

54  
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ANALISIS HIDRAULICO DE LA LINEA DE  
CONDUCCION  
"PRESA EL CUCHILLO - ESTACION ALDAMA"

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL  
PRESENTAN :

JUVENTINO LOPEZ ORTIZ  
BENJAMIN PINTO CARRILLO



DIRECTOR DE TESIS  
M.I. OSCAR VEGA ROLDAN

257810

México, D. F.

1998



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-059-060

Señores:  
PINTO CARRILLO BENJAMIN.  
LOPEZ ORTIZ JUVENTINO.  
Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. Oscar Vega Roldán, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrollen ustedes como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"ESTUDIO HIDRAULICO DEL ACUEDUCTO DEL SISTEMA REGIONAL  
EL CUCHILLO, N.L."**

- I.- INTRODUCCION
- II.- COMPORTAMIENTO HIDRAULICO DE UNA CONDUCCION CON ESTACIONES DE BOMBEO.
- III.- ESTUDIO HIDRAULICO DEL ACUEDUCTO EN REGIMEN PERMANENTE
- IV.- ESTUDIO HIDRAULICO DEL ACUEDUCTO EN REGIMEN TRANSITORIO
- V.- CONCLUSIONES

Ruego a ustedes cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo les recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberán prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, a 15 de junio de 1992.  
EL DIRECTOR

ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

el.  
JMCS/RCR\*rmfa

## *Dedicatorias*

*A mis padres a los que agradezco su amor y comprensión,  
ya que con ellos el camino ha sido menos difícil.*

*A mis hermanos por su valiosa y solidaria compañía, que  
me ha servido de aliento para alcanzar mis objetivos.*

*Y por supuesto a dios, creador y dador de vida, que todos  
días abre un camino de esperanza frente a mí.*

## *Agradecimientos*

*Con todo respeto a la facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme albergado en su seno durante el periodo de mi formación como ingeniero, permitiéndome así alcanzar una de mis metas.*

*A la compañía CFEPS consultores S.A. de C.V. por todas las facilidades otorgadas para que pudiera llevar a cabo este trabajo.*

*Agradecemos a todos los familiares, amigos y compañeros que nos brindaron su sincero y desinteresado apoyo.*

*Y hacemos un agradecimiento muy en especial al M.I. Oscar Vega Roldán, director de esta tesis, por su interés y ayuda invaluable para la realización de este trabajo.*

# INDICE

	pag.
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>2. ANTECEDENTES</b>	2
2.1 JUSTIFICACIÓN DEL ACUEDUCTO	3
2.2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	3
2.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	4
2.3.1 Conducción	5
2.3.2 Derivaciones y tanques de carga	6
2.3.3 Plantas de bombeo	7
2.4 GASTOS DE PROYECTO	8
<b>3. DISEÑO DEL ACUEDUCTO A RÉGIMEN ESTABLECIDO</b>	9
3.1 GENERALIDADES	9
3.2 DIÁMETRO ECONÓMICO Y VELOCIDAD ECONÓMICA	10
3.2.1 Velocidades permisibles en conductos por gravedad	11
3.3 ECUACIONES FUNDAMENTALES	11
3.3.1 Ecuación de continuidad	12
3.3.2 Ecuación de Bernoulli	12
3.4 PÉRDIDAS DE CARGA	13
3.4.1 Pérdidas por fricción	14
3.4.2 Pérdidas locales	17
3.5 CARGA PIEZOMÉTRICA	17
3.6 CARGA TOTAL	19
3.7 CAVITACIÓN	19
3.8 ACUEDUCTO A RÉGIMEN ESTABLECIDO	21
<b>4. FLUJO TRANSITORIO EN CONDUCTOS A PRESIÓN</b>	26
4.1 BREVE HISTORIA DEL CONOCIMIENTO DE LOS FENÓMENOS TRANSITORIOS	26
4.2 FLUJO TRANSITORIO	28
4.2.1 Clasificación de flujos	28
4.2.2 Problemas en conducciones debidas a fenómenos transitorios	28
- Sobrepresión	28
- Depresión	28
- Sobrevelocidad en las máquinas	29
4.3 GOLPE DE ARIETE EN CONDUCCIONES POR GRAVEDAD	30
4.3.1 Generalidades	30
4.3.2 Descripción del fenómeno	31
4.3.3 Teoría de la columna rígida	31
4.3.4 Teoría de la columna elástica	33
4.3.5 Ecuaciones generales de Allievi	34
4.3.6 Desarrollo en cadenas de Allievi	35
4.3.7 Cartas de Allievi para maniobras de cierre o apertura uniforme	37
4.3.8 Ecuación de Joukovsky	39

4.4	<b>GOLPE DE ARIETE EN PLANTAS DE BOMBEO</b>	41
	4.4.1 Generalidades	41
	4.4.2 Análisis inicial	41
	4.4.3 Ecuación de Allievi para plantas de bombeo	43
	4.4.4 Curvas características de una bomba	45
<b>5.</b>	<b>MÉTODO DE ANGUS, BERGERON, SCHNYDER</b>	47
5.1	<b>METODO GRÁFICO DE SCHNYDER - BERGERON</b>	47
	5.1.1 Cierre total lento ( $\tau > \mu$ )	50
	5.1.2 Cierre total rápido ( $\tau \leq \mu$ )	53
	5.1.3 Cierre parcial lento	54
	5.1.4 Presión en cualquier sección de la tubería	54
	5.1.5 Apertura total lenta ( $\tau > \mu$ )	58
	5.1.6 Apertura brusca ( $\tau \leq \mu$ )	59
<b>6.</b>	<b>MÉTODO GENERAL DE LAS CARACTERÍSTICAS</b>	60
6.1	ECUACIONES CARACTERÍSTICAS	60
6.2	SOLUCIÓN A LAS ECUACIONES CARACTERÍSTICAS Y DE COMPATIBILIDAD	65
6.3	CONDICIONES DE FRONTERA	68
	6.3.1 Depósito con nivel constante	69
	6.3.2 Extremo cerrado situado en la frontera aguas arriba	70
	6.3.3 Cambio de diámetro en un conducto	70
	6.3.4 Válvula situada en el extremo aguas abajo de un conducto	71
	6.3.5 Válvula situada en cualquier sección de un conducto con cambio de diámetro	73
	6.3.6 Bifurcación de un conducto	75
	6.3.7 Bombas centrífugas y válvulas de no retorno	76
6.4	CONDICIONES DE ESTABILIDAD Y CONVERGENCIA	78
<b>7.</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS FENÓMENOS TRANSITORIOS EN EL ACUEDUCTO</b>	80
7.1	OBJETIVO	80
7.2	PROGRAMA DE CÓMPUTO UTILIZADO	80
7.3	PRIMER TRAMO DE ANÁLISIS	81
7.4	SEGUNDO TRAMO DE ANÁLISIS	86
7.5	TERCER TRAMO DE ANÁLISIS	96
7.6	CUARTO TRAMO DE ANÁLISIS	99
<b>8.</b>	<b>COMENTARIOS FINALES Y RECOMENDACIONES</b>	103
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	107
	<b>PLANO ANEXO</b>	108

# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

El agua juega un papel muy importante, no solo para el desarrollo de las sociedades, sino para su propia existencia. Se da por sabido que el hombre siempre ha buscado para su establecimiento, los lugares que le ofrecen mayores comodidades y facilidades para el desarrollo de sus múltiples actividades. Sin embargo, no siempre ha podido conseguirlo por diversas razones, teniendo que establecerse en sitios que quizá no sean los mejores para su desenvolvimiento. Pero también es cierto que siempre ha tratado de acondicionar su entorno, construyendo para esto obras que le permiten satisfacer en cierto grado sus necesidades. Tal es el caso de los acueductos que a través de la historia ha construido.

En el diseño de acueductos y en su operación es necesario saber evaluar los posibles riesgos que se presentan durante la vida útil de tal modo asegurar la seguridad del sistema. En el diseño son muy variadas las razones por las que se debe decidir entre una alternativa más segura pero más cara que una menos segura.

Además del diseño básico de la línea de conducción a flujo establecido, uno de los temas más interesantes e importantes en el diseño de obras hidráulicas es el relativo a los fenómenos transitorios.

Las líneas de conducción están sujetas a presiones transitorias cuando se abren o cierran las válvulas, o cuando se arrancan o se paran las bombas. Los fenómenos transitorios en las conducciones de agua a presión constituyen un aspecto que el proyectista y el operador de un acueducto no pueden dejar de conocer. La magnitud de las sobrepresiones que generan pueden destruir la conducción y así mismo las depresiones pueden reducir la presión interior tanto que produzcan el colapso de la tubería.

Por lo anteriormente dicho es tan importante analizar los acueductos de manera de evitar, en lo posible, los efectos perjudiciales de dichos fenómenos.

## CAPITULO II

### ANTECEDENTES

Por su ubicación geográfica y su accidentada orografía, nuestro país enfrenta serios problemas por dotar de servicios a todo el territorio, sobre todo lo que se refiere al suministro de agua, haciéndose más evidente en ciertas zonas del norte del país. Tal es el caso de la ciudad de Monterrey y otras poblaciones cercanas a ésta, ya que en la actualidad las diversas fuentes de suministro de agua de la región, tienen dificultad para satisfacer adecuadamente las necesidades de la población y de la industria. Por esto se requiere la construcción de grandes obras de captación, almacenamiento, conducción y distribución para así aprovechar el agua de nuevas fuentes de abastecimiento, que puedan cubrir tanto el déficit actual (que es aproximadamente de 2.5 m<sup>3</sup>/s) como las necesidades futuras de la ciudad de Monterrey así como las necesidades de las localidades circunvecinas.

Después de realizar diversos estudios, la presa "El Cuchillo" fue elegida como la alternativa más conveniente de siete posibles fuentes de abastecimiento. Dicha presa se localiza a 105 Km al este de la ciudad de Monterrey, y fue construida de materiales graduados, su boquilla se extiende hacia ambos márgenes del cauce del río San Juan con un desarrollo aproximado de 4800 m.

Algunos datos adicionales de la presa "El Cuchillo" se presentan a continuación.

PRESA EL CUCHILLO , N.L.	
Altura máxima de la cortina (m)	44.00
Elevación del NAME (m.s.n.m.)	166.66
Elevación del NAMO (m.s.n.m.)	162.35
Elevación del NAMINO (m.s.n.m.)	150.75
Capacidad total del vaso al NAME (millones de m <sup>3</sup> )	1784.70
Capacidad al NAMO (millones de m <sup>3</sup> )	1123.00
Capacidad al NAMINO (millones de m <sup>3</sup> )	202.30
Capacidad útil para agua potable (millones de m <sup>3</sup> )	920.70

## **2.1 JUSTIFICACIÓN DEL ACUEDUCTO**

Debido a la construcción de la presa "El Cuchillo", la cual se ubica sobre el cauce del río San Juan, aguas arriba de la localidad de China, y conforme a la política de operación de dicha presa, no se permitirá circular agua por el río San Juan exceptuando la necesaria para el Distrito de Riego Las Lajas (además de las que pudiera verter la obra de excedencias), esto trae consigo que poblaciones aguas abajo de la presa, queden exentas de su principal fuente de abastecimiento que es el río San Juan. Aunado a esto podemos citar que los resultados obtenidos de análisis fisicoquímicos de las fuentes actuales de dicha región (sobre todo de los pozos en cuanto a dureza, cloruros y sulfatos), son muy desfavorables para el uso doméstico. Por tal motivo se pensó construir un acueducto que lleve agua cruda desde la obra de toma ubicada en la presa "El Cuchillo", hasta la comunidad de Estación Aldama, perteneciente al municipio Los Aldama; beneficiando en el trayecto a las localidades de China, General Bravo, Doctor Coss, Cantú, Los Aldama y Estación Aldama.

## **2.2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

La ubicación del acueducto en estudio es al Noreste del estado de Nuevo León y a 105 Km al Este de la capital de del estado. El clima de ésta región es extremoso en invierno y verano, las lluvias se presentan en los meses de agosto y septiembre, la precipitación media anual es de 600 mm.

El acueducto principia en la presa "El Cuchillo" y su recorrido es paralelo al cauce del río San Juan. La elevación respecto al nivel medio en la zona de estudio, varía desde 163 msnm en China y baja a 128 msnm hasta Los Aldama.

La vía de acceso a la zona es por medio de las carreteras federales No. 40 y No. 48 además del ferrocarril Monterrey-Matamoros que pasa por Estación Aldama.

En la figura 2.1 se presenta la ubicación geográfica del acueducto así como de las poblaciones servidas.

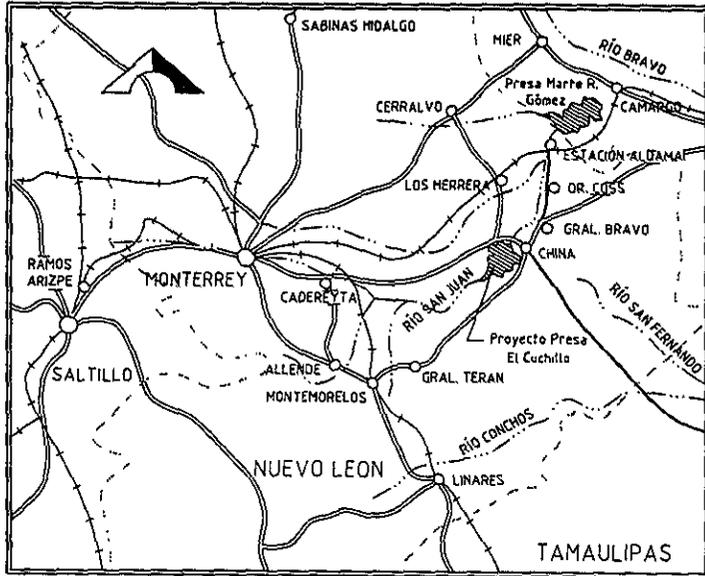


Figura 2.1 Mapa de localización del acueducto y de las poblaciones servidas.

### 2.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

El análisis del acueducto descrito a continuación, representa una de las posibles alternativas de solución de la problemática antes mencionada.

Constituido por tubería de asbesto-cemento, partirá de la presa "El Cuchillo" hasta la localidad de Estación Aldama y tendrá una longitud de recorrido aproximada a los 49.4 Kilómetros. La mayor parte de la conducción (43,369 m) se efectuará por gravedad aprovechando para esto dos elevaciones, en cada una de las que se propone colocar un "tanque de carga", además contará con dos plantas de bombeo.

A partir de China, la conducción irá por el derecho de vía de la carretera que intercomunica las localidades, como la línea de conducción cruza a cada una de las poblaciones, esto favorecerá hacer las derivaciones lo más cercano a los sitios donde se llevará a cabo la potabilización del agua.

El perfil topográfico que se tiene de este trazo se muestra en el **plano anexo** donde se presentan los resultados del diseño hidráulico a régimen establecido o flujo permanente.

### 2.3.1 CONDUCCIÓN

Como se mencionó anteriormente, el material de la tubería será asbesto-cemento. Dicha tubería irá enterrada a lo largo de la conducción a profundidades variables como se muestra en el **plano anexo**, ya que la profundidad depende del diámetro (Ref. 6).

El acueducto "El Cuchillo-Estación Aldama" da comienzo en la captación de la presa "El Cuchillo" (*cadnamiento 0+000*) con una tubería de  $\phi=350$  mm (14") y un gasto de proyecto de 102.03 l/s; a partir de la presa el agua se conducirá por gravedad hasta la planta de bombeo No. 1, que se localiza en el *cadnamiento 1+000*; en esta planta se bombeará el gasto de 102.03 l/s hasta un tanque de carga con capacidad de 1200 m<sup>3</sup>, el cual se localiza en el *cadnamiento 2+100* a una *elevación del terreno de 169.50 msnm*; esta conducción tendrá un diámetro de  $\phi=350$  mm (14").

A partir del tanque No. 1, la conducción será por gravedad, comenzando con una tubería de  $\phi=460$  mm (18") y conducirá un gasto de 102.03 l/s hasta el *cadnamiento 4+440*, que es donde se localiza la primera derivación correspondiente a la población de China. A partir de esta derivación, el acueducto seguirá conduciendo por gravedad un gasto de 65.91 l/s utilizando tubería de  $\phi=350$  mm (14") hasta el *cadnamiento 16+480*, que corresponde a la segunda derivación en General Bravo. Del anterior cadnamiento, la conducción se llevará a cabo mediante tubería de  $\phi=250$  mm (10") A-C y un gasto de 30.16 l/s, con carga suficiente para que continúe por gravedad hasta la tercera derivación, localizada en la localidad de Congregación Cantú, perteneciente al Municipio de Dr. Coss (*cadnamiento 26+780*). Cabe aclarar que dicho municipio cuenta con un sistema de bombeo propio, el cual inicia en Cantú y de ahí el sistema municipal se encarga de potabilizar y distribuir el agua por lo que el gasto derivado en Cantú incluye el gasto correspondiente a Dr. Coss y será de 9.98 l/s (la

conducción dentro del sistema municipal no entra en el análisis de este estudio). Desde la derivación de Congregación Cantú se continuará por gravedad con una tubería de  $\phi=200$  mm (8") de A-C, y conduciendo un gasto de 20.18 l/s hasta un tanque elevado existente que es contiguo a la planta de bombeo No. 2, la cual se encuentra localizada a las afueras de Dr. Coss en el *cadnamiento 32+160*; por medio de una tubería de 8" (200 mm) ésta planta bombeará el agua hasta un tanque de carga ubicado en el *cadnamiento 36+072* a partir del cual la conducción será por gravedad hasta el último punto, ubicado en el *cadnamiento 49+381* correspondiente a la localidad de Estación Aldama, también con tubería de 8" de diámetro.

### 2.3.2 DERIVACIONES Y TANQUES DE CARGA

El tanque de carga N° 1 estará localizado en el *cadnamiento 2+100* a una cota de terreno de 169.50 msnm, cuenta con una capacidad de 1200 m<sup>3</sup> lo que representa un volumen de almacenaje de 1.2 días, fue diseñado para almacenar el agua, proveniente de P.B. 1, a bombeo continuo las 24 Hrs. del día, con la consideración que la elevación máxima del agua será la elevación 171.72 msnm.

Ya que la mayoría de las localidades cuenta con la infraestructura necesaria para llevar a cabo la potabilización del agua, a partir del tanque N° 1 y antes de llegar a la planta de bombeo No. 2 se efectuarán tres derivaciones a lo largo de la conducción. La primera se efectuará en la localidad de China (*cadnamiento 4+400*), teniendo una longitud de 1100 m a partir de la tubería principal y conducirá un gasto de 36.12 l/s en un conducto de 200 mm (8") de diámetro. La entrega se hará en el tanque elevado de la planta potabilizadora de dicha población a la cota 163.36 msnm.

La segunda derivación se efectuará en el *cadnamiento 16+480* que corresponde a la localidad de Gral. Bravo. Su longitud a partir de la tubería principal es de 600 m, la tubería será de A-C de 150 mm (6") de diámetro, que conduce un gasto de 35.75 l/s; la cota de llegada es la 141.15 msnm entregándose también en un tanque elevado.

La tercera derivación se realizará en la localidad de Cantú (*cademamiento 26+780*). La longitud de esta derivación es de 500 m desde de la tubería principal hasta el tanque elevado con cota de llegada de 131.17 m, la tubería es de A-C con un diámetro interior de 100 mm (4") que se encargará de transportar un gasto de 9 98 l/s, que es el correspondiente a Cantú y Dr Coss.

En el *cademamiento 35+772* a una cota piezométrica de 140.38 msnm se localiza el tanque de carga N° 3, el cual recibe de la planta de bombeo N° 2 un gasto de 20.18 l/s Este tanque tendrá una capacidad de almacenamiento de 600 m<sup>3</sup> Después de éste tanque, la conducción continuará por gravedad hasta el tanque elevado de la planta potabilizadora de la localidad de Estación Aldama cuya cota piezométrica de llegada al tanque es de 109.92 msnm.

De cada derivación, solo se mencionan las cotas de entrega a los tanques de llegada o de agua cruda, los cuales distribuyen el agua proveniente del acueducto dentro de las plantas potabilizadoras de cada localidad.

### **2.3.3 PLANTAS DE BOMBEO**

Este acueducto contará con dos rebombes intermedios, el primero ubicado antes de China en el *cademamiento 1+000* m y el segundo a las afueras del poblado de Dr Coss, en el *cademamiento 32+160*

La planta de bombeo número uno manejará un gasto de proyecto de 102 03 l p.s. con una potencia de la bomba de 76 HP. Estará localizada como se dijo anteriormente en el *cademamiento 1+000* a una cota de terreno de 140 msnm La carga positiva de succión y la carga de bombeo, cuando el nivel del agua se encuentra al NAMINO son de 6.35 m y 20 87 m respectivamente, y cuando el nivel del agua se encuentra al NAME las cargas son de 21.36 m y 17 41 m.

La P.B. 1 descargará en un tanque de carga edificado sobre una colina situada en el *cademamiento 2+100* a una elevación de terreno de 169.50 msnm, teniendo como nivel máximo del

espejo de agua en la elevación 171.72 msnm.

La planta de bombeo número dos manejará un gasto de proyecto de 20.18 l/s, con una potencia de 9.6 HP. Estará localizada en el *cademamiento 32+160* a una elevación de terreno de 111.74 msnm. Esta planta estará abastecida mediante un tanque elevado contiguo a la planta de bombeo, cuyo nivel del agua se localiza en la cota 126.93 msnm. La planta de bombeo descarga a un pequeño tanque elevado localizado en el *cademamiento 36+072*, cuyo nivel máximo del agua está situado a la elevación 140.48 msnm. La carga de bombeo será 21.63 m y a partir del tanque la conducción se realizará por gravedad hasta la localidad de Estación Aldama.

## 2.4 GASTOS DE PROYECTO

Con base en datos estadísticos de los aspectos demográficos y con el método de progresión geométrica se obtuvieron las poblaciones de proyecto cuyo período económico comprende hasta el año 2010. El gasto máximo diario de cada población se obtuvo tomando en cuenta, además del uso doméstico, el servicio público, el servicio comercial y las pérdidas físicas.

En el cuadro que a continuación se presenta, aparecen los datos de población para diferentes años (en habitantes), dotación propuesta (en litros por habitante al día) y gasto máximo diario (en litros por segundo).

LOCALIDAD	1990	1995	2000	2010	DOTACIÓN	Q Máx día
China	9284	10504	11884	15213	133	36.12
Gral. Bravo	9108	9997	10972	13219	150	35.75
Doctor Coss	3380	3695	4040	4829	124	9.98
Los Aldama	6426	6956	7680	9361	125	20.18

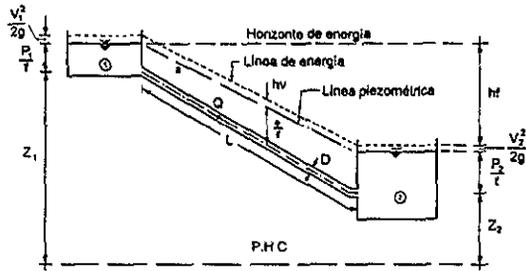


Figura 3.3 Conducción por gravedad

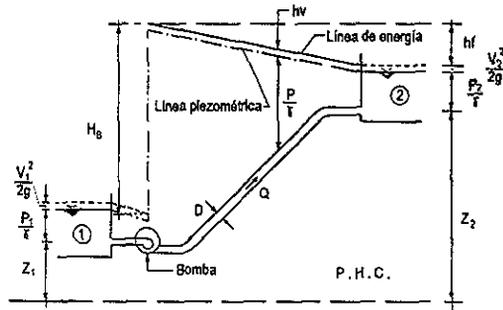


Figura 3.4 Conducción por bombeo.

### 3.4 PÉRDIDAS DE CARGA

En la ecuación de Bernoulli (ecuación 3.2) aparece el término llamado "pérdidas de carga", que representa la cantidad de energía que el flujo tiene que disipar para vencer las fuerzas que se oponen a su escurrimiento.

Las pérdidas de carga las podemos dividir en pérdidas por fricción (\$h\_f\$) y pérdidas locales (\$h\_L\$) llamadas también pérdidas menores.

$$h_t = \Sigma h_f + \Sigma h_L \quad (3.3)$$

### 3.4.1 PÉRDIDAS POR FRICCIÓN

Este tipo de pérdidas se distribuye a lo largo de todo el tramo de tubería en el cual fluye el líquido, se puede determinar mediante el uso de fórmulas deducidas experimentalmente, dependiendo del tipo de flujo de que se trate, por ejemplo podemos mencionar algunas de las fórmulas más utilizadas para el cálculo de este concepto.

#### Fórmula de Manning

$$h_f = L \left( \frac{V n}{R^{2/3}} \right)^2 \quad (3.4)$$

Donde :

- $h_f$  = Pérdidas por fricción en metros.
- $L$  = Longitud de la línea de conducción en metros.
- $V$  = Velocidad del flujo en m/s.
- $R$  = Radio hidráulico en metros (en secciones circulares = Diámetro/4).
- $n$  = Coeficiente de rugosidad (en función del material de la tubería).

#### Fórmula de Scobey

Para tuberías de acero es :

$$h_f = \frac{V^{1.9}}{D^{1.1}} K_s \quad (3.5)$$

Para tuberías de concreto :

$$h_f = \frac{V^2}{D^{1.25}} K_s \quad (3.6)$$

Donde :

- $h_f$  = Pérdidas de carga debidas a la fricción en pies por cada 1000/pies
- $K_s$  = Coeficiente de pérdidas determinado experimentalmente
- $V$  = Velocidad de la corriente en pies por segundo
- $D$  = Diámetro de la tubería en pies

#### Fórmula de Hazen - Williams

Para tubos de fundición es :

$$h_f = \frac{3030 V^{1.85}}{C^{1.85} D^{1.17}} \quad (3.7)$$

Donde : " C " es un coeficiente que esta en función de la edad de la tubería y los demás términos tienen el mismo significado al de la fórmula anterior.

### Fórmula de Darcy - Weisbach

Esta es la fórmula que se utilizó para determinar las pérdidas producidas por la fricción en la línea de conducción que se analiza en este trabajo.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (3.8)$$

- $h_f$  = Pérdidas por fricción.
- $f$  = Coeficiente de pérdida de carga.
- $L$  = Longitud de la tubería.
- $D$  = Diámetro de la tubería.
- $V$  = Velocidad media del fluido.

Para determinar el coeficiente de pérdida de carga (  $f$  ), existen diferentes fórmulas que dependen del tipo de flujo o se puede utilizar el diagrama universal de Moody **figura 3.5** (Ref. 10).

TIPO DE TUBO	AUTOR	FORMULA	RANGO
Lisos o rugosos en zona laminar	Poiseulle	$f = \frac{64}{Re}$	$Re < 2300$
Lisos en zona de transición o turbulenta	Blasius	$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$	$Re > 10^5$
	Nikuradse	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left( \frac{Re\sqrt{f}}{2.51} \right)$	$23000 < Re$ $Re > 3400000$
	Kozeny	$f = \frac{2g}{(7.78 \log Re - 5.95)^2}$	$Re > 4000$
Rugosos en zona turbulenta	Nikuradse	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{3.71D}{\epsilon}$	
	Kozeny	$f = \frac{2g}{(8.86 \log D + N)^2}$	
Rugosos en zona transición y turbulentos	Swamee y Jain	$f = \frac{2g}{\left[ \log \left( \frac{\epsilon/D}{3.71} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$	$Re > 4000$

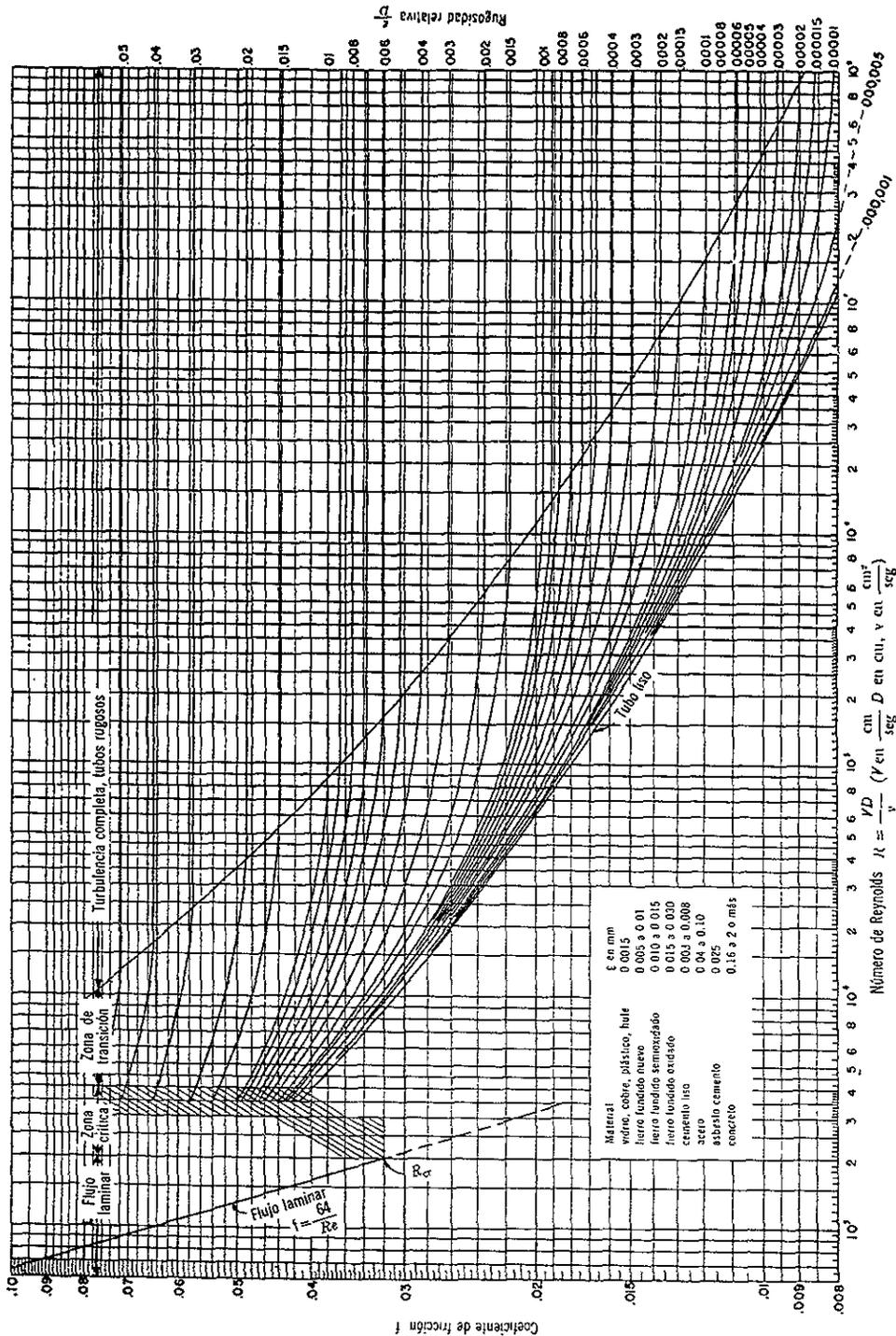


Figura 3.5 Diagrama Universal de Moody. (Ref. 10)

### 3.4.2 PÉRDIDAS LOCALES

Estas pérdidas tienen lugar en los cambios de sección y dirección de la corriente, en las contracciones, ensanchamientos, codos, diafragmas, válvulas de diferentes tipos, etc. Estos elementos producen una perturbación de la corriente en el mismo sitio del cambio de geometría o de la alteración del flujo que origina remolinos y desprendimientos que intensifican las pérdidas.

Las pérdidas locales o menores se pueden calcular por una fórmula especial y un coeficiente de pérdidas adimensional.

$$h_L = K \frac{V^2}{2g} \quad (3.9)$$

Donde :

$h_L$  = Pérdida de carga local

$K$  = Coeficiente de pérdida de carga secundaria adimensional

$\frac{V^2}{2g}$  = Carga de velocidad, aguas abajo de la zona de alteración del flujo

El coeficiente " K " depende del tipo de accesorio, del número de Reynolds, de la rugosidad y hasta de la configuración de la corriente antes del accesorio.

### 3.5. CARGA PIEZOMÉTRICA

La carga piezométrica en cualquier punto de una conducción, es la presión del fluido en dicho punto, y se obtiene al sumar la distancia " Z " (en metros) que existe de un plano horizontal de referencia a la tubería, más el valor de la presión manométrica (  $\frac{P}{\gamma}$  ) en dicho punto (en metros de columna de agua), esto es :  $C.P. = Z + \frac{P}{\gamma}$ .

En el análisis del comportamiento de una conducción, es de gran utilidad representar gráficamente la carga piezométrica en cada sección de la misma, (ver **plano No 1**). Dicha representación es la línea piezométrica.

La línea piezométrica es una línea recta descendente en el sentido del flujo con una pendiente cuyo valor será  $\frac{f V^2}{2 g D}$  si se usa la fórmula de Darcy-Weisbach, y resulta de unir en cada sección los puntos asociados a la carga piezométrica.

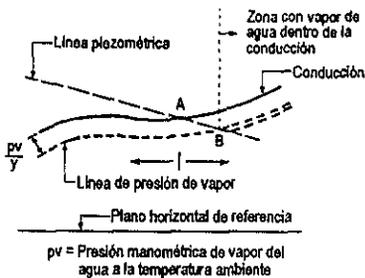


Figura 3.6 Tramo supuesto de conducción.

En la figura 3.6 se presenta un tramo supuesto de tubería que es cortado en el punto "A" por la línea piezométrica. Si la presión disminuye hasta igualar la presión de vaporización del agua a la temperatura de trabajo, en el seno del fluido se crearán burbujas de vaporización y ya no fluirá agua líquida por el acueducto sino que coexistirán las fases líquido y vapor con gases libres que, en la zona en la que la presión era la atmosférica, se hallaban disueltos. Es por esto que siempre se evita que la cota piezométrica cruce la línea de la conducción en cualquier punto de ésta.

Para ubicar las zonas de flujo de agua líquida y vapor, se traza por debajo del perfil una línea distante  $\frac{(Pa - Pv)}{\gamma}$ , donde  $Pv$  es la presión absoluta de saturación de vapor de agua y  $Pa$  la presión atmosférica absoluta.

En la siguiente tabla se presentan valores de  $Pv$  para el agua (pura, limpia) a diferentes temperaturas (Ref. 8).

Temperatura (°C)	Presión absoluta de saturación de vapor del agua ( m.c.a.)
0	0.06
10	0.12
20	0.25
30	0.44
40	0.76
50	1.26
60	2.03
80	4.86
100	10.33

### 3.6 CARGA TOTAL

La representación gráfica de la carga total se obtiene en forma muy sencilla sumándole gráficamente la carga de velocidad a la línea piezométrica. En la figura 3.7 se presenta una conducción que sale de un tanque donde la velocidad es despreciable junto a la velocidad "V" de la tubería y llega a otro tanque donde se verifica lo mismo. Las representaciones gráficas de las líneas piezométricas y de carga total se observan superpuestas en dicha figura.

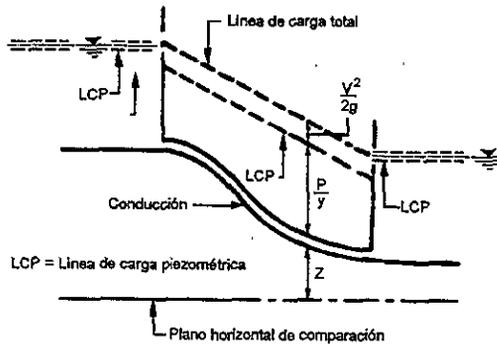


Figura 3.7 Línea de carga total.

### 3.7 CAVITACIÓN

Por la necesidad de instalar dispositivos propios de las conducciones (por ejemplo válvulas, cambios de dirección etc.), se corre el riesgo que en las secciones donde existen dichos dispositivos se presenten cambios en las áreas de las secciones por el paso del flujo. Si aplicamos la ec. de continuidad (ecuación 3.1) y denominando  $A_1$  y  $A_2$  las áreas de las secciones de la tubería rectilínea y el área más pequeña en el interior de la singularidad respectivamente se tiene :

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (3.10)$$

En consecuencia, si  $A_1 > A_2$  se deduce que dentro de la singularidad se pueden presentar

velocidades  $V_2$  mayores que la velocidad en la tubería  $V_1$ . En la fig. 3.8 se muestra un esquema muy simplificado de una válvula con las líneas de corriente del flujo, destacándose el incremento de la velocidad al pasar de la sección "1" a la sección "2".

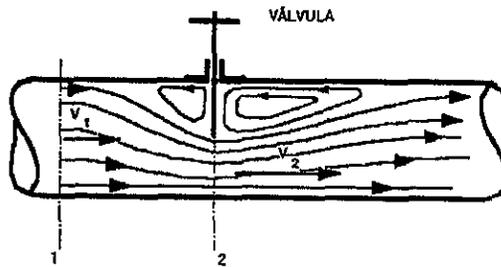


Figura 3.8 Incremento de la velocidad en un segmento.

Conociendo la presión en la sección "1" es posible calcular la presión en la sección "2" admitiendo que en la primera aproximación que la pérdida de carga entre la sección "1" y la sección "2" es nula. Aplicando la ec de Bernoulli con pérdida nula, y admitiendo que  $Z_1 = Z_2$  se tiene :

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$$

Aplicando ahora la ecuación 3.10 e introduciendo  $Q = V_1 A_1$  se tiene la siguiente expresión:

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{Q^2}{A_1^2 2g} \left[ \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right]$$

En consecuencia, como  $\frac{A_1}{A_2} > 1$  resulta que en "2" se tienen presiones  $P_2$  más pequeñas que  $P_1$  y si  $\frac{A_1}{A_2}$  es suficientemente grande puede llegarse a tener presiones  $P_2$  cercanas a la presión de vapor a la temperatura de trabajo. Esto implica la aparición en el seno del flujo de burbujas de vapor tal como lo indica la figura 3.9. Estas burbujas pueden ser muy pequeñas sin embargo lo

significativo es que lleguen a formarse. Una vez formadas viajan con el flujo y recordando que la sección "2" es la sección con velocidad media más alta, las burbujas pasarán de inmediato por secciones de menor velocidad media lo cual implica presiones mayores. Ello supone que las burbujas formadas en la sección "2" no pueden subsistir en la sección "3" y por lo tanto "implotarán" ( explotarán hacia dentro ). Este fenómeno de formación de burbujas de vapor por acción de un descenso de presión en el seno del flujo y su subsiguiente implosión al entrar a la zona de mayor presión se denomina "*cavitación*". Cuando la implosión de las burbujas ocurre en la proximidad de fronteras materiales, el fenómeno es altamente destructivo. Por ello su caracterización en cada singularidad es imprescindible y en el diseño debe evitarse completamente.

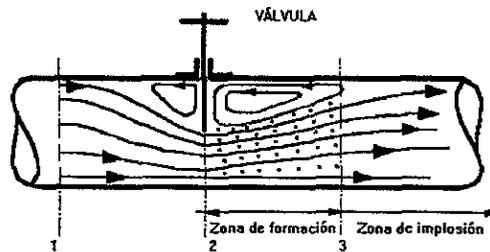


Figura 3.9 Formación de burbujas de vapor.

### 3.8 ACUEDUCTO A RÉGIMEN ESTABLECIDO

Una vez definido el trazo de la conducción, la longitud de los tramos, el perfil de la misma y el gasto máximo diario, se procedió a definir *diámetro económico comercial* de la tubería; ya que en acueductos con gastos pequeños como el que nos ocupa, resulta más caro mandar fabricar la tubería con el diámetro óptimo arrojado del análisis numérico, que comprar tubería con diámetro cercano al óptimo.

En la **figura 3.10** (Ref. 6) se muestra el formato utilizado para evaluar, cotizar y comparar diferentes diámetros comerciales de tubería, para con ello obtener el diámetro económico de cada uno de los tramos de la conducción. Resultando como diámetro económico el que está dado por el menor costo determinado en la columna "7". En dicho formato se incluye una somera evaluación del fenómeno transitorio de golpe de ariete, con lo que se intenta conocer la presión máxima a la que estará sometido el acueducto, y así poder asignar el tipo y clase de tubería correspondiente.

Además del costo de la tubería, se comparan costos de materiales y conceptos que intervienen en la instalación y operación de acueductos, como son la excavación, relleno compactado plantilla, costo de bombeo etc.

Proyecto: \_\_\_\_\_  
 Cálculó: \_\_\_\_\_

Diámetro nominal	Área en [m <sup>2</sup> ]	Gasto en [m <sup>3</sup> /s]	Velocidad en [m/s]	Longitud de línea en [m]	f de Darcy	Pérdida por fricción hf	Pérdidas locales	Pérdidas totales	Eficiencia $\eta = \frac{\text{---}}{\text{---}} \%$	$H.P. = \frac{Q \cdot \eta}{76 \cdot \eta}$
	mm	Pulg.								

**GOLPE DE ARIETE**

Presión de trabajo de la tubería [kg/cm <sup>2</sup> ]	Diámetro nominal en [cm]	Espesor pared de tubo en [cm]	Velocidad en [m/seg]	Ete	$h = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{Ead}{Ete}}}$	Sobrepresión absorbida por válvula R.P. = 80% h	Sobrepresión absorbida por tubería 20% h	Carga normal de operación en [m]	Presión total = 20% h + carga normal de operación

V = Velocidad inicial del agua (m/seg)    Ea = Módulo de elasticidad del agua (20,670 kg/cm<sup>2</sup>)    Et = Módulo de elasticidad de las paredes del tubo (A-C = 328,000 y acero = 2,100,000 kg/cm<sup>2</sup>)

CONCEPTO	Diámetro mm ( " ), clase		Diámetro mm ( " ), clase		Diámetro mm ( " ), clase	
	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad
Excavación Mat. clase A		m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>
Excavación Mat. clase B		m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>
Excavación Mat. clase C		m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>
Plantilla apisonada		m <sup>2</sup>		m <sup>2</sup>		m <sup>2</sup>
Inst. lujoso y prueba tubería		m		m		m
Releño compactado		m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>
Releño a volteo		m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>
Atraches de concreto f=80		m		m		m
Costo de la tubería						
Costo total de la conducción						

**RESUMEN**

Presión de trabajo Tubería kg/cm <sup>2</sup>	Diámetro mm	Pulg.	① H.P.	② K.W.h	③ Costo por hora de bombeo \$	④ Carga anual de bombeo	⑤ Costo total de conducción	⑥ Carga anual de amortización (conducción) albos al % anual	⑦ Costo anual de bombeo para operación de 365 días

Costo anual de K.W.h = \$ \_\_\_\_\_    ② = ① x 0.7457    ③ = ② x \$ \_\_\_\_\_    ④ = ③ x 8,760    ⑤ = ④ x anualidad    ⑦ = ④ + ⑥

Figura 3.10

A continuación se presenta el resumen de resultados obtenidos para cada tramo así como el diámetro económico propuesto para la tubería principal. Las tablas y gráficas de comparación, así como la manera de elaborarlas, no se presentan ya que no entran dentro de los alcances de este trabajo.

TRAMO	LONGITUD	DIAMETRO	CLASE	MATERIAL	VELOCIDAD
1	2,100 m	14"	A-5	A-C	1.027 m/s
2 (secc. 1)	2,340 m	18"	A-5	A-C	0.621 m/s
2 (secc. 2)	12,040 m	14"	A-5	A-C	0.664 m/s
2 (secc. 3)	10,300 m	10"	A-5	A-C	0.600 m/s
2 (secc. 4)	5,380 m	8"	A-5	A-C	0.622 m/s
3	3,912 m	8"	A-5	A-C	0.622 m/s
4	13,311 m	8"	A-5	A-C	0.622 m/s

NOTAS : La velocidad se obtiene con la fórmula de continuidad ( ecuación 3.1 ).

Los tramos, así como las secciones del tramo 2 son apreciables en el **plano anexo**.

Utilizando la *ecuación 3.3* ( Ecuación de Bernoulli o conservación de la energía ) y suponiendo que la velocidad en los tanques a la entrada y salida es despreciable, la carga piezométrica la podemos obtener de la siguiente forma :

$$CP = CS - SLn \quad ( 3.11 )$$

Donde :

- CP = Cota piezométrica en el punto de interes
- CS = Carga de salida o nivel del agua en el depósito
- S = Pendiente en el tramo =  $h_f / Lt$
- $h_f$  = Pérdidas totales *ecuacion 3.3*
- Lt = Longitud total del tramo
- Ln = Longitud al punto "n" desde la salida

Rigurosamente la línea piezométrica en una conducción debería estar formada por segmentos de diferentes pendientes, desfasadas en los puntos donde existen pérdidas locales, pero por simplicidad se

omite dicho procedimiento obteniéndose la pendiente " S " de la forma anteriormente descrita.

A manera de ejemplo, en la página siguiente se presentan los resultados a régimen establecido utilizando la *ecuación 3.11* para el tramo :

*PRESA "EL CUCHILLO" - PLANTA DE BOMBEO NO. 1*

**DATOS:**

- ( 1 ) Diámetro = 14"
- ( 2 ) Gasto = 102.03 l/s
- ( 3 ) Pérdidas totales  $h_t = 4.41$  m
- ( 4 ) Longitud del tramo = 1,000 m
- ( 5 ) Nivel del agua a la salida = 150.76 (NAMINO)
- ( 6 ) Pendiente " S " = 0.00441

Cadenamiento	Longitud	Cota piezométrica	Cota del terreno	Carga disponible
0+000	100	150.76	130.00	20.76
0+100	100	150.32	130.00	20.32
0+200	100	149.88	130.00	19.88
0+300	100	149.44	135.00	14.44
0+400	100	149.00	139.50	9.50
0+500	100	148.56	140.00	8.56
0+600	100	148.11	140.00	8.10
0+700	100	147.67	140.00	7.67
0+800	100	147.23	140.00	7.23
0+900	100	146.79	140.00	6.79
P:B: 1+000	100	146.35	139.85	6.50
		177.22		37.37

Los resultados de los tramos restantes fueron obtenidos de manera similar y dichos resultados son presentados en el **plano anexo**.

## CAPITULO IV

### FLUJO TRANSITORIO EN CONDUCTOS A PRESIÓN

#### 4.1 BREVE HISTORIA DEL CONOCIMIENTO DE LOS FENÓMENOS TRANSITORIOS

Probablemente el primero en hacer investigaciones relacionadas con el golpe de ariete fue Michaud. En 1878, basado en sus estudios y experimentos de este fenómeno en tuberías, publicó en Lausana, Suiza, un libro cuyo título fue "*Coups de Bélier dans les Conduites. Etude des moyens employés pour atténuer ses effets*", donde establece un análisis matemático del golpe de ariete, que tiene lugar en una columna de agua elástica contenida en una tubería rígida.

Helmholtz, dentro de el campo de la acústica, demostró en 1848, que la celeridad o velocidad de propagación del sonido en el seno de un fluido compresible contenido en una tubería, era función de la elasticidad del material de las paredes de esta última, y en ese mismo año D.J. Korteweg determinó la ecuación correspondiente.

Nicolai Igorovich Joukovsky (1847-1921), demostró en 1897 que cuando en una tubería se presenta un incremento de presión a causa de un cierre brusco de una válvula situada en el extremo aguas abajo, la celeridad de la onda de presión generada por tal maniobra, al igual que el sonido, también es función de la elasticidad de las paredes. Joukovsky investigó y experimentó los efectos producidos por cierre de válvulas, cámaras de oscilación, válvulas de seguridad, etc., y en cada caso presentó un análisis matemático riguroso incluyendo todos los elementos necesarios, de acuerdo con las diferentes condiciones. Estos fueron los estudios y experimentos que este científico realizó con relación al golpe de ariete, que dieron como resultado las primeras ecuaciones básicas en su forma más correcta. Tales resultados fueron publicados en 1898, en las "*Memorias de la Academia Imperial de San Petersburgo*". Las ecuaciones de Joukovsky son consideradas como la primera gran aportación a la teoría del golpe de ariete.

Lorenzo Allievi (1856 - 1942), es quizá la figura más importante por sus estudios y aportaciones

a la teoría del golpe de ariete. Profundizó en las investigaciones efectuadas por Joukovsky y en 1902, partiendo de los resultados obtenidos por el científico ruso, los cuales complementó con ideas propias, elaboró su primer trabajo importante sobre el golpe de ariete (1903) al cual tituló "*Teoria generale del moto perturbato dell 'acqua nei tubi in pressione*", que fue publicada por la sociedad italiana de ingenieros y arquitectos. Su gran interés por mejorar cada vez más sus teorías acerca del fenómeno en cuestión, tuvo gran resultado con la aparición en 1913 de su obra "*Teoria del colpo d'ariete*", editada en las actas del Colegio de Ingenieros y Arquitectos de Italia, la cual es considerada como la base para el desarrollo de los descubrimientos realizados posteriormente en este campo.

E. Braun, en 1909 aportó una de las mejores contribuciones al desarrollo de la teoría del golpe de ariete, al introducir el valor de la característica de la tubería ( $\epsilon$ ) en el trabajo que presentó en Stuttgart, bajo el título "*Druckschwankungen in Rohrleitungen*" (oscilaciones de presión en tuberías). En 1910 publicó trabajos similares a los expuestos por Allievi en su segundo tratado de 1912.

El suizo Othmar Schnyder, en 1929 desarrolló un método gráfico de solución del golpe de ariete en sistemas de bombeo, y en 1932 publicó un trabajo donde expone su método para resolver cualquier sistema de tuberías, especialmente para las que alimentan turbinas.

El científico francés Luis Bergeron (1876-1936) en 1933, trabajando independientemente, desarrolló el mismo método gráfico ideado por Schnyder. En 1937, Bergeron demostró que el método gráfico de análisis que había desarrollado para resolver problemas de golpe de ariete podía ser aplicado a otros campos de la teoría de la elasticidad y también a problemas eléctricos.

R.W. Angus, de la Universidad de Toronto, en Canadá, mejoró notablemente los métodos gráfico y analítico de solución, mediante valiosas aportaciones.

En 1953, con el advenimiento de las computadoras, Gray introdujo el método de las características para poder llevar a cabo el análisis computarizado del golpe de ariete.

## 4.2 FLUJO TRANSITORIO

### 4.2.1 CLASIFICACIÓN DE FLUJOS

- Flujo permanente y no permanente Si las condiciones de flujo, tal como presión, velocidad y carga, no cambian con el tiempo, el flujo se denomina permanente. Si las condiciones cambian con el tiempo, el flujo se denomina no permanente.

- Flujo uniforme y no uniforme o variado Un flujo se denomina uniforme si la velocidad es constante con respecto a la distancia para cualquier instante dado. Si la velocidad varía a lo largo del conducto para cualquier instante, el flujo es no uniforme, sino "variado".

- Flujo compresible y no compresible Un flujo se considera incompresible, si al pasar de una sección a otra del conducto los cambios en la densidad del fluido son despreciables, y en caso contrario se dice que es compresible.

- Flujo transitorio Se define como el flujo inestable intermedio, cuando las condiciones del flujo cambian de una condición de estado permanente a otro estado permanente.

### 4.2.2 PROBLEMAS EN CONDUCCIONES DEBIDAS A FENÓMENOS TRANSITORIOS

Los problemas en conducciones de agua a presión debidos a fenómenos transitorios, son de tres tipos: sobrepresión, depresión y sobrevelocidad en las máquinas.

#### - SOBREPRESIÓN

Con este nombre se denomina a toda presión superior a la de trabajo en cualquier punto de una conducción a presión. Una sobrepresión provoca un incremento de tensiones en el material de la tubería pudiendo provocar deformaciones plásticas o roturas en la instalación.

#### - DEPRESIÓN

Bajo esta denominación se considera a toda presión absoluta menor que la atmosférica.

Cuando se trata de fenómenos transitorios creados por el paro accidental de una planta de

bombeo, los problemas de depresión son los más frecuentes, y se pueden clasificar en tres tipos:

1° Colapso de la tubería Al reducirse la presión interior y alcanzar valores por debajo de la presión media exterior, el tramo de tubería afectado trabajará a la compresión. Si ésta es suficientemente alta, se producirá un fenómeno de pandeo en la pared del tramo hasta llegar al colapso.

2° Separación de la columna líquida Si la resistencia de la tubería a la compresión es suficiente para evitar el colapso, el descenso de la presión interior puede producir la vaporización del agua a la temperatura ambiente; el líquido se transforma en gas y se crean burbujas de tamaños diversos en el agua. La presión de vaporización esta en función de la altura sobre el nivel del mar y de la temperatura del líquido, y en sí no constituye un problema, pero si puede serlo después, cuando la burbuja producida inicialmente por una onda de depresión sea sometida a una presión levemente superior a la de vaporización, lo que reducirá con mucha rapidez su volumen, provocando que las columnas líquidas separadas por ellas choquen violentamente.

3° Entrada de aire en la tubería La entrada de aire atmosférico en la tubería puede realizarse a través de las válvulas de admisión y expulsión de aire cuando la presión en el interior de la tubería es menor que la exterior.

En un acueducto bien diseñado, la línea de resistencia de la tubería es superior en cada punto, a la presión máxima; y la presión mínima debe ser mayor que la presión atmosférica.

#### - SOBREVOLUCIDAD EN LAS MÁQUINAS

Cuando hay un paro accidental debido al corte de energía eléctrica, las bombas hidráulicas quedan condicionadas a la acción combinada del flujo (que en un acueducto ascendente tiende a invertirse) y de la inercia de las masas en rotación. De esta acción casi siempre se deriva una inversión de velocidad en la máquina, que comienza a girar al revés al cabo de pocos segundos. Es obvio que si esta velocidad aumenta por encima de la del régimen, las partes que giran serán sometidas a

esfuerzos proporcionales, debido a la fuerza centrífuga, como lo es la aceleración centrípeta. Si este fenómeno persiste mucho tiempo, las piezas sufrirán un mayor desgaste que el normal.

### 4.3 GOLPE DE ARIETE EN CONDUCCIONES POR GRAVEDAD

#### 4.3.1 GENERALIDADES

Este fenómeno se presenta debido a una serie de perturbaciones originadas por cambio de flujo en un conducto a presión, por lo que se producen variaciones violentas de presión en forma de ondas elásticas que viajan por la tubería.

A continuación se presentan los conceptos principales utilizados en el análisis del golpe de ariete.

**CELERIDAD (  $a$  ).** Es la velocidad con que se propaga la onda de presión a lo largo de la tubería (la velocidad del sonido en el agua).

**FASE (  $\mu$  ) Y PERÍODO (  $T$  ).** Muchas veces se llama "período" al tiempo en segundos que tarda la onda de presión en ir de un extremo al otro de la tubería y reflejarse hasta llegar nuevamente a la válvula. Si  $L$  es la longitud de la tubería de presión, esta magnitud es  $\frac{2L}{a}$ .

El período de la oscilación es realmente  $T = \frac{4L}{a}$ , lo que da lugar a confusiones que se resuelven llamando "FASE" al tiempo  $\frac{2L}{a}$ . Así lo haremos en este trabajo.

**TIEMPO DE MANIOBRA (  $\tau$  ).** Es el tiempo en segundos que dura un cierre o una apertura de una válvula.

**MANIOBRA INSTANTÁNEA O BRUSCA.** Aquella que dura como máximo una fase, es decir  $\tau \leq \mu$ .

**MANIOBRA LENTA O GRADUAL.** Es la que dura más de un fase, es decir, cuando  $\tau > \mu$ .

**TIEMPO RELATIVO DE MANIOBRA (  $\theta$  ).** Es el número de fases que dura la maniobra; es decir  $\theta = \frac{\tau}{\mu}$ .

### 4.3.2 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO

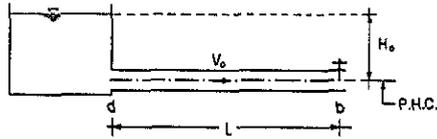


Figura 4.1

Si en el modelo de la **figura 4.1** se lleva a cabo una maniobra de cierre instantáneo en el órgano de control, cuando existe flujo permanente, la energía cinética del agua se transformará en energía potencial, y a su vez se incrementará la carga piezométrica un valor de  $\Delta H$ , lo cual provoca una deformación de las paredes del conducto y en el agua.

La conversión de energía se conoce como onda de presión y se propaga con velocidad o celeridad "  $a$  ".

El frente de onda llega al depósito en un tiempo  $t = \frac{L}{a}$ , en el cual el conducto se encuentra deformado en su totalidad.

Al llegar la onda a "d" el nivel en el depósito permanece constante y refleja en su totalidad la onda de presión y en este instante se produce la traslación de una onda negativa hacia el órgano de control (punto b).

A esta primera serie de eventos, se le conoce como fase directa del golpe de ariete.

### 4.3.3 TEORÍA DE LA COLUMNA RÍGIDA

Esta teoría ya no es utilizada en la práctica; fue desarrollada para cuantificar la magnitud de los efectos del golpe de ariete en conductos con una misma sección transversal.

A continuación se enlistan las principales hipótesis en las que esta basada ésta teoría:

- a) El flujo en el conducto es incompresible.
- b) Las paredes del conducto se consideran rígidas o indeformables.
- c) El conducto permanece lleno de agua todo el tiempo y la presión mínima en cualquier sección de este siempre es mayor que la presión de vaporización del agua.
- d) Las pérdidas de carga por fricción y la carga de velocidad son despreciables en comparación con los cambios de presión en el conducto.
- e) Las distribuciones de velocidad y presión en cualquier sección del conducto son uniformes.
- f) El nivel del depósito permanece constante durante el tiempo que dura el fenómeno.
- g) La carga piezométrica varía linealmente con respecto a la coordenada curvilínea  $x$ .

Las cargas máximas y mínimas para los casos de cierre y apertura respectivamente, se pueden determinar con las siguientes expresiones:

$$(\Delta H_r)_{m\acute{a}x} = H_0(Z_r)_{m\acute{a}x} = \left( \frac{K_r}{2} + \sqrt{K_r + \frac{K_r^2}{4}} \right) H_0$$

$$(\Delta H_r)_{m\acute{i}n} = H_0(Z_r)_{m\acute{i}n} = \left( \frac{K_r}{2} - \sqrt{K_r + \frac{K_r^2}{4}} \right) H_0$$

$$K_r = \left( \frac{L\Delta V_r}{gH_0\tau} \right)^2$$

Donde:

- $L$  = Longitud de la línea de conducción en metros.
- $\Delta V_r$  = Diferencia entre velocidades inicial y final para el flujo permanente  $V_0 - V_r$ , en m/seg.
- $g$  = Aceleración de la gravedad, en m/seg<sup>2</sup>.
- $H_0$  = Carga piezométrica en m.
- $\tau$  = Tiempo de cierre o apertura en seg.

Esta teoría es aplicable sólo para conductos donde la maniobra de cierre o apertura del órgano de control es relativamente lento ( $\tau > \frac{L}{73}$ ) y para una relación de carga y velocidad para el flujo permanente inicial, tal que  $\frac{H_0}{V_0} \leq 50$ .

#### 4.3.4 TEORÍA DE LA COLUMNA ELÁSTICA

Esta teoría se acerca más al comportamiento real del fenómeno, además que su aplicación es más conveniente para maniobras de cierre o apertura rápidas. Las hipótesis simplificatorias en las que esta basada esta teoría son las siguientes :

- a) El conducto permanece lleno de agua todo el tiempo y la presión mínima en cualquier sección siempre es mayor que la de vaporización del fluido.
- b) Las distribuciones de velocidad y presión en cualquier sección del conducto son uniformes.
- c) Las fórmulas para el cálculo de pérdidas de carga cuando el flujo es permanente, también son válidas cuando éste es transitorio.
- d) La pared del conducto y el fluido se comportan de una manera elástica lineal y tienen pequeñas deformaciones.
- e) El incremento de la presión con respecto a las coordenada curvilínea "x" resultan pequeño comparado con el incremento de la misma con respecto al tiempo.

$$\frac{dp}{dt} \approx \frac{\partial p}{\partial t}$$

- f) El incremento de la carga de velocidad y la densidad del fluido resulta pequeño comparado con el de la carga piezométrica.

$$\frac{\partial H_T}{\partial x} + \frac{h_p}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) \approx \frac{\partial H}{\partial x}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} \approx \rho g \frac{\partial H}{\partial t}$$

Para el análisis de la conducción, definiremos a la celeridad de la onda de presión " a " :

$$a = \frac{1}{\sqrt{\rho \left( \frac{1}{E_v} + \frac{D}{eE_T} \right)}} \quad (4.1)$$

Donde :

- $E_v$  = Módulo de elasticidad volumétrico del fluido.
- $\rho$  = Densidad del fluido.
- $D$  = Diámetro del tubería.
- $e$  = Espesor de la tubería.
- $E_T$  = Módulo de elasticidad del material del conducto.

Ahora, si tomamos los siguientes valores prácticos de  $E_v = 2.24 \times 10^8 \text{ Kg/m}^2$  y  $\rho = 101.94 \frac{\text{Kgf seg}^2}{\text{m}^4}$  se obtiene :

$$a = \frac{1,482}{\sqrt{1 + \frac{E_v D}{E_T e}}} \quad (4.2)$$

para  $\frac{e}{D} \leq 0.10$

#### 4.3.5 ECUACIONES GENERALES DE ALLIEVI

Allievi propuso un sistema de ecuaciones para calcular la variación de la carga piezométrica y la velocidad en la sección adyacente inmediatamente aguas arriba del órgano de control. Estas ecuaciones se deducen primeramente de las ecuaciones diferenciales del golpe de ariete:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (4.4)$$

conocidas como ecuaciones de continuidad y dinámica del golpe de ariete, de las cuales se obtienen las ecuaciones integrales que permiten determinar la carga piezométrica y la velocidad en cualquier sección del conducto durante el flujo transitorio en función de la coordenada curvilínea  $x$  con origen en el depósito y el tiempo  $t$ .

$$H = H_o + F\left(t + \frac{L}{a}\right) + f\left(t - \frac{L}{a}\right) \quad (4.5)$$

$$V = V_o - \frac{g}{a} \left[ F\left(t + \frac{L}{a}\right) - f\left(t - \frac{L}{a}\right) \right] \quad (4.6)$$

a estas dos ecuaciones se les conocen con el nombre de *Ecuaciones Generales de Allievi*.

A partir de estas ecuaciones generales se llega a la fórmula clásica de Allievi, que permite llevar

acabo un desarrollo en cadena, mediante la cual se puede obtener la carga piezométrica en la sección adyacente aguas arriba del órgano de control.

$$H_i + H_{i-1} - 2H_o = \frac{a}{g} (V_{i-1} - V_i) \quad (4.7)$$

#### 4.3.6 DESARROLLO EN CADENAS DE ALLIEVI

Dividiendo la ecuación 4.7 entre  $H_o$ , tenemos :

$$\frac{H_i}{H_o} + \frac{H_{i-1}}{H_o} - \frac{2H_o}{H_o} = \frac{a}{gH_o} (V_{i-1} - V_i)$$

si multiplicamos y dividimos el segundo miembro por  $V_o$  resulta :

$$\frac{H_i}{H_o} + \frac{H_{i-1}}{H_o} - 2 = \frac{aV_o}{gH_o} \left( \frac{V_{i-1}}{V_o} - \frac{V_i}{V_o} \right)$$

haciendo  $Z_i^2 = \frac{H_i}{H_o}$  y  $\varepsilon = \frac{aV_o}{2gH_o}$ , obtendremos la siguiente forma :

$$Z_i^2 + Z_{i-1}^2 - 2 = 2\varepsilon \left( \frac{V_{i-1}}{V_o} - \frac{V_i}{V_o} \right) \quad (4.8)$$

si

$$\frac{V_i}{V_o} = \frac{(C_d A_v)_i}{(C_d A_v)_o} \sqrt{\frac{H_i}{H_o}}$$

6

$$\frac{V_i}{V_o} = \eta_i Z_i$$

si sustituimos la ecuación anterior en la ec. 4.8 obtendremos la *Ecuación Adimensional de Allievi*.

$$Z_i^2 + Z_{i-1}^2 - 2 = 2\varepsilon (\eta_{i-1} Z_{i-1} - \eta_i Z_i) \quad (4.9)$$

donde  $\eta$  es la ley de maniobra de cierre o apertura lineal.

Ley para una maniobra de cierre uniforme o lineal.

$$\eta_i = 1 - (1 - \eta_p) \frac{i}{\theta} \quad 0 \leq i \leq \theta \quad (4.10)$$

$$\eta_i = \eta_f \quad i \geq \theta$$

donde  $\eta_f > 0$  para una cierre parcial, e igual a cero si este es total.

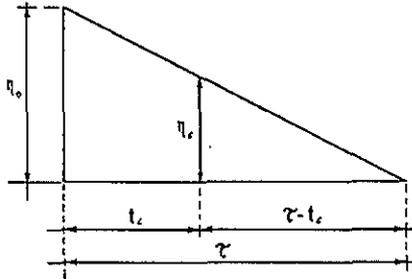


Figura 4.2 Maniobra de cierre

Ley para una maniobra de apertura uniforme o lineal; ( $\eta_f < 1$ ) si es parcial y ( $\eta_f = 1$ ) si es total.

$$\eta_i = \frac{i}{\theta} \eta_f \quad ; \quad 0 \leq i \leq \theta \quad (4.11)$$

$$\eta_f \quad ; \quad i$$

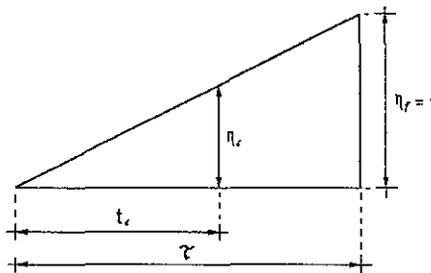


Figura 4.3 Ley de apertura

#### 4.3.7 CARTAS DE ALLIEVI PARA MANIOBRAS DE CIERRE O APERTURA UNIFORME

Estas cartas proporcionan el valor de la carga piezométrica máxima o mínima en el órgano de control, exclusivamente cuando las maniobras son uniformes o lineales y para el caso simple del modelo vaso-tubería-válvula.

Basándose en la ecuación 4.9 se formaron las cartas o ábacos, en la cual se obtiene la carga máxima  $Z_{máx}^2$  para una maniobra de cierre uniforme, en función de  $\varepsilon$  y  $\theta$ .

Una vez obtenida  $Z_{máx}^2$ , se utiliza la expresión  $H_{máx} = H_0 Z_{máx}^2$ .

Para obtener la carga máxima, Allievi elaboró tres cartas; de las cuales la primera es para valores de  $\varepsilon$  y  $\theta$  pequeños, la segunda para valores intermedios y la tercera para valores grandes.

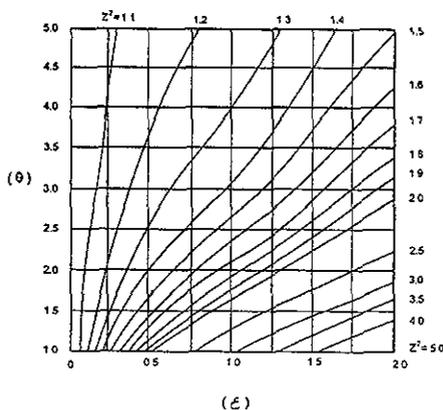


Figura 4.4 Carga piezométrica máxima para valores de  $\varepsilon$  y  $\theta$  pequeños.

Con la segunda carta se puede obtener, además de  $Z_{máx}^2$ , el instante al final de la cual se presenta la carga máxima mediante el uso de la familia de curvas F que se presentan en la carta. Dichas curvas indican el tiempo en unidades  $t = \frac{2L}{a}$  seg. que transcurre desde el inicio de la maniobra hasta el momento en que se presenta  $Z_{máx}^2$ .

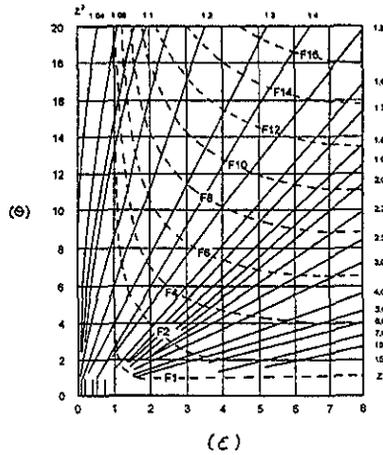


Figura 4.5 Carga piezométrica máxima, para valores  $\varepsilon$  y  $\theta$  intermedios.

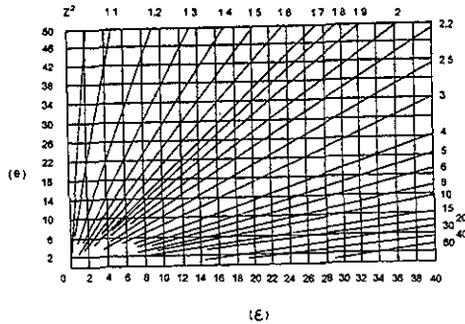


Figura 4.6 Carga piezométrica máxima, para valores  $\varepsilon$  y  $\theta$  grandes

Allievi también elaboró una carta para resolver el problema de una maniobra de apertura uniforme en el órgano de control, así, mediante la **figura 4.7** podemos encontrar el valor de la carga piezométrica mínima  $Z_{mín}^2$ , originada por una maniobra de apertura uniforme iniciada desde una posición de cierre total hasta cualquier grado de la primera, para valores pequeños de  $\varepsilon$  y  $\theta$ , donde  $\varepsilon = \frac{a V_f}{2g H_0}$ , en esta figura se puede observar que si  $\theta \leq 1$ , la magnitud  $Z_{mín}^2$  es independiente del tiempo que dure la maniobra (apertura brusca).

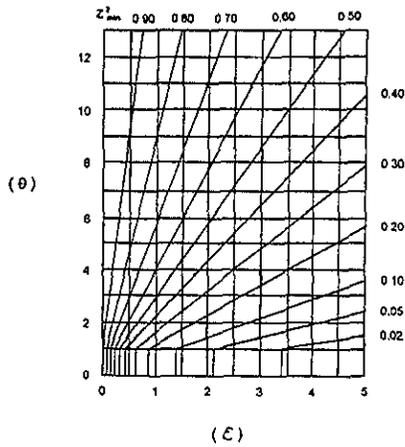


Figura 4.7 Carga piezométrica mínima, para valores de  $\epsilon$  y  $\theta$  pequeños

En la figura 4.8 se puede obtener la magnitud de  $Z_{min}^2$  para valores de  $\epsilon$  y  $\theta$  grandes.

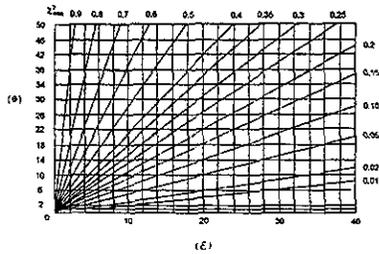


Figura 4.8 Carga piezométrica mínima, para valores de  $\epsilon$  y  $\theta$  grandes

### 4.3.8 ECUACIÓN DE JOUKOVSKY

Con la ecuación de Joukovsky se puede obtener la carga piezométrica máxima o mínima en el órgano de control, solo si la maniobra de cierre o apertura es rápida, esto es si el tiempo de cierre o apertura  $\tau$  es menor o igual al período del conducto o "fase" del fenómeno ( $\tau \leq \mu$ ,  $\theta \leq 1$ ).

De la ecuación 4.9 aplicada para los instante  $i = 0$  e  $i = \theta$ , que corresponden a las

condiciones iniciales y finales respectivamente; y si en esta misma ecuación se hace  $Z_0^2 = 1$  y recordando que  $2\varepsilon = \frac{a V_0}{g H_0}$  y  $V_i = \eta_i Z_i V_0$ , ordenando términos resulta:

$$\frac{H_m}{H_0} = 1 + \frac{a}{gH} (V_0 - V_f) \quad (4.12)$$

Donde :

$H_m$  = Representa la carga piezométrica máxima o mínima.

$V_0$  = Velocidad inicial en flujo permanente.

$V_f$  = Velocidad final en flujo permanente.

Para una maniobra de cierre total,  $V_f = 0$  y la *ecuación 4.12* se simplifica a :

$$H_m = \left(1 + \frac{a V_0}{g H_0}\right) H_0 \quad (4.13)$$

si  $\Delta H = H_m - H_0$

$$\Delta H = \frac{a V_0}{g} H_0 \quad (4.14)$$

Para una maniobra de apertura iniciada cuando el órgano de control está totalmente cerrado ( $V_0=0$ ) se obtiene :

$$H_m = \left(1 - \frac{a V_0}{g H_0}\right) H_0 \quad (4.15)$$

Además, para una maniobra brusca la magnitud de las cargas extremas que se originan en el órgano de control no dependen de la ley de cierre o apertura y se presentan en los instantes  $i = \theta$  e  $i = \theta + 1$  respectivamente.

## 4.4 GOLPE DE ARIETE EN PLANTAS DE BOMBEO

### 4.4.1 GENERALIDADES

El golpe de ariete en plantas de bombeo se puede presentar como resultado de diversas condiciones de operación que modifican el régimen del flujo. Dentro de las causas que originan la presencia del fenómeno en estudio puede citarse las maniobras de cierre o apertura de válvulas de seccionamiento en la tubería de descarga que se efectúan antes del paro o después del arranque de una bomba respectivamente, el arranque o paro de una bomba sin válvulas en la tubería de descarga, las fallas mecánicas en la bomba y el paro ocasionado por una interrupción brusca de la alimentación de energía eléctrica al motor.

En nuestro medio, la condición que se presenta con más frecuencia es aquella en la que se instala una válvula de no retorno en la tubería de descarga para impedir la inversión del flujo en la bomba y para cuantificar los efectos de golpe de ariete en este caso.

### 4.4.2 ANÁLISIS INICIAL

Suponiendo un acueducto en el que existe una planta de bombeo y cuya tubería de descarga carece de válvula de no retorno o válvula Check ( ver figura 4.9 ).

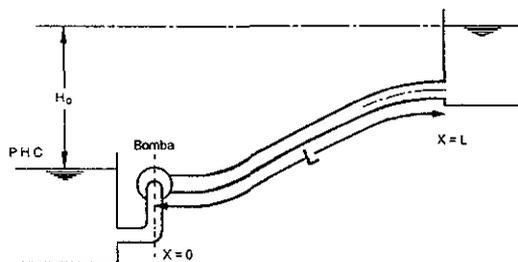


Figura 4.9

Instantes después de presentarse la interrupción de energía, se presentan tres zonas de operación en la bomba (ver la figura 4.10). La primera se caracteriza por el decremento de la carga piezométrica y el gasto de bombeo que se reduce a cero; la segunda y la tercera por el incremento tanto del flujo invertido como en la carga que llega a su valor máximo en la última zona, acarreado con esto el aumento en costo en la tubería de descarga, ya que se tendría que diseñar para soportar las cargas en la última zona

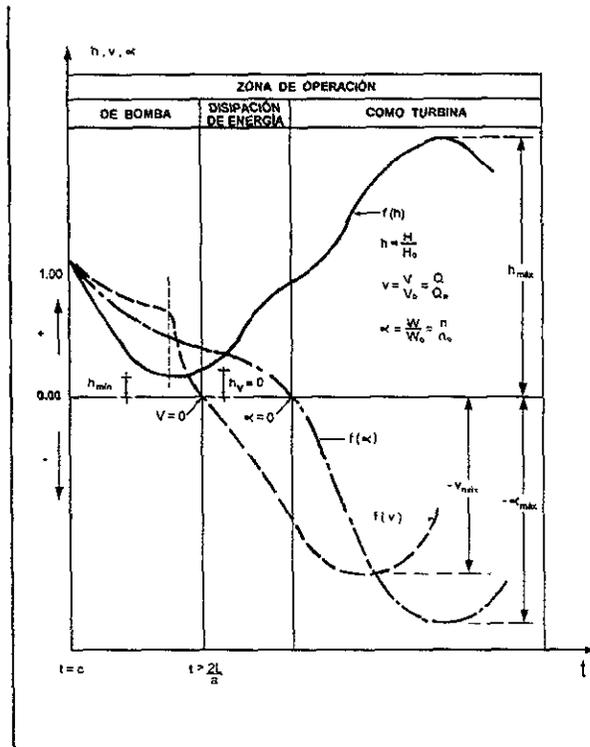


Figura 4 10

Si en la tubería de descarga se coloca una válvula de no retorno, que cierre cuando se invierta el flujo (figura 4.11), ésta solo trabajará en la primera zona y, en el instante de cierre, tendrá origen la oscilación asociada a la carga máxima que se presentará en la bomba  $\mu$  segundos después.

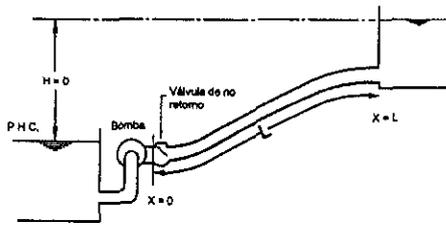


Figura 4.11a Planta de bombeo con válvula de no retorno en la tubería de descarga.

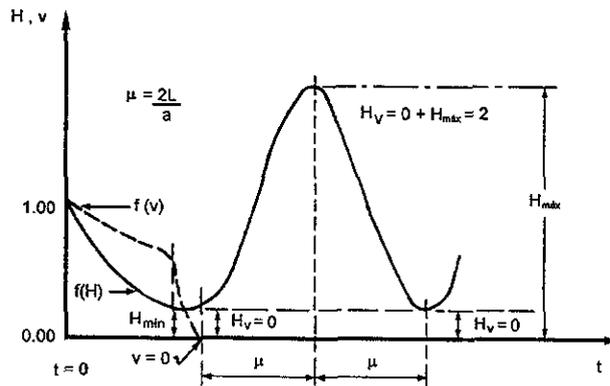


Figura 4.11b Comportamiento de la carga para el caso de la figura anterior.

#### 4.4.3 ECUACIÓN DE ALLIEVI PARA PLANTAS DE BOMBEO

Para determinar los efectos de golpe de ariete en el equipo de bombeo, sin considerar los efectos de fricción, es necesario recurrir a la *ecuación 4.7* (fórmula clásica de Allievi), sólo que para este caso como la dirección del flujo coincide con la de propagación de onda directa de presión, y el segundo miembro de esta ecuación es negativo y por lo tanto quedará de la siguiente forma:

$$H_i + H_{i-1} - 2H_0 = \frac{a}{g} (V_i - V_{i-1}) \quad (4.16)$$

Si en la expresión anterior al primer miembro lo multiplicamos y dividimos por  $H_0$ , y haciendo lo mismo con el segundo miembro pero por  $V_0$ , hacemos  $h_i = \frac{H_i}{H_0}$ ;  $v_i = \frac{V_i}{V_0}$  y recordando que  $2\varepsilon = \frac{aV_0}{gH_0}$ ; la ecuación anterior se escribe como:

$$h_i + h_{i-1} - 2 = 2\varepsilon (v_i - v_{i-1}) \quad (4.17)$$

que es la ecuación general que rige el fenómeno de golpe de ariete en la bomba. Los valores de  $V_i$  dependerán de la ley con la cual se modifique el gasto en la tubería de descarga a través del tiempo.

Para el caso de una planta de bombeo, donde existen varios equipos de bombeo iguales, y cuya operación se realiza en paralelo, el valor de  $V_0$  requerido para el cálculo de  $2\varepsilon$ , deberá ser el correspondiente al número de equipos que operen en la planta sin considerar el efecto de fricción, por ejemplo, si solo opera un equipo que proporciona un gasto  $Q_0$ , la velocidad será  $V_0$ , si operan dos equipos el gasto será igual a  $2Q_0$  y la velocidad a  $2V_0$ ; así mismo, la carga suministrado por los equipos será siempre igual a  $H_0$ .

Cabe aclarar que para lo dicho anteriormente, tenemos que considerar el efecto de *Momento de Inercia* (  $I$  ) del conjunto Bomba-Motor, dicho efecto es involucrado en las siguientes expresiones :

$$\alpha_i = \frac{1}{K_b \mu i + 1} \quad (4.18)$$

Donde:  $i = \frac{t}{\mu}$       y       $K_b = \frac{900 \gamma Q_0 H_0}{\lambda_0 I (\pi \eta_0)^2}$

#### 4.4.4 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UNA BOMBA

Las curvas características de los equipos de bombeo para las diferentes zonas en las que pueden operar los equipos (figura 4.10) deberán ser proporcionados por el fabricante de estos ya que las curvas son necesarias para poder evaluar el fenómeno de golpe de ariete. Sin embargo, con excepción de las curvas para las condiciones de operación normal de la bomba (figura 4.12), con frecuencia no se dispone de las restantes y es necesario obtenerlas a partir de las leyes de semejanza.

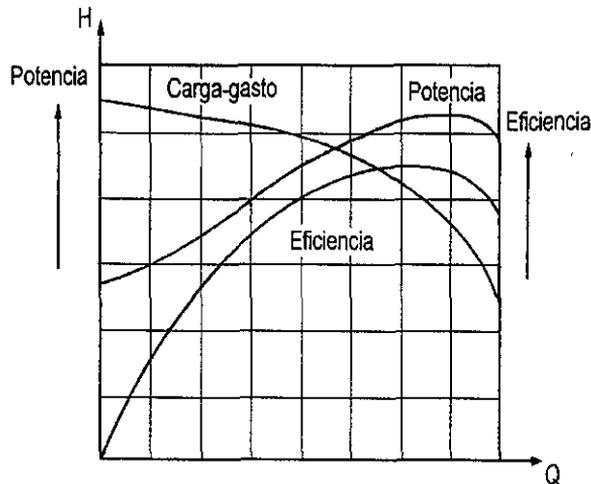


Figura 4.12

Si se considera la curva carga-gasto para la condición de operación normal, se expresa con una ecuación de tipo parabólica de la siguiente forma:

$$H = a + bQ + cQ^2, \quad Q \geq 0 ; n = n_0$$

donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son constantes que pueden ser obtenidas con una regresión de tipo parabólico.

Para la operación de  $N$  equipos en paralelo la ecuación anterior se deduce que :

$$H = a + \frac{b}{N}Q + \frac{c}{N}Q^2 \quad (4.19)$$

si  $\frac{H_i}{H} = \alpha^2$  y  $\frac{Q_i}{Q} = \alpha$ , que sustituyéndolas en la ecuación 4.19 resulta lo siguiente:

$$H_i = a\alpha^2 + \frac{b}{N}\alpha_i Q_i + \frac{c}{N}Q^2 \quad (4.20)$$

con los parámetros  $h_i = \frac{H_i}{H_0}$  y  $v_i = \frac{Q_i}{N Q_0}$ ; donde  $Q_0$  el gasto suministrado por cada bomba y  $H_0$  la carga normal; la ecuación 4.20 se escribe de la siguiente forma adimensional.

$$h_i = A_b \alpha_i^2 + B_b \alpha_i v_i + C_b v_i^2 ; \quad (4.21)$$

$$\alpha_i > 0 \quad ; \quad v_i \geq 0$$

Donde:  $A_b = \frac{a}{H_0}$  ;  $B_b = b \frac{Q_0}{H_0}$  ;  $C_b = c \frac{Q_0^2}{H_0}$

Sustituyendo la ecuación 4.21 en la ecuación 4.20 y despejando  $v_i$  se obtiene :

$$v_i = \frac{-(B_b \alpha_i - 2\varepsilon) + \sqrt{(B_b \alpha_i - 2\varepsilon)^2 - 4C_b(A_b \alpha_i + h_{i-1} + 2\varepsilon v_{i-1} - 2)}}{2C_b} \quad (4.22)$$

ecuación que permite obtener la magnitud de  $v_i$  a partir de las constantes  $A_b$ ,  $B_b$ ,  $C_b$  así como  $h_{i-1}$ ,  $v_{i-1}$ ,  $2\varepsilon$ ,  $\alpha_i$  previamente calculados y después determinar  $h_i$  de la ecuación 4.18 para la zona de operación de la bomba.

## CAPITULO V

### MÉTODO GRÁFICO DE SCHNYDER BERGERON Y ANGUS

El propósito del presente capítulo, es el de presentar una breve introducción de los principios elementales que rigen el Método Gráfico de solución del golpe de ariete.

Con anterioridad a la aparición de los métodos gráficos, la solución del fenómeno era compleja, pues su evaluación dependía únicamente del análisis matemático.

Schnyder y Bergeron, idearon una interpretación sencilla de las ecuaciones conjugadas y en cadena de Allievi, lo que dio origen al método gráfico que lleva sus nombres. Además Schnyder y Bergeron son los pioneros en la aplicación del método gráfico de análisis. Bergeron encontró en los estudios de propagación de ondas planas que este concepto es altamente preciso, lo que permitió la introducción o establecimiento de su método gráfico, el cual resulta simple y rígido en su solución.

En su nuevo método, Bergeron omitió conceptos que se empleaban anteriormente, llegando a concebir con claridad el fenómeno en todos sus detalles, culminando así la elaboración del método que lleva su nombre.

Cabe mencionar que al desarrollarse dicho método, las aportaciones del profesor R. W. Angus contribuyeron a su ampliación y mejoramiento.

Con los métodos gráficos de solución se pueden obtener resultados idénticos y aun más exactos que los conseguidos con el análisis matemático.

Este método fue muy utilizado hasta el advenimiento de las computadoras y es un procedimiento visual para interpretar físicamente lo que ocurre en una situación de flujo transitorio.

#### 5.1 MÉTODO GRÁFICO DE SCHNYDER - BERGERON

El método analítico da una explicación muy amplia de los problemas del golpe de ariete. Sin embargo, la aplicación analítica de las Ecuaciones en cadena de Allievi y de Angus a sistemas

hidráulicos más complejos conduce, generalmente, a cálculos numéricos bastante laboriosos.

Con el uso del método gráfico se logra una solución más rápida y precisa de aquellos problemas cuya solución analítica es, a menudo, prácticamente imposible. A continuación se explican las bases del método gráfico en estudio, y subsecuentemente se explicará considerando diferentes tipos de maniobras.

Dicho método está basado en la Ecuación en Cadena de Allievi ( *ecuación 4.9* ), mediante la cual se puede obtener la carga piezométrica en la sección adyacente aguas arriba del órgano de control. Si la *ecuación 4.9* se multiplica y divide por y entre "A" (área transversal de la tubería) y recordando la definición de gasto, el segundo miembro de la ecuación puede escribirse:

$$H_{b_i} + H_{b_{i-1}} - 2H_{b_0} = \frac{a}{gA} (Q_{b_{i-1}} - Q_{b_i}) \quad (5.1)$$

Al coeficiente  $\frac{a}{gA}$  del segundo miembro se le representará por  $m$ , dicha constante tiene las dimensiones de una carga de presión  $H$ , entre un gasto  $Q$ .

Esto equivale a que el cociente  $m = \frac{a}{gA}$  representará a la pendiente de una recta en un plano cartesiano, en cuyo eje horizontal se tengan los gastos  $Q$  y sobre el vertical las cargas de presión  $H$ . El ángulo de inclinación de dicha pendiente depende, por consiguiente, de las escalas que se elijan en los dos ejes coordenados ( $Q - H$ ) y del valor  $\frac{a}{gA}$  del conducto en cuestión.

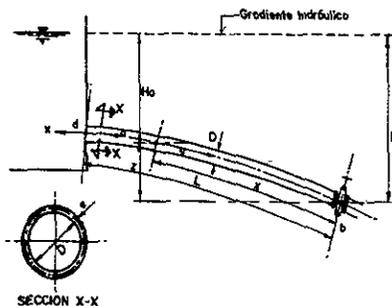


Figura 5.1

Si nos ubicamos en la sección adyacente aguas arriba del órgano de control (ver **figura 5.1**), el gasto en el punto "b", para un instante cualquiera, será función de la carga  $H_{b_i}$  en ese instante y del cierre o apertura, representado por el factor adimensional  $\eta_{b_i}$ , que varía entre los límites 0 y 1, de acuerdo con la ley de cierre o apertura correspondiente (con valor de 1 cuando la válvula se encuentra totalmente abierta y 0 cuando se halla cerrada en su totalidad), esto es:

$$Q_{b_i} = f(\eta_{b_i}, H_{b_i}) \quad (5.2)$$

Ahora bien, para el caso de una tubería, cuyo gasto esté controlado por una válvula de aguja que descarga libremente (recordando la definición del factor de cierre  $\eta_{b_i}$ ) y considerando que  $C_d=1$ , tomará la forma :

$$Q_{b_i} = \eta_{b_i} S_0 \sqrt{2g H_{b_i}} \quad (5.3)$$

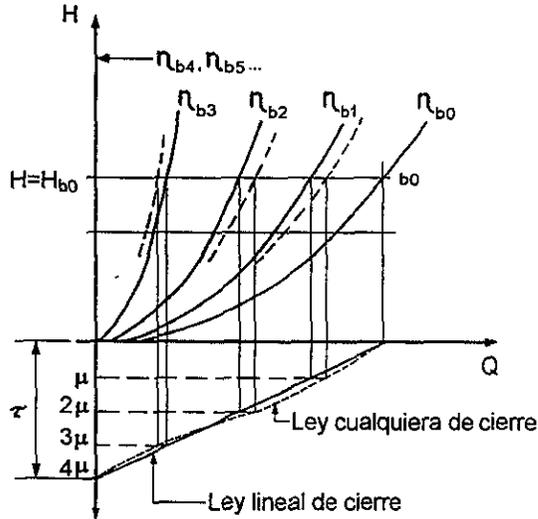
Para cada valor de  $Q_{b_i}$  hay muchos pares de valores  $\eta_{b_i}$  y  $H_{b_i}$  que satisfacen la **ecuación 5.3**, pero para un instante dado,  $\eta_{b_i}$  estará obligada por la ley de cierre o apertura, por lo cual sólo existirá un valor de  $H_{b_i}$  que satisfaga dicha relación. De este modo, la *expresión 5.3* representa la ecuación de una familia de parábolas en un plano coordenado, en donde las abscisas representan los valores de  $Q_{b_i}$  y las ordenadas los valores de  $H_{b_i}$ , cuyo parámetro es  $\eta_{b_i}$ , o sea que para cada instante  $i = 0, 1, 2, \dots$ , se tendrá una parábola distinta.

La posición relativa de una parábola respecto a otra, dependerá de la ley de cierre o apertura, tal como se representa en la **figura 5.2**.

El número de parábolas dependerá del tiempo de cierre o apertura  $\tau$ , de manera que si se elije como intervalo de tiempo a  $\mu$ , se tendrá :

$$\theta = \frac{\tau}{\mu} \quad (5.4)$$

Esto es, será un número tal que iguale al número de intervalos del cierre o apertura, como se muestra en la figura 5.2 .



La parábola  $\eta_{b_0}$  y subsiguientes corresponderá con el eje vertical en el caso de que se trate de una maniobra de cierre.

### 5.1.1 MÉTODO GRÁFICO DE SCHNYDER-BERGERON PARA MANIOBRAS DE CIERRE TOTAL LENTO ( $\tau > \mu$ )

En la figura 5.3 , se ha representado el cierre total de una válvula de aguja que se efectúa en un tiempo  $\tau = 4\mu$  , lo cual da lugar a cuatro parábolas, de modo que las parábolas de  $\eta_{b_4}$  en adelante se confundan con el eje vertical.

En dicha figura el punto de intersección  $b_0$  de la recta  $H = H_{b_0}$  con la parábola  $\eta_{b_0}$  representa las condiciones en régimen permanente en el punto  $b$  de la figura 5.1, antes de que ocurra cualquier maniobra en la válvula; es decir, sus coordenadas, son ( $Q_{b_0}, H_{b_0}$ ).

Ahora bien, la solución en cadena de la ecuación 5.1 , conduce, para distintos valores de  $i$  a

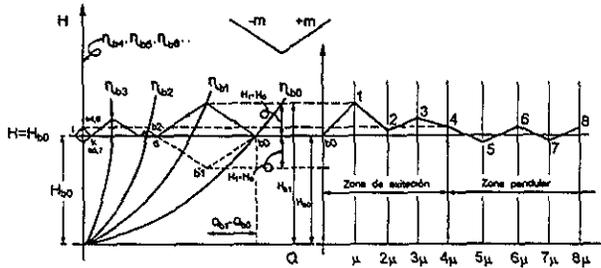


Figura 5.3

las siguientes ecuaciones, de las que se desprenderán las interpretaciones del *método gráfico*.

\* Para  $i = 1$ , la ecuación 5.1 tomará la forma :

$$H_{b_1} - H_{b_0} = \frac{a}{gA} (Q_{b_0} - Q_{b_1}) \quad (5.5)$$

De acuerdo con lo antes dicho  $Q_{b_1}$ , será la abscisa de alguno de los puntos de la curva  $\eta_{b_1}$ ; el cual llamaremos  $b_1$ . Dicho punto  $b_1$  queda ubicado en la intersección de la recta de pendiente  $(-\frac{a}{gA})$  con la curva  $\eta_{b_1}$  y que pasa por  $b_0$ .

Las coordenadas necesariamente en el punto  $b_1$ , son precisamente  $(Q_{b_1}, H_{b_1})$  y proporcionan las condiciones en la sección de la válvula para el instante  $(1)$ , es decir, al término de la primera fase  $(i = \mu)$ .

\* Para  $i = 2$ , de la ecuación 5.1, se obtiene :

$$H_{b_2} = H_{b_0} - (H_{b_1} - H_{b_0}) + \frac{a}{gA} (Q_{b_1} - Q_{b_2}) \quad (5.6)$$

Sin embargo, resulta más sencillo, pasar por  $b_1$  una recta de pendiente  $(\frac{a}{gA})$  hasta determinar un punto  $(d)$  sobre la recta  $H = H_{b_0}$  para después levantar por ese punto otra recta de pendiente  $(-\frac{a}{gA})$  hasta intersectar  $\eta_{b_2}$ , con lo cual queda definido  $b = (Q_{b_2}, H_{b_2})$ , que proporciona

el gasto  $Q_{b_2}$  y la carga  $H_{b_2}$  en la sección de la válvula para el instante (2), es decir, al término de la segunda fase ( $i = 2\mu$ ).

Con los razonamientos análogos se podrán determinar los restantes puntos  $b_i = (Q_{b_i}, H_{b_i})$  que permiten resolver gráficamente la Ecuación de Allievi.

En el caso particular de la maniobra de cierre representada en la figura 5.3, las parábolas  $\eta_{b_4}, b_5, b_6, \dots$  se confunden con el eje vertical, puesto que  $\theta = 4$ . Para encontrar  $b_4$ , se traza por  $b_3$  una recta de pendiente  $(\frac{a}{gA})$  hasta intersectar la recta  $H = H_{b_0}$ , por la intersección correspondiente "i" se traza otra recta de pendiente  $(-\frac{a}{gA})$  hasta intersectar  $\eta_4$ , o sea el eje vertical, en cuya intersección estará  $b_4$ . Para determinar  $b_5$ , por  $b_4$  se traza una recta de pendiente  $(\frac{a}{gA})$  hasta intersectar  $H = H_{b_0}$  en el punto "j" y a partir de esta intersección se trazará una recta de pendiente  $(-\frac{a}{gA})$  hasta intersectar  $\eta_{b_5}$ , o sea el eje vertical, con lo que se obtiene el punto  $b_5$ , el cual es simétrico de  $b_4$ , al quedar por debajo de la recta  $H = H_{b_0}$  y cuyas coordenadas representan las condiciones en el instante (5). Para obtener  $b_6$  se repiten los mismos trazos indicados para volver nuevamente al punto  $b_4$ . Esto significa que las condiciones en el instante (6) son idénticas a las del instante (4). Análogamente, las condiciones de (7) son iguales a las de (5), y así sucesivamente. Se observa entonces que, a partir del instante  $t = \tau$ , la carga de presión oscilará siempre entre dos valores simétricos al de  $H_{b_0}$ , si no se hace intervenir el efecto de amortiguador de la fricción.

Por último se podrá dibujar la "curva oscilaciones de cargas de presión contra tiempos", tal como se muestra en la figura 5.3, en la cual pueden distinguirse dos zonas perfectamente definidas; la primera con una duración  $t = \tau$  llamada "zona de excitación" y la segunda de duración indefinida y que sigue de la anterior, llamada "zona pendular".

La presentación del máximo valor de la carga de presión puede ocurrir al terminar cualquiera de las fases dentro de la zona de excitación, pues esto depende de la pendiente de las rectas  $m$  y del número y posición de las parábolas, o sea de  $\theta$ .

**5.1.2 MÉTODO DE SCHNYDER-BERGERON PARA MANIOBRAS DE CIERRE TOTAL RÁPIDO ( $\tau \leq \mu$ )**

En la figura 5.4 se muestran los diagramas ( $Q-H$ ) y ( $t-H$ ) para el caso de un cierre total rápido, es decir, con una duración  $\tau$  menor o igual que el intervalo  $\mu$ . Al iniciar el cierre en el instante  $t = 0$ , la presión en la válvula (punto b fig. 5.1) se incrementará hasta alcanzar un máximo en el instante  $t = \tau$ . Dicho máximo quedará representado por la ordenada del punto de intersección con el eje vertical de la recta que se inicia en  $b_0$  y cuya pendiente es  $(-\frac{a}{gA})$ , a sea :

$$H_{b\tau} = H_{b0} + \frac{a}{gA} Q_{b0} \quad (5.6)$$

Esta carga de presión permanece constante hasta el instante  $t = \mu$ , en el que la onda reflejada llega nuevamente a la válvula y la presión empieza a disminuir, iniciándose el movimiento pendular.

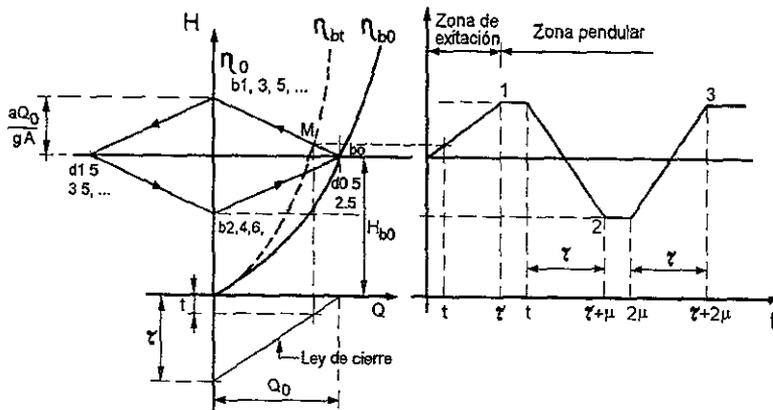


Figura 5.4 Cierre total rápido.

Para un instante cualquiera  $t$ , tal que  $0 < t < \tau$ , será necesario trazar la parábola correspondiente y su intersección "M", con la recta del golpe de ariete de pendiente  $(-\frac{a}{gA})$  que se inicia en  $b_0$ , representa las condiciones en la válvula "b" para ese instante considerado.

### 5.1.3 MÉTODO DE SCHNYDER-BERGERON PARA MANIOBRAS DE CIERRE PARCIAL LENTO

En caso de efectuar una maniobra consistente en un cierre parcial lento, se dibujará sobre el plano ( $Q-H$ ) las parábolas hasta la  $\eta_{b_c}$  correspondiente al cierre parcial, siendo  $\eta_{b_c}$  el grado final de apertura de la válvula.

El trazo de las rectas del golpe de ariete será idéntico al mostrado en la figura 5.3, partiendo de "  $b_0$  " y con pendientes  $(-\frac{a}{gA})$  y  $(\frac{a}{gA})$  hasta alcanzar la curva  $\eta_{b_c}$ . A partir de esta curva, la intensidad de la presión disminuye de una fase a otra, con un amortiguamiento que depende de la pendiente de las rectas ( figura 5.5 ).

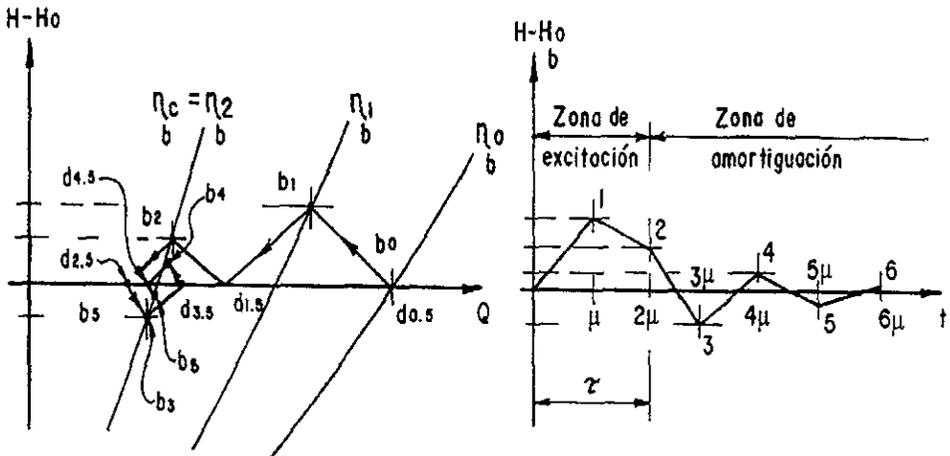


Figura 5.5 Cierre parcial.

### 5.1.4 MÉTODO DE SCHNYDER-BERGERON PARA CALCULAR LA PRESIÓN EN CUALQUIER SECCIÓN DE LA TUBERÍA

Para ilustrar el método gráfico de Snyder-Bergeron, se mostrará aquí el método usado para determinar la carga de presión en una sección intermedia "  $c$  " de la tubería, comprendida entre la válvula y el tanque ( $b-d$ ), en el caso de un cierre total lento. Esta solución viene a ser la simple interpretación geométrica de las ecuaciones de Angus.

Designando con "A" al área de la sección transversal de una tubería de característica única y eje horizontal, por lo que  $H_{b_0} = H_{d_0}$ , se tiene :

$$2H_{d_i} = H_{b_h} + H_{b_j} + \frac{a}{gA} (Q_{b_j} - Q_{b_h}) \quad (5.7)$$

Supóngase ahora que en el plano (  $Q$ - $H$  ) (figura 5.6) se conocen los puntos  $b_h$  y  $b_j$ . La ecuación de la recta de pendiente  $m = \frac{a}{gA}$  que pasa por  $b_h$ , es:

$$H = H_{b_h} + \frac{a}{gA} (Q - Q_{b_h}) \quad (5.8)$$

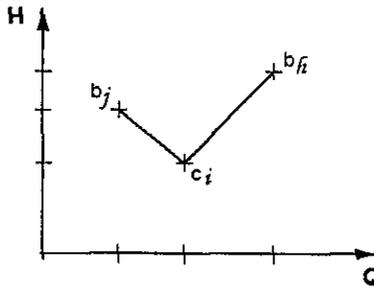


Figura 5.6

y la ecuación de la recta que pasa por  $b_j$  y tiene pendiente  $-m$  es:

$$H = H_{b_j} + \frac{a}{gA} (Q_{b_j} - Q) \quad (5.9)$$

si se suman las ecuaciones 5.8 y 5.9, se obtendrá la ordenada de la intersección de las dos rectas de pendientes  $+m$  y  $-m$  anteriormente citadas, esto es:

$$2H = H_{b_h} + \frac{a}{gA} (Q_{b_j} - Q_{b_h}) \quad (5.10)$$

expresión que comparada con 5.7, muestra que la intersección de las rectas mencionadas es precisamente el punto  $(Q_{c_i}, H_{c_i})$  que resuelve el problema.

En la figura 5.7 se presenta como ejemplo el trazo de las rectas de golpe de ariete para la tubería horizontal, correspondiente a un cierre total lento, con un tiempo de cierre  $\tau = 3\mu$ . Con el fin de determinar las cargas de presión para un punto "c", situado a la mitad de la tubería, se han trazado también las parábolas intermedias  $\eta_{b_{0.5}}, \eta_{b_{1.5}}$  y  $\eta_{b_{2.5}}$ .

El punto  $b_0$  de coordenadas  $(Q_{b_0}, H_{b_0})$  representa las condiciones iniciales en la sección "b" de la válvula. Por este punto se hace pasar una recta de pendiente  $(-\frac{a}{gA})$ . Las intersecciones de esta recta con las parábolas  $\eta_{b_{0.5}}$  y  $\eta_{b_1}$  determinan los puntos  $b_{0.5}$  y  $b_1$ , respectivamente, cuyas ordenadas representan, a su vez, las cargas de presión  $H_{b_{0.5}}$  y  $H_{b_1}$ .

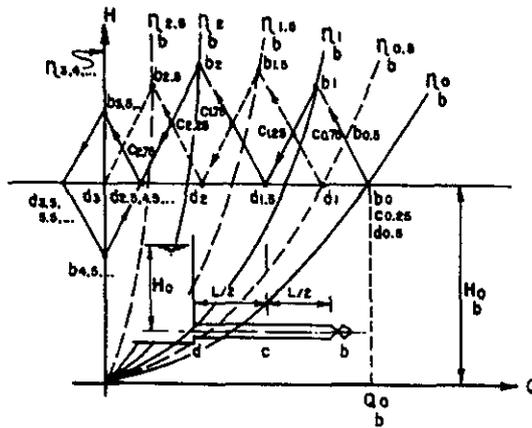


Figura 5.7.

Por el punto  $b_{0.5}$  se hace ahora pasar una recta de pendiente  $(+\frac{a}{gA})$  hasta cortar a la recta  $H = H_{b_0}$  en el punto "d<sub>1</sub>" y desde esa intersección se lleva una recta de pendiente  $(-\frac{a}{gA})$  hasta cortar la parábola  $\eta_{b_{1.5}}$ . Esa intersección determina el punto  $b_{1.5}$ , cuya ordenada representa la carga de presión  $H_{b_{1.5}}$ .

En forma análoga se puede determinar el punto  $b_{2.5}$ , así como los  $b_2, b_3, b_4$ , etc.

Ahora bien, para el punto " c " en el centro de la tubería, puesto que  $x_c = \frac{L}{2}$  al hacer  $i=1.25$ ,  $H = 1$  y  $j = 1.5$ . Entonces 5.7, podrá escribirse:

$$2H_{c_{1.25}} = H_{b_1} + H_{b_{1.5}} + \frac{a}{gA} (Q_{b_{1.5}} - Q_{b_1}) \quad (5.11)$$

Si por  $b_1$  se pasa una recta de pendiente  $m$  y por  $b_{1.5}$  una recta de pendiente  $-m$ , la intersección de ambas determinará el punto  $c_{1.25}$ , cuya ordenada será  $H_{c_{1.25}}$ .

En forma similar, con la ayuda de  $b_{1.5}$  y  $b_2$ , se puede determinar  $c_{1.75}$ , y así sucesivamente.

Se pueden determinar las presiones en otros puntos de la tubería, utilizando el número de parábolas necesarias. En el caso de que la tubería no sea de eje horizontal, se considera como si ésta lo fuera, con una carga  $H_{b_0}$  igual a la que tiene la tubería real en la válvula y a los valores de  $H_{c_i}$  calculados con el método anterior, deberá restarse la carga de posición de la sección " c " en estudio.



### 5.1.6 MÉTODO DE SCHNYDER-BERGERON PARA APERTURA BRUSCA ( $\tau \leq \mu$ )

En el análisis de una apertura brusca se diferencian dos casos como los mostrados en la figura 5.9.a y 5.9.b . Se observa que para  $t = 0$ , el grado de apertura de la válvula es  $\eta_{b0} = 0$  (válvula totalmente cerrada), y en el instante  $\tau \leq \mu$  :  $\eta_{b1} = 1$  (válvula completamente abierta). Dependiendo, sobre todo de la pendiente  $\pm m$  de las rectas del golpe de ariete, se observa que la carga de presión ( $H_{b1} - H_{b0}$ ) puede ser positiva o negativa.

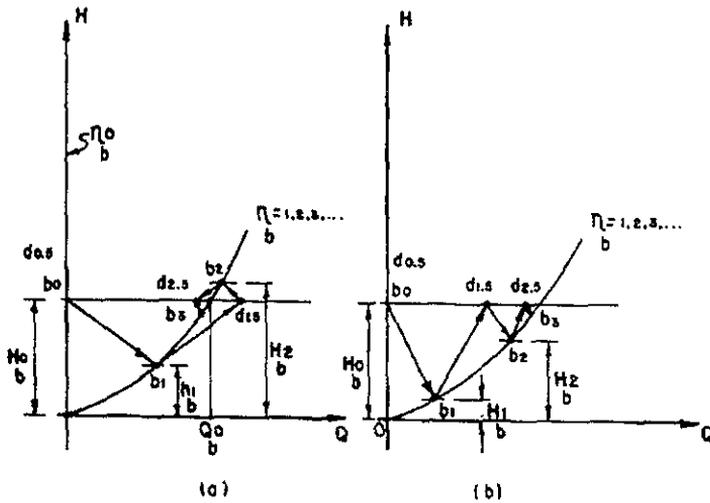


Figura 5.9 Apertura brusca.

# CAPITULO VI

## MÉTODO GENERAL DE LAS CARACTERÍSTICAS

En algunos sistemas hidráulicos, al efectuar el cálculo de los fenómenos transitorios es necesario incluir el efecto de las pérdidas por fricción y cambios en la tubería; esto es con el objeto de apegarse más a la realidad. Para la solución de este problema, uno de los métodos que podemos utilizar es el llamado de las características, que permite simular el fenómeno incluyendo las pérdidas, a partir de las condiciones para flujo permanente inicial y las de frontera correspondientes al sistema (bifurcaciones, válvulas, cambios de diámetro, bombas, etc.).

### 6.1 ECUACIONES CARACTERÍSTICAS

La base del método de las características consiste en transformar las ecuaciones diferenciales parciales dinámica y de continuidad, ya antes citadas, en ecuaciones diferenciales totales.

$$L_1 = g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f V |V|}{2D} = 0 \quad (6.1)$$

$$L_2 = \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (6.2)$$

Debido a que cada condición de frontera y cada sección del conducto se analiza por separado durante un intervalo de tiempo, éste método es particularmente apropiado para sistemas con condiciones de frontera complejas. Las desventajas de este método consisten en que los intervalos de tiempo deben ser muy pequeños para satisfacer la condición de estabilidad (condiciones de Courant).

Si se lleva a cabo una combinación lineal de las ecuaciones 6.1 y 6.2, después de multiplicar por "  $\lambda$  " ambos términos, de la ecuación 6.2 se tendrá que :

$$L_1 + \lambda L_2 = 0$$

lo que da como resultado :

$$\left( g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f |V|}{2D} \right) + \lambda \left[ a^2 \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial t} \right] = 0$$

$$\left( \frac{\partial V}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \lambda g \left[ \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{f |V|}{2D} = 0 \quad (6.3)$$

si las funciones  $H = H(x, t)$  y  $V = V(x, t)$  son soluciones de las ecuaciones 6.1 y 6.2, sus derivadas totales resultan :

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H}{\partial t} \quad (6.4)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (6.5)$$

Igualando el primer término de la ecuación 6.3 con la 6.5 y el segundo con la 6.4, se obtiene:

$$\left( \frac{\partial V}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial V}{\partial x} \right) = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{dV}{dt} \quad (6.6)$$

$$\left( \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{dH}{dt} \quad (6.7)$$

de estas dos últimas ecuaciones se deduce que :

$$\lambda a^2 = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\lambda} \quad ; \quad \frac{1}{\lambda} = \lambda a^2 \quad (6.8)$$

$$\lambda = \pm \frac{1}{a} \quad (6.9)$$

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \quad (6.10)$$

Si sustituimos las ecuaciones 6.6 , 6.7 , 6.9 y 6.10 en la 6.3 resulta :

$$\frac{dV}{dt} + \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2D} V | V | = 0 \quad (6.11)$$

$$\text{si } \frac{dx}{dt} = a \quad (6.12)$$

$$\frac{dV}{dt} - \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2D} V | V | = 0 \quad (6.13)$$

$$\text{si } \frac{dx}{dt} = -a \quad (6.14)$$

Matemáticamente, las ecuaciones 6.12 y 6.14 representan en el plano  $x - t$  líneas rectas con pendiente igual a  $( \frac{1}{a} )$  y  $( - \frac{1}{a} )$  ( figura 6.1 ).

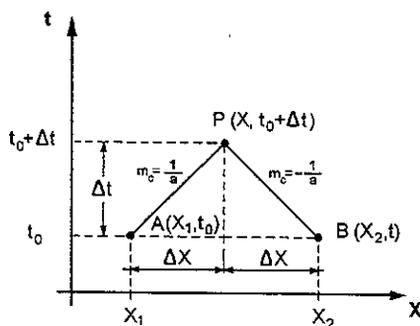


Figura 6.1 Líneas características en el plano  $x-t$ .

dichas líneas se conocen como líneas características positiva  $( m_c = \frac{1}{a} )$  y negativa  $( m_c = -\frac{1}{a} )$  a lo largo de las cuales se cumplen las ecuaciones 6.11 y 6.13 denominadas como ecuaciones de compatibilidad.

Las ecuaciones 6.11 y 6.13 contienen cada una, dos incógnitas para cada punto conocido a lo largo de sus características, pero en la intersección "  $p$  " de ambas curvas " $m_c$ " y " $-m_c$ ", las dos ecuaciones se pueden resolver una vez que se obtienen los valores de  $V_p$  y  $H_p$ .

De esta manera la solución se va obteniendo a lo largo de las líneas características, partiendo de condiciones conocidas y encontrando nuevas intersecciones en las que se determinan la velocidad y la carga para tiempos posteriores.

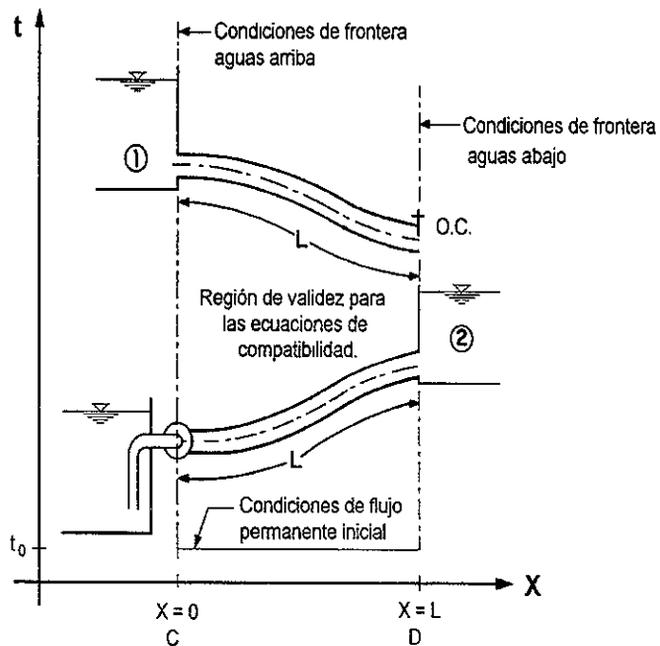


Figura 6.2

Si se considera un conducto por gravedad, cuyo órgano de control se somete a una determinada maniobra de cierre o apertura cuando  $t = t_0$ , o bien una planta de bombeo, tal como se muestra en la figura 6.2; en la que tiene lugar una interrupción brusca en el suministro de energía, también cuando

$t = t_0$ ; en dicho instante se originará una onda de presión, que partiendo del órgano de control y de la bomba, viaja hacia el depósito situado en el extremo aguas arriba y aguas abajo respectivamente, al que llegará en el instante  $t = t_0 + \frac{\mu}{2}$ . Si la trayectoria de la onda mencionada se grafica en el plano  $x - t$ , se obtiene la representación que aparece en la figura 6.3a para el conducto por gravedad, y en la 6.3b para la planta de bombeo; donde se puede observar que las condiciones en la **región I** dependen sólo del flujo permanente inicial en ambos sistemas, puesto que las correspondientes a las fronteras situadas en los extremos aguas arriba y aguas abajo no se modifican al permanecer constante el nivel de la superficie libre del agua en los depósitos 1 y 2, mientras que en la **región II** las condiciones dependen de las impuestas por el órgano de control y la bomba. De acuerdo con esto puede afirmarse que las líneas características CE y DE dividen al plano  $x - t$  en dos regiones, para cada una de las cuales existe una solución.

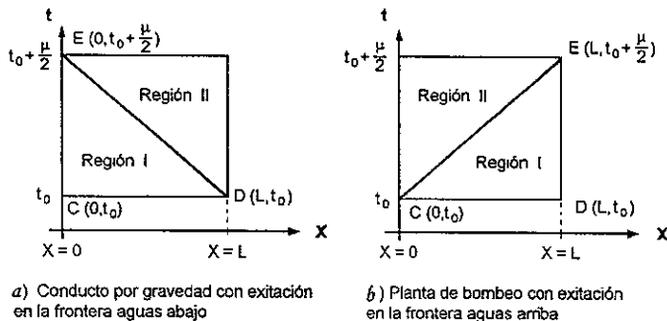
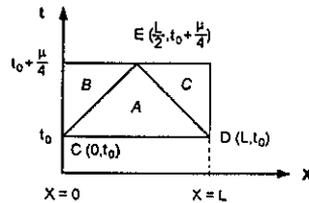


Figura 6.3 Regiones bajo influencia en sistemas con excitación en una frontera

Por otra parte, si la excitación de los sistemas se presenta simultáneamente en las secciones  $C (x=0)$  y  $D (x=L)$ , por ejemplo, cuando el nivel del agua en los depósitos 1 y 2 es sensible a la variación del gasto que llega a los mismos, la región influenciada por las condiciones de flujo

permanente inicial será la mostrada en la **figura 6.4** donde las líneas características CE y DE, separan las regiones bajo la influencia de estas condiciones, y las que lo están por las correspondientes a las fronteras ubicadas aguas arriba y aguas abajo.



- A Condiciones del flujo permanente inicial
- B Condiciones de frontera aguas arriba
- C Condiciones de frontera aguas abajo

Figura 6.4 Regiones bajo influencia en sistemas con excitación en las fronteras aguas arriba y aguas abajo.

## 6.2 SOLUCIÓN A LAS ECUACIONES CARACTERÍSTICAS Y DE COMPATIBILIDAD

Con relación a la **figura 6.1** si las condiciones del sistema hidráulico cuando  $t = t_0$  son los del flujo permanente inicial, y se conocen para cualquier sección "  $x$  " del conducto, tal que  $0 \leq x \leq L$  , el cálculo de las condiciones para el instante  $t_0 + \Delta t$  puede efectuarse mediante un esquema de diferencias finitas de primer orden, mismo que siguiendo la línea característica positiva  $AP$  permite escribir :

$$dV = V_p - V_A \quad (6.15)$$

$$dH = H_p - H_A \quad (6.16)$$

y al seguir la línea característica negativa  $Bp$  resulta :

$$dV = V_p - V_B \quad (6.17)$$

$$dH = H_p - H_B \quad (6.18)$$

Sustituyendo las *ecuaciones 6.15 y 6.16* en la *6.11* y las *6.17 y 6.18* en la *6.13*, realizando el cálculo del término de fricción en los puntos A y B, y después de hacer operaciones resulta :

$$V_p - V_A + \frac{g}{a} (H_p - H_A) + f \frac{\Delta t}{2D} V_A |V_A| \quad - \quad (6.19)$$

$$V_p - V_B - \frac{g}{a} (H_p - H_B) + f \frac{\Delta t}{2D} V_B |V_B| \quad (6.20)$$

Si en las dos últimas ecuaciones se introducen los términos  $H_0$  y  $V_0$ , se hacen operaciones y recordando la definición del los parámetros adimensionales  $h = \frac{H}{H_0}$ ,  $v = \frac{V}{V_0}$  y  $2\varepsilon = \frac{aV_0}{gH_0}$ , se obtiene :

$$v_p - v_A + \frac{1}{2\varepsilon} (h_p - h_A) + F_a v_A |v_A| = 0 \quad (6.21)$$

$$v_p - v_B - \frac{1}{2\varepsilon} (h_p - h_B) + F_a v_B |v_B| = 0 \quad (6.22)$$

$$\text{Donde : } F_a = \frac{f \Delta t Q_0}{2 DA}$$

Despejando la variable  $v_p$  de las *ecuaciones 6.21 y 6.22*, resulta :

$$v_p = C_{pa} - \frac{h_p}{2\varepsilon} \quad (6.24)$$

$$v_p = C_{na} + \frac{h_p}{2\varepsilon} \quad (6.25)$$

y en estas ecuaciones :

$$C_{pa} = v_A + \frac{h_A}{2\varepsilon} - F_a v_A |v_A| \tag{6.26}$$

$$C_{na} = v_B + \frac{h_B}{2\varepsilon} - F_a v_B |v_B| \tag{6.27}$$

La ecuación 6.24 se denomina ecuación característica adimensional positiva y es válida a lo largo de la línea  $Ap$  , y la 6.25 ecuación característica adimensional negativa y se cumple a lo largo de la línea  $Bp$  , los valores de los parámetros  $C_{pa}$  y  $C_{na}$  dependen de las condiciones hidráulicas cuando  $t = t_0 + \Delta t$  ; además, si se analizan las ecuaciones 6.24 y 6.25, se puede ver que existen las incógnitas  $v_p$  y  $h_p$  , lo cual conduce a :

$$v_p = \frac{C_{pa} + C_{na}}{2} \tag{6.28}$$

y entonces  $h_p$  puede ser determinada, de cualquiera de las ecuaciones 6.24 o 6.25.

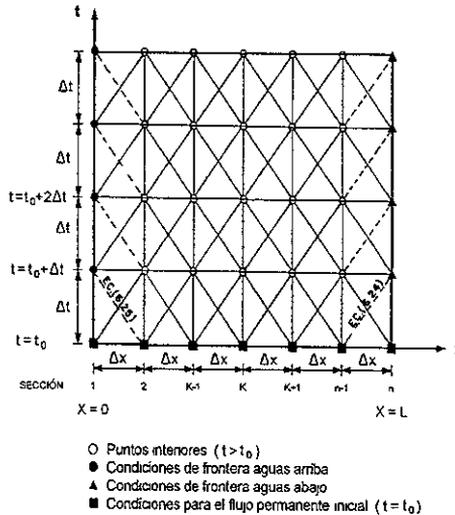


Figura 6.5 Malla empleada para la aplicación del método de las características

Con el propósito de comprender mejor el uso de las *ecuaciones 6.24* a la *6.28*, se puede considerar cualquiera de los sistemas mostrados en la **figura 6.2**; dividiendo el conducto o la tubería de descarga en un número " N " de tramos iguales con longitud  $\Delta x$  , tal como se muestra en la **figura 6.5** .

Una vez hecho lo anterior, se determinan en cada *sección x* los parámetros  $h_0$  y  $v_0$  para las condiciones de flujo permanente inicial que tiene lugar en el sistema cuando  $t = t_0$  , y a partir de estos últimos se lleva a cabo el cálculo de  $h_p$  y  $v_p$  en los puntos interiores para el instante  $t = t_0 + \Delta t$  , tomando en cuenta las *ecuaciones 6.24* a *6.28* por lo que se refiere a las condiciones de frontera del sistema, éstas quedarán definidas por la *ecuación 6.24* para la ubicada aguas abajo, y por la *6.25* para la que se encuentra aguas arriba, además de una ecuación adicional para cada frontera que permita establecer una relación entre  $h_p$  y  $v_p$  en las mismas. Estas ecuaciones adicionales dependerán del tipo particular de frontera y serán establecidas en la siguiente sección para los casos más frecuentes en conductos por gravedad y planta de bombeo.

### 6.3 CONDICIONES DE FRONTERA

Se puede definir el término "condición de frontera" como la condición que priva en cada extremo de la tubería en el tiempo, y puede ser la parte final del sistema en un vaso de almacenamiento, una válvula, una tapa ciega, etc. o puede estar constituida por la unión con otra tubería, una bomba, una válvula o algún otro dispositivo diferente. La *ecuación 6.26* corresponde a la característica positiva y se utiliza para enlazar la condición particular aguas abajo, de manera análoga la *ecuación 6.27* se emplea para enlazar la frontera aguas arriba a lo largo de la característica negativa.

A continuación se estudiarán las condiciones de frontera más comunes que se presentan en los transitorios hidráulicos en el conducto a presión.

### 6.3.1 DEPÓSITO CON NIVEL CONSTANTE

Independientemente de la ubicación del depósito, ya sea aguas arriba o aguas abajo (figura 6.6); si las pérdidas locales de entrada o salida al mismo además de la carga de velocidad resultan despreciables comparadas con la fricción, y se recuerda que  $h_p = \frac{H_p}{H_0}$ , y se hace  $h_{fL} = \frac{H_{fL}}{H_0}$  ( $H_{fL}$  es la pérdida por fricción en el conducto para el flujo permanente inicial en las secciones  $x = 0$  y  $x = L$ ) se puede escribir :

$$h_p = 1 \quad (6.29)$$

$$h_p = 1 - h_{fL} \quad (6.30)$$

Así, para el depósito situado aguas arriba se tendrá que :

$$v_p = C_{na} + \frac{1}{2\varepsilon} \quad (6.31)$$

y para el que se encuentra aguas abajo :

$$v_p = C_{pa} - \frac{1 - h_{fL}}{2\varepsilon} \quad (6.32)$$

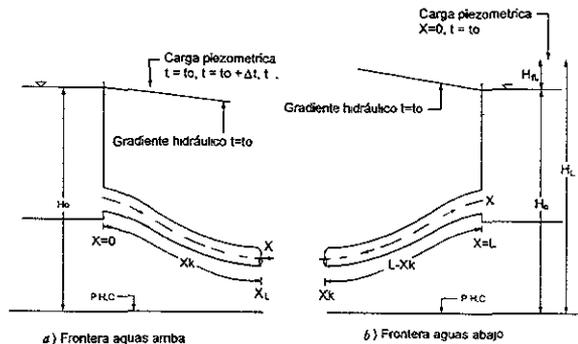


Figura 6.6

### 6.3.2 EXTREMO CERRADO SITUADO EN LA FRONTERA AGUAS ARRIBA

Si existe una ramificación cerrada en la tubería situado en el extremo aguas abajo (figura 6.7) de la ecuación 6.24 con  $v_p = 0$ , resulta :

$$h_p = 2 \varepsilon C_{pa} \quad (6.33)$$

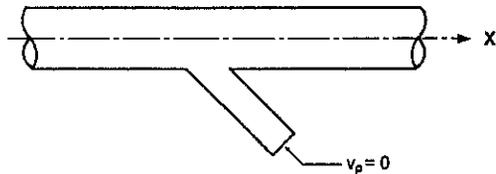


Figura 6.7 Extremo cerrado aguas abajo.

### 6.3.3 CAMBIO DE DIÁMETRO EN UN CONDUCTO

Para la solución de este caso, es necesario establecer ecuaciones adicionales a las ecuaciones 6.24 y 6.25 que permitan definir los parámetros  $h_p$  y  $v_p$  en las secciones de transición (figura 6.8).

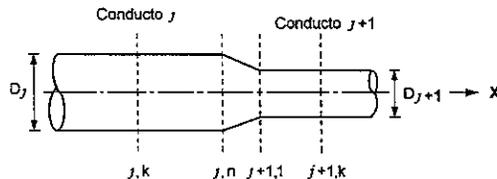


Figura 6.8 Cambio de diámetro en un conducto.

Si las pérdidas de carga y la diferencia de cargas de velocidad entre las secciones  $(j,n)$  y

( $j+1,1$ ) de figura 6.8 son despreciables, se tendrá que :

$$h_{p_{j,n}} = h_{p_{j+1,1}} = h_p \quad (6.34)$$

De acuerdo con esta expresión las ecuaciones características adimensionales positiva y negativa para las secciones anteriores se pueden escribir como :

$$v_{p_{j,n}} = C_{pa_j} - \frac{h_{p_{j,n}}}{2\varepsilon_j} \quad (6.35)$$

$$v_{p_{j+1,1}} = C_{na_{j+1}} + \frac{h_{p_{j+1,1}}}{2\varepsilon_{j+1}} \quad (6.36)$$

si aplicamos la ecuación de continuidad en la transición resulta :

$$v_{p_{j,n}} = v_{p_{j+1,1}} = v_p \quad (6.37)$$

Tomando en cuenta las ecuaciones 6.34 a 6.37 y después de hacer operaciones se obtiene :

$$h_p = \frac{C_{pa_j} - C_{na_{j+1}}}{\frac{1}{2\varepsilon_j} + \frac{1}{2\varepsilon_{j+1}}} \quad (6.38)$$

Una vez conocido el valor de  $h_p$  , el de  $v_p$  puede obtenerse de la ecuación 6.35 o 6.36 .

### 6.3.4 VÁLVULA SITUADA EN EL EXTREMO AGUAS ABAJO DE UN CONDUCTO

El gasto que pasa por la válvula (figura 6.9) para condiciones de flujo permanente inicial queda definido por la siguiente expresión :

$$Q_0 = (C_d A_v)_0 \sqrt{2gH_v} \quad (6.39)$$

donde  $C_d$  es el coeficiente de descarga que dependerá del tipo de válvula y del grado de apertura de la misma, y  $H_v$  es igual a la carga de velocidad más la pérdida de carga en esta última  $H_{pv}$ .

Basándonos en la figura 6.9 se puede escribir:

$$\frac{Q_p}{Q_0} = \frac{(C_d A_v)_p}{(C_d A_v)_0} \sqrt{\frac{H_p}{H_0 - H_{fL}}}$$

Si incluimos los parámetros adimensionales  $\eta_p$ ,  $v_p$ ,  $h_p$  y  $h_{fL}$  anteriormente definidos, en la ecuación anterior, ésta quedará de la siguiente manera:

$$v_p^2 = \frac{\eta_p^2 h_p}{1 - h_{fL}} \quad (6.40)$$

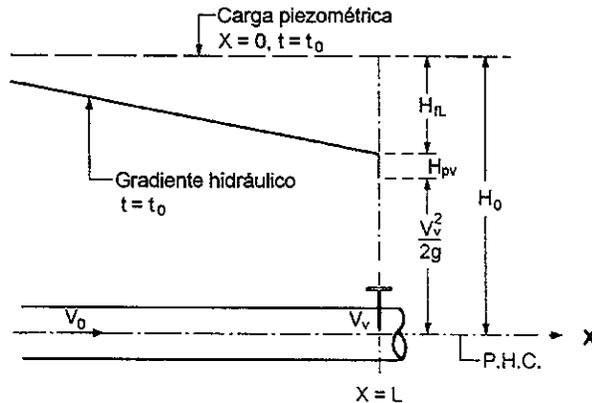


Figura 6.9 Válvula situada en el extremo aguas abajo.

Cuando las maniobras de cierre o apertura son uniformes, el valor de  $\eta_p$  se obtiene de las ecuaciones 4.11 y 4.12, sustituyendo el cociente  $\frac{i}{\theta}$  por el equivalente  $\frac{t}{\tau}$ .

Sustituyendo la ecuación 6.24 en la 6.40, el valor de  $v_p$  se puede expresar como:

$$v_p = \frac{1}{2} ( \sqrt{B^2 + 4BC_{pa}} - B ) \quad (6.41)$$

donde :  $B = \frac{2 \varepsilon \eta^2 p}{1 - h_{fL}}$

y el valor de  $h_p$  se obtiene de la ecuación 6.24 o 6.40 .

### 6.3.5 VÁLVULA SITUADA EN CUALQUIER SECCIÓN DE UN CONDUCTO CON CAMBIO DE DIÁMETRO

El gasto que pasa por la válvula (figura 6.10) se calcula de acuerdo con la expresión:

$$Q_0 = (C'_d A_v)_0 \sqrt{\Delta H_0} \quad (6.42)$$

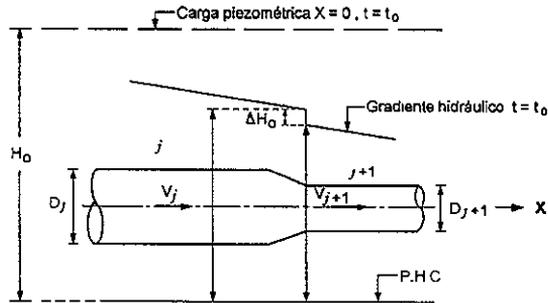


Figura 6.10 Válvula situada en cualquier sección del conducto con cambio de diámetro.

donde  $C'_d$  es el coeficiente de descarga que dependerá del tipo de válvula y del grado de apertura de ésta, y  $\Delta H_0$  es la pérdida de carga ( Se desprecia la pérdida de carga debida al cambio de diámetro ).

Las ecuación de continuidad aplicada en las secciones  $(j,n)$  y  $(j+1,l)$  permiten escribir:

$$v_{P_{j,n}} = v_{P_{j+1,l}} = v_p \quad (6.43)$$

Las ecuación de continuidad aplicada en las secciones  $(j,n)$  y  $(j+1,1)$  permiten escribir:

$$v_{p_{j,n}} = v_{p_{j+1,1}} = v_p \quad (6.43)$$

considerando la *ecuación 6.42* y de la **figura 6.10**, se deduce :

$$\frac{Q_p}{Q_0} = \frac{(C_d A v)_p}{(C_d A v)_0} \sqrt{\frac{H_{p_{j,n}} - H_{p_{j+1,1}}}{\Delta H_0}}$$

$$v_p^2 = \frac{H_0 \eta_p^4}{\Delta H_0} (h_{p_{j,n}} - h_{p_{j+1,1}}) \quad (6.44)$$

Por otra parte, de las *ecuaciones 6.24, 6.25 y 6.43* resulta :

$$h_{p_{j,n}} = 2\varepsilon_j (C_{pa_j} - v_p) \quad (6.45)$$

$$h_{p_{j,n}} = 2\varepsilon_{j+1} (v_p - C_{na_{j+1}}) \quad (6.46)$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en la *ecuación 6.44* el valor de  $v_p$  queda como :

$$v_p = \frac{1}{2} ( \sqrt{B_3^2 + 4C_3} - B_3 ) \quad (6.47)$$

donde :

$$B_3 = \frac{H_0 \eta_p^2}{\Delta H_0} (2\varepsilon_j + 2\varepsilon_{j+1}) \quad , \quad C_3 = \frac{H_0 \eta_p^2}{\Delta H_0} (2\varepsilon_j C_{pa_j} + 2\varepsilon_{j+1} C_{na_{j+1}})$$

Los valores de  $h_{p_{j,n}}$  y  $h_{p_{j+1,1}}$  , se obtienen de las *ecuaciones 6.45 y 6.46* .

La *ecuación 6.47*, es válida solamente para la dirección del flujo permanente inicial. Para la dirección opuesta se puede deducir una expresión semejante siguiendo el mismo razonamiento anterior.

### 6.3.6 BIFURCACIÓN DE UN CONDUCTO

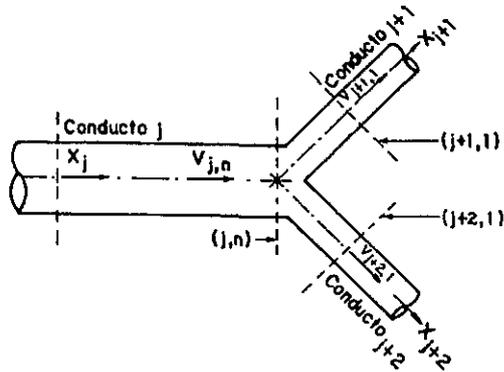


Figura 6.11 Bifurcación en un conducto.

En las bifurcaciones, como lo mostrado en la **figura 6.11** y despreciando la pérdida de carga en la sección de transición se puede establecer las siguientes ecuaciones :

- Ecuación adimensional de continuidad

$$v_{p_{j,n}} = v_{p_{j+1,1}} + v_{p_{j+2,1}} \quad (6.48)$$

- Ecuaciones características adimensionales

$$v_{p_{j,n}} = C_{pa_j} - \frac{h_{p_{j,n}}}{2\varepsilon_j} \quad (6.49)$$

$$v_{p_{j-1,1}} = C_{na_{j+1}} + \frac{h_{p_{j+1,1}}}{2\varepsilon_{j+1}} \quad (6.50)$$

- Ecuaciones de cargas piezométricas adimensionales

$$h_{p_{j,n}} = h_{p_{j+1,1}} + h_{p_{j+2,1}} = h_p \quad (6.52)$$

Resolviendo simultáneamente las ecuaciones 6.48 a 6.52 queda :

$$h_p = \frac{C_{pa_j} - C_{na_{j+1}} - C_{na_{j+2}}}{\frac{1}{2\varepsilon_j} + \frac{1}{2\varepsilon_{j+1}} + \frac{1}{2\varepsilon_{j+2}}} \quad (6.53)$$

Ahora  $h_{p_{j+1,1}}$  y  $h_{p_{j+2,1}}$  pueden determinarse de la ecuación 6.52 y  $v_{p_{j,n}}$ ,  $v_{p_{j+1,1}}$  y  $v_{p_{j+2,1}}$  de las ecuaciones 6.49 a 6.51 .

### 6.3.7 BOMBAS CENTRÍFUGAS Y VÁLVULAS DE NO RETORNO

Esta condición sirve para calcular el golpe de ariete en plantas de bombeo equipadas con bombas centrífugas iguales colocadas en paralelo, y con una válvula de no retorno situada en la tubería de descarga, cuando se presenta una interrupción brusca en el suministro de energía eléctrica en la totalidad de la planta (figura 6.12) donde la carga  $H_0$  incluye las pérdidas por fricción en la tubería de descarga.

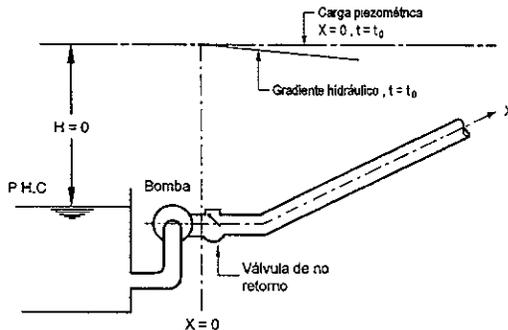


Figura 6.12 Bombas centrífugas y válvula de no retorno.

$$h_i = A_b \alpha_i^2 + B_b \alpha_i v_i + C_b v_i^2 \quad \alpha_i > 0 ; v_i \geq 0 \quad (6.54)$$

Si las pérdidas de carga por entrada a la tubería de succión así como las pérdidas por fricción en esta última ( $H_f$ ) son despreciables; con  $h_i = h_p$ ,  $v_i = v_p$ ,  $\alpha_i = \alpha_p$  y las ecuaciones 6.25 y 6.54, después de hacer operaciones resulta :

$$v_p = \frac{1}{2C_b} ( B_1 - \sqrt{B_1^2 - C_1} ) \quad (6.55)$$

$$h_p = 2\varepsilon ( v_p - C_{na} ) \quad (6.56)$$

donde :

$$B_1 = 2\varepsilon - B_b \alpha_p$$

$$C_1 = 4C_b ( 2\varepsilon C_{na} + A_b \alpha_p^2 )$$

$$\alpha_p = \frac{1}{K_p t + 1}$$

$$A_b = \frac{a}{H_0}$$

$$B_b = \frac{b Q_0}{H_0}$$

$$C_b = \frac{c Q_0^2}{H_0}$$

y el efecto de la válvula de no retorno se puede simular mediante la ecuación :

$$h_{p_{v \rightarrow 0}} = h - \left( \frac{h - h_p}{v - v_p} \right) V \quad (6.57)$$

#### 6.4 CONDICIONES DE ESTABILIDAD Y CONVERGENCIA

Con referencia a la solución de ecuaciones características y de compatibilidad (*sección 6.2*); si la solución de las ecuaciones expresadas en diferencias finitas se aproxima a la solución exacta de las ecuaciones diferenciales originales conforme los valores de  $\Delta x$  y  $\Delta t$  tienden a cero, se dice que esta es convergente. Si el error de redondeo debido por la representación de números irracionales por un número finito de dígitos significativos, aumenta conforme se avanza en la solución del esquema de cálculo, se dice entonces que es inestable y, en caso contrario se denomina estable; Se ha podido comprobar que la convergencia de un esquema implica su estabilidad y la estabilidad implica convergencia.

Cuando se tienen conductos con características "geométricas y elásticas" constantes (caso de sistemas simples), se recomienda que para la convergencia y estabilidad de las ecuaciones en diferencias finitas lo siguiente (ver **figuras 6.1 y 6.5**).

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{1}{a} \quad (6.58)$$

En sistemas más complejos, en los que existen conductos con propiedades diferentes a lo largo de su desarrollo, se requiere utilizar un mismo incremento de tiempo en todo el sistema, y además es necesario que se cumpla la relación :

$$\Delta t_j = \frac{\Delta x_j}{a_j} \quad (6.59)$$

donde :  $\Delta x_j = \frac{L_j}{N_j} \quad ; \quad j = 1, 2, 3, \dots N_j \geq 2$

De acuerdo con lo anterior se sugiere el siguiente procedimiento para el cálculo del incremento de tiempo y el valor de  $N_j$  que representa el número mínimo entero de tramos en que debe dividirse cada conducto :

a).- Calcular el incremento de tiempo mínimo según la expresión :

$$\Delta t_{\min} = \frac{1}{m_c} \left( \frac{L_j}{a_j} \right)_{\min} ; \quad m_c \geq 2$$

b).- Determinar  $N_j'$  ;  $N_j' = \frac{L_j}{a_j \Delta t_{\min}}$

c).- Aceptar nuevos valores para la celeridad de onda en cada conducto, de tal manera que

$$: a_j = \frac{L_j}{\Delta t_{\min} N_j} ; \quad N_j \geq 3$$

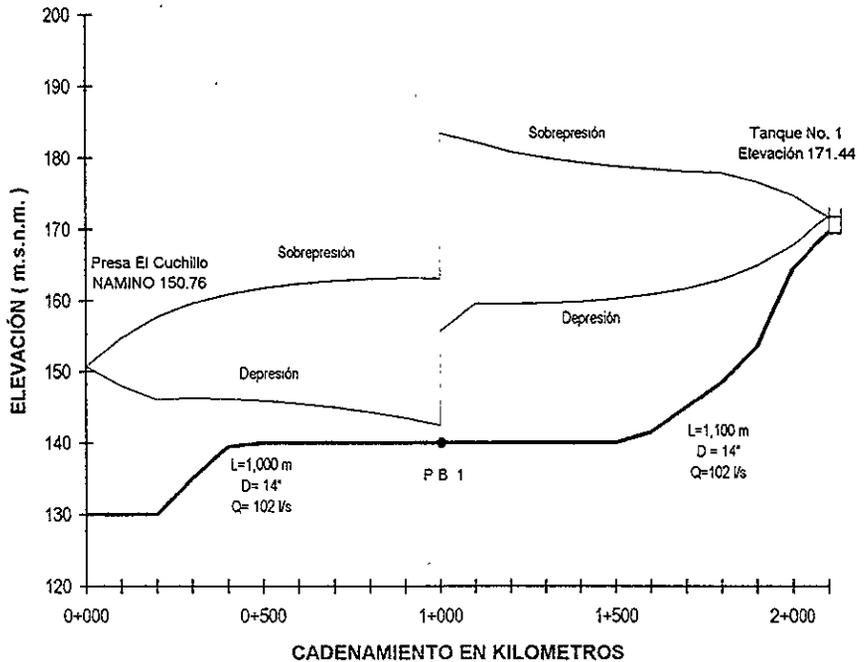
Siendo  $N_j$  el entero más próximo a  $N_j'$  .

Si aumentamos el valor de  $m_c$ , se obtendrá mayor precisión en los resultados.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

# TRANSITORIOS HIDRÁULICOS

## PRIMER TRAMO DE ANÁLISIS



### CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN

Planta de bombeo en el cadenamiento 1+000  
 Simulación *sin dispositivos* de control  
 para atenuar los efectos de golpe de ariete  
 Válvula de no retorno en la tubería de  
 descarga de la P.B.  
 Carga estática total 30.88 m  
 Tubería A-C, clase A-5

TRAMO DE ANÁLISIS  
 "EL CUCHILLO-TANQUE No. 1"

U. N. A. M.  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 TESIS PROFESIONAL  
 figura 7.2

En la simulación presentada anteriormente (figura 7.2); se garantiza que no se tendrá problemas con respecto a los fenómenos transitorios de sobrepresión y depresión. Ahora bien, al revisar el fenómeno transitorio de sobrevelocidad se observa que las velocidades de rotación de las bombas disminuyen de tal forma que nunca alcanzan valores negativos, sin embargo se hizo una simulación extra para el caso "catastrófico extraordinario" en el que la válvula de retención no cierra, presentándose los resultados a continuación (ver figura 7.3).

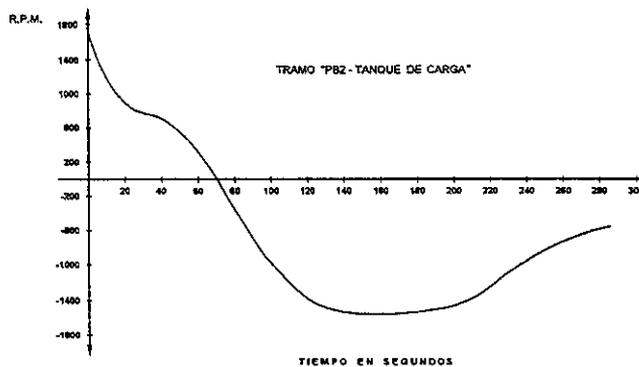


Figura 7.3 Sobrevelocidad en el equipo de bombeo.

En la figura anterior se puede apreciar que para dicho caso extraordinario la máxima velocidad en reversa impuesta a los equipos de bombeo nunca es mayor a la velocidad de referencia, por lo que se asegura que no se presentan problemas de sobrevelocidad.

## 7.4 SEGUNDO TRAMO DE ANÁLISIS

El segundo tramo de análisis es el más largo dentro del acueducto, tiene una longitud aproximada de 30 km. Está comprendido entre el tanque N° 1 y la planta de bombeo PB-2, cuenta con tres bifurcaciones las cuales derivan el gasto necesario de cada población por las que pasa el acueducto (ver inciso 2.3.1 y 2.3.2).

Dado que la conducción se realiza mediante gravedad, para la cuantificación de los fenómenos transitorios se propuso el cierre programado en las válvulas de control localizadas en el extremo final de cada bifurcación. Cada cierre se supuso independiente uno de otro, esto con el propósito de aislar cada localidad sin afectar en lo posible el suministro de las otras poblaciones.

En la **figura 7.4** se presenta numeradas en forma ascendente el orden en el que serán cerradas las válvulas dentro del cierre programado.

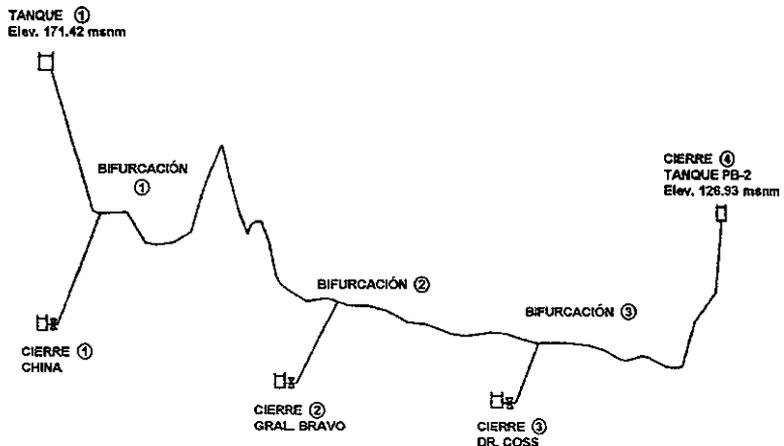


Figura 7.4 Cierres programados.

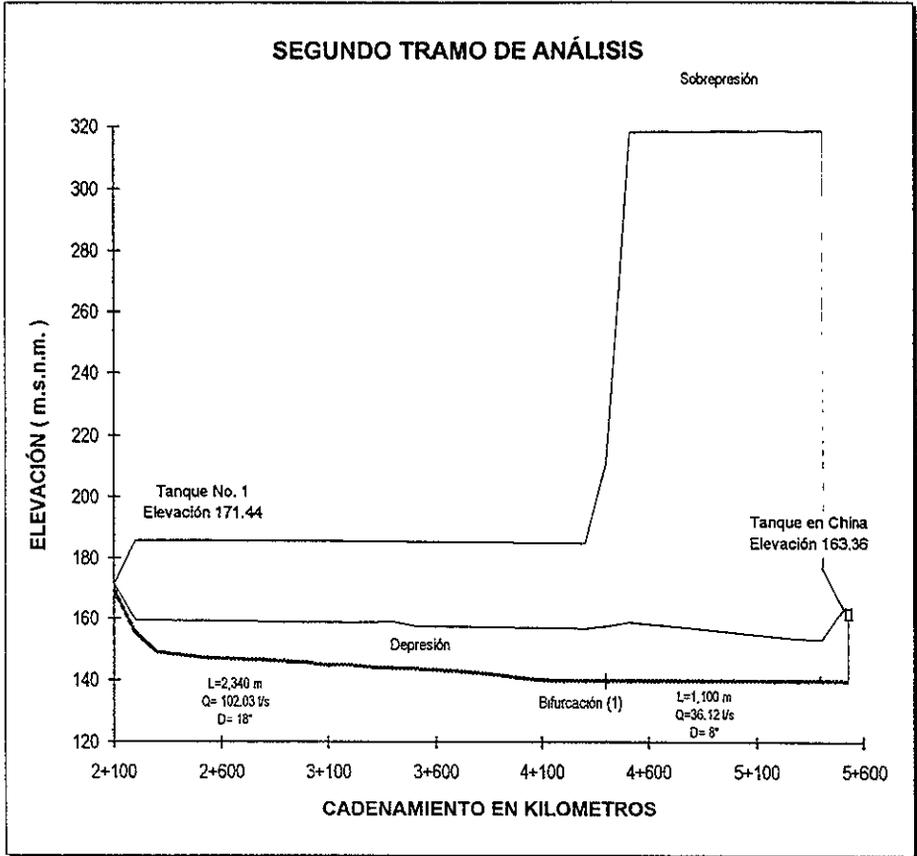
Conociendo que la magnitud de los fenómenos transitorios de golpe de ariete es mayor cuando la "maniobra de cierre" es rápida, y el tipo de maniobra lo define el período ( $T$ ) junto con el tiempo

de cierre (o apertura); procuremos simular y operar las válvulas de modo de asegurar un "cierre lento".

Los resultados de las simulación de cada sección en el que se dividió el tramo, se presenta en ocho figuras ( Figuras 7.5 a 7.12 ), donde se alternan las simulaciones "sin" y "con dispositivos de control". Se suponen "válvulas de flotador" en todos los tramos, con tiempo de cierre que varía entre 100 y 200 segundos, siendo la "válvula de alivio" el tipo de dispositivo de control utilizado.

Por necesidades de operación y mantenimiento se colocará una "válvula de compuerta" antes de cada uno de los tanque de almacenamiento. Para el cierre de dichas válvulas también se deberá asegurar que los cierres en cada tramo sean lentos, ya que de lo contrario podría afectar la seguridad del acueducto.

# TRANSITORIOS HIDRÁULICOS



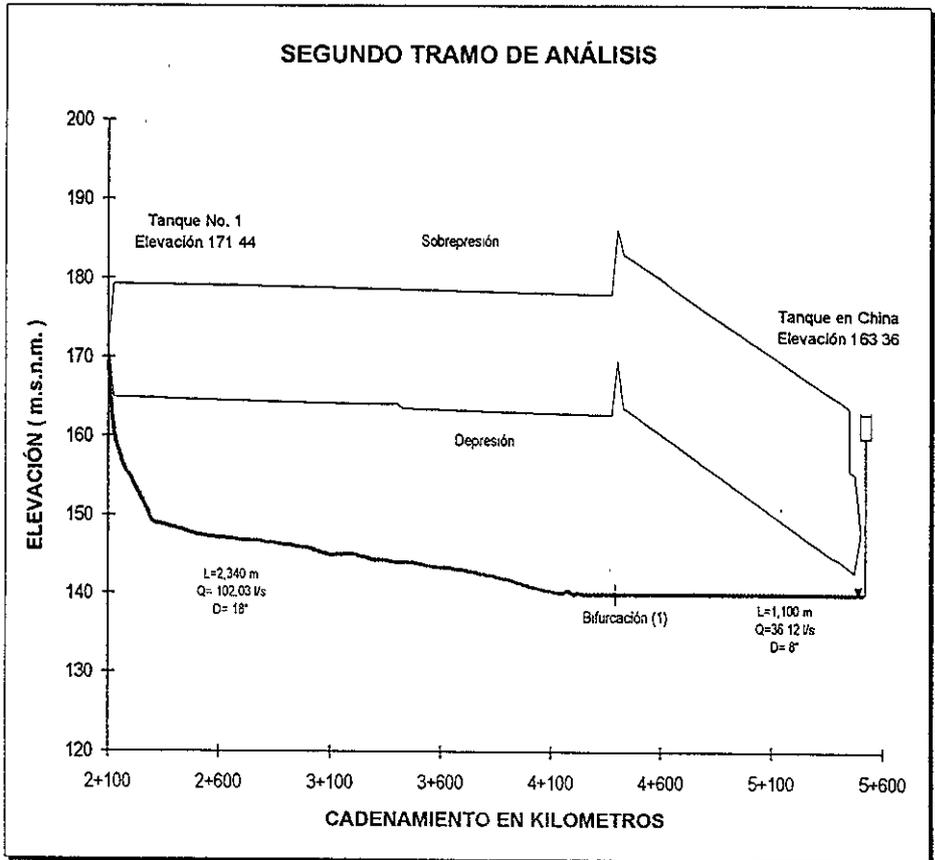
## CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN

Simulación sin dispositivos de control  
Bifurcación (1) cad. 4+400  
 $Q_1 = 102.03 \text{ l/s}$   
 $Q_2 = 36.12 \text{ l/s}$   
Tiempo de cierre de la válvula 100 seg.  
(cierre lento)

SECCIÓN DE ANÁLISIS  
"TANQUE No. 1 - CHINA"

U. N. A. M.  
FACULTAD DE INGENIERIA  
TESIS PROFESIONAL  
figura 7.5

# TRANSITORIOS HIDRÁULICOS



## CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN

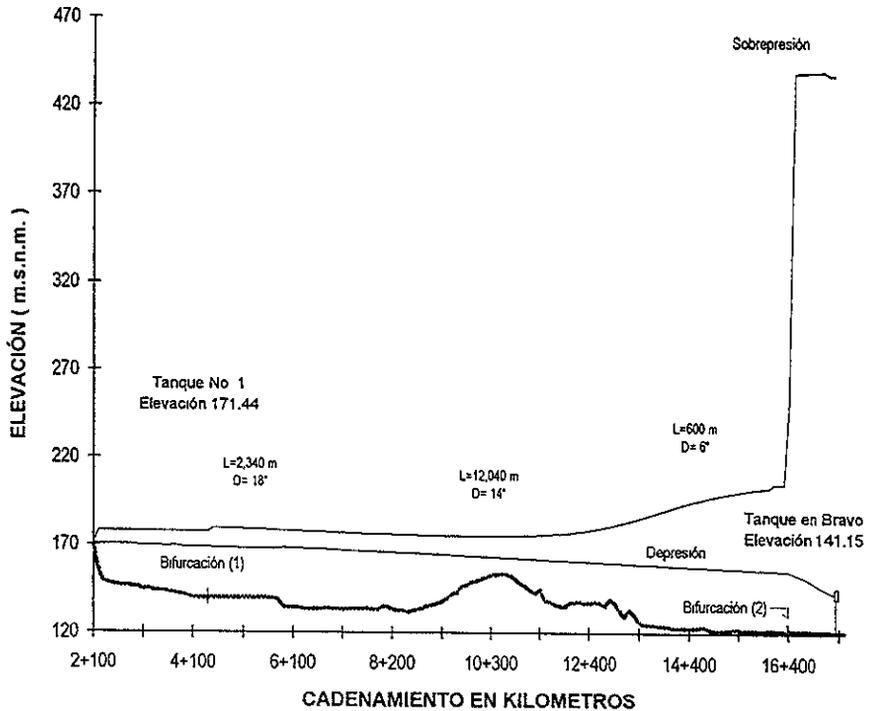
Simulación con válvula de alivio como dispositivo de control  
Bifurcación (1) cad 4+400  
 $Q_1 = 102.03 \text{ l/s}$   
 $Q_2 = 36.12 \text{ l/s}$   
Tiempo de cierre de la válvula 200 seg.

SECCIÓN DE ANÁLISIS  
"TANQUE No. 1 - CHINA"

**U. N. A. M.**  
FACULTAD DE INGENIERIA  
TESIS PROFESIONAL  
figura 7.6

# TRANSITORIOS HIDRÁULICOS

## SEGUNDO TRAMO DE ANÁLISIS



### CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN

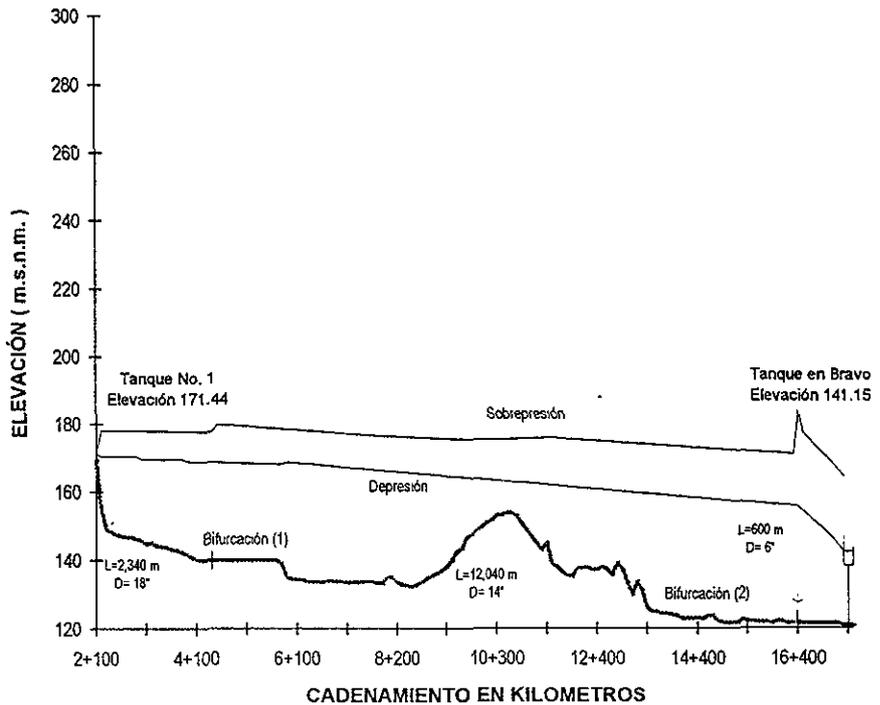
Simulación sin dispositivos de control  
Bifurcación (1) cad. 4+400  
Bifurcación (2) cad. 16+400  
 $Q_3 = 66.95$  l/s  
 $Q_4 = 36.46$  l/s  
Tiempo de cierre de la válvula 20 seg.

### SECCIÓN DE ANÁLISIS "TANQUE No. 1 - BRAVO"

U. N. A. M.  
FACULTAD DE INGENIERIA  
TESIS PROFESIONAL  
figura 7.7

# TRANSITORIOS HIDRÁULICOS

## SEGUNDO TRAMO DE ANÁLISIS



### CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN

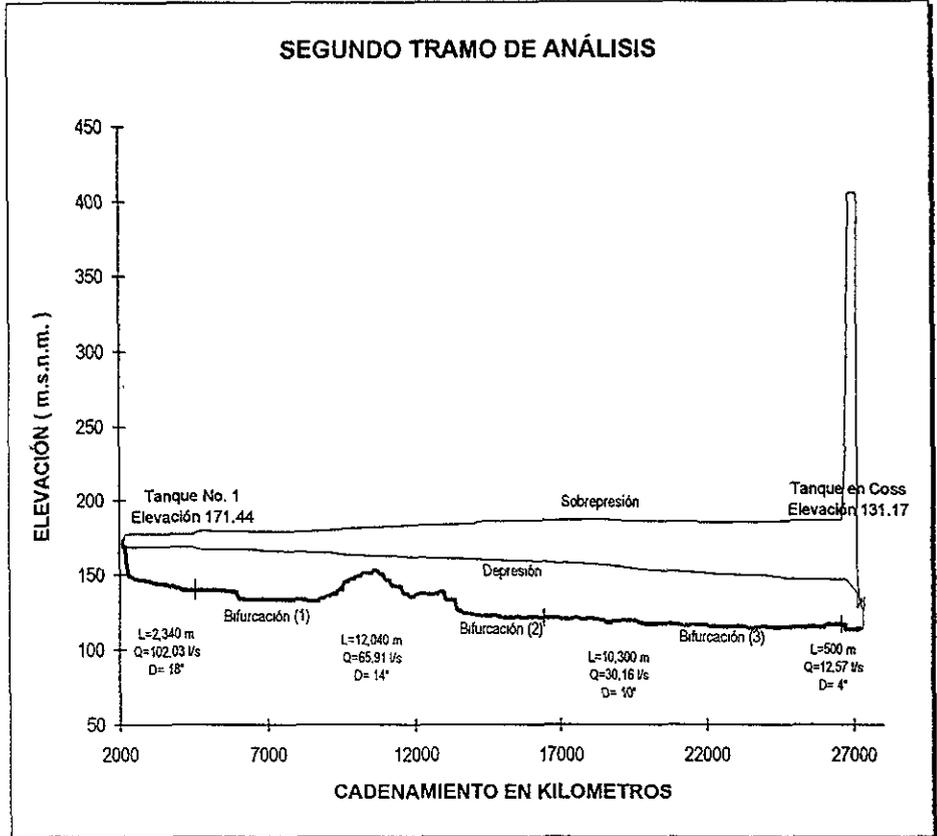
Simulación con válvula de alivio  
Bifurcación (1) cad. 4+400  
Bifurcación (2) cad 16+400  
 $Q_3 = 66.95$  l/s  
 $Q_4 = 36.46$  l/s  
Tiempo de cierre de la válvula 100 seg

### SECCIÓN DE ANÁLISIS "TANQUE No. 1 - BRAVO"

U . N . A . M .  
FACULTAD DE INGENIERIA  
TESIS PROFESIONAL  
figura 7.8

# TRANSITORIOS HIDRÁULICOS

## SEGUNDO TRAMO DE ANÁLISIS



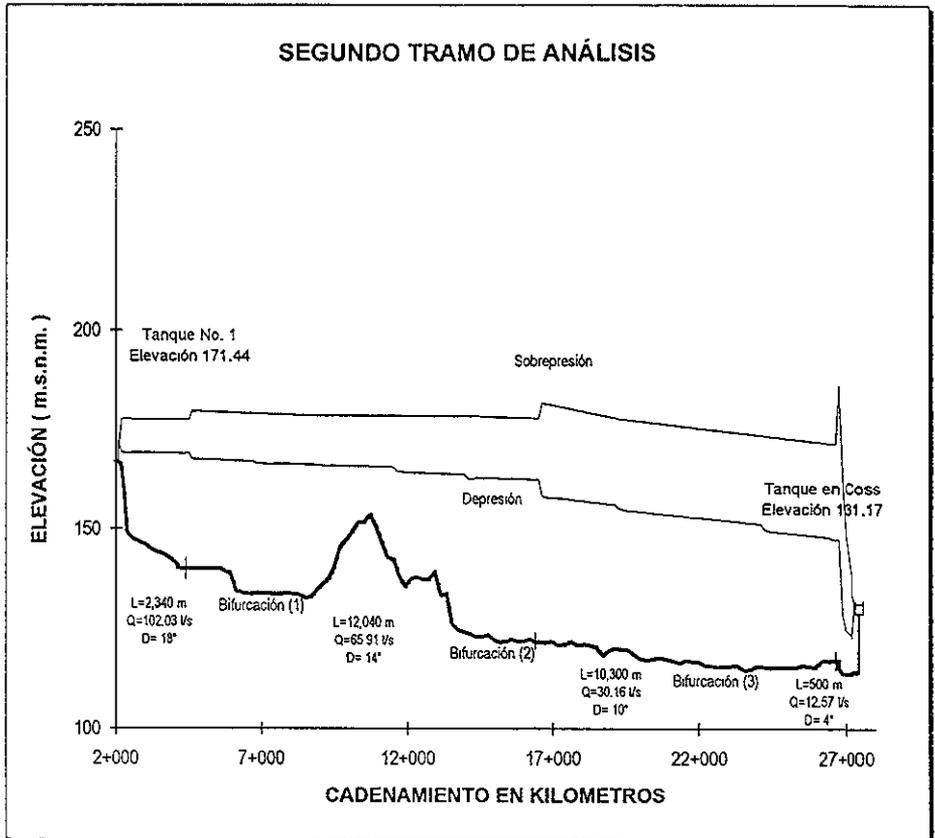
### CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN

Simulación sin dispositivos de control  
Bifurcación (1) cad. 4+400  
Bifurcación (2) cad. 16+400  
Bifurcación (3) cad. 26+700  
Tiempo de cierre de la válvula 100seg.

SECCIÓN DE ANÁLISIS  
"TANQUE No. 1 - DR. COSS"

U. N. A. M.  
FACULTAD DE INGENIERIA  
TESIS PROFESIONAL  
figura 7.9

# TRANSITORIOS HIDRÁULICOS



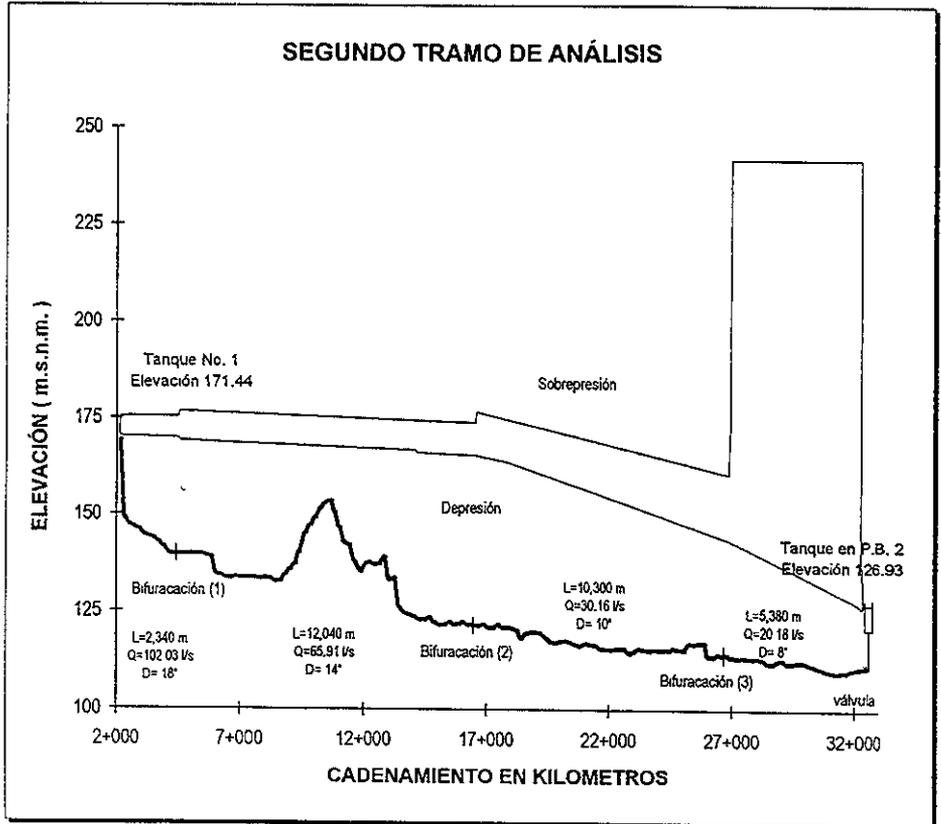
## CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN

Simulación con válvula de alivio como dispositivos de control  
Bifurcación (1) cad. 4+400  
Bifurcación (2) cad. 16+400  
Bifurcación (3) cad. 26+700  
Tiempo de cierre de la válvula 100seg.

SECCIÓN DE ANÁLISIS  
"TANQUE No. 1 - DR. COSS"

U. N. A. M.  
FACULTAD DE INGENIERIA  
TESIS PROFESIONAL  
figura 7.10

# TRANSITORIOS HIDRÁULICOS



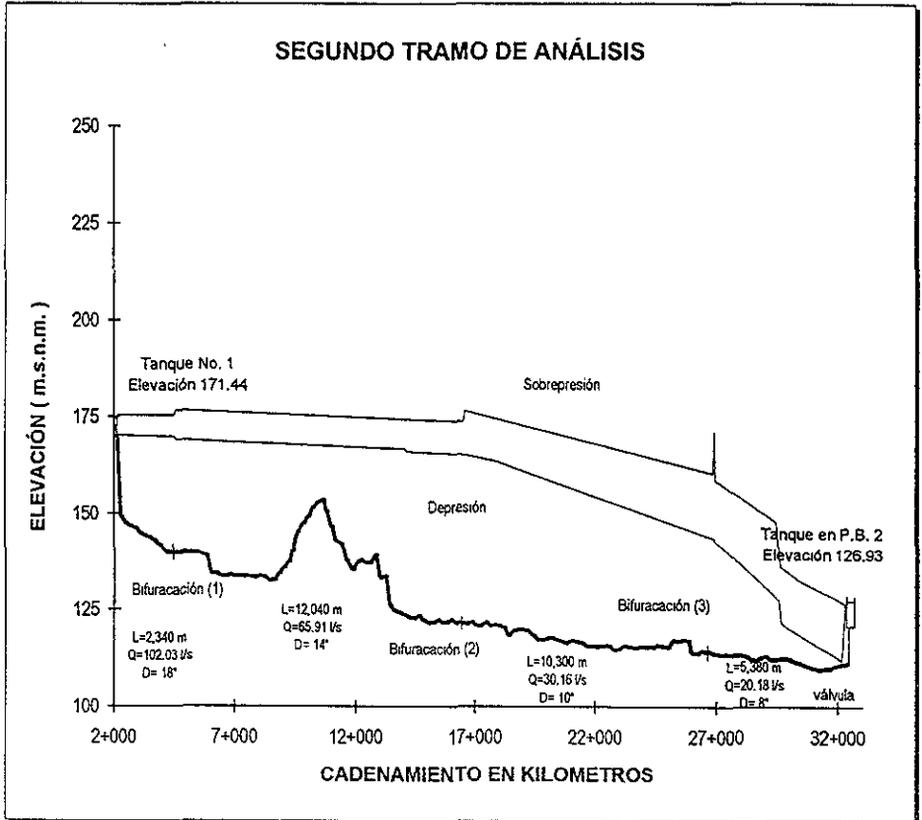
## CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN

Simulación sin dispositivos de control  
 Bifurcación (1) cad. 4+400  
 Bifurcación (2) cad. 16+400  
 Bifurcación (3) cad. 26+700  
 Tiempo de cierre de la válvula 100 seg.

SECCIÓN DE ANÁLISIS  
 "TANQUE No. 1 - P.B. 2"

**U. N. A. M.**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
 TESIS PROFESIONAL  
 figura 7.11

# TRANSITORIOS HIDRÁULICOS



## CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN

Simulación con válvula de alivio como dispositivo de control  
Bifurcación (1) cad. 4+400  
Bifurcación (2) cad. 15+400  
Bifurcación (3) cad. 26+700  
Tiempo de cierre de la válvula 100 seg

SECCIÓN DE ANÁLISIS  
"TANQUE No. 1 - P.B. 2"

U. N. A. M.  
FACULTAD DE INGENIERIA  
TESIS PROFESIONAL  
figura 7.12

## 7.5 TERCER TRAMO DE ANÁLISIS

El tercer tramo de análisis esta comprendido entre la "planta de bombeo No. 2" ( PB-2 ) y el "tanque de carga No. 2".

Las características de la planta de bombeo No. 2 son :

Número de bombas	1
Capacidad (gasto real de operación)	0.0216 m <sup>3</sup> /s
Velocidad de rotación	1750 rpm
Momento de inercia (wk <sup>2</sup> )	0.053 kg-m <sup>2</sup>
Carga de diseño	21.83 m

La conducción esta formada por tubería de A-C de 0.2032 m (8") de diámetro y aproximadamente 3900 m de longitud. Los resultados para este tramo de la simulación sin dispositivo de control alguno, se muestran en la **figura 7.13**, en donde se aprecia que la envolvente mínima nunca corta el perfil del terreno, y la magnitud de las cargas máximas son fácilmente contenidas con la tubería propuesta de asbesto-cemento clase A-5 (50 mca), llegando a la conclusión de que no se requieren dispositivos de control.

Simulación sin dispositivos de control :

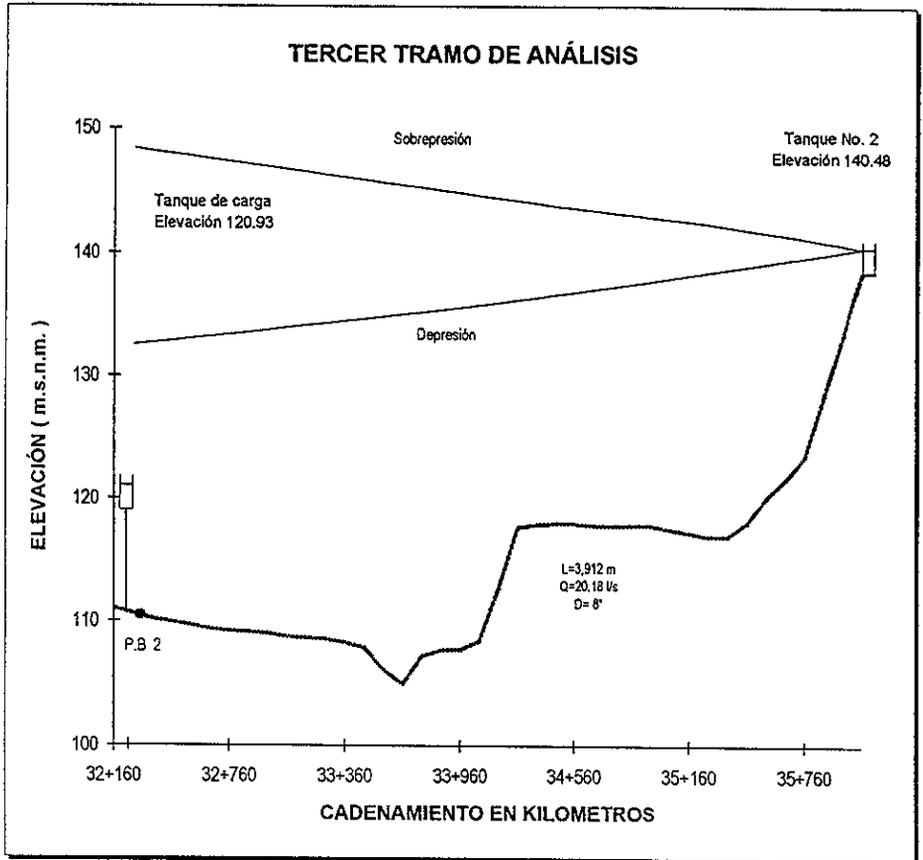
### **Elevación del gradiente hidráulico**

Máximo	Mínimo
148.25 m	132.54 m

### **Presión manométrica en la planta PB-2**

Máxima	Mínima
36.51 m	20.80 m

# TRANSITORIOS HIDRÁULICOS



## CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN

Planta de bombeo en el cad. 32+160  
Simulación *sin dispositivo* de control que disminuyan los efectos de golpe de ariete  
Válvula de no retorno en la tubería de descarga de la P.B.  
Carga estática total 21.95 m  
Tubería de A-C, clase A-5

TRAMO DE ANÁLISIS  
"P.B. 2 - TANQUE No. 2"

**U. N. A. M.**  
FACULTAD DE INGENIERIA  
TESIS PROFESIONAL  
figura 7.13

En cuanto a la sobrevelocidad máxima en reversa que se presenta en el equipo de bombeo, podemos decir que nunca es mayor que la velocidad de referencia, aun cuando se considera el "caso extraordinario" en que la válvula de retención no cerrase, los resultados arrojados para el último caso mencionado se muestran gráficamente en la **figura 7.14**.

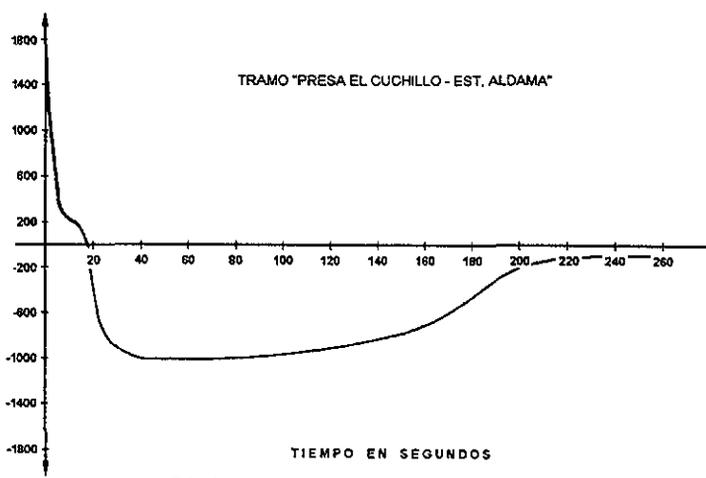


Figura 7.14 Sobrevelocidad en los equipos de bombeo.

## 7.6 CUARTO TRAMO DE ANÁLISIS

El cuarto y último tramo de análisis queda comprendido entre el tanque de carga No. 2 y la localidad de Estación Aldama. La conducción se realiza mediante gravedad utilizando tubería de Asbesto-Cemento de 8" de diámetro.

De éste tramo de análisis, se presentan y comentan algunas de las diferentes alternativas de simulación que se estudiaron.

En la primera simulación se consideró el supuesto de un "cierre imprudencial" de la válvula de control de 15 seg (cierre rápido), y, sin considerar ningún dispositivo de control, obteniéndose los resultados que se presentan en la figura 7.15 y se resumen a continuación.

Por los valores que arroja la primera simulación, la operación es riesgosa para el sistema, ya que las presiones máximas resultan exageradas, pero sobre todo por la presión mínima manométrica en el tubo; por lo que fue necesario proponer una nueva simulación.

La siguiente simulación contempla la utilización de válvulas de alivio a lo largo del conducto, las cuales lograban disminuir significativamente las presiones máximas, pero las depresiones no lograban librar el perfil de la conducción, debido a esto se desechó esta alternativa porque cruzaban dicho perfil aproximadamente desde el cadenamamiento 41+850 al 44+150 (el perfil topográfico muestra en esta zona un promontorios de consideración).

La tercera simulación consistiría en colocar un "tanque rompedor de presión" dividiendo el conducto en dos tramos en vez de uno, los que se simularon con tiempo de cierre de 50 seg. (cierre lento), lográndose por un lado librar el perfil topográfico y por el otro se logra la utilización de tubería clase A-5 (50 m.c.a.) en la totalidad de la conducción .

En la cuarta simulación se propuso aumentar el tiempo de cierre de la válvula a 100 seg.(cierre lento) sin utilizar ningún dispositivo de control, como lo muestra la figura 7.16 , con lo que se logra un cierre seguro con cargas moderadas y sin que crucen las depresiones crucen el perfil de la

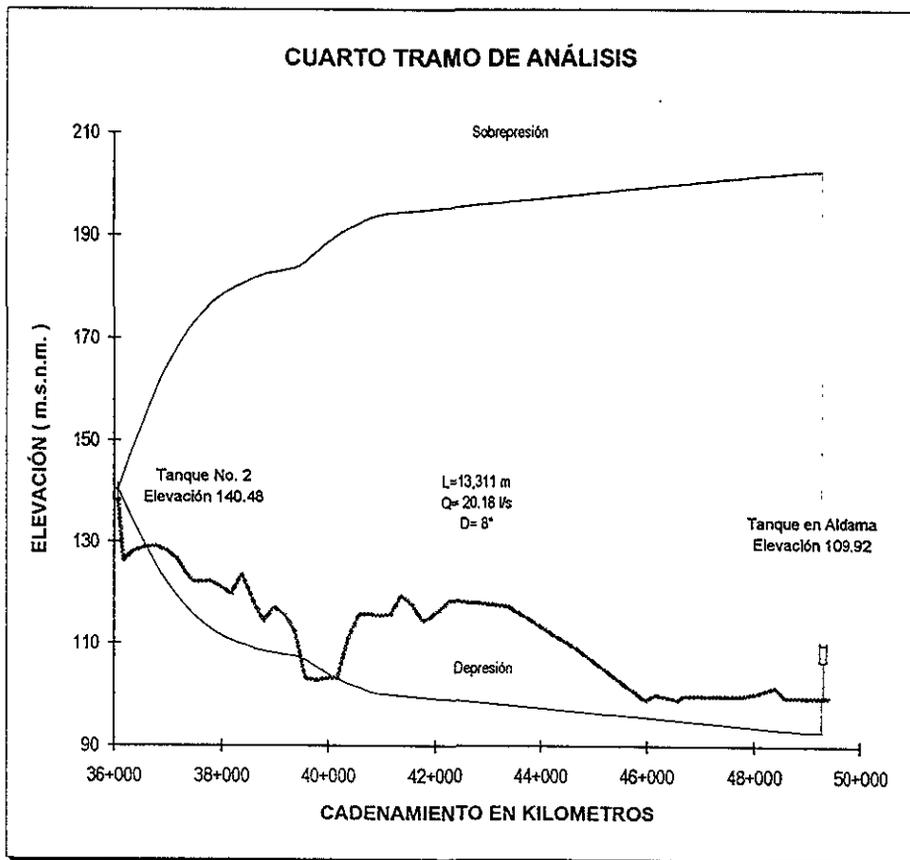
conducción como en otras alternativas.

En la alternativa mencionada anteriormente, existe un tramo aproximadamente de 4,200 m en el que es necesario utilizar tubería clase A-7 (70 m.c.a.).

Comparando las alternativas 3 (tanque intermedio) y 4 (simulación con de cierre de la válvula de 100 seg) técnicamente las dos son viables, y aunque en la alternativa 4 se utiliza solo tubería clase A-5, se prefirió utilizar la alternativa número 3, ya que a pesar de contar con el tramo de tubería clase A-7, económicamente resultó ser más barata que construir el tanque intermedio con todas sus instalaciones necesarias

A continuación se presentan las figuras 7.15 y 7.16 que corresponden a la simulaciones de las alternativas 1 y 4 con tiempo de cierre de 15 seg. y de 100 seg. respectivamente..

# TRANSITORIOS HIDRÁULICOS



## CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN

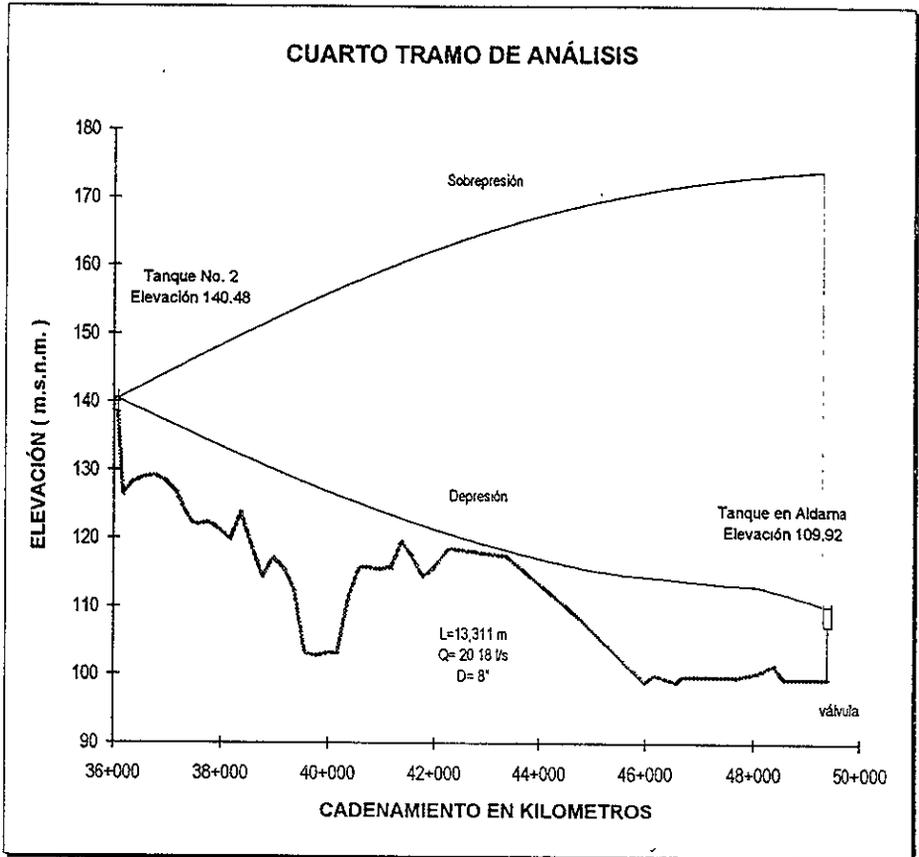
Conducción por gravedad

Sin dispositivos de control que disminuyan los efectos del golpe de ariete  
Tiempo de cierre de la válvula = 15 seg.  
( cierre rápido )

TRAMO DE ANÁLISIS  
"TANQUE No. 2 - ALDAMA"

**U. N. A. M.**  
FACULTAD DE INGENIERIA  
TESIS PROFESIONAL  
figura 7.15

# TRANSITORIOS HIDRÁULICOS



## CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN

Conducción por gravedad

Tiempo de cierre de la válvula = 100 seg  
(cierre lento)

TRAMO DE ANÁLISIS  
"TANQUE No. 2 - ALDAMA"

U. N. A. M.  
FACULTAD DE INGENIERIA  
TESIS PROFESIONAL  
figura 7.16

## CAPITULO VIII

### COMENTARIOS FINALES Y RECOMENDACIONES

Por la magnitud del incremento y decremento de la presión dentro de las conducciones, debida a los fenómenos transitorios, es necesario que durante el diseño de los acueductos se realicen estudios con el fin de cuantificar dichos efectos y, en caso necesario, los dispositivos necesarios para atenuarlos y su ubicación más conveniente.

Se recomienda el método de las características para dicha cuantificación, ya que cuenta con muchas ventajas sobre otros métodos, entre las que se encuentran la buena aproximación que pueden alcanzar los resultados numéricos, la rapidez del cálculo, la facilidad de utilizar programas de cómputo electrónico, la simulación de diferentes tipos de dispositivos de control, la posibilidad de ubicar en el mejor lugar el dispositivo apropiado, y sobre todo porque permite conocer las presiones máximas y mínimas en puntos intermedios de la conducción.

Sobre el último punto mencionado anteriormente, existe la necesidad de conocer las presiones máximas, ya que la diferencia de alturas entre éstas y las cotas topográficas, definen la clase y tipo de tubería a utilizar; y con respecto a las cargas de presión mínimas, es indispensable conocerlas porque se corre el riesgo de tener presiones negativas en puntos intermedios de la conducción.

También es necesario mencionar que para la utilización del programa de cómputo se debe tener cuidado en la "caracterización de las válvulas" ya que se pueden tener grandes diferencias y saltos de las magnitudes en la simulación cuando no se caracterizan adecuadamente.

En relación con el proyecto del acueducto "Presa el cuchillo - Estación Aldama", gracias a la utilización de dispositivos de control que disminuyen los efectos de los fenómenos transitorios, en la mayor parte de la conducción fue posible utilizar tubería de asbesto cemento clase A-5 (50 mca) en lugar de clase A-7 o A-10, que son de un mayor precio.

En el diseño de plantas de bombeo es indispensable considerar en la tubería de descarga las

válvulas de no retorno, porque evitan que los equipos trabajen en la "zona de disipación" y en la "zona trabajando como turbina", que como lo visto en el inciso 4.4 en esta última zona alcanza la mayor carga de trabajo, lo que podría causar la ruptura de la tubería.

En los tramos donde funcionan plantas de bombeo, la depresión es el efecto de mayor magnitud, que en el diseño a régimen establecido nunca se toma en cuenta, por lo que es indispensable la revisión a régimen transitorio.

Se recomienda además dar mantenimiento a los dispositivos de control, de modo que estén siempre en posibilidades de operar correctamente, ya que en los resultados obtenidos de la simulación, es evidente la disminución de los efectos producidos por transitorios hidráulicos y sus problemas.

En conducciones por gravedad y cuyas longitudes de tubo sean "muy grandes", se recomienda de ser posible, colocar tanques intermedios entre puntos inicial y final de la conducción, de manera que estos sirvan como cajas rompedoras de presión, dividiendo así las cargas iniciales ( $H_0$ ) además de disminuir la fase ( $\mu$ ), con lo que se logran disminuir los efectos del golpe de ariete y el tiempo requerido para una maniobra segura.

Esta conclusión se deduce fácilmente mediante la "Teoría de la columna rígida" (sección 4.3.3), en donde la longitud " $L$ " es directamente proporcional al factor  $Kr$ , utilizado en dicha teoría.

También es recomendable operar las válvulas con "cierres lento" ( $\tau \geq \frac{2l}{a}$ ) o "apertura lenta", porque las magnitudes de los fenómenos transitorios aumentan al disminuir el tiempo de cierre o apertura. Esto lo podemos ejemplificar claramente con la figura 4.6 de las cartas de Allievi, en donde tomando un valor de la característica de la conducción  $\varepsilon = 12$ , y para dos diferentes tiempos relativos de maniobra, por ejemplo  $\theta_1 = 6$  y otro de  $\theta_2 = 46$ , obtenemos valores de  $Z^2_{\max} = 6$  para el primer valor de  $\theta$ , y  $Z^2_{\max} = 1.3$  para el segundo. Ahora bien, si sustituimos dichos valores en la fórmula  $H_{\max} = H_0 Z^2_{\max}$ , observamos que con el primer valor se obtienen cargas máximas 4.6 veces mayores que con el segundo valor.

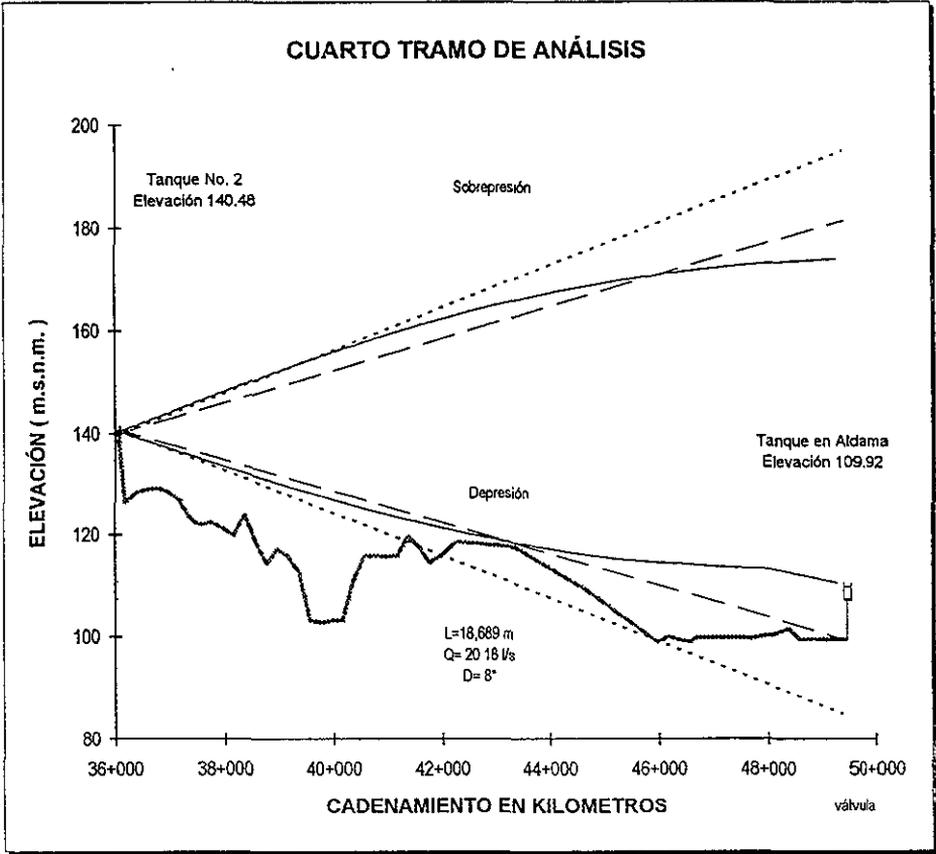
Por eso mismo es necesario que las válvulas y en general todo el sistema, sea operado por personal calificado y capacitado, de modo de evitar tiempos de cierres "imprudenciales" menores de los proyectados para cada tramo.

A continuación se presenta la **figura 8.1**, que es una comparación de los resultados obtenidos por diferentes métodos (Características, Cartas de Allievi y Método gráfico) para la cuantificación de los fenómenos transitorios en el último tramo del acueducto, considerando un tiempo de cierre de la válvula de 100 seg. (cierre lento).

El método de las cargas de Allievi, sólo válido para maniobras lineales, da únicamente los valores de la sobrepresión máxima y la posible depresión en la válvula, en tanto que el método de las características permite calcular las variaciones de presión en diferentes puntos a lo largo de la conducción.

Como se aprecia en la figura, la práctica usual de calcular únicamente las presiones en la cercanía de la válvula y unir con una línea recta estos valores con los del tanque inicial del tramo, resulta en estimaciones en exceso en algunos sitios y en defecto en otros. Esto conduce, naturalmente a que la tubería quede sobrediseñada estructuralmente en algunos tramos y escaso en otros, por lo que se recomienda, en lo posible, hacer el cálculo en varias secciones como lo permiten el método finito y el de las características.

# TRANSITORIOS HIDRÁULICOS



**CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN**

Conducción por gravedad  
Tiempo de cierre = 100 seg.  
( cierre lento )

Características \_\_\_\_\_

Gráfico .....

Cartas de Allievi - - - - -

TRAMO DE ANÁLISIS  
"TANQUE No. 2 - ALDAMA"

**U . N . A . M .**  
FACULTAD DE INGENIERIA  
TESIS PROFESIONAL  
**figura 8.1**

## BIBLIOGRAFÍA

- 1 - Manual de diseño de obras civiles.  
Comisión Federal de Electricidad  
A.2.3 Conducciones por gravedad
- 2 - Manual de diseño de obras civiles.  
Comisión Federal de Electricidad  
A.2.6 Golpe de ariete
- 3 - Teoría del golpe de ariete y sus  
aplicaciones en ingeniería hidráulica.  
Uriel Mancebo del Castillo
- 4 - Diseño y operación hidráulicos en  
conducciones de agua a presión.  
Instituto de Ingeniería, UNAM 1985  
Fascículos I, II, III, IV, V, VI y VII
- 5 - Tratado de hidráulica aplicada.  
Calvin, Victor Davis  
Ed. Labor S.A.
- 6 - Manual de normas de proyecto para  
obras de aprovisionamiento de agua  
potable en localidades urbanas de  
la república mexicana.  
Facultad de Ingeniería, UNAM
- 7 - Tesis profesional "Teoría del golpe  
de ariete y sus aplicaciones".  
Francisco de Asis Tavera Escobar  
ESIA, IPN
- 8 - Aprovechamientos hidroeléctricos y  
de bombeo.  
Humberto Gardea Villegas.  
Facultad de Ingeniería, UNAM
- 9 - Revista "Ingeniería hidráulica de México"  
II Núm I, II Época Enero/Abril 1987
- 10 - Hidráulica general Volumen I  
Gilberto Sotelo Avila  
Ed. Limusa
- 11 - Tesis profesional "Anteproyecto  
de la obra de desvío de la presa  
el cuchillo, N.L."  
Manuel Gutiérrez Torres

