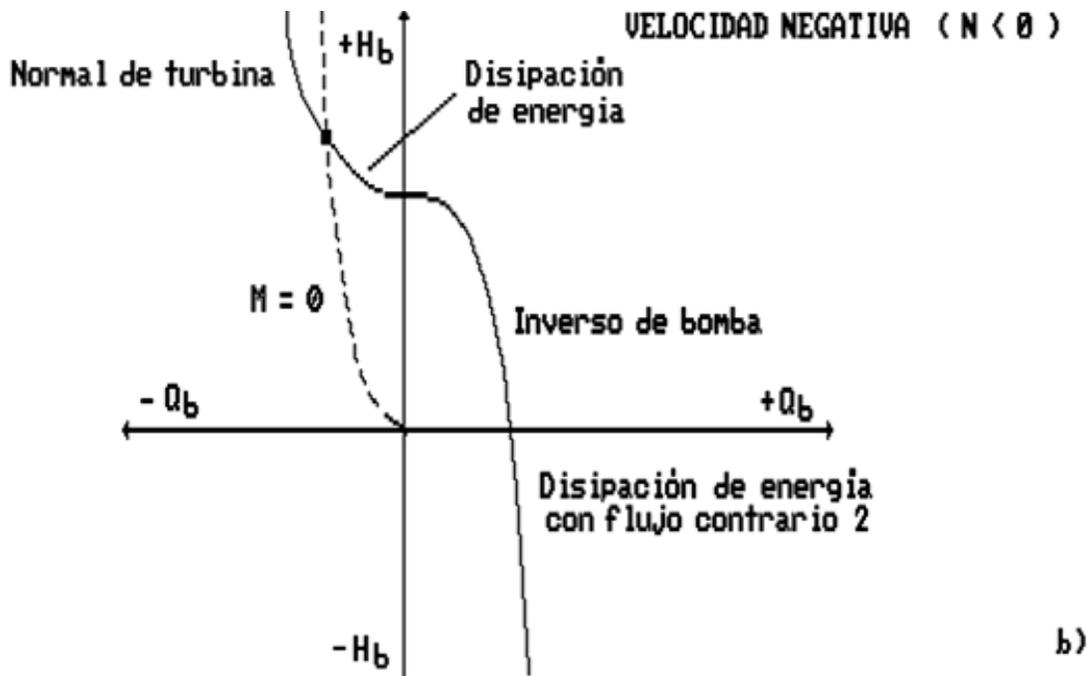


Figura 1.3.35. Curvas características de una bomba con velocidad negativa

3.8.6.4. Transitorios en una conducción por gravedad

Apertura de una válvula al final de la conducción

La lamina 1.3.36-(a) muestra las condiciones iniciales del transitorio. La válvula está cerrada, la velocidad es igual a cero y en la tubería se tiene una 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 inicio de la misma (Figura 1.3.36-(b)) y luego se reflejan en una onda que tiende a restaurar la carga inicial (Figura 1.3.36-(c)). Después del tiempo $t=2L/a$, 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 (Figura 1.3.36-(d)).

La apertura de válvulas en general no genera sobrepresiones. En dependencia de las formas del perfil longitudinal de la tubería y la magnitud de las depresiones, la onda puede causar vacíos y separaciones de la columna de agua en el inicio del transitorio (Figura 1.3.37).

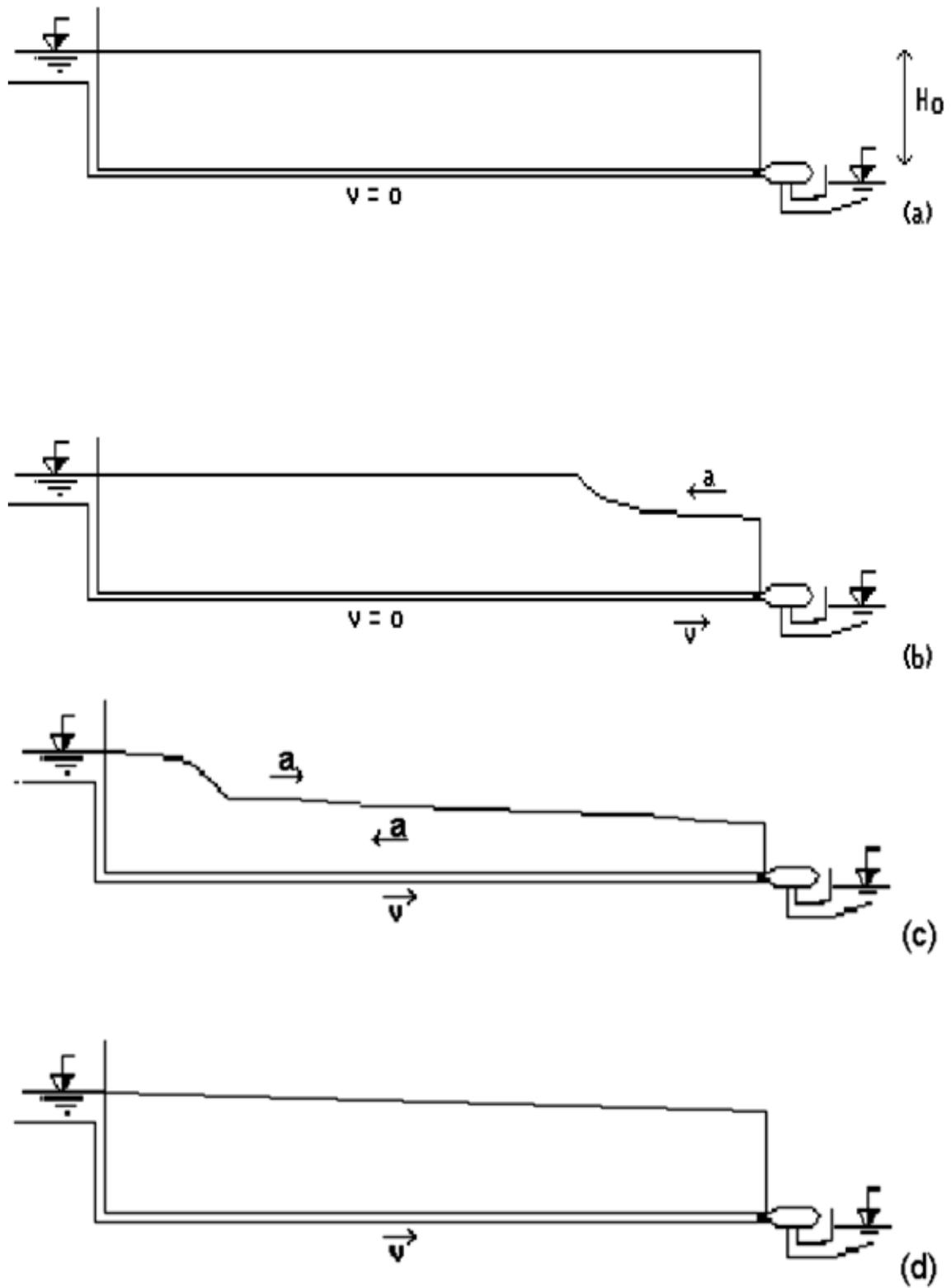


Figura 1.3.37 Transitorio generado por la apertura de una válvula.

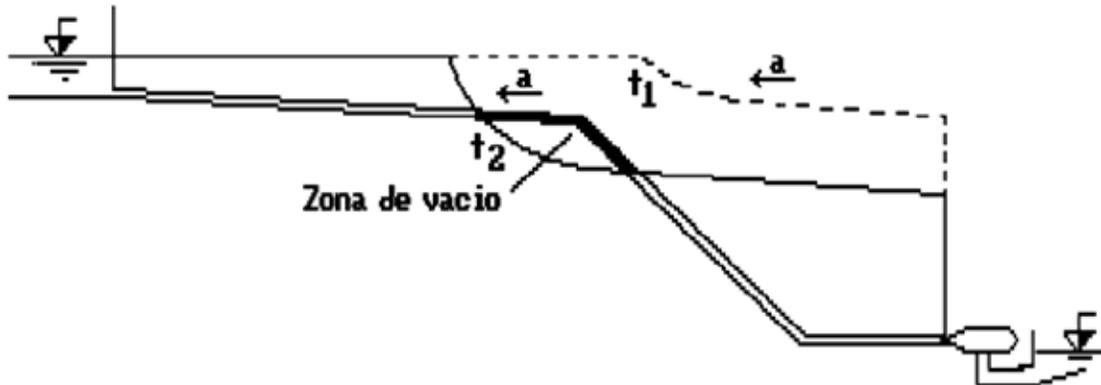


Figura 1.3.37. Generación de vacíos con la apertura de una válvula (continuación)

Cierre de una válvula al final de una conducción

Al iniciarse el cierre en la válvula surgen sobrepresiones, que se propagan al inicio de la tubería (Figura 1.3.38-(a)), se reflejan desde el tanque y después de un tiempo $t = 2L/a$ neutralizan en cierta medida las nuevas sobrepresiones que genera el cierre. En la tubería se establecen cargas hidráulicas más altas que la del tanque (Figura 1.3.38-(b)). Luego del cierre total se alcanza una velocidad cero del flujo en la tubería. A consecuencia de la presión más alta en la tubería surge un flujo hacia el tanque y una onda de depresión (Figura 1.3.38-(c)). Al llegar al final de la tubería esta onda se refleja y provoca subpresiones que se dirigen al tanque (Figura 1.3.38-(d)). El transitorio continúa desarrollándose con sobrepresiones y depresiones periódicas hasta su disipación total.

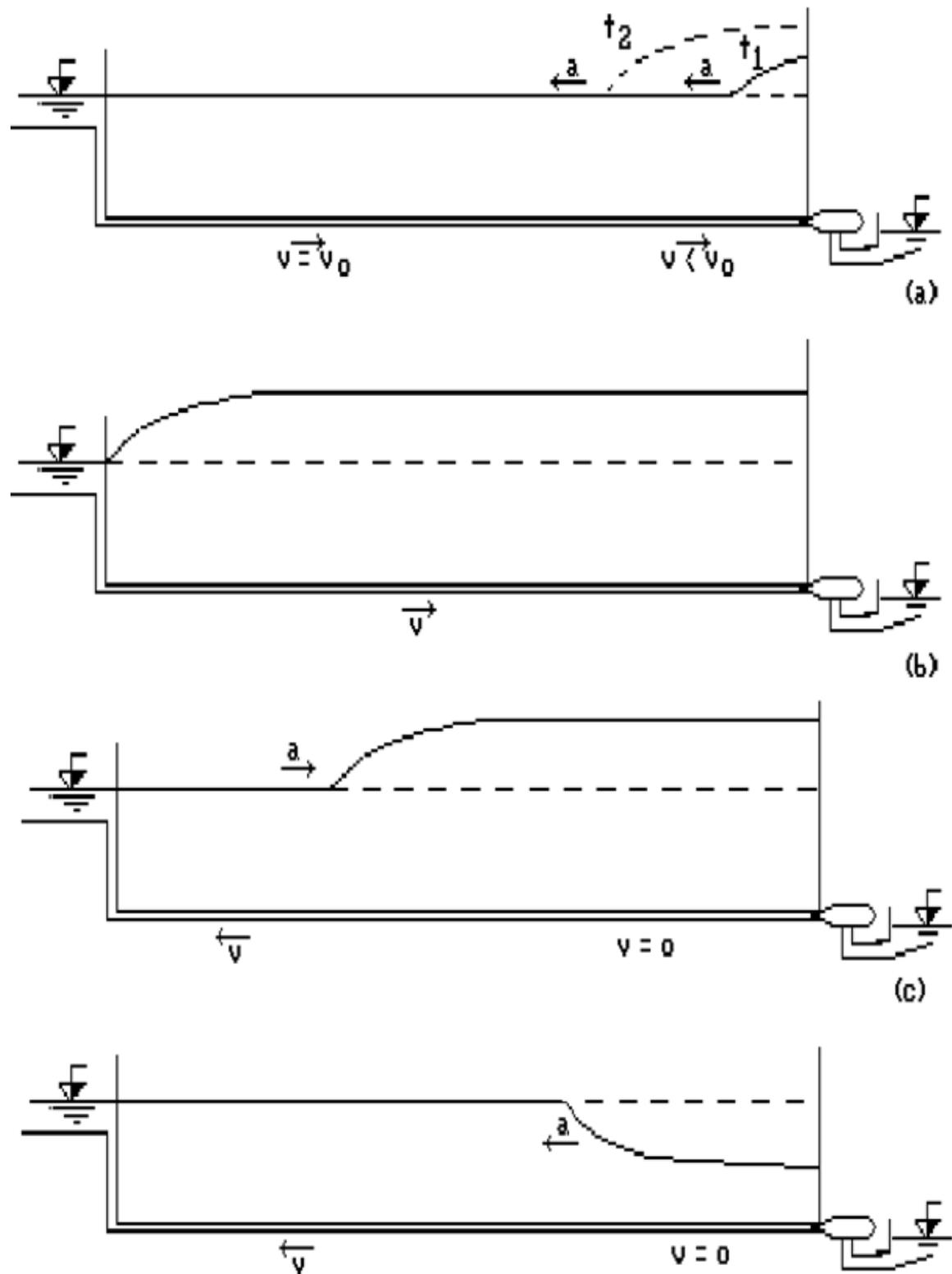


Figura 1.3.38 Transitorio generado por el cierre de una válvula al final de una conducción.

Como 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 Joukowski (1.3.37).

Conclusiones para el caso de apertura o cierre de válvula

1. Las depresiones y sobrepresiones que se producen con la apertura o el cierre de una válvula al final de la conducción dependen del tiempo de cierre y de la longitud de la conducción.
2. Las depresiones y sobrepresiones son tanto mayores cuantos menor es el tiempo de cierre.
3. La sobrepresión (depresión) máxima se obtiene con un golpe directo (con tiempo de cierre/apertura menor que $2L/a$), y se calcula por la fórmula de Joukowski.
4. Ante formas de terreno desfavorables es posible que se produzcan separaciones de la columna, en que caso las sobrepresiones pueden ser mayores que las del golpe directo.

3.9 MEDIOS DE CONTROL DE TRANSITORIOS

3.9.1 Problemas que pueden causar los transitorios

Sobrepresiones: Las altas presiones que se producen como resultado del golpe de ariete pueden superar la resistencia de los diferentes accesorios (válvulas, juntas, etc.) o de la propia tubería hasta provocar su reventamiento o avería.

Depresiones (vacíos y separaciones de la columna líquida): Al presentarse un vacío (presión menor que la atmosférica), dentro de la tubería se tendrá una presión inferior a la que actúa afuera. Para tuberías soterradas, 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 de la tubería. La estabilidad de una tubería frente al colapso depende de la relación entre su diámetro D y el espesor de la pared δ (menor en caso de existir un mayor valor de D/δ).

Al efecto de depresión son más sensibles las conducciones enterradas que, debido al recubrimiento de tierras, han perdido su sección recta circular por ser excesivamente deformables, lo que se traduce en una notable pérdida de resistencia. Sin duda que las tuberías de plástico son más vulnerables en estas condiciones, al tratarse de un material más deformable. Otras tuberías, como por ejemplo las de concreto, soportan bien estas condiciones.

Algunos tipos de tuberías presentan juntas de goma que pueden ser succionadas por el vacío causando fugas de agua en el sistema a pesar de que los tubos queden intactos.

En presencia de vacíos mayores se producen separaciones de la columna líquida. Como se explicó en la sección 3.8.5, el cierre posterior de estas separaciones puede ser acompañado de presiones muy altas.

Fatiga del material: La acción repetida de cargas dinámicas durante un período de tiempo prolongado disminuye la resistencia del material del que está constituida la tubería y sus accesorios, es decir, entra a jugar su papel el fenómeno conocido como falla por fatiga. 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 durante el período de explotación y acorta la vida útil de las diferentes instalaciones y accesorios, o de todo el sistema hidráulico. Al disminuir la frecuencia y la magnitud de los transitorios y asegurar un transitorio más paulatino, puede reducirse al mínimo dicha fatiga.

Sobrevelocidad de las máquinas: Las piezas en rotación de las bombas y de los 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 éstas puedan resistir sin daño alguno hasta una velocidad máxima predeterminada.

Como se explica más adelante en la sección 3.9.3.12, en algunos transitorios las bombas quedan libres de la acción eléctrica y el flujo tiende a acelerarlas hasta el grado máximo posible, es decir, a embalarlas. Es posible que se produzca en estas condiciones una velocidad superior a la máxima permisible y que se dañen las partes en rotación.

3.9.2 Principios generales en la protección contra el golpe de ariete

La fórmula de Joukowski:

$$\Delta H = \frac{a \Delta Q}{A} \quad (1.3.44)$$

y el mecanismo de reducción del golpe de ariete por el reflejo de las ondas de presión (ver sección 3.8.4.) demuestran los principios básicos para reducir las variaciones de la presión, mediante:

1. Aumento de la sección transversal de la tubería A (cambio del diámetro a uno superior). Una solución tal es cara y generalmente se buscan otras soluciones. Puede ser conveniente algunos tramos de pequeña longitud y pequeño diámetro son la causa de un aumento considerable del golpe de ariete.
2. 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. Así por ejemplo, para una tubería de acero a tiene un valor del orden de los 1000 m/s mientras que en tuberías plásticas su valor es de alrededor de 300-400 m/s, es decir, en sistemas de tuberías plásticas ocurre un golpe de ariete de menor valor.
3. 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.
4. Limitación de la longitud de la tubería en la que se desarrolla el golpe de ariete. Para una conducción por gravedad, esto puede lograrse mediante la división de la tubería en varias etapas separadas entre sí por tanques o cajas rompedoras de presión. Para una conducción por bombeo se lograría realizando el bombeo en varias etapas. En los dos casos los transitorios se desarrollan en cada etapa de manera independiente y son menos severos. Hay que tener en cuenta que, por otro lado, la operación en varias etapas es más complicada.
5. Reducción de la variación del gasto ΔQ en la tubería. En los períodos de depresión se suministran gastos complementarios desde afuera para reducir las depresiones. En los períodos de sobrepresión parte del gasto se expulsa al exterior o a un recipiente.

La mayoría de los medios antiarriete 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 los vacíos y las separaciones de columna, entonces las cinco alternativas señaladas pueden presentar también esta función. Si no obstante esto se producen vacíos y separaciones, para eliminarlos tendrán que tomarse medidas especiales.

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 al admitir aire en la tubería se forma una cavidad, 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 antiarriete. La tarea es seleccionar la variante más adecuada. El criterio determinante más frecuente es el económico, es decir, se busca la variante

con un mínimo de costos para la protección, su mantenimiento, gastos complementarios por concepto de energía eléctrica, etc., manteniendo el golpe de ariete dentro de los límites permisibles; pero también puede ser otro como una máxima seguridad (en el caso de obras importantes), etcétera.

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

3.9.3 Dispositivos de control de transitorios

3.9.3.1. Torre de oscilación

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. En su parte superior la torre de oscilación está abierta y se comunica directamente con la atmósfera. En un régimen permanente la cota del nivel de agua es igual a la carga piezométrica en la tubería.

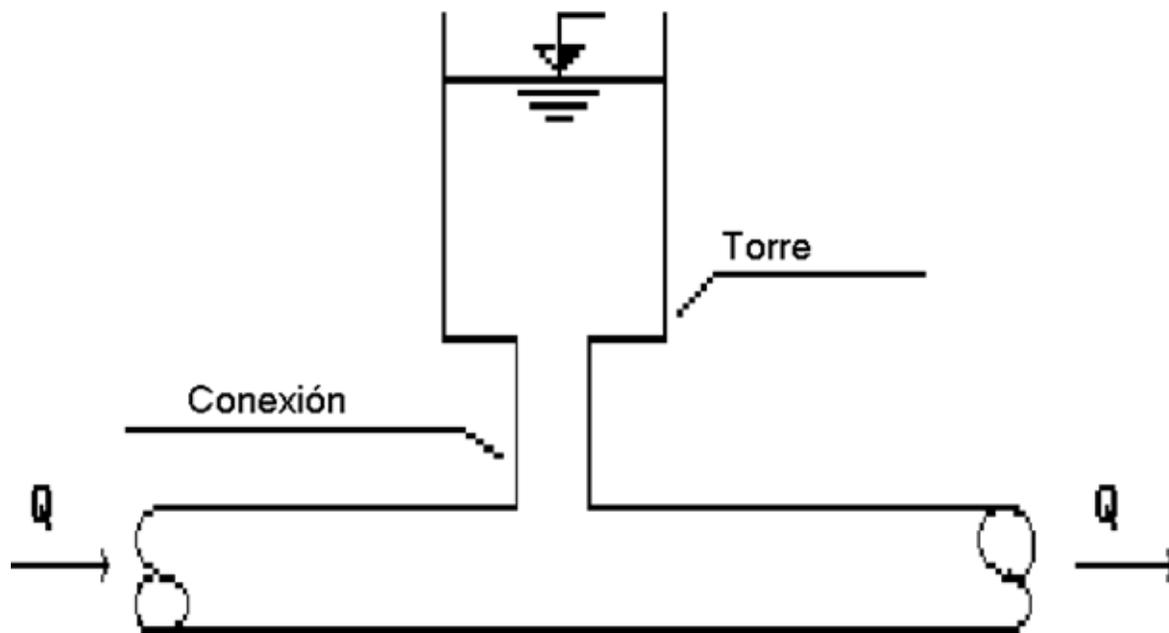


Figura 1.3.40 Torre de oscilación

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. Normalmente para sistemas de agua potable su diámetro es constante. En torres de oscilación para centrales hidroeléctricas por la magnitud del gasto, se pueden construir con diámetro variable. La parte donde suceden las oscilaciones del nivel de agua se construye con un diámetro mayor y se conecta con la tubería por medio de una conexión de diámetro menor (Figura 1.3.40).

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

Las ventajas indudables que presenta la torre de oscilación son:

- La simplicidad de funcionamiento de este dispositivo se ve unida al hecho de que no requiere mantenimiento mecánico alguno.

- No necesita de mecanismo adicional alguno para llenar y reponer el volumen de agua aportado durante el transitorio. Únicamente se debe tener la precaución de dar a la torre una altura suficiente para que no rebose por su parte superior durante el proceso de arranque de la instalación.

- El transitorio generado no se transmite aguas abajo de la torre si ésta se diseña adecuadamente. Por ello el tramo aguas abajo de la misma 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 es derivada de la geometría que debe tener la torre de oscilación. La altura máxima de la torre (cota de coronamiento de la misma) debe ser superior a la altura piezométrica en el punto en que se instale. Además la cota del entronque de la torre con la conducción debe ser inferior a la altura piezométrica para caudal nulo, a fin de evitar que se vacíe de agua durante los períodos de tiempo en que la instalación esté parada. Estas limitaciones condicionan en gran medida la geometría que debe tener la torre así como la obra civil que es necesario realizar para su instalación.

- La segunda de las desventajas es la relativa al comportamiento que tiene la torre durante el transitorio. 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 deceleración e inversión del flujo lleva consigo asociado dos fenómenos. Por un lado pueden generarse velocidades de giro inversas en la bomba bastante importantes en el caso de no disponer de válvula de no retorno. Por otro lado, en el caso de instalarse una válvula de no retorno para evitar velocidades de giro inversas en la máquina, se generan fuertes sobrepresiones al cerrarse ésta. Estas sobrepresiones pueden ser superiores a las que se generan sin la presencia de la torre.

3.9.3.2. 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 que en su parte superior tiene comprimido un volumen de aire (figura 1.3.41-(a)). Durante el trabajo normal en régimen permanente el aire en la cámara está comprimido a una presión igual a la presión del agua dentro de la tubería, no existiendo flujo entre la cámara y la tubería.

Al bajar la presión dentro de la tubería, surge un flujo de 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 de la falla en el suministro eléctrico 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.

Mientras mayor sea el volumen de aire tanto más eficaz resulta la cámara de aire para reducir las depresiones y sobrepresiones. Por otra parte, con un volumen insuficiente de aire la cámara puede provocar incluso presiones más altas que aquellas que pudieran producirse sin medios de control algunos. Es por esto que se hace necesario mantener un volumen de aire constante 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, juntas, etcétera.

El método más usado para restituir el aire perdido es a través de un compresor (Figura 1.3.41-(a)). Otra posibilidad es aislar el agua del aire mediante membranas (Figura 1.3.41-(b)) o balones elásticos especiales (Figura 1.3.41-(c)).

Cuanto mayor sea el gasto que circula de la cámara de aire a la tubería durante los períodos de presión baja en la tubería, tanto menores serán las depresiones, y el peligro de vacío y separaciones. Pero la entrada rápida de un gasto grande a la cámara en los períodos de sobrepresión, puede provocar 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 flujo a ésta, es decir, que se tenga una resistencia hidráulica asimétrica en la conexión de la cámara con la tubería. Un método para realizar esto, es la colocación de una válvula de no retorno con plato perforado, que se cierra en caso de un flujo hacia la cámara. El tamaño de la

perforación se selecciona en dependencia de la magnitud necesaria para las pérdidas. De esta forma para el flujo de salida no hay estrangulamiento alguno, mientras que para el flujo de retorno hay un estrangulamiento controlado por el tamaño del orificio practicado.

La resistencia asimétrica puede lograrse también mediante una tobera, que crea condiciones para un vaciado de la cámara más fácil que para un llenado.

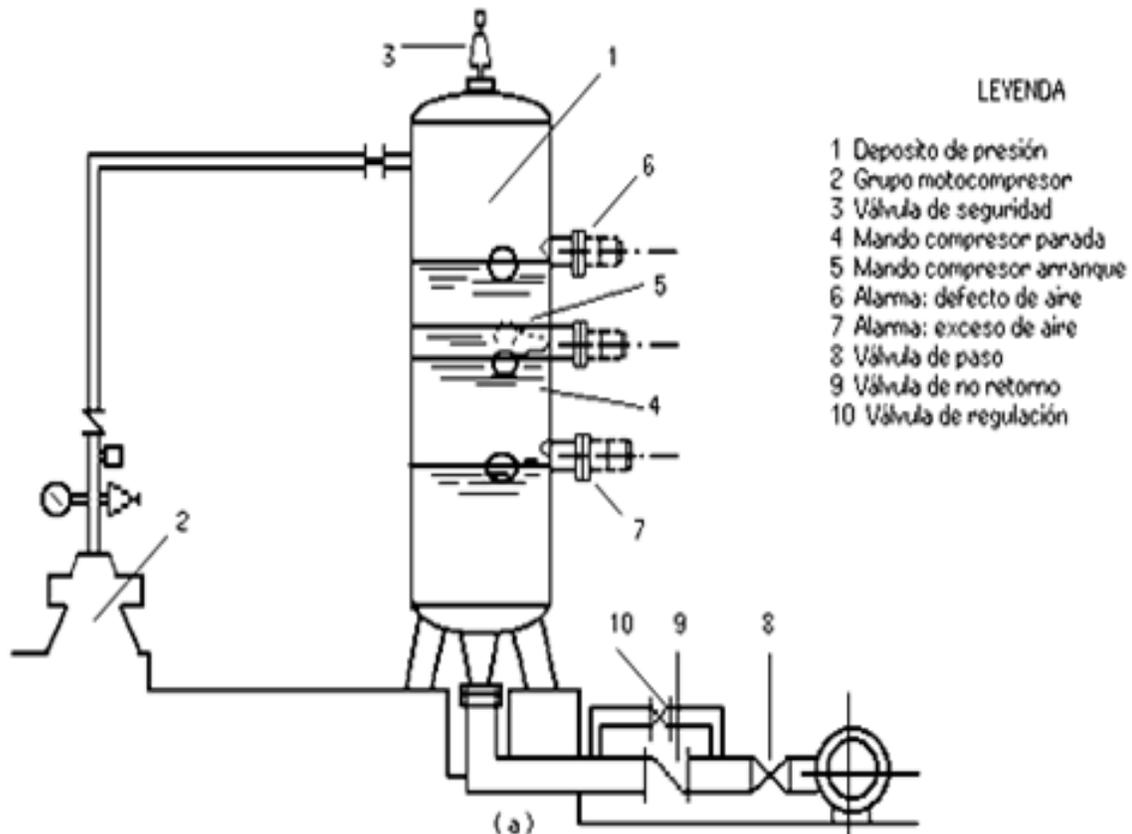


Figura 1.3.41 Tipos de cámara de aire.

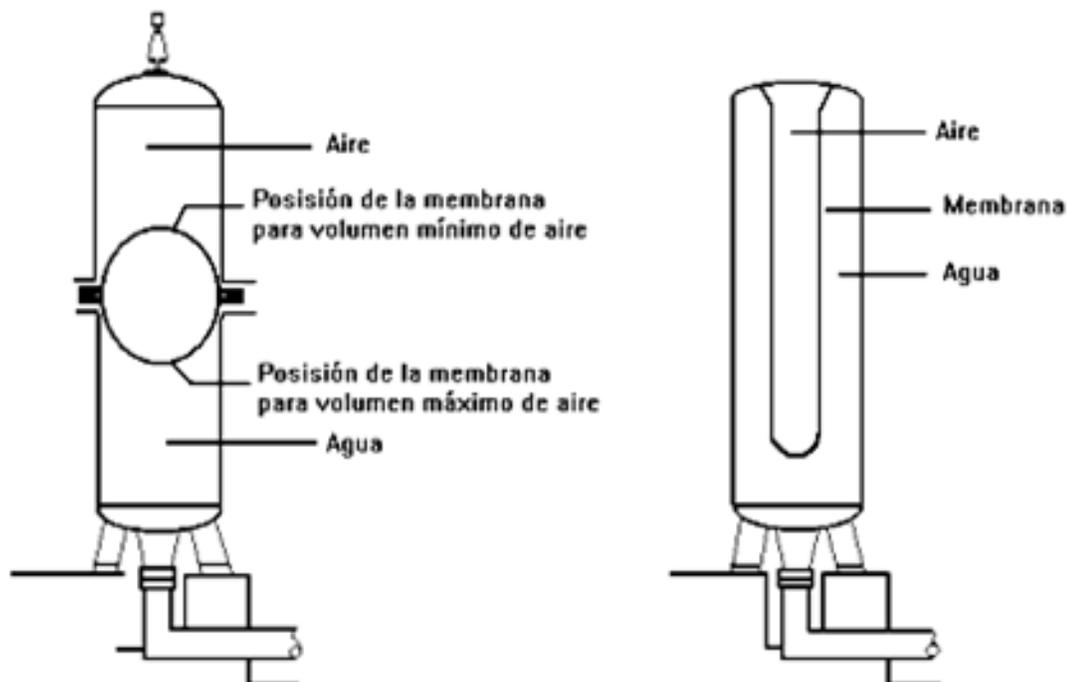


Figura 1.3.41 Tipos de cámara de aire (continuación)

Una tercera posibilidad consiste en la colocación de una válvula de no retorno y un by-pass de diámetro mucho menor y con una válvula de regulación (Figura 1.3.41-(a)) en la conexión de la cámara con la tubería. Esta forma es la más utilizada, ya que la resistencia puede regularse por la válvula de cierre una vez que la instalación está en funcionamiento. Una vez ajustada esta válvula debe bloquearse mecánicamente para evitar que se cambie el valor del coeficiente de pérdidas de forma accidental.

En la práctica se usa también una estrangulación simétrica mediante un diafragma o válvula de regulación. La ventaja de ésta 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 citados dispositivos de protección.

- La independencia de instalación de la cámara de aire, hace que ésta pueda instalarse en la mayoría de las ocasiones cerca de la planta de bombeo. Esta instalación próxima a la planta de bombeo facilita la alimentación del compresor, así como reduce en muchas ocasiones los gastos de mantenimiento del mismo, respecto a la situación en que la cámara de aire estuviese alejada de la planta de bombeo.

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

- La primera desventaja que presenta la cámara de aire, fundamentalmente frente a la torre de oscilación es que si bien reduce la onda de depresión inicial, no la suprime por completo, por lo que en ocasiones puede ser necesario instalar aguas abajo de la cámara de aire otros dispositivos de control secundarios, tales como tanques unidireccionales.

- La desventaja que quizás resulta más decisiva a la hora de rechazar la instalación de una cámara de aire es el costo económico que presenta, principalmente los gastos de mantenimiento que origina. Este gasto de mantenimiento se manifiesta en el compresor que es necesario para mantener el volumen de aire necesario; en las válvulas de no retorno y regulación que se instalan en el estrangulamiento de la cámara de aire, y en general en toda la instalación complementaria que acompaña a la misma.

3.9.3.3. Tanque unidireccional abierto

El tanque unidireccional abierto es un dispositivo que aporta agua a la tubería en los períodos de presión baja del transitorio en puntos altos de tuberías con perfiles sinuosos, con el objetivo de evitar los vacíos y las separaciones de la columna líquida.

El tanque unidireccional es semejante constructivamente a la torre de oscilación, si bien a diferencia de ésta lleva una válvula de no retorno instalada en el entronque 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.

El esquema de funcionamiento de un tanque unidireccional abierto se muestra en la Figura 1.3.42. 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 penetra agua, mediante lo cual se evitan los vacíos y las separaciones. De algún modo complementario se asegura el llenado reiterado del tanque con agua. De esta forma el volumen del tanque se determina sólo por la cantidad de agua necesaria para entregar a la tubería y su altura es mucho menor que aquella existente en una torre de oscilación.

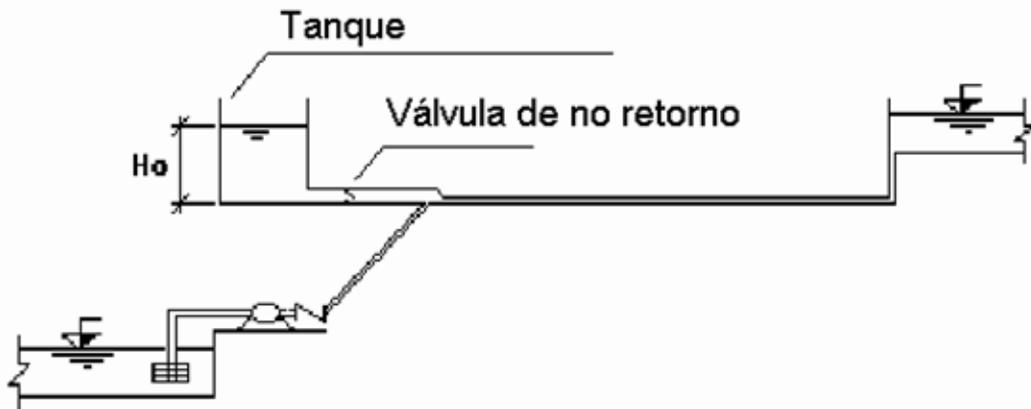


Figura 1.3.42 Esquema de funcionamiento de un tanque unidireccional abierto

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

- En comparación con la torre de oscilación, es que no se induce un flujo invertido de importancia entre el tanque y las bombas. Obviamente el cierre de las válvulas de no retorno en las bombas originará en la conducción sobrepresiones inferiores a las que se originarían con una torre de oscilación.

- La flexibilidad que puede tener la geometría del tanque. En este sentido, al contrario de lo que ocurría con la torre de oscilación, la cota superior del tanque se encuentra siempre por debajo de la altura piezométrica en régimen permanente en el punto donde éste se encuentra instalado. Esta flexibilidad de instalación del tanque hace que éste sea especialmente adecuado para perfiles topográficos irregulares, que requerirían de grandes torres de oscilación para su protección.

Los problemas del tanque unidireccional son:

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

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

3.9.3.4. Tanque unidireccional cerrado

El tanque unidireccional cerrado tiene la misma finalidad que el abierto. Su esquema de funcionamiento viene dado en la Figura 1.3.43. Consiste de un depósito cerrado, en cuya parte superior se colocan válvulas de admisión y expulsión de aire.

En presencia de presiones en la tubería mayores que Δz (Figura 1.3.43) 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 hacia la tubería, penetra aire a través de las válvulas y el nivel del agua dentro del tanque baja.

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

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

El tanque unidireccional cerrado ha tenido aplicación en países de Europa. En México por el momento no se ha empleado. Sus ventajas ante el tanque unidireccional abierto consisten en su sencillez y bajo costo. No se requiere de válvulas de no retorno y de dispositivos de llenado, que son mecanismos propensos de fallas si no tienen un mantenimiento adecuado.

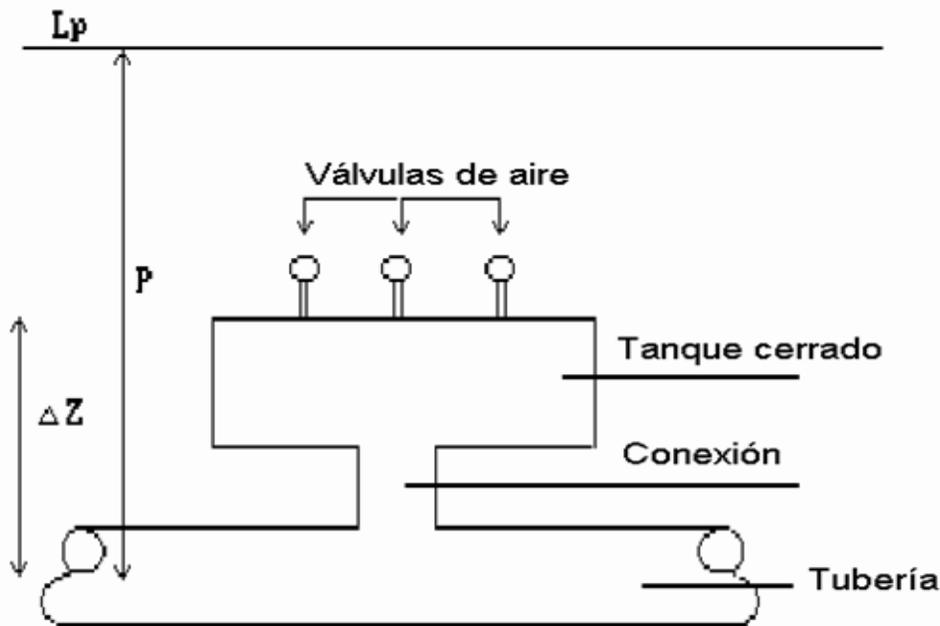


Figura 1.3.43 Esquema de un tanque unidireccional cerrado

3.9.3.5. Válvulas de no retorno

Por sí sola, la válvula de no retorno no es un medio antiarriete, y sirve para hacer posible el flujo en un solo sentido. En las válvulas de no retorno reales no obstante se produce en general un cierto flujo de retorno, o flujo inverso, antes de sobrevenir el cierre. Esto es así porque el obturador de la válvula se moverá en este sentido para efectuar el cierre, lo cual permitirá dicho flujo inverso. 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 vista a estas características se presentan las siguientes directrices cualitativas para escoger la válvula de no retorno más conveniente en cuanto a los transitorios:

- a) Baja inercia de las partes móviles.
- b) Recorrido corto en válvulas deslizantes, o bien relación distancia-ángulo pequeña en las basculantes.
- c) Resorte de asistencia al cierre de la válvula.

Generalmente, después de las bombas se colocan válvulas de no retorno para evitar el vaciado de las tuberías. Como medio antiarriete las válvulas de no retorno pueden colocarse también en el trazado de la tubería de modo tal que detengan el flujo invertido y las sobrepresiones; así la tubería se divide en "zonas" con transitorios independientes. El efecto dependerá de la forma del terreno. Así por ejemplo, la colocación de válvulas de no retorno intermedias en la tubería de la Figura 1.3.44-(a), no tendrá un gran efecto, debido a que la sobrepresión se produciría después de la válvula con la misma magnitud que en la planta de bombeo sin válvula de no retorno intermedia.

En el caso de la Figura 1.3.44-(b), 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 aquí tiene sentido, ya que en la planta de bombeo están presentes las cargas estáticas máximas 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 posibilidades para admitir sobrepresiones.

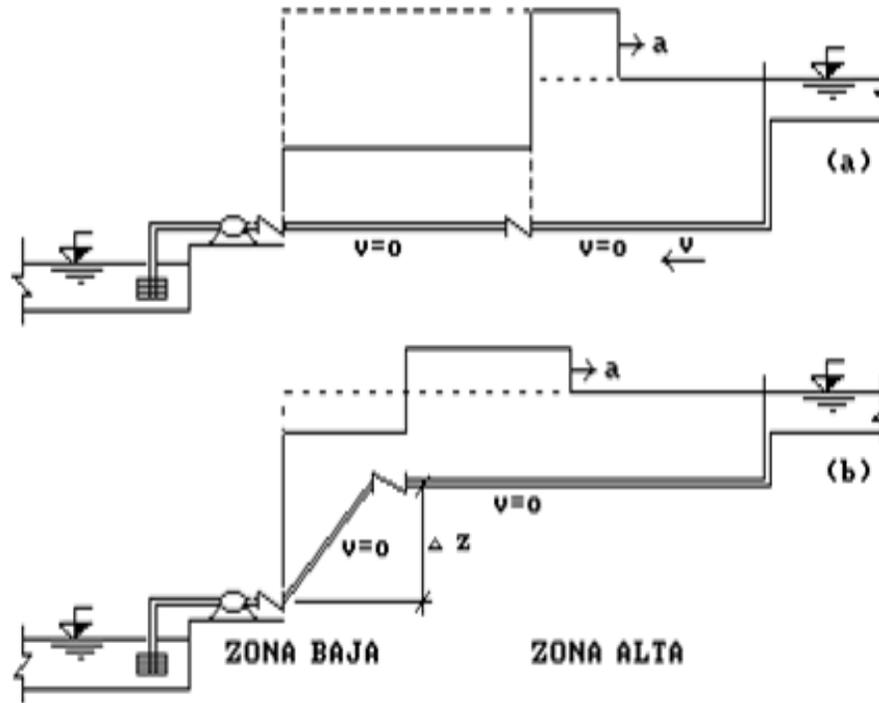


Figura 1.3.44 Efecto de la ubicación de una válvula de no retorno intermedia en una tubería

Para limitar las sobrepresiones, aguas abajo de la válvula de no retorno (considerado por el sentido normal de circulación) puede colocarse una válvula de alivio (Figura 1.3.45-(a)). En caso de que se produzca un vacío antes de la válvula, en el mismo lugar se coloca una válvula de aire (Figura 1.3.45-(b)).

Es posible también la colocación al mismo tiempo de una válvula de aire, y una válvula de alivio después de la válvula de no retorno (Figura 1.3.45-(c)). Las mismas funciones puede ejecutar un by-pass (Figura 1.3.45-(d)) o la perforación de un orificio en el plato de la válvula.

En los dos últimos métodos se produce una interconexión de las "zonas" de la tubería antes y después de la válvula. Posterior al cierre de la válvula circulará cierto gasto a través del by-pass u orificio aguas abajo donde la presión es menor. Este gasto juega un papel amortiguador en cuanto a las sobrepresiones aguas arriba de la válvula, y protector en cuanto a los vacíos aguas abajo.

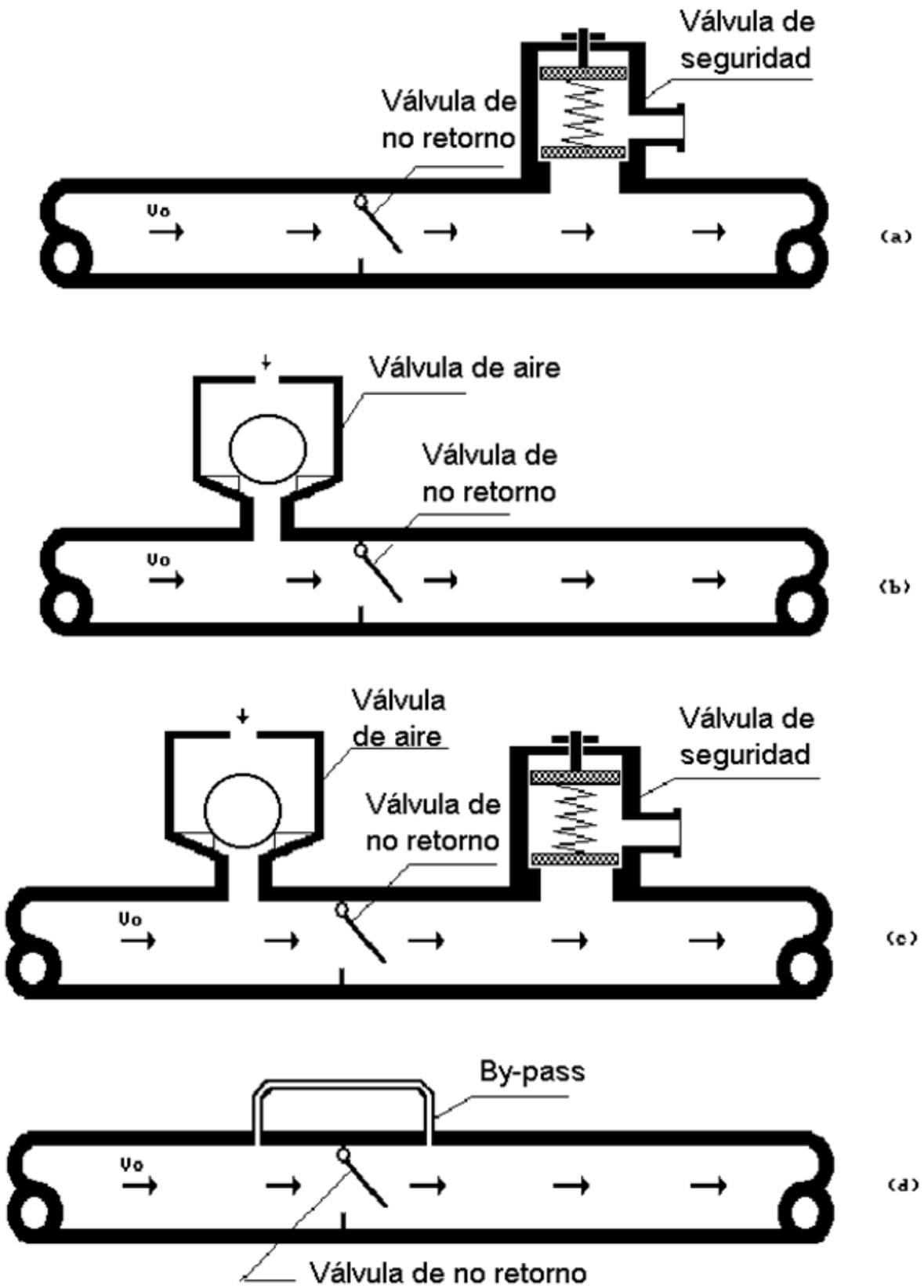


Figura 1.3.45 Diferentes combinaciones de una válvula de no retorno intermedia con otros medios de control

Las válvulas de no retorno intermedias no tienen efecto en la fase de depresión del transitorio generado por el paro de una bomba, ya que ésta se da con velocidades positivas del agua. De esta manera, si en el transitorio se originan separaciones de la columna las válvulas de no retorno intermedias no conseguirán proteger la tubería.

Por otra parte, las perturbaciones que se generan con el cierre de las válvulas de no retorno intermedias, cada una con su correspondiente flujo inverso, pueden combinarse y alcanzar unos picos altos de la presión.

Otra consideración a hacer es que si las válvulas se encuentran en puntos de la tubería de difícil acceso, es muy 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. Todas estas razones se consideran suficientes para no recomendar en cualquier caso este tipo de protección.

De no disponer de las características dinámicas de las válvulas de no retorno, en los métodos de modelación matemática se asume que el cierre es instantáneo, es decir que la válvula es ideal. En este sentido se recomienda cierta precaución en sistemas con válvulas de no retorno no adecuadas, ya que las sobrepresiones que éstas producen pueden ser superiores a lo que da el modelo.

Existen también otros tipos de válvulas de no retorno, en las cuales con el auxilio de un sistema de palancas y un amortiguador de aceite se asegura un cierre lento. Válvulas de este tipo pueden instalarse con las bombas en vez de válvulas de no retorno corrientes con el objetivo de permitir ciertos gastos en el sentido inverso y de esta forma disminuir las sobrepresiones (ver sección 3.9.3.12).

3.9.3.6. Válvulas de alivio (de seguridad)

Las válvulas de alivio son dispositivos que se abren al excederse una presión determinada descargando un gasto, limitando de esta forma la sobrepresión.

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

En la Figura 1.3.46 se ilustra una válvula de alivio de resorte que es uno de los tipos más sencillos. Por medio de un vástago y un plato el resorte mantiene tapado al orificio. Si la fuerza que actúa sobre el plato sobrepasa la fuerza ejercida por el resorte, el plato se levanta y a través del orificio se descarga un cierto gasto directamente al exterior o hacia un recipiente. Al disminuir la presión dentro de la tubería, bajo la acción del resorte la válvula se cierra. La válvula se ajusta para abrir normalmente cuando la presión en la conducción alcanza un valor entre 10 y 20% superior a la presión del régimen permanente.

Los problemas que presenta este tipo de válvula de alivio son, por un lado el golpeteo de la válvula y por otro la posibilidad de generar un nuevo transitorio en la conducción cuando la válvula cierra.

El golpeteo de la válvula consiste en que la válvula va abriendo y cerrando continuamente, produciéndose 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, etcétera.

El golpeteo se puede evitar utilizando válvulas de alivio con dispositivos que permiten que éstas 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 solventar utilizando válvulas que dispongan de algún tipo de mecanismo de control para el cierre.

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

El funcionamiento hidráulico de la válvula de alivio se presenta mediante su curva característica la que muestra el gasto que ésta descarga para diferentes presiones estáticas. En la Figura 1.3.47 se presenta un ejemplo de este tipo de curva.

En su primera parte, hasta el punto A, la curva característica es poco empinada 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 simple descarga de orificio, donde las leyes de la hidráulica indican una relación cuadrática entre la presión que actúa p y el gasto que se descarga Q , o sea:

$$Q = C \sqrt{p} \quad (1.3.45)$$

donde C es una constante. Entonces, a falta de datos experimentales sobre la curva característica posterior al punto A, para la misma puede asumirse la parábola representada por la fórmula (1.3.45), la cual pasa a través del inicio del sistema de coordenadas y por el punto A.

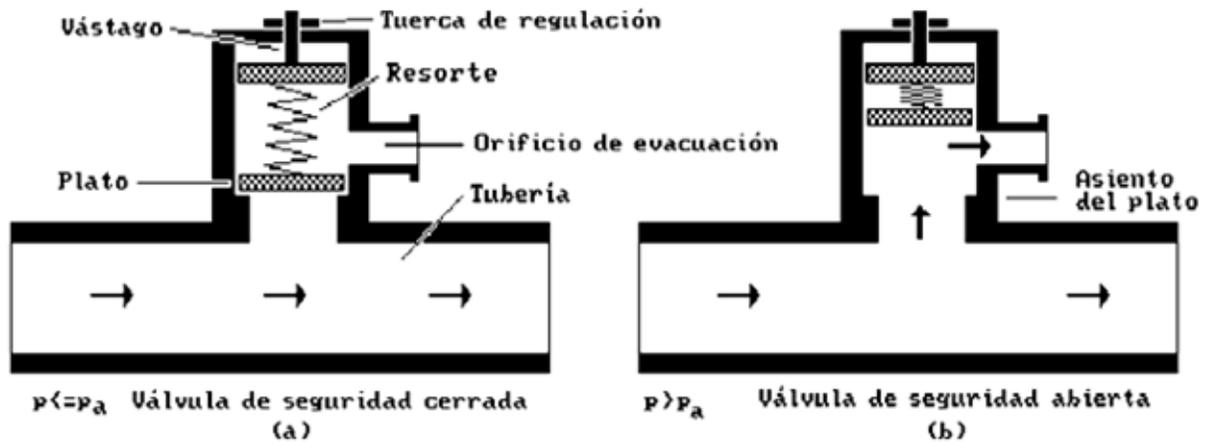


Figura 1.3.46 Esquema de funcionamiento de una válvula de alivio de resorte.

Mediante la tensión del resorte puede variarse la presión p ante la cual se abre la válvula.

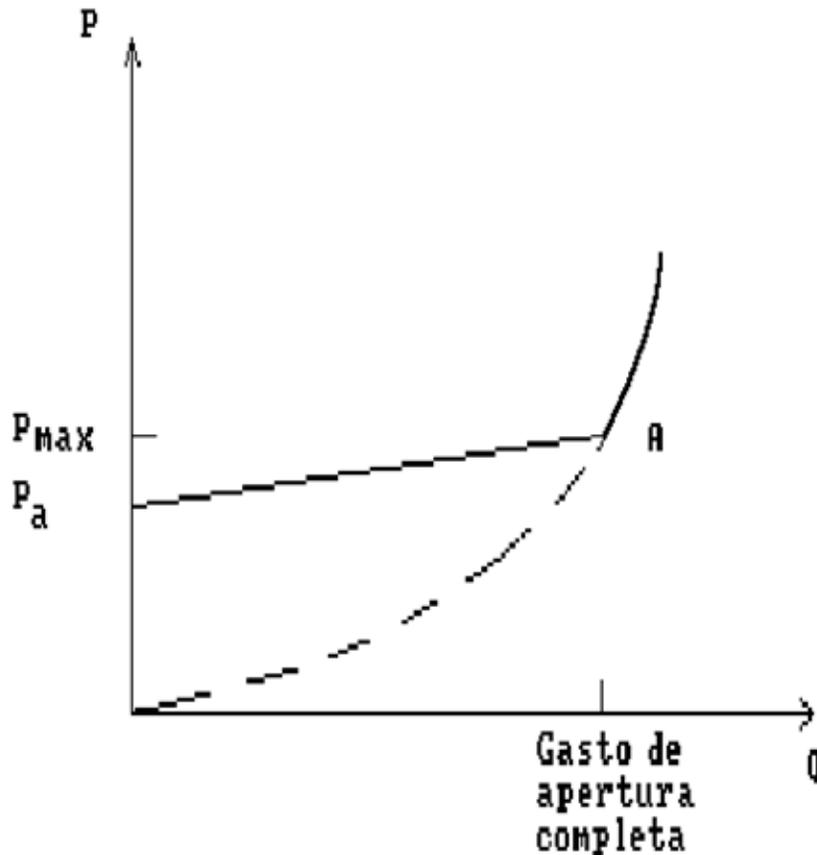


Figura 1.3.47 Curva característica de una válvula de alivio.

A cada presión de apertura le corresponde una curva característica del tipo mostrado en la Figura 1.3.47. Se debe señalar que estas curvas características responden a presiones estáticas, es decir, puede ocurrir el caso en que la válvula no reaccione bien para transitorios de altas frecuencias debido a su inercia.

3.9.3.7. Válvulas anticipadoras del golpe de ariete

Las válvulas anticipadoras se utilizan sólo en sistemas en que el transitorio comienza con depresiones, como es el caso de un paro accidental de bombas. Una vez abierta, la válvula anticipadora de manera automática se cierra lentamente de modo que en la siguiente fase de sobrepresión se encuentre abierta y descargue ciertos gastos aliviando las sobrepresiones.

Existen diversos tipos de válvulas anticipadoras en cuanto a construcción se refiere. La descripción de las mismas puede encontrarse en los catálogos de los fabricantes.

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

3.9.3.8. Válvulas de admisión y expulsión de aire

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

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

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

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

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

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

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

- Gran capacidad de expulsión de aire, para que éste salga rápidamente cuando se llena la conducción.

- Rápida capacidad de admisión de aire, para que éste entre rápidamente en la conducción cuando se está procediendo el vaciado de la misma.

- Baja capacidad de expulsión durante el funcionamiento normal de la conducción, para expulsar el aire que se libera del agua en los puntos altos.

Por 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 colapse de forma brusca, ya que esto generaría un transitorio de bastante importancia.

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

3.9.3.9. Válvula de admisión y retención de aire

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

En una conducción, las válvulas de admisión y retención de aire tienen lugar solamente como medio de control de transitorios. Para los efectos del vaciado y llenado de la línea pueden ser más bien no deseables. Se pueden usar cuando el trazo de la conducción pasa por un terreno sinuoso y se ubican en los puntos altos, donde puede generarse volúmenes de aire suficientemente grandes. En todo caso se

necesita una simulación con un modelo matemático para determinar su número y correcta ubicación.

Una vez amortiguado el transitorio hay que evacuar el aire atrapado. Una posibilidad de hacerlo es usar 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.

3.9.3.10. Membranas protectoras o fusibles

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 entre sostenedores especiales y posterior a una válvula de cierre abierta constantemente. 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 antiariete, se recomienda su colocación junto con los restantes medios antiariete como una protección adicional. Las membranas deben colocarse cerca de la planta de bombeo o en otros lugares peligrosos de la tubería donde se debe asegurar la evacuación del agua.

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

3.9.3.11. Adición de un volante de inercia al árbol del equipo de bombeo

Como demuestra el análisis de la sección 3.8.6, mientras más lenta sea el paro de los equipos de bombeo, tanto menor es el golpe de ariete. 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 rotantes del equipo de bombeo se expresa a través de su momento volante GD^2 :

$$I = \frac{GD^2}{4g} \quad (1.3.46)$$

donde:

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

La denominación GD^2 (G - peso (Gewicht en alemán), D - diámetro) indica que el momento volante es proporcional al peso y al cuadrado del diámetro de las partes rotantes. Debido a esto serán más efectivos los volantes que presentan diámetros mayores.

En la literatura americana 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:

$$GD^2 = 4WR^2 \quad (1.3.47)$$

En la Figura 1.3.48 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.

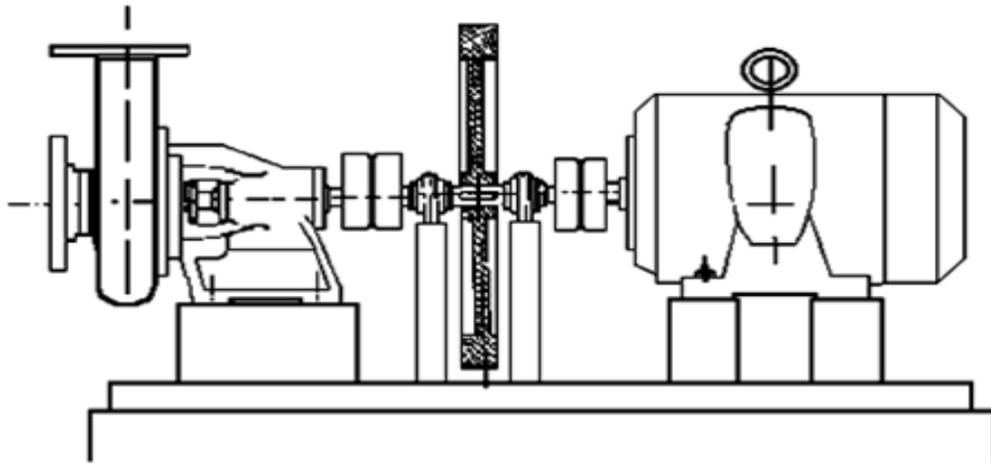


Figura 1.3.48 Equipo de bombeo con volante de inercia.

La protección antiarriete mediante un volante puede utilizarse en tuberías cortas, donde se puede lograr un aumento considerable del tiempo de paro de las bombas en comparación con la fase del golpe $2L/a$. En tuberías largas se hacen necesarios volantes muy grandes, cuya colocación puede resultar antieconómica.

El peso del volante aumenta la fuerza de fricción en los apoyos del árbol y con esto disminuye la eficiencia del equipo de bombeo. De igual modo aumenta el tiempo para alcanzar las revoluciones nominales al arrancar las bombas, y la potencia necesaria del motor para el arranque.

Probablemente por las causas anteriores, los volantes de inercia no han tenido un gran uso. A pesar de todo, con dimensiones aceptables del volante, este medio antiarriete no debe descartarse, debido a su sencillez y funcionamiento seguro sin necesidad de ningún mantenimiento.

3.9.3.12. Descarga inversa de agua en las bombas

Al usar este medio de control, después de invertirse el flujo de agua en la conducción se admite pasar ciertos caudales en sentido inverso en las bombas, reduciendo de esta forma las sobrepresiones que se generan por la detención del flujo invertido.

En su forma más sencilla, la descarga inversa podría lograrse mediante una simple eliminación de las válvulas de no retorno de las bombas (Figura 1.3.49-(a)). En ese caso se tiene una descarga inversa no restringida.

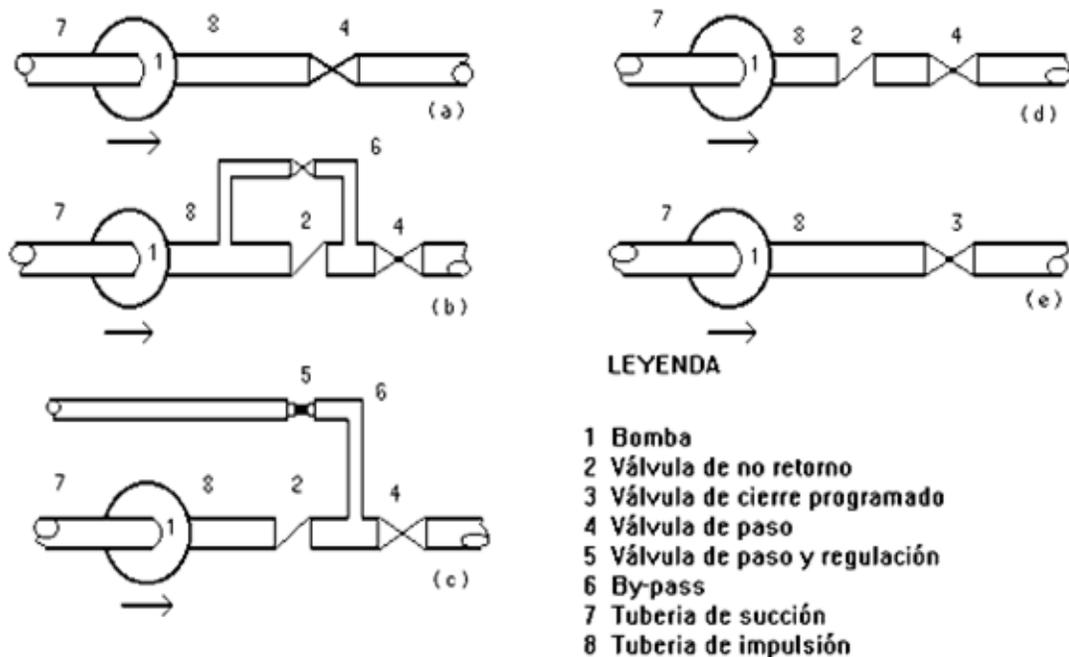


Figura 1.3.49 Diferentes forma de realización de una descarga inversa de agua en bombeos.

El arranque siguiente de las bombas después de una descarga inversa no restringida tendrá que producirse contra 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.

El flujo en sentido inverso puede generar una rotación de las bombas en sentido contrario. 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 se establezca un nuevo estado permanente con flujo y velocidad constantes (ver sección 3.8.6.3.).

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

La rotación invertida se debe evitar, o al menos limitar, por dos razones principales:

1.- No todos motores eléctricos y bombas 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 éste 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. Por esta razón el máximo giro contrario al sentido de marcha normal debe ser acotado por el fabricante del motor y de la bomba.

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. Esto se observa en las curvas características de la bomba en los cuatro cuadrantes (ver 3.8.6.3.3). Como un resultado, con una mayor velocidad invertida de la bomba se producen mayores sobrepresiones en la tubería.

Son posibles dos formas de restringir la rotación invertida:

1.- Impedir la inversión de la rotación por medio de frenos mecánicos especiales. El flujo invertido pasará a través de la bomba con el impelente inmóvil. El gasto y la cantidad de agua descargada inversamente de esta forma serán en general grandes.

2.- Reducir el flujo invertido, 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 (Figura 1.3.49-(e)), que comienzan a cerrarse en el momento de la desconexión de la energía eléctrica. El cierre debe producirse con una suficiente lentitud para controlar las sobrepresiones, pero no demasiado lento para limitar la rotación invertida y el volumen de agua que retrocede. Esta forma se aplica ante todo en tuberías de diámetro grande y costo importante.

Una alternativa de esta forma es usar válvulas de no retorno de cierre lento en vez de válvulas de cierre (Figura 1.3.49-(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; al mismo tiempo son más costosas.

Otra solución consiste en una válvula de no retorno y by-pass alrededor de la válvula (Figura 1.3.49-(b)) o alrededor de la válvula y la bomba (Figura 1.3.49-(c)). La capacidad de conducción del by-pass 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 by-pass se coloca una válvula de cierre, a través de la cual puede regularse su capacidad de conducción, la cual se cierra automáticamente después de la disipación del transitorio.

3.9.3.13. Instalación de un by-pass en la planta de bombeo

El by-pass puede ser de utilidad en las plantas en que el grupo motor-bomba dispone de cierto nivel de presión en la succión (Figura 1.3.50). Al producirse el paro de las bombas, la presión comienza a descender aguas abajo de la válvula de no retorno colocada a la salida de las bombas. Si la presión llega a caer por debajo del nivel de agua en el depósito, del cual se alimentan las bombas, entonces a través del by-pass se produce un flujo desde el depósito de succión hacia la conducción principal sin pasar por las bombas. Este aporte de caudal realiza una función de control similar a la que haría un tanque unidireccional instalado en dicho punto. En definitiva, se consigue evitar que las depresiones en el tramo inicial aguas abajo de la planta lleguen a ser de importancia. Por otra parte, es importante la presencia de la válvula de no retorno en el by-pass, que impide la descarga de la bomba hacia el propio depósito, evitando pues que la máquina funcione en circuito cerrado.



Figura 1.3.50 By-pass en una planta de bombeo.

El problema que se presenta en este tipo de instalaciones viene derivado del hecho de que hay que asegurar de alguna forma que la válvula de no retorno del by-pass, que puede haber estado una larga temporada sin funcionar, se abra en el instante adecuado; por ejemplo suponiendo que la válvula no abra hasta que entre el depósito de succión y el punto aguas abajo de las bombas haya una diferencia de presiones determinada, a fin de garantizar que esta diferencia de presiones va a ser capaz de abrir la válvula de no retorno. Por otra parte, el mantenimiento de la válvula de no retorno del by-pass, en este tipo de instalaciones, se vuelve un hecho de suma importancia.

3.9.4 Resumen de los medios de control

La Tabla 1.3.4 resume los medios de control más importantes y las condiciones de su uso [10, 11]. Las variables de este cuadro tienen el siguiente significado:

GD^2	- momento de inercia de las partes rotantes (ton.m ²)
n	- velocidad de rotación nominal, en RPM
γ	- el peso volumétrico del agua (ton/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_o	- la carga en la operación normal (m)
h	- carga de presión en la tubería en el lugar del medio de control
L	- longitud de la tubería
g	- la aceleración de la gravedad
a	- velocidad de la onda de presión (m/s)

Según la Tabla 1.3.4, la condición de uso de un medio de control se define en la mayoría de los casos por el valor de la magnitud $aV_o/(gH_o)$ o $aV_o/(gh)$. Este valor expresa la proporción entre la depresión máxima por la fórmula de Joukowski (1.3.40) y la presión de operación normal en el punto. Un valor muy superior a uno significa que existe una gran probabilidad de que produzca una separación de columna y viceversa.

Las recomendaciones de la Tabla 1.3.4 deben de tomarse como una aproximación inicial al medio de control a emplear. Son posibles situaciones donde estas recomendaciones no son válidas. Los procedimientos de diseño que se presentan en el subcapítulo 2.7 la parte II de este tema indican la manera de seleccionar y dimensionar en cada caso el medio de control adecuado.

Tabla 1.3.4 Dispositivos de control de transitorios

Método de protección	Finalidad	Condiciones	Observaciones
Volante de inercia	Hacer menos brusco el paro de las bombas	$\frac{GD^2 n^2}{\gamma ALH_0^2} > 0.04$	
By-pass en las válvulas de no retorno de las bombas	Limitar sobrepresiones	$\frac{aV_0}{gH_0} \gg 1$	-Cierta volumen de agua se descarga en sentido inverso.
Válvulas de no retorno en línea	Limitar sobrepresiones	$\frac{aV_0}{gh} > 1$	-Es posible la separación de la columna. -Normalmente se usa con otros medios.
Válvulas de aire	Protegen puntos altos de las depresiones.	-Conductos de perfil irregular.	-Importante que funcionen correctamente. -Exigen un mantenimiento. -Necesidad de adecuada caracterización.
Torre de oscilación	Limitar sobrepresiones y depresiones	<i>h pequeño</i> -Tuberías de escasa pendiente. -Perfil uniforme o convexo.	-La tubería debe estar cerca de la línea piezométrica para que la altura sea aceptable.
Válvula de alivio automática	Limitar sobrepresiones	$\frac{aV_0}{gH_0} \gg 1$ -Rápida apertura y cierre lento. -Elevada altura de bombeo H_0 .	-Exigen mantenimiento. -El perfil de la tubería debe ser cóncavo. -Es posible la separación de la columna.
Tanque unidireccional	Limitar depresiones en puntos altos.	$\frac{aV_0}{gh} > 1$ -Perfil convexo.	-Requiere de dispositivo de llenado.
By-pass en la planta de bombeo	Limitar depresiones cerca de la planta.	$\frac{aV_0}{gH_0} \ll 1$ 1-Perfil tubería cóncavo.	-Exige un nivel en la toma más alto que las bombas.
By-pass en válvulas de no retorno intermedias	Paliar las limitaciones de válvulas de no retorno intermedias.	$\frac{aV_0}{gh} \ll 1$	
Cámara de aire	Limitar sobrepresiones y depresiones.	$\frac{aV_0}{gH_0} > 1$ -Más eficaz en perfiles cóncavos.	-Muy importante las condiciones de entrada/salida. -Eficaz pero con elevado costo. -Exige mantenimiento.

3.10 PROTECCION DE LAS CONDUCCIONES

3.10.1 Protección contra sismo

La necesidad de llevar agua de fuentes distantes para abastecer grandes núcleos de población, requiere entre otros de sistemas subterráneos de conducción de agua que cruzan grandes extensiones geográficas; advirtiéndose por esta razón importante riesgo sísmico y geotécnico del sistema. En este capítulo hacemos hincapié en la obligación del proyectista en cuanto a la aplicación de métodos analíticos para evaluar la respuesta a la propagación de ondas sísmicas y los niveles de riesgo sísmico de las conducciones.

No siendo por otra parte adecuado incorporar un manual de diseño sísmico dentro del presente manual de agua potable, se recomienda al proyectista consulte manuales o bibliografía especializada vigente, ya sea nacional o internacional, algunos de éstos se anuncian en la relación que se anexa a continuación. Asimismo y considerando la magnitud e importancia del acueducto, de igual forma que en el diseño de edificios, el análisis sísmico deberá realizarse por profesionales con experiencia en la materia.

- Finite element modeling of seismic wave propagation effects on straight buried segmented pipelines / Vanguel H. Vassilev, Raúl Flores B., 1995
- Earthquake-proof design of buried segmented pipelines / Kuliota LTD, 1981
- Criteria of earthquake-proof measures for a cutter supply system / Japan Water Works Association / Keizaiuro Kubo
- Estudio de vulnerabilidad a los sismos de la conducción del Sistema Cutzamala / UNAM Roberto Gómez M.

El desplazamiento relativo entre placas tectónicas de la corteza terrestre cuando se vencen las fuerzas friccionantes que lo impiden, así como la actividad volcánica son las fuentes principales que originan sismos (referencias 12 y 13). Las manifestaciones dinámicas de estos dependen de diferentes factores siendo los más importantes:

- a) La energía liberada por desplazamientos entre placas tectónicas
- b) Distancia que viajan las ondas sísmicas
- c) Profundidad del epicentro
- d) Características y condiciones dinámicas del suelo que trasmite las ondas sísmicas.
- e) Interacción suelo estructura

Los efectos del sismo en las conducciones, se basan en la generación de esfuerzos y desplazamientos instantáneos que varían con el tipo de suelo, la rigidez o flexibilidad de la estructura y la profundidad a que se encuentra ésta.

Si la tubería se encuentra en el "campo cercano" (Figura 1.3.51) definido por la distancia entre el punto de ubicación y el epicentro, se tiene una transmisión directa de las ondas sísmicas a la estructura; dominando en este caso las longitudinales P y las de cortante S.

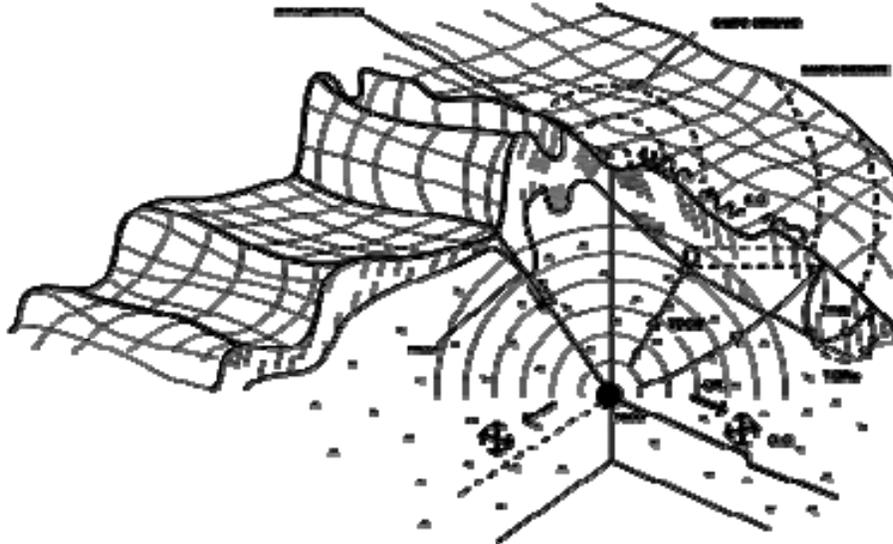


Figura 1.3.51 Transmisión de ondas sísmicas

En caso de que la tubería se ubique en el "campo distante" se tendrá mayor complejidad de los movimientos sísmicos, acorde a la predominante presencia de ondas reflejadas y refractadas, así como las superficiales R.

Cabe hacer notar que en suelos blandos pueden amplificarse los movimientos sísmicos, encontrándose factores de amplificación de la aceleración máxima registrada en este tipo de suelos de 4 y 5 veces la registrada en suelos firmes.

Las deformaciones inducidas por el sismo en la conducción son de dos tipos, deformación "axial ondulante" y de "corte u ovalamiento" (Figura 1.3.52)

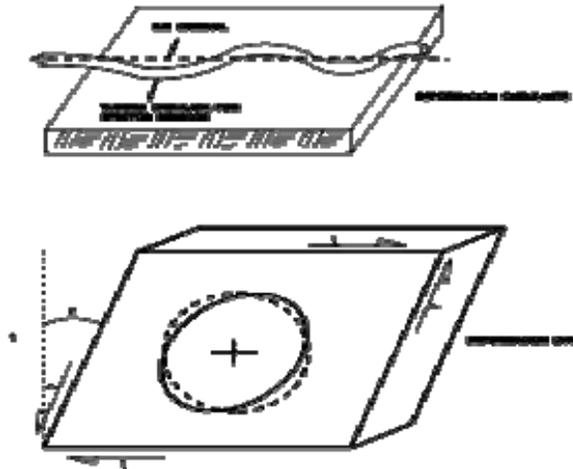


Figura 1.3.52 Deformaciones por efectos sísmicos

La ondulación es producida por la propagación de ondas sísmicas en dirección paralela u oblicua a la conducción. El ovalamiento es producido por ondas de corte que se propagan perpendicularmente al eje de la estructura. El comportamiento estructural de la conducción es función de la rigidez relativa de ésta respecto al suelo que desplaza.

Los daños sísmicos en las conducciones pueden ser muy grandes, por lo que es importante identificar los potenciales riesgos de falla que un movimiento sísmico induce (Figura 1.3.53), fundamentalmente a partir de: propagación del tren de ondas sísmicas a través del suelo que aloja a la tubería y movimientos permanentes del suelo, manifestándose estos últimos como desplazamiento relativo entre planos, así como licuación y densificación en suelos granulares.

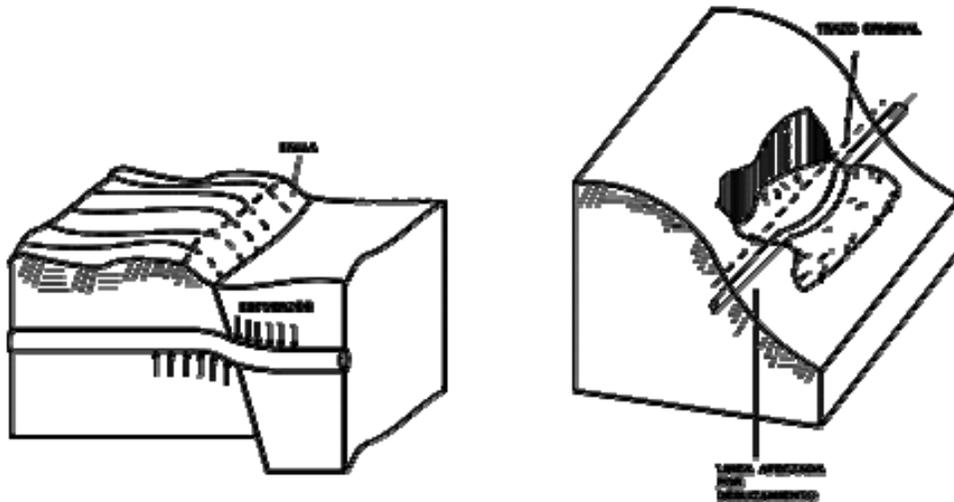


Figura 1.3.53 Potenciales riesgo de falla

3.10.2 Protección contra la corrosión

Los daños por corrosión en conducciones son cuantiosos tanto por el daño a tramos de tuberías como por la pérdida de agua y el costo político y social que reviste. Razón por la cual, se advierte la responsabilidad del proyectista en la consideración de protección anticorrosiva en el diseño de conducciones.

No siendo adecuado involucrar el diseño de protección anticorrosiva en este manual, sugerimos al usuario consulte manuales o bibliografía especializada vigente, a continuación se citan algunos aspectos teóricos elementales de corrosión en conducciones.

3.10.2.1. Principios básicos de la corrosión

Los metales en la naturaleza, son en general encontrados en forma de compuestos estables tales como óxidos, sulfuros, carbonatos. Los metales puros como el hierro y el acero de las tuberías se obtienen a partir de tales compuestos aplicando una considerable cantidad de energía, esta energía requerida está relacionada directamente con la estabilidad del compuesto que los origina.

La presencia del oxígeno y el agua en el medio ambiente genera en la mayoría de los casos sistemas metal/medio termodinámicamente inestables, por esta razón, todos los metales expuestos pueden cambiar al estado más estable bajo las condiciones prevalecientes.

Dicha reversión es generada por un proceso electroquímico ya que presenta reacciones químicas y flujo de corriente eléctrica directa y es conocido en todo el mundo como corrosión (referencias 14 y 15), la cual provoca deterioro y pérdida de resistencia mecánica en los metales bajo la acción del medio ambiente.

Existen varias formas de corrosión las cuales serán clasificadas posteriormente. No obstante, en todas ellas tiene lugar una transferencia de electrones que se produce entre metales de naturaleza diferente, así como, entre distintas zonas del mismo material. El material o zona que cede electrones se conoce como ánodo, mientras que cuando aceptan se les llama cátodo.

En el ánodo se desarrolla una reacción de oxidación con solubilidad del hierro (ecuación 1.3.48).



Para que se produzca lo anterior debe ocurrir una reacción de reducción en el oxígeno disuelto en el agua (ecuación 1.3.49) o en el ion hidrógeno a gas (ecuación 1.3.50), en forma simultánea.





3.10.2.2. Clasificación de los procesos de corrosión

Los procesos de corrosión pueden clasificarse acorde al medio en que se desarrollan o considerando su morfología.

Tabla 1.3.5 Clasificación acorde al medio corrosivo

Corrosión Electroquímica	Corrosión Química
Atmosférica, en suelos	En interfase metal gas
En soluciones electrolíticas	En no electrolitos
En medios ionizados fundidos	

Tabla 1.3.6 Clasificación acorde a la forma

Corrosión Uniforme	En placas por picado intergranular fisurante en rendijas
Corrosión no uniforme	
Corrosión localizada	

En las tuberías de acueductos, la corrosión puede clasificarse en interna, influida por las características del agua transportada y medioambiental o externa que depende de las condiciones atmosféricas.

Corrosión interna: en las tuberías de acero, la corrosión de la superficie interna es causada principalmente por un proceso galvánico (Figura 1.3.54). La magnitud de la corrosión depende de la corrosividad del agua transportada y se manifiesta por la formación de tubérculos de hidróxido férrico, que reducen la capacidad interior de la tubería, fenómeno conocido como tuberculación. La persistencia del mismo puede generar daños importantes en las conducciones.

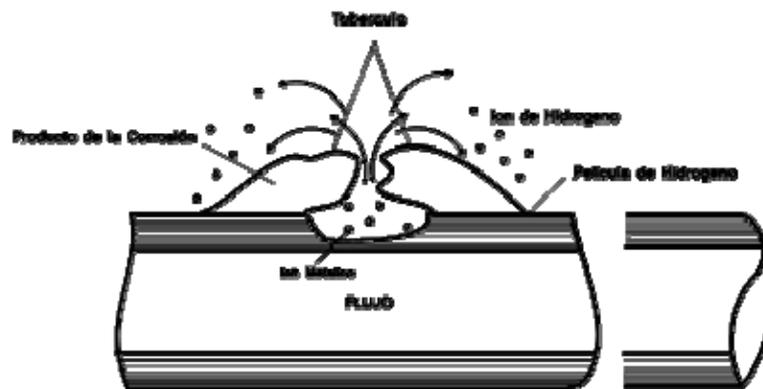


Figura 1.3.54 Corrosión interna

Corrosión medioambiental: La corrosión por exposición externa de las tuberías metálicas a la atmósfera en la mayoría de los casos es insignificante, exceptuando la generada en zonas industriales o costeras donde puede ser de consideración.

En las tuberías de concreto presforzado adquiere gran importancia la corrosión medioambiental, ya que penetra en el mortero o concreto de revestimiento y deteriora las armaduras de acero de presfuerzo (referencia 16), por la acción corrosiva de componentes del aire o del suelo.

3.10.2.3. Control de la corrosión

La generación de corrosión en un medio acuoso requiere que se produzcan las reacciones de oxidación y reducción antes mencionadas, de manera que si interferimos estratégicamente en cualquiera de estas reacciones podríamos tener control sobre el proceso de corrosión.

Como puede observarse la naturaleza del proceso de corrosión en tuberías subterráneas o subacuáticas es electroquímico y sugiere los siguientes tres métodos básicos de protección y control de la corrosión.

Por recubrimientos: Estos pueden ser metálicos o químicos, los cuales impiden la comunicación eléctrica entre tuberías y accesorios y aíslan del agua o suelo a la conducción.

Protección catódica: Impone una corriente eléctrica directa que contrarresta las corrientes asociadas con corrosión. De manera tal que la tubería actúa como cátodo y como la corrosión se desarrolla en un ánodo de sacrificio en circuito con ésta, se garantiza la protección anticorrosiva. La protección catódica puede obtenerse por técnica galvánica o por corrientes impresas.

Por inhibición: Un inhibidor es una sustancia que retarda las reacciones electroquímicas del proceso corrosivo. La inhibición se realiza por adsorción o deposición de iones en la superficie de la tubería. Los productos químicos más frecuentemente utilizados en este tipo de protección anticorrosiva son: los cromatos, fosfatos, nitratos, silicatos y tungstatos, la aplicación de los inhibidores puede ser por vertido al medio ambiente o en forma directa en la superficie metálica.

SEGUNDA PARTE: PROCEDIMIENTOS Y GUIAS DE DISEÑO

1 DATOS BASICOS

1.1 DATOS GENERALES

Los datos generales a recabar en una línea de conducción, son entre otros, la localización de las fuentes de abastecimiento y las descargas, el clima, los medios de comunicación al lugar, servicios de energía eléctrica, y usos del agua.

1.2 INFORMACION DE LA FUENTE DE ABASTECIMIENTO

Es importante conocer los gastos que pueden proporcionar las fuentes de abastecimiento, sus niveles del agua y el tipo de fuente ya que de ello depende el tipo de conducción (bombeo o gravedad) y número de bombas que pueden colocarse. Por ejemplo, si son pozos profundos, una sola bomba puede instalarse, en cada pozo.

1.3 DATOS DE PROYECTO

Los datos del proyecto necesarios para el diseño de una línea de conducción son: la estadística de la población, las dotaciones, el período del proyecto, la curva de demandas, la topografía y el estudio del suelo del lugar.

La forma de obtener esta información se contempla en el tema de *Datos Básicos* que pertenece a la serie de este manual.

1.4 COSTOS DE CONSTRUCCION Y OPERACION

Es necesario también, conocer los costos de la construcción y la operación del sistema, a fin de poder efectuar el análisis económico.

Los costos pueden ser de obra, por indemnización, y por operación y mantenimiento.

2 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

2.1 ESQUEMA DE LA CONDUCCION

El esquema de la conducción se refiere a la forma como serán conectados los tubos, las fuentes de abastecimiento y los tanques de entrega de la conducción, sin dar detalles de trazo y dimensionamiento de los tubos. Un ejemplo se observa en la Figura 2.2.1.

El esquema de la conducción se obtiene una vez localizados las fuentes de abastecimiento y los tanques de regularización donde serán las entregas del agua de la conducción.

2.2 PROYECCION DE LA POBLACION

Con base en la estadística de la población, se aplica un método para obtener la proyección de la población correspondiente al período de diseño. Dicho estudio es importante para determinar los consumos de la población en el tiempo, las etapas de construcción, equipamiento y los volúmenes anuales requeridos para abastecer de agua a la población en cada una de las etapas.

Dicho estudio se obtiene utilizando los métodos indicados en el tema de *Datos Básicos* de la serie de este manual.

2.3 VARIACION DE LA DEMANDA

La variación de la demanda es un dato que proporciona la curva de demandas de la población. Con ella se modela el funcionamiento hidráulico y se diseña la red de distribución, obteniendo en cada tanque, los volúmenes de agua que demanda la población en la red de distribución del sistema de agua potable.

2.4 GASTO DE DISEÑO

2.4.1 Un solo tanque

Según se explica en la referencia 17 la conducción puede presentar una o varias entregas de agua a un solo tanque de regulación, ver Figura 2.2.1. El gasto de las entregas, para el caso de un sistema de agua potable con un solo tanque, se calcula con:

$$\sum_{j=1}^n N_j Q_j = 24 Q_{md} \quad (2.2.1)$$

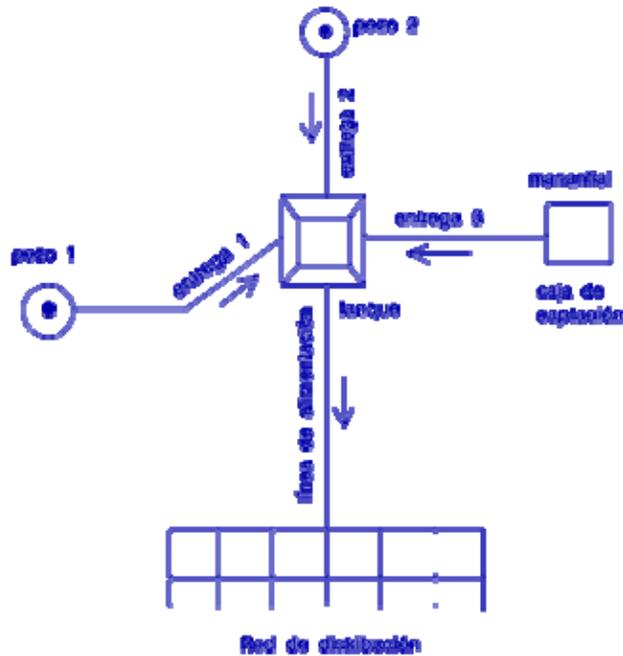


Figura 2.2.1 Un tanque de regulación con varias entradas

donde:

n es el número de entregas de agua en el tanque.

N_j es el tiempo en horas que funciona una entrega.

Q_j es el gasto de una entrega.

Q_{md} es el gasto máximo diario.

Los valores de Q_{md} y Q_j deben darse en las mismas unidades.

Si existe una sola entrega de agua, de la Ecuación 2.2.1 se obtiene

$$Q = Q_{md} \frac{24}{\text{numero de horas de bombeo}} \quad (2.2.2)$$

y cuando el tiempo de funcionamiento de cada una de las entregas es igual a 24 horas, los gastos de entrega se calculan con

$$\sum_{j=1}^n Q_j = Q_{md} \quad (2.2.3)$$

Cuando existen varias entregas, con las Ecuaciones 2.2.1 ó 2.2.3 se pueden obtener varias soluciones para el gasto Q_j de cada entrega. No obstante, cuando las entregas corresponden a fuentes de abastecimiento diferentes, se puede reducir el número de soluciones al apoyarse en los gastos que pueden proporcionar las fuentes.

Por ejemplo, aplicando la Ecuación 2.2.1 en el caso de la Figura 2.2.1 se tienen 3 gastos de entrega desconocidos, sin embargo, tomando en cuenta los estudios de aforo de las fuentes, se tiene que el gasto del pozo 1 es igual al gasto del pozo 2 y que el gasto del pozo 1 es igual a 5 veces el gasto del manantial. De esta manera se puede obtener una solución determinada.

Para el caso de una red de conducción, la Ecuación 2.2.1 ó 2.2.3 se resuelve considerando los gastos que pueden proporcionar las fuentes de abastecimiento y las ecuaciones de continuidad en los nodos de la red de conducción.

En el caso de conducciones con derivaciones a varios sistemas independientes con un solo tanque, como el que se muestra en la Figura 2.2.2, se aplica la Ecuación 2.2.1 o 2.2.2 en forma independiente en cada uno de los tanques utilizando el Q_{md} correspondiente al poblado.

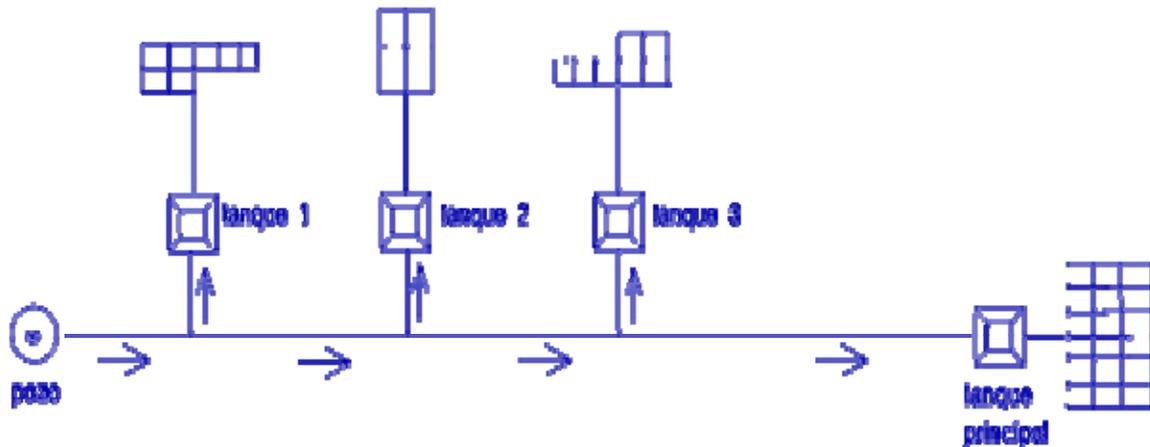


Figura 2.2.2 Red de conducción con derivaciones a sistemas de agua potable independientes

2.4.2 Varios tanques

2.4.2.1. Condiciones previas

Para obtener el gasto de diseño de la conducción, cuyas entregas sean directas a varios tanques (Figura 2.2.3), se indica a continuación, de acuerdo a la referencia 17, el procedimiento a seguir y las condiciones que son necesarias cumplir en cada paso.

1. Se efectúa la revisión o el dimensionamiento de la red de distribución para el gasto máximo horario.

Los tanques deben suministrar agua a la red. Si alguno de ellos no cumple con la condición, es necesario cambiar la ubicación o subir la elevación de dicho tanque, repitiendo el proceso de revisión o diseño de la red de distribución hasta que la condición se cumpla.

El funcionamiento de la red debe satisfacer los rangos aceptables de velocidad, gradientes de energía y de presión.

2. Si existe conectado a la red algún tanque de regulación en el cual no hay entrega de agua de la conducción, como el tanque 3 que se muestra en la figura II.2.3, es decir, tanques que se conectan únicamente a la red de distribución, enseguida es necesario efectuar la revisión de la red de distribución para la mínima demanda, debiéndose cumplir las siguientes condiciones:

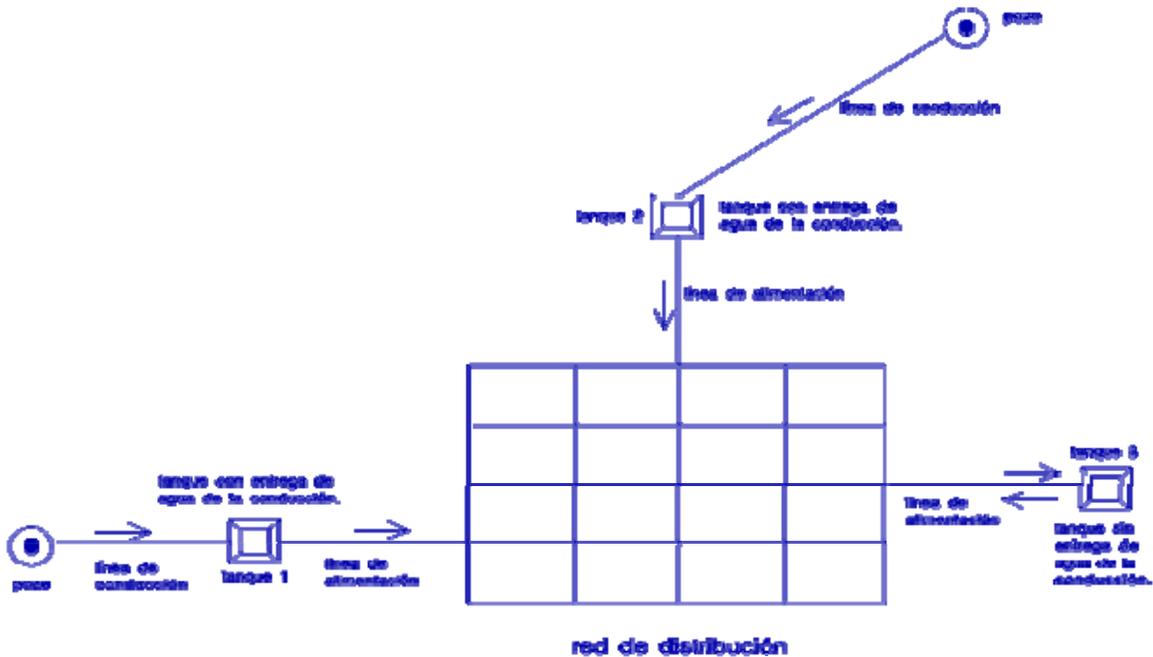


Figura 2.2.3 Sistema de agua potable con abastecimiento directo a varios tanques de regulación. El tanque 3 no recibe ninguna descarga de la línea de conducción

El sentido del gasto en la línea de alimentación en cada uno de estos tanques de este tipo debe ser de la red hacia el tanque. Si la condición no se cumple en algún tanque, se deberá cambiar la ubicación o bajar la elevación de dicho tanque, repitiendo de nuevo el proceso desde el paso número 1 hasta llegar a cumplir esta condición.

En los tanques de regulación donde exista alguna entrega de agua de la conducción se debe cuidar o preferir que la red de distribución no aporte agua hacia el tanque.

3. Se efectúan las revisiones de la red de distribución para el resto de demandas. Se pueden hacer, por ejemplo, para cada hora.

Con los resultados de las revisiones se encuentran en cada línea de alimentación de los tanques, los gastos de entrada o de salida de cada tanque.

Se calcula el volumen de entrada y de salida de cada tanque. Estos volúmenes se obtienen multiplicando cada gasto por el tiempo de permanencia y, posteriormente, sumando estos productos.

En los tanques donde no existe alguna entrega de agua de la conducción (como el tanque 3 de la Figura .2.3), se debe cumplir que el volumen de agua de salida del tanque debe ser igual o ligeramente menor al volumen de entrada. Si en algún tanque no se cumple esta condición, es necesario cambiar la ubicación o elevación de dicho tanque, o cambiar algunos diámetros de tubos, repitiendo de nuevo el proceso desde el paso número 1 hasta que se cumpla esta condición.

Si el volumen de agua de salida del tanque es mayor al volumen de entrada, se puede bajar la elevación de dicho tanque.

Cuando el volumen de agua de salida del tanque es mucho menor al volumen de entrada, se puede subir la elevación de dicho tanque. Sin embargo, si este tanque es existente se debe repetir el paso número 3 considerando que no hay flujo de agua de la red hacia el tanque cuando éste ya se ha llenado.

En los tanques con alguna entrega de agua de la conducción, el volumen de entrada al tanque debe ser menor al volumen de salida. Cuando en algún tanque ocurra lo contrario, entonces ese tanque no requiere de gastos de la conducción, en todo caso lo que se necesita es, ya sea cambiar la ubicación o subir la elevación de dicho tanque, o bajar la de los que no presentan ese problema. En este caso es necesario empezar de nuevo el procedimiento desde el paso número 1.

Una forma de evitar que se presenten aportaciones de agua de la red de distribución hacia tanques donde existe alguna entrega de la conducción, es ubicar a todos los tanques a un mismo nivel. Si esto no es posible, se pueden colocar válvulas de no retorno en las líneas de alimentación de los tanques donde existe alguna entrega de agua de la conducción y cuyos niveles se ubican más abajo.

Las simulaciones hidráulicas horarias pueden efectuarse corriendo repetidas veces un programa de flujo permanente como son el AH, ENEXPLIC, VARIOMAT y otros similares, calculando manualmente los datos para cada simulación como son las demandas horarias y las alturas del agua en los elementos de frontera: pozos profundos, tanques atmosféricos, etc. El programa AH se contiene en el tema de *Redes de Distribución* que pertenece a la serie de este Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Los programas ENEXPLIC y VARIOMAT pueden solicitarse a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa.

Existen programas que pueden efectuar tanto las simulaciones horarias como también obtener las demandas y alturas del agua de los elementos de frontera que se presentan en dichas simulaciones horarias, tal es el caso del programa AHPE (Análisis Hidráulico de Períodos Extendidos) que se contiene en el tema de *Redes de Distribución* que pertenece a la serie de este Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.

2.4.2.2. Gasto de diseño

Una vez cumplidas las condiciones previas anteriormente señaladas, enseguida se procede a obtener el gasto de diseño en cada una de las entregas.

En los tanques donde existe alguna entrega de agua de la conducción, los gastos de entrega se calculan con:

$$\sum_{j=1}^n N_j Q_j = (\text{volumen de salida}) - (\text{volumen de entrada}) \quad (2.2.4)$$

donde:

n es el número de entregas en el tanque.

N_j es el tiempo de funcionamiento de una entrega.

Q_j es el gasto de entrega.

Cuando el tiempo de funcionamiento de cada una de las entrega es igual a 24 horas, de la Ecuación 2.2.4 se tiene:

$$\sum_{j=1}^n Q_j = \frac{(\text{Volumen de salida}) - (\text{Volumen de entrada})}{24 \text{ horas}} \quad (2.2.5)$$

Las Ecuaciones 2.2.4 y 2.2.5 son válidas para el caso cuando en el tanque el volumen de salida es mayor al volumen de entrada.

Cuando existen varias entregas en los tanques, con las Ecuaciones 2.2.4 ó 2.2.5 se pueden obtener varias soluciones. No obstante, cuando las entregas corresponden a fuentes de abastecimiento diferentes, se puede reducir el número de soluciones al apoyarse en los gastos que pueden proporcionar las fuentes de abastecimiento.

En el caso de una red de conducción, la Ecuación 2.2.4 o 2.2.5 aplicada en cada uno de los tanques, se resuelve considerando los gastos que pueden proporcionar las fuentes de abastecimiento y las ecuaciones de continuidad en los nodos de la red de conducción.

2.5 POLITICA DE OPERACION

2.5.1 Conducción con una sola entrega

En la parte final de una línea de conducción con una sola entrega, se debe evitar la colocación de válvulas. Cuando el tanque se llene, se envía la señal al equipo de bombeo para realizar un paro programado, evitando someter a la tubería a cambios fuertes de presiones.

2.5.2 Red de conducción con derivaciones

Cuando se tiene una red de conducción con derivaciones como la que se muestra en la Figura 2.2.2, es importante identificar la entrega con mayor gasto ya que es el caso cuando se pueden provocar mayores problemas de sobrepresiones al presentarse en ella un cierre de válvula cuando se llene el tanque de descarga, que en este caso se llamará tanque principal.

En dicha entrega se debe evitar la colocación u operación de válvulas. El corte del servicio se hará ordenando apagar el funcionamiento del equipo de bombeo, utilizando de preferencia algún medio de control remoto.

Para lograr que primero se llenen los otros tanques, que en este caso se llamarán tanques de derivación, los tubos de las derivaciones correspondientes deberán diseñarse para un gasto mayor al gasto de diseño. Se recomienda un gasto igual a 1.15 veces el gasto de diseño.

En los tanques de derivación donde su desplante sea mayor al del tanque principal, en la descarga se debe colocar una válvula de cierre lento para el llenado del tanque, y una válvula de no retorno para evitar el vaciado del tanque cuando se suspenda el funcionamiento del equipo de bombeo.

Los diámetros calculados con el gasto de diseño de cada tramo de la red de conducción, pueden ser los adecuados cuando se encuentran operando las derivaciones; no obstante, una vez que se llenan los tanques de derivación, el gasto total se va hacia el tanque principal, provocando que los diámetros puedan resultar insuficientes, presentándose cambios fuertes de presión para flujo estacionario, una operación fuera del rango recomendado del equipo de bombeo, y sobrepresiones altas para flujo transitorio.

Este problema se puede resolver contemplando en el dimensionamiento de los conductos, el gasto total de bombeo hacia el tanque principal.

Los tanques de derivación con un desplante menor al del tanque principal, se recomienda conectarlos al acueducto trabajando como un tanque unidireccional, colocando un tubo de vaciado con una válvula de no retorno paralelo al de llenado, para dar mayor seguridad a la conducción en el caso de presentarse un transitorio.

2.5.3 Criterios de modelación transitoria

De acuerdo a la política de operación y a la propuesta de funcionamiento de los elementos de la conducción, es necesario definir los diferentes casos de transitorio hidráulico que deben ser analizados.

En una línea de conducción por bombeo, un paro accidental del equipo de bombeo, es el primer caso que debe ser analizado, y, dependiendo si se presentan sobrepresiones y depresiones inadecuadas, se proponen los medios de control del transitorio, efectuando enseguida la simulación hidráulica para revisar si resuelven el problema.

En el caso de varias derivaciones, es importante considerar en las modelaciones hidráulicas, la existencia de tanques de derivación que puedan funcionar también como un tanque unidireccional.

2.6 ANALISIS DE ALTERNATIVAS

2.6.1 Alternativa de trazos

Para definir el trazo de una conducción es conveniente combinar aspectos económicos y de funcionamiento hidráulico.

Para un mismo material, la tubería es de menor costo cuando la distancia es más corta. Sin embargo, en un perfil del terreno cuyas elevaciones de puntos máximos sean mayores al tanque de regularización, se pueden ocasionar complicaciones en el funcionamiento hidráulico de la conducción cuando se bombean gastos parciales.

Ante esta situación, es necesario colocar estructuras especiales, tales como, orificios disipadores de energía, válvulas de regulación, o tanques intermedios, siendo necesario comparar los costos y la operación, respecto de un trazo alternativo.

Las propiedades químicas del terreno del lugar pueden también determinar la necesidad de colocar un determinado tipo de material del tubo y aplicar a éste algún tratamiento especial, provocando el encarecimiento de la conducción y la conveniencia de analizar un trazo diferente.

El trazo definitivo de la conducción se debe encontrar mediante el proceso de proponer varias alternativas de trazos, considerando la negociación de las afectaciones a terceros por el derecho de paso de la conducción y revisar para cada una el costo total del sistema, incluyendo las estructuras necesarias para la operación, mantenimiento y buen funcionamiento hidráulico.

2.6.2 Línea de conducción por bombeo

2.6.2.1. Gastos menores a 10 l/s

En las líneas de conducción por bombeo con un gasto menor a 10 l/s el diseño hidráulico se efectúa con el siguiente procedimiento:

1. Con el procedimiento que se señala en el subcapítulo 2.4 de esta segunda parte se determina el gasto de bombeo para un funcionamiento de 24 horas y una demanda de la población correspondiente al período de diseño.
2. Con la Ecuación 1.3.26 se obtiene el diámetro económico D_0 . Con esta ecuación se obtiene además una velocidad aceptable del agua de 0.88 m/s.
3. En cada uno de los materiales disponibles se selecciona el diámetro comercial inmediato superior a D_0 .
4. Para el diámetro propuesto en cada material, con la Ecuación 1.3.11 se obtiene la carga de la bomba.
5. En función de la topografía del trazo de la conducción y de las presiones a flujo establecido y a gasto nulo (ver referencia Numero 8) se propone por tramos, la resistencia de los tubos en cada uno de los materiales.
6. Se encuentra el material y diámetro con menor costo de suministro e instalación. Si los cálculos se van a realizar en forma manual, puede usarse la Tabla 2.2.1, usando una para cada tipo de material.
7. Se selecciona el equipo de bombeo, de acuerdo al procedimiento indicado en la subunidad 2.6.2.3.
8. Para el material y diámetro que resulte un menor costo de la tubería, se realiza el análisis transitorio, encontrando las sobrepresiones y depresiones causados por un paro accidental del equipo de bombeo.
9. Se propone la ubicación y el dispositivo para aliviar los efectos transitorios.

El funcionamiento hidráulico de la conducción con los dispositivos de alivio, se obtiene por medio de un programa de cómputo de simulación del fenómeno del transitorio, con el cual se verá si es o no adecuada la propuesta del dispositivo de alivio.

Las presiones que se obtengan a partir de la envolvente de alturas máximas de presiones deben ser menores a la resistencia del tubo.

Las alturas piezométricas de la envolvente de alturas mínimas de presiones, deben ser mayores a la elevación del tubo en cualquier punto sobre el trazo de la conducción.

10. En el caso de que no se cumplan las condiciones señaladas en el paso anterior, se repite el paso número 9, cambiando la propuesta del dispositivo de alivio, tantas veces como sea necesario, hasta encontrar el que mejor resuelva el problema.

2.6.2.2. Gastos mayores a 10 l/s

En las líneas de conducción por bombeo con un gasto mayor a 10 l/s, el procedimiento de diseño es el siguiente:

1. Con el procedimiento que se señala en el subcapítulo 2.4 de esta segunda parte se determina el gasto de bombeo para un funcionamiento de 24 horas y una demanda de la población correspondiente al período de diseño.

2. Con la Ecuación 1.3.26 se obtiene el diámetro económico D_0 .

3. En cada uno de los materiales disponibles se proponen tres diámetros comerciales, el más próximo, el inmediato superior al más próximo a D_0 , y el inmediato inferior al más próximo.

4. Para los diámetros propuestos en cada material se calcula la carga de la bomba usando la Ecuación 1.3.11.

5. Se selecciona el equipo de bombeo, de acuerdo al procedimiento indicado en la subunidad 2.6.2.3.

El equipo de bombeo puede seleccionarse después de obtenerse el diámetro más económico, cuando dicha selección no influye en costos ocasionados por la necesidad de colocar una u otra estructura especial para lograr un funcionamiento hidráulico adecuado de la conducción.

6. En función de la topografía del trazo de la conducción y de las presiones a flujo establecido y a gasto nulo (ver referencia Numero.8) se propone por tramos, la resistencia de los tubos en cada uno de los materiales.

7. Se efectúa un análisis de costos de la tubería y del bombeo. El costo de bombeo se calcula para cada año del periodo de diseño, considerando que el gasto bombeado en cada año puede ser diferente, debido al crecimiento de la población y/o la presencia de etapas en la construcción y operación. Los costos de construcción de la tubería y para el bombeo anual se presentan en diferentes momentos de tiempo, por esta razón como se muestra en la referencia 18, para poder sumarlos y obtener el costo total se requiere transformar los costos de bombeo en cada año a valor presente (al momento de construcción). Para transformar un costo a valor presente se usa la siguiente fórmula:

$$\text{Valor presente} = \frac{\text{Valor}_i}{(1+r)^i} \quad (2.2.6)$$

donde Valor_i representa el costo para el año i , y r es la tasa de actualización anual (tasa de descuento), cuyo valor normalmente se asume como 0.10 ó 0.12.

En otras palabras, el costo total de la conducción a valor presente se calcula por la siguiente fórmula:

$$\text{Costo Total} = \text{C.C.} + \sum_{i=1}^n \frac{\text{C.O.}_i}{(1+r)^i} \quad (2.2.7)$$

donde C.C. es el costo de construcción de la conducción, C.O._i es el costo de operación (bombeo) para el año i , y n es el período de diseño en años. Si la construcción dura más de un año, el costo C.C. también debe de ser llevado a valor presente por la Fórmula 2.2.6.

El procedimiento del análisis de costos es entonces el siguiente:

- a) Se calcula la población esperada para cada año del periodo de diseño y se definen las diferentes etapas del equipo de bombeo y los gastos que demanda la población en cada año.
- b) Con el procedimiento que se señala en el subcapitulo 2.4 de esta segunda parte se determina el gasto de bombeo en cada año.
- c) Se determina el número de horas de bombeo anuales, según el gasto de bombeo en cada etapa de equipamiento y la demanda que se presenta en cada uno de los años.
- d) Si los cálculos se van a realizar en forma manual, puede usarse la Tabla 2.2.1 para calcular el costo de la conducción usando una para cada tipo de material. La Tabla 2.2.2 se usa para calcular el costo total de la conducción a valor presente para un diámetro dado y un material dado; se requerirá un mínimo de tres tablas de este tipo (uno para cada diámetro) para cada material considerado.
- e) Un diámetro dado proporciona el costo total mínimo posible de la conducción, cuando tanto los diámetros mayores como los diámetros menores a éste dan costos superiores. Entonces, para tener la certeza de haber llegado al costo mínimo, de los tres diámetros considerados en cada material, el diámetro intermedio debe ser el de menor costo.

f) Si el diámetro mayor es el de menor costo, se escoge el diámetro comercial inmediato superior al de menor costo y se repite el proceso para este diámetro a partir del paso número 4.

g) Si el diámetro menor es el de menor costo, se escoge el diámetro comercial inmediato inferior al de menor costo y se repite el proceso para este diámetro a partir del paso número 4.

h) Se selecciona el material y diámetro de menor costo.

8. Para el diámetro más económico de todos los materiales, se realiza el análisis transitorio, encontrando las sobrepresiones y depresiones causadas por un paro accidental del equipo de bombeo.

9. Se propone la ubicación y el dispositivo para aliviar los efectos transitorios.

El funcionamiento hidráulico de la conducción con los dispositivos de alivio, se obtiene por medio de un programa de cómputo de simulación del fenómeno del transitorio, con el cual se verá si es o no adecuada la propuesta del dispositivo de alivio.

Las presiones que se obtengan a partir de la envolvente de alturas máximas de presiones deben ser menores a la resistencia del tubo.

Las alturas piezométricas de la envolvente de alturas mínimas de presiones, deben ser mayores a la elevación de tubo en cualquier punto sobre el trazo de la conducción.

10. En el caso de que no se cumplan las dos condiciones señaladas en el paso anterior, se repite el paso número 9, cambiando la propuesta del dispositivo de alivio, tantas veces como sea necesario, hasta encontrar el que mejor resuelva el problema.

11. Se selecciona el equipo de bombeo de las otras etapas de acuerdo al procedimiento indicado en la subunidad 2.6.2.3.

Tabla 2.2.1 Formato para obtener el costo de construcción

MATERIAL DEL TUBO: _____ LONGITUD: _____ m

CONCEPTO	Diámetro: _____ mm Clases: _____				Diámetro: _____ mm Clases: _____				Diámetro: _____ mm. Clases: _____			
	Cantidad	Unid.	P.U.	Importe	Cantidad	Unid.	P.U.	Importe	Cantidad	Unid.	P.U.	Importe
Excav. Mat. clase I		m ³				m ³				m ³		
Excav. Mat. clase II		m ³				m ³				m ³		
Excav. Mat. clase III		m ³				m ³				m ³		
Plantilla apisonada		m ³				m ³				m ³		
Inst. junteo y prueba de tubería		m				m				m		
Relleno compactado		m ³				m ³				m ³		
Relleno a volteo		m ³				m ³				m ³		
Atraques de f'c = 90 concreto		m ³				m ³				m ³		
Costo de tubería		m				m				m		
Costo total de la conducción												

Tabla 2.2.2 Formato para obtener el costo total a valor presente

MATERIAL DEL TUBO: _____ DIAMETRO NOMINAL: _____ mm DIAMETRO INTERIOR: _____ mm COEF. DE RUG: _____ mm
 COSTO DE UN K.W.H.: _____ CARGA ESTÁTICA H_{est} : _____ m EFICIENCIA DE BOMBA: _____ NUMERO DE HORAS DE BOMBEO: _____
 TASA DE ACTUALIZACIÓN: _____ %

Año	Gasto Q (l/s)	Pérdidas de carga h_f (m)	Pérdidas menores $h_m=4\%$ $h_f(m)$	Carga de la bomba H (m)	Potencia (H.P.)	Potencia (K.W.H.)	Costos de construcción o bombeo (\$)	Costo anual a valor presente (\$)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	Costo de construcción							
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20	(Q de diseño)							
Costo total a valor presente								

$$\text{Potencia(HP)} = \frac{\gamma Q H}{76 \eta} \quad \text{Costo de bombeo} = \text{Potencia(KWH)} \cdot \text{Costo(KWH)} \cdot N \cdot 365$$

Q=gasto(m³/s), H=carga de la bomba, γ =peso específico del agua (1000 N/m³), η =eficiencia de la bomba (adimen.)
 r=tasa de actualización, i=año, N=número de horas de bombeo/día, Costo(KWH)=costo de un K.W.H., H_{est} =carga estática

2.6.2.3. Selección del equipo de bombeo

La cantidad de bombas en operación en algunas ocasiones es variable, situación que puede presentarse tanto en plantas de bombeo como en un conjunto de pozos interconectados. En el caso de conducciones con derivaciones pueden existir tiempos diferentes de llenado para cada uno de los tanques.

En todos estos casos es necesario revisar el funcionamiento hidráulico para conocer las presiones sobre el trazo de la conducción, y la operación del equipo de bombeo.

En el equipo de bombeo, es importante conocer la carga, la eficiencia, la carga neta positiva de succión (CNPS) requerida y la potencia al freno por la bomba y la disponible en la instalación del equipo de bombeo. Esta última, en la subunidad 2.6.2.4 se explica cómo obtenerse.

Es importante conocer las presiones en todo el trazo de la tubería.

Una vez que se tiene la carga del equipo de bombeo, se busca en el catálogo de bombas que proporciona el fabricante, la bomba cuya curva característica ofrezca una mayor eficiencia para las diferentes operaciones de la conducción.

Si no se encuentra una curva que contenga exactamente la carga y el gasto de diseño, pero se encuentra una curva muy cercana, este punto puede ubicarse por abajo de la curva, debiendo revisar enseguida la carga y el gasto real de operación del equipo de bombeo.

En este caso se debe esperar un ligero aumento del gasto y una ligera disminución de la carga, respecto de los de diseño.

a) *Conducción sin derivaciones con varias bombas*

En el caso de plantas de bombeo, el equipo de bombeo se puede componer de varias bombas con las mismas características, colocadas en paralelo.

En este caso, cuando trabaja un número de bombas menor al número total de bombas, con relación al punto de operación correspondiente al número total de bombas, el nuevo punto de funcionamiento se desplaza hacia la derecha de la curva característica, pudiendo incluso salirse de la eficiencia mínima recomendada.

Para prever esta situación se recomienda el siguiente procedimiento de selección de la bomba en el orden indicado:

1. Seleccionar bombas con curvas de eficiencia de poca variación, es decir, con valores bajos de $\partial\eta/\partial Q$, donde η es la eficiencia y Q el gasto.

2. Seleccionar bombas con curvas de cargas de variación suficiente para absorber las diferencias de pérdidas de energía por conducción al trabajar la conducción con uno u otro número de bombas, dentro de un rango de eficiencia aceptable. Es decir, bombas con valores relativamente altos de $\partial H/\partial Q$, donde H es la carga de la bomba.

3. Cuando la bomba es de tazonos, se recomienda colocar un número suficiente para lograr incrementar el valor de $\partial H/\partial Q$.

4. Escoger la bomba en un punto de operación de máxima eficiencia para el caso cuando trabajan todas las bombas.

5. Si no se encuentra una curva que contenga exactamente la carga y el gasto de diseño, pero sí se encuentra una curva muy cercana, este punto puede ubicarse por abajo de la curva, debiendo revisar enseguida la carga y el gasto real de operación del equipo de bombeo.

Si no se encuentra una curva muy cercana, será necesario recortar el impulsor de la bomba con respecto al dado en el catálogo, para que cumpla exactamente con el punto requerido.

6. Se calcula el punto de operación para gasto parcial.

7. Con la Ecuación 1.3.34 se calcula la relación de consumo de energía, tomando el subíndice *d* en el punto de máxima eficiencia y el subíndice *s* en el punto de operación para gasto parcial. Si es mayor que uno, se justifica incrementar la eficiencia de operación de la bomba, colocando un orificio disipador de energía o una válvula de regulación.

b) Conducción con derivaciones

A menudo existen conducciones con una planta de bombeo, con derivaciones hacia varios tanques con válvulas que se van cerrando a medida que se llenan los tanques de derivación. Cuando esto sucede, respecto al punto de operación correspondiente al bombeo con todas las derivaciones abiertas, el nuevo punto de operación se desplaza hacia la izquierda de la curva característica.

- Una sola bomba

En el caso de colocar una sola bomba se recomienda emplear el siguiente procedimiento de selección:

1. Seleccionar bombas con curvas de eficiencia de poca variación, es decir, con valores bajos de $\partial \eta/\partial Q$.

2. Elegir bombas con valores bajos de $\partial H/\partial Q$. Es decir, curvas de baja inclinación.

3. Seleccionar la bomba en un punto de operación correspondiente al bombeo con todas las derivaciones, ubicado hacia la derecha del punto de máxima eficiencia.

La selección de la bomba para esta situación permite tener el control sobre los gastos de cada derivación, cuyos tubos pueden diseñarse en función de las presiones en los puntos de conexión.

4. Si no se encuentra una curva que contenga exactamente la carga y el gasto de diseño, pero sí se encuentra una curva muy cercana, este punto puede ubicarse por abajo de la curva, debiendo revisar enseguida la carga y el gasto real de operación del equipo de bombeo.

Si no se encuentra una curva muy cercana, será necesario recortar el impulsor de la bomba con respecto al dado en el catálogo, para que cumpla exactamente con el punto requerido.

5. Con la Ecuación 1.3.34 se calcula la relación de consumo de energía, tomando el subíndice d en el punto de máxima eficiencia y el subíndice s en el punto de operación con todas las derivaciones.

6. Si la relación de consumo de energía es menor o igual a 1.0, es factible resolver el problema colocando una sola bomba. En este caso se continúa con el paso número 8.

7. Si la relación de consumo de energía es mayor que 1.0, es necesario colocar más de una bomba en paralelo. En este caso se da por concluido este proceso y se continúa con el caso de varias bombas que se indica en este punto. El bombeo exclusivo al tanque principal se realiza operando un número de bombas menor al número total de bombas y el bombeo con los derivaciones se lleva a cabo con todas las bombas funcionando.

8. Se obtiene el punto de operación de la bomba para cuando todas las derivaciones están cerradas y el bombeo es exclusivamente hacia el tanque principal.

La operación debe corresponder al punto de máxima eficiencia o la relación de consumo de energía debe ser menor o igual a 1.0, tomando el subíndice d en el punto de máxima eficiencia y el subíndice s en el punto de operación cuando el bombeo es exclusivamente hacia el tanque principal.

9. Si el paso número 8 no se cumple, se repite el proceso desde el paso número 1.

-Varias bombas en paralelo

Se podrán colocar más de una bomba en paralelo si la fuente de abastecimiento no es un pozo profundo, donde solo una bomba puede colocarse. En este caso no puede continuarse con el caso de varias bombas que se indica a continuación.

En el caso de colocarse más de una bomba en la planta, se recomienda emplear el siguiente procedimiento de selección:

1. Seleccionar bombas con curvas de eficiencia de poca variación, es decir, con valores bajos de $\partial\eta/\partial Q$.
2. Elegir bombas con curvas de cargas con variación suficiente para absorber las diferencias de pérdidas de energía por conducción al trabajar la conducción con uno u otro número de bombas, dentro de un rango de eficiencia aceptable, es decir, bombas con valores relativamente altos de $\partial H/\partial Q$.
3. Seleccionar la bomba en un punto de operación correspondiente al bombeo con todas las derivaciones, ubicado hacia la derecha del punto de máxima eficiencia.
4. Si no se encuentra una curva que contenga exactamente la carga y el gasto de diseño, este punto puede ubicarse por abajo de la curva, debiendo revisar enseguida la carga y el gasto real de operación del equipo de bombeo.
5. Se obtiene el punto de operación de la bomba para cuando todas las derivaciones están cerradas y el bombeo parcial es hacia el tanque principal.

La operación debe corresponder lo más cerca posible al punto de máxima eficiencia.

6. Si el paso número 5 no se cumple, el proceso se repite desde el paso número 1 hasta lograr que el punto de operación de la bomba para cuando el bombeo total es hacia el tanque principal, corresponda lo más cerca posible al punto de máxima eficiencia.

2.6.2.4. Carga neta positiva de succión (CNPS)

El fabricante de bombas proporciona el funcionamiento requerido de la bomba para que no se presente el problema de cavitación, mediante el concepto *CNPS requerida*, en función del gasto.

Por definición, la *CNPS disponible* es igual a la carga de presión absoluta en la succión de la bomba, más la altura de velocidad en ese punto, menos la carga de presión absoluta de vapor a la temperatura de trabajo.

En forma matemática

$$\text{CNPS disponible} = \frac{P}{\gamma} + \frac{P_a}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma} \quad (2.2.8)$$

donde P y V son la presión y la velocidad en el extremo aguas arriba de la bomba, P_a es la presión atmosférica del lugar, P_v es la presión absoluta de vapor a la temperatura de trabajo, g es la gravedad y γ es el peso específico del agua.

Para que en una bomba no se presente el fenómeno de cavitación, la *CNPS* disponible debe ser mayor que la *CNPS* requerida.

2.6.3 Línea de conducción por gravedad

Para evitar los trabajos de un constante cierre y apertura de válvulas en una conducción por gravedad, su funcionamiento deberá cubrir las 24 horas del día. Es por ello que al existir una sola descarga, el gasto de ésta es igual al gasto máximo diario.

Si el gasto disponible de la fuente es menor al gasto máximo diario que requiere la población, es necesario buscar otra fuente de abastecimiento complementaria para proporcionar la diferencia faltante.

Tomando en cuenta que el tiempo de funcionamiento de la conducción por gravedad es de 24 horas, el gasto faltante se obtiene con

$$Q = \frac{24}{N}(Q_{md} - Q \text{ disponible}) \quad (2.2.9)$$

donde Q_{md} es el gasto máximo diario y N es el tiempo de funcionamiento del gasto Q faltante en horas.

En un sistema de agua potable con una conducción por gravedad donde el gasto de la fuente de abastecimiento sea mayor o igual al gasto máximo horario, no es necesario construir un tanque de regulación.

En este caso la línea de conducción se diseña para el gasto máximo horario, considerando a ésta como si fuera una línea de alimentación, que abastece del tanque de regulación a la red de distribución.

Cuando el gasto de la fuente de abastecimiento es menor al gasto máximo horario, es necesario construir un tanque de regulación.

El dimensionamiento de los diámetros de una línea de conducción por gravedad se obtiene usando las Ecuaciones 1.3.16 y 1.3.17.

2.6.4 Selección de la alternativa más viable

Para un trazo definido de la conducción, después de haber encontrado el diámetro y el material más económicos, y de haber probado varias alternativas de dispositivos de alivio del transitorio, se selecciona la alternativa que mejor convenga desde el punto de vista hidráulico y económico.

2.7 DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS DE CONTROL DE TRANSITORIOS

2.7.1 Procedimiento general

En este subcapítulo se ofrecen lineamientos y recomendaciones, que pueden servir a los proyectistas como guía a la hora de analizar los transitorios y diseñar la protección de sus conducciones. Se supone que el proyectista cuenta con un programa de simulación de transitorios que pueda simular los casos sin y con diferentes dispositivos de control. Este puede ser el programa ARIETE desarrollado en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (1994) (ver parte 3, capítulo 2), el programa del Instituto de Ingeniería de la UNAM (1985) [8] u otro similar.

Se insiste en que el diseño de los dispositivos de control de transitorios en sistemas de importancia se debe de apoyar en una simulación por computadora. Los métodos aproximados que se basan en monogramas, fórmulas, tablas, etc., pueden usarse solamente en el prediseño con una revisión posterior por el programa de simulación. Para sistemas pequeños en comunidades rurales pueden usarse las recomendaciones de diseño aproximado, dadas en la parte de Conducción del tema Sistemas rurales del Libro II Proyecto, 1ª Sección Agua Potable de este Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la Comisión Nacional del Agua. Estas recomendaciones de diseño aproximado puede también emplearse en la etapa de prediseño de los dispositivos de control de transitorios que se consideran aquí, con posterior revisión por el programa de cómputo.

El análisis de transitorios de un sistema determinado se efectúa en el siguiente orden:

1. Con la ayuda del programa de computación se hace un análisis del transitorio en el sistema sin ninguna protección antiariete. Los resultados de este primer análisis son muy importantes, ya que ellos argumentan la necesidad o no de protección, 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 dispositivo de control adecuado.
3. Se proponen algunas dimensiones aproximadas de los dispositivos antiariete. El proyectista puede seleccionar guiándose por las orientaciones del presente capítulo

o teniendo en cuenta otras consideraciones como pueden ser su experiencia, los criterios de prediseño, la disponibilidad de los dispositivos antiarriete, etc.

4. Se efectúa un análisis de los transitorios con los dispositivos de control asumidos utilizando el programa de computación. Los resultados presentan una de las dos posibilidades siguientes: la protección resuelve todos los problemas o no los resuelve. Si resultó la primera posibilidad se pasa al punto 5.1. y si resultó la segunda se pasa al punto 5.2.

5.1. Al considerarlo necesario, se efectúan uno o más análisis con dimensiones reducidas de los dispositivos antiarriete con vista a buscar una solución más económica; como válida se quedará la solución con dispositivos antiarriete de costo mínimo, que al mismo tiempo sigue resolviendo los problemas.

5.2. Se realizan análisis del fenómeno aumentando las dimensiones o las cantidades de los dispositivos antiarriete. Si se logra obtener una solución que resuelva los problemas con dispositivos antiarriete aceptables, es decir, no demasiado caros y constructivamente razonables, ésta se acepta como válida. En el caso contrario la forma de protección asumida se descarta y se pasa al próximo punto.

6. Al ser posibles otras formas de protección que alternen con la ya estudiada, se repiten para ellas lo indicado en los puntos 3, 4 y 5.

7. Se selecciona la alternativa definitiva después de una comparación entre las alternativas estudiadas teniendo en cuenta consideraciones económicas, constructivas, de seguridad, etcétera. En la comparación debe de incluirse también la variante de utilizar tuberías y equipos de una resistencia mayor (de una clase superior) que resistan todos los efectos de los transitorios, en vez de los dispositivos de control.

2.7.2 Criterios de resistencia

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

2.7.2.1. Resistencia a las sobrepresiones

En general, la única información que los fabricantes de tuberías y accesorios ofrecen en cuanto a la resistencia de sus productos es la llamada "clase" del producto, expresada por la presión máxima que el producto soporta sin dañarse.

La "clase" no establece una diferencia entre presiones estacionarias y transitorias, y por lo tanto la protección antiarriete debe reducir las presiones máximas por debajo de este límite.

2.7.2.2. Resistencia a las depresiones

Serán muy raras las veces en que a los proyectistas se les suministren datos precisos en cuanto a la resistencia de una tubería determinada frente a presiones de vacío, y por lo general la misma debería 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 Figura 2.2.4. La presión crítica P_{cr} para este caso se presenta por la siguiente fórmula (ver por ejemplo [19]):

$$P_{cr} = \frac{24EI}{bD^3} \quad (2.2.10)$$

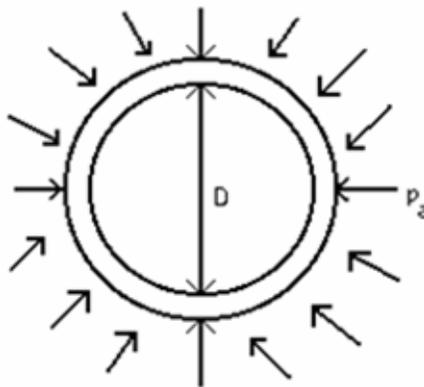


Figura 2.2.4 Tubería de depresión

donde E es el módulo de elasticidad del material del tubo, I el momento de inercia de la pared tubular, b es la longitud del tubo y D su diámetro. Teniendo en cuenta que la longitud de la tubería es mucho mayor que su diámetro, se considera sólo un metro lineal ($b = 1$). En este caso el módulo de elasticidad E se divide en $(1 - \mu^2)$ para considerar las tensiones longitudinales ; μ es el coeficiente de Poisson.

El momento de inercia de un rectángulo de 1 m de longitud y espesor δ es:

$$I = \frac{\delta^3}{12} \quad (2.2.11)$$

Sustituyendo en la Ecuación (2.2.10) resulta:

$$P_{cr} = \frac{2E}{1-\mu^2} \left(\frac{\delta}{D} \right)^3 \quad (2.2.12)$$

De la Ecuación (2.2.12) se puede despejar el espesor que asegura contra el colapso:

$$\delta \geq D \left[\frac{p(1-\mu^2)K}{2E} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.2.13)$$

donde p es la diferencia entre las presiones actuantes dentro y fuera del tubo y K es un factor de seguridad.

Para un tubo de acero $\mu = 0.3$ y $E = 2.1 \times 10^6$ Pa y al asumir un vacío completo dentro de la tubería, es decir, $p = 1$ Pa, y un factor de seguridad $K = 2$, de la expresión (2.2.13) resulta que:

$$\delta \geq \frac{D}{130} \quad (2.2.14)$$

Para un tubo de cualquier material:

$$\delta_{cr} = \frac{D}{C} \quad (2.2.15)$$

donde el coeficiente C se toma de la Tabla 2.2.3. El resultado 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 2.2.3 Constantes para el cálculo del espesor crítico

Material del tubo	Constante C
Acero	130
Fibro cemento	64
Plásticos (PVC y PE)	29
Hierro dúctil	122

Claramente, el colapso es posible en el caso de tuberías de diámetros grandes y espesores pequeños como es el caso de las tuberías de lámina de acero de plantas de bombeo de gran caudal. Para los tubos de concreto y asbesto cemento, que se caracterizan por espesores relativamente grandes, el vacío generalmente no representa un peligro.

2.7.2.3. Resistencia a la sobrevelocidad (sobrerotación) de las máquinas hidráulicas

Las revoluciones máximas que se le pueden 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, pero existen también bombas especialmente construidas para permitir sin daño alguno cierta rotación inversa.

Si no se tienen datos sobre la velocidad permisible de una bomba, la rotación inversa debe limitarse lo más posible.

2.7.2.4. Conclusiones

1. La presión máxima admisible debe asumirse igual a la establecida por la "clase" de la tubería.
2. La presión mínima admisible debe determinarse para cada caso específico según el tipo de tubería. En caso de no poderse determinar, el vacío se debe evitar.
3. Las velocidades admisibles de rotación de las máquinas hidráulicas deben suministrarse por sus fabricantes.

2.7.3 Conducciones por bombeo

2.7.3.1. Condiciones de operación más desfavorables en cuanto a los transitorios

La carga estática del bombeo puede variar debido a una variación en los niveles de los tanques de toma y de descarga, en virtud de lo cual las condiciones de operación se caracterizan por dos parámetros: la carga estática H_g y la cantidad total de bombas en operación n_b .

En general no puede decidirse con todo rigor cuáles serán las condiciones más adversas. Ello depende considerablemente de las condiciones particulares de cada instalación. Sin embargo, como un punto de partida para el análisis se puede utilizar la Tabla 2.2.4.

Tabla 2.2.4 Condiciones más adversas de operación:

	Número de Bombas	Carga Estática H_g
Sobrepresión	n_b	$H_{g,máx}$
Depresión	n_b	$H_{g,mín}$
Sobrerotación	1	$H_{g,máx}$

La razón de lo indicado en esta tabla es la siguiente:

Mientras más grande sea la carga estática H_g mayor será la velocidad del flujo invertido y con esto mayor la presión máxima.

Operando contra una carga estática menor las bombas descargan mayor gasto, es mayor la velocidad en la tubería y las depresiones después del paro. Esto, sumado con el hecho de que con cargas estáticas menores serán más pequeñas las cargas en la tubería antes de ocurrir el transitorio, argumenta la afirmación de que las depresiones máximas se obtienen con todas las bombas trabajando, y con la $H_{g,min}$ como se observa en la segunda fila de la tabla.

La severidad del transitorio depende directamente de la velocidad del agua en la tubería y por eso será más desfavorable el caso de operación de todas las bombas que es cuando circula más gasto por la tubería.

Si trabajara una sola bomba, todo el volumen contenido en la tubería después de invertirse el flujo, provocaría la rotación inversa de la bomba, lo que se observa en la última fila de la Tabla 2.2.4.

2.7.3.2. Procedimiento de diseño

Se recomienda seleccionar los dispositivos de control por el siguiente procedimiento:

1. Se analiza el transitorio sin dispositivos de control en la conducción. Son posibles cuatro casos en cuanto a los resultados:

1.1. Las presiones máximas que se producen en el transitorio no superan la resistencia (la clase) de los tubos, y no hay presiones negativas (vacíos). No se necesitan dispositivos de control en este caso, y el análisis concluye.

Las presiones máximas que se producen en el transitorio no superan la resistencia (la clase) de los tubos, 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 resultan peligrosos el análisis concluye.

Si los vacíos presentan problemas se analiza el transitorio con alguno de los dispositivos de control que se presentan más adelante en la sección 2.7.3.4. Varias corridas del programa con diferentes dispositivos pueden resultar necesarias para determinar el más adecuado para el caso.

1.3. Las presiones máximas que se producen en el transitorio superan la resistencia de los tubos; no hay presiones negativas. Los dispositivos que se emplean en este caso se presentan en 2.7.3.3. Varias corridas del programa con diferentes

dispositivos pueden resultar necesarias para determinar el más adecuado para el caso.

1.4. Las presiones máximas que se producen en el transitorio superan la resistencia de los tubos; hay presiones negativas peligrosas. La cámara de aire es una solución universal para este caso. En principio, la cámara de aire es solución también en los casos 1.2 y 1.3, pero es más cara y requiere de mantenimiento. Otros dispositivos posibles se comentan en 2.7.3.4.

2.7.3.3. Caso cuando en la tubería no se producen vacíos

Como muestra el análisis en la sección 2.3.6.1, en este caso la sobrepresión máxima se produce en el inicio de la tubería como consecuencia de la detención del flujo invertido por las válvulas de no retorno. Por esa razón los dispositivos 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.

Una mejor protección se logra con dispositivos antiarriete que reducen tanto las depresiones al inicio del proceso, como las sobrepresiones subsiguientes; tales equipos son la cámara de aire, la torre de oscilación y el volante de inercia.

La protección puede obtenerse también con 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 dispositivos antiarriete que actúan al descender la presión hasta la atmosférica como tanques unidireccionales y válvulas de aire, no pueden utilizarse para estos casos.

Protección usando by-pass en las válvulas de no retorno.

El único parámetro que hay que determinar en este caso es el diámetro del tubo by-pass. Este diámetro debe determinarse atendiendo a las siguientes consideraciones:

- 1) Reducir la presión máxima $p_{m\acute{a}x}$ del transitorio hasta un valor admisible p_{adm} .
- 2) Que no se produzcan vacíos en la tubería como producto de un gasto invertido demasiado grande. La Figura 2.2.5 ilustra esta situación. Con un diámetro mayor del by-pass, es posible que la línea piezométrica corte el perfil del terreno (línea 2), generando vacíos. Con un diámetro menor la línea piezométrica sube (línea 1) y los vacíos se evitan.
- 3) No permitir una excesiva rotación inversa de las bombas.

4) 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. Las siguientes condiciones pueden servir como guía para obtener un diámetro aproximado con el cual comenzar las corridas del programa:

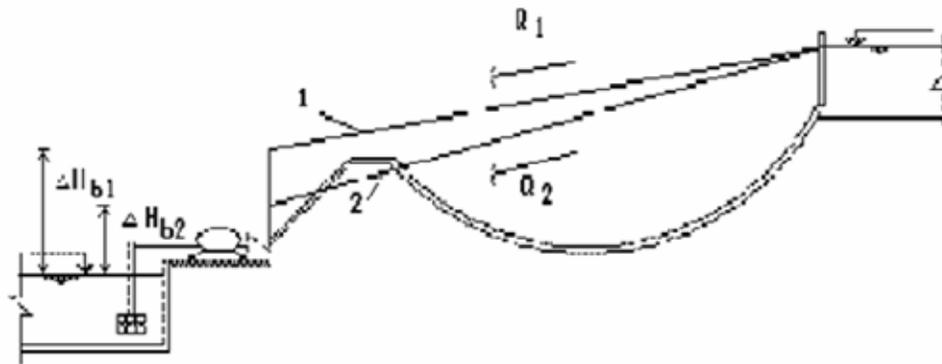


Figura 2.2.5 Líneas piezométricas con un flujo invertido: 1) Con un diámetro menor del by-pass. 2) Con un diámetro mayor del by-pass.

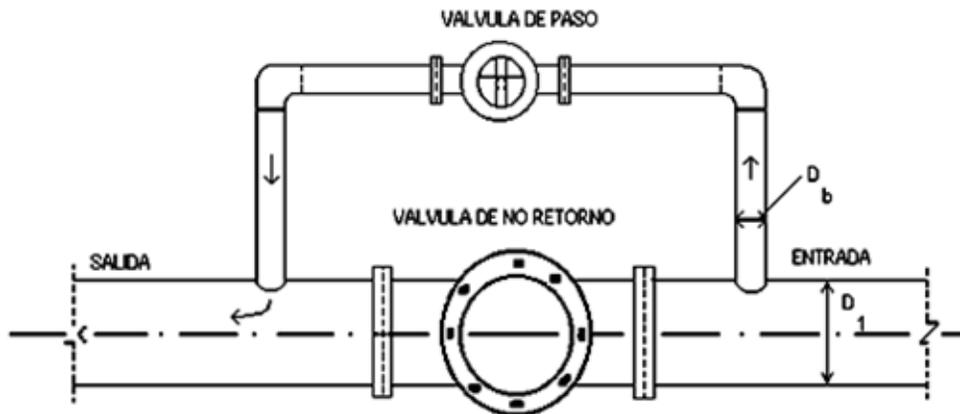


Figura 2.2.6 By-pass en una válvula de no retorno.

Experimentalmente se ha comprobado [9]; que con altas velocidades (entre 10 m/s y 12 m/s) en el tubo by-pass es posible el surgimiento de fenómenos de cavitación con un brusco descenso de su capacidad de conducción. El diámetro del by-pass tiene que seleccionarse de forma tal que no se produzcan velocidades tan altas.

Descarga inversa con válvulas de cierre programado.

Lo esencial en el diseño de esta forma de control de transitorios es determinar el tiempo y el diagrama (la ley) del 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 etapas (Figura 2.2.7), que se define por tres parámetros:

- 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 .

La forma de determinar estos parámetros es asumirlos, correr el programa de simulación, y en dependencia de los resultados obtenidos cambiar alguno de los tres parámetros y volver a correr el programa; y así sucesivamente ir realizando un proceso de prueba y error hasta obtener una solución adecuada. Para asumir el diagrama de cierre inicial, con el cual comienzan las pruebas se puede usar las siguientes guías:

1. El tiempo t_1 debe ser aproximadamente igual al tiempo en que se invierte el flujo.

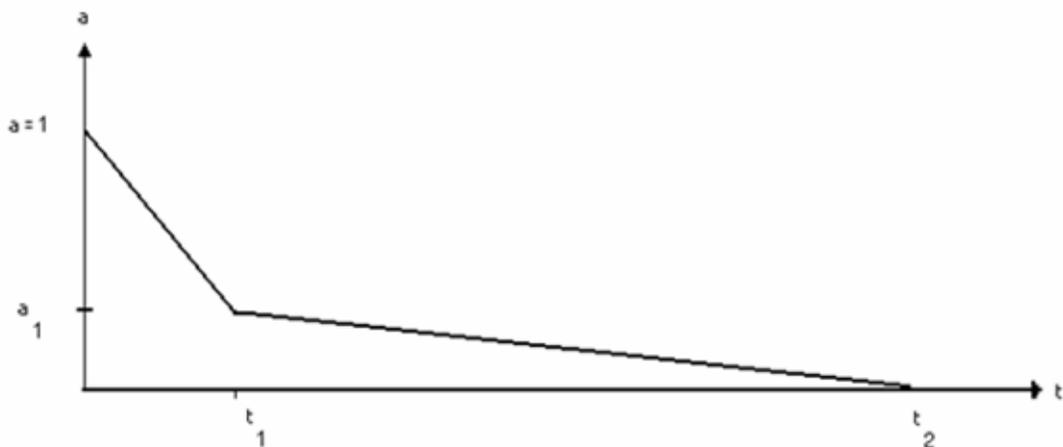


Figura 2.2.7 Diagrama de cierre en dos etapas.

Para determinarlo se realiza una simulación sin dispositivos de control. El momento del cierre de las válvulas de no retorno, obtenido en los resultados de esta simulación, se escoge como t_1 .

2. El grado de cierre a_1 debe de coincidir aproximadamente con el inicio de la parte efectiva del cierre de la válvula, que puede ser tomado de su curva (a, K_v) como el punto a partir del cual crece bruscamente el coeficiente de pérdidas K_v .

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

a) 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 del cambio del 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 invertido demasiado grande y 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 .

b) La presión máxima sobrepasa la admisible. Esto puede suceder por dos razones:

b.1. 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.2. La segunda parte del cierre es demasiado lenta; se produce un flujo invertido grande, que luego al detenerse produce una presión alta. En este caso hay que disminuir o t_1 y t_c a la vez, o uno de ellos.

c) Se obtienen velocidades demasiado elevadas en la rotación invertida de las máquinas. En este caso hay que disminuir el gasto del flujo inverso, lo que se puede alcanzar disminuyendo t_c , t_1 y a_1 , o alguno de ellos.

d) 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 vistas en el punto 3.

Al examinar la descarga inversa como dispositivo antiarriete tienen que tomarse 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 causados por los dispositivos: by-pass, válvulas de cierre programado, etc., y a los consumos complementarios de energía eléctrica causados por las pérdidas de carga en los dispositivos.

Uso de válvulas de alivio

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

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 puede sobrepasar la presión admisible p_{adm} .
- La presión de apertura p_o debe ser de tal magnitud, que la válvula no funcione 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 dispositivos de control se escoge 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.

$$\Delta p_{red} = p_{max} - p_{adm} \quad (2.2.16)$$

4. Por la fórmula de Joukowski se calcula el gasto que las válvulas tienen que descargar para reducir la presión una cantidad Δp_{red}

$$Q_{vs} = \frac{\Delta p_{red} F_t}{a} \text{ g} \quad (2.2.17)$$

donde F_t representa el área de la sección transversal de la tubería.

5. Se busca de los catálogos de los fabricantes la(s) válvula(s) que puede 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, de cuyos resultados se determina si son necesarias más modificaciones.

Incremento de la inercia de las masas rotantes

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 hacen varias corridas con el programa, incrementando en cada una el 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 [10] proporciona una expresión sencilla para saber si el momento de inercia de las masas rotantes tiene o no algún efecto en el control de golpe de ariete por paro de bomba en una instalación determinada. Esta expresión es:

$$\frac{I N^2}{\rho ALH_0^2} = > 0.01(\text{rev/min})^2 \quad (2.2.18)$$

donde:

- N - la velocidad de rotación nominal en r.p.m.
- ρ - la densidad del agua en N/m^3
- A - el área de la sección transversal de la tubería en m^2
- L - la longitud de la tubería en m
- H_0 - la carga de bombeo en operación normal en m.c.a.
- $I = WR^2$ - el momento de inercia en Kg.m^2

La condición (2.2.18) 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 rotantes limita el efecto del golpe de ariete en un valor al menos del orden del 10%.

En la práctica los fabricantes de motores eléctricos proporcionan en sus catálogos el momento de inercia del rotor del motor, lo que pocas veces ocurre con los fabricantes de bombas. Por ello, en la bibliografía se encuentran expresiones que permiten calcular aproximadamente el momento de inercia del conjunto motor-bomba en función de la potencia y de la velocidad de rotación. Una de ellas es la fórmula de Linton:

$$WR^2(\text{Kg.m}^2) = 150 \left[\frac{P(\text{HP})}{N(\text{rpm})} \right]^{1.435} \quad (2.2.19)$$

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.p.m. No se recomienda actualmente su uso, ya que la construcción de motores en aquella

época era más robusta y la fórmula da inercia mayores que las reales para los motores modernos.

Otra fórmula para la inercia del motor eléctrico es la del "Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1975":

$$WR^2 = 0.0045 P^{1.38} \quad (2.2.20)$$

$$WR^2 = 0.00193 P^{1.38} \quad (2.2.21)$$

donde P es la potencia en kW y WR^2 el momento de inercia en kg.m².

La Fórmula 2.2.20 es válida para una velocidad de 1200 r.p.m. y la Fórmula 2.2.21 para velocidad de 1800 r.p.m. Las dos fórmulas proporcionan el momento de inercia del motor, sugiriéndose añadir un 10% a 15% para tomar en consideración la bomba. Estas fórmulas, igual que la fórmula de Linton, han quedado obsoletas.

La diferencia entre el momento de inercia calculado por las fórmulas presentadas y el real (dado en el catálogo del fabricante) es tanto más importante, cuanto más moderna tecnológicamente la máquina sea y cuanto más impulsores en serie tenga para la misma potencia. Esta diferencia va al lado contrario de la seguridad (ya que el cálculo da sobrepresiones menores para una inercia mayor), por lo que se recomienda buscar el momento de inercia de catálogo de fabricantes y no usar las fórmulas.

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

$$WR^2 (motor) = 0.0043 \left(\frac{P}{N} \right)^{1.48} \quad (2.2.22)$$

$$WR^2 (bomba) = 0.03768 \left(\frac{P}{N^3} \right)^{0.9556} \quad (2.2.23)$$

donde P es la potencia en Kw, N es la velocidad de rotación nominal en r.p.m., y WR^2 es el momento de inercia en Kg.m². Siendo más nuevas, las fórmulas de Thorley dan por lo general mejores resultados.

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

Conclusiones para las formas de protección en el caso sin separación de columna

Como formas de protección para este caso es posible también el uso de cámara de aire o torre de oscilación, pero como estos dos dispositivos resultan más apropiadas para el caso de separación de la columna, se presentan en la sección 2.7.3.4.

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

No es recomendable el uso de válvulas de alivio, a no ser que estén asegurados de forma especial su rápido accionamiento y su poca inercia.

La ubicación de válvulas de no retorno intermedias se puede usar en presencia de topografía adecuada.

2.7.3.4. Casos cuando en la tubería se producen vacíos

Los posibles dispositivos 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 dispositivos del primer grupo se instala uno sólo en la planta de bombeo para proteger todo el sistema, mientras que los del segundo se instalan en los lugares donde se producen los vacíos.

Los dispositivos del primer grupo son:

- Cámara de aire
- Torre de oscilación
- Incremento de la inercia de las masas rotantes.

Los del segundo grupo son:

- Tanques unidireccional (abierto o cerrado)
- Válvulas de aire
- Válvulas anticipadoras del golpe de ariete

Si la tubería soporta el vacío, debe verificarse si las presiones máximas que se producen superan 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 o válvulas de admisión y retención de aire en los

lugares de separación. Si con estos dispositivos antiarriete las presiones máximas siguen inadmisiblemente altas, tienen que preverse adicionalmente dispositivos de control en la planta de bombeo, como los descritos en la sección 2.7.3.3.

Protección con cámara de aire

La localización ideal de la cámara de aire es en la planta de bombeo y tan cerca de ésta 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 éstas. 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, ver sección 3.9.3.6 de la parte 1.

Como regla general la cámara de aire debe poner poca resistencia a la salida de agua, con el fin de que se haga cargo rápidamente de proporcionar 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 (de esta forma coopera mejor en el amortiguamiento del transitorio).

De esta manera, el caudal de salida normalmente debe ser sin restricción, 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 adoptar 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 presenta en referencia [21]. En la Figura 2.2.8, 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 ; donde $K = 0$ corresponde al caso sin pérdidas y $K = \infty$ al caso en que no se admite penetrar gastos, 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, mientras que el segundo 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 cual en los dos máximos se obtiene una misma sobrepresión, la que también es la mínima para el caso concreto. En la Figura 2.2.14 esto se logra con $K = 5$.

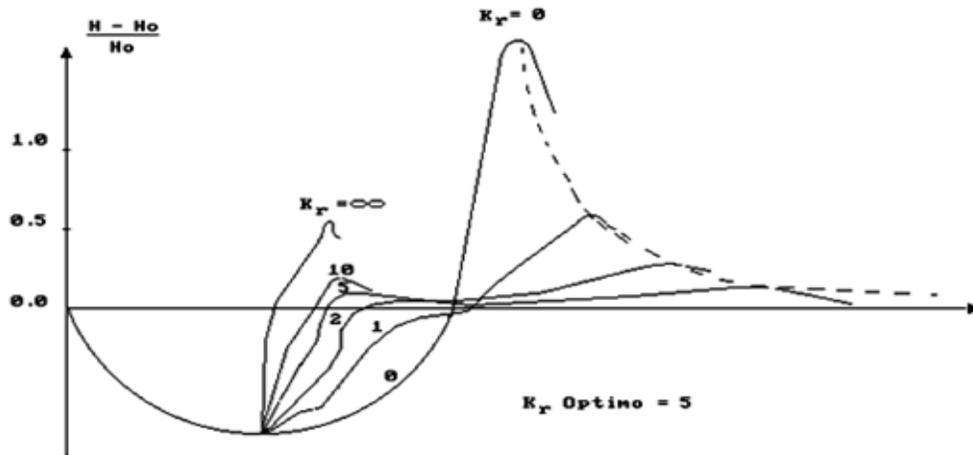


Figura 2.2.8. Evolución de la presión para diferentes pérdidas de carga en la conexión de la cámara de aire.

El diseño de una cámara de aire se caracteriza por los siguientes parámetros, ver Figura 2.2.9:

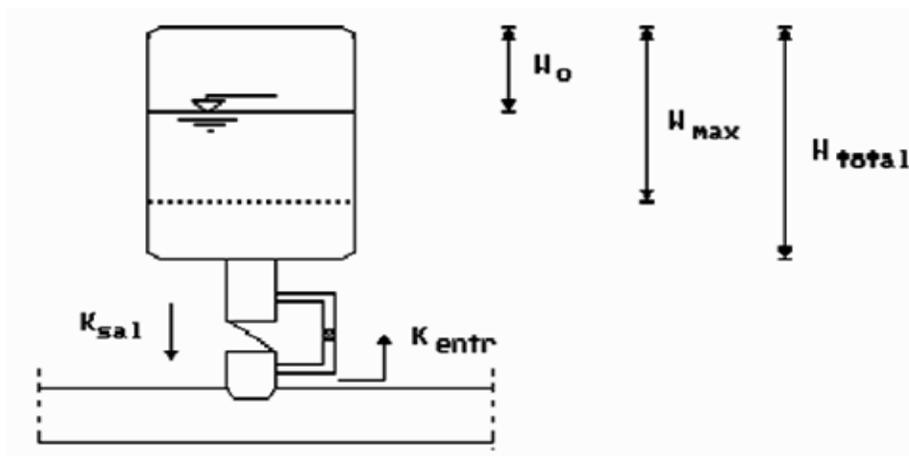


Figura 2.2.9. Parámetros de diseño de una cámara de aire.

- 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 el caso cuando el agua sale de la cámara y K_{ent} cuando el agua entra.

Los cinco parámetros anteriores se deben de determinar atendiendo a 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 representa 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 cuales 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, teniendo 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 por el programa de simulación. Se recomienda el siguiente procedimiento:

1. Se asume un valor para W_o y se corre el programa con $K_{ent}=0$.
2. Existen dos posibilidades en cuanto a los vacíos 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 cada vez aumentando W_o 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 ó 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.

Si las presiones máximas en la simulación con el K_{ent} óptimo se reducen por debajo de las admisibles, esta última queda como definitiva. 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 $W_{m\acute{a}x}$. El volumen total W_{total} se obtiene adicionándole a $W_{m\acute{a}x}$ una reserva para que la cámara no se vacíe completamente. La reserva depende del valor de W_o y del diámetro del tanque. Para valores grandes W_o se puede usar una reserva menor y viceversa. La reserva exacta se obtiene al redondear W_o a un volumen de tanque estándar mayor, pero no menos de 10% a 15% de W_o .

Para K_{sal} generalmente se asume el valor cero, ya que las pérdidas al salir agua del tanque son pocas y se pueden despreciar. Al desear un análisis más preciso, K_{sal} se puede calcular, como se muestra más abajo, y usarlo en las corridas.

La cantidad de corridas para obtener la solución definitiva se puede reducir si el análisis empieza con un buen estimado para W_o . Una posibilidad es utilizar la fórmula de Gandenberger:

$$W_{max} = \frac{Q_o^2}{gA_T} L \left(\frac{H + 10}{H_g + 10} \right)^2 \frac{H_{min} + 1}{H_o - H_{min}} \quad (2.2.24)$$

donde:

- Q_o es el gasto en la tubería en operación normal en m³/s
- g es la aceleración de la gravedad
- L es la longitud de la tubería en m
- A_T es el área de la sección transversal de la tubería en m²
- H_o es la carga de las bombas en la operación normal en m
- H_g es la carga estática en m
- H_{min} es la carga mínima que se pretende en la estación de bombeo, en m.

W_o se obtiene aplicando la ley de Boyle-Mariotte:

$$W_o = \frac{W_{max}(H_{min} + 10)}{H_o + 10} \quad (2.2.25)$$

En la expresión (2.2.24) se desprecia la diferencia de cotas entre la cámara y el nivel agua en la toma.

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

Sea $p_{m\acute{a}x}$ la presión máxima obtenida en el caso sin pérdidas y sea p_{adm} la presión admisible. Entonces, la diferencia Δp_{red}

$$\Delta p_{red} = p_{max} - p_{adm} \quad (2.2.26)$$

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:

$$\Delta H_{pred} = K_{ent} Q^2 \quad (2.2.27)$$

donde $\Delta H_{pérd}$ son las pérdidas en la conexión con la tubería y Q es el gasto que entra a la cámara. La expresión (2.2.27) se refiere a un momento dado ya que el gasto Q varía durante el transitorio.

Con el auxilio de la visualización de resultados intermedios del programa de simulación (ver capítulo 2 de la parte 3) para el caso sin pérdidas en la conexión, se escoge un valor promedio Q_{medio} del gasto. Considerando como una aproximación muy gruesa que $\Delta H_{pérd}$ es igual a Δp_{red} , de (2.2.27) se despeja K_{ent} :

$$K_{ent} = \frac{\Delta p_{red}}{Q_{medio}^2} \quad (2.2.28)$$

donde Q_{medio} es un valor promedio del gasto, que se toma de la simulación para el caso sin pérdidas.

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 by-pass (Figura 2.2.10 (a)).

Si $K_{ent} > 0$, se diseña una conexión con válvula de no retorno y by-pass (Figura 2.2.10 (b)), a no ser que las pérdidas asimétricas se realicen de otra forma.

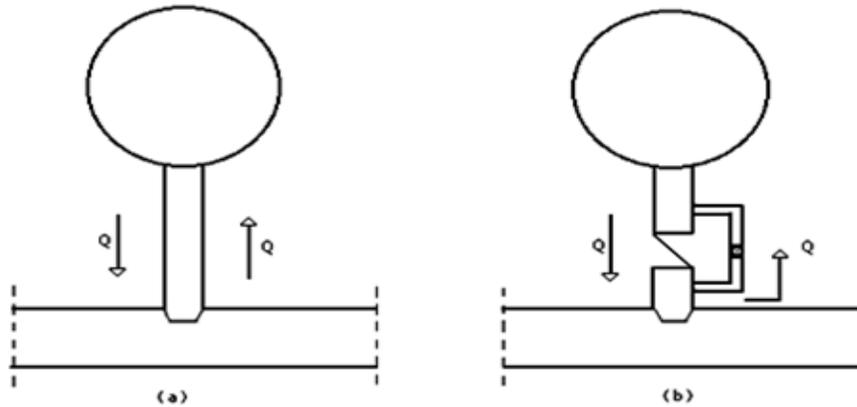


Figura 2.2.10. Conexión de la cámara con la tubería: a) simple, b) con pérdidas asimétricas.

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

$$\Delta H_{perd} = \Sigma K \frac{V_b^2}{2g} \quad (2.2.29)$$

donde ΣK representa la suma de los coeficientes de todas las pérdidas de carga que se presentan en el camino del agua desde el punto de unión con la tubería hasta la entrada a la cámara. El diámetro de la conexión es considerablemente mayor que el diámetro del by-pass y las pérdidas en el propio tubo de conexión se pueden despreciar; al considerar de esta forma solamente las pérdidas en el by-pass se tendrá:

$$\Sigma K = 2 K_{codo} + K_v l_v + K_{sal} + K_{fric} \quad (2.2.30)$$

con:

- K_{codo} es el coeficiente de pérdidas en los codos.
- $K_{válv}$ es el coeficiente de pérdidas en la válvula de paso del by-pass. Esta válvula debe estar abierta y se usa en casos de reparación, mantenimiento, etc. Se puede utilizar también para regular las pérdidas en el by-pass y en ese caso se estrangula el grado necesario.
- K_s es el coeficiente de pérdidas de la salida del by-pass a la conexión. Se asume $K_{sal}=1$.
- K_{fric} coeficiente de pérdidas por fricción (por longitud) en el by-pass.

$$K_{fric} = \frac{f L_b}{D_b} \quad (2.2.31)$$

donde:

- L_b es la longitud del by-pass.
- f es el factor de fricción.

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

Teniendo en cuenta que,

$$V_b = \frac{Q}{A_b} \quad (2.2.32)$$

donde A_b es el área de la sección transversal del by-pass, la ecuación (2.2.29) puede representarse en la forma:

$$\Delta H_{perd} = \frac{\Sigma K}{2gA_b^2} Q^2 \quad (2.2.33)$$

De la comparación de (2.2.33) con (2.2.27) se concluye que:

$$K_{ent} = \frac{\Sigma K}{2gA_b^2} \quad (2.2.34)$$

Conociendo K_{ent} y ΣK , de (2.2.34) se despeja A_b para calcular luego el diámetro del by-pass D_b :

$$D_b = \left(\frac{4A_b}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2.35)$$

Una problemática adicional que se presenta en las cámaras de aire de tamaño importante es la obra civil que es necesario realizar para albergar la planta de bombeo y el elemento de protección. En estos casos con frecuencia resulta más económico y más práctico montar varias cámaras de aire de tamaño menor sobre un colector común que posteriormente se conecta a la tubería principal.

Torre de oscilación en la planta de bombeo

Los parámetros que hay que determinar con el diámetro y la altura de la torre, y las posibles pérdidas en su base atendiendo a las siguientes condiciones:

- Que se eliminen los vacíos en la tubería.
- Que se reduzcan las presiones máximas por debajo de las admisibles.
- Que no derrame agua por el borde superior de la torre.

- Que el diámetro, y ante todo la altura de la torre, sean mínimos.

El problema se soluciona haciendo varias corridas con el programa de simulación con 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 alcanzadas durante el transitorio, que 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 el caso contrario se pasa al siguiente 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 cual 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 resulta 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 los cálculos se simplifican buscando el efecto de la torre variando solamente su diámetro.

Para obtener una orientación previa de prediseño, antes de la simulación por computación, pueden usarse las siguientes expresiones aproximadas [22]:

$$\frac{H_d}{H_m} x = 1 - \frac{2}{3} k + \frac{1}{9} k^2 \quad (2.2.36)$$

$$\frac{H_m}{H_m} x = 0.973 - 1.326 k + 0.654 k^2 \quad (2.2.37)$$

donde H_d y H_m son respectivamente el ascenso y descenso máximos del nivel de agua en la torre con respecto al nivel estático. $H_{m\acute{a}x}$ y k se calculan por las siguientes fórmulas:

$$H_m \cdot x = V_o \left[\frac{A_{tub} L}{g A_{torre}} \right]^{0.5} \quad (2.2.38)$$

$$k = \frac{\Delta H_{perd}}{H_m} x \quad (2.2.39)$$

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, $\Delta H_{m\acute{a}x}$ las pérdidas de carga en ésta y g es la aceleración de la gravedad.

$H_{m\acute{a}x}$ representa la amplitud de la variación sinusoidal del nivel de agua con respecto al nivel estático, despreciando la influencia de las pérdidas de carga.

Al concluir todos los análisis quedan determinadas las cotas mínimas y máximas que alcanza el agua en la torre. Puesto que la parte "activa" de la torre queda encerrada entre las cotas mínimas y máximas de la oscilación, la parte por debajo de la cota mínima se puede diseñar con un diámetro menor nombrándola "conexión".

Protección con tanques unidireccionales

Mientras que la cámara de aire y la torre de oscilación modifican el transitorio en toda la tubería, los tanques unidireccionales tienen ante todo una acción local. Existen tres posibilidades en su empleo como medio de control:

1. Es suficiente proteger la tubería sólo con tanques unidireccionales (uno o más).
2. Resulta más conveniente la combinación de otro medio antiarriete en la planta de bombeo (por ejemplo una cámara de aire) con tanques unidireccionales situados en puntos intermedios de la conducción.
3. Los tanques unidireccionales no son adecuados como medio de protección antiarriete para la tubería dada.

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

- a) Como regla general, los tanques unidireccionales se ubican en los lugares de separación de la columna que tengan los volúmenes máximos de la burbuja de cavitación, como puntos altos del perfil de la tubería, puntos de cambios de pendiente, etcétera.

b) Si los vacíos en la tubería se concentran en una pequeña parte de ésta, se coloca un tanque unidireccional en esta 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 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, se hace una nueva corrida con un nuevo tanque unidireccional 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 demasiado grande, esta variante de protección se califica como no aceptable. Si la cantidad de tanques es aceptable, se pasa el 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 eliminen los vacíos.

Se revisan los volúmenes de las separaciones 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 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 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 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. Después que se eliminen los vacíos, ningún incremento en el volumen o la cantidad de los tanques unidireccionales puede ejercer influencia sobre las sobrepresiones.

f) Combinación de tanques unidireccionales con otros medios antiarriete. Puede ser necesaria por dos causas principales:

f.1) Los tanques unidireccionales eliminan los vacíos, pero no las sobrepresiones. Para reducir la presión se agrega al sistema cualquiera de los medios antiarriete descritos en 2.7.2.2. Hay que prestar especial atención cuando se usa la combinación con descarga inversa (a través de by-pass o válvulas de cierre programado), ya que si no cesa a tiempo la descarga inversa los tanques unidireccionales se pueden vaciar.

f.2) Cuando los tanques unidireccionales 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). Existen dos posibilidades: usar una cámara de aire más grande, que elimine los vacíos completamente, o mantener la cámara pequeña y resolver el vacío "localmente" con uno o más tanques unidireccionales. Como los tanques unidireccionales son relativamente baratos, la segunda alternativa puede resultar más económica.

El programa de simulación de transitorios pide 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 asumen las dimensiones del tanque y el nivel de agua en éste. El área de la sección del tanque en planta debe de ser no menos de 16 mayor que la sección de la tubería [8].

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 cálculo del volumen total del tanque es:

$$V_T = n V_{\min} \quad (2.2.40)$$

donde n es un coeficiente de seguridad, que suele tomarse alrededor de 10, pero en ningún caso debería 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 al 10-15% del nivel máximo. Por ello el área del tanque se determina como:

$$A_T = \frac{V_T}{0.1 Z_T} \quad (2.2.39)$$

siendo Z_T el nivel máximo de agua en el tanque y V_T el volumen calculado.

d) Se calculan nuevas dimensiones del tanque con el área calculada y se regresa al punto (b). Varias pruebas con diferentes área y nivel máximo en el tanque pueden resultar necesarias, para lograr un tanque que cumple con las condiciones señaladas.

Uso de válvulas de aire

a) 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 altos que el sitio de admisión de aire, esta discontinuidad se cerrará en el transitorio, generando 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 y 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, y 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, etcétera; con vistas al vaciado y llenado de la tubería, sin pensar en su efecto sobre los transitorios.

Como se señaló en el procedimiento general de 2.7.1, el primer paso del análisis consiste en analizar el transitorio sin medios de control alguno. En esta corrida 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 con 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.

b) Válvulas de admisión y retención de aire

Además de reducir los vacíos, producen efecto amortiguador en la fase de sobrepresión. Mientras mayor sea el volumen de aire atrapado, mayor será el efecto amortiguador de la 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 vacío y separación en la conducción. En todo caso, la simulación del transitorio muestra lo adecuado de una u otra variante de ubicación de las válvulas.

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

1. Asegurar que el aire atrapado se quede en el lugar de las válvulas de aire durante el transitorio (o sea, que no se traslade rápidamente por la tubería).
2. 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 [8].

Conclusiones para las formas de protección para el caso con vacíos en la conducción

- La cámara de aire es una solución aplicable casi en todos los casos que se pueden presentar. Al mismo tiempo es una solución cara.
- Las torres de oscilación son efectivas y seguras sin necesidad de mantenimiento, pero limitadas en su uso por la altura requerida.
- Pocas veces se puede proteger la tubería solamente con incrementar la inercia de las masas rotantes de los equipos de bombeo.
- Son posibles algunos casos en que la protección antiarriete se puede lograr usando solamente tanques unidireccionales. Esta variante es relativamente económica y por eso siempre se debe revisar la posibilidad de su uso. Si no es posible, generalmente 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 con tanques unidireccionales, pero con gran cantidad 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.

2.7.4 Conducciones por gravedad

2.7.4.1. 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, en cuanto a las sobrepresiones más desfavorable es el caso de un cierre al final de la tubería.

El cierre de una válvula intermedia genera sobrepresiones aguas arriba y depresiones aguas abajo. Depresiones se generan también con la apertura de una válvula de una válvula al final de la conducción. Cual 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 apertura, y más alta la velocidad en la tubería. Como se señala en la sección 3.8.6.4, cuando el tiempo de maniobra es menor de $2L/a$ se produce la sobrepresión (depresión) máxima que da la fórmula de Joukowski (1.3.37).

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 tiene 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, requiriéndose un tiempo menor para la maniobra de cierre total. Si este tiempo, en particular, es menor que $2L/a$ se produce la sobrepresión máxima que da la fórmula de Joukowski.

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.

2.7.4.2. 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 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 éstas superan la resistencia de la tubería se busca la forma adecuada para reducirlas. 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 cierre lento al final.

El cierre más lento o en etapas se realiza por medio de arreglos mecánicos especiales que se adicionan a las válvulas.

Las sobrepresiones pueden ser reducidas también con válvulas de alivio o by-pass en las válvulas de cierre.

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

d) Una vez reducidas las presiones máximas en los límites permisibles se pasa a revisar las presiones negativas. Si el transitorio genera presiones negativas que la tubería no puede soportar, se intenta ante todo de 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 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.

En ocasiones, si el vacío se presenta en una pequeña longitud de la conducción, puede resultar más conveniente reforzar esta parte y permitir el vacío.

e) Se simula el transitorio que genera la apertura de la válvula al final, y el cierre de válvulas intermedias. Es de esperar que las sobrepresiones en estos casos sean menores. Presiones negativas son posibles; la protección contra éstas es como en el punto (d).

Para fines de prediseño pueden usarse los diagramas mostrados en las Figuras 2.2.11 y 2.2.12, que dan 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; y no se consideran las pérdidas de carga por fricción en la tubería.

Se emplean los siguientes parámetros adimensionales:

$$\alpha = \frac{g H_o}{a V_o} \quad (2.2.42)$$

$$\Delta h_m = \frac{g (H_m - H_o)}{a V_o} \quad (2.2.43)$$

$$t_c = \frac{a T_c}{2L} \quad (2.2.44)$$

donde:

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

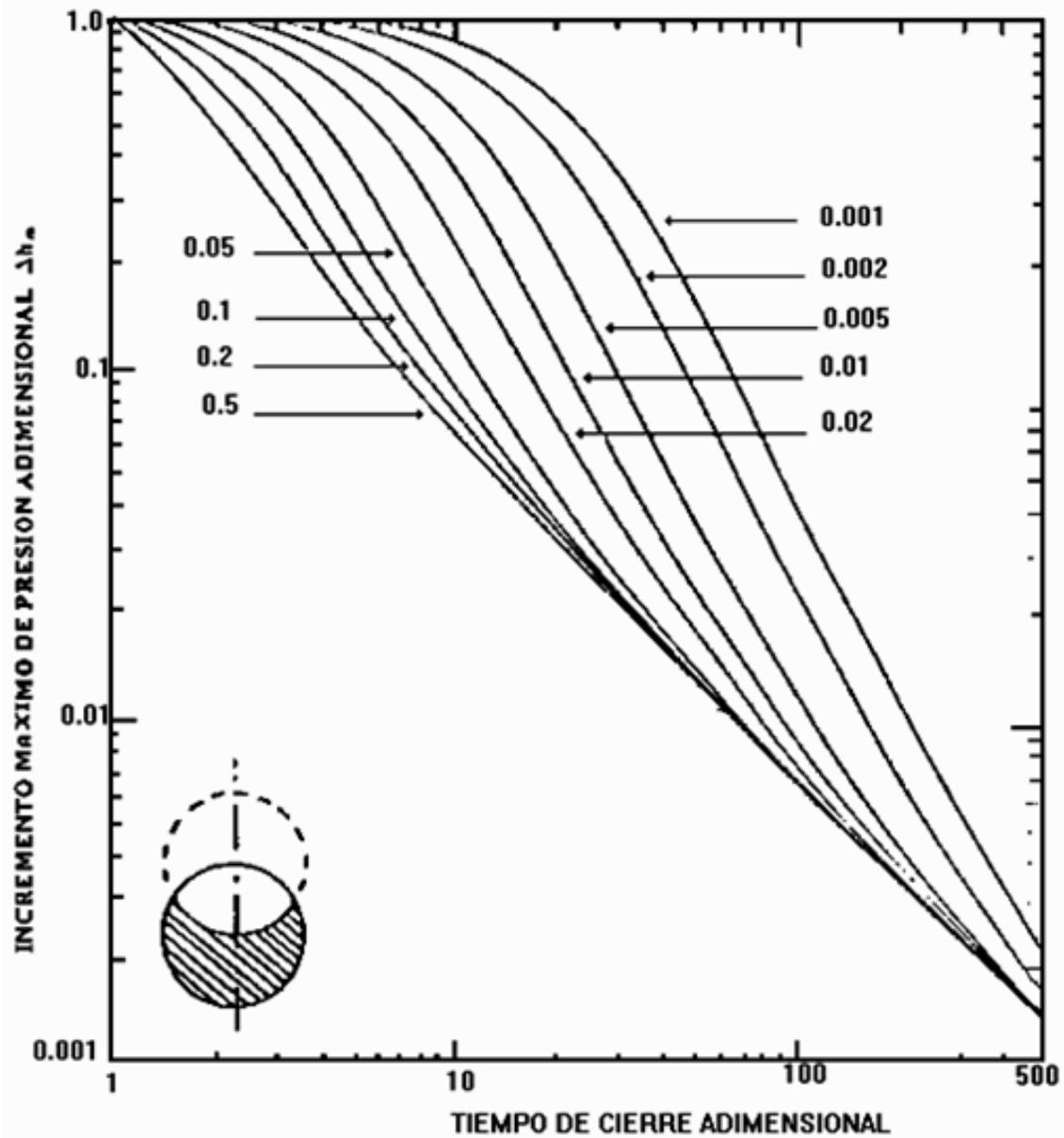


Figura 2.2.11 Incremento máximo de presión en una tubería debido al cierre de una válvula de compuerta en su final.

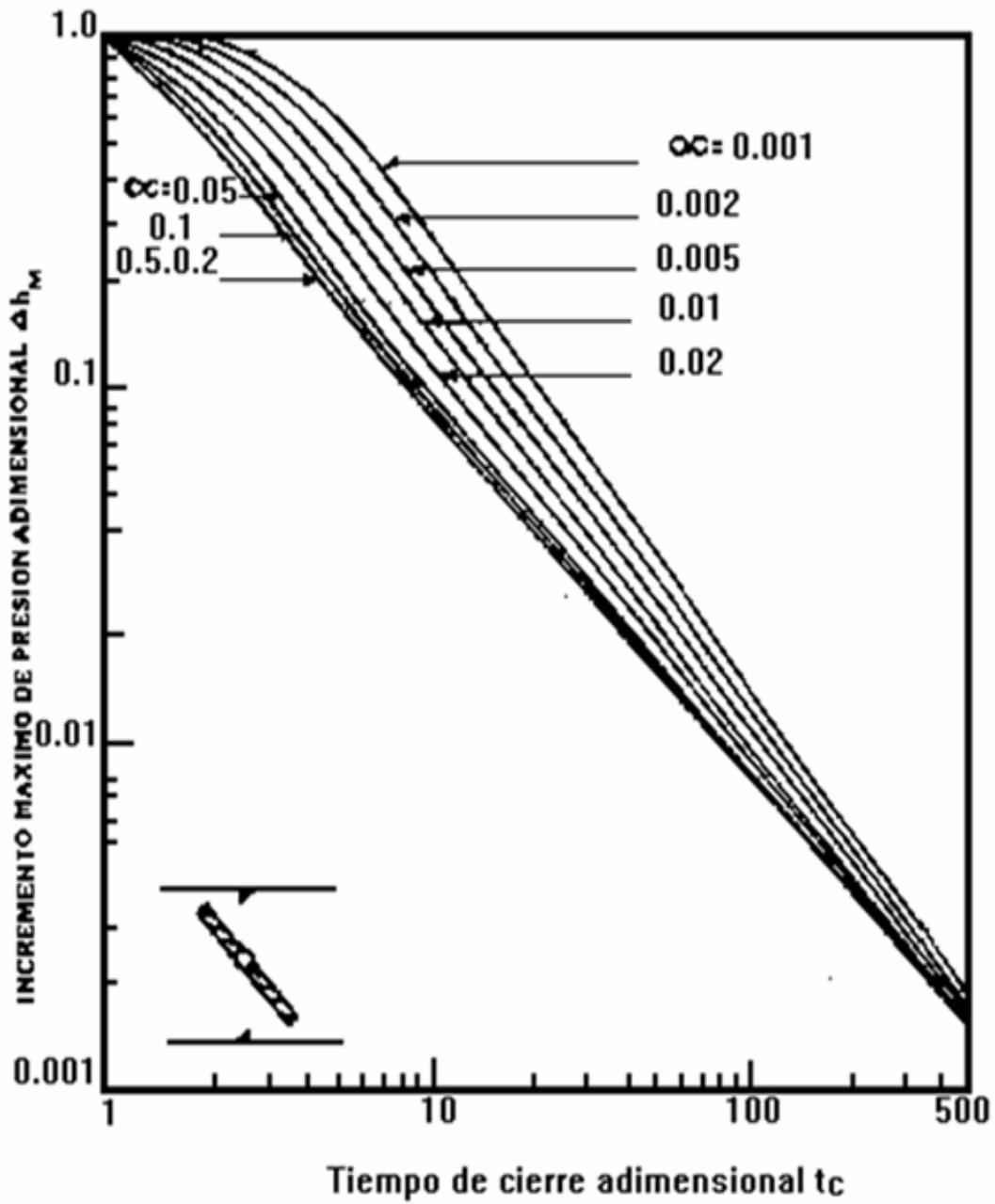


Figura 2.2.12 Incremento máximo de presión en una tubería al cierre de una válvula de mariposa en su final.

2.8 GASTO DE LLENADO

El llenado de la conducción supone la expulsión del aire existente en la tubería por medio de válvulas de admisión-expulsión instaladas en los puntos altos del trazo para ese efecto.

El gasto de llenado se determina acorde con la relación del gasto de bombeo con respecto al gasto máximo de llenado, de la siguiente manera:

Si el gasto de bombeo de la conducción es mayor que el gasto máximo de llenado $Q_{m\acute{a}x}$ (ecuación II.2.43), deberá utilizarse en el llenado y dimensionamiento de las válvulas de aire, el gasto máximo de llenado, el cual está en función de la resistencia más baja Δh de los tubos en el tramo que se analiza, y del área transversal de la tubería A :

$$Q_{\max} = \Delta h \frac{g A}{a} \quad (2.2.45)$$

donde:

- g es la aceleración de la gravedad m/seg^2
- a es la velocidad de las ondas, aproximadamente 1000 m/s.

Sin embargo, si el gasto de bombeo es menor que el gasto máximo de llenado $Q_{m\acute{a}x}$, será el gasto de bombeo el utilizado.

PROCEDIMIENTO

1. Obtener las características geométricas del acueducto en el tramo a estudiar.
2. Obtener la resistencia más baja de las tuberías del tramo que se analiza.
3. Calcular los gastos, de bombeo y máximo de llenado.
4. Determinar el gasto a utilizar a partir de la comparación del gasto de bombeo vs gasto máximo de llenado

Notas:

- a) El gasto de llenado determina la capacidad mínima necesaria de expulsión de aire.
- b) El diseño de la válvula de admisión y expulsión de aire deberá considerar, tanto la capacidad de expulsión como la de admisión ya que pueden ser muy diferentes, predominando en el diseño la mayor.

c) La expulsión del aire no debe generar presiones superiores a 0.14 Pa y la admisión no debe generar depresiones superiores a 0.35 Pa.

2.9 DISEÑO Y UBICACION DE VALVULAS

2.9.1 Válvulas

Entre otros los servicios que ofrecen las válvulas son: regulación de flujo y presión, evitar el retroceso del flujo a través de las bombas, control del aire por medio de la admisión o eliminación, protección por sobrepresiones en tuberías y bombas, y ayudar en la prevención de transitorios (referencia 24).

Existe una amplia variedad de tipos de válvulas para ser usadas con diferentes propósitos, la Tabla 2.2.5 divide a las válvulas en cuatro categorías:

- 1) Válvulas de control
- 2) Válvulas reguladoras de presión
- 3) Válvulas de no retorno
- 4) Válvulas de admisión y expulsión de aire.

2.9.2 Válvulas de control

Estas válvulas tienen la función de controlar las velocidades y presiones del flujo en las conducciones; dentro de este grupo existen válvulas para aislar, regular o seccionar tramos de la conducción. El control del flujo que proveen se debe hacer sin generar transitorios, cavitación excesiva y grandes pérdidas de carga.

Dentro de la clasificación se encuentran válvulas de: mariposa, cono, tapón, globo y compuerta; en la Tabla 2.2.5 se hará una breve descripción de éstas.

En la selección y dimensionamiento de las válvulas de control, deberán observarse los siguientes razonamientos:

- Especificar un programa de operación, incluyendo un tiempo de cierre que no produzca transitorios.
- Seleccionar el tipo y tamaño que no produzca pérdidas excesivas cuando opere totalmente abierta.
- Evitar cavitación excesiva.
- No operar las válvulas con aberturas inferiores a 10%

Tabla 2.2.5 Usos de las válvulas

Tipo de válvula	Función
<i>Válvulas de control</i>	
Disipación de energía y control de cavitación	Controla el flujo y disipa los excesos de energía, además de limitar la cavitación a niveles aceptables
Seccionamiento	Para aislar bombas o secciones de tubería para mantenimiento
<i>Válvulas reguladoras de presión</i>	
Aliviadora de presión	Protege a la tubería de presiones excesivas
Reductora o sostenedora de presión	Mantiene constante la presión en la conducción, se activa hidráulicamente
Anticipadora de transitorio	Protege anticipadamente de sobrepresiones generadas por transitorio, al activarse cuando se inicia éste
<i>Válvulas de no retorno</i>	Impiden el retroceso del flujo
<i>Válvulas de aire</i>	
Válvulas de admisión y expulsión	Admiten y expulsan aire durante el vaciado y llenado respectivamente
Válvula eliminadora de aire.	Eliminan el aire que contiene el agua en solución y que al separarse se acumula en los puntos altos del perfil

Características hidráulicas de las válvulas de control

Coefficiente de flujo.- La presión actuante en la válvula es proporcional al cuadrado de la velocidad de descarga, la única diferencia entre las pérdidas por válvula y otras locales, es que los coeficientes de perdidas en las válvulas varían con la abertura de éstas. En algunas válvulas principalmente pequeñas, se tiene una variación con el número de Reynolds. No obstante, sólo para situaciones en las cuales las pérdidas de carga en la válvula deban ser cuidadosamente determinadas esto tendría importancia.

La relación entre el flujo y la presión actuante puede ser expresada como un coeficiente de flujo. En seguida se dan los más comunes.

$$K_l = \frac{2g \Delta H}{V^2} \quad (2.2.46)$$

$$C_v = \frac{Q}{\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}} \quad (2.2.47)$$

$$C_{d1} = \frac{V}{(2g \Delta H)^{0.5}} \quad (2.2.48)$$

$$C_d = \frac{V}{(2g \Delta H + V^2)^{0.5}} \quad (2.2.49)$$

$$C_{df} = \frac{V}{(2g H_u)^{0.5}} \quad (2.2.50)$$

donde:

ρ es la gravedad específica del fluido
 $\Delta H = \Delta P$ es el incremento de presión
 H_u es la carga de presión aguas arriba de la válvula

Con excepción de la fórmula (2.2.45) las demás son dimensionales, las unidades en SI son: $g=9.81 \text{ m/s}^2$, ΔH en m, V en m/s y Q en m^3/s . En la Ecuación (2.2.45) el gasto Q está dado en gpm y ΔP en psi.

En la comparación de coeficientes de flujo de válvulas idénticas de diferentes tamaños, K_l , C_d y C_{d1} serán iguales para fines prácticos. C_v puede ser escalada de una válvula con diámetro d_2 a una con d_1 utilizando

$$C_{v1} = C_{v2} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \quad (2.2.51)$$

Los coeficientes de flujo de las válvulas varían con el tipo de válvula, así también, dentro del mismo tipo por cambios menores en el diseño. Por lo tanto es importante tener información específica de la válvula a través de los fabricantes.

Válvula en función del sistema de pérdidas.- Al seleccionar una válvula de control, es necesario analizar su comportamiento como parte del sistema y no como un dispositivo aislado, pues la misma válvula instalada en diferentes sistemas tendría porcentajes totalmente diferentes de flujo contra aperturas de la válvula.

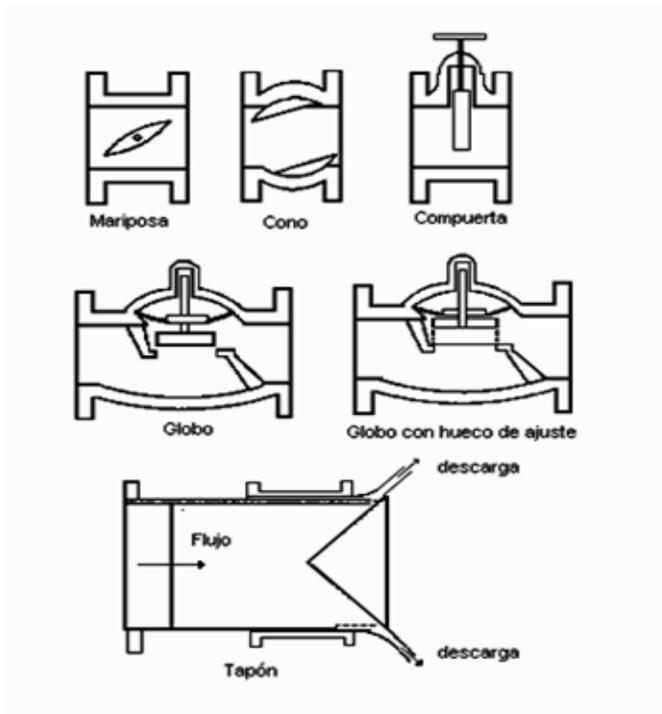


Figura 2.2.13 Válvulas de control.

2.9.2.1. Válvula de mariposa

Una válvula de mariposa (Figura 2.2.13), consiste básicamente de un disco que gira sobre un eje 90 grados para pasar de totalmente abierta a totalmente cerrada. Existen discos de diseños variados; entre otros están los simétricos, asimétricos, excéntricos y de flujo libre. La forma del disco influye en la capacidad del flujo y en el par requerido para accionar la válvula.

El uso de esta válvula se ha incrementado en la actualidad debido a su funcionamiento adecuado, tamaño compacto, ligereza y bajo costo. Es adecuada para regular el flujo por estrangulamiento, así como, para trabajar totalmente cerrada o abierta. Con discos diseñados para aumentar la capacidad de flujo la válvula mariposa se acerca a la de compuerta en la posición totalmente abierta. La cavitación y el par pueden ser controlados por medio del diseño del disco.

En su fabricación se utilizan diversos materiales para el cuerpo, el disco o la base, con la finalidad de adecuarse a cualquier líquido. El diseño de la mayoría de las válvulas de mariposa no es adecuado para estrangulamiento severo (superior al 70%) del flujo en la conducción. El uso más frecuente de éstas es para agua y aire, sin embargo no son adecuadas para aguas residuales o aguas con arenas, porque la parte inferior del eje que soporta el disco acumula arena y genera excesiva abrasión.

2.9.2.2. Válvula de cono

En las válvulas de cono el obturador es un tapón de forma cónica, el cual es elevado al principio, posteriormente el mecanismo lo mueve a una nueva posición hasta alcanzarla, en ese momento el tapón es reacomodado para generar un sello (Figura 2.2.13)

Esta válvula tiene excelentes características en el control de energía para el buen funcionamiento de las bombas.

En la versión de flujo en orificio libre, éste pasa por un diámetro igual al de la tubería, cuando la válvula está totalmente abierta, lo que permite que no haya pérdidas ocasionadas por ésta. Para aberturas intermedias hay dos orificios de estrangulamiento uno en la entrada y el otro en la salida del tapón, lo que da a la válvula de cono mejores características contra la cavitación que las de compuerta o mariposa. Sin embargo su mecanismo de operación requiere mantenimiento especializado.

2.9.2.3. Válvula de tapón

Las válvulas de tapón contienen un tapón cilíndrico con un cortador en éste. Se requiere un giro de 90 grados para que el tapón pase de totalmente abierto a totalmente cerrado. El diseño de la base del tapón no permite la acumulación de arena, evitando de esta manera el desgaste. Las válvulas de tapón pueden obtenerse con tapón de orificio libre o con orificios de áreas reducidas.

Estas válvulas pueden ser del tipo lubricadas o no lubricadas, la más utilizada es del tipo no lubricada con orificio rectangular o redondo. En las válvulas lubricadas el lubricante utilizado deberá cumplir con las normas nacionales e internacionales para abastecimiento de agua. El sistema de lubricación inyecta a presión un lubricante semisólido en la parte superior del tapón y a través de ranuras en la parte inferior, para que de esta manera queden lubricadas las superficies del tapón y la base.

Una válvula de tapón provee un fuerte sello, esta característica la hace adecuada para usarse donde exista gran presión del orden de 1,000 kPa y donde la válvula permanezca cerrada por grandes períodos de tiempo.

2.9.2.4. Válvula de globo

La válvula de globo es adecuada para una gran variedad de aplicaciones en sus versiones automática y manual. Tiene un disco o tapón que se mueve verticalmente dentro de una protuberancia del cuerpo. La dirección normal del flujo es de izquierda a derecha a través de la válvula, por la acción de dos giros de 90 grados el primero ascendente y el segundo hacia afuera, de manera que el flujo es controlado por el disco o tapón.

Las pérdidas de carga y las presiones en este tipo de válvula son mayores que en las válvulas mariposa o las de compuerta, debido a la amplitud de posiciones de apertura en que puede trabajar.

El control puede ser manual o automático. Las válvulas de diámetro pequeño se operan manualmente. Una válvula de globo puede ser adaptada para mantener constante: la presión de entrada, la presión de salida, el porcentaje del flujo y el nivel del tanque de almacenamiento, actúa como una válvula de anticipación a ondas transitorias o una aliviadora de presión.

Esta válvula presenta en la posición totalmente abierta pérdidas más grandes que las de compuerta, cono y mariposa, porque el paso del flujo es complicado; si se adiciona un dispositivo supresor de cavitación, que consiste en uno o más cilindros que contienen muchos orificios pequeños que disipan energía y suprimen la cavitación, mejora el comportamiento al respecto pero las pérdidas para la posición totalmente abierta se incrementan en forma considerable.

El uso más frecuente es donde se requiere estrangulamiento del flujo, tal como, en el control de la presión o flujo.

Las válvulas de globo deben ser utilizadas en aguas claras, nunca deben usarse en agua residual porque sufrirían taponamiento por sólidos.

2.9.2.5. Válvula de compuerta

Las válvulas de compuerta presentan un cuerpo totalmente hermético donde un disco circular, rectangular o compuerta se desliza perpendicular a la dirección del flujo (Figura 2.2.13). Los principales subtipos de estas válvulas son: doble disco y de base flexible.

Este tipo de válvulas en la posición totalmente abierta permiten el paso de un gasto sólo ligeramente menor que el de la tubería sin válvula instalada, esto debido a que la base y las guías se proyectan hacia dentro del flujo. Por lo anterior estas válvulas tienen gran capacidad de descarga, pequeña presión actuante y pérdidas moderadas.

Las válvulas de compuerta son adecuadas únicamente para aislamiento, es decir, para posiciones totalmente abierta o cerrada. Si se usan para estrangular o regular el flujo pueden ser considerablemente dañadas, ya que una pequeña abertura permite una alta capacidad de flujo que genera a su vez grandes vibraciones.

La válvula de compuerta de doble disco es una de las más utilizadas en conducciones de agua limpia. Cuando la línea es presurizada con valores que exceden 1700 kPa y la válvula está cerrada, los discos son presionados hacia afuera por dispositivos de ésta, logrando un cierre a prueba de fugas. El uso de estas válvulas para aguas con gran cantidad de sólidos en suspensión es inadecuado.

Las válvulas de compuerta presentan un desnivel en la base, en éste se acumulan sólidos que impiden que la válvula sea completamente cerrada. La válvula de compuerta de base flexible reduce en forma importante este problema porque su base no presenta el desnivel. En este caso el disco tiene un borde de caucho que es directamente apoyado en el cuerpo de la válvula, esta característica la hace adecuada para trabajar con agua que tenga arena, agua residual, así como agua limpia.

Cabe mencionar que su uso está restringido a tuberías cercanas a la horizontal. Estas válvulas pueden cerrar en forma hermética contra presiones de trabajo de 1380 kPa.

2.9.3 Válvulas reguladoras de presión

2.9.3.1. Válvula aliviadora de presión

Las válvulas aliviadoras de presión son frecuentemente de globo, activadas automáticamente por la presión de la conducción. El objetivo de estas válvulas es abrir rápidamente si la presión excede un valor predeterminado y hacer un cierre lento. Estas válvulas podrían generar serios problemas si no son adecuadamente seleccionadas y operadas.

Si una válvula es sobredimensionada y por esa razón presenta un cierre rápido, generará una elevación transitoria de la presión con la cual se abrirá nuevamente, lo anterior pone en riesgo la propia válvula y las tuberías.

El tiempo de cierre depende de la longitud de la tubería y de la velocidad de la onda. Para predecir en forma segura el transitorio con el cual se determine el tiempo de cierre y apertura de la válvula, deberá utilizarse un programa de cómputo para transitorios.

2.9.3.2. Válvula reductora de presión

Normalmente es tipo globo, siendo meramente una válvula de control especial; por lo que se aplican los mismos principios de dimensionamiento definidos para las válvulas de control. Se utilizan para mantener una presión constante en la línea.

2.9.3.3. Válvula anticipadora de onda

Es una válvula con una solenoide que permite detectar en forma anticipada un transitorio, para que ésta abra o cierre automáticamente, evitando así las sobrepresiones que pudieran generarse. Auxilia de manera importante cuando una bomba es parada por la falla de energía eléctrica, en cuyo caso la onda inicial de baja presión actuante en la descarga de la bomba abre la válvula y el dispositivo de alivio de presión, anticipadamente a la subsecuente onda de alta presión, pudiendo reducir significativamente la presión de la onda.

2.9.4 Válvulas de no retorno

Las válvulas de no retorno (Figura 2.2.14) son instaladas en las tuberías de descarga de las estaciones de bombeo para proteger fundamentalmente a las bombas, también en líneas de descarga para minimizar el retroceso del flujo, con el cual pueden dañarse las bombas y motores. Estas válvulas abren fácilmente, son estables para el flujo hacia adelante y presentan un bajo coeficiente de pérdidas; por otra parte cierran cuando el flujo trata de retroceder.

Cuando no hay flujo en el sistema, la válvula permanece cerrada o casi cerrada debido a la gravedad, un resorte o una combinación de ambos. Al iniciarse el flujo las fuerzas hidrodinámicas abren la válvula.

La proximidad de piezas especiales u otras válvulas que alteran el flujo, constituyen un importante factor que afecta la estabilidad del disco. Si un codo u otra situación que genere disturbio es localizada a corta distancia aguas arriba, la inestabilidad del flujo puede causar que el disco oscile, causando ondas en el sistema.

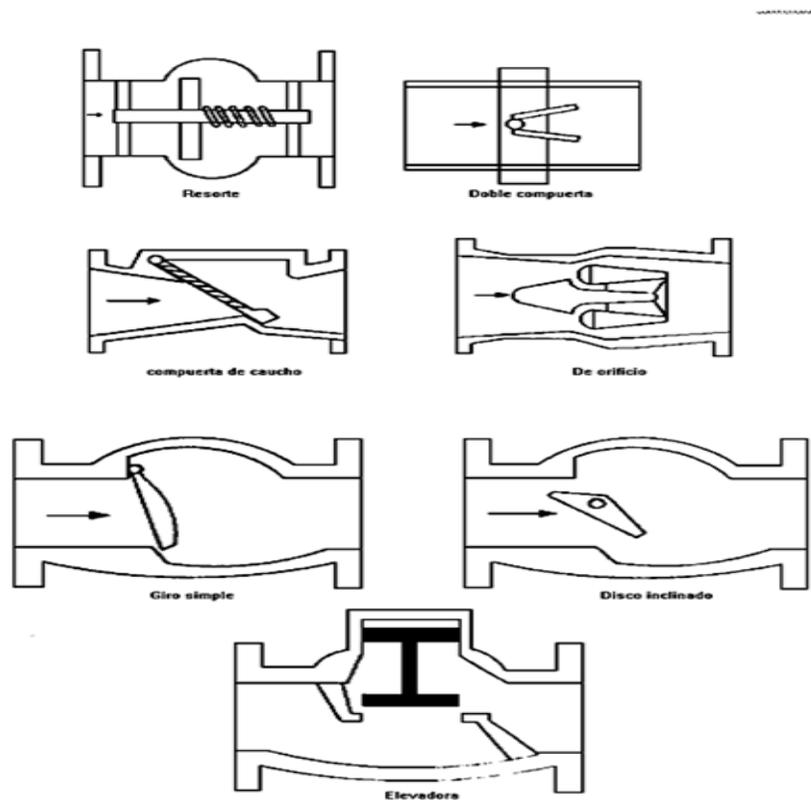


Figura 2.2.14 Válvulas de no retorno.

Existen numerosos diseños adecuados, éstos tienen diferentes características y diseños de cierre (Figura 2.2.14).

2.9.4.1. Válvula de no retorno de giro simple

Es diseñada con un pivote en la parte superior de la periferia del disco (Figura 2.2.14), el cual cierra por gravedad cuando el peso del disco es más grande que las fuerzas dinámicas del flujo. Las características de abertura y cerrado pueden cambiar por rotación del eje, el peso del disco o por adición de contrapesos.

Las válvulas de no retorno de aleta de caucho y de doble compuerta (Figura 2.2.14) son diseños alternativos de las de giro simple. En la primera la aleta no pivotea de un perno porque es flexible, además la base presenta un ángulo que permite un giro corto. En la de doble puerta, el disco es dividido en dos de manera que se tienen giros más cortos para cada puerta.

2.9.4.2. Válvula de no retorno de disco inclinado

También depende de la gravedad para cerrar (Figura 2.2.14), aunque en ésta el disco tiene un giro más corto, ya que el eje de rotación se encuentra justamente por arriba del centro del disco.

2.9.4.3. Válvula de no retorno elevadora

Tiene un flotador que es elevado cuando la fuerza dinámica del fluido excede su peso (Figura 2.2.14).

2.9.4.4. Válvulas de no retorno de resorte y de orificio

Presentan cierres más rápidos (Figura 2.2.14), en el primer caso el resorte impulsa al disco contra el flujo, de tal forma que cuando la fuerza del resorte es mayor que la del flujo se produce un cierre rápido. En la válvula de orificio se tienen cierres excepcionalmente rápidos porque ésta sólo hace un desplazamiento corto para cerrar, además su forma aerodinámica ofrece poca resistencia al flujo.

En la selección de válvulas de no retorno, deberá considerarse que éstas tengan un coeficiente de pérdidas aceptable en flujo hacia adelante y que no generen transitorios al cerrar. Para un sistema donde la velocidad del flujo es lenta, las válvulas de no retorno cerrarán antes que ocurra un flujo en retroceso de magnitud significativa.

Para una válvula dada, la máxima velocidad está en función del porcentaje de flujo en retroceso, siendo dicho porcentaje diferente para cada sistema. La velocidad del flujo en reversa y la elevación asociada de carga por transitorio varían con el tipo de válvula, tamaño y dinámica del sistema.

2.9.5 Válvulas de aire

Para que una conducción presente un comportamiento adecuado en condiciones normales de flujo requiere de válvulas que controlen el aire (Figura 2.2.15), tanto en llenado y vaciado como en operación a flujo establecido.

Cuando la conducción es llenada es necesario expulsar el aire existente para evitar sobrepresiones y cuando es vaciada es necesario admitir aire para evitar depresiones que pongan en peligro la tubería. El agua en condiciones ordinarias contiene aproximadamente un 2% de aire disuelto. La presión en la tubería y la temperatura rigen la solubilidad del aire por lo que en los puntos altos del perfil de la línea éste se separa y queda atrapado, haciendo necesaria su eliminación.

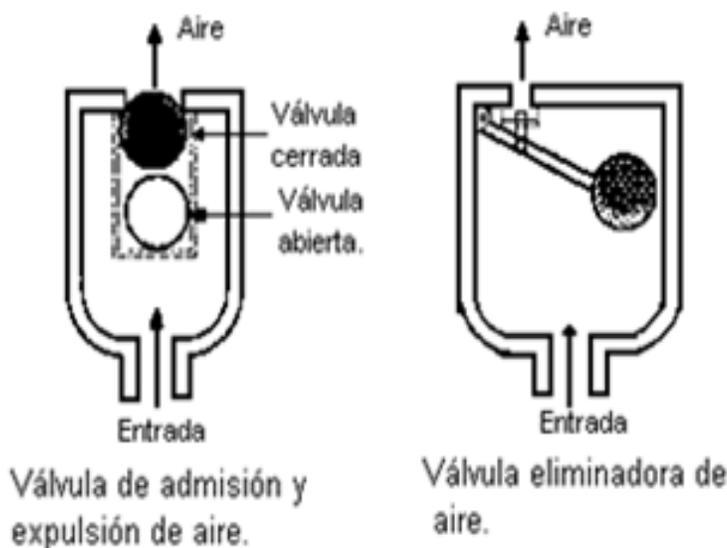


Figura 2.2.15 Válvulas de aire.

Para resolver la problemática descrita existen dos tipos de válvulas de aire: 1) Válvula de admisión y expulsión de aire, y 2) válvula eliminadora de aire, aunque puede resultar un tercer tipo al superponer los efectos de las dos anteriores.

2.9.5.1. Válvulas de admisión y expulsión de aire

Estas válvulas (Figura 2.2.15) generalmente tienen grandes orificios (1/2" a 36") para expulsar o admitir importantes cantidades de aire en las operaciones de llenado y vaciado respectivamente. Deberán ubicarse en los puntos altos del perfil (cerca del gradiente hidráulico) y su montaje debe hacerse vertical sobre el lomo de la tubería. En tramos largos horizontales o con pendiente ascendente deberán colocarse a intervalos de 400 a 800 m.

Contienen un flotador que permanece abajo por gravedad cuando la tubería está vacía o presenta depresión. Cuando la tubería es presurizada entra el agua en la válvula y eleva el flotador hasta sellar el orificio mientras la línea permanezca presurizada no podrá reabrir, para eliminar el aire que pueda acumularse subsecuentemente, siendo necesaria en estos casos la válvula eliminadora.

PROCEDIMIENTO

El dimensionamiento se hace considerando las necesidades tanto de expulsión como de admisión de aire, utilizando para el efecto el gasto de llenado; predominando el dimensionamiento que resulte mayor, considerando un adecuado tiempo de vaciado (8 a 10 hrs).

Dimensionamiento por expulsión. Si el gasto de bombeo es mayor que el gasto máximo de llenado (Ecuación 2.2.43), será el gasto de llenado quien determine la capacidad de expulsión de aire de cada válvula del tramo considerado, cuidando que la sobrepresión sea inferior a 0.14 Pa en el acueducto.

Sin embargo, si el gasto de bombeo es menor al gasto máximo de llenado el gasto de bombeo será el utilizado como gasto de llenado para dimensionar las válvulas.

Cabe hacer notar que si en el llenado por tramo intervienen más de una válvula en un punto, el gasto de llenado que es igual al de expulsión deberá dividirse entre las válvulas que participen.

Dimensionamiento por admisión. La capacidad de admisión de aire se determina al igualarse ésta, al gasto máximo de vaciado Q_{mv} considerando una depresión no mayor a 0.35 Pa y un adecuado tiempo de drenado. Lo anterior se basa en la dependencia del gasto de vaciado al gasto de aire que pueda ser admitido por las válvulas que actúen y a la pendiente máxima en el tramo (ver 3.2.2 de la parte I de este tema).

2.9.5.2. Válvulas eliminadoras de aire

Este tipo de válvula (Figura 2.2.15) presenta un orificio pequeño (1/2" o menor), por el cual se eliminan pequeñas cantidades de aire acumuladas en los puntos altos de la línea, cuando ésta opera a flujo establecido. Los orificios de la válvula son controlados por un émbolo activado por un sistema de flotación.

La acumulación de aire en el cuerpo de la válvula hace que el flotador baje y se abra el orificio, con lo cual, el aire es eliminado y el flotador vuelve a subir permitiendo el cierre del orificio.

Cabe hacer notar que las funciones de las válvulas eliminadoras de aire y de admisión y expulsión son requeridas en varios tramos de la conducción, en función de: 1) el perfil del acueducto; 2) la frecuencia de llenado y vaciado; 3) la cantidad de aire que es necesario admitir; y 4) la resistencia de la tubería al colapso por

depresiones o sobrepresiones. Esto se soluciona con la instalación en paralelo de las válvulas de admisión-expulsión y aliviadora, generando un tercer tipo denominado válvula combinada. La instalación puede hacerse separada o conectadas.

En conducciones donde la velocidad del flujo es mayor de 3 m/s o las condiciones de operación puedan obligar a efectuar cierres rápidos de la válvula de admisión y expulsión, deberá instalarse una válvula de no retorno que reduzca la velocidad del agua antes de llegar al flotador; evitando así posibles sobrepresiones.

3 EJEMPLO DE DISEÑO DE UNA CONDUCCION

Se desea diseñar la línea de conducción cuyo trazo se muestra en la figura II.3.1, para abastecer a los fraccionamientos A y B que se indican. La población inicial de los fraccionamientos es de 1,820 y 8,987 habitantes respectivamente. Se asume un periodo de diseño de 20 años.

En los dos fraccionamientos las dotaciones son de 250 (l/hab)/día, con un coeficiente de variación diaria de 1.2, y un coeficiente de variación horaria de 1.5.

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.

Los datos de la curva de aforo del pozo son los siguientes:

Profundidad del nivel dinámico (m)	Gasto (l/s)
10	50
20	70
30	90
50	120
55	130
60	135

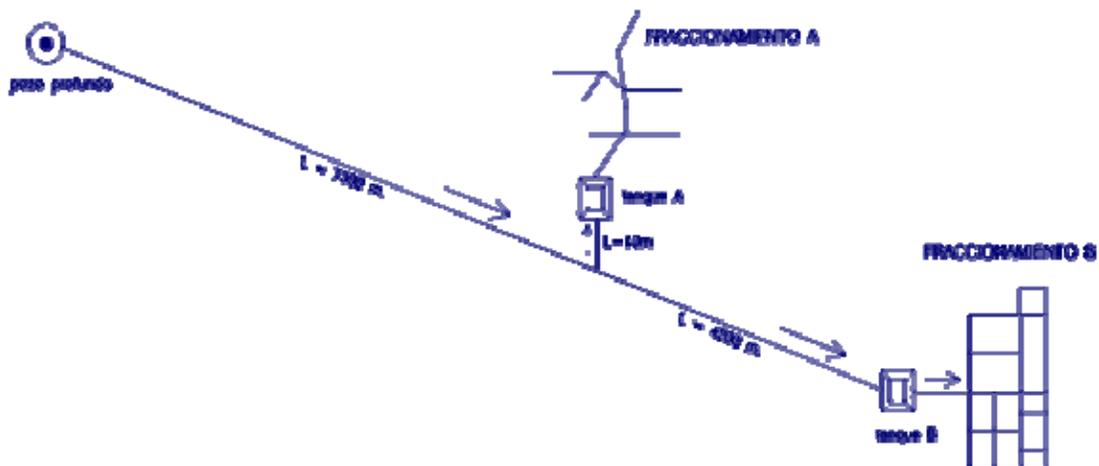


Figura 2.3.1 Trazo de la red de conducción para abastecer de agua a los fraccionamientos A y B.

3.1 GASTOS DE DISEÑO

Se calcula primeramente el crecimiento esperado de la población de los dos fraccionamientos dentro del periodo de diseño, con el uso de los procedimientos indicados en el tomo de Datos Básicos de este manual. La Tabla 2.3.1 muestra la población calculada para cada año.

Tabla 2.3.1 Población esperada por años

Año	Población (hab)	
	Fraccionamiento A	Fraccionamiento B
0	1,820	8,987
1	1,866	9,354
2	1,913	9,736
3	1,962	10,133
4	2,011	10,546
5	2,062	10,977
6	2,115	11,425
7	2,168	11,891
8	2,223	12,376
9	2,279	12,881
10	2,337	13,407
11	2,396	13,954
12	2,457	14,524
13	2,519	15,116
14	2,583	15,733
15	2,648	16,375
16	2,715	17,044
17	2,784	17,739
18	2,854	18,463
19	2,927	19,217
20	3,000	20,000

La conducción funcionará las 24 horas del día, por lo tanto, los gastos que se requerirán hacia cada fraccionamiento se calculan como:

$$Q = ((250 \times \text{Población})/86400) \times 1.2$$

La Tabla 2.3.2 muestra los gastos calculados de esta forma y su suma (el gasto total) por años. El gasto total calculado para el último año representa el gasto de diseño para la conducción, y es igual a 79.86 l/s.

Tabla 2.3.2 Gastos requeridos por años

Año	Gasto (l/s)		
	Fraccionamiento A	Fraccionamiento B	Total
0	6.32	31.20	37.52
1	6.48	32.48	38.96
2	6.64	33.80	40.45
3	6.81	35.18	41.99
4	6.98	36.62	43.60
5	7.16	38.11	45.27
6	7.34	39.67	47.01
7	7.52	41.29	48.82
8	7.72	42.97	50.69
9	7.91	44.73	52.64
10	8.11	46.55	54.67
11	8.32	48.45	56.77
12	8.53	50.43	58.96
13	8.75	52.49	61.23
14	8.97	54.63	63.60
15	9.19	56.86	66.05
16	9.43	59.18	68.61
17	9.67	61.59	71.26
18	9.91	64.11	74.02
19	10.16	66.72	76.88
20	10.42	69.45	79.86

3.2 POLITICA DE OPERACION

Es difícil garantizar que en todo momento, las dos descargas funcionen simultáneamente. Ello debe tomarse en cuenta para considerar el caso en que todo el gasto se vaya hacia una sola descarga. Por razones 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, es por ello que se propone diseñar el diámetro que abastece al fraccionamiento A de tal manera que el gasto de derivación sea ligeramente mayor al calculado en el capítulo anterior 3.1 para lograr que el tanque A se llene primero que el B. Así, podrá suspenderse el bombeo cuando éste último se encuentre lleno.

El corte del servicio hacia el tanque B se hará ordenando apagar el equipo de bombeo de la planta. Es decir, en el tanque B no se operarán válvulas de control o seccionamiento.

Para evitar que cuando todo el gasto se vaya al tanque B se provoquen cambios fuertes de presión y una operación del equipo de bombeo fuera del rango recomendado, se propone un mismo diámetro desde el pozo profundo hasta el poblado B.

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 con una válvula de no retorno, paralelo al de llenado.

La fuente de abastecimiento es un pozo. Ello determina que sólo un equipo de bombeo puede colocarse.

3.3 CRITERIO DE MODELACION

De acuerdo a 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 del paso 1 se presentan presiones inadecuadas, se buscará el dispositivo de alivio más adecuado para resolver el problema. Esto se logra proponiendo repetidas veces el dispositivo y corriendo el programa para simular el transitorio para un paro accidental del equipo de bombeo.
3. Si en el paso número 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 proponiendo repetidas veces el dispositivo y corriendo el programa para simular el transitorio para un paro accidental del equipo de bombeo.

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

3.4 DIAMETRO ECONOMICO

De la ecuación 1.3.26 el diámetro económico teórico es

$$D_0 = 1.2\sqrt{0.07986} = 0.34 \text{ m}$$

Cumpliendo con el paso número 3 para el caso de gastos mayores a 10 l/s de la subunidad 2.6.2.2, para materiales de PVC y fibrocemento, los primeros tres diámetros a analizar son:

	PVC	FIBROCEMENTO
DIAMETRO NOMINAL (mm)	315	300
	355	350
	400	400

En las Figuras 2.3.2 a 2.3.7 se muestra el funcionamiento hidráulico para flujo establecido para los 3 diámetros en cada uno de los materiales, y en función de las presiones se proponen las resistencias indicadas en las mismas figuras.

El análisis económico para el material de fibrocemento se muestra en las Tablas 2.3.3 a 2.3.6. El análisis económico para el material de PVC (que no se incluye aquí para ahorrar espacio) da un costo mayor. Se obtiene que en los dos materiales, los diámetros de menor dimensión son los de menor costo total. Enseguida se debe analizar el diámetro de 250 mm en los dos materiales.

Para el diámetro de 250 mm en la Figura 2.3.8 se muestra el funcionamiento hidráulico para el material de PVC y en la Figura 2.3.9 para el material de fibrocemento.

Se observa sin embargo, que en los dos materiales al inicio de la conducción se requiere una resistencia de trabajo de 20 Pa, lo cual en los dos materiales no es comercial, cuya situación determina el caso de una solución no factible.

Con ello, se obtiene que el material más económico es el de fibrocemento con un diámetro de 300 mm.

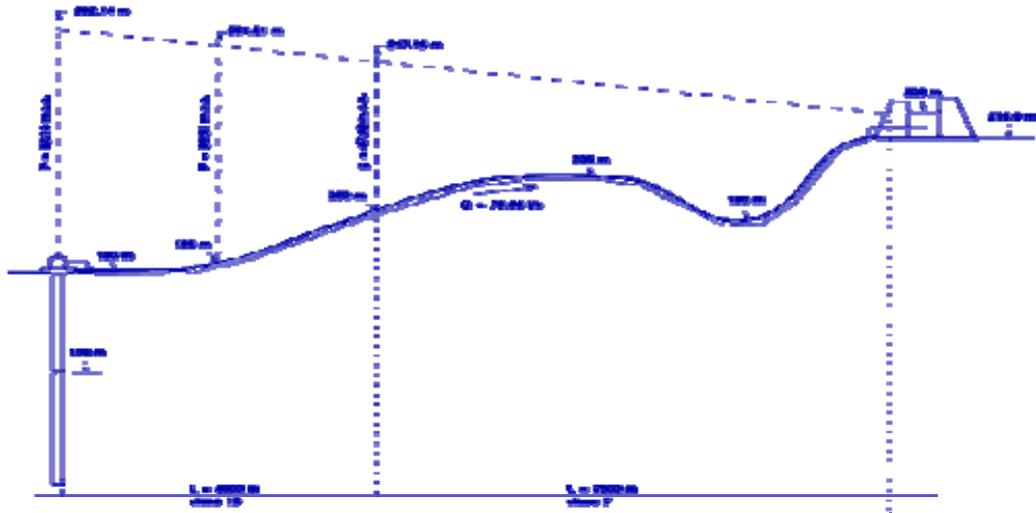


Figura 2.3.2 Funcionamiento hidráulico para tubo de PVC de 315 mm de diámetro nominal

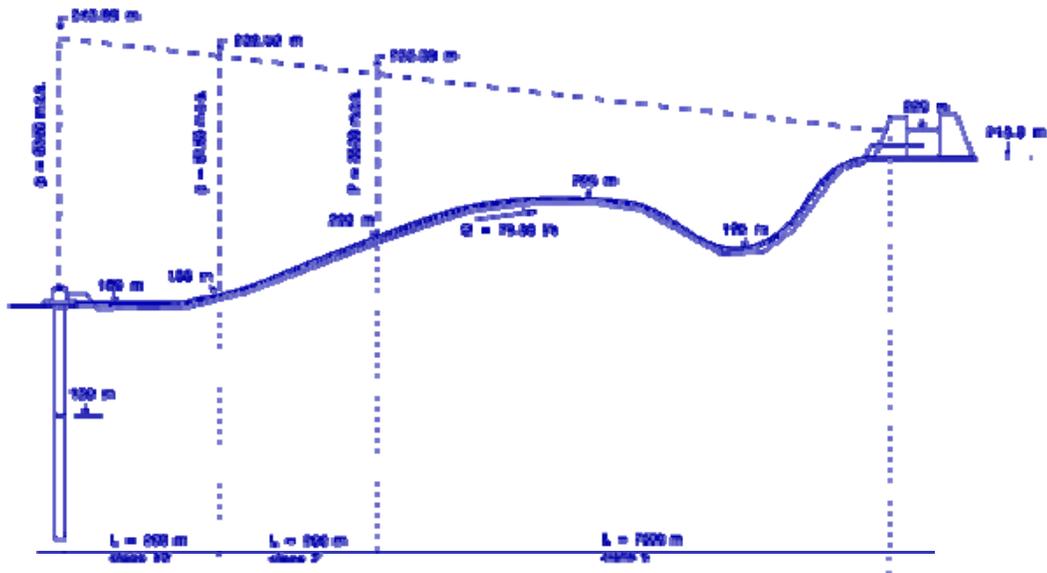


Figura 2.3.3 Funcionamiento hidráulico para tubo de PVC de 355 mm de diámetro nominal

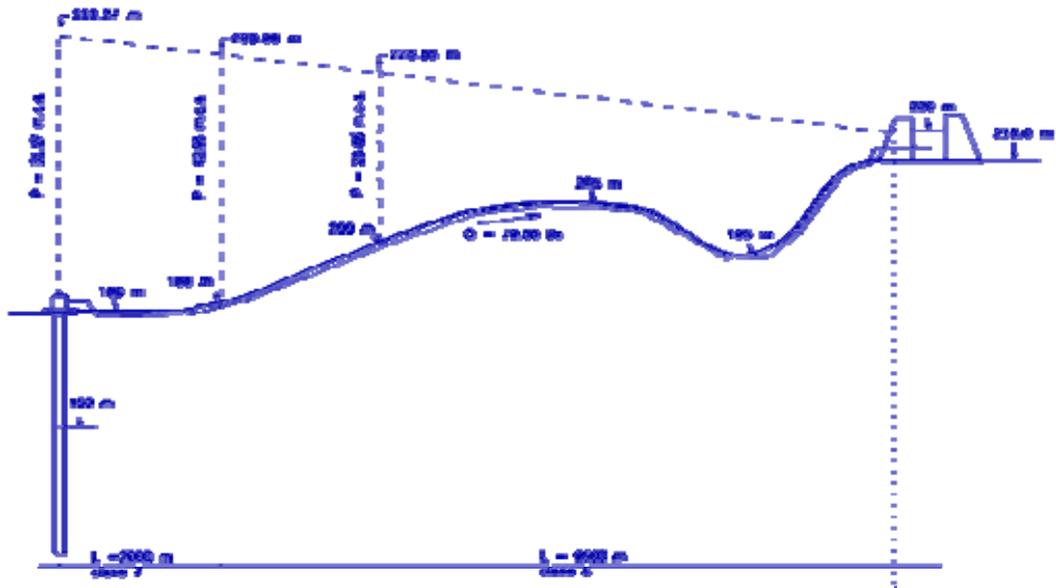


Figura 2.3.4 Funcionamiento hidráulico para tubo de PVC de 400 mm de diámetro nominal

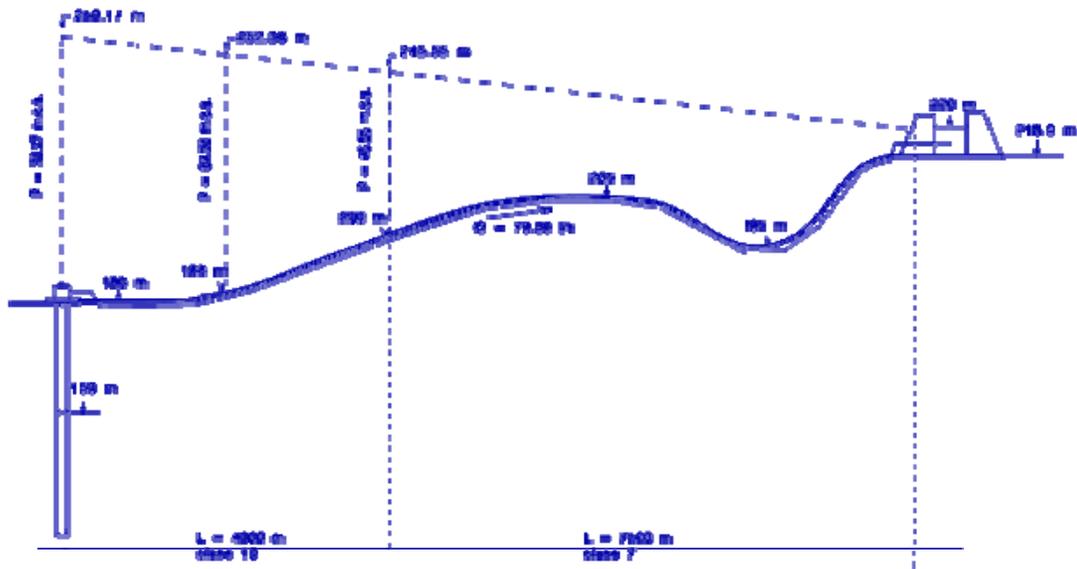


Figura 2.3.5. Funcionamiento hidráulico para tubo de fibrocemento de 300 mm de diámetro nominal

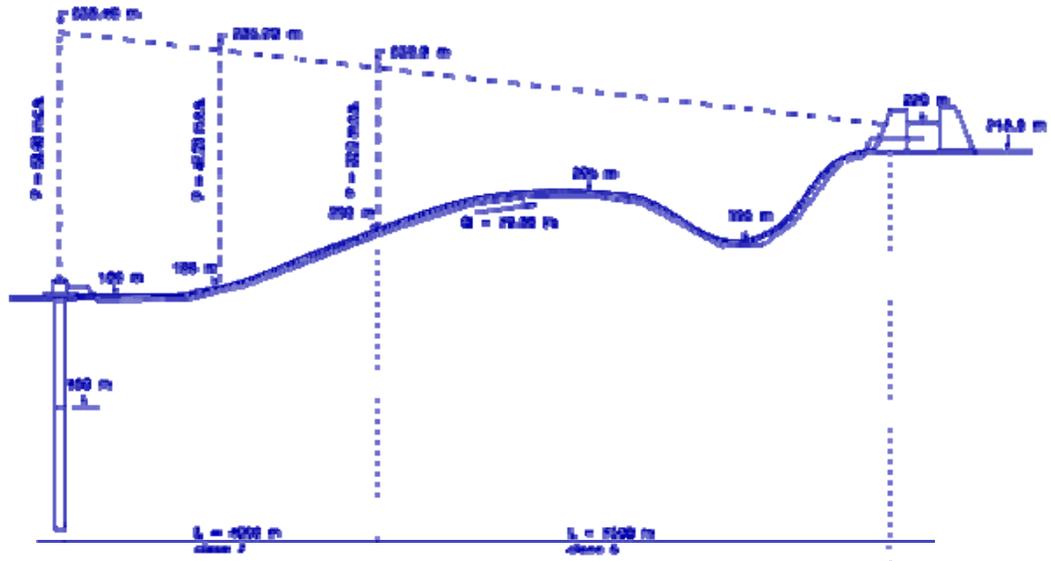


Figura 2.3.6 Funcionamiento hidráulico para tubo de fibrocemento de 350 mm de diámetro nominal

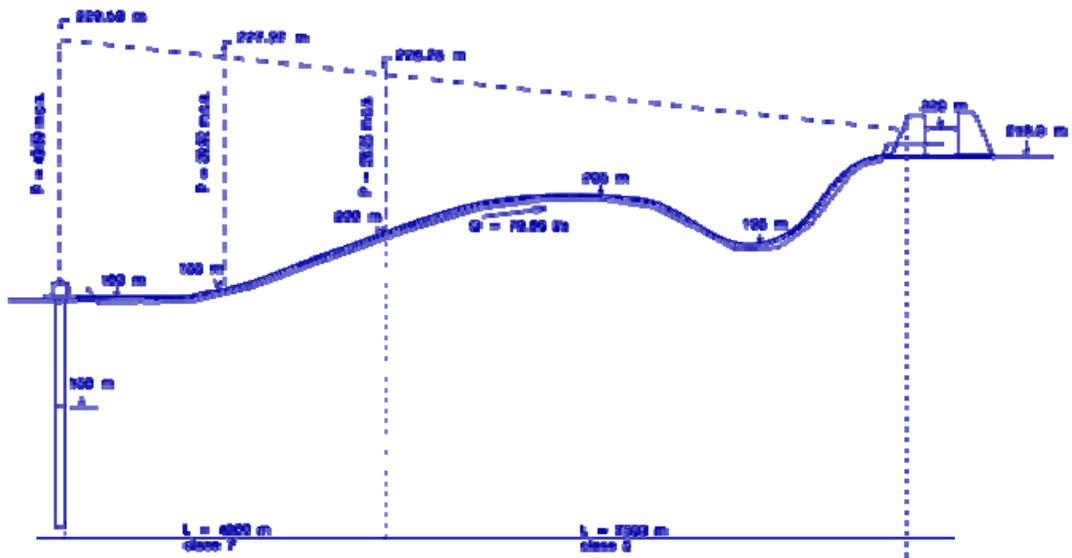


Figura 2.3.7 Funcionamiento hidráulico para tubo de fibrocemento de 400 mm de diámetro nominal

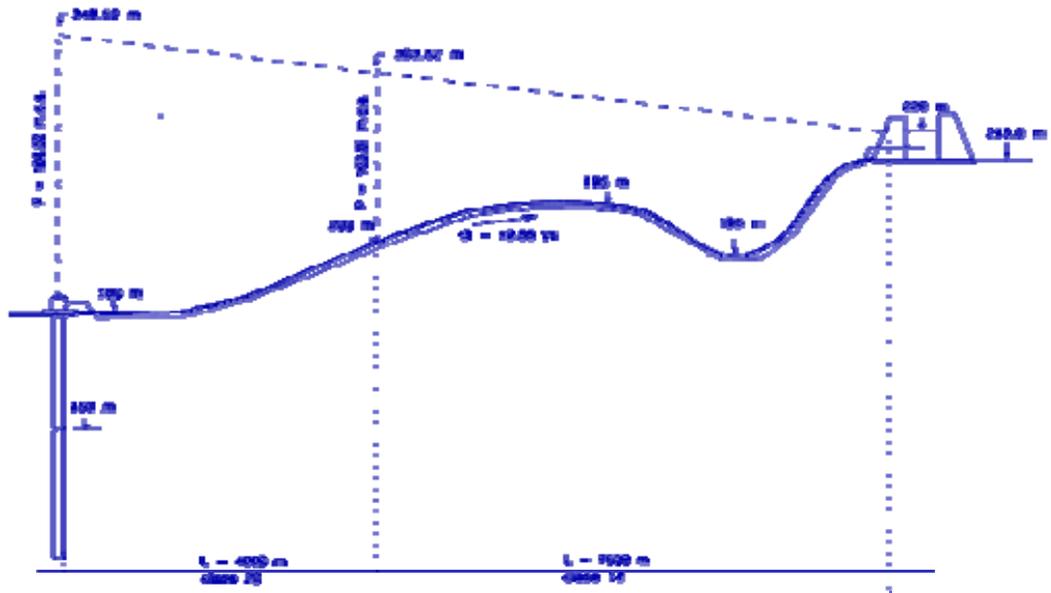


Figura 2.3.8 Funcionamiento hidráulico para tubo de PVC de 250 mm de diámetro nominal

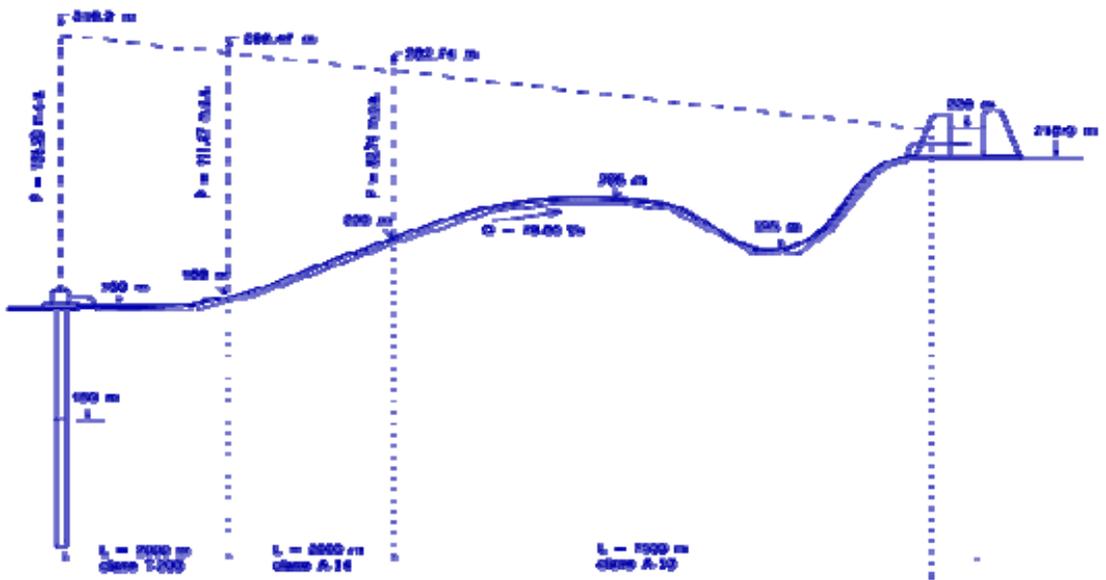


Figura 2.3.9 Funcionamiento hidráulico para tubo de fibrocemento de 250 mm de diámetro nominal

Tabla 2.3.3 Formato para obtener el costo de construcción

MATERIAL DEL TUBO: ____ AC ____ LONGITUD: ____ 11,500 ____ m

CONCEPTO	Diámetro: 300 mm. Clases: 10, 7				Diámetro: 350 mm Clases: 7, 5				Diámetro: 400 mm. Clases: 7, 5			
	Cantidad	Unid.	P.U.	Importe	Cantidad	Unid.	P.U.	Importe	Cantidad	Unid.	P.U.	Importe
Excav. Mat. clase I	5,278.5	m ³	3.27	17,260.70	5,796.0	m ³	3.27	18,952.92	6,900.0	m ³	3.27	22,563.0
Excav. Mat. clase II	5,278.5	m ³	7.43	39,219.26	5,796.0	m ³	7.43	43,064.28	6,900.0	m ³	7.43	51,267.0
Excav. Mat. clase III	2,639.0	m ³	33.96	89,620.44	2,898.0	m ³	33.96	98,416.08	3,450.0	m ³	33.96	117,162
Plantilla apisonada	977.5	m ³	14.62	14,291.05	1,035.0	m ³	14.62	15,131.70	1,150.0	m ³	14.62	16,813.0
Inst. junteo y prueba de tubería	11,500.0	m	9.00	103,500.0	11,500	m	9.00	103,500.0	11,500.0	m	10.0	115,000
Relleno compactado	5,865.0	m ³	11.26	66,039.90	6,727.5	m ³	11.26	75,751.65	8,050.0	m ³	11.26	90,643.0
Relleno a volteo	6,353.5	m ³	1.96	12,452.86	6,727.5	m ³	1.96	13,185.90	8,050.0	m ³	1.96	15,778.0
Atraques de concreto f'c = 90	4.0	m ³	349.28	1,397.12	4.0	m ³	349.28	1,397.12	4.0	m ³	349.28	1,397.12
Costo de tubería clase 10	4,000.0	m	125.0	500,000.0		m				m		
clase 7	7,500.0	m	89.0	667,500.0	4000.0	m	142.0	568,000.0	2,000.0	m	178.0	356,000
clase 5					7500.0	m	124.0	930,000.0	9,500.0	m	153.0	1,453,50
Costo total de la conducción	1,511,281.30				1,867,399.7				2,240,123.10			

Tabla 2.3.4 Formato para obtener el costo total a valor presente

MATERIAL DEL TUBO: AC DIAMETRO NOMINAL: 300 mm DIAMETRO INTERIOR: 300 mm COEF. DE RUG: 0.025 mm
 COSTO DE UN K.W.H.: 0.18 CARGA ESTÁTICA H_{est} : 70.00 m EFICIENCIA DE BOMBA: 0.80 NUMERO DE HORAS DE BOMBEO: 24
 TASA DE ACTUALIZACIÓN: 12 %

Año	Gasto Q (l/s)	Pérdidas de carga h_f (m)	Pérdidas menores $h_m=4\% h_f$ (m)	Carga de la bomba H (m)	Potencia (H.P.)	Potencia (K.W.H.)	Costos de construcción o bombeo (\$)	Costo anual a valor presente (\$)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	37.52	Costo de construcción						1,511,281.30
1	38.96	10.02	0.40	80.42	51.53	38.43	60,596.42	54,103.95
2	40.45	10.74	0.43	81.17	54.00	40.27	63,497.74	50,620.01
3	42.00	11.54	0.46	82.00	56.64	42.24	66,604.03	47,408.38
4	43.60	12.35	0.49	82.84	59.41	44.30	69,852.24	44,392.91
5	45.27	13.19	0.53	83.72	62.34	46.49	73,305.43	41,596.45
6	47.01	14.18	0.57	84.75	65.53	48.87	77,058.22	39,040.54
7	48.82	15.19	0.61	85.80	68.89	51.37	81,000.22	36,641.73
8	50.69	16.23	0.65	86.88	72.43	54.01	85,162.97	34,396.77
9	52.64	17.43	0.70	88.13	76.30	56.90	89,719.92	32,354.82
10	54.67	18.67	0.75	89.42	80.40	59.95	94,529.16	30,436.33
11	56.77	20.01	0.80	90.81	84.79	63.23	99,701.06	28,662.09
12	58.96	21.47	0.86	92.33	89.54	66.77	105,282.94	27,024.03
13	61.23	23.04	0.92	93.96	94.62	70.56	111,259.01	25,498.24
14	63.60	24.74	0.99	95.73	100.14	74.67	117,739.66	24,091.93
15	66.05	26.49	1.06	97.55	105.97	79.02	124,598.74	22,764.00
16	68.61	28.45	1.14	99.59	112.38	83.80	132,135.84	21,554.55
17	71.26	30.48	1.22	101.70	119.20	88.89	140,161.75	20,413.89
18	74.02	32.75	1.31	104.06	126.69	94.47	148,960.30	19,370.90
19	76.89	35.07	1.40	106.47	134.65	100.41	158,326.49	18,382.91
20	79.86 (Q de diseño)	37.66	1.51	109.17	143.39	106.93	168,607.22	17,479.13
Costo total a valor presente								2,147,522.86

(5) = (3)+(4)+ H_{est} (7) = $0.7457 \times (6)$ (9) = (8) / (1+r)ⁱ

Potencia es $HP = \frac{\gamma QH}{76\eta}$ Costo de bombeo = Potencia(KWH).Costo(KWH).N.365

Q=gasto(m³/s), H=carga de la bomba, γ =peso específico del agua (1000 N/m³), η =eficiencia de la bomba (adimen.)
 r=tasa de actualización, i=año, N=número de horas de bombeo/día, Costo(KWH)=costo de un K.W.H., H_{est} =carga estática

Tabla 2.3.5 Formato para obtener el costo total a valor presente

MATERIAL DEL TUBO: AC DIAMETRO NOMINAL: 350 mm DIAMETRO INTERIOR: 350 mm COEF. DE RUG: 0.025 mm
 COSTO DE UN K.W.H.: 0.18 CARGA ESTÁTICA H_{est}: 70.00 m EFICIENCIA DE BOMBA: 0.80 NUMERO DE HORAS DE BOMBEO: 24
 TASA DE ACTUALIZACIÓN: 12 %

Año	Gasto Q (l/s)	Pérdidas de carga h _f (m)	Pérdidas menores h _m =4%h _f (m)	Carga de la bomba H (m)	Potencia (H.P.)	Potencia (K.W.H.)	Costos de construcción o bombeo (\$)	Costo anual a valor presente (\$)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	37.52	Costo de construcción						1,867,399.70
1	38.96	4.74	0.19	74.93	48.01	35.80	56,449.44	50,401.29
2	40.45	5.08	0.20	75.28	50.08	37.34	58,877.71	46,936.95
3	42.00	5.45	0.22	75.67	52.27	38.98	61,463.66	43,749.49
4	43.60	5.83	0.23	76.06	54.54	40.67	64,128.46	40,755.29
5	45.27	6.23	0.25	76.48	56.94	42.46	66,950.93	37,990.65
6	47.01	6.69	0.27	76.96	59.50	44.37	69,962.62	35,445.65
7	48.82	7.16	0.29	77.45	62.19	46.38	73,131.98	33,082.41
8	50.69	7.65	0.31	77.96	65.00	48.47	76,427.50	30,868.57
9	52.64	8.21	0.33	78.54	68.00	50.71	79,959.53	28,835.03
10	54.67	8.80	0.35	79.15	71.17	53.07	83,680.78	26,943.39
11	56.77	9.42	0.38	79.80	74.51	55.56	87,607.01	25,185.28
12	58.96	10.11	0.40	80.51	78.07	58.22	91,801.30	23,563.57
13	61.23	10.84	0.43	81.27	81.84	61.03	96,232.10	22,054.39
14	63.60	11.64	0.47	82.11	85.89	64.05	100,994.04	20,665.43
15	66.05	12.45	0.50	82.95	90.11	67.20	105,960.96	19,358.90
16	68.61	13.37	0.53	83.90	94.68	70.60	111,322.08	18,159.32
17	71.26	14.32	0.57	84.89	99.49	74.19	116,982.79	17,037.98
18	74.02	15.37	0.61	85.98	104.68	78.06	123,085.01	16,006.06
19	76.89	16.46	0.66	87.12	110.18	82.16	129,549.89	15,041.73
20	79.86 (Q de diseño)	17.67	0.71	88.38	116.09	86.57	136,503.58	14,151.02
Costo total a valor presente								2,433,640.10

(5) = (3)+(4)+H_{est} (7) = 0.7457x(6) (9) = (8) / (1+r)ⁱ

$$\text{Potencia HP} = \frac{\gamma Q H}{76 \eta} \quad \text{Costo de bombeo} = \text{Potencia(KWH)} \cdot \text{Costo(KWH)} \cdot N \cdot 365$$

Q=gasto(m³/s), H=carga de la bomba, γ=peso específico del agua (1000 N/m³), η=eficiencia de la bomba (adimen.)
 r=tasa de actualización, i=año, N=número de horas de bombeo/día, Costo(KWH)=costo de un K.W.H., H_{est}=carga estática

Tabla 2.3.6 Formato para obtener el costo total a valor presente

MATERIAL DEL TUBO: AC DIAMETRO NOMINAL: 400 mm DIAMETRO INTERIOR: 400 mm COEF. DE RUG: 0.025 mm
 COSTO DE UN K.W.H.: 0.18 CARGA ESTÁTICA H_{est} : 70.00 m EFICIENCIA DE BOMBA: 0.80 NUMERO DE HORAS DE BOMBEO: 24
 TASA DE ACTUALIZACIÓN: 12 %

Año	Gasto Q (l/s)	Pérdidas de carga h_f (m)	Pérdidas menores $h_m=4\% h_f(m)$	Carga de la bomba H (m)	Potencia (H.P.)	Potencia (K.W.H.)	Costos de construcción o bombeo (\$)	Costo anual a valor presente (\$)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	37.52	Costo de construcción						2,240,123.10
1	38.96	2.48	0.10	72.58	46.51	34.68	54,683.42	48,824.49
2	40.45	2.66	0.11	72.77	48.41	36.10	56,922.48	45,378.25
3	42.00	2.85	0.11	72.96	50.40	37.58	59,256.14	42,178.19
4	43.60	3.05	0.12	73.17	52.47	39.13	61,700.18	39,212.06
5	45.27	3.26	0.13	73.39	54.64	40.75	64,254.60	36,460.65
6	47.01	3.50	0.14	73.64	56.94	42.46	66,950.93	33,919.81
7	48.82	3.75	0.15	73.90	59.34	44.25	69,773.40	31,563.11
8	50.69	4.00	0.16	74.16	61.83	46.11	72,706.25	29,365.58
9	52.64	4.30	0.17	74.47	64.48	48.08	75,812.54	27,339.54
10	54.67	4.60	0.18	74.78	67.24	50.14	79,060.75	25,455.84
11	56.77	4.92	0.20	75.12	70.14	52.30	82,465.64	23,707.53
12	58.96	5.28	0.21	75.49	73.21	54.59	86,077.51	22,094.38
13	61.23	5.66	0.23	75.89	76.43	56.99	89,861.83	20,594.45
14	63.60	6.08	0.24	76.32	79.83	59.53	93,866.90	19,207.08
15	66.05	6.50	0.26	76.76	83.39	62.18	98,045.42	17,912.75
16	68.61	6.98	0.28	77.26	87.18	65.01	102,507.77	16,721.49
17	71.26	7.02	0.28	77.30	90.60	67.56	106,528.6	15,515.38
18	74.02	8.02	0.32	78.34	95.37	71.12	112,142.02	14,583.03
19	76.89	8.58	0.34	78.92	99.81	74.43	117,361.22	13,626.53
20	79.86 (Q de diseño)	9.21	0.37	79.58	104.53	77.95	122,911.56	12,741.97
Costo total a valor presente								2,776,533.21

$$(5) = (3)+(4)+H_{est} \quad (7 = 0.7457x(6)) \quad (9) = (8) / (1+r)^i$$

$$\text{Potencia HP} = \frac{\gamma QH}{76\eta} \quad \text{Costo de bombeo} = \text{Potencia(KWH)}. \text{Costo(KWH)}. N.365$$

Q=gasto(m³/s), H=carga de la bomba, γ =peso específico del agua (1000 N/m³), η =eficiencia de la bomba (adimen.)
 r=tasa de actualización, i=año, N=número de horas de bombeo/día, Costo(KWH)=costo de un K.W.H., H_{est} =carga estática

3.5 DISEÑO DE LA DERIVACION

La operación de la conducción a flujo establecido con la derivación se muestra en la Figura 2.3.10.

Se procede a obtener el diámetro de la derivación hacia el tanque del fraccionamiento A.

Sin considerar las pérdidas menores y tomando en cuenta la presión en el punto de conexión de la derivación hacia el fraccionamiento A, y usando la ecuación 1.3.12 con los siguientes datos:

$$\begin{aligned} Q &= 10.42 \times 1.15 = 11.98 \text{ l/s} \\ g &= 9.81 \text{ m/s}^2 \\ S_f &= (230.61 - 210) / 10 = 2.061 \\ \nu &= 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ \epsilon &= 0.03 \text{ mm para material de fibrocemento,} \end{aligned}$$

se obtiene un diámetro de 0.0415 m, con el cual se obtiene una velocidad de 8.86 m/s, la cual es demasiado alta.

Se propone colocar un tubo adecuado para que se presente una velocidad aceptable e incorporar un orificio disipador de energía.

En un tubo de asbesto cemento de 100 mm de diámetro se genera una velocidad aceptable de 1.52 m/s y una pérdida de energía de 0.22 m en el tramo de 10 m de longitud, usando la fórmula 1.3.7.

Entonces, el orificio disipador necesita generar una pérdida de $230.61 - 210 - 0.22 = 20.39$ m.

Con la fórmula general de pérdida local (ecuación 1.3.8) y usando la velocidad del agua en el tubo, es necesario colocar un orificio con un valor de $K = 170$.

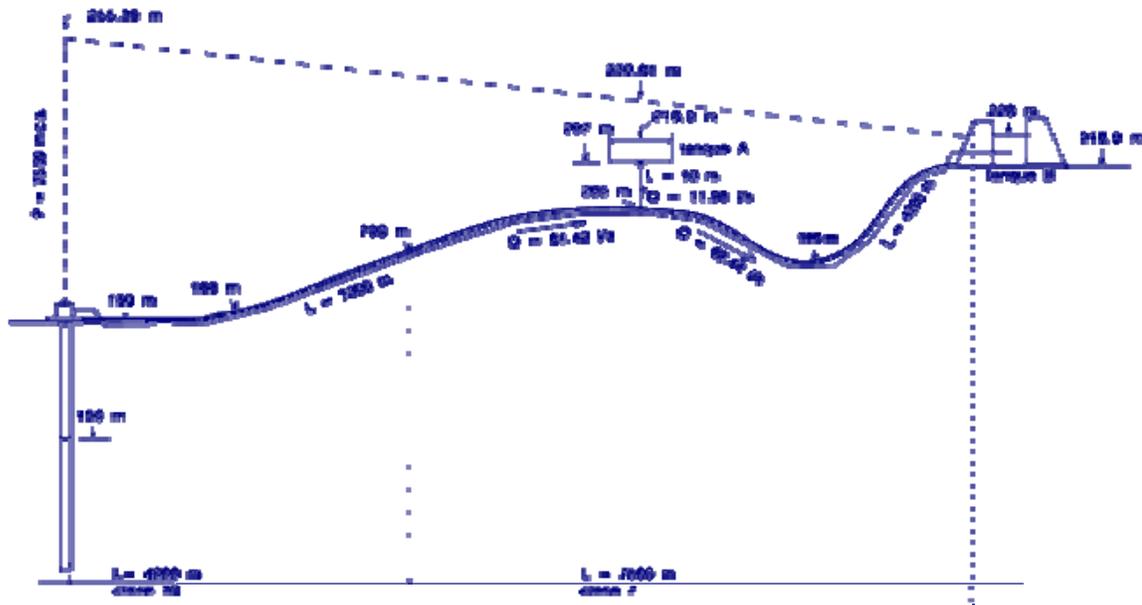


Figura 2.3.10 Funcionamiento con la derivación a los tanques A y B para el tubo de fibrocemento de 300 mm de diámetro nominal

3.6 SELECCION DE LA BOMBA

Como se muestra en la Figura 2.3.10, la carga H de la bomba es igual 105.39 m y el gasto de bombeo es 81.42 l/s igual a 1290.74 gal/min.

Se colocará una bomba de turbina compuesta por un determinado número de pasos. Entonces, la carga de la bomba para varios números de pasos se obtiene dividiendo la carga H entre el número de pasos:

PASOS	CARGA (m)	CARGA (pies)
1	105.39	345.77
2	52.70	172.90
3	35.13	115.26
4	26.35	86.45
5	21.08	69.16
6	17.57	57.64

Se escoge una bomba vertical marca Nassa Johnston integrada por 4 pasos, impulsor número NJ 050320 y 11 pulgadas de diámetro, trabajando a 1770 R.P.M.

Los datos de la curva de la bomba por paso son:

H(pies)	Q(GPM)
107	1000
98	1200
86	1400
72	1600

Los datos de la curva de la bomba para cuatro pasos son:

H(pies)	Q(GPM)	H(m)	Q(l/s)
428	1000	130.45	63.08
392	1200	119.48	75.70
344	1400	104.85	88.31
288	1600	87.78	100.93

3.6.1 Operación del equipo de bombeo

La operación de la conducción funcionando el equipo de bombeo con la derivación, se muestra en la Figura 2.3.11. Como se puede observar, se obtiene un gasto ligeramente mayor al indicado en la Figura 2.3.10, ya que la bomba que se seleccionó no coincidió exáctamente con la carga y el gasto de diseño. En la figura 2.3.12 se puede apreciar el punto de operación de la bomba para esta situación.

Para verificar si es factible resolver el problema con una sola bomba se usa la ecuación 1.3.34 de la relación de condumdo de energía, donde para el punto de operación se tiene $H_s = 109.22$ m y $\eta_s = 79.72\%$ y para el punto de máxima eficiencia $H_d = 115.82$ y $\eta_d = 80.5$, de tal suerte que la relación de consumo de energía es 0.96, valor menor que 1.0, por tanto, es factible resolver el problema colocando una sola bomba.

La operación de la conducción funcionando el equipo de bombeo sin la derivación se muestra en la Figura 2.3.13, y en la Figura 2.3.12 el punto de funcionamiento de la bomba. Se observa que no corresponde al punto de máxima eficiencia.

Para verificar si esta bomba resuelve el problema, se calcula la relación de consumo de energía, donde para el punto de operación se tiene $H_s = 111.37$ m y $\eta_s = 80\%$ y para el punto de máxima eficiencia $H_d = 115.82$ y $\eta_d = 80.5$, de tal suerte que la relación de consumo de energía es 0.97, valor menor que 1.0, por tanto, es factible resolver el problema colocando esta bomba.

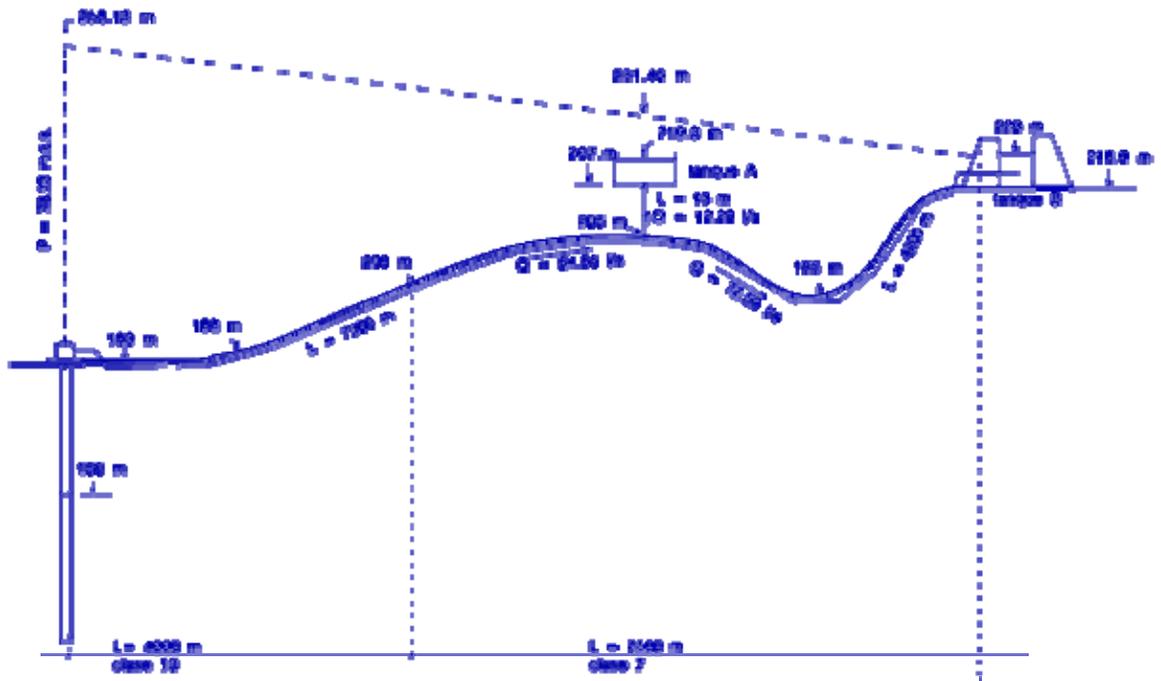


Figura 2.3.11 Funcionamiento hidráulico con el equipo seleccionado, con la derivación al tanque A, para tubo de fibrocemento de 300 mm de diámetro nominal

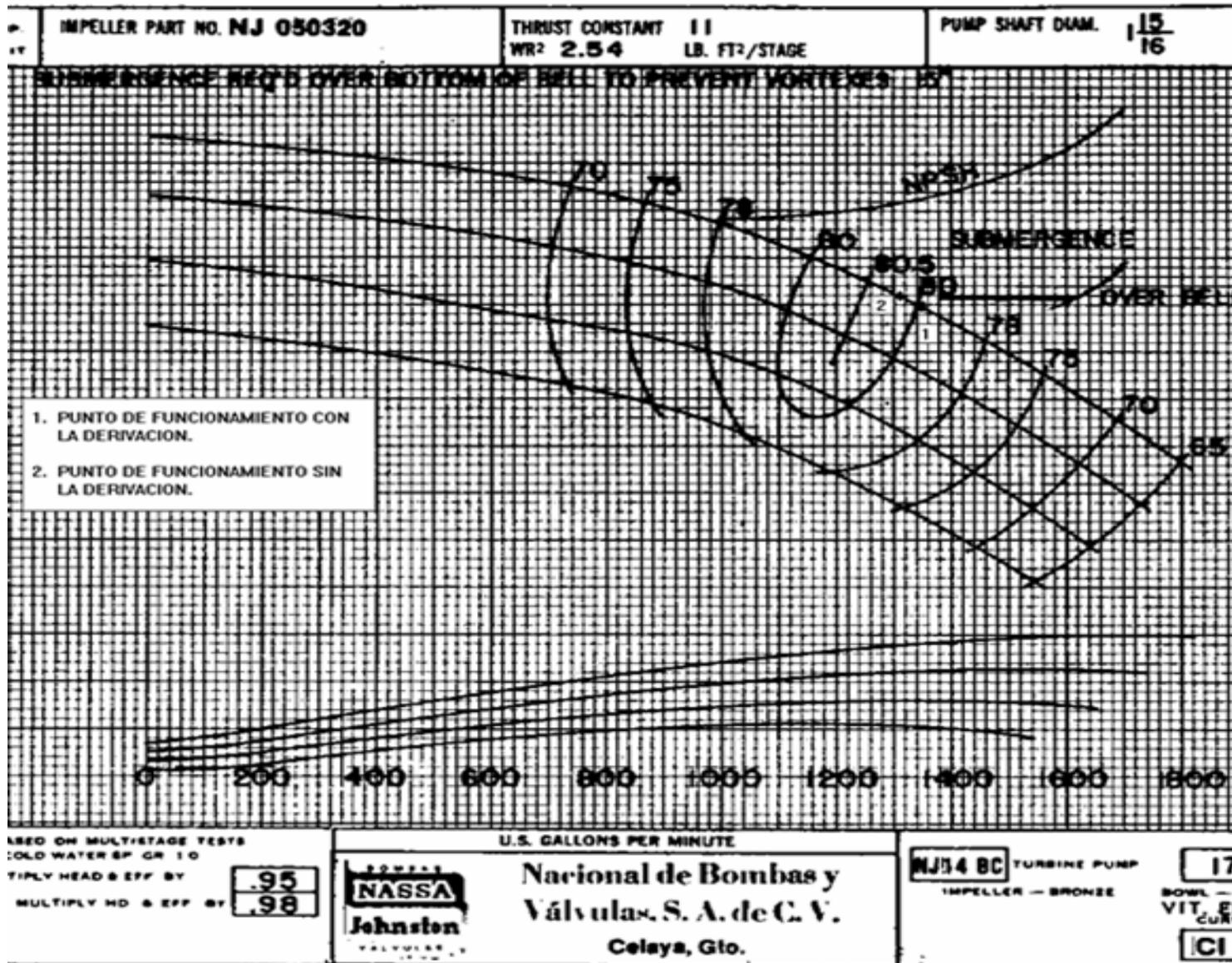


Figura 2.3.12 Curva característica de la bomba seleccionada

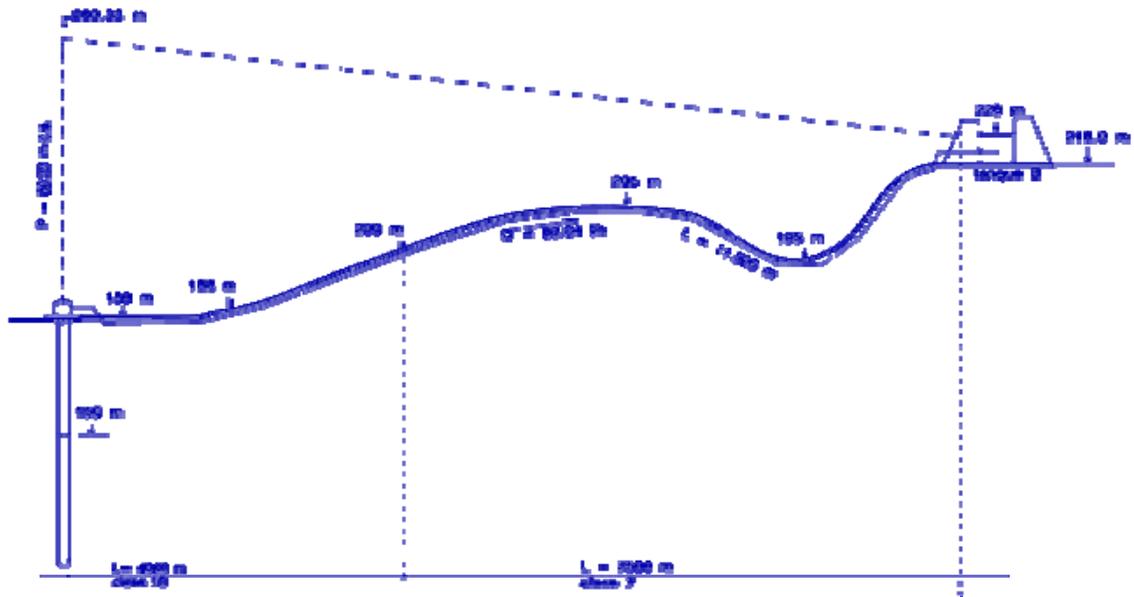


Figura 2.3.13 Funcionamiento hidráulico con la bomba seleccionada, sin la derivación al tanque A, para tubo de fibrocemento de 300 mm de diámetro nominal

3.6.2 Carga neta positiva de succión

La carga neta positiva de succión disponible se calcula con la ecuación 2.2.6, donde los datos son:

$P/\gamma = 3.0$ m (sumergencia del primer tazón), $P_a/\gamma = 10.12$ m para una altura del terreno de 200 m sobre el nivel del mar, $V_2/2g = 0.07$ m y $P_v/\gamma = 0.44$ m para una temperatura de 30°C, de tal suerte que

$$\text{CNPS disponible} = 12.75 \text{ m}$$

De la curva característica de la bomba (Figura 2.3.12) para un gasto máximo de operación de 84.88 l/s correspondiente al caso cuando funciona la derivación, se presenta la CNPS requerida máxima que es igual a 6.88 m, menor a la CNPS disponible, por lo tanto, no existen problemas de cavitación en la bomba.

3.7 ANALISIS TRANSITORIO

Para las corridas del programa de cómputo para el análisis transitorio, se consideraron en todos los casos un paro repentino del equipo de bombeo y los siguientes datos:

- Una válvula de no retorno en el equipo de bombeo.
- A partir del equipo de bombeo hasta una distancia de 4000 m existe un tubo de fibrocemento de 300 mm de diámetro, clase A-10, con una velocidad de la onda de presión de 1108 m/s, y una rugosidad absoluta de 0.025 mm.
- A partir del cadenamiento 4000 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 1038 m/s, y una rugosidad absoluta de 0.025 mm.
- Una interconexión en el cadenamiento 7300 hacia el tanque A, con un tubo de fibrocemento de 100 mm de diámetro, clase A-7, con una longitud de 10 m y una velocidad de la onda de presión de 1135 m/s, y una rugosidad absoluta de 0.030 mm. En el extremo de este tubo existe un orificio con un valor de $K = 170$.
- Un tubo para el vaciado del agua del tanque A de 300 mm de diámetro y 10 m de longitud.
- En el pozo, existe una bomba que a flujo establecido trabaja a 1770 RPM y tiene un momento de inercia de 4.5 kg.m^2 . La curva de funcionamiento es la siguiente:

Gasto (l/s)	Carga (m)	Eficiencia (%)
63.08	130.45	78
75.70	119.48	80.25
88.31	104.85	79
100.93	87.78	73.50

En la Figura 2.3.14 se muestra la envolvente de energías 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.

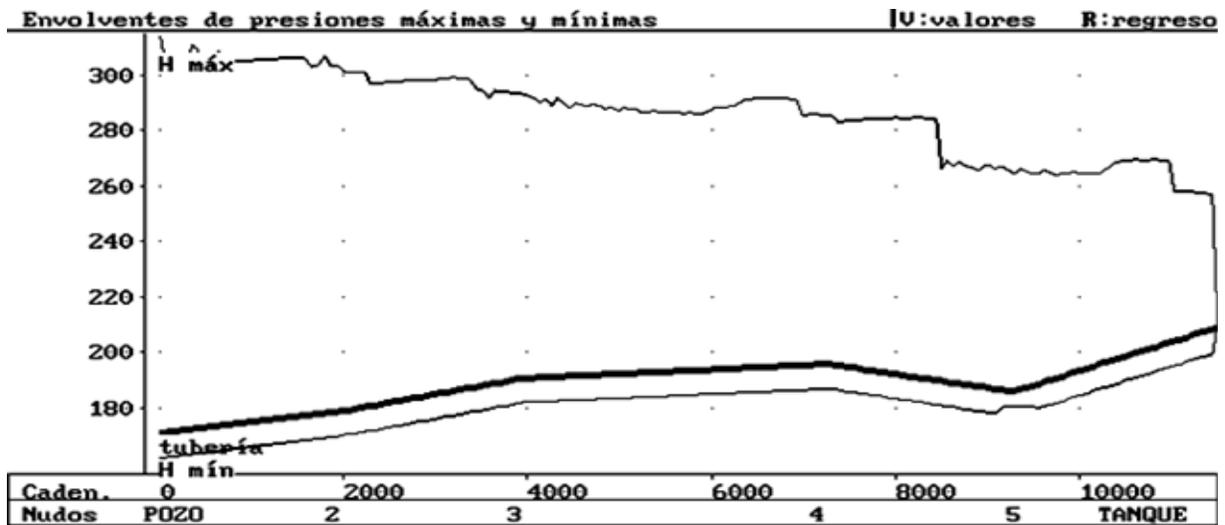


Figura 2.3.14 Envoltente de energías, paro de bomba con descarga al tanque B

En la Figura 2.3.15 se muestra la envoltente de energías para el caso cuando el tanque A funciona como un tanque unidireccional. Se encuentra en este caso, que las presiones negativas aguas abajo de éste no pueden evitarse.

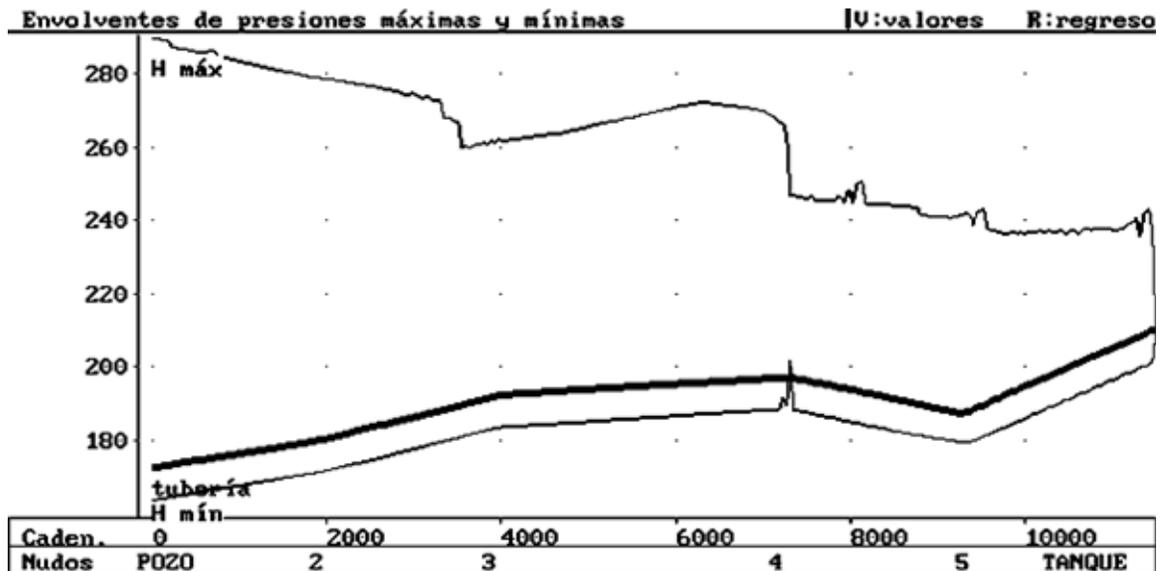


Figura 2.3.15 Envoltente de energías, paro de bomba con descarga al tanque B, y tanque A funcionando como tanque unidireccional

Se propuso entonces una cámara de aire junto al equipo de bombeo con las siguientes características: Un tubo de conexión de 300 mm de diámetro con una 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 Figura 2.3.16 se muestra la envoltente de energías donde se obtiene que las energías 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.

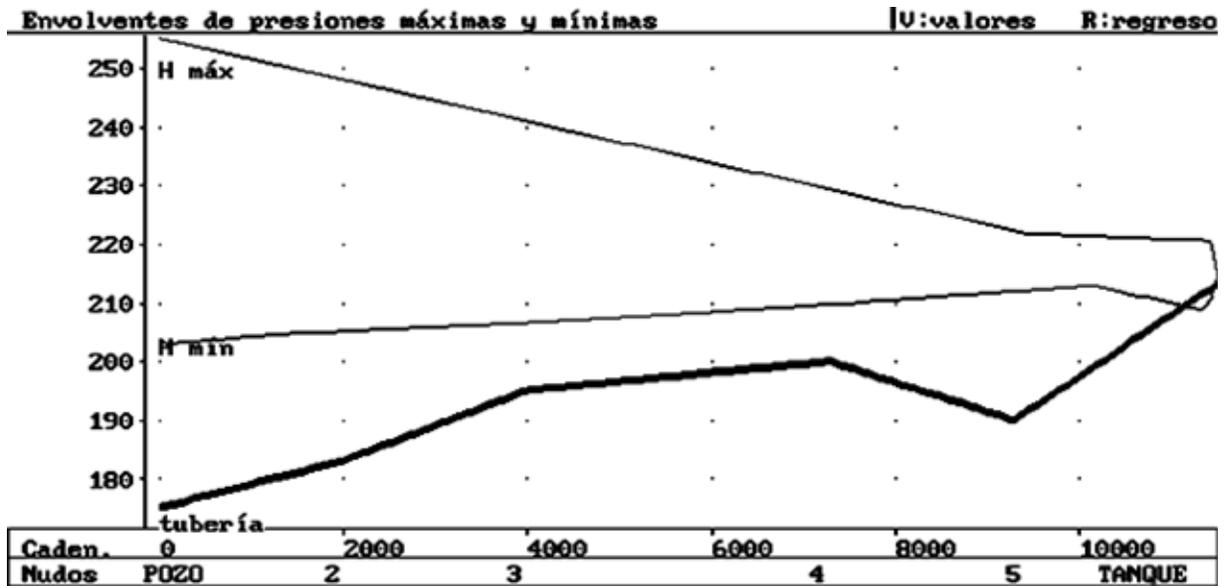


Figura 2.3.16 Envoltente de energías, paro de bomba con cámara de aire y descarga al tanque B

En la Figura 2.3.17 se muestra también la envolvente de energías correspondiente al caso de funcionar la cámara de aire propuesta con descargas a los tanques A y B. En este caso tampoco se presentan problemas en las presiones, y en la cámara se presentan los mismos valores del tirante máximo y mínimo generados en la corrida anterior.

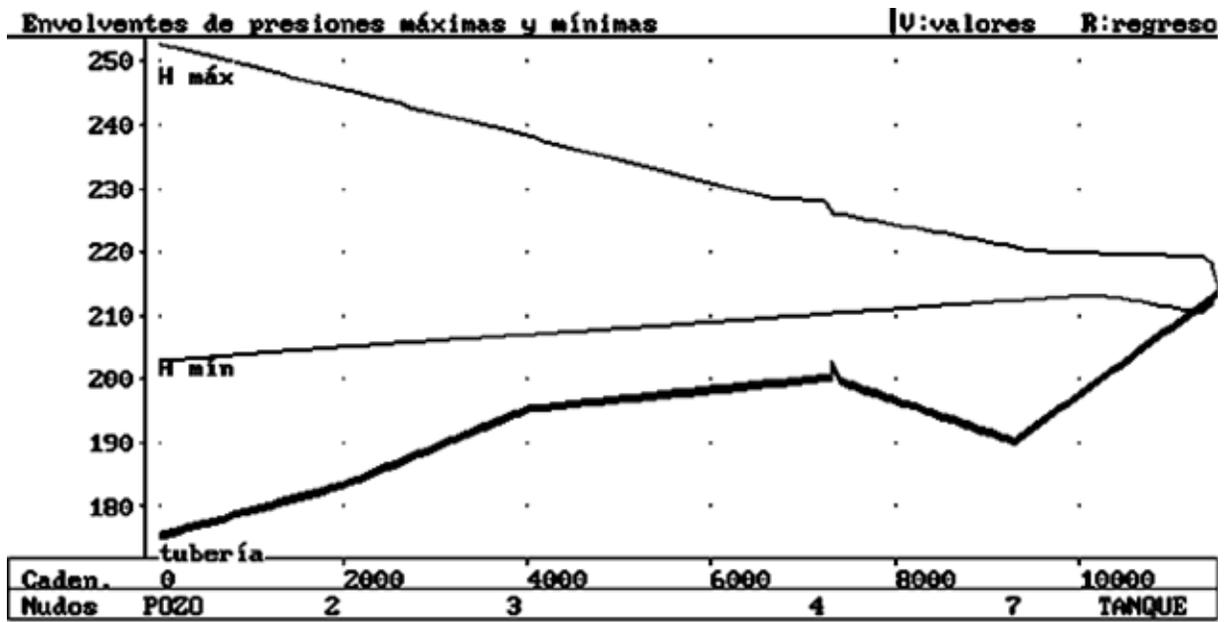


Figura 2.3.17 Envolvente de energías, paro de bomba con cámara de aire y descargas a los tanques A y B

TERCERA PARTE: PROGRAMAS DE CÓMPUTO

1 PROGRAMAS DE ANALISIS DE FLUJO PERMANENTE

1.1 GENERALIDADES

El objetivo de un programa de cómputo para el análisis de flujo permanente es calcular el gasto y la presión en la conducción, y los parámetros de operación de las bombas; para una condición de operación dada. Los programas pueden analizar tanto una sola conducción sencilla por bombeo o gravedad, como una red de conducción, un sistema de pozos, etcétera.

Al utilizar un programa de este tipo el usuario introduce los siguientes datos:

- Longitud, diámetro y coeficiente de rugosidad para cada conducto.
- Configuración de la red (forma en que se conectan entre si los conductos).
- Nivel de agua en los tanques.
- Datos para los bombeos: número de bombas en operación, curvas de funcionamiento de las bombas, nivel de agua en la toma.

El programa proporciona los resultados siguientes:

- Gasto y pérdida de carga en cada conducto.
- Elevación piezométrica y presión en cada nodo.
- Gastos en los tanques.
- Punto de operación de las bombas expresado por su gasto y carga. El programa **AH** (ver 3.1.2) da también la eficiencia, altura de succión, y potencia requerida para la bomba y para el motor.

Un programa de análisis de flujo permanente puede tener muchos usos en el diseño de conducciones y redes de conducciones, entre los cuales:

- Para revisar un diseño propuesto en cuanto a gastos, velocidad, pérdidas de carga y presiones.
- Para analizar la operación con diferente número de bombas en operación y con diferentes niveles en los tanques de toma y descarga.
- Para revisar si las bombas seleccionadas son adecuadas.

- Para analizar la eficiencia de las bombas en los diferentes regímenes de operación posibles, y calcular el consumo de energía eléctrica.

- Para calcular de manera exacta las condiciones iniciales para el análisis de transitorios.

1.2 EL PROGRAMA AH (ANALISIS HIDRAULICO)

Está desarrollado en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Puede analizar conducciones y redes abiertas o cerradas con bombas, tanques, demandas fijas, descargas libres o a presión, válvulas de no retorno, válvulas reductoras de presión, válvulas retenedoras de presión, válvulas cerradas y rebombes ("boosters").

En las Figuras 3.1.1 a 3.1.3 se muestran respectivamente la pantalla de resultados para los tramos, para los nodos y para un bombeo de la red de pozos, cuyo esquema se muestra en la Figura 3.1.4.

Programa: ANALISIS HIDRAULICO EN REDES		ARCHIVO: RPPZT							
Resultados para los tramos:				total de tramos		12			
TRAMO	TI PO	N U D O S inicial - final		LONGITUD (m)	C de H.-W.	DIAM. (mm)	Q (L/s)	V (m/s)	PERD. (m)
1	1	0 P20	N1	990.00	130.0	250.0	55.14	1.12	5.15
2	2	0 P21	N1	150.00	130.0	250.0	54.86	1.12	0.77
3	3	0 N1	N2	1440.00	130.0	300.0	110.00	1.56	11.07
4	4	0 P22	N2	670.00	130.0	250.0	44.56	0.91	2.35
5	5	0 N2	N3	1730.00	130.0	450.0	154.56	0.97	3.47
6	6	0 P23	N3	50.00	130.0	250.0	48.99	1.00	0.21
7	7	0 N3	N4	1220.00	130.0	450.0	203.55	1.28	4.07
8	8	0 P24	N4	800.00	130.0	250.0	49.96	1.02	3.47
9	9	0 N4	N5	3090.00	130.0	500.0	253.51	1.29	9.26
10	10	0 N5	N6	765.00	130.0	500.0	253.51	1.29	2.29
11	11	0 N6	N7	1390.00	130.0	500.0	253.51	1.29	4.17
12	12	0 N7	TANCR	1165.00	130.0	500.0	253.51	1.29	3.49

PgUp Pág.anterior PgDn Pág.siguiete Regresa al menú F2 Esquema

Figura 3.1.1 Pantalla de resultados para los tramos del programa AH

El programa **AH** se incluye en el tema Redes de distribución de este Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.

Resultados para los nudos:

total de nudos 13

N U D O	T I P O	D E S C R I P C I O N	C. PIEZ. (m)	COTA T. (m)	PRESION (m)	CONSUMO (L/s)
1	P20	13 BOMBA (trabajando)	1877.97	1845.00	32.97	-55.14
2	P21	13 BOMBA (trabajando)	1873.68	1840.00	33.68	-54.86
3	P22	13 BOMBA (trabajando)	1864.10	1811.00	53.10	-44.56
4	P23	13 BOMBA (trabajando)	1858.50	1813.00	45.50	-48.99
5	P24	13 BOMBA (trabajando)	1857.68	1814.00	43.68	-49.96
6	N1	0 NUDO SIMPLE	1872.82	1825.00	47.82	-0.00
7	N2	0 NUDO SIMPLE	1861.75	1844.00	17.75	0.00
8	N3	0 NUDO SIMPLE	1858.29	1812.50	45.79	-0.00
9	N4	0 NUDO SIMPLE	1854.22	1823.00	31.22	0.00
10	N5	0 NUDO SIMPLE	1844.95	1780.00	64.95	0.00
11	N6	0 NUDO SIMPLE	1842.66	1780.00	62.66	-0.00
12	N7	0 NUDO SIMPLE	1838.49	1817.50	28.99	0.00

PgUp Pág. anterior

PgDn Pág. siguiente

Regresa al menú

F2 Esquema

Figura 3.1.2 Pantalla de resultados para los nudos del programa AH

Resultados para los nudos especiales:

1 página de 5

N U D O	T I P O	D E S C R I P C I O N	P A R A M E T R O S
1	P20	13 BOMBA (trabajando)	Nivel ag. en la toma 1745.00 m Q de una bomba 55.14 L/s Q est. de bombeo 55.14 L/s Carga de la bomba 133.95 m Efic. de la bomba 73.95 % Altura de succión 10.92 m Potencia de la bomba 97.91 kW Potencia del motor 103.01 kW

PgUp Pág. anterior

PgDn Pág. siguiente

Regresa al menú

F2 Esquema

Figura 3.1.3 Pantalla de resultados para un bombeo del programa AH

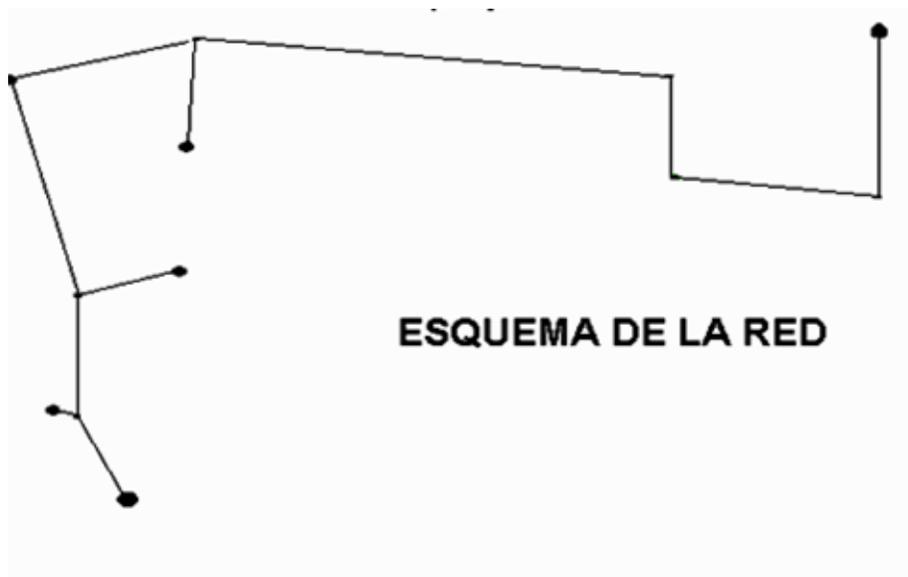


Figura 3.1.4 Pantalla de esquema de la red del programa AH

1.3 EL PROGRAMA EPANET

Está desarrollado en la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (Environmental Protection Agency, EPA en inglés). Fue creado para análisis hidráulicos, y ante de la calidad del agua, en redes de distribución, pero puede ser utilizado también para analizar hidráulicamente conducciones y redes de conducciones. Las Figuras 3.1.4 y 3.1.5 muestran respectivamente una ventana con el esquema de una red y una ventana con tabla de resultados del programa EPANET.

El programa EPANET se distribuye libremente. La versión en inglés puede ser copiada de la página Internet de la Environmental Protection Agency <http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet.html>. La Universidad Politécnica de Valencia en España ha desarrollado una versión en español de EPANET, que puede ser copiada de <http://www.idmh.upv.es/psoftware.html>.

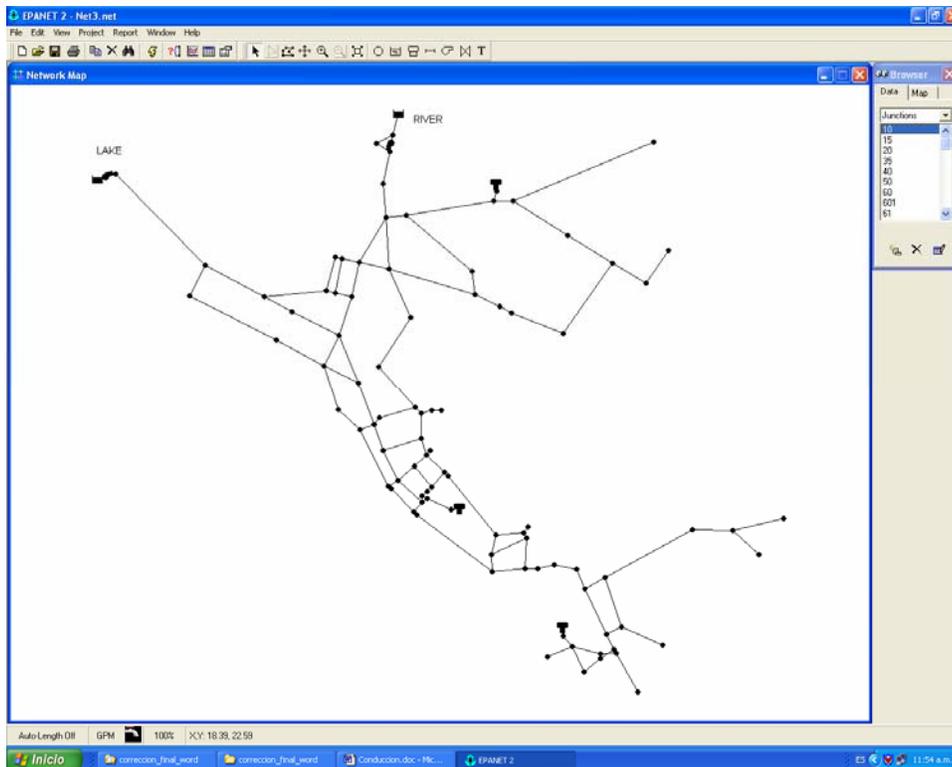


Figura 3.1.4 Pantalla de esquema de una red en el programa EPANET

Link ID	Flow GPM	Velocity fps	Unit Headloss ft/ft	Friction Factor	Reaction Rate mg/L/d	Trace Lake percent	Status
Pipe 20	-2246.30	0.09	0.00	0.009	0.00	0.00	Open
Pipe 40	-480.32	0.02	0.00	0.000	0.00	0.00	Open
Pipe 50	329.21	0.01	0.00	0.000	0.00	0.00	Open
Pipe 60	13157.88	9.33	0.93	0.013	0.00	0.00	Open
Pipe 101	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	Open
Pipe 103	168.06	0.27	0.02	0.027	0.00	0.00	Open
Pipe 105	-422.59	1.20	0.51	0.022	0.00	0.00	Open
Pipe 107	32.30	0.09	0.00	0.034	0.00	0.00	Open
Pipe 109	-10.43	0.02	0.00	0.041	0.00	0.00	Open
Pipe 111	-320.51	0.91	0.21	0.024	0.00	0.00	Open
Pipe 112	498.35	1.41	0.70	0.022	0.00	0.00	Open
Pipe 113	-80.63	0.23	0.02	0.029	0.00	0.00	Open
Pipe 114	124.27	0.79	0.38	0.026	0.00	0.00	Open
Pipe 115	-40.92	0.26	0.05	0.031	0.00	0.00	Open
Pipe 116	16.53	0.05	0.00	0.037	0.00	0.00	Open
Pipe 117	636.29	1.81	1.10	0.022	0.00	0.00	Open
Pipe 119	-733.46	2.08	1.43	0.021	0.00	0.00	Open
Pipe 120	1193.13	3.29	3.33	0.020	0.00	0.00	Open
Pipe 121	1039.29	2.95	2.72	0.020	0.00	0.00	Open
Pipe 122	388.34	2.38	2.87	0.022	0.00	0.00	Open
Pipe 123	9021.71	4.48	1.72	0.014	0.00	0.00	Open

Figura 3.1.5 Tabla de resultados en el programa EPANET

2 PROGRAMAS DE ANALISIS DE TRANSITORIOS HIDRAULICOS

2.1 GENERALIDADES

El objetivo de un programa de cómputo para el análisis de transitorios hidráulicos es el de simular el transitorio mediante un modelo matemático, para evaluar las posibles consecuencias de éste en términos de presiones producidas y comportamiento de la bombas y otros equipos. Normalmente el proyectista analiza primero los transitorios sin dispositivos de control algunos; los resultados de este primer análisis le orientan en la necesidad o no de contar con dispositivos de control. Luego puede simularse incluyendo dispositivos de control, cambiando alternativas de diferentes tipos, para encontrar una solución adecuada.

Al utilizar un programa de este tipo el usuario introduce los siguientes datos:

- Longitud, diámetro, factor de fricción y celeridad para cada conducto.
- Configuración de la red (forma en que se conectan entre si los conductos).
- Nivel de agua en los tanques.
- Datos para los bombeos: número de bombas en operación, curvas características de las bombas, nivel de agua en la toma.
- Datos de los dispositivos de control: ubicación, dimensiones y otras características.
- Condiciones iniciales para el transitorio. Se expresan por los gastos, presiones y niveles del flujo permanente que se tiene en la conducción antes del transitorio.
- Tipo de transitorio que se quiere simular. Para conducciones de agua potable normalmente se analiza al paro de bombas o el cierre de válvulas, sea brusco o gradual.

Los resultados que pueden ser obtenidos con la corrida dependen del programa. Como mínimo, el programa debe dar las presiones máximas y mínimas que se producen en el transitorio en toda la conducción. Un programa más elaborado puede dar también los resultados siguientes:

- Ubicación y volumen de las separaciones de columna.
- Evolución en el tiempo de la presión en los nodos de la conducción.
- Evolución en el tiempo de la línea piezométrica.

- Evolución en el tiempo del nivel de agua en dispositivos de control como cámara de aire, tanque unidireccional y torre de oscilación.

- Evolución en el tiempo de la velocidad de rotación de las bombas.

Debido a que la información numérica de estos resultados puede ser muy extensa, es conveniente que el programa los represente en forma gráfica y opcionalmente en forma numérica. Entre los posibles resultados gráficos de gran utilidad son las líneas envolventes de presiones máximas y mínimas en la conducción dibujadas sobre el perfil del trazo de ésta.

Para realizar la simulación, dos problemas adicionales deben ser atendidos:

- La discretización de las tuberías en subtramos de cálculo.

- La selección del intervalo de tiempo del transitorio que se va a simular.

El modelo matemático en que se basa la simulación se compone de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales cuyas incógnitas son el gasto Q y la carga H en los puntos de las tuberías del sistema hidráulico. La solución de estas ecuaciones da Q y H en todos los puntos y en todos los instantes de tiempo.

Las ecuaciones se solucionan en el programa por métodos numéricos, para lo cual es necesario discretizar cada tubería en cierto número de subtramos. Para que la solución numérica funcione se requiere que en cada tubería i (cada tramo de la red) se cumpla la relación:

$$\Delta x_i = a_i \Delta t \quad (3.2.1)$$

donde Δx_i es la longitud del subtramo, a_i es la velocidad de propagación de la onda de presión (celeridad) en el tramo, y Δt es el incremento de tiempo usado.

El programa que se utilice debe dividir cada tramo en subtramos de igual longitud Δx , que se obtiene dividiendo la longitud del tramo L_i entre la cantidad de subtramos N_i . Si la red tiene tramos con diferentes longitudes, en el caso general no se cumple con la relación (3.2.1) en todos los tramos. Puesto que esta condición es obligatoria para que el método funcione, se debe hacer una corrección de la velocidad de la onda a en algunos tramos. En la práctica, esta velocidad se determina por ecuaciones que proporcionan más bien un estimado de a que su valor exacto, y se puede esperar que variaciones pequeñas de ésta no afecten la exactitud de los resultados finales.

Otra cuestión importante es la cantidad de subtramos. Mientras mayor sea la cantidad de subtramos, más precisa será la solución numérica, en más puntos se obtendrá la información final y, como se verá más abajo, menores serán las

correcciones de la velocidad de la onda a . Por otra parte se necesitará más memoria de la máquina y más tiempo de cálculo.

Los programas de cómputo normalmente dan al usuario alguna manera de regular la discretización, que debe ser definida de forma tal que la cantidad de puntos no sea ni demasiado pequeña ni demasiado grande, y que las correcciones en la celeridad no sean demasiado grandes. Lograr esto puede ser problemático cuando en la red hay a la vez tramos muy largos y muy cortos. Se recomienda por esta razón despreciar los tramos muy cortos a la hora de componer el esquema de cálculo para el sistema a analizar, o dividir los tramos muy largos en varios tramos de menor longitud.

En lo que respecta al intervalo de tiempo del transitorio a simular, pocas veces es necesario simular el transitorio completo, es decir, hasta establecerse un estado permanente. Para los fines prácticos se necesitan, por lo general, solamente las presiones máximas y mínimas, que se producen en la parte inicial del transitorio.

En la Figura 3.2.5 se muestra la evolución de la presión al inicio de la tubería a presión de una estación de bombeo después de un paro de las bombas. Si el objetivo de la simulación es obtener las presiones máximas y mínimas, tendría poca importancia continuar ésta después del instante t_1 , y en este momento se podría concluir. El problema consiste en que los momentos de realización de estas presiones no se conocen de antemano, siendo éstos resultados de la simulación.

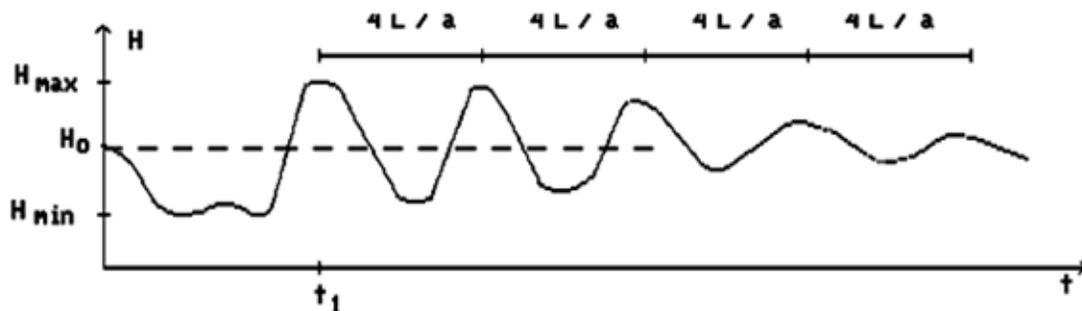


Figura 3.2.5 Evolución en el tiempo de la presión en una planta de bombeo

Si el usuario tiene poca experiencia en los análisis de transitorios, existe el peligro de que fije un tiempo demasiado corto, antes de que se produzcan las presiones máximas. Se recomienda en todo caso dar un tiempo bastante largo, seguir el desarrollo del transitorio en la simulación, e interrumpir cuando se tiene la certeza de que se simuló la parte importante.

El programa ARIETE (versión 2.2.) determina directamente el momento en que debe concluir la simulación.

Se presentan a continuación los programas de análisis de transitorios más conocidos en México.

2.2 EL PROGRAMA ARIETE

Está desarrollado en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y es compatible en sus datos de entrada con el programa **AH**, que puede ser usado para el cálculo de las condiciones iniciales del transitorio. Simula el transitorio mostrando los resultados en forma numérica y gráfica. El usuario puede detener en cualquier momento la simulación para consultar resultados intermedios, y luego continuar.

Para identificar el dispositivo o componente ubicado en un nudo, el programa maneja *tipos de nudo*. El tipo de nudo es un número entero que define el tipo de componente que representa el nudo y las condiciones en las que se encuentra durante el transitorio. El programa ARIETE cuenta con los siguientes tipos de nudo:

- | | |
|---------|--|
| Tipo 0 | Nudo simple. Se utiliza para representar uniones de tuberías o extremos cerrados. |
| Tipo 1 | Cámara de aire. |
| Tipo 2 | Torre de oscilación. |
| Tipo 3 | Tanque unidireccional abierto. |
| Tipo 4 | Tanque unidireccional cerrado. |
| Tipo 5 | Válvula de admisión y expulsión de aire. |
| Tipo 6 | Válvula de admisión y retención de aire. |
| Tipo 7 | Nudo en que la cota piezométrica se mantiene invariable durante el transitorio. Por este nudo se representan tanques de superficie libre y descargas libres. |
| Tipo 8 | Descarga en el aire bajo presión. |
| Tipo 9 | Válvula de cierre ubicada antes de una descarga bajo presión. |
| Tipo 10 | Válvula de alivio. |
| Tipo 11 | Válvula de alivio ubicada antes de una descarga bajo presión. |
| Tipo 12 | Válvulas de alivio y de cierre ubicadas antes de una descarga bajo presión. |
| Tipo 13 | Bomba operando con su velocidad nominal durante el transitorio. |
| Tipo 14 | Bomba que deja de operar. |

Tipo 15	Bomba que deja de operar, con by-pass en la válvula de cheque.
Tipo 16	Bomba que deja de operar, con válvula de cierre programado.
Tipo 17	Bomba operando, con cámara de aire.
Tipo 18	Bomba que deja de operar, con cámara de aire.
Tipo 19	Bomba operando, con torre de oscilación.
Tipo 20	Bomba que deja de operar, con torre de oscilación.
Tipo 21	Bomba que deja de operar, con tanque unidireccional abierto.
Tipo 22	Bomba que deja de operar, con tanque unidireccional cerrado.
Tipo 23	Bomba operando, con válvulas de alivio.
Tipo 24	Bomba que deja de operar, con válvulas de alivio.
Tipo 25	Central hidroeléctrica, paro de las turbinas.
Tipo 26	Central hidroeléctrica, rechazo de la demanda.
Tipo 27	Arranque de las turbinas.
Tipo 34	Consumo que se mantiene invariable durante el transitorio.

Los siguientes *tipos de tramo* están incluidos en ARIETE 3:

Tipo 0	Tubería.
Tipo 1	Pérdida de carga concentrada.
Tipo 2	Válvula de no retorno.
Tipo 4	Bomba en serie (booster).

El programa no está limitado en cuanto al tipo de red, el modo de conexión de sus componentes o el tipo de dispositivos que actúan conjuntamente. Sin diferencias en el enfoque, puede analizarse el golpe de ariete en una conducción, una red ramificada o una red cerrada. Los casos sin dispositivos de control o con diferentes protecciones, pueden ser analizados.

La solución considera la posibilidad de separaciones de la columna líquida tanto en las tuberías como en los nudos. Se asume que la separación se produce cuando la

presión manométrica tiende a descender por debajo de -8.00 m de columna de agua. El programa simula los cambios en el volumen de la separación y las sobrepresiones que genera su reunión.

ARIETE se maneja por un menú de opciones. Los datos se introducen en ventanas dentro del propio programa y cuenta con ayuda en línea. Las ventajas del programa son:

- Calcula una discretización óptima con respecto a las correcciones en la celeridad, que no obstante puede ser modificada por el usuario si éste lo encuentra conveniente.

- Tiene la capacidad de determinar el momento en que debe concluir la simulación. El usuario tiene también la opción de dar un tiempo de simulación fijo, o de establecer un límite máximo o mínimo a éste.

- Determina el camino más largo entre dos nodos del sistema, uno de los cuales genera el transitorio (como una bomba o una válvula) y otro que lo refleja (como un tanque o una descarga); para usarlo en el cálculo del período del transitorio. Este cálculo es fácil en el caso de una conducción simple, pero puede ser sumamente complicado en una red con varias bombas, válvulas y tanques.

- En los datos el usuario puede dar las elevaciones del terreno en la conducción. En cada tramo se puede dar hasta un máximo de 10 elevaciones. Lo anterior da la posibilidad de simular las separaciones de columna y presentar gráficamente las líneas envolventes de presión máxima y mínima sobre el terreno real.

- El usuario necesita dar las curvas características de las bombas solamente en el primer cuadrante (el de operación normal) que siempre se proporcionan por los fabricantes. El programa internamente genera las curvas para los demás cuadrantes, cuando se necesite. Otros programas requieren de las curvas características en los cuatro cuadrantes, que muy pocas veces se tienen en la práctica.

- Tiene tres facilidades para visualizar la simulación en el tiempo de la ejecución:

- 1. Mostrar en forma numérica las presiones, gastos y volúmenes de separación de la columna, para nudos seleccionados. La figura III.2.6 representa la pantalla que se utiliza para este propósito. El usuario puede elegir el intervalo de visualización.

- 2. Mostrar en forma gráfica la evolución en el tiempo de la presión en nudos seleccionados, como se representa en la figura III.2.7. En la ejecución se puede cambiar de un nudo a otro.

- 3. Mostrar la evolución en el tiempo de la línea piezométrica. El usuario puede detener la simulación, para ver la posición momentánea de la línea piezométrica con los valores de la presión en los diferentes puntos (Figura 3.2.8), y continuar. Existe también la facilidad de ver en cualquier momento de la simulación las líneas de presiones máximas y mínimas producidas hasta el momento (Figura 3.2.9).

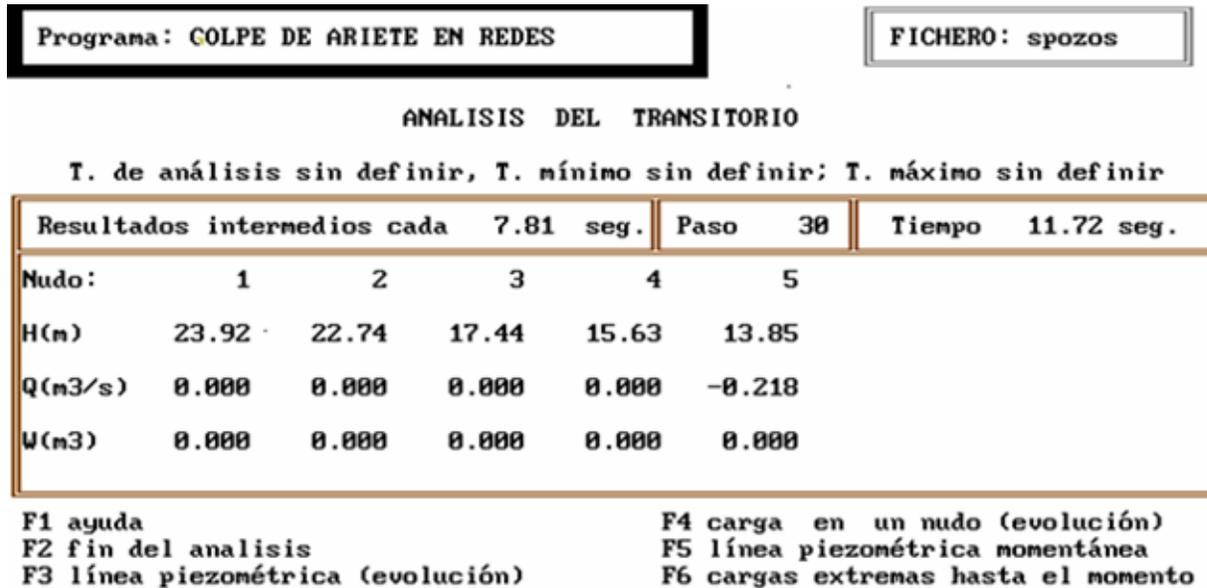


Figura 3.2.6 Programa ARIETE: Visualización del transitorio en forma numérica

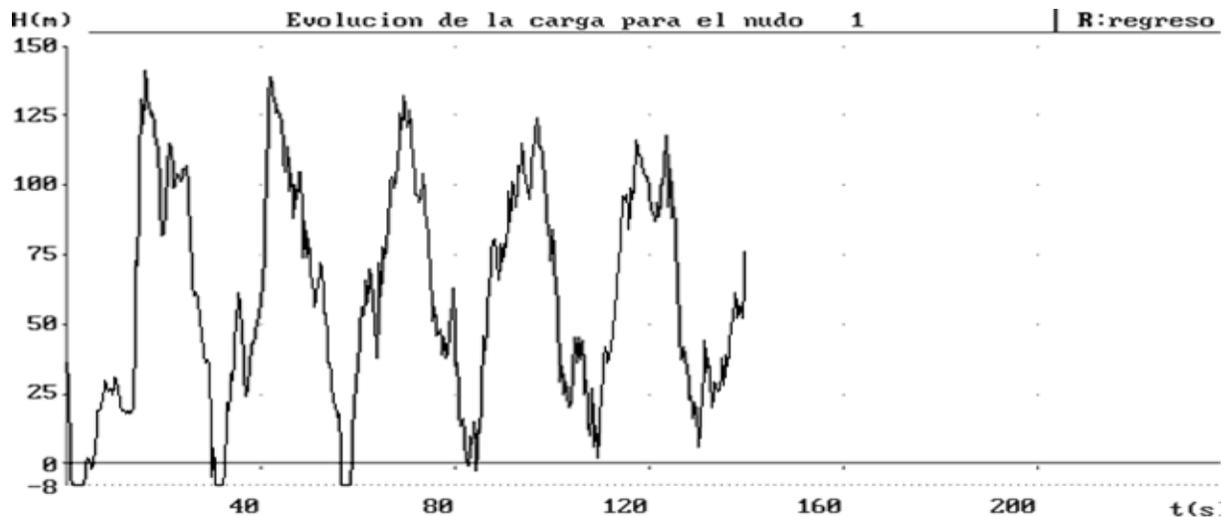


Figura 3.2.7 Programa ARIETE: Evolución de la presión en un nodo

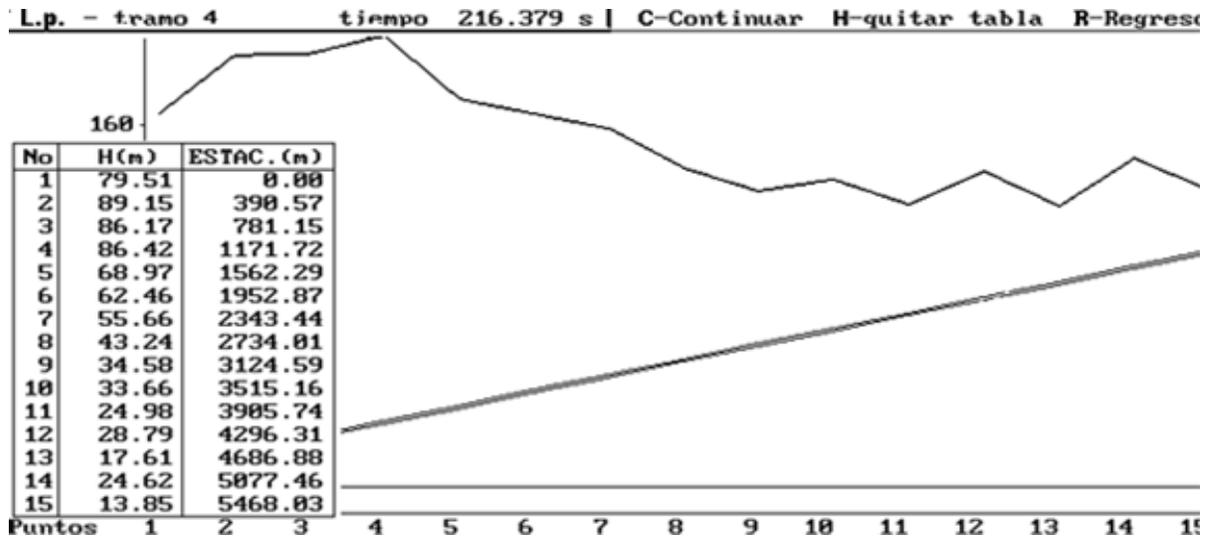


Figura 3.2.8 Programa ARIETE: Línea piezométrica momentánea

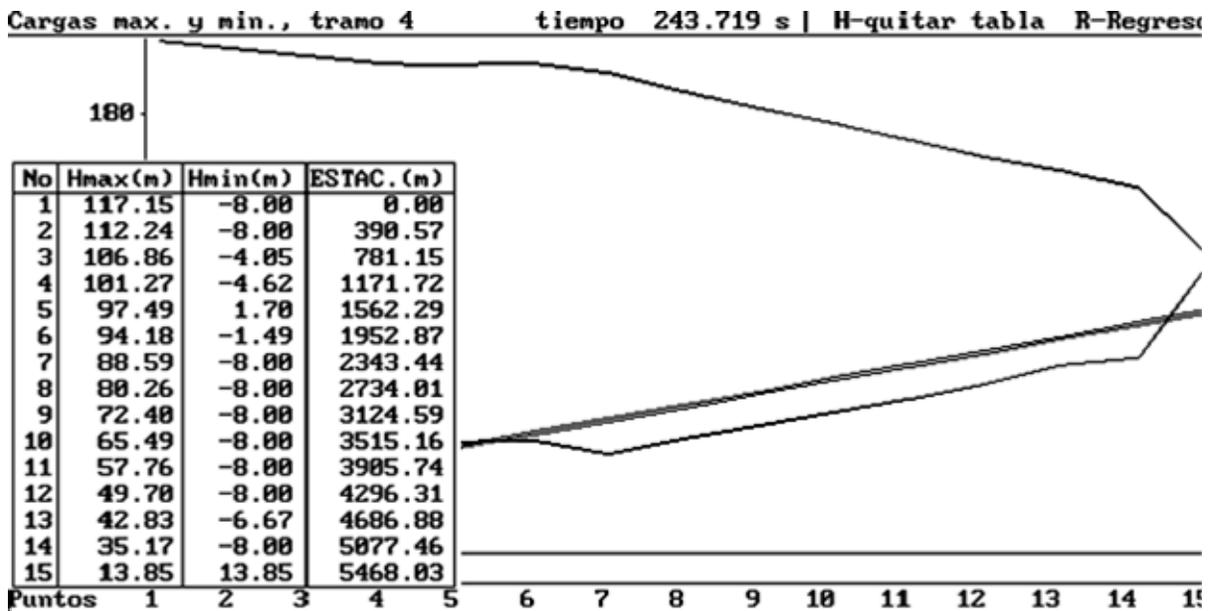


Figura 3.2.9 Programa ARIETE: Cargas máximas y mínimas

2.3 PROGRAMAS DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM

Se conocen tres programas desarrollados en el Instituto de Ingeniería. El primero viene publicado en [8] y puede simular transitorios por paro de bombas en una conducción simple por bombeo. Los medios de control contemplados son:

- Tanque unidireccional.
- Torre de oscilación.
- Cámara de aire.
- Válvula de alivio.
- Válvula de cierre programado.

El programa simula el transitorio generado por el paro de todas o de parte de las bombas en la planta. Se piden los datos de curvas características de presión y de momento para los cuatro cuadrantes de la bomba.

En los datos de entrada se pide el número de divisiones en el último tramo de la conducción. Este dato se usa en el programa para calcular la discretización para la solución numérica. Los usuarios con poca experiencia en el uso del programa deben prestar cierta atención al dar este dato, ya que de él depende la precisión de la simulación y el tiempo de máquina requerido.

El usuario debe proporcionar en los datos de entrada el tiempo de simulación. Nuevamente los usuarios sin experiencia deben tener cuidado, para no dar tiempos demasiado cortos en que no llegan a manifestarse las presiones máximas y mínimas del transitorio.

El programa no maneja datos para las elevaciones del terreno en la conducción, y no considera las separaciones de columna que pueden surgir. De esta forma, los resultados son válidos solamente en los casos sin separación. Para asegurarse que no hay separaciones de columna, el usuario tendrá que superponer los trazos de la corrida las líneas de presiones máximas y mínimas obtenidas sobre el trazo del terreno de la conducción.

Para correr el programa el usuario debe usar un editor de texto para preparar los datos de entrada en un archivo ASCII, con una estructura dada. Al iniciar la simulación en el programa, se indica el nombre del archivo de datos. Los resultados, que son solamente numéricos, se graban en otro archivo que se genera con la corrida, para su posterior gráfica, mediante un programa de dibujos por separado.

El segundo programa, que tiene características similares, tiene el objeto de simular transitorios en sistemas de pozos.

El tercer programa, el más nuevo, pero similar en su manejo a los dos anteriores, se llama TRANS. Los elementos hidráulicos que puede simular son los siguientes:

- Tubos
- Batería de tubos en paralelo
- Bombas
- Tanques unidireccionales
- Tanques de oscilación con área constante y variable
- Cámaras de aire
- Válvulas check
- Válvulas de control
- Válvulas de alivio
- Válvulas de admisión y expulsión de aire
- Derivaciones
- Uniones
- Aportaciones

y los siguientes eventos:

- Paro de bombas
- Paro controlado de bombas
- Arranque de bombas
- Bombas operando
- Descarga a presión constante
- Descarga a gasto constante
- Apertura y cierre de válvulas de control

De igual manera que, TRANS se alimenta a través de un archivo de datos ASCII en donde se describen las características hidráulicas y físicas del sistema.

Las características físicas de una conducción se describen con las características de los tramos de tubería y los elementos hidráulicos que lo forman, las hidráulicas se dan a través de eventos hidráulicos que describen la forma particular de operar de cada sistema. Ambas se identifican a través de códigos.

Los resultados que entrega el sistema son otros archivos en código ASCII. La información se graba en columnas de datos separadas por espacios. Cada columna está asociada a un elemento o evento, como se indica en la descripción de los códigos de eventos y elementos. Los resultados se pueden graficar con cualquier paquete de graficación que se alimente con archivos ASCII.

2.4 PROGRAMAS EXTRANJEROS

Como programas extranjeros más conocidos para el análisis de flujo transitorio en conducciones se pueden mencionar Hammer de Bentley Systems Incorporated de los Estados Unidos de Norteamérica, y Wanda de Delft Hydraulics en Holanda. Información sobre otros programas puede ser encontrada en el libro Fenómenos Transitorios en Líneas de Conducción de esta serie de Manuales de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Guerrero A., J.O., "*Hidráulica de Tubos Usando el Concepto de Recorrido*", Editorial UAS, junio de 1988.
2. Guerrero A., J.O., "Ecuación Modificada de Colebrook-White", *Segundo informe de actividades de Proyecto Doctoral en Ingeniería Hidráulica*, junio de 1994.
3. Hydraulics Research Station, "Charts for the Hydraulic Design of Channels and Pipes", 3ed Edn., H.M.S.O., London, 1969.
4. Swamnee, P.K. and Jain, AK, "Explicit Equations for Pipe Flow Problems", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 102, No. HY5, pp. 657-664, May, 1976.
5. Culinae M.J, K.E. Lansey and Mays L.W., "Optimization-Availability-Based Design of Water-Distribution Networks", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 3, March 1992, pp. 420-441.
6. Tzatchcov, V.G. y M. E. Alfonso F., "Diseño Optimo de Redes Hidráulicas mediante Análisis Consecutivos Direccionados", *Seminario Internacional sobre Uso Eficiente del Agua*, México, D. F. 1991.
7. Sherali H.D. and Smith EP, "An Optimal Replacement-Design Model for Reliable Water Distribution Network System, Integrated Computer Applications in Water Supply", Vol. 1- Methods and Procedures for Systems Simulation and Control, Edited by Coulbeck, Editoriales Research Studies Pres. LTD. y John Wiley, 1993.
8. Guarga, R., Sánchez B., J.L., Carmona R. Aguilar, L.. "*Diseño y Operación Hidráulicos de Conducciones de Agua a Presión*", SARH, 1985.
9. Dikarevskii, V.S., V.P. Zirianov, A. E. Tatura, *Protección antiarriete de las redes de riego*, Editorial Kolos, Moscú, 1981 (en ruso).
10. Stephenson, D. *Pipeline Design for Water Engineers*, Elsevier, Amsterdam, 1976.
11. Abreu, J. M., R. Guarga, J. Izquierdo (editores), *Transitorios y Oscilaciones en Sistemas Hidráulicos a Presión*, Universidad de Coimbra (Portugal), Universidad Politécnica de Valencia (España) y Universidad de la República Oriental de Uruguay, 1994.
12. Los Sismos de 1985, Casos de Mecánica de Suelos. Simposio de la SMMS, 1986.
13. Advisory Notes en Pipeline Earthquake Engineering, ASCE, 1986.
14. Steel Pipe: A Guide for Design and Instalation, AWWA, 1989.

15. Internal Corrosion of Water Distribution Systems, AWWA, 1985.
16. Seminario Taller Internacional Para Especialistas en Tuberías de Concreto Preforzado, CEPIS, 1986.
17. Guerrero A., J.O., "Sistemas de Agua Potable con Abastecimiento directo a Tanques", Onceavo Congreso Nacional de Hidráulica, octubre de 1990.
18. Rojas F.J., "La determinación del diámetro óptimo en acueductos", Revista de Ingeniería Civil, No. 295, México, D.F., noviembre de 1993.
19. Kiseliov, *Mecánica de construcción*, Moscú, Mir.
20. Madjarov L. y H. Hristov, Manual para la determinación del Golpe de Ariete en las tuberías a presión de las estaciones de bombeo, Tejnika, Sofía, 1967 (en búlgaro).
21. Puech, Ch., Meunier, M., "Etude du fonctionnement et du dimensionnement des balons d'air anti-bélier", *Bulletin Technique du Genie Rural*, No. 124, 1978.
22. Meunier, M., Les coups de bélier et la protección des reseaux d'eau sous pression, Ecole Nationale du Genie Rural des Eaux et des Forets, Paris, 1980.
23. Thorley, A.R.D. (1991), *Fluid Transients in Pipeline Systems*, D.&L. George Ltd.
24. Tullis, J. Paul, *Hydraulics of Pipelines*, John Wiley & Sons, 1989.

Tabla de conversión de unidades de medida al Sistema Internacional de Unidades (SI)

OTROS SISTEMAS DE UNIDADES		MULTIPLICADO POR	SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)	
UNIDAD	SÍMBOLO		SE CONVIERTE A	
			UNIDAD	SÍMBOLO
LONGITUD				
Pie	pie, ft.,'	0.3048	metro	m
Pulgada	plg., in, "	25.4	milímetro	mm
PRESIÓN/ ESFUERZO				
Kilogramo fuerza/cm ²	kg _f /cm ²	98,066.5	Pascal	Pa
Libra/pulgada ²	lb/ plg ² ,PSI	6,894.76	Pascal	Pa
Atmósfera	atm	98,066.5	Pascal	Pa
metro de agua	m H ₂ O (mca)	9,806.65	Pascal	Pa
Mm de mercurio	mm Hg	133.322	Pascal	Pa
Bar	bar	100,000	Pascal	Pa
FUERZA/ PESO				
Kilogramo fuerza	kg _f	9.8066	Newton	N
MASA				
Libra	lb	0.453592	kilogramo	kg
Onza	oz	28.30	gramo	g
PESO VOLUMÉTRICO				
Kilogramo fuerza/m ³	kg _f /m ³	9.8066	N/m ³	N/m ³
Libra /ft ³	lb/ft ³	157.18085	N/m ³	N/m ³
POTENCIA				
Caballo de potencia, Horse Power	CP, HP	745.699	Watt	W
Caballo de vapor	CV	735	Watt	W
VISCOSIDAD DINÁMICA				
Poise	μ	0.01	Mili Pascal segundo	mPa.s
VISCOSIDAD CINEMÁTICA				
Viscosidad cinemática	v	1	Stoke	m ² /s (St)
ENERGÍA/ CANTIDAD DE CALOR				
Caloría	cal	4.1868	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