

0874

ANALISIS DE CAMARAS DE AIRE COMO DISPOSITIVO
DE PROTECCION EN TUBERIAS A PRESION

NABIL MOBAYED KHODR

TESIS

Presentada a la División de Estudios de
Posgrado de la

FACULTAD DE INGENIERIA

de la

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

como requisito para obtener
el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA

HIDRAULICA

CIUDAD UNIVERSITARIA, Septiembre de 1986



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



DEPFI

T. UNAM

1 9 8 6

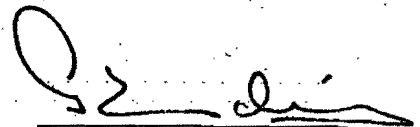
MOB

ANALISIS DE CAMARAS DE AIRE COMO DISPOSITIVOS
DE PROTECCION EN TUBERIAS A PRESION

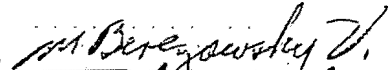
Créditos asignados a la tesis 8 (ocho)

APROBADO POR EL JURADO

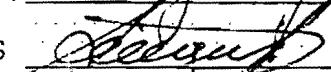
Presidente: DR. GABRIEL ECHAVEZ ALDAPE



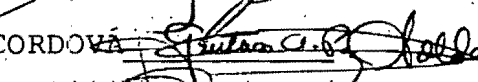
Vocal: M EN I MOISES BEREZOWSKY V.



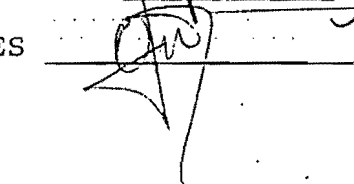
Secretario: DR. FELIPE I ARREGUIN CORTES



Suplente: M EN I GUSTAVO PAZ-SOLDAN CORDOVA



Suplente: M EN I OSCAR FUENTES MARILES



Cd. Universitaria, D. F., agosto de 1986.



DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

JEFATURA

UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENOMA

Sr. Prof. MOISES BEREZOWSKY VERDUZCO
Presente.

Me permito comunicarle que a propuesta del Subjefe del area de HIDRAULICA
-----, ha sido designado como Director de tesis, del alumno
NABIL MOBAYED KHODR, para obtener el grado de
MAESTRO EN ING. (HIDRAULICA) y el nombre de la tesis a de-
sarrollar propuesto es el siguiente: "ANALISIS DE CAMARAS DE AIRE COMO
DISPOSITIVO DE PROTECCION EN TUBERIAS A PRESION".

Mucho me da agradecerle la comunicaci3n por escrito de su aceptaci3n a esta
designaci3n.

Atentamente.
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 18 de octubre de 1983.
EL JEFE DE LA DIVISION

DR. ROLANDO SPRINGALL GALINDO

Forma E.5.2. Aceptación de la designación
de director de tesis

Jefe de la División de Estudios
de Posgrado de la Facultad de Ingeniería
de la UNAM
P r e s e n t e

En atención a su oficio, en el que me informa que he sido designado director de tesis del Ing. Nabil Mobayed Khodr inscrito en la maestría en Ingeniería (Hidráulica); manifiesto a usted la aceptación a esta designación.

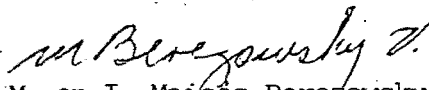
El nombre de la tesis a desarrollar es Análisis de cámaras de aire como dispositivo de protección en tuberías a presión

y el tiempo estimado para concluir es de 1 Año

Quedo enterado de que formaré parte del jurado del examen en la fecha y hora que me comunicarán posteriormente.

Atentamente,

México, D.F. a 1 de agosto de 1986



M. en I. Moisés Berezowsky Verduzco

c.c. Subjefe del área correspondiente

AGRADECIMIENTO

Este trabajo fue desarrollado gracias a la orientación y apoyo del M. en I. Moisés Berezowsky. Las sugerencias del Dr. Rafael Guarga y la ayuda de sus colaboradores, quienes facilitaron el acceso a las instalaciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM, fueron muy útiles durante la preparación del mismo.

El estímulo constante de Norma, mi esposa, y de mis familiares, así como la enorme motivación que significa mi hija, Fadia, fueron elementos indispensables en la realización de la tesis.

El autor agradece a todas las personas que de alguna manera brindaron su apoyo técnico, moral o económico y espera que este trabajo sea igualmente una ayuda para quienes lo consulten.

Querétaro, Qro., Septiembre de 1986.

ANALISIS DE CAMARAS DE AIRE COMO DISPOSITIVO
DE PROTECCION EN TUBERIAS A PRESION

R E S U M E N

Cuando se diseñan sistemas que contienen fluido a presión, es necesario prever dispositivos de protección contra los efectos que produce el golpe de ariete. La cámara de aire se caracteriza por ser un tanque de oscilación cerrado que cede o admite fluido de la tubería donde se presentan las fluctuaciones de carga, y amortigua las oscilaciones mediante la compresión y expansión del aire confinado en el mismo.

En este trabajo se presentan algunas generalidades del tema; se explica el comportamiento de la cámara de aire de acuerdo al rango de sus variables adimensionales, y se plantean los principios de cálculo, dimensionamiento y criterios de utilización asociados a sus características hidráulicas y geométricas. Se define un procedimiento convergente de solución de las ecuaciones asociadas a condiciones transitorias de flujo.

Se presenta también una comparación de diversas gráficas de dimensionamiento, para seleccionar una de ellas, y se resuelve un ejemplo de cálculo por medio de las ecuaciones y con ayuda de las gráficas; asimismo, se efectúa una verificación del modelo matemático mediante una prueba experimental.

ANALISIS DE CAMARAS DE AIRE COMO DISPOSITIVO
DE PROTECCION EN TUBERIAS A PRESION

I N D I C E

1.	INTRODUCCION	1
2.	GENERALIDADES	5
2.1	FENOMENOS TRANSITORIOS EN TUBERIAS A PRESION	
2.1.1	<i>Conceptos de Golpe de Ariete</i>	5
2.1.2	<i>Ecuaciones Básicas para Flujo No Permanente</i>	10
2.1.3	<i>Método de las Características</i>	13
2.2	COMPARACION DE SISTEMAS DE PROTECCION CONTRA GOLPE DE ARIETE	17
2.3	FUNCIONAMIENTO DE CAMARAS DE AIRE	23
2.3.1	<i>Planteamiento en Variables Adimensionales</i>	29
2.3.2	<i>Sobrepresiones y Subpresiones</i>	36
2.3.3	<i>Criterios de Utilización</i>	42
	FIGURAS DEL CAPITULO 2	50
3.	CALCULO Y DIMENSIONAMIENTO	59
3.1	PLANTEAMIENTO DE ECUACIONES PARA CAMARA DE AIRE	
3.1.1	<i>Ecuación General</i>	66
3.1.2	<i>Ecuaciones Asociadas a la Geometría</i>	70
3.2	SOLUCION DE ECUACIONES	76
3.3	METODOS PRELIMINARES DE DIMENSIONAMIENTO	87

3.3.1	<i>Criterio de Oscilación de Masa</i>	87
3.3.2	<i>Comparación de Diversas Gráficas de Dimensionamiento</i>	94
3.3.3	<i>Método Gráfico Seleccionado</i>	105
	FIGURAS DEL CAPITULO 3	116
4.	APLICACIONES	132
4.1	VERIFICACION DEL MODELO MATEMATICO	133
4.2	EJEMPLO DE DIMENSIONAMIENTO DE UNA CAMARA DE AIRE	137
4.3	REVISION DE DISEÑO	142
	TABLAS DE RESULTADOS	147
	FIGURAS DEL CAPITULO 4	161
	CONCLUSIONES	165
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	171
	APENDICES	
A.	<i>Variación Presión-Volumen en Cámaras de Aire. Fundamentos Termodinámicos</i>	173
B.	<i>Programa para Cálculo de Condiciones Transitorias en Tuberías a Presión</i>	181
C.	<i>Programa para Cálculo de Oscilaciones de Masa en una Tubería Protegida con Cámara de Aire</i>	193

1. INTRODUCCION

Una de las finalidades básicas que se persigue al realizar cualquier obra de ingeniería hidráulica consiste en encontrar un diseño que ofrezca, simultáneamente, la máxima seguridad durante su funcionamiento o uso y el menor costo para su realización.

La mayor parte de las obras hidráulicas presentan la complejidad de manejo del agua en condiciones cinemáticas, dado que el efecto del movimiento fluido ante configuraciones geométricas arbitrarias o en condiciones transitorias de comportamiento es demasiado difícil de abordar en forma teórica. Sin embargo, los diseños óptimos dependen muchas veces del análisis preciso que se haga de estos efectos, sobre todo en

los proyectos de gran magnitud.

Cuando se diseñan sistemas que contienen fluido a presión, se conjunta precisamente el estudio característico de la ocurrencia de ondas transitorias de presión, conocidas como golpe de ariete, con el análisis de los dispositivos de protección que den al sistema mayor seguridad y economía. A pesar de que en la actualidad se cuenta con modelos numéricos eficientes para analizar el golpe de ariete, existe incertidumbre en el comportamiento hidráulico de los dispositivos, en condiciones transitorias, y normalmente se incurre en sobredimensionamientos o en la selección errónea de los equipos de protección, lo cual se traduce en un encarecimiento del proyecto.

El objetivo del presente trabajo es el análisis de cámaras de aire como dispositivo de protección en tuberías a presión. Este dispositivo se caracteriza por ser una cámara de oscilación cerrada que se conecta a la tubería y contiene un cierto volumen de líquido abajo de un colchón de aire a presión. Cuando se presentan fluctuaciones de carga, la cámara cede o admite agua en la línea y se controlan las presiones al amortiguarse contra el volumen confinado de aire.

para iniciar el estudio se hace un planteamiento de generalidades, en el que se revisan algunos aspectos sobre golpe de

ariete en tuberías. Posteriormente se definen las ecuaciones básicas para flujo no permanente y se presenta el método de las características, que es un procedimiento numérico empleado en la solución de las ecuaciones (capítulo 2.1). Dentro de los aspectos generales se hace una comparación de diversos sistemas de protección contra golpe de ariete, para ubicar dentro de este contexto a la cámara de aire (capítulo 2.2), y también se procede a describir en forma cualitativa el funcionamiento del dispositivo, es decir, se explica su comportamiento de acuerdo al rango de variables adimensionales y se definen los criterios de utilización que imponen sus características hidráulicas (capítulo 2.3).

Como segunda parte del estudio se plantean los principios de cálculo y dimensionamiento de las cámaras de aire. Primeramente se definen las ecuaciones asociadas tanto al comportamiento hidráulico como a la geometría de la cámara (capítulo 3.1) y se presenta un procedimiento de solución de dichas ecuaciones, cuando se analiza la cámara como una frontera en el esquema de planteamiento del método de las características (capítulo 3.2).

En forma complementaria, se describen dos métodos preliminares de análisis y dimensionamiento, que son una técnica auxiliar al procedimiento de solución numérica descrito; estos

métodos son el criterio de oscilación de masa y las gráficas de dimensionamiento (capítulo 3.3).

El último capítulo tiene como finalidad presentar un ejemplo de dimensionamiento de una cámara de aire, así como una verificación del modelo matemático mediante pruebas obtenidas de una instalación experimental.

Finalmente, debido al poco conocimiento y aplicación que se tiene en el país de las cámaras de aire, baste añadir que otra meta que se ha trazado con la realización del trabajo es precisamente dar a conocer las características hidráulicas y geométricas de la cámara y tratar de familiarizar al diseñador hidráulico con una opción interesante de protección de tuberías a presión, que reúne a su vez características de seguridad y economía.

2. GENERALIDADES

2.1 FENOMENOS TRANSITORIOS EN TUBERIAS A PRESION

En este capítulo se tratan algunos aspectos generales relacionados con los fenómenos transitorios en tuberías a presión. Se hace una descripción del fenómeno de golpe de ariete; se definen las ecuaciones básicas del flujo no permanente en conductos cerrados y se describe el método de las características para resolver las ecuaciones.

2.1.1 *Conceptos de Golpe de Ariete*

Cualquier sistema que contenga un fluido estático o en movi-

miento, dentro de tuberías o túneles a presión, puede experimentar oscilaciones de carga al variar las condiciones de flujo. Un cambio de presión o velocidad en el fluido causa disturbios que se propagan a través del sistema desde el punto donde el cambio fué iniciado. El estudio de estos disturbios y los factores que los producen se conocen como fenómenos transitorios o golpe de ariete en tuberías a presión.

Algunas de las causas que originan oscilaciones de presión en tuberías o túneles son : cambios bruscos en maniobras de válvulas, arranque y paro de bombas o turbinas, cambios de carga en generadores hidroeléctricos, efectos de bombas recíprocas, llenado y vaciado de líneas o cámaras, reacciones químicas o cambios térmicos rápidos en un sistema (p.ej. generación de vapor), vibración mecánica de componentes de un sistema, etc.

La velocidad con la cual viajan las ondas de presión es una función de las propiedades del fluido y de la tubería o túnel que lo contiene. Para líquidos dentro de tuberías circulares ligeramente elásticas, la velocidad es cercana a la de las ondas de sonido a través de un medio líquido, pero se reduce debido a la presencia de aire o gas y a la elasticidad de las paredes del tubo.

La derivación general de las ecuaciones para flujo no perma-

nente en tuberías elásticas se basa en los principios de conservación de masa y cantidad de movimiento. Este flujo transitorio ocurre normalmente por un cambio entre dos condiciones estacionarias del flujo y, de acuerdo a la rapidez del cambio, se tienen dos casos extremos de análisis :

a) Cambio rápido en las condiciones de flujo.

Si un líquido se desplaza con velocidad V por una tubería, desde un depósito con carga de presión H por ejemplo, y se frena bruscamente al reducir su velocidad en ΔV , mediante el cierre de una válvula en su extremo, el incremento de presión debido al cambio súbito en la energía de deformación es $\rho a \Delta V$, donde ρ es la densidad del líquido y a es la velocidad de propagación de la onda de presión, llamada también celeridad. En términos de carga este incremento se expresa como

$$\Delta H = \frac{a}{g} \Delta V \quad (2.1.1)$$

y se conoce como ecuación de Joukowsky. Para una tubería de longitud L , la onda de presión ΔH y la reducción de velocidad ΔV se propagan a lo largo de la línea en un tiempo L/a ; si hay un cierre total de válvula, se tiene velocidad nula ($V - \Delta V = 0$) y carga $H + \Delta H$ al alcanzarse el depósito con carga H en el extremo opuesto. Este desnivel de carga

(ΔH) produce un retorno de flujo hacia el depósito con velocidad $-V$, y refleja una onda de presión $-\Delta H$ que retorna la carga inicial hasta la válvula, en el instante $2L/a$; este ciclo se conoce como "periodo de la tubería" (fig. 2.1a).

La condición de carga H y velocidad $-V$, después de un periodo de la tubería, producen una depresión $H-\Delta H$ y una velocidad nula ($-V-\Delta V=0$) que, al reflejarse en el depósito aguas arriba, propagan la condición inicial de carga H y velocidad V para el tiempo $4L/a$ (fig. 2.1b). El ciclo de expansión y contracción de la tubería ocurre cuando se presentan las cargas $H+\Delta H$ y $H-\Delta H$, al frenarse la columna de líquido.

Teóricamente, el ciclo de variación de presiones por golpe de ariete se repite indefinidamente, pero la fricción existente entre el fluido y las paredes amortigua las oscilaciones, hasta anularlas completamente.

b) Cambio lento en las condiciones de flujo.

Si la ocurrencia de un cambio de presión o velocidad toman un tiempo mucho mayor al periodo de la tubería ($2L/a$), la compresibilidad del fluido puede ignorarse y el incre-

mento de presión puede ser calculado aplicando la segunda ley de movimiento de Newton, la cual determina la expresión

$$\Delta H = \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \quad (2.1.2)$$

donde H es el incremento requerido para dar a una columna de fluido, de longitud L, una aceleración dV/dt .

La técnica de cálculo de la ecuación 2.1.2 se conoce como análisis de columna rígida o de oscilación de masa y puede observarse que el incremento de carga es mínimo en comparación con el valor determinado en un cierre instantáneo, sobre todo si la desaceleración dV/dt es muy lenta (tiende a cero); además, el grado de aceleración no es constante normalmente y se requiere integrar la expresión para determinar las variaciones de carga y velocidad.

En algunos casos prácticos, el tiempo en el cual cierra una válvula o falla una bomba es mayor que el periodo de la tubería, pero no suficiente como para justificar un análisis de columna rígida. En estos casos la variación de carga es siempre menor que $\pm aV/g$ y, aunque este rango puede ser usado como una primera aproximación, es necesario emplear métodos de análisis más exactos, ya sean gráficos o numéricos.

2.1.2 Ecuaciones Básicas para Flujo No Permanente

Las ecuaciones diferenciales para flujo no permanente permiten conocer el comportamiento transitorio en tuberías a presión. Estas ecuaciones se obtienen al aplicar a un segmento diferencial del escurrimiento, dos ecuaciones básicas de la mecánica : la segunda ley de Newton y la ecuación de continuidad. Las variables dependientes que se consideran son el nivel H de la línea de cargas piezométricas respecto a un nivel fijo y la velocidad promedio V en una sección transversal; por su parte, las variables independientes están constituidas por la distancia x medida sobre el eje de la tubería, desde el extremo aguas arriba de la misma, y el tiempo t ; de esta manera se tiene $H = H(x,t)$ y $V = V(x,t)$.

Las hipótesis más importantes contempladas en el planteamiento de las ecuaciones diferenciales para golpe de ariete son :

- 1) El flujo se considera unidimensional, es decir, se desprecian cambios de velocidad, presión, etc. transversales a la dirección principal del escurrimiento.
- 2) El conducto y fluido circulante son linealmente elásticos, o sea, el esfuerzo que actúa en ellos es proporcional a la deformación.

3) Las fórmulas de fricción empíricas para flujo permanente se consideran válidas en las condiciones de flujo transitorio.

Para aplicar la segunda ley de Newton, en la dirección axial de una tubería de diámetro D , se toma como volumen de control un elemento de fluido de densidad ρ entre dos secciones transversales separadas entre sí una distancia dx (fig.2.2a). Haciendo la suma de fuerzas por unidad de masa puede obtenerse la ecuación

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{4\tau_0}{\rho D} + \frac{dV}{dt} = 0 \quad (2.1.3)$$

donde τ_0 es el esfuerzo cortante entre paredes y fluido; para flujo permanente se tiene $\tau_0 = \rho f V^2 / 8$, donde f es el coeficiente de fricción de Darcy. Como la fricción se opone al movimiento, V^2 se debe escribir como $V|V|$ a fin de tener el signo apropiado. Así, al desarrollar el término de aceleración se obtiene

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (2.1.4)$$

que es la ecuación dinámica o de cantidad de movimiento para flujo no permanente en una tubería.

Por otro lado, la ecuación de continuidad aplicada al volumen

de control de sección transversal A (fig.2.2b), define que

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

El primer término se refiere a la elasticidad de las paredes del tubo, de espesor e, y a su rapidez de deformación con la presión p, en tanto que el segundo término tiene en cuenta la compresibilidad del líquido. Al introducir los conceptos del módulo de elasticidad de Young para el material del tubo, E, y el módulo de elasticidad del fluido, K, es decir,

$E = (AD/e)dp/dA$ y $K = dp/(d\rho/\rho)$ pueden sustituirse dA y dρ en la ecuación anterior, obteniéndose

$$\frac{dp}{dt} \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{eE} \right) + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.1.5)$$

que es la ecuación de conservación de masa o continuidad para flujo transitorio en una tubería.

Finalmente, para escribir la ecuación de continuidad en función del nivel piezométrico H; debe tomarse en cuenta la presión $p = \rho g(H-z)$, donde z es la elevación fija de una sección transversal cualquiera de la tubería, tal que $\partial z/\partial t = 0$ y que $\partial z/\partial x = \text{sen}\theta$, siendo θ el ángulo de inclinación de la misma.

Al desarrollar dp/dt resulta que

$$\frac{g}{a^2} \left(V \frac{\partial H}{\partial x} + V \text{sen}\theta + \frac{\partial H}{\partial t} \right) + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.1.6)$$

a^2 es una constante que agrupa los módulos de elasticidad E y K , o sea

$$a^2 = \frac{K}{\rho[1+(KD/eE)]} = \frac{K}{\rho[1+\psi(K/E)]} \quad (2.1.7)$$

y que es precisamente la expresión más conocida para calcular la velocidad de las ondas de presión o celeridad del fluido. ψ es un parámetro adimensional que generaliza la expresión para diversas geometrías y condiciones de empotramiento del conducto; en la ref. [1] pueden verse estos casos.

2.1.3 Método de las Características

La ecuación dinámica y de continuidad para flujo no permanente en tuberías, expresadas en función de las variables dependientes H y V , forman un sistema de ecuaciones diferenciales parciales, no lineales e hiperbólicas; la solución exacta del sistema de ecuaciones es posible sólo en casos simplificados (p.ej. sin fricción), pero normalmente se resuelve mediante cálculo numérico. Algunas de las técnicas numéricas más usuales para resolver las ecuaciones 2.1.4 y 2.1.6 son el método de diferencias finitas y el método de las características, pero en el presente trabajo sólo se hará referencia a este último.

En el método de las características, las ecuaciones diferenciales parciales son transformadas primeramente en ecuaciones diferenciales ordinarias; el sistema definido previamente puede escribirse en la forma siguiente :

$$\frac{dH}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} + V \operatorname{sen} \theta + \frac{af}{2gD} V|V| = 0, \quad \text{si} \quad \frac{dx}{dt} = V+a \quad (2.1.8)$$

$$\frac{dH}{dt} - \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} + V \operatorname{sen} \theta + \frac{af}{2gD} V|V| = 0, \quad \text{si} \quad \frac{dx}{dt} = V-a \quad (2.1.9)$$

Dado que en flujos a presión $a \gg V$ y además, si se supone que la pendiente del conducto es pequeña ($\operatorname{sen} \theta \approx 0$), las ecuaciones anteriores se pueden simplificar. Multiplicando ambas por g/a , así como por la sección transversal de la tubería, A , se obtiene :

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0, \quad \text{si} \quad \frac{dx}{dt} = a \quad (2.1.10)$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0, \quad \text{si} \quad \frac{dx}{dt} = -a \quad (2.1.11)$$

donde $Q = AV$, es el gasto a través de la sección del conducto, de área A .

Las ecuaciones son válidas si se satisfacen las condiciones indicadas de dx/dt . En un plano $x-t$ estas condiciones se representan como dos líneas rectas con pendiente $\pm 1/a$ y se conocen como líneas características; físicamente, representan la tra-

yectoria seguida por un disturbio de flujo transitorio.

En una línea de flujo, por ejemplo, un disturbio en un punto A alcanza a un punto P, a una distancia Δx , después de un tiempo Δt (fig 2.3a); se dice que el efecto del punto anterior a P viaja con la característica positiva (C+). Igualmente el disturbio en un punto B posterior a P sigue una trayectoria negativa hacia dicho punto o característica negativa (C-). En el plano x-t las condiciones de carga y gasto de los puntos A y B representan, mediante las líneas C+ y C-, la región de influencia o dominio para calcular las condiciones del punto intermedio P, transcurrido un tiempo Δt .

Si en una línea de flujo de una tubería se tienen N-1 puntos espaciados Δx (N, número de tramos), las condiciones conocidas en un instante t permiten calcular explícitamente cargas y gastos de cada uno de los puntos para el instante $t+\Delta t$, con los datos de sus puntos adyacentes respectivos (fig 2.3b). En las fronteras, al faltar una característica (C+ aguas arriba y C- aguas abajo) deben plantearse ecuaciones de H-t ó Q-t de acuerdo con el tipo de frontera (leyes de cierre en válvulas, variación de niveles en cámaras, etc).

Para definir el esquema explícito de diferencias finitas, se consideran las condiciones en $t=t_0$ conocidas. A lo largo de

la característica AP (fig 2.3a) se tiene que $dQ=Q_P-Q_A$ y $dH=H_P-H_A$; en forma similar, para BP se tiene que $dQ=Q_P-Q_B$ y $dH=H_P-H_B$. Sustituyendo estas expresiones en 2.1.10 y 11 y multiplicando por Δt , resultan las ecuaciones siguientes, una vez agrupados en constantes los valores conocidos:

$$Q_P = C_p - C_a \cdot H_P \quad (2.1.12)$$

$$Q_P = C_n + C_a \cdot H_P \quad (2.1.13)$$

donde

$$\begin{aligned} C_p &= Q_A + C_a \cdot H_A - F|Q_A|Q_A, \text{ constante de } C+ \\ C_n &= Q_B - C_a \cdot H_B - F|Q_B|Q_B, \text{ constante de } C- \end{aligned} \quad (2.1.14)$$

y

$$C_a = \frac{gA}{a}, \quad F = \frac{f\Delta t}{2DA}$$

De aquí en adelante el gasto Q_P y la carga H_P corresponderán a los valores desconocidos en el instante $t_0 + \Delta t$ de un punto P de la línea de flujo, mientras que las cargas y gastos con subíndices A y B corresponderán a valores conocidos de los puntos adyacentes a P en el instante t_0 .

Como $dx/dt = \pm a$, es necesario seleccionar los N tramos Δx de un tubo (de longitud L) y el valor Δt , de tal manera que se cumpla con el número de Courant

$$\frac{a\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad \text{donde} \quad \Delta x = \frac{L}{N} \quad (2.1.15)$$

Con ello se garantiza que no haya extrapolación de las líneas características en la cuadrícula $\Delta x - \Delta t$ del plano de análisis (fig 2.3b). Como existe siempre incertidumbre en el valor de la celeridad, se recomienda ajustar a para que se cumpla siempre la igualdad de 2.1.14 y no se tengan que interpolar resultados; este procedimiento se detalla en la ref.[1].

2.2 COMPARACION DE SISTEMAS DE PROTECCION CONTRA GOLPE DE ARIETE

Cualquier método o dispositivo capaz de limitar las oscilaciones de presión en una tubería o controlar un cambio repentino de la velocidad de flujo puede considerarse un sistema de protección contra los efectos del golpe de ariete. Existen esencialmente dos tipos de protección contra estas condiciones transitorias :

- 1) Sistemas que previenen la ocurrencia de fluctuaciones rápidas de flujo; por ejemplo, cámaras de oscilación, cámaras de aire, volantes de inercia en bombas, válvulas controladas, etc.
- 2) Sistemas que restringen las consecuencias de una fluctuación rápida de flujo; por ejemplo, válvulas de alivio (pa-

ra sobrepresiones), derivaciones laterales (by-pass), válvulas de retención (check), etc.

A continuación se describen brevemente algunos de los sistemas de protección contra golpe de ariete en tuberías (fig 2.4)

a) Válvula con manibras controladas. Una apertura o cierre lentos de una válvula limitan la amplitud de oscilación de las presiones, sobre todo si la duración de la maniobra es mayor que el periodo de reflexión de la tubería ($2L/a$). Para asegurar el cambio de presión dentro de límites aceptables, el tiempo de maniobra T_c suele ser mucho mayor que $2L/a$. En un cierre lento, por ejemplo, debe relacionarse T_c con la gráfica gasto-porcentaje de cierre propia de cada válvula para definir su funcionamiento; en muchas ocasiones la mejor maniobra tiene dos etapas, de manera que la más lenta es empleada para el 10 ó 20% de cierre final de la válvula.

b) Volante de inercia en bombas. El objeto de incrementar la inercia de las partes rotatorias de un sistema bomba-motor es reducir el grado de desaceleración del fluido al presentarse una falla; si la reducción de velocidad es suficientemente lenta, puede prevenirse que el retorno de la columna de fluido hacia la descarga de la bomba no provoque una

caída muy baja de presión. El incremento de inercia de la bomba puede ser adecuado si [2]

$$\frac{IN^2}{\rho ALPo^2} > 0.01 \quad (\text{rev/min}) \quad (2.2.1)$$

donde I es el momento de inercia de las partes rotatorias en kg-m², N la velocidad de la bomba en rev/min, ρ la densidad del líquido en kg/m³, A la sección de la tubería en m², L su longitud en m y Po la carga inicial de la bomba en m.

c) Cámara (o pozo) de oscilación. Esta estructura es capaz de retardar las fluctuaciones de flujo en una tubería, causadas por arranques y paros de bombas o turbinas, al admitir o ceder agua al sistema, es decir, la energía cinética del fluido se transforma en energía potencial al subir o bajar lentamente el nivel en la cámara. El periodo completo de oscilación de un sistema sin fricción, provisto de una cámara o pozo, es

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g} \frac{As}{At}} \quad (2.2.2)$$

donde L es la longitud del túnel o tubería, As el área transversal de la cámara y At el área del conducto; como T es mucho mayor que el periodo completo de las ondas elásticas ($4L/a$), es normal considerar el fluido como una colum-

na rígida que oscila entre la cámara y un almacenamiento determinado.

d) Cámara de aire. La operación de una cámara de aire es muy similar a un tanque de oscilación; en la primera, sin embargo, la altura del nivel de agua no es igual a la carga de depresión, puesto que se trata de un depósito cerrado y

parcialmente lleno con aire o gas comprimido. Cuando la cámara admite o cede líquido en la línea, el volumen de

gas cambia con la presión y se crean fluctuaciones de carga tanto por oscilación de masa como por golpe de ariete.

Debido a que el estudio de este dispositivo de protección

es el objetivo de la tesis, en el capítulo 2.3 se hace una descripción más detallada de su funcionamiento.

e) Válvula de admisión de aire. Cuando una onda de presión fluctuante se hace negativa, o sea, se tiene una carga piezométrica inferior al nivel de la tubería, existe el riesgo de que se alcance la presión de vaporización del fluido y se pueden formar cavidades de vapor. Para evitar esto, es posible colocar válvulas que admitan aire en la línea cuando se presente la caída de presión debajo de la atmosférica y que permitan una expulsión amortiguada, para controlar el incremento brusco de la carga al colapsarse la cavidad. Debido a la incertidumbre que existe

en el fenómeno es recomendable emplear estas válvulas en condiciones de cargas y velocidades bajas.

- f) Válvula de alivio. Esta válvula se coloca para abrirse rápidamente en un tiempo mucho menor al periodo de la tubería, cuando la presión alcanza determinado valor, permitiendo que el líquido escape del sistema; con ello pueden controlarse las subpresiones pues la salida de fluido equivale a la admisión de agua en una cámara, aunque en este caso la presión máxima se mantiene similar a la de apertura de la válvula. El cierre de la válvula es normalmente lento y ocurre al reducirse de nuevo la presión transitoria.
- g) Derivación lateral (by-pass). El dispositivo consiste en una línea de conexión entre la descarga de una bomba y la succión, que permite el paso de agua de ésta cuando la presión de descarga en la bomba es menor que la carga de succión. La conexión tiene una válvula de retención (check) que se cierra cuando la bomba opera o cuando aumenta de nuevo la carga.
- h) Tanque unidireccional (de alimentación). A diferencia del tanque de oscilación, este dispositivo solamente cede agua al sistema (en lugar de aire como la válvula descrita en

e), cuando ocurre una caída de presión menor al nivel de agua en el tanque. Como está provisto de una conexión con válvula de retención, puede colocarse en los puntos elevados de la tubería sin necesidad de que su nivel de agua coincida con la línea piezométrica. El volumen aproximado del tanque (V_t) que puede entrar en una línea, de longitud L y sección A , es [2]

$$V_t = \frac{AL}{H} \frac{V_0^2}{2g} \quad (2.2.3)$$

siendo H y V_0 la carga (en el lugar del dispositivo) y velocidad iniciales; este volumen debe reponerse posteriormente antes de operar el sistema.

- i) Válvula de retención (check). Esta válvula es usada en la descarga de una bomba para evitar retorno de flujo y rotación de la misma, después de una falla. También puede colocarse en un punto intermedio de la línea (fig.2.4) para reducir el efecto de la longitud en las variaciones de presión ante un retorno de la columna líquida, es decir, la tubería se aísla en dos tramos al cerrarse la válvula y se acorta la magnitud de las oscilaciones.

En resumen, la mejor manera de evitar cambios rápidos de flujo en tuberías, cuando sea posible, es utilizar tiempos ade-

cuados en maniobra de válvulas o incrementar la inercia de las bombas mediante volantes de ajuste. Cuando los cambios rápidos no pueden evitarse, el flujo puede derivarse dentro de cámaras cerradas o llevarse hacia depósitos abiertos. Pero, si ninguna de estas posibilidades es factible, pueden limitarse las presiones en ciertas circunstancias mediante el uso de dispositivos de admisión o desfogue.

En general, cualquier sistema de protección puede ser usado si resulta práctico, económico y proporcione una seguridad adecuada para la tubería. En la tabla 2.1 se presenta la comparación de diferentes sistemas de protección contra golpe de ariete, desde el punto de vista de funcionamiento, rango usual de variables, así como algunas ventajas y desventajas en cada uno de los casos.

2.3 FUNCIONAMIENTO DE CAMARAS DE AIRE

El objetivo de este capítulo es explicar el funcionamiento físico de la cámara de aire cuando se produce un golpe de ariete; relacionar preliminarmente las teorías hidráulicas que permitan hacer un análisis cuantitativo del problema; y defi

TABLA 2.1 Sistemas de protección contra Golpe de Ariete [2],[4],[12]

Dispositivo	Funcionamiento	Rango de Variables	Ventajas	Desventajas
Válvula con control mecánico	Maniobras controladas para tener fluctuaciones lentas de flujo	$T_C \gg \frac{4L}{a}$	Control preventivo contra ondas de presión; a mayor T_C menor rango de presión	Problemas en la operación mecánica
Incremento de inercia de bombas	En una falla, se amortigua el retorno de la columna de descarga	$\frac{IN^2}{ALP_0^2} > 0.01$ $L \leq 2.0 \text{ Km}$	Sistema preventivo; fácil mantenimiento; cierre más lento de válvula(s) check	Dificultades mecánicas; sistema de arranque del electromotor más complicado
Tanque (pozo) de oscilación	Oscilación de masa al ceder o admitir agua en un sistema de conducción	$h_0 < 50 \text{ m}$ altura pozo	Mantenimiento mínimo; elimina fluctuaciones rápidas de flujo y no requiere ningún elemento mecánico	Tubería cerca de la línea de presión; cierre brusco de válvula check (bomberos) difícil de readaptar dims.
Cámara de aire	Control de presiones, amortiguadas por un volumen confinado de aire (ó gas)	$\frac{aV_0}{gP_s} > 1$ (ver 2.3)	Localización inmediata a planta de bombeo; mantenimiento mínimo; limita efectos del golpe de ariete	Control de volumen de aire (compresor); condición del perfil de terreno cóncavo p/evitar subpresiones < 0
Válvula de admisión y expulsión de aire	Entrada de aire para limitar las subpresiones a la presión atmosférica	$\frac{aV_0}{gH} > 1$	Solución económica; adecuada en llenado de tuberías	Control regular de operación; incertidumbre al admitir aire en la tubería

Continúa ...

... TABLA 2.1 Sistemas de protección contra Golpe de Ariete

Dispositivo	Funcionamiento	Rango de Variables	Ventajas	Desventajas
Válvula de alivio	Salida automática de agua en sobrepresiones (valor prefijado)	$\frac{aV_0}{gH} \ll 1$ $2L/a > 5s$	Solución económica	Funcionamiento mecánico (calibración, mantenimiento); riesgos en subpresión
Bomba con by-pass	Admisión de agua de la succión en fallas repentinas	$\frac{aV_0}{gP_0} \gg 1$	Solución económica; se controla en la misma planta	Dificultades mecánicas; no se protege la succión
Tanques unidireccionales	Entrada de agua para evitar presiones negativas en puntos elevados de la línea	$\frac{aV_0}{gH} > 1$ $H < 50 \text{ m}$	Económicos; adecuados para subpresiones en tuberías largas; no introducen aire	Mantenimiento; llenado después del transitorio; no protegen sobrepresiones
Válvula check en la línea	Control de retorno de flujo en línea y rotación en bombas	$\frac{aV_0}{gH} > 1$	Solución económica	Funcionamiento mecánico; no puede usarse aislada; riesgo de separación de columna

Variables Principales :

- L longitud de tubería, en m
- a celeridad, en m/s
- V_0 velocidad en condiciones iniciales, en m/s
- P_0 presión absoluta en condiciones iniciales, en m (capítulo 2.3)
- P_s presión absoluta en condiciones estáticas, en m (capítulo 2.3)
- H carga inicial de presión relativa en el lugar del dispositivo, en m

Nota General : Puede utilizarse la expresión aV_0/gP_s en lugar de aV_0/gP_0

nir algunos aspectos prácticos relacionados con la instalación de cámaras.

Una dificultad frecuente en el análisis y dimensionamiento de una cámara de aire es el efecto de protección sobre una red hidráulica. La mayoría de los estudios consideran el caso simple de un conducto único que conecta una bomba a un almacenamiento y proporcionan valores extremos de presión en ciertos puntos, después de una falla repentina de energía eléctrica. Sin embargo, pueden llevarse a cabo dimensionamientos preliminares en sistemas más complejos si se puede hacer una simplificación razonable de la red.

Se insiste que la cámara de aire es solamente uno de los métodos que previenen la ocurrencia de fluctuaciones rápidas de flujo en tuberías a presión y principalmente en el caso de falla o paro repentino en una estación de bombeo (capítulo 2.2).

La cámara de aire, conocida en el mercado como tanque hidroneumático, está constituida por una camisa, generalmente de acero, que contiene un cierto volumen de fluido abajo de un colchón de aire a presión. El dispositivo está conectado a la conducción, lo que hace que la presión de aire en el mismo sea igual a la presión absoluta del fluido circulante.

Como se verá más tarde, las cámaras de aire llevan frecuente-

mente en su base un dispositivo que restringe la entrada de fluido hacia la misma; se desea, en efecto, tener una pérdida de carga lo más baja posible para el vaciado y, por el contrario, se desea que esta pérdida de carga sea considerable durante el llenado. Existen varias posibilidades para crear esta pérdida de carga asimétrica [3] : se puede disponer de una válvula de retención con orificio que se cierre en el llenado; o bien una contracción que resulte desfavorable durante la admisión de fluido; o bien una válvula de retención con un pequeño tubo de derivación que asegure sólo la comunicación con el tanque hidroneumático en la fase de llenado (fig 2.5).

La válvula horadada es un dispositivo muy utilizado en las cámaras pues es fácil adaptar el diámetro del orificio a la pérdida de carga que se va a asegurar al llenado; no obstante,

se presentan los inconvenientes de piezas móviles (obstrucción, vibraciones, etc.). La desventaja de la contracción proviene de su dificultad de fabricación y dimensionamiento. El

tercer dispositivo para conexión; válvula con by-pass, presenta la ventaja de poder modificar la pérdida de carga de llenado al instalar una válvula de regulación sobre la derivación; este método es empleado en instalaciones para las cuales la pérdida se fija en pruebas efectivas de operación.

Desde el punto de vista geométrico, se pueden distinguir tres

tipos de cámaras de aire (fig 2.6) :

- a) Cámara cilíndrica vertical; es la forma más común de estos dispositivos y se caracteriza por requerir poco volumen de aire para el control de presiones transitorias. La cámara presenta generalmente una tapa superior en forma convexa y tapa inferior similar o en forma cónica, sin embargo, en el diseño hidráulico se limita el funcionamiento del dispositivo a la parte central cuya sección circular es constante.
- b) Cámara cilíndrica horizontal; esta geometría tiene ventajas estructurales cuando se necesita un volumen de aire considerable para proteger la línea. Algunos fabricantes adoptan este diseño para volúmenes totales mayores de 12 m^3 aunque no existe un criterio de selección.
- c) Cámara esférica; es menos usual que las anteriores. En general se diseña para resistir presiones altas y contener volúmenes de aire reducidos.

Desde el punto de vista funcional, se pueden distinguir tres clases de cámara de aire (fig 2.7) :

- a) Cámaras con depósito flexible interior; con este elemento adicional el aire y el agua no están en contacto, lo cual evita la disolución del primero en el fluido y permite tam

bién emplear, en lugar de aire, algún gas inerte (nitrógeno, por ejemplo). No existe entonces el problema de restablecer periódicamente el volumen de aire necesario en la cámara.

- b) Cámaras sin depósito flexible; sus inconvenientes provienen del contacto aire-agua, por lo que es necesario tener un compresor que restablezca en forma periódica y automática el volumen de aire.
- c) Cámara de aire - cámara de oscilación (mixta); esta cámara posee la particularidad de funcionar como una cámara de oscilación cuando la presión desciende por debajo de cierto valor, y como tanque hidroneumático en condiciones de operación normal y sobrepresiones. Sus dimensiones son generalmente más próximas a las de una cámara de oscilación abierta. En la referencia [3] se describe detalladamente su funcionamiento y utilización (fig 2.7).

2.3.1 Planteamiento en Variables Adimensionales

Con el fin de establecer parámetros adimensionales característicos de las cámaras de aire, se definen en primer lugar las variables que intervienen en el fenómeno. En la fig 2.8 se

muestra una línea de bombeo protegida por una cámara de aire, la cual se ubica junto a la bomba y después de una válvula de retención; en el extremo opuesto se localiza un almacenamiento de nivel fijo.

En condiciones estáticas, H_s representa la elevación del almacenamiento respecto a un nivel horizontal de referencia y es, por condiciones de equilibrio, la carga de presión estática en la cámara. P_s es la carga estática de presión absoluta a la cual está sometido el aire, es decir,

$$P_s = H_s - z_o + h_b \quad (2.3.1)$$

siendo z_o la elevación inicial del fluido en la cámara, y

h_b la presión barométrica = 10.33 m de columna equivalente de agua.

Para las condiciones iniciales de flujo, se tienen el gasto Q_o , velocidad media V_o y un volumen determinado de aire o gas C_o . La carga de la bomba tiene una elevación piezométrica H_o , mientras que la carga de presión absoluta a la cual está sometido el aire es $P_o = H_o - z_o + h_b$.

Los números adimensionales que caractericen al flujo no permanente en el sistema cámara de aire-conducto-depósito deben representar, por un lado, la importancia de la oscilación de onda y, por otro, la importancia de la inercia relativa entre

conducto y dispositivo. Si se presenta una subpresión instantánea después de una falla de bomba y se carece de protección, la ecuación 2.1.1 que relaciona incrementos de carga y velocidad, indica que $\Delta H = -aV_0/g$. Al dividir esta expresión entre la carga estática P_s del sistema, se tiene el siguiente número adimensional

$$A = \frac{aV_0}{gP_s} \quad (2.3.2)$$

que resulta el parámetro asociado al efecto de oscilación de onda, en el cual a es la velocidad de propagación de onda o celeridad.

Para encontrar una relación adimensional que represente el efecto de la cámara sobre el conducto, se harán las siguientes consideraciones :

- a) Si se produce una falla con cierre instantáneo de la válvula de retención, el gasto Q_0 se deriva de la cámara y, en un tiempo igual al de propagación de la onda en el conducto $\Delta t = L/a$ (ver capítulo 2.1), el volumen aportado resulta

$$\Delta C = Q_0 \frac{L}{a}$$

- b) La variación de volumen de aire y presión en el tanque hidroneumático corresponde a una ley de los gases dada por $P_0 C_0^n = PC^n = \text{constante}$, tal como se describe más adelante

en el capítulo 3 y apéndice A; si se escribe la ecuación como $\log P + n \log C = \log(\text{constante})$, al derivarla y expresar $dP = \Delta P$, $dC = \Delta C$ se tiene

$$\frac{\Delta P}{P} = -n \frac{\Delta C}{C}$$

Sustituyendo ΔC en la segunda expresión se encuentra un número sin dimensiones, utilizado por algunos autores (capítulo 3.3.2), en función de condiciones iniciales conocidas

$$\rho_0 = \frac{Q_0 L}{a C_0} \quad (2.3.3)$$

Sin embargo, siguiendo el criterio de los franceses Puech y Meunier [3], puede multiplicarse ρ_0 por A para obtener un parámetro independiente de la celeridad e involucrar la relación LV_0/g , asociada a la cantidad de movimiento del fluido (ecuación 2.1.2). El número adimensional resultante es

$$B = \frac{LV_0 Q_0}{g P_0 C_0} \quad (2.3.4)$$

que define al parámetro que representa la influencia de la cámara sobre la instalación. B es inversamente proporcional a $P_0 C_0$, es decir que las dimensiones del dispositivo son pequeñas cuando B es grande. Se observa también que el coeficiente B se divide entre P_0 en lugar de P_s , que es la carga de presión absoluta asociada al volumen de aire inicial en la

cámara.

Por otro lado, las pérdidas de carga en el sistema cámara-conducto-depósito se representan también mediante coeficientes adimensionales al dividir la pérdida, dada en función del gasto inicial Q_0 ó de un desnivel piezométrico, entre la carga estática P_s , que corresponde a un nivel horizontal de referencia en condiciones de equilibrio. Estos coeficientes son :

$$K = \frac{P_0 - P_s}{P_s}, \text{ representa las pérdidas de carga } \underline{l_i} \text{ (2.3.5a)}$$

neales en el conducto

$$K_v = k_v \frac{Q_0^2}{P_s}, \text{ representa las pérdidas de carga a (2.3.5b)}$$

la salida de la cámara (vaciado)

$$K_r = k_r \frac{Q_0^2}{P_s}, \text{ representa las pérdidas de carga a (2.3.5c)}$$

la entrada de la cámara (llenado)

k_v y k_r son coeficientes de pérdidas asociados al tipo de conexión diferencial entre conducto y cámara. Puede escribirse también que $K = kQ_0^2/P_s$.

Una última expresión se obtiene al definir el tiempo en forma adimensional. Si se comparan el coeficiente B y la ecuación de oscilación de masa 2.1.2, se tiene la equivalencia $1/t = Q_0/C_0$ para una aceleración media V/t ; el tiempo representado en forma adimensional es, por consiguiente

$$T = \frac{tQ_0}{C_0} \quad (2.3.6)$$

El manejo de números adimensionales como A, B, K, K_T , K_V y T ayuda a determinar relaciones generales entre ellos que se asocian a valores representativos del análisis y dimensionamiento de cámaras, tales como volúmenes de aire y presiones absolutas en diversas condiciones críticas de flujo no permanente (ver Tabla 2.2). Las presiones máximas y mínimas referidas ocurren normalmente en el primer movimiento oscilatorio completo del sistema cámara-conducto-depósito, después de una falla súbita de la bomba.

CONDICION	Presión Absoluta	Volumen de aire
Inicial (dinámica)	P_0	C_0
Presión mínima (fin de vaciado)	$P_{\text{mín}}$	$C_{\text{máx}}$
Presión máxima (fin de llenado)	$P_{\text{máx}}$	$C_{\text{mín}}$
Final (estática)	P_s	C_s

TABLA 2.2 Clasificación de volúmenes de aire y presiones en la cámara.

En los criterios de dimensionamiento de cámaras de aire se manejan los valores críticos de presión y volumen en proporción a valores fijos conocidos, por ejemplo, $P_{\text{máx}}/P_s$, $P_{\text{mín}}/P_s$,

C/C_0 , etc. lo cual les da un carácter adimensional. La representación y crítica de diversos métodos gráficos de análisis preliminar se hace en el capítulo 2.3.2.

Como discusión final del presente capítulo se plantea el problema de dimensionar el volumen total de la cámara. Aunque $C_{\text{máx}}$ sea la capacidad máxima de aire, al final del vaciado, el volumen del tanque hidroneumático debe ser mayor para que no entre aire en la conducción y para tener en cuenta la variación de volumen debida a cambios de temperatura. En cámaras sin depósito flexible interior, $C_{\text{máx}}$ se incrementa del orden de 20%, por seguridad.

Quando se instala una cámara, el llenado o inflado posterior debe ser efectuado al tener el valor seleccionado del producto PC^n . En cámaras con depósito interior se calcula la presión correspondiente al volumen total con la relación planteada $P_0 C_0^n = PC^n$. Si se acepta, por ejemplo, un margen de seguridad de 20% en el volumen, se tiene

$$C_{\text{total}} = 1.2 C_{\text{máx}} \quad \text{y} \quad P_{\text{inflado}} = P_0 \left(\frac{C_0}{C_{\text{total}}} \right)^n \quad (2.3.7)$$

Este resultado es equivalente a suponer la presión de inflado como un 80% de la presión mínima; en efecto, al escribir

$$P_{\text{mín}} C_{\text{máx}}^n = P_{\text{inflado}} (1.2 C_{\text{máx}})^n \quad \text{y} \quad \text{considerar } n=1.2 \quad (\text{valor me-})$$

dio, ver Apéndice A), se tiene

$$P_{\text{inflado}} = 0.8 P_{\text{mín}} \quad \text{y} \quad C_{\text{total}} = C_o \left(\frac{P_o}{P_{\text{inflado}}} \right)^{1/n} \quad (2.3.8)$$

En esta expresión es interesante señalar que si existe el riesgo de presiones cercanas a la presión atmosférica P_a , la presión relativa de inflado $(P_{\text{inflado}} - P_a)$ podría ser negativa, lo cual resulta absurdo; físicamente se requiere una "aspiración" en lugar de un llenado, es decir, hay que hacer vacío en la cámara hasta que el volumen de aire encerrado en el depósito resulte igual a $C_{\text{total}} (P_{\text{inflado}}/P_a)^{1/n} < C_{\text{total}}$. Esta dificultad de instalación conduce a preferir el dispositivo mixto descrito previamente (fig 2.7), cuando puede ocurrir que $P_{\text{mín}} < P_a$.

2.3.2 Sobrepresiones y Subpresiones

En el capítulo 2.1 se definieron dos condiciones extremas de flujo no-permanente en tuberías que producen los fenómenos de oscilación de masa y oscilación de onda o golpe de ariete. Se comentan a continuación algunos puntos relacionados con estos fenómenos en el sistema aislado cámara de aire-conducto-depósito; y más adelante se plantea un análisis crítico acerca de

rangos y envolventes de las presiones extremas.

Cuando se presentan oscilaciones de masa en un conducto, se supone que todos los puntos de la columna líquida tienen la misma velocidad cada instante (flujo incompresible) y por lo tanto la presión varía linealmente en dicho instante, en función de la dirección y sentido de flujo (eje x). Por eso, las envolventes de presiones por oscilación de masa son rectas que unen $P_{\text{máx}}$ (sobrepresiones) ó $P_{\text{mín}}$ (subpresiones) en la cámara, con el nivel fijo del depósito.

Cuando se presentan oscilaciones de onda en un conducto, puede haber valores muy diferentes de gasto y presión a un lado y otro de la tubería; de hecho, el golpe de ariete provoca en cada paso de la onda una caída consecutiva de presión en la cámara, durante la fase de vaciado. Aceptando una ley de variación $PC^n = \text{constante}$ puede escribirse que $\Delta P/P = -n \Delta C/C$ y además, como $\Delta C = Q \cdot \Delta t$,

$$\Delta P = -n \frac{P}{C} Q \cdot \Delta t$$

Si se toma Δt igual al periodo de la tubería $2L/a$, se ve que el incremento puede ser pequeño para valores de celeridad muy altos y en consecuencia se reduce la variación de presión ΔP entre dos pasos de onda; en esta circunstancia los resultados obtenidos por oscilación de masa son más próximos a los del

criterio de golpe de ariete. En otras palabras, puede decirse que la oscilación de masa es el límite del fenómeno oscilatorio de onda cuando su velocidad de propagación o celeridad tiende a infinito.

En un punto intermedio de la conducción, presión y gasto obedecen a una variación doblemente periódica : un periodo "global" correspondiente a la fluctuación de masa, al cual se superpone un periodo más corto debido a las oscilaciones de onda; el número de éstas en una oscilación global es función de la celeridad y, cuando es reducido, la presión mínima puede ser más reducida (fig 2.9).

A nivel de la cámara el descenso de presión se hace más regular, el gasto cambia de valor bruscamente a cada paso de onda y lentamente entre dos fluctuaciones. El punto de presión mínima es prácticamente idéntico al de oscilación de masa, salvo en los casos en que la celeridad sea muy baja.

En resumen, el método más válido de análisis es el que considera el criterio de golpe de ariete en una conducción protegida con cámara de aire. El análisis mediante oscilación de masa es una aproximación a veces burda del fenómeno, pero con la ventaja de poder emplear ecuaciones diferenciales más simples (capítulo 3.3.1). Pueden utilizarse sus resultados a

condición de verificar que las condiciones en las cuales se presenta sean aceptables; esto es cuando $A/B \geq 10$, con $A > 1$ (capítulo 3.3.3).

Desde el punto de vista numérico, el ajuste entre los dos métodos de cálculo es mínimo en los extremos de la conducción, pero la oscilación de onda que ocurre en depresiones críticas es más acusada en puntos intermedios. La curva envolvente de presiones mínimas calculada al considerar este criterio forma una concavidad, desplazada hacia la extremidad del depósito, tanto más grande como la celeridad sea menor (fig 2.10).

Por otra parte, si se carece de protección en la línea y se desprecian pérdidas de carga por fricción, las presiones máxima y mínima están dadas por $\Delta H = \pm aV_0/g$, de acuerdo con la ecuación de Joukowsky (capítulo 2.1.1). Haciendo referencia a las variables adimensionales descritas, puede verse que

$$\frac{P_{\text{máx}} - P_s}{P_s} = \frac{\Delta H}{P_s} = \frac{aV_0}{gP_s} = A$$

es decir que $(P_{\text{máx}} - P_s)/P_s$ es el límite de A. Ahora, la presión inicial P_0 es una limitante de resistencia en la tubería y si $P_{\text{máx}}$ es inferior a P_0 no hay que preocuparse por esta sobrepresión; es pues necesario comparar $(P_{\text{máx}} - P_s)/P_s$ con $(P_0 - P_s)/P_s$, y esa última expresión no es otra cosa que K, variable a-

dimensional de las pérdidas de carga. Se deduce entonces lo siguiente :

- a) Si $A < K$, no hay riesgo de sobrepresión.
- b) Los resultados gráficos que se verán más adelante (capítulo 3.3.3) muestran que sólo son importantes los riesgos de sobrepresión en aquellos casos en que las pérdidas de carga lineales sean bajas ($K < 0.5$).

En cuanto a pérdidas de carga en la conexión de la cámara, se pueden señalar varios puntos relacionados con las presiones extremas :

- a) En la fase de vaciado, las pérdidas asociadas a K_v pueden impedir el buen funcionamiento del dispositivo en una falla si limitan su eficiencia para ceder flujo a la línea. Una pérdida considerable reduce el gasto de salida y, al no amortiguarse la fluctuación de flujo en la tubería debida al golpe de ariete, pueden registrarse subpresiones más desfavorables. Por ello se busca, en la medida de lo posible, reducir las pérdidas de carga a la salida de la cámara.
- b) En la fase de llenado, las pérdidas asociadas a K_r representan un problema más complejo. Cuando K_r es muy bajo o nulo, el llenado de la cámara produce un incremento de carga en proporción similar a la subpresión, debido al efecto

oscilatorio de la masa fluida; la presión máxima puede ser importante, sobre todo si el valor de K en la línea es reducido. Cuando $K_r = \infty$ (válvula check en la conexión) se producen sobrepresiones por golpe de ariete relativamente restringidas, debido a la limitación de fluctuaciones rápidas en la fase de vaciado; sin embargo, además de los inconvenientes del no llenado e inercia de válvulas (retardo de cierre), la magnitud de $P_{\text{máx}}$ sí puede ser considerable.

Finalmente puede mostrarse que una pérdida de carga intermedia en el llenado, entre una conexión libre y una válvula de retención, es favorable. En efecto, al restringir el gasto de entrada la fase de llenado se retarda, la aceleración de la columna líquida es más lenta y por consiguiente la presión máxima final se reduce. Al incrementar la pérdida, se hace sentir el efecto del golpe de ariete y puede presentarse una sobrepresión inicial antes de alcanzarse el final del llenado. Existe pues un valor K_r para el cual las sobrepresiones asociadas al efecto de golpe de ariete (inicial) y al volumen de aire mínimo (final) tienen ambos valores mínimos en relación a las condiciones extremas de $K_r = \infty$ y $K_r = 0$ respectivamente. Esto se ilustra claramente en la fig 2.11, en donde el valor óptimo de pérdida de carga a la entrada de la cámara resulta $K_r = 5.0$ cuando se desprecian las pérdidas en la tubería ($K=0$).

Las formas más adecuadas para crear pérdidas disimétricas en la conexión del tanque hidroneumático han sido descritas al principio del capítulo (fig 2.6); de ellas, la más indicada puede ser la válvula de retención con orificio o con derivación lateral porque puede crear las mayores diferencias de pérdida de carga entre admisión y salida de flujo en la cámara.

2.3.3 Criterios de Utilización

Después de haber estudiado en forma cualitativa el funcionamiento de las cámaras de aire, se plantearán en esta última parte del capítulo 2 algunos aspectos relacionados con su utilización. La comparación con otros dispositivos ha sido tratada en el capítulo 2.2 y los criterios de dimensionamiento y diseño se describen en el capítulo siguiente.

- 1) Necesidad de instalar una cámara de aire. Antes de dimensionar una cámara para protección de una estación de bombeo, es necesario saber si puede tratarse del dispositivo más adecuado. Independientemente de un análisis económico comparativo de diversos sistemas, vale la pena hacer algunos razonamientos.

El manejo de presiones absolutas implica, como primer paso,

dibujar una línea paralela al perfil de la tubería que se estudia, desnivelada -10.0 m. Puede interpretarse que este trazo representa el cero absoluto de presiones y se le llamará línea de cavitación, toda vez que una carga piezométrica inferior a ella pueda inducir riesgos de cavitación. En segundo lugar, si se despreja la inercia de las bombas y se supone que la interrupción del gasto es total e instantánea, la subpresión está dada por $\Delta H = -aV_0/g$ en ausencia de toda protección; esta depresión se propaga paralelamente a la línea piezométrica inicial y puede admitirse, como primera aproximación, un desnivel equidistante en ΔH de la línea estática (nivel del depósito extremo). Ahora, pueden presentarse dos casos :

- a) $aV_0/g > P_s$ (o sea $A > 1$). En la figura 2.12a se observa que hay riesgo de cavitación en la bomba; una protección interesante puede ser un depósito de admisión cerca del bombeo -puede ser la succión (ver bomba con by-pass, Tabla 2.1)- que induzca una depresión inicial no menor al nivel del mismo. Si se traza, como aproximación, una línea de depresión paralela a la piezométrica inicial desde el nivel de este depósito, el riesgo se "recorre" después de la intersección de dicho trazo con la línea de cavitación. Tratándose en realidad de una solución

para cargas bajas de bombeo, resulta imperativo utilizar otra protección, como la cámara de aire.

b) $aV_0/g < P_s$ (es decir $A < 1$). En la figura 2.12b se ve que no hay riesgo de cavitación en la bomba, pero sí puede existir en algún punto intermedio de la conducción o cerca del depósito extremo; en el primer caso hace falta instalar una protección, pero en la extremidad puede prescindirse de ella, al menos por dos razones : se han supuesto condiciones de riesgo máximo al despreciar la inercia de las bombas y pérdidas de carga; el depósito final protege la extremidad del conducto, al jugar el papel de una cámara de oscilación. De cualquier manera es recomendable un cálculo más preciso sin incluir dispositivos de protección, antes de una decisión final.

2) Cámara de regulación / Cámara de aire. La cámara de regulación es un tanque hidroneumático que se utiliza en redes pequeñas (distribución de agua potable en edificios, fábricas, etc) con la finalidad de mantener un rango adecuado de compresión en el sistema. Con el dispositivo se aprovecha la compresibilidad del aire para que el equipo de bombeo solamente opere cuando se requiera elevar la presión en la línea, una vez que ésta haya descendido a un valor mínimo durante la operación.

En muchas redes se prevén dos tipos de cámara próximas a la estación de bombeo : una cámara de regulación, y una cámara de aire, para amortiguar las variaciones bruscas de presión. La instalación de los equipos lleva el siguiente orden : bombas, cámara de regulación, una válvula de retención y la cámara de aire; en esta forma, después de una falla de energía la válvula se cierra, y se controla el golpe de ariete con el dispositivo adecuado (fig 2.13a). También, los medidores de presión que se instalen deben localizarse en cada cámara, puesto que las presiones del conducto y del tanque hidroneumático pueden ser distintas cuando se tiene una conexión diferencial.

Existe, sin embargo, la posibilidad de tener una sola cámara de aire para llevar a cabo la función de regulación y anti-ariete. En primer lugar, no puede tenerse una conexión diferencial porque el control manométrico del sistema implica que en la base del dispositivo se localicen pérdidas similares de entrada y salida, lo cual significa restringir la protección contra sobrepresiones.

En el caso de una sola cámara, hay que calcular primeramente los volúmenes de aire extremos C_1 y C_2 (mínimo y máximo) para regulación; este cálculo no se describe por estar fuera de los alcances del trabajo. En seguida se efectúa

el cálculo del volumen C_0 para protección contra golpe de ariete mediante algún método aproximado. Si $C_2 \geq C_0$, la subpresión está contemplada y es suficiente calcular $C_{\text{máx}}$ al final de la fase de vaciado, partiendo del volumen inicial C_2 (y no C_0); si $C_2 < C_0$ no hay protección suficiente y entonces hay que instalar dos cámaras o revisar los volúmenes de aire para regulación (fig 2.13b).

- 3) Localización de la cámara de aire. A lo largo del capítulo 2.3 se ha admitido implícitamente que la cámara de aire está situada justamente después de las bombas. En la práctica cierta distancia los separa, pero en general es corta y aunque el cierre de válvulas de retención no es instantáneo, la salida de agua de la cámara hacia la depresión que se genera en este tramo reduce el tiempo de cierre favorablemente. Es válido, entonces, considerar que el tanque hidroneumático se encuentra inmediatamente junto a la bomba.

Se plantea entonces el problema de saber si son preferibles otras localizaciones para la cámara de aire. Se comentan básicamente dos casos :

- a) No existe riesgo de cavitación cerca de la bomba, pero sí en un punto intermedio elevado. Este caso sugiere proteger localmente la zona de riesgo con una cámara de

aire o algún otro dispositivo (ver capítulo 2.2). Al desplazar la protección, el conducto se aísla en dos partes, de manera que se presentan oscilaciones de onda por golpe de ariete entre bombas y cámara y ocurren oscilaciones de masa por continuidad de flujo entre cámara y depósito; sin embargo, ambos fenómenos se influyen mutuamente y no es posible tratar cada tramo separadamente como se pudiera esperar. En la figura 2.14 se comparan envolventes de subpresión obtenidas en caso real y con el artificio de simplificación al aislar ambos fenómenos; se nota que la primera es más desfavorable y puede requerirse un incremento sustancial del volumen de aire.

- b) Existen varios puntos altos sucesivos en el perfil de la conducción. En ciertos casos el costo de una serie de pequeñas cámaras de aire en dichos puntos puede ser inferior al de una sola protección localizada junto a las bombas. Sin embargo, todos los métodos de dimensionamiento están elaborados para el esquema cámara-conducto-depósito y no son extrapolables a uno más complejo de dispositivos en serie; en estas condiciones es necesario recurrir a los métodos de simulación para poder dimensionar (igualmente, si se opta por otros sistemas

alternativos de protección).

- 4) Reemplazo de una red por un conducto equivalente. La mayoría de las redes hidráulicas no corresponden, como es de esperarse, al esquema propuesto cámara-conducto-depósito y solamente el cálculo numérico permite dimensionar realmente una cámara anti-ariete; a pesar de ello, resulta ventajoso tener idea de la magnitud requerida si se puede hacer alguna simplificación razonable.

Como criterio de equivalencia puede reemplazarse toda la red por un conducto único que tenga por longitud, la distancia entre bombas y extremo más alejado, y por sección y gasto los del conducto maestro; este procedimiento sobreestima fuertemente la energía cinética del sistema hidráulico y por consiguiente sobredimensiona la cámara de aire. Parece más correcto calcular la verdadera energía cinética, que sirve para estimar la longitud L del conducto equivalente, es decir,

$$\sum_i L_i Q_i V_i = L Q_o V_o \quad (2.3.9)$$

donde L_i , Q_i , V_i son longitud, gasto y velocidad del i -ésimo tramo que forma parte de la red, y Q_o , V_o son gasto y velocidad de la línea maestra. Una vez determinado el

esquema equivalente, se procede a dimensionar la cámara de aire con algún método aproximado, ya sea gráfico o numérico.

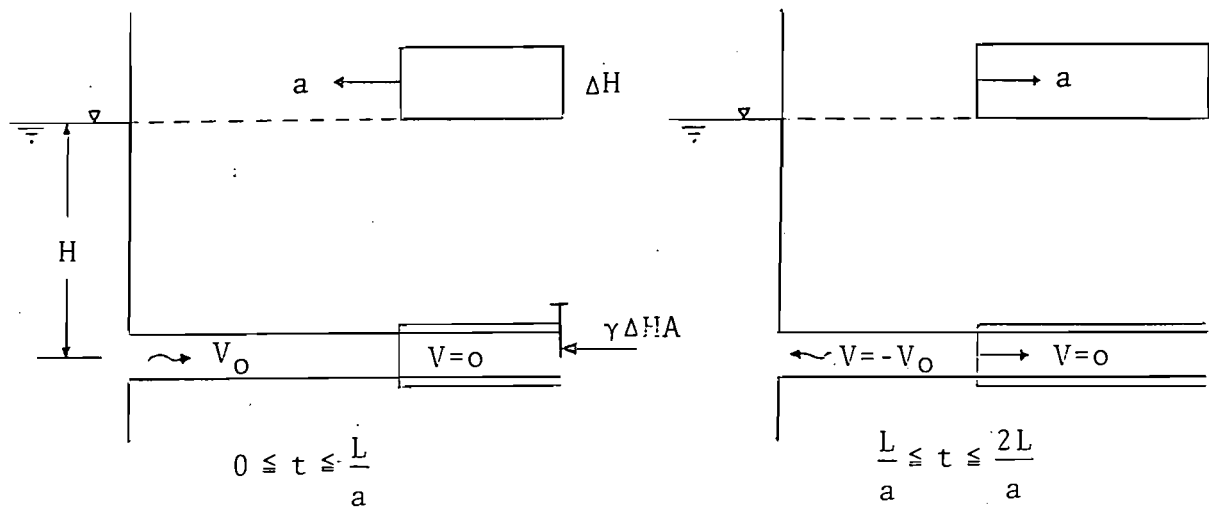


FIGURA 2.1A GOLPE DE ARIETE. PERIODO $0 \leq t \leq \frac{2L}{a}$

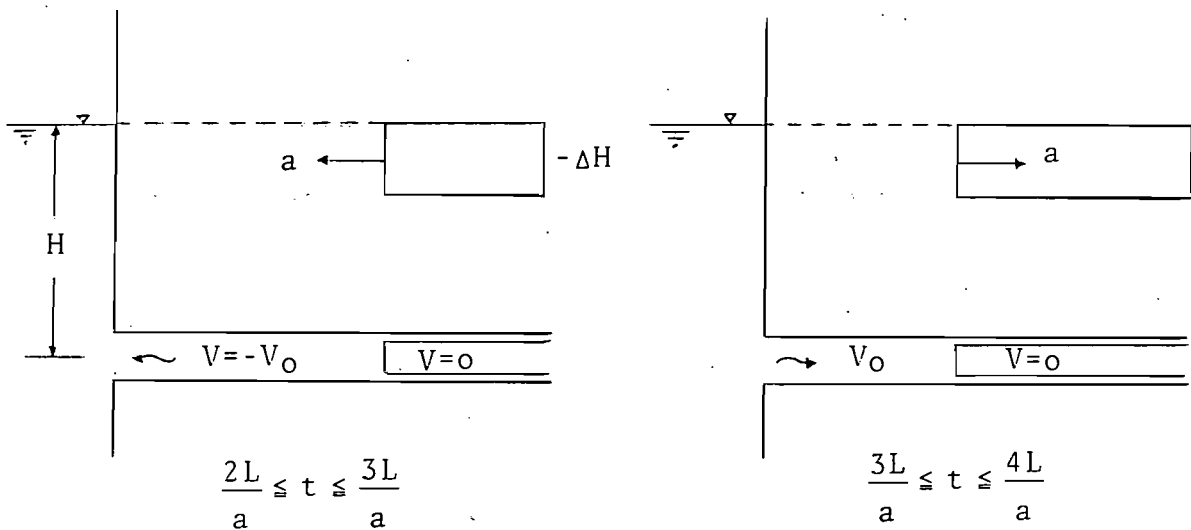
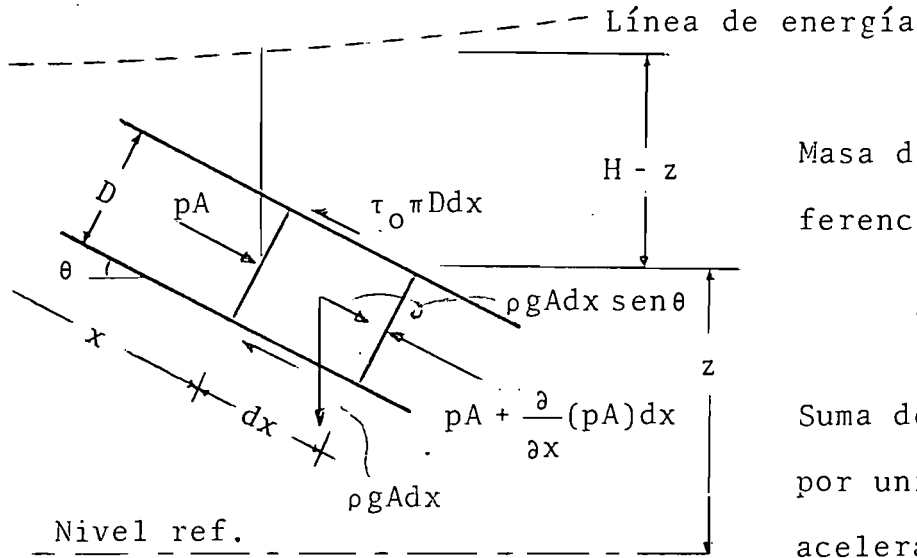


FIGURA 2.1B GOLPE DE ARIETE. PERIODO $\frac{2L}{a} \leq t \leq \frac{4L}{a}$

VARIABLES	H , carga de presión	a , celeridad
	V_0 , velocidad inicial	L , longitud de tubo
	ΔH , incremento de carga	t , tiempo



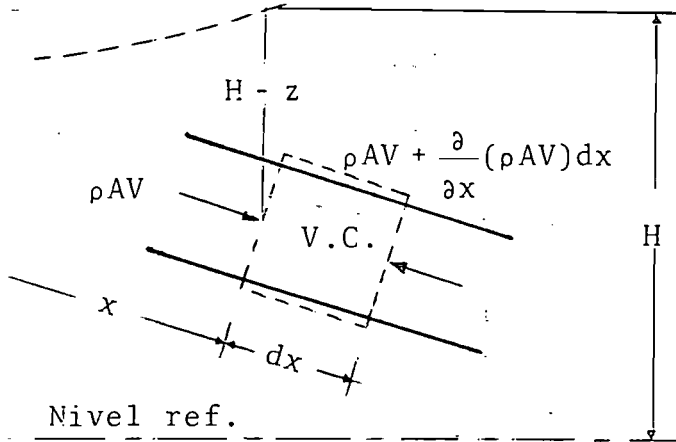
Masa del elemento diferencial :

$$\rho A dx$$

Suma de fuerzas (en x) por unidad de masa = aceleración :

$$-g \frac{\partial}{\partial x} (H - z) + g \operatorname{sen} \theta - \frac{\pi D \tau_0}{\rho A} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{4 \tau_0}{\rho D} = \frac{dV}{dt}$$

FIGURA 2.2A DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE PARA DEDUCIR LA ECUACION DE MOVIMIENTO.



VARIABLES

- A, área de tubería
- x, distancia al origen
- z, elevación tubería
- H, carga piezométrica
- $p = \rho g(H - z)$, presión
- τ_0 , esfuerzo cortante
- ρ , densidad del fluido

Por conservación de masa:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho AV) dx + \frac{\partial}{\partial t} (\rho A dx) = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

FIGURA 2.2B VOLUMEN DE CONTROL PARA DEDUCIR LA ECUACION DE CONTINUIDAD

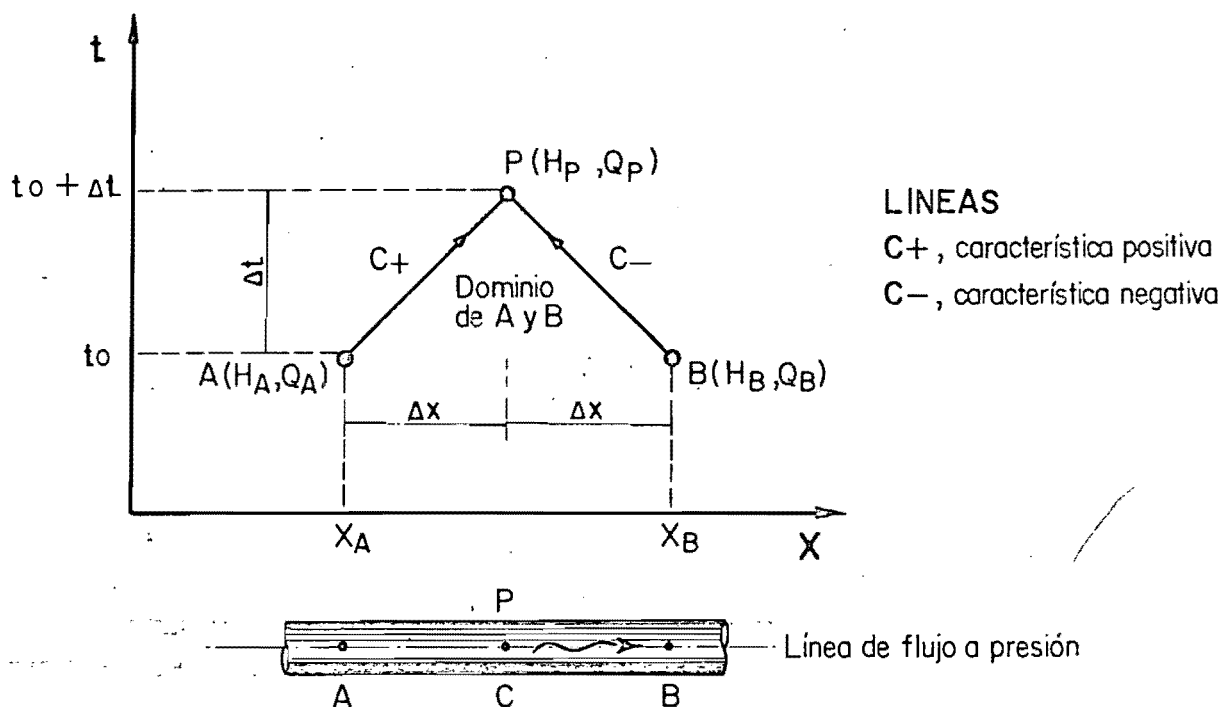


Fig. 2.3a LINEAS CARACTERISTICAS EN EL PLANO $x-t$

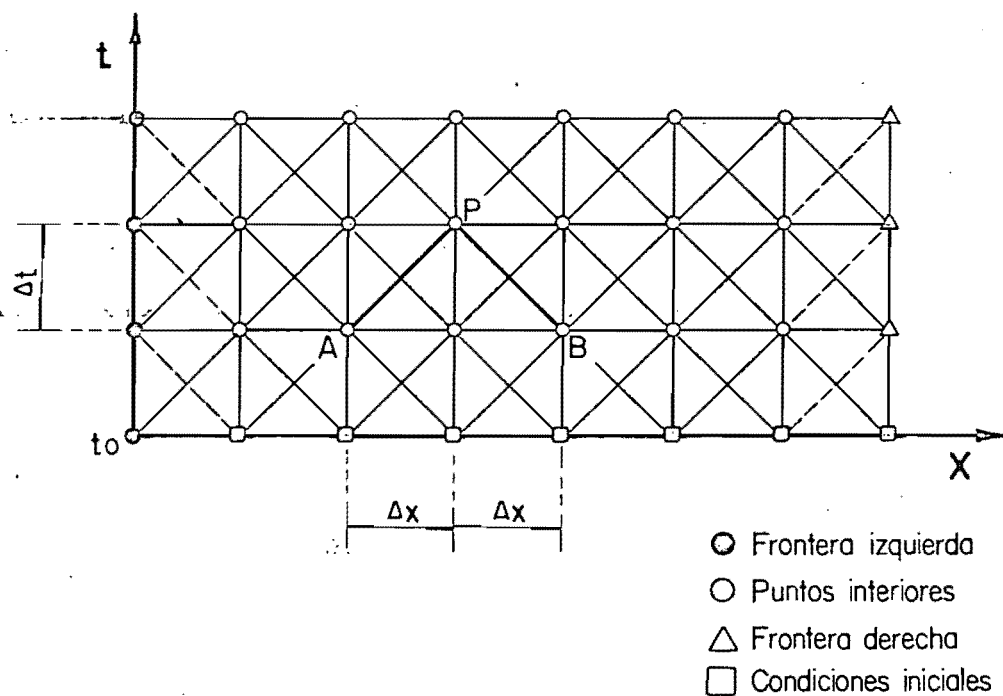


Fig. 2.3b PLANO DE LAS CARACTERISTICAS (MALLA)

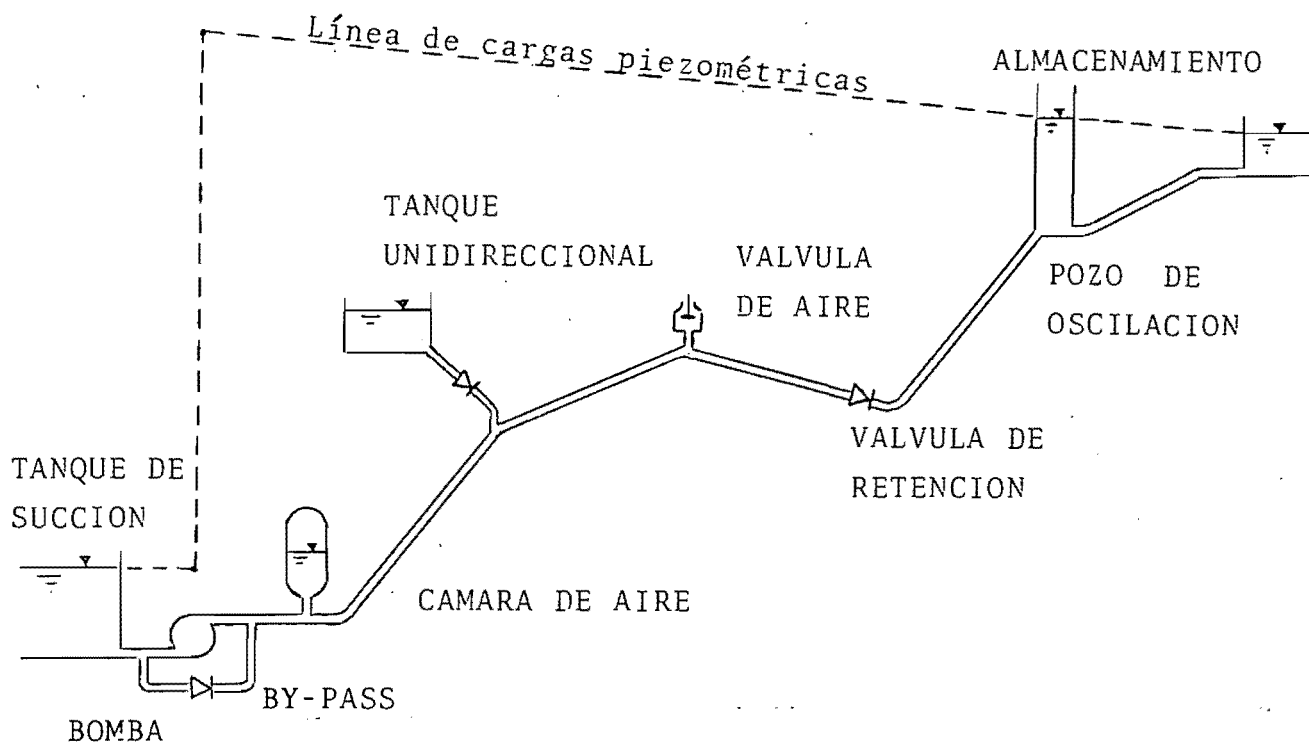


FIGURA 2.4 SISTEMAS DE PROTECCION CONTRA GOLPE DE ARIETE

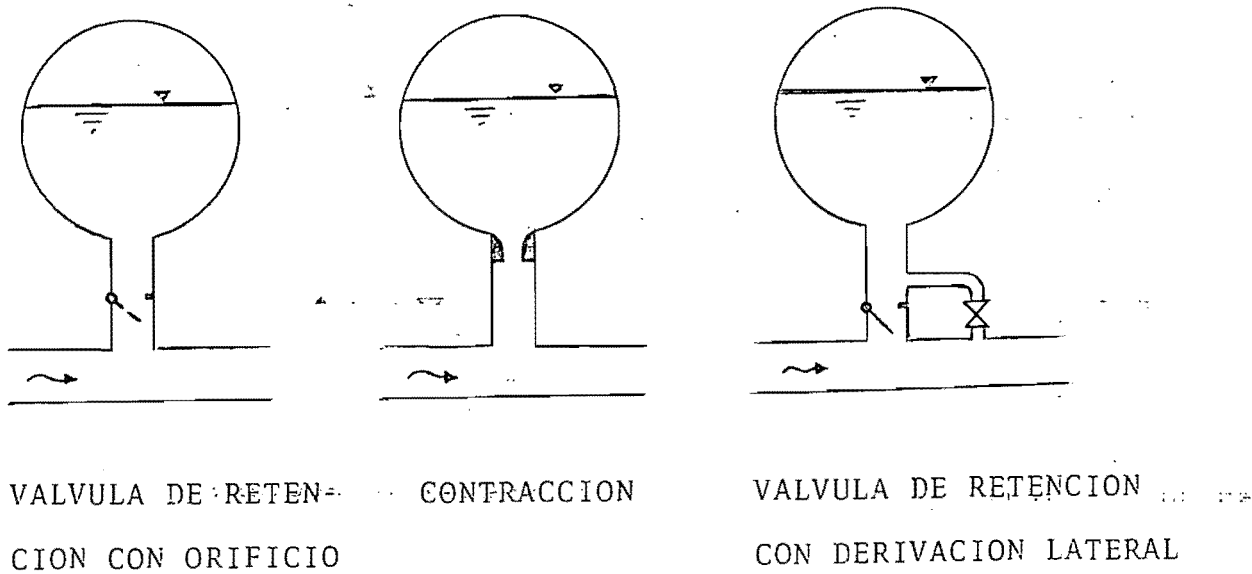
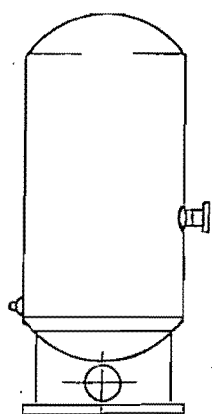
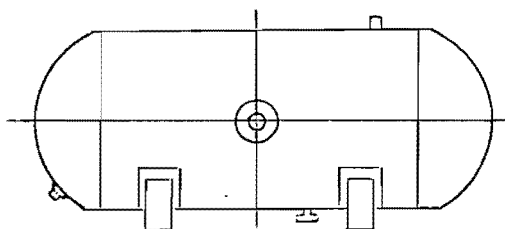


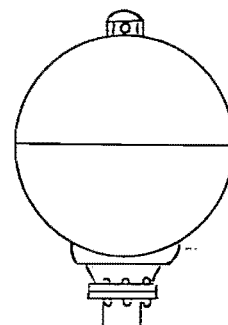
FIGURA 2.5 CONEXIONES DE CAMARA DE AIRE CON LA LINEA



CAMARA CILINDRICA VERTICAL

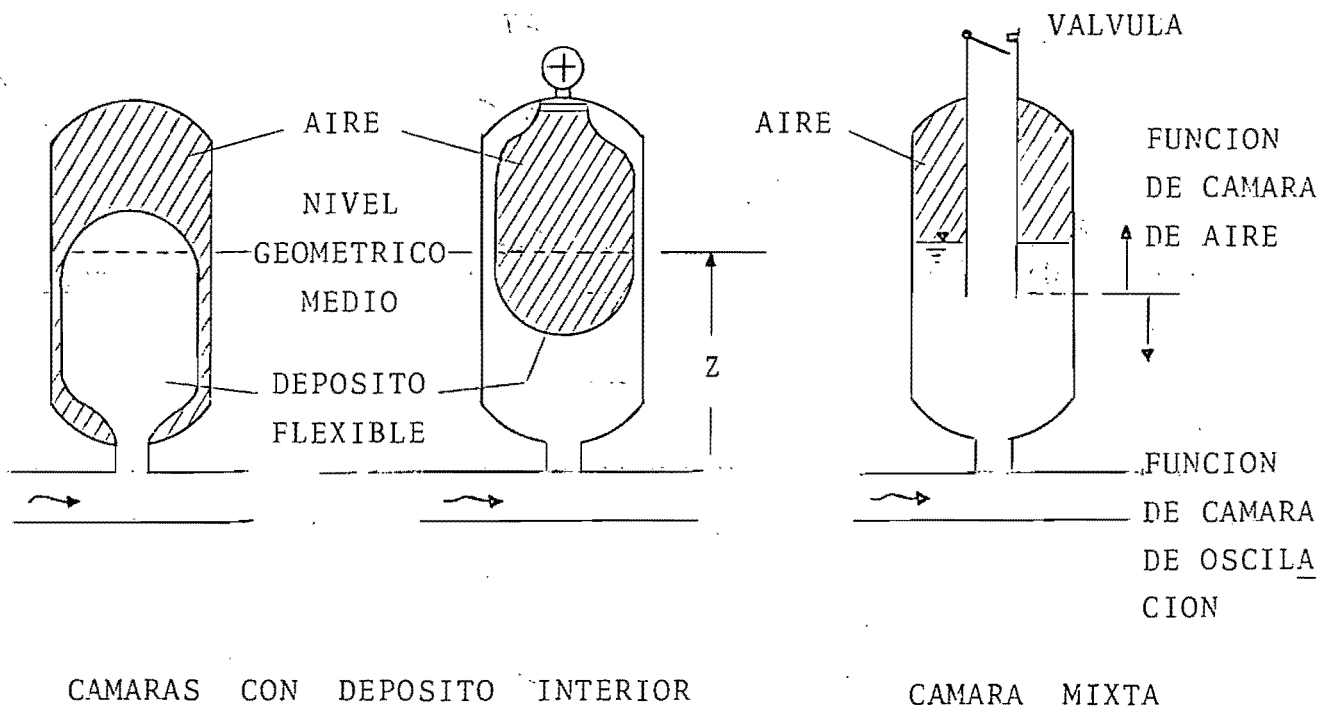


CAMARA CILINDRICA HORIZONTAL



CAMARA ESFERICA

FIGURA 2.6 TIPOS DE CÁMARA, SEGÚN SU GEOMETRÍA



CAMARAS CON DEPOSITO INTERIOR

CAMARA MIXTA

FIGURA 2.7 TIPOS DE CÁMARA, SEGÚN SU FUNCIONAMIENTO

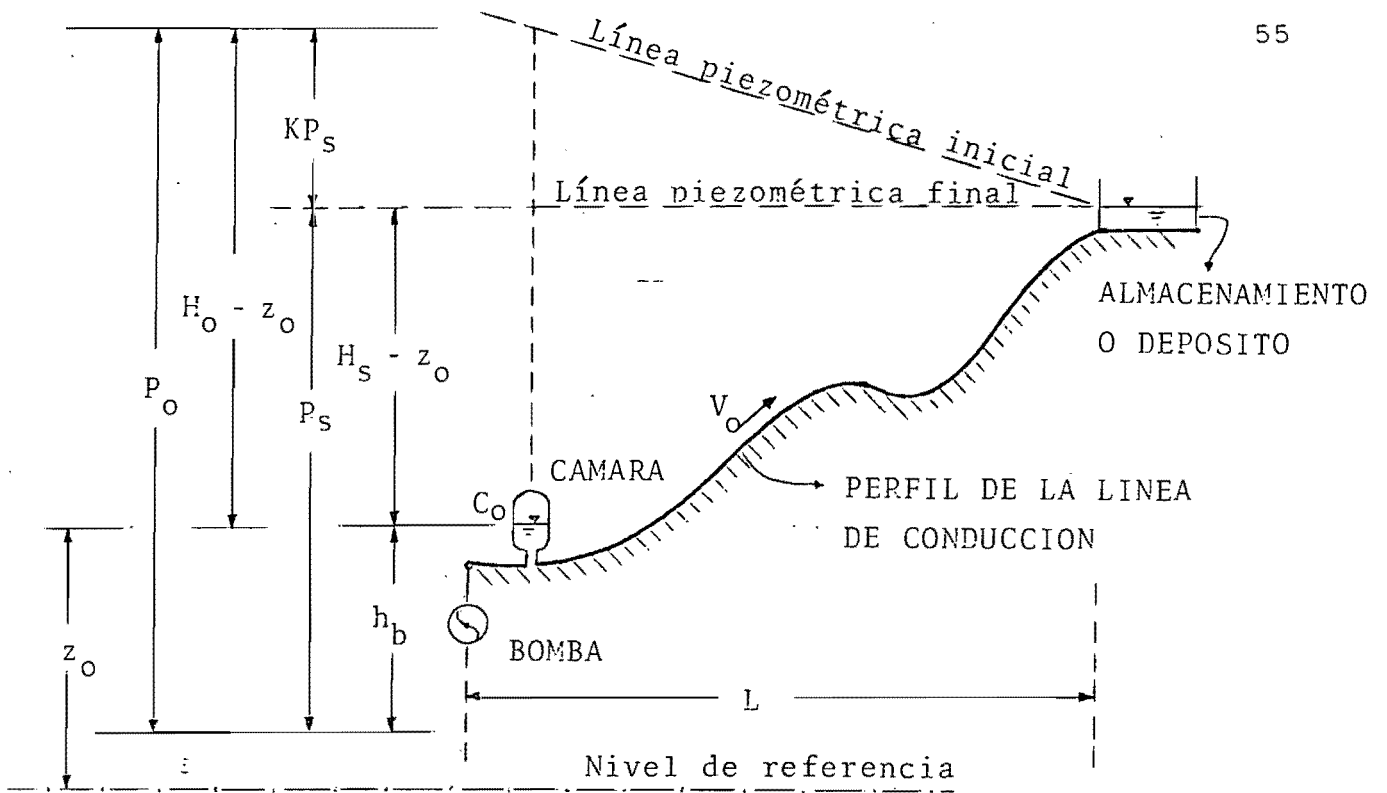


FIGURA 2.8 ESQUEMA GENERAL DE CÁMARA-CONDUCTO-DEPOSITO, VARIABLES CONSIDERADAS EN EL ANALISIS DIMENSIONAL

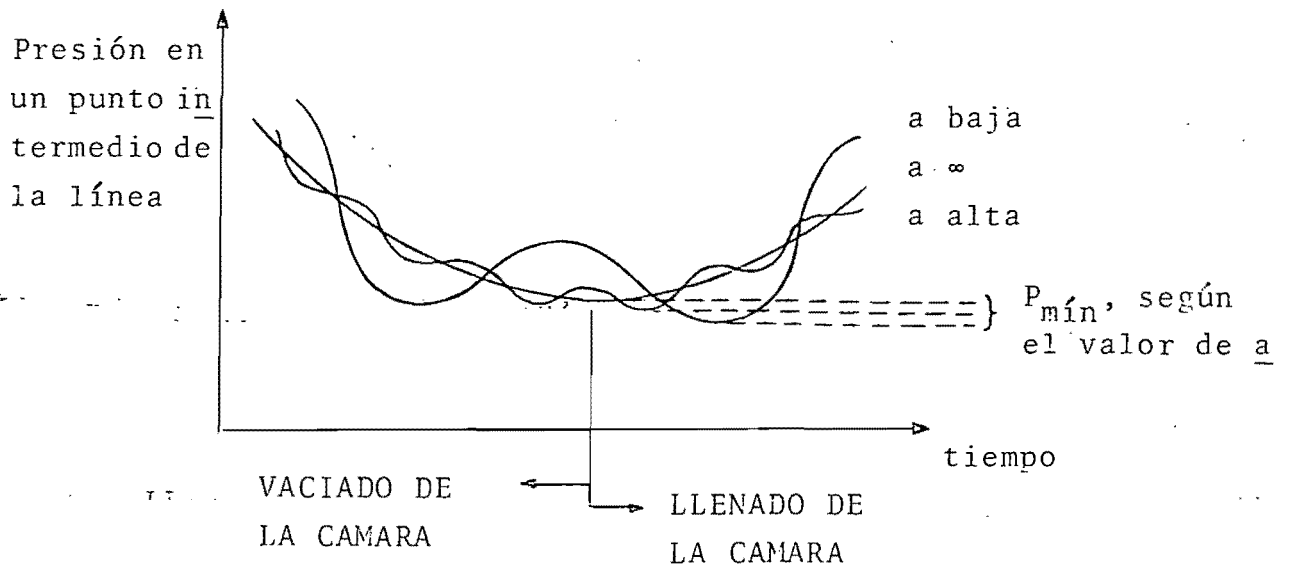


FIGURA 2.9 FLUCTUACIONES DE PRESIONES, SEGÚN EL VALOR DE LA CELERIDAD

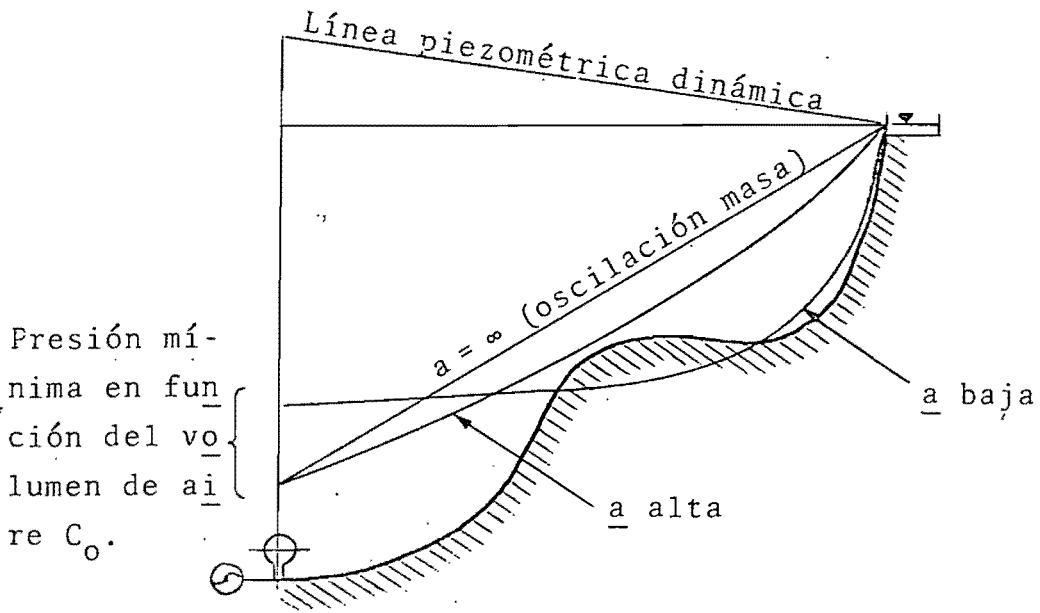


FIGURA 2.10 ENVOLVENTES DE SUBPRESIÓN, DE ACUERDO CON EL VALOR DE LA CELERIDAD.

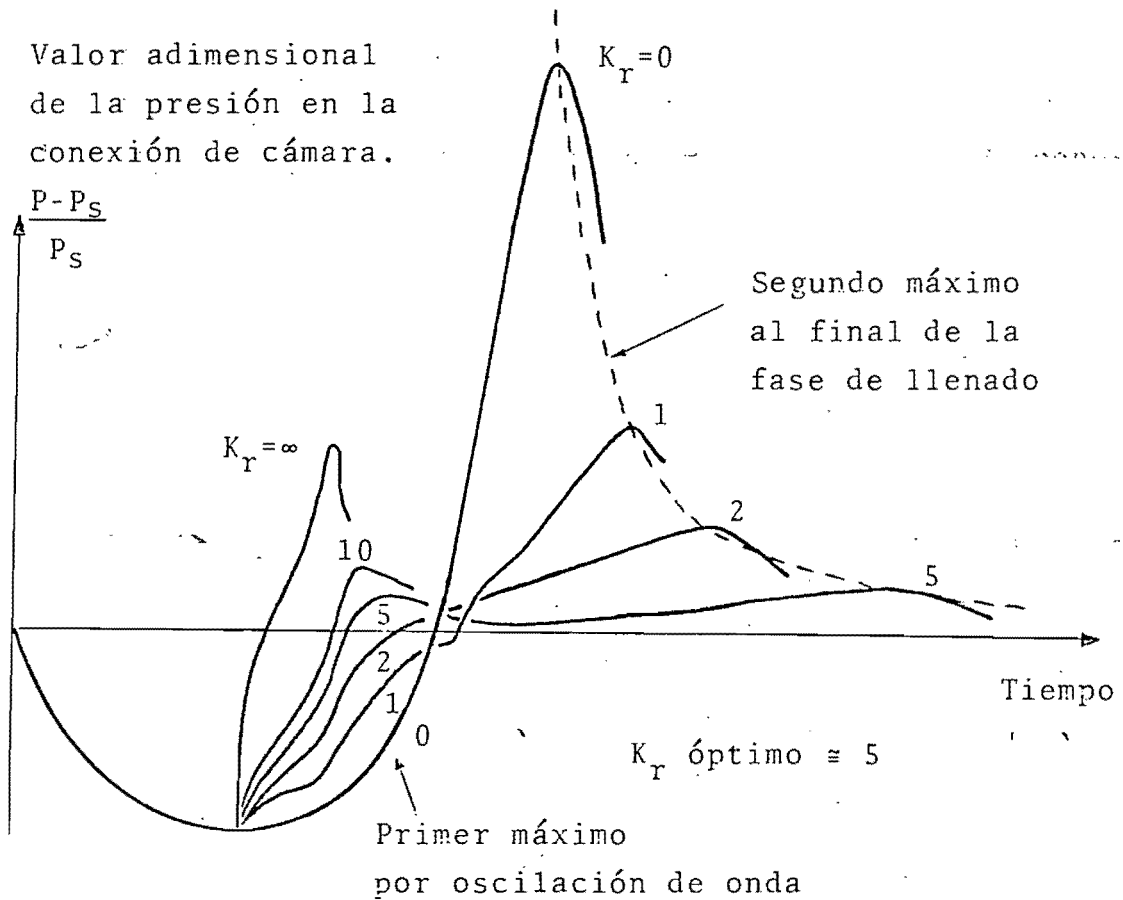


FIGURA 2.11 INFLUENCIA DE K_r EN EL LLENADO DE LA CÁMARA ($K=0$)

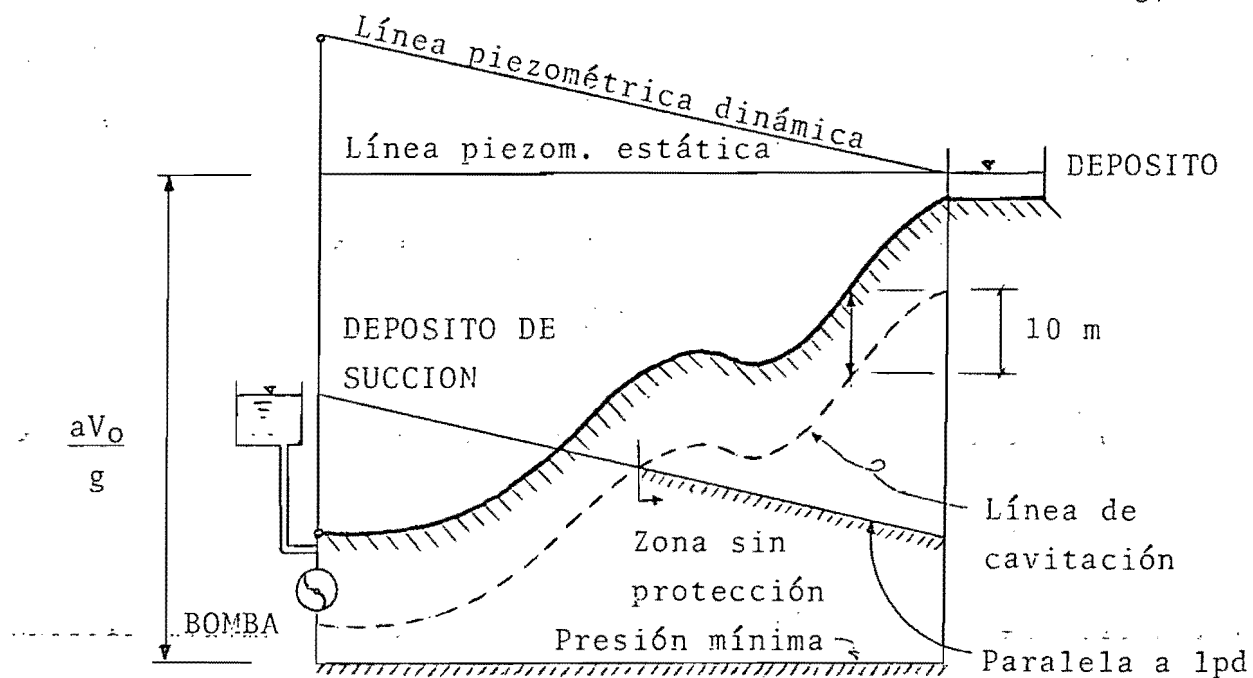


FIGURA 2.12A PRESIONES MÍNIMAS CUANDO $\frac{aV_0}{g} > P_s$. BOMBA PROTEGIDA CON UN DEPÓSITO DE ADMISIÓN.

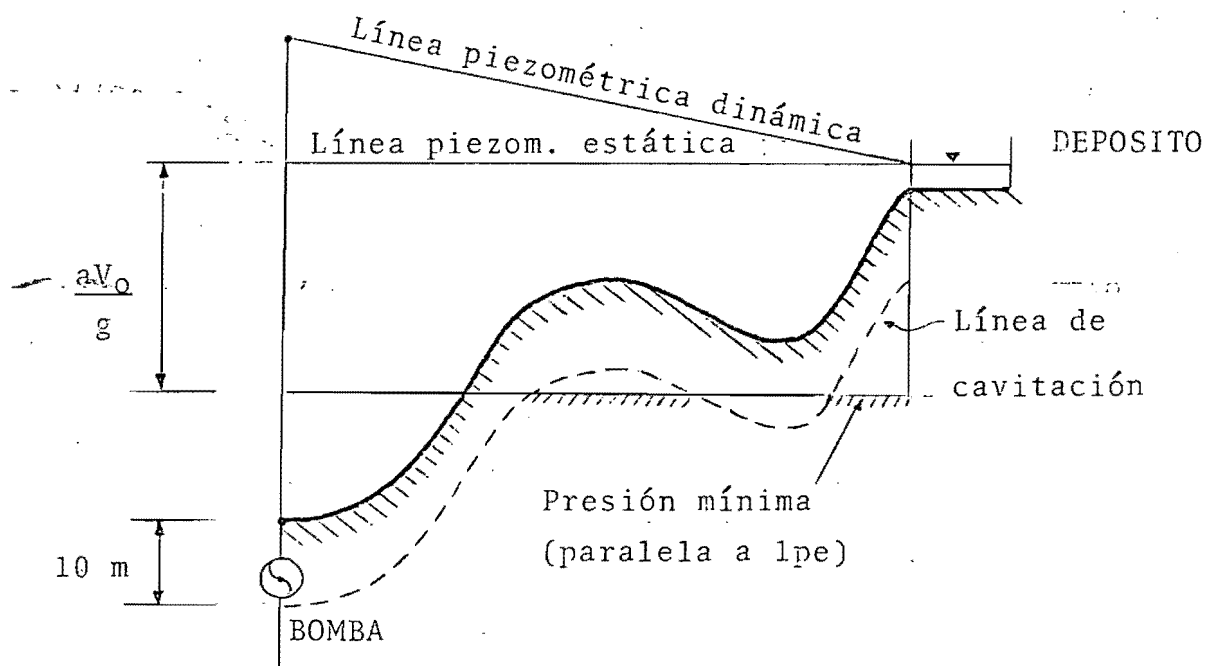


FIGURA 2.12B PRESIONES MÍNIMAS CUANDO $\frac{aV_0}{g} < P_s$. RIESGO DE CAVITACIÓN EN PUNTOS INTERMEDIOS.

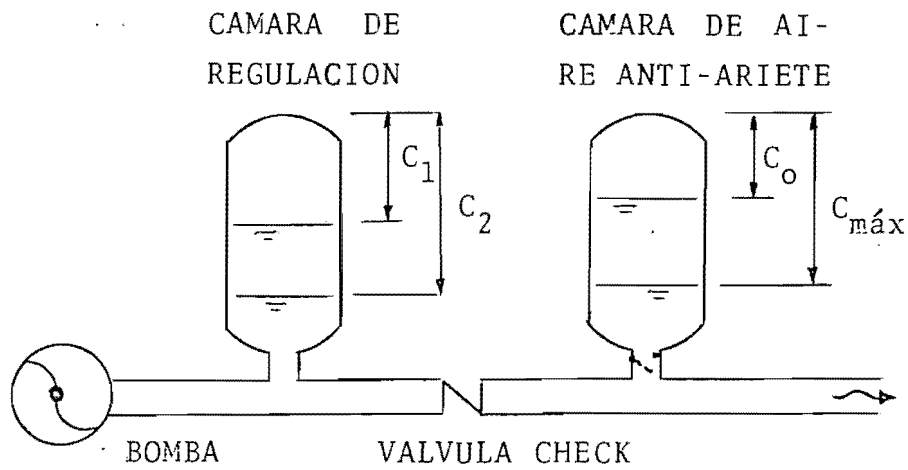


FIG 2.13A INSTALACION DE BOMBEO CON 2 CAMARAS DE AIRE.

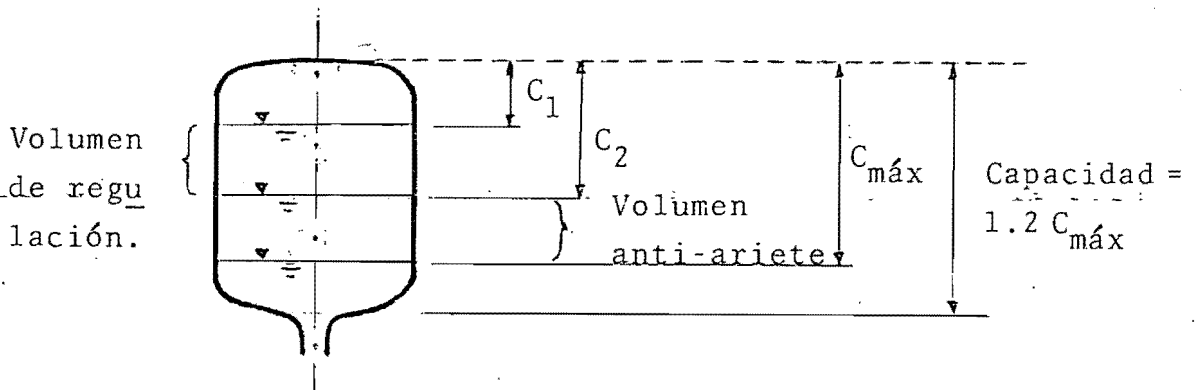


FIG 2.13B CÁMARA DE REGULACIÓN UTILIZADA CONTRA GOLPE DE ARIETE

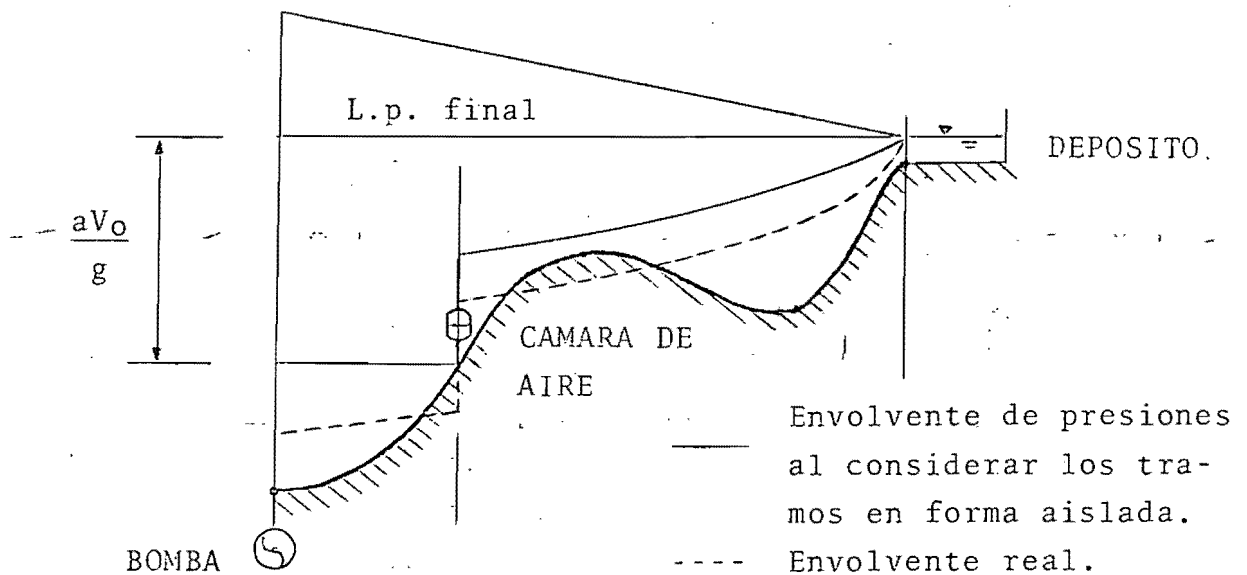


FIG 2.14 UBICACION INTERMEDIA DE UNA CÁMARA. SUBPRESIONES

3. CALCULO Y DIMENSIONAMIENTO

En el capítulo 2 se trataron algunos aspectos generales sobre fenómenos transitorios en tuberías a presión, sistemas de protección contra golpe de ariete y funcionamiento de las cámaras de aire, desde un punto de vista cualitativo. En este capítulo se estudian las ecuaciones que definen el comportamiento de una cámara de aire y se presentan esquemas de solución numérica, así como métodos preliminares de dimensionamiento.

3.1 PLANTEAMIENTO DE ECUACIONES PARA CAMARA DE AIRE

Después de haber descrito el funcionamiento de una cámara de

aire, como dispositivo de protección contra golpe de ariete, se plantean a continuación las ecuaciones involucradas con su comportamiento hidráulico cuando ocurren fluctuaciones rápidas de flujo en el sistema.

Como se analizó en el capítulo 2.3, la cámara de aire contiene

un fluido de la tubería en la parte inferior y aire o gas comprimido,

en contacto con el líquido o confinado en un depósito flexible,

en su parte superior. Cuando ocurre una falla de

energía eléctrica, por ejemplo, la carga desarrollada por bomba

debeo decrece rápidamente, cerrándose casi en forma instantánea

la válvula de retención ubicada entre bomba y cámara; la caída

de presión en la tubería, en el punto donde está la cámara,

hace que el aire o gas comprimido obligue al líquido a salir

por la parte inferior hacia la línea, minimizando cambios de

velocidad y efectos del golpe de ariete. A su vez, al frenarse

se la columna de fluido y regresar hacia la bomba, el líquido

entra al dispositivo, decreciendo el volumen de aire e incre-

mentándose la carga de presión por encima de las condiciones

de operación normal.

La expansión y compresión de aire en la cámara ocurre de acuerdo a una relación politrópica de presiones y volúmenes, es decir,

$$PC^n = \text{constante} \quad (3.1.1)$$

donde P es la presión absoluta a que se encuentra sometido el aire en la cámara y C su volumen correspondiente. Para una relación adiabática de P y C , en donde no se considera transmisión de energía en forma de calor a través de las fronteras del sistema, el valor del exponente es 1.4, mientras que para una relación isotérmica o a temperatura constante del volumen sometido a variación de presiones, el valor del exponente es 1.0. El criterio más generalizado de análisis de cámaras de aire considera una relación intermedia entre la expansión isotérmica y adiabática, de manera que al expresar 3.1.1 en términos de carga de presión absoluta y tomar un valor de $n=1.2$, se tiene

$$PC^{1.2} = P_0 C_0^{1.2} = \text{constante} \quad (3.1.2)$$

siendo P_0 la carga de presión absoluta en m , en el punto en que se encuentra la cámara, en condiciones establecidas

C_0 el volumen de aire en la cámara en m^3 , en condiciones establecidas

P y C , carga y volumen, en cualquier instante posterior a la variación de las condiciones iniciales.

La ecuación 3.1.2 puede escribirse en forma adimensional, como

$$pc^{1.2} = 1 \quad (3.1.3)$$

donde $p=P/P_0$ y $c=C/C_0$. En la figura 3.1 se muestra gráficamente la relación adimensional presión-volumen de aire; se observa, por ejemplo, que si el volumen se incrementa al doble ($c=2.0$) la carga de presión se reduce en un 66% ($h=0.44$), mientras que para aumentar la carga proporcionalmente ($h=1.66$) el volumen de aire sólo se reduce en 35% ($c=0.65$). Si se considera más desfavorable la reducción de volumen por el incremento sustancial que se produce en presión, es necesario restringir el retorno de flujo hacia la cámara y, por el contrario, facilitar su salida.

Algunos dispositivos adecuados para lograr una diferencia de pérdidas de carga a la entrada y salida del orificio han sido descritos en el capítulo 2.3. Además, en el apéndice A se presenta un estudio sobre fundamentos termodinámicos de la ecuación 3.1.1.

Por otro lado, debido a que las ecuaciones básicas para flujo no permanente suelen resolverse numéricamente al establecer incrementos diferenciales de la variable tiempo, se procederá a hacer un planteo de las ecuaciones que involucra la cámara de aire en una forma similar.

En la figura 3.2 se definen las principales variables que intervienen en el caso de una cámara de aire para los tiempos t

y $t+\Delta t$. En la figura se considera el tramo AB de una tubería a presión y C el punto intermedio donde se localiza la cámara de aire; los puntos 1 y 2 corresponden a secciones transversales inmediatamente antes y después del punto C. Se considera que el subtramo AC tiene una sección transversal de área A_1 y el subtramo CB de área A_2 ; la cámara tiene un área A_C , constante ó variable con la altura, vista en planta. Para el tiempo t , se conocen : las elevaciones piezométricas H_A, H_1, H_2, H_B ; los gastos Q_A, Q_1, Q_2, Q_B ; el volumen de aire V en la cámara y la elevación de la superficie líquida z en ella. P es la carga de presión absoluta a que está sometido el aire; h_b , la carga correspondiente de presión barométrica; h_f , la pérdida de carga del orificio diferencial y; Q_C , el gasto a través del orificio.

Para el instante $t+\Delta t$ las variables descritas de la figura 3.2 son desconocidas y se distinguen de las anteriores mediante el subíndice P. Cabe señalar que por tratarse de una condición transitoria y de fluido compresible $Q_A \neq Q_1$ y $Q_2 \neq Q_B$. De acuerdo con el esquema presentado, pueden plantearse las siguientes ecuaciones en el punto C de unión de la cámara de aire con la tubería :

a) Ecuación de continuidad. En el instante $t+\Delta t$ se tiene

$$Q_{P1} = Q_{P2} = Q_{PC} \quad (3.1.4)$$

donde Q_{P1} y Q_{P2} son gastos por la sección 1 y 2 respectivamente, en m^3/s

Q_{PC} es el gasto a través del orificio de la cámara de aire, en m^3/s ($Q_{PC} > 0$ cuando entra a la cámara)

- b) Ecuación de compatibilidad de cargas. Para $t+\Delta t$ se tienen las incógnitas H_{P1} y H_{P2} , sin embargo, al suponer que las secciones 1 y 2 son adyacentes al punto C y que la diferencia en cargas de velocidad (cuando $Q_{P1} \neq Q_{P2}$) es despreciable; puede aceptarse la siguiente identidad en compatibilidad de cargas :

$$H_{P1} = H_{P2} = H_P \quad (3.1.5)$$

donde H_P es la elevación piezométrica en el punto C, en m, para el instante $t+\Delta t$; se definirá por H a la carga de presión en C, para el tiempo t .

- c) Ecuación de pérdidas en la conexión cámara de aire-conducto. Para $t+\Delta t$

$$h_{fP} = K_4 |Q_{PC}| Q_{PC} \quad (3.1.6)$$

Por medio de K_4 se definirán las pérdidas de diferentes tipos de conexiones, como la válvula de retención con orifi-

cio o con derivación lateral y el orificio diferencial, descritos en el capítulo 2.3. Normalmente se tendrá un coeficiente asociado a las pérdidas de entrada k_r y otro a las pérdidas de salida k_v (ver valor óptimo de pérdidas de carga en la conexión, capítulo 2.3.2).

- d) Ecuaciones relacionadas con el volumen de aire. En general, se definen la carga neta de presión absoluta P_p que actúa sobre la cámara y el volumen de aire C_p asociado a los gastos en el sistema.

Respecto a P_p , su valor se determina al sumar la carga de presión barométrica h_b a la diferencia entre la elevación piezométrica en el punto C y el nivel de la superficie de fluido, es decir,

$$P_p = (H_p - z_p) + h_b - h_{fp} \quad (3.1.7)$$

donde también se han restado las pérdidas h_{fp} que definen la diferencia de cargas entre la cámara y su punto de conexión-con la línea (fig 3.2). La ecuación está expresada para el instante $t+\Delta t$.

En cuanto a la variación de volumen de aire de C a C_p , en un incremento de tiempo Δt , se puede igualar al gasto promedio a través del orificio, multiplicada por Δt ; al considerar un promedio lineal de gastos se obtiene

$$C_P = C - \frac{1}{2}(Q_C + Q_{PC})\Delta t \quad (3.1.8)$$

Lo anterior puede aceptarse si se desprecia la compresibilidad del líquido (como el agua), al compararla con la del aire ó gas.

3.1.1 Ecuación General

Para encontrar una ecuación que relacione cargas y gastos de la cámara de aire en el tiempo $t+\Delta t$, conocidas las condiciones en el tiempo t , se hará una relación algebraica de las ecuaciones arriba planteadas. La carga P_p según la ecuación

3.1.2 puede escribirse

$$P_p = K_1 \cdot C_p^{-1.2} \quad (3.1.9)$$

donde $K_1 = P_o C_o^{1.2} = (H_o + h_b - z_o) \cdot C_o^{1.2}$, según 3.1.7. Sustituyendo las ecuaciones 3.1.7 y 8 en la expresión anterior queda

$$H_p + h_b - z_p - h_{fp} = K_1 \left[C - \frac{\Delta t}{2}(Q_C + Q_{PC}) \right]^{-1.2}$$

Al sustituir h_{fp} según 3.1.6 y agrupar en constantes los valores conocidos del instante t , puede despejarse H_p :

$$H_p = K_1 (K_3 - K_2 Q_{PC})^{-1.2} + K_4 |Q_{PC}| Q_{PC} + K_6 + z_p \quad (3.1.10)$$

en donde $K_2 = \Delta t / 2$, $K_3 = C - K_2 Q_C$ y $K_6 = -h_b$.

En esta ecuación H_p es función de Q_{pC} y z_p ; como se verá más adelante, la elevación de la superficie de fluido en la cámara depende de la geometría de ésta y también del gasto Q_{pC} . Además, la ecuación obtenida corresponde a una cámara unida directamente a la línea a través de un orificio diferencial. Para generalizar la ecuación, se considerará la conexión mediante un tubo corto (TC), como se observa en la figura 3.3, y se tomará en cuenta la ecuación de cantidad de movimiento del fluido en dicha línea de conexión.

La ecuación de cantidad de movimiento en una línea de conducción, aplicada al tubo corto, resulta (ver fundamentos en el capítulo 3.3.1, cuando se emplea el criterio de oscilación de masa) :

$$\frac{L_{TC}}{g} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{Q_C}{A_{TC}} \right) = \Delta H - k_{TC} |Q_C| Q_C \quad (3.1.11)$$

donde L_{TC} es la longitud del tubo corto, en m

$d/dt(Q_C/A_{TC})$ la aceleración de la columna de fluido en el tubo, en m/s^2

Q_C el gasto instantáneo hacia (de) la cámara, en m^3/s

A_{TC} el área transversal del tubo corto, en m^2

ΔH diferencia instantánea de cargas entre el punto C y

el lugar de la cámara, en m^2

k_{TC} coeficiente de pérdidas en el tubo corto

Expresando la derivada en 3.1.11 mediante incrementos diferenciales y la diferencia de cargas $\Delta H = H_P - (P_P - h_b + z_P + K_4 |Q_{PC}| Q_{PC})$ de acuerdo con 3.1.6 y 3.1.7, se obtiene la siguiente expresión para el instante $t + \Delta t$:

$$\frac{Q_{PC} - Q_C}{\Delta t} \cdot \frac{L_{TC}}{A_{TC} g} = H_P - P_P + h_b - z_P - K_5 |Q_{PC}| Q_{PC} \quad (3.1.12)$$

El coeficiente de pérdidas K_5 corresponde tanto a las pérdidas en el tubo como en el orificio de entrada-salida de la cámara. Tomando en cuenta la fórmula de Darcy-Weisbach para pérdidas en tuberías, K_5 se expresa

$$K_5 = \frac{f L_{TC}}{2 g D_{TC} A_{TC}^2} + K_4 \quad (3.1.13)$$

en donde f es el coeficiente de pérdidas de Darcy

D_{TC} el diámetro del tubo corto, en m

A_{TC} el área transversal del tubo corto, en m^2

K_4 el coeficiente de pérdidas del orificio (conexión)

Al comparar las ecuaciones de cargas 3.1.7 para cámara con orificio diferencial y 3.1.12 para cámara conectada mediante tubo corto, puede encontrarse la diferencia de términos; así, sustituyendo 3.1.7 en 3.1.12 sin eliminar el término H_P , se

determina que

$$H_{P(TC)} = H_{P(orf)} + \frac{fL_{TC}}{2gD_{TC}A_{TC}} |Q_{PC}|Q_{PC} + \frac{L_{TC}}{\Delta tg A_{TC}} (Q_{PC} - Q_C)$$

que es la diferencia de cargas al considerar la conexión mediante tubo corto; nótese que para $L_{TC}=0$ las ecuaciones 3.1.7 y 3.1.12 son idénticas. Estos nuevos términos, al sumarse a la ecuación 3.1.10, pueden agruparse en los coeficientes de términos semejantes respectivos, obteniéndose la siguiente ecuación y constantes :

$$H_P = K_1 (K_3 - K_2 Q_{PC})^{-1.2} + K_5 |Q_{PC}|Q_{PC} + K_6 Q_{PC} + K_7 + z_{P...} \quad (3.1.14)$$

siendo K_1, \dots, K_4 las mismas de la ecuación 3.1.10.

$$K_5 = \frac{fL_{TC}}{2gD_{TC}A_{TC}^2} + K_4$$

$$K_{TC} = \frac{L_{TC}}{\Delta tg A_{TC}} \quad (\text{constante del tubo corto})$$

$$K_6 = K_{TC}$$

$$K_7 = -h_b - K_{TC} \cdot Q_C$$

En caso de que L_{TC} sea despreciable, $K_{TC} \approx 0$, obteniendo las constantes anteriores para la ecuación 3.1.10.

3.1.2 Ecuaciones asociadas a la Geometría

La geometría más conocida de las cámaras de aire o gas corresponde, en general, a las tres formas descritas en el capítulo 2.3 y representadas en la figura 2.8. Estas son :

- a) Cámara cilíndrica vertical (c.c.v)
- b) Cámara cilíndrica horizontal (c.c.h)
- c) Cámara esférica (c.e)

La ecuación general 3.1.14 del tipo $H_p = H_p(Q_{pC}, z_p)$ representa, hasta esta etapa de análisis, a la carga de presión H_p de la cámara en función del gasto Q_{pC} y la elevación de fluido z_p en la misma. Una manera de relacionar estas variables es mediante la variación de volumen de aire (o gas) en la cámara en un tiempo Δt , es decir,

$$\Delta C = C - C_p \quad (3.1.15)$$

ΔC varía según el gasto que entra o sale y determina el siguiente nivel z_p de fluido, conocidas las condiciones en el tiempo t . Además, deben tomarse en cuenta las siguientes hipótesis :

- a) El líquido que entra y sale de la cámara de aire es incompresible.
- b) La variación del volumen de aire (o gas) confinado ΔC , en

un incremento de tiempo Δt , es igual al promedio lineal del gasto durante la variación, multiplicado por Δt (ecuación 3.1.8).

- c) Cuando la cámara tiene aire o gas confinado en un depósito flexible interior, la elevación z del líquido corresponde al nivel geométrico medio que determina los mismos volúmenes y cargas de una cámara sin depósito, en iguales condiciones hidráulicas (esto se observa en la fig 2.7).

En primer lugar se plantearán las expresiones para ΔC con base en las características geométricas involucradas en cada caso :

- a) Cámara cilíndrica vertical. Como puede apreciarse en la figura 3.2, la variación del volumen ΔC para c.c.v es la diferencia de elevaciones de la superficie de fluido de t a $t+\Delta t$ multiplicada por el área horizontal-transversal A_c de la cámara (constante en esta geometría)

$$\Delta C = A_c (z_p - z) \quad (3.1.16)$$

- b) Cámara cilíndrica horizontal. Considérese una c.c.h en corte vertical-transversal, como se observa en la figura 3.4. Antes que nada la elevación z_p de fluido en la cámara puede expresarse como

$$z_p = z_{\text{mín}} + r - r \cos \theta_p \quad (3.1.17)$$

siendo $z_{\text{mín}}$ la elevación mínima de la superficie de fluido en la cámara, en m

$r = D_c/2$ el radio de la c.c.h, en m (D_c , diámetro)

θ_p la mitad del ángulo inferior que forman los radios que pasan por los puntos de intersección de la superficie líquida (en $t + \Delta t$) con el perímetro de la cámara, en radianes.

Como se observa, para $\theta_p = 0$, $z_p = z_{\text{mín}}$ y para $\theta_p = \pi$ rad (180°),

$$z_p = z_{\text{mín}} + D_c.$$

Por otro lado, sea ΔA_z el incremento de área transversal de la cámara de t a $t + \Delta t$ (fig 3.4), donde

$$\Delta A_z = A_{z_p} - A_z$$

El subíndice indica la elevación de fluido que acota en la parte superior al área transversal. Si L_c es la longitud de la cámara cilíndrica horizontal, la variación del volumen de aire ΔC es igual al volumen $\Delta A_z \cdot L_c$. Además, dado que el área hidráulica de la sección circular en el instante $t + \Delta t$ está dada por $A_{z_p} = r^2(2\theta_p - \text{sen}2\theta_p)/2$, la ecuación de ΔC resulta

$$\Delta C = K_8(2\theta_p - \text{sen}2\theta_p) - K_9 \quad (3.1.18)$$

donde $K_8 = L_c \cdot r^2 / 2$

$K_9 = K_8 (2\theta - \text{sen}2\theta)$; , ángulo para el instante t.

c) Cámara esférica. Si se hace un corte vertical que pase por el centro de una c.e, se obtiene un detalle idéntico al de la figura 3.4; por esta razón la expresión para la elevación z_p es igual a la ecuación 3.3.17. Sin embargo, en este caso ΔC depende de la variación diferencial del casquete esférico acotado por la superficie de fluido, es decir,

$$\Delta C = V_{z_p} - V_z$$

donde V es el volumen del casquete esférico inferior, en m^3 , acotado por la elevación que indica el subíndice. Si $h = z - z_{\text{mín}}$ es la altura del casquete esférico, el volumen V_z de fluido en el instante t está dado por

$$V_z = \frac{1}{3} \pi h^2 (3r - h)$$

Mediante la ecuación 3.1.17 y h , resulta fácil encontrar la expresión del volumen en función de θ , o sea

$$V_z = \frac{\pi}{3} r^3 (1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta)$$

y empleando identidades trigonométricas, puede expresarse el segundo miembro en términos de primer grado; puede demostrarse entonces que $(1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta) = 2 - \frac{9}{4} \cos\theta + \frac{1}{4} \cos^3\theta$.

Al sustituir estas expresiones, la variación del volumen ΔC para una c.e resulta

$$\Delta C = K_8 (\cos 3\theta_p - 9\cos \theta_p) - K_9 \quad (3.1.19)$$

donde $K_8 = r^3/12$

$$K_9 = K_8 (\cos 3\theta - 9\cos \theta)$$

Ahora se introducirá la ecuación 3.1.8 del tipo $Q_{PC}=Q_{PC}(\Delta C)$. A primera vista 3.1.18 y 3.1.19 resultan implícitas en θ_p , lo cual obliga a sustituir z_p por 3.1.17 en la ecuación general previa, y obtener así una ecuación del tipo $H_p=H_p(Q_{PC}, \theta_p)$. En cambio para c.c.v, la elevación z_p puede hacerse explícita; sustituyendo ΔC de acuerdo con 3.1.8 en la expresión 3.1.16 (para c.c.v) se tiene

$$z_p = \frac{K_2}{A_c} (Q_C + Q_{PC}) + z \quad (3.1.20)$$

recordando que $K_2=\Delta t/2$. Para poder conservar una sola ecuación general, y dado que los términos en 3.1.17 y 3.1.20 son distintos, puede sustituirse z_p en 3.1.14, eliminando ó añadiendo los términos que sean necesarios.

En efecto, si se emplea el factor $\alpha=0$ para c.c.v y $\alpha=1$ para c.c.h y c.e, los términos en z_p que cambian se afectan por α ó $(1-\alpha)$ para anularlos o añadirlos según el caso. La ecuación general queda, de esta manera, como sigue :

$$H_p = K_1 (K_3 - K_2 Q_{PC})^{-1.2} + K_5 |Q_{PC}| Q_{PC} + K_6 Q_{PC} + K_7 - r \cos \theta_p \quad (3.1.21)$$

donde K_1, \dots, K_5 son las mismas de 3.1.14

$$K_6 = K_{TC} + (1-\alpha)K_2/A_C$$

$$K_7 = Q_C [K_2/A_C(1-\alpha) - K_{TC}] - h_b + \alpha(r+z_{\text{mín}}) - (1-\alpha)z$$

Para c.c.v el último término de 3.1.21 se elimina obviamente (pues $\theta_p = \pi/2$ siempre) y H_p solo depende de Q_{PC} . Para c.c.h y c.e la ecuación general es, como se dijo, del tipo $H_p = H_p(Q_{PC}, \theta_p)$ y requiere de las expresiones complementarias de ΔC ; así, al sustituir ΔC de acuerdo con 3.1.8 en las expresiones 3.1.18 (para c.c.h) y 3.1.19 (para c.e) se obtienen las ecuaciones complementarias de la general :

$$\beta=0 \quad (\text{c.c.v}) \quad , \quad \theta_p = \pi/2$$

$$\beta=1 \quad (\text{c.c.h}) \quad , \quad Q_{PC} = K_8(2\theta_p - \text{sen}2\theta_p) - K_9 \quad (3.1.22)$$

$$\beta=2 \quad (\text{c.e}) \quad , \quad Q_{PC} = K_8(\cos3\theta_p - 9\cos\theta_p) - K_9 \quad (3.1.23)$$

β se emplea sencillamente para identificar el tipo de cámara. Los coeficientes K_8 y K_9 son finalmente

$$\beta=1 \quad , \quad K_8 = L_C r^2 / 2K_2 \quad ; \quad K_9 = K_8(2\theta - \text{sen}2\theta) + Q_C$$

$$\beta=2 \quad , \quad K_8 = \pi r^3 / 12K_2 \quad ; \quad K_9 = K_8(\cos3\theta - 9\cos\theta) + Q_C$$

Resultan de interés las expresiones siguientes para calcular α , dado β , y para calcular K_9 en el instante t , a partir del

valor de K_9 en el instante previo $t-\Delta t$:

$$\alpha = \beta(3 - \beta)/2$$

$$K_9(t) = K_9(t-\Delta t) + 2Q_C, \quad \beta=1,2$$

3.2 SOLUCION DE LAS ECUACIONES

La ecuación general que define el comportamiento transitorio de la cámara de aire en una conducción ha sido determinada en función de dos variables : carga de presión H_p en el punto de conexión y Q_{PC} a través de ésta, de tal manera que $H_p = H_p(Q_{PC})$. Evidentemente se requiere de otra ecuación complementaria asociada al flujo no permanente en la tubería, que permita evaluar las variaciones de H_p y Q_{PC} .

En efecto, el análisis de golpe de ariete mediante el método de las características (capítulo 2.1.3) permite calcular cargas y gastos de flujo en diferentes puntos a lo largo de una línea y en este caso, la cámara de aire resulta ser una frontera que impone condiciones particulares al sistema hidráulico sujeto a oscilaciones de presión.

En la figura 3.2, se mostró previamente la ubicación de una

cámara de aire en la tubería, localizada en un punto C ; para el instante de tiempo t se conocen valores de carga y gasto tanto en el punto C como en los adyacentes A y B. A través de las curvas características la información se transmite en distancia y tiempo, desde estos puntos adyacentes, para evaluar carga H_p y gastos Q_{p1} y Q_{p2} inmediatamente antes y después de la cámara, en el instante siguiente $t+\Delta t$. En la figura 3.5 se muestra la cámara de aire como frontera interna en el método de las características y, de acuerdo con el capítulo 2.1.3, las ecuaciones de C^+ y C^- para los puntos A y B son

$$Q_{p1} = C_p - Ca_1 H_p \quad (3.2.1)$$

$$Q_{p2} = C_n + Ca_2 H_p \quad (3.2.2)$$

característica positiva y negativa respectivamente, donde C_p y C_n están dadas por las ecuaciones 2.1.14; en estas expresiones los coeficientes Ca y F se diferencian con un subíndice 1 para el tramo AC, y con subíndice 2 para el tramo CB, dado que pueden tener diferentes áreas, celeridades o coeficientes de fricción (ver expresiones de Ca y F , ecuaciones 2.1.14).

En el instante t , se conocen C_p y C_n , así como Ca_1 y Ca_2 . Para plantear una ecuación del tipo $H_p = H_p(Q_{pC})$, donde Q_{pC} es el gasto a través del orificio de la cámara en el instante $t+\Delta t$, se tomará en cuenta la ecuación de continuidad 3.1.4, previamente

definida. Sustituyendo Q_{p1} de 3.2.1 y Q_{p2} de 3.2,2 en dicha ecuación, se tiene

$$C_n - C_p + (C_{a1} + C_{a2})H_p + Q_{PC} = 0$$

Al agrupar constantes y despejar H_p puede expresarse

$$H_p = \frac{K_C}{K_B} - \frac{Q_{PC}}{K_B} \quad (3.2.3)$$

donde $K_B = C_{a1} + C_{a2}$

$K_C = C_p - C_n$

La ecuación general del fenómeno transitorio en la cámara de aire se resuelve finalmente al igualar la ecuación anterior con la 3.1.21. A continuación se presenta la expresión general encontrada y un resumen de las ecuaciones para valuar sus coeficientes, en diversas condiciones; también se incluye un listado de las variables utilizadas.

$$K_1(K_3 - K_2Q_{PC})^{-1.2} + K_5|Q_{PC}|Q_{PC} + K_6Q_{PC} + K_7 - r\cos\theta_p = 0 \quad (3.2.4)$$

$$\text{Si } \begin{cases} \beta=0 & (\text{c.c.v}) , & \theta_p = \pi/2 \\ \beta=1 & (\text{c.c.h}) , & Q_{PC} = K_8(2\theta_p - \text{sen}2\theta_p) - K_9 \\ \beta=2 & (\text{c.e}) , & Q_{PC} = K_8(\cos3\theta_p - 9\cos\theta_p) - K_9 \end{cases}$$

Las constantes finales son las siguientes :

<u>Constante</u>	<u>Observación</u>
$K_1 = (H_o + h_b - z_o) C_o^{1.2}$	Invariante
$K_2 = \Delta t / 2$	Invariante
$K_3 = C - K_2 Q_C$	Varía cada Δt
$K_4 = k_v \quad \text{para } Q_{PC} < 0, \text{ sale}$ $= k_r \quad \text{para } Q_{PC} \geq 0, \text{ entra}$	Varía según Q_{PC}
(3.2.5a) $K_5 = \frac{f L_{TC}}{2 g D_{TC} A_{TC}^2} + K_4$	Cte. de pérdidas
$K_6 = K_{TC} + (1 - \alpha) \frac{K_2}{A_c} + \frac{1}{K_B}$	Invariante
$K_7 = Q_C \left[\frac{K_2}{A_c} (1 - \alpha) - K_{TC} \right] - h_b +$ $+ \alpha (r + z_{\min}) + (1 - \alpha) z - K_C / K_B$	Varía cada Δt
donde $\alpha = \frac{\beta}{2} (3 - \beta)$	
$K_{TC} = \frac{L_{TC}}{g \Delta t A_{TC}}$	Cte. tubo corto
$K_B = Ca_1 + Ca_2 ; \quad K_C = Cp - Cn$	Constantes características



DEPFI

Cte. tubo corto

Constantes características

Además, se tiene que

	<u>Constante</u>	<u>Observación</u>
(3.2.5b)	$K_8 = \frac{L_c r^2}{2K_2} \quad \text{para } \beta=1$	Invariante
	$K_8 = \frac{\pi r^3}{12K_2} \quad \text{para } \beta=2$	
	$K_9(t) = K_9(t-\Delta t) + 2Q_C$	Varía cada Δt

Datos conocidos para $t=0$:

$\beta, H_o, h_b, z_o, z_{\text{mín}}, C_o, \Delta t, k_v, k_r, f, r, L_c, D_{TC}, L_{TC}$.

Valores iniciales para $t=0$:

$$Q_C = 0.0$$

$$\theta_o = \text{ang } \cos\left(\frac{r - z_o + z_{\text{mín}}}{r}\right)$$

$$K_9(t=0) = K_8(2\theta_o - \text{sen}2\theta_o) \quad \text{para } \beta=1$$

$$K_9(t=0) = K_8(\cos3\theta_o - 9\cos\theta_o) \quad \text{para } \beta=2$$

Las variables que intervienen en la ecuación general de solución con el método de las características, obtenidas a lo largo del capítulo 3, se enlistan a continuación :

Q_C y Q_{pC} , gasto a través de la conexión de cámara de aire, en m^3/s , en el instante t y $t+\Delta t$ respectivamente

θ y θ_p , mitad del ángulo vertical inferior comprendido entre los radios que pasan por la intersección de la superficie de fluido con el perímetro de la cámara, en el tiempo t y $t+\Delta t$

z_o , z y z_p , elevación de la superficie de fluido en el interior del dispositivo, en m, para $t=0$, t y $t+\Delta t$ respectivamente.

$z_{\text{mín}}$ elevación mínima de fluido en la cámara (fondo) en m

H_o , H y H_p , elevación piezométrica o carga de presión relativa en el punto de conexión del tanque hidroneumático con la línea (punto C) en m, para $t=0$, t y $t+\Delta t$

h_b carga de presión barométrica, en m

C_o , C y C_p , volumen de aire o gas confinado en la cámara, en m^3 , en los instantes $t=0$, t y $t+\Delta t$

Δt incremento de tiempo, en s

k_r y k_v , coeficientes de pérdidas en la conexión, de entrada y salida

f coeficiente de pérdidas de Darcy para el tubo corto

D_c y A_c , diámetro en m y área transversal en m^2 de la cámara

r radio de la cámara, en m

D_{TC} y A_{TC} , diámetro en m y área transversal en m^2 del tubo corto

L_c longitud de la cámara (c.c.v ó c.c.h), en m

L_{TC} longitud del tubo corto (entre cámara y conducto), en m

$\alpha = 0$ ó 1 , variable para añadir o quitar términos en K_6 y K_7
 $\beta = 0, 1$ ó 2 , variable para identificar el tipo de cámara
 K_{TC} constante del tubo corto definida en 3.2.5a
 K_B y K_C , constantes en las ecuaciones de las curvas caracte-
 rísticas definidas en 3.2.3 (ver también capítulo 2.1).

Como se observa, la ecuación 3.2.4 depende de la variable Q_{PC} , asociada a la variación de flujo en la tubería, así como de la variable θ_p , asociada a la forma de la cámara de aire. Los valores que toman Q_{PC} y θ_p en el instante $t + \Delta t$ son aquellos que anulan la función $F(Q_{PC}, \theta_p)$, no lineal e implícita, definida por dicha ecuación.

Dado que las ecuaciones auxiliares del tipo $Q_{PC} = Q_{PC}(\theta_p)$ son explícitas en Q_{PC} , pueden sustituirse en 3.2.4, obteniendo así una función general $G(\theta_p)$ que solo depende de una variable. La solución consiste en encontrar el valor de θ_p (por consiguiente de Q_{PC}) que anule la función

$$F(Q_{PC}, \theta_p) = G(\theta_p) = 0, \quad \beta = 1, 2 \quad (3.2.6)$$

En cámaras cilíndricas verticales el último término en θ_p de la ecuación 3.2.5 se anula (con $\theta_p = \pi/2$ pues el área es constante) y entonces, la solución consiste en encontrar el valor

de Q_{PC} cuando

$$F(Q_{PC}, \theta_P) = G(Q_{PC}) = 0, \quad \beta=0 \quad (3.2.8)$$

Las ecuaciones implícitas anteriores pueden resolverse mediante un método iterativo, como el de Newton-Raphson, cuyo algoritmo es en este caso

$$\theta_{P(i+1)} = \theta_{P(i)} - \frac{G(\theta_{P(i)})}{G'(\theta_{P(i)})} \quad (3.2.9)$$

siendo $G(\theta_{P(i)})$ la ecuación 3.2.7 evaluada con $\theta_P = \theta_{P(i)}$
 $G'(\theta_{P(i)})$ la derivada de $G(\theta_P)$ evaluada con $\theta_{P(i)}$
 i el número de iteración.

Así, un valor $\theta_{P(0)}$ inicial (puede ser θ en el instante t conocido) se calcula $\theta_{P(1)}$ con 3.2.8; si $|\theta_{P(1)} - \theta_{P(0)}| >$ una tolerancia, se calcula $\theta_{P(2)}$ con $\theta_{P(1)}$ y la ecuación 3.2.8. El cálculo se repite hasta que $|\theta_{P(i+1)} - \theta_{P(i)}| \leq$ tolerancia. Para la función $G(Q_{PC})$ se tendría un procedimiento totalmente similar, pero encontrando $Q_{PC(i+1)}$ en cada iteración. La derivada $G'(\theta_P)$ vale

$$G'(\theta_P) = \frac{dF}{d\theta_P} = \frac{\partial F}{\partial \theta_P} + \frac{\partial F}{\partial Q_{PC}} \cdot \frac{dQ_{PC}}{d\theta_P}$$

o también

$$G' = \frac{\partial F}{\partial \theta_P} + \frac{\partial F}{\partial Q_{PC}} \cdot Q' \quad (3.2.9)$$

donde $Q' = dQ_{PC}/d\theta_P$. Con 3.2.9, G' es una expresión general práctica ya que permite obtener $G'(Q_{PC})$ siempre y cuando $Q'=1$ (Q' sería dQ_{PC}/dQ_{PC} y la parcial $\partial F/\partial \theta_P$ sería nula, pues se trata del caso de una c.c.v donde $\theta_P = \text{constante}$).

El procedimiento de cálculo para resolver la ecuación general es el siguiente :

1°) Para el instante $t=0$ se calculan las invariantes $K_1, K_2, \alpha, K_6, K_8, K_{TC}$ y K_8 , así como los valores iniciales de K_3, K_7, K_9, θ_0 y Q_C .

2°) Para el instante $t+\Delta t$:

_ Calcular K_3, K_7, K_9, K_C (datos del instante t).

_ Considerar $\theta_{P(i=0)} = \theta$ para $\beta=1,2$

$Q_{PC(i=0)} = Q_C$ para $\beta=0$ (θ y Q_C , datos de t)

_ Emplear el algoritmo de Newton-Raphson para iterar, de acuerdo con 3.2.8, hasta que $\theta_{P(i+1)} \cong \theta_{P(i)}$ ó $Q_{PC(i+1)} \cong Q_{PC(i)}$.

Para cada tanteo o iteración $i=0,1,2,\dots$ el procedimiento general consiste en :

a) Calcular $Q_{PC(i)}$, según β :

$$\beta = 0, \quad Q_{PC(i)} = Q_C, \quad \theta_{P(i)} = \pi/2$$

$$\beta = 1, \quad Q_{PC(i)} = K_8(2\theta_{P(i)} - \text{sen}2\theta_{P(i)}) - K_9$$

$$\beta = 2, \quad Q_{PC(i)} = K_8 (\cos 3\theta_{P(i)} - 9\cos\theta_{P(i)}) - K_9$$

b) Comparar $Q_{PC(i)}$ con cero para seleccionar K_4 y con ello calcular K_5 (ver constantes de 3.2.5a).

c) Calcular $Q'(i)$, según :

$$\beta = 0, \quad Q'(i) = 1$$

$$\beta = 1, \quad Q'(i) = 2K_8(1 - \cos 2\theta_{P(i)})$$

$$\beta = 2, \quad Q'(i) = 3K_8(3\text{sen}\theta_{P(i)} - \text{sen}3\theta_{P(i)}) \quad (3.2.10)$$

d) Calcular $G(i)$ y $G'(i)$:

$$G(i) = K_1(K_3 - K_2Q_{PC(i)})^{-1.2} + K_5|Q_{PC(i)}|Q_{PC(i)} - K_6Q_{PC(i)} + K_7 - r\cos\theta_{P(i)}$$

$$G'(i) = [K_{10}(K_3 - K_2Q_{PC(i)})^{-2.2} + 2K_5|Q_{PC(i)}| - K_6]Q'(i) + \text{arsen}\theta_{P(i)} \quad (3.2.11)$$

donde $K_{10} = 1.2K_1K_2$

α se añade al último término para anularlo en el caso de $\beta=0$. La derivada del producto $Q_{PC}|Q_{PC}|$ es $2|Q_{PC}|$, siempre positiva.

e) Haciendo $x_{(i)} = Q_{PC(i)}$ para $\beta=0$ ó $x_{(i)} = \theta_{P(i)}$ para $\beta=1,2$, calcular

$$x_{(i+1)} = x_{(i)} - G(i)/G'(i)$$

f) Si $|x_{(i+1)} - x_{(i)}| < \text{tolerancia}$, terminan las iteraciones.

Si no se cumple, hacer

$$\underline{x}_{(i+1)} = Q_{PC(i+1)} \text{ para } \beta=0 \quad \text{ó} \quad \underline{x}_{(i+1)} = \theta_P(i+1) \text{ para } \beta=1,2$$

$\underline{i} = i + 1$ y regresar al paso a.

Una vez calculados los valores de Q_{PC} y θ_P para el instante $t+\Delta t$ se calculan en forma directa las variables restantes, a saber :

La carga de presión H_P , se calcula mediante 3.2.3.

Los gastos Q_{P1} y Q_{P2} , se calculan con 3.2.1, 3.2.2 y el valor H_P .

La elevación z_P , se obtiene con 3.1.17 para $\beta=1,2$ y con 3.1.20 para $\beta=0$.

El volumen de aire C_P , se determina finalmente con la expresión 3.1.8.

En el apéndice B se presenta un programa de procesamiento que permite sistematizar el método de solución de las ecuaciones características, para analizar el fenómeno transitorio del golpe de ariete en presencia de una cámara de aire. Además el programa incluye una subrutina para analizar una falla de bombeo, que puede ser útil para revisar las presiones críticas en una tubería sin protecciones. Finalmente, en el capítulo 4.2 se presenta una aplicación del programa para calcular las

oscilaciones en un sistema protegido con cámara de aire.

3.3 METODOS PRELIMINARES DE DIMENSIONAMIENTO

Esta última parte del capítulo trata algunos criterios preliminares para dimensionar una cámara de aire anti-ariete. En primer lugar, se plantean las ecuaciones de oscilación de masa del sistema cámara-conducto-depósito al tratar como incompresible al fluido. Después se discuten algunos métodos que relacionan gráficamente parámetros adimensionales, para estimar presiones críticas y volúmenes de aire en condiciones transitorias desfavorables, y se selecciona uno de ellos con el fin de presentar sus gráficas correspondientes al final del capítulo.

3.3.1 *Criterio de Oscilación de Masa*

Cuando los cambios de velocidad de flujo en un sistema de conducción son suficientemente lentos o controlados durante un transitorio hidráulico, puede despreciarse el efecto de compresibilidad del fluido y elasticidad de la tubería y estudiar el fenómeno como una simple oscilación de masa; en otras palabras, pueden despreciarse los efectos de golpe de ariete.

En un sistema protegido por una cámara de aire ocurren variaciones transitorias de presión y velocidad tanto por oscilación de onda, cuya influencia se asocia al parámetro adimensional A, como por oscilación de masa, cuyo efecto se asocia al coeficiente B. Sin embargo, tal como se puede verificar en los resultados del análisis dimensional -capítulo 3.3.3-, la influencia del golpe de ariete es pequeña cuando $A/B \geq 10$. Esto se observa claramente en la envolventes de presiones máxima y mínima, las cuales tienden a ser rectas cuando el flujo se considera incompresible.

En efecto, si la relación $A/B \geq 10$ se expresa en términos de sus variables, de acuerdo con las ecuaciones 2.3.2 y 2.3.4, se tiene que

$$\frac{A}{B} = \frac{aP_0C_0}{P_S LQ_0} = \frac{a(K+1)C_0}{LQ_0} \geq 10$$

donde también se ha utilizado la definición del coeficiente adimensional de pérdidas en la conducción, K, en función de la presión dinámica inicial P_0 y estática final P_S del sistema, es decir, $P_0/P_S = K + 1$ (ecuación 2.3.5a). Si además se acepta un valor medio de la celeridad $a=1000$ m/s y también $K \approx 0.0$ resulta

$$C_0 \geq 0.01 LQ_0 \quad (3.3.1)$$

que coincide precisamente con la expresión propuesta A.R. Manuel [5] para estimar el volumen que requiere una cámara de oscilación abierta en una maniobra de cierre; L es la longitud de conducción en m, y Q el gasto establecido antes del cierre en m^3/s . Esta expresión es válida si el periodo de oscilación de masa dura cuando menos 10 veces el periodo de oscilación de onda de la tubería, $2L/a$; así, para un periodo de oscilación ($T=1$ en la ecuación adimensional 2.3.6) y una reducción lineal del gasto de Q_0 a 0.0, se tiene

$$1 = t \frac{Q}{C} \quad ; \quad C_0 = \left(10 \times \frac{2L}{a}\right) \left(\frac{Q_0 + 0.0}{2}\right)$$

o sea $C_0 = (10/a)LQ_0 = 0.01 LQ_0$, para $a \approx 1000$ m/s

Por otro lado, a pesar de que el criterio de oscilación de masa para análisis transitorio de cámaras de aire sea solo una aproximación del fenómeno, el método permite establecer en forma muy cercana la variación de presiones en una cámara, puesto que corresponde a las oscilaciones de nivel en la misma, y la duración global en fases de vaciado y llenado.

Otra de las ventajas es que, al suponer el fluido circulante como incompresible, se manejan en el sistema solo dos incógnitas, variables respecto al tiempo; éstas son : velocidad V de la columna fluida que se mueve entre la cámara y un depósito

de nivel fijo, y carga de presión H al comprimirse y expanderse el volumen de aire. Por tener dos incógnitas, es necesario definir cuando menos dos ecuaciones, que son la ecuación de cantidad de movimiento o dinámica y la ecuación de conservación de masa o continuidad.

Sea, entonces, una tubería de sección A en la que se induce una fuerza de presión $\rho g A(\Delta H)$, debido al desnivel de carga ΔH entre una cámara y un depósito de nivel fijo en sus extremos; esta fuerza es igual a la masa de la columna fluida ρAL multiplicada por su aceleración dV/dt , donde V es la velocidad de dicha columna, ρ la densidad de líquido y L la longitud de tubería. Al movimiento se opone la fuerza de fricción $-\tau PL$ siendo τ el esfuerzo cortante de fricción y que actúa en el perímetro mojado P ; la expresión resultante es

$$\rho g A(\Delta H) - \tau PL = \rho AL \frac{dV}{dt}$$

Si se acepta la expresión $\tau = f/8(\rho V^2)$, para flujo turbulento permanente (fórmula de Darcy-Weisbach para pérdidas por fricción), al dividir la ecuación entre la masa ρAL y sustituir τ se obtiene

$$\frac{dV}{dt} = \frac{g}{L} \Delta H - \frac{fP}{8A} V^2 \quad (3.3.2)$$

que es la forma diferencial de la ecuación dinámica, en el esquema-cámara-conducto-depósito.

La ecuación de continuidad se establece en el punto de conexión entre cámara de aire y conducto; dicha ecuación ha sido planteada en el capítulo 3.1 y en este caso puede reescribirse como

$$Q_E = Q + A_C \frac{dz}{dt} \quad (3.3.3)$$

donde Q_E es el gasto de entrada al sistema en m^3/s

Q el gasto de la conducción en m^3/s

A_C área transversal de la cámara en m^2 (puede ser constante como en la cámara cilíndrica vertical)

dz/dt velocidad de ascenso o descenso de fluido, en m/s , donde z es la elevación de nivel correspondiente en el dispositivo.

Para hacer compatibles las ecuaciones anteriores es necesario definir algunas relaciones adicionales. Primeramente, de acuerdo con la figura 2.8, el desnivel ΔH puede expresarse como $\Delta H = H - H_S$, siendo H la elevación piezométrica en el punto de conexión y H_S el nivel fijo del depósito aguas abajo. Si se sustituye H por la expresión 3.1.7 se tiene que

$$\Delta H = P + z + K_4 A_C^2 \frac{dz}{dt} \left| \frac{dz}{dt} \right| - h_b - H_S \quad (3.3.4)$$

en donde se tomó en consideración la ecuación 3.1.6 que define las pérdidas de orificio, y además que $Q = A_c (dz/dt)$. P es la carga de presión absoluta a la cual está sometido el volumen de aire confinado C y cuya relación está dada por $P = K_1 C^{-1.2}$.

Debido a que el volumen de aire C varía con las oscilaciones transitorias, la carga de presión tendrá que definirse como $P = K_1 (C_0 - \Delta C)^{-1.2}$, expresión en donde el volumen ΔC , en forma similar a ΔH , representa la diferencia respecto a condiciones iniciales de flujo. Al hacer referencia a la ecuación 3.1.16 para ΔC , la carga de presión absoluta queda como

$$P = K_1 (C_0 + (z_0 - z)A_c)^{-1.2} \quad (3.3.5)$$

Es fácil constatar que cuando $z = z_0$, la carga P corresponde a las condiciones iniciales en las que $C = C_0$.

Finalmente, si se multiplica la ecuación 3.3.2 por A y se sustituye ΔH según 3.3.4 y 3.3.5 se obtiene una ecuación diferencial asociada a las mismas variables que la ecuación de continuidad. El resultado es un sistema de dos ecuaciones diferenciales F y G en función del gasto Q en la tubería y el nivel fluido z en la cámara de aire, o sea,

$$F(z, Q) = \frac{dz}{dt} = \frac{Q_E - Q}{A_c} \quad (3.3.6)$$

$$G(z, Q) = \frac{dQ}{dt} = \frac{Ag}{L} [K_1 (C_o + (z_o - z)A_c)^{-1.2} + z + K_2 |F|F + K_3] - K_5 |Q|Q \quad (3.3.7)$$

donde $K_1 = (H_o + h_b - z_o) C_o^{1.2}$ (según ecuación 3.1.9)

$K_2 = K_4 A_c^2$; $K_4 = k_e$, coeficiente de pérdidas de entrada, $Q < 0.0$

k_v , coeficiente de pérdidas de salida

$K_3 = - (H_s + h_b)$

$K_5 = \frac{f}{2DA}$, constante en la que se ha sustituido P/A por $4/D$, para una tubería de diámetro D .

Las expresiones anteriores forman un sistema de ecuaciones diferenciales, una de ellas no lineal, para las cuales no existe solución cerrada de integración; sin embargo, se pueden manejar fácilmente con algún método numérico. Una solución numérica del criterio de oscilación de masa con el método de Runge-Kutta se muestra más adelante en el apéndice C, con un programa de computadora, y en el capítulo 4.1, con un ejemplo de aplicación.

3.3.2 Comparación de Diversas Gráficas de Dimensionamiento

El empleo de gráficas de dimensionamiento para cámaras de ai re anti-ariete es una técnica que existe desde hace varias décadas. Elaboradas por diversidad de autores, todas ellas permiten estimar el volumen de aire que se requiere para limitar presiones críticas en una línea de bombeo, al ocurrir una falla repentina de energía; y todas consideran el sistema aislado cámara-conducto-depósito ubicado junto a una válvula de retención, justo después de la(s) bomba(s).

Las hipótesis empleadas por cada uno de los autores representan las diferencias fundamentales entre los métodos y por consiguiente en los resultados de dimensionamiento, además de las discrepancias que se tienen por criterios de simplificación y presentación de gráficas. En general, las primeras publicaciones consideran hipótesis relativamente simples, las cuales incurren en resultados poco precisos para ciertos rangos de sus parámetros adimensionales. Los trabajos posteriores emplearon técnicas numéricas y consideraciones más complejas que acercaron más los resultados al comportamiento de las cámaras.

Debido a las diversas limitaciones o diferencias de crite-

rios es necesario, en todo caso, hacer un análisis comparativo de las gráficas para seleccionar finalmente una de ellas. A continuación se apuntan una serie de observaciones y críticas de diversas gráficas de dimensionamiento para cámaras de aire, basadas en varios estudios y artículos referidos en la bibliografía. El orden de presentación tiene una secuencia estrictamente cronológica.

- a) Sliosberg-Vibert (1952) [5]. Estos autores tomaron en cuenta las hipótesis siguientes : Las pérdidas de carga en la línea y entrada de la cámara se consideran despreciables; la compresibilidad del aire sigue la Ley de Mariotte $pC =$ constante; el criterio de oscilación de masa rige el comportamiento del fenómeno. Como método de cálculo establecieron un balance energético e integraron las ecuaciones que definen el movimiento; posteriormente, Sliosberg elaboró una gráfica que incluía en sus resultados el efecto de las pérdidas de carga en la conducción. Los parámetros adimensionales utilizados fueron

$$n = \frac{V_o^2 LA}{2gC_o P_o} \quad \text{y} \quad t = \frac{TQ_o}{C_o}$$

- b) Combes-Borot (1952) [6]. Lo más relevante de la gráfica presentada por Combes y Borot es la evaluación directa de

las subpresiones en función de la pérdida de carga en el conducto; como hipótesis principales establecieron el criterio de oscilación de masa, pérdidas de carga lineales en la tubería, Ley de Mariotte $pC=\text{constante}$ y la consideración de pérdidas en la conexión de la cámara. Con la gráfica pueden determinarse los valores adimensionales $z_{\text{mín}}/z_0$ y $z_{\text{máx}}/z_0$ en la cámara, en función de los parámetros n (mismo del caso a) y coeficientes adimensionales de pérdidas de carga.

Debido a las limitaciones de cálculo por oscilación de masa, los resultados son confiables en esquemas de conducción en que el riesgo por subpresiones solo pueda presentarse cerca de la cámara y en los que el cálculo por medio de este criterio sea aceptable (capítulo 3.3.1).

c) Lupton (1953) [7]. El autor determinó en realidad expresiones para calcular el volumen de aire y dimensiones de la cámara mínimos para evitar una separación de columna en una línea de bombeo, por lo menos en el caso de un punto del perfil que se localice a tres cuartas partes del recorrido de la tubería y con igual elevación que el depósito final de almacenamiento. En el Sistema Internacional de unidades, estas expresiones son

$$\text{Volumen total} = \frac{(H_s - z_o + 36.6)LAV_o}{8361} \text{ (m}^3\text{)} \quad (3.3.8)$$

$$\text{Volumen de aire, } C_o = \frac{(H_s - z_o)LAV_o}{8361} \text{ (m}^3\text{)} \quad (3.3.9)$$

donde H_s representa la elevación del almacenamiento y z_o la elevación de fluido en la cámara; la carga estática, es decir $H_s - z_o$, debe ser mayor de 15 m.

- d) Evans-Crawford (1954). Debido a que la publicación de estas gráficas de diseño es un antecedente del trabajo presentado 20 años más tarde por Graze y Forrest, se apuntan más adelante las características principales de estos criterios en forma paralela.
- e) Dubin-Gueneau (1955) [8]. Se plantean como hipótesis fundamentales las siguientes : Criterio de oscilación de onda; Ley de Mariotte $pC=\text{constante}$; se desprecian las pérdidas de carga en la línea y ; se optimizan las pérdidas a la entrada de la cámara. Como método de cálculo se sistematizaron las evaluaciones mediante el método de Bergeron, planteado en su forma analítica.

Los números adimensionales A y B definidos en el capítulo 2.3 son empleados justamente en la presentación de resul-

tados. Se observa que el número adimensional B es igual al doble del número n de Combes y Borot, y de Sliosberg; por su parte, el parámetro A es función de la celeridad, la cual es propia de los métodos basados en el principio de oscilación de onda.

La presentación de estas gráficas es interesante pues se hace superponer el perfil de la tubería a un conjunto de envolventes de subpresión, previamente calculadas, y con ello pueden conocerse las presiones mínimas en cualquier punto del perfil. Sin embargo, los resultados corresponden únicamente al caso de pérdidas por fricción nulas.

Con relación a las presiones máximas, Dubin y Gueneau pusieron en evidencia un valor óptimo del coeficiente de pérdidas K_r a la entrada de la cámara, pero, puede verse que las gráficas de sobrepresión corresponden a valores de K_r muy grandes (2 a 15), es decir, a dimensiones de orificio muy reducidas.

- f) Parmakian (1963) [9]. Como las gráficas precedentes, Parmakian utilizó los criterios de oscilación de onda y pérdidas de carga nulas en la tubería, dado que el total de pérdidas asociado a los resultados corresponde solo a las de conexión entre cámara y conducto. Otras dos hipótesis

son : ley politrópica para la compresibilidad del aire, $pC^{1.2} = \text{constante}$, y, relación de 2.5 a 1 entre las pérdidas de entrada y salida del tanque hidroneumático. El criterio de cálculo desarrollado consistió en una solución gráfica con el criterio del golpe de ariete, definiéndose a su vez los parámetros adimensionales empleados en las gráficas :

$$\rho = \frac{aV_0}{2gP_s} \quad \text{y} \quad \frac{2C_0a}{Q_0L}$$

Estas relaciones corresponden a $A/2$ y $2A/B$ respectivamente, de acuerdo con los parámetros definidos en el capítulo anterior.

Mediante un análisis de resultados se observa que la presiones máxima y mínima en la bomba y a la mitad de la tubería se estimaron en los rangos siguientes : para $2\rho=0.5$ $2C_0a/Q_0L$ varía de 2 a 20 y para $2\rho=4$, el mismo parámetro varía de 10 a 80; esto es equivalente al rango de análisis de

$$0.5 \leq A \leq 4.0$$

$$0.1 \leq B \leq 8.0$$

Para las gráficas de sobrepresión, los coeficientes de pérdida de carga adimensionales ($K_r = 0, 0.3, 0.5$ y 0.7) son valores muy bajos debido al hecho de que, al haberse fijado una relación disimétrica, no se pueden tener pérdidas

fuertes en la fase de llenado si durante el vaciado se requieren reducir éstas al mínimo.

- g) Graze-Forrest (1974) [10]. Estos autores obtuvieron versiones recientes de las gráficas de Evans y Crawford, al incluir mejores criterios con relación a las pérdidas por fricción. Como suposiciones más importantes consideraron: criterio de oscilación de onda, relación politrópica de $pC^{1.2} = \text{constante}$, relación entre las pérdidas de entrada y salida de la cámara de 2.5 a 1, así como los parámetros a dimensionales siguientes :

$$\rho^* = \frac{aV_0}{gP_0} = A \frac{P_0}{P_s} \quad , \quad \text{característica de la tubería}$$

$$\sigma^* = \frac{2gC_0P_0}{ALV_0} = \frac{2}{B} \quad , \quad \text{característica de cámara de aire}$$

$$K = \frac{H_f}{P_s} = \frac{P_0 - P_s}{P_s} \quad , \quad \text{coeficiente de pérdidas de carga}$$

donde H_f es la pérdida total de carga en el sistema (para mayor referencia, ver capítulo 2.3). En las gráficas de diseño se presentan curvas de sobrepresiones y subpresiones adimensionales contra valores de $(2\rho^*\sigma^*)$.

Según las gráficas de Graze y Forrest, el coeficiente de pérdida de carga total, K , es dividido en dos componentes;

K_3 correspondiente a la fricción en la tubería y K_4 asociado a las pérdidas de entrada en la cámara de aire, de manera que

$$K = K_3 + K_4$$

Los autores presentan familias de curvas con $2\rho^* = 1, 2$ y 4 , en la cámara y a la mitad de la conducción, para diversas combinaciones de K_3 y K_4 (de 0.0 a 0.5). En el trabajo preliminar de Evans y Crawford, $K_3=0$.

- h) Ruus (1977) [11]. Las gráficas presentadas por Ruus para dimensionar cámaras de aire se caracterizan por ser, en general, completas y de resultados confiables. Al igual que los métodos más recientes, el autor se basa en las hipótesis de oscilación de onda, relación politrópica entre volumen y presión del aire, y proporción entre pérdidas de entrada y salida de la cámara del orden de 2.5; considera, igual que todos los autores, la localización del dispositivo cerca de la bomba y el cierre de la válvula de retención en forma simultánea con la falla de energía. Con relación a las pérdidas, la fórmula de fricción de Darcy-Weisbach se supuso válida durante el estado transitorio.

En las gráficas se relacionan los parámetros adimensiona-

les $2\rho^*$, empleado por Graze y Forrest, contra valores de $2C_0 a/Q_0 L$, empleado por Parmakian; el autor presentó curvas con igual coeficiente K de pérdidas ($K = 0.0, 0.3, 0.6, 1.0$ y 2.0), correspondientes a diversos valores fijos de incrementos de carga relativa máxima H_U/P_S y mínima H_D/P_S ($H_U/P_S, -H_D/P_S = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8$ y 1.0). De esta manera pueden interpolarse valores extremos de variación de presión, si se conocen los valores de ρ^* , K y cierto volumen de aire C_0 .

También presentó gráficas para estimar sobrepresiones y subpresiones en la cámara de aire, a la mitad de la tubería y a un cuarto de longitud entre el depósito final y la cámara.

- i) Puech-Meunier (1978) [3]. Estos autores franceses presentaron un estudio de funcionamiento y dimensionamiento de las cámaras de aire anti-ariete. Después de hacer una comparación de los trabajos de varios autores, desarrollaron unas gráficas de dimensionamiento en las que adoptaron la representación de resultados empleada por Dubin y Gueneau, la cual muestra envolventes de subpresión adimensionales para un rango importante de los parámetros A y B . Sin embargo emplearon una relación politrópica para la compresibilidad del aire, es decir, $pC^{1.2} = \text{constante}$ y no limita-

ron la proporción de pérdidas a la entrada y salida de la cámara como Parmakian, Graze y Forrest y Ruus.

Por sus características se han seleccionado estas gráficas para emplearlas como un criterio preliminar de dimensionamiento. En el siguiente capítulo (3.3.3) se muestran las gráficas, se describen más detalladamente y se explica su modo de empleo.

Finalmente, en la tabla 3.1 se presenta en forma sintetizada la comparación de diferentes criterios gráficos de dimensionamiento preliminar para cámaras de aire, de los diversos autores cuyas publicaciones han sido previamente comentadas.

Autor(es)	Año	Criterio de Oscilación de		Pérdidas de carga		Valor n en $PC^n = cte$	Valores de Subpresión en la línea		
		masa	onda	en la línea	conexión (relación)		L/2	L/4	toda
Sliosberg	1952	X		X		1.0			
Combes - Borot	1952	X		X		1.0			
Lupton	1953	X		X		1.0			
Evans - Crawford	1954		X		--	1.0	--		
Dubin - Gueneau	1955		X		variable	1.0			X
Parmakian	1963		X		2.5 a 1	1.2	X		
Graze - Forrest	1974		X	X	2.5 a 1	1.2	X		
Ruus	1977		X	X	2.5 a 1	1.2	X	X	
Puech - Meunier	1978		X	X	variable	1.2			X

TABLA 3.1 Comparación de diversos Criterios Gráficos de Dimensionamiento Preliminar para Cámaras de Aire

3.3.3 Método Gráfico Seleccionado

Las gráficas de dimensionamiento de Puech y Meunier para cámaras de aire, permiten calcular las presiones mínimas en cualquier punto de la línea de conducción, así como estimar presiones máximas en la cámara asociadas a su coeficiente de pérdidas de entrada. De acuerdo con el análisis dimensional, el fenómeno transitorio ha sido definido correctamente por los parámetros A, B y K, es decir,

$$A = \frac{aV_0}{gP_s}, \quad B = \frac{LQ_0V_0}{gP_0C_0}, \quad K = \frac{P_0 - P_s}{P_s}$$

y que son los mismos que han empleado los autores en sus gráficas (ver capítulo 2.3.1).

Por razones de representación gráfica, se ha escogido la carga de presión absoluta P_s para definir A y K -que corresponde a la presión estática sobre la cámara medida desde el nivel de almacenamiento- pues ello permite una comparación entre la envolvente de subpresiones dada por $(P_{\text{mín}} - P_s)/P_s$ y el perfil de la tubería.

En efecto, al establecer un marco de referencia con abscisas x/L y ordenadas P/P_s unitarias, el valor $x/L=0$ representa la

posición de la cámara con ordenada h_b/P_s de presión atmosférica relativa y 0 de presión absoluta al origen (h_b es la carga de presión barométrica), y el valor $x/L=1$ representa la posición del depósito final con $P/P_s=1$ de presión estática actuante sobre la cámara. En cuanto al perfil de la tubería, también puede representarse por similitud, en el mismo sistema adimensional de longitudes y elevaciones (figura 3.6)

Como se señaló previamente, los autores adoptaron la representación gráfica de Dubin y Gueneau por ser muy objetiva y simple de utilizar. En las gráficas de subpresión, el conjunto de valores para los parámetros A, B y K es el siguiente :

A: 0.5 1 2 y 4
 B: 0.1 0.2 0.4 0.6 0.8 1 2 4 10 e ∞
 K: 0 0.1 0.2 0.4 0.6 0.8 1 1.5 y 2 ($C_o=0$)

Cualquier sistema de cámara-conducto depósito para el que se definan A, B y K, le corresponde una sola envolvente adimensional de subpresiones; en otras palabras, para cada par de valores A, K del sistema se tienen tantas envolventes mínimas de presión como volúmenes de aire en la cámara, o valores B, se definan. En las figuras 3.7 a 3.15 se presentan las gráficas de dimensionamiento de la cámara para proteger al sistema de presiones mínimas; cada figura corresponde a un valor

K e incluye a su vez 4 gráficas, una por cada valor de A, en las que se han trazado 10 líneas de subpresión respectivamente, una por cada valor de B. En la construcción de las gráficas se ha despreciado el coeficiente de pérdidas a la salida de la cámara ($K_V=0$).

En lo que concierne a las gráficas de dimensionamiento para sobrepresiones, presentadas en las figuras 3.16 a 3.18, se relacionan valores adimensionales de presión máxima en la cámara $(P_{\text{máx}} - P_S)/P_S$ contra coeficientes de pérdidas en la conexión K_r , debido a la importancia de este parámetro en condiciones de llenado (capítulo 2.3.2). En cada gráfica, correspondiente a un par de valores A, K dados, se han trazado curvas por cada valor de B. El conjunto de valores estudiados es el siguiente :

$(P_{\text{máx}} - P_S)/P_S$ es continuo de 0.025 a 3.0

K_r es continuo de 0.0 a 5.0

A: 0.5 1 2 y 4

B: 0.1 0.2 0.5 1 2 y 4

K: 0 0.5 y 1

Los autores no presentaron envolventes de sobrepresión para diversos puntos de la tubería, por las razones siguientes :

a) El número de parámetros que rigen el fenómeno aumentan, al

incluir K_r , lo que multiplica el número de casos a considerar.

- b) Existe incertidumbre en el cálculo del coeficiente K_r y las fórmulas para estimar su valor son aproximadas.
- c) La "concauidad" de la curva envolvente de presiones máximas, por la cual puede requerirse mayor protección de la tubería en puntos intermedios, es más pronunciada para valores bajos de A ; y como $(P_{\text{máx}} - P_s)/P_s$ está limitada por A , en estos casos las sobrepresiones son también bajas (capítulo 2.3.2).

Finalmente, Puech y Meunier elaboraron una gráfica complementaria para estimar la duración de la fase de vaciado de la cámara de aire (figura 3.19); en ella se tiene una correspondencia entre el valor B y un parámetro adimensional α , proporcional al coeficiente de tiempo $T = tQ_0/C_0$, definido en la ecuación 2.3.6. Cada curva $\alpha(B)$ corresponde a un par de valores A, K ; así, el valor de B permite determinar α y por consiguiente la duración del vaciado de la cámara, dada por

$$t = \alpha \left(A \frac{L}{a} \right) \quad (3.3.10)$$

siendo A el parámetro adimensional empleado en las gráficas, L la longitud de la tubería y a la celeridad.

Por otro lado, el modo de utilización de las gráficas de dimensionamiento descritas puede establecerse en varios pasos, los cuales se comentan a continuación.

- a) Determinación de los números adimensionales A y K. Estos parámetros son característicos de la tubería y se calculan con las expresiones previamente definidas. En general, los valores de A y K no coinciden con los de las series propuestas, pero se seleccionan aquellos que definen el intervalo donde éstos se encuentran, es decir, $A_1 \leq A \leq A_2$ y $K_1 \leq K \leq K_2$.
- b) Construcción de la línea de cavitación en variables reducidas. La cavitación en una tubería se produce cuando se alcanza el valor de la presión de vaporización en cualquier punto de la misma. Para prevenir este fenómeno mediante la instalación de la cámara de aire, es necesario comparar la envolvente de presiones mínimas en el sistema con la llamada línea de cavitación, toda vez que una carga piezométrica inferior a ella pueda inducir riesgos de cavitación.

Como se describió en el capítulo 2.3.3, la línea de cavitación es un trazo paralelo al perfil de la tubería que

se estudia, ubicada en una elevación inferior. Si $z(x)$ corresponde a la cota de un punto del perfil, tomando como origen a la cámara de aire ($x=0$), y P_v corresponde a la presión absoluta de vaporización, la línea de cavitación se localiza en

$$z(x) - h_b + P_v$$

donde $z(x) - h_b$ representa el cero absoluto de presiones, siendo $h_b = 10.33$ m la carga de presión de la atmósfera. En general, es común definir una línea de subpresiones admisibles al añadir un margen de seguridad m a la expresión anterior. Así, cuando se emplea el marco de referencia de presiones absolutas y longitudes adimensionales, la elevación de la línea de subpresiones admisibles P/P_s está dada finalmente por

$$\frac{P}{P_s} = \frac{(z(x) - z_{\text{cámara}}) + P_v + m}{P_s} \quad (3.3.11)$$

donde $z_{\text{cámara}}$ es la elevación de la superficie de fluido en la cámara. Cuando $m=0$, se obtiene la línea de cavitación y no existe margen de seguridad, pero cuando $P_v + m = h_b$ se define el perfil adimensional de la tubería y m es tal que no se admiten presiones inferiores a éste. Cabe señalar que $P_v \approx 0.25$ m.

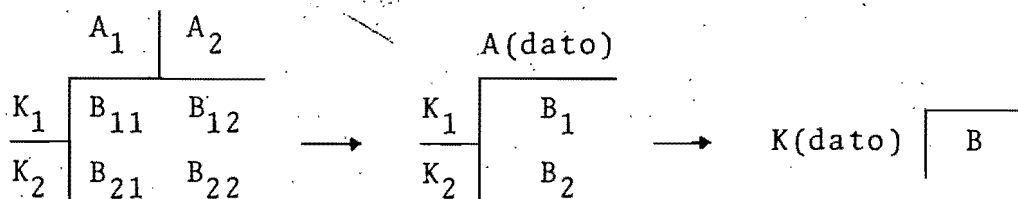
c) Selección del número adimensional B máximo, dados los valores A y K. Después de haber definido el rango de A y K entre los valores representados en las gráficas, es decir, $A_1 \leq A \leq A_2$ y $K_1 \leq K \leq K_2$, se selecciona para cada uno de los cuatro pares de datos (A_i, K_j) el valor máximo de B. El procedimiento para seleccionar B es el siguiente :

_ En una cuadrícula $x/L - P/P_s$ similar a las gráficas de subpresiones (figuras 3.7 a 3.15) se representa la línea o perfil de subpresiones mínimas admisibles.

_ El perfil obtenido se superpone a la cuadrícula correspondiente a los datos (A_i, K_j) .

_ Se selecciona una línea envolvente de subpresiones, asociada a un valor de B, que pase cuando menos sobre el punto más elevado del perfil, para asegurar que cualquier otro punto quede por debajo de dicha envolvente. Pueden hacerse interpolaciones gráficas.

_ En seguida se interpolan los valores de B obtenidos, primero respecto a A y después respecto a K, tal como se ilustra a continuación :



Cuando una línea de subpresiones mínimas admisibles resulte inferior a las envolventes de las gráficas adimensionales ($B > 10$, por ejemplo) : puede diseñarse la cámara con $B=10$; extrapolarse un valor más adecuado para reducir dimensiones (aunque no resulta muy confiable), o; analizar otro tipo de protección de la tubería. En la práctica, sin embargo, un caso de $B > 10$ es raro.

Puede presentarse también el caso en que una envolvente de presiones mínimas tenga una ordenada al origen inferior a la posición de la cámara, pero superior a la línea de subpresiones admisibles. En este caso $P_{\text{mín}} < h_b$ y es conveniente seleccionar otra B (envolvente mayor) ó optar por el diseño de una cámara mixta, descrita en el capítulo 2.3, que opera como cámara de oscilación abierta cuando la carga de presión sea igual que la atmosférica.

- d) Cálculo del volumen de aire y capacidad de la cámara. Una vez determinado el valor de B , se calcula el volumen de aire inicial C_o mediante la expresión

$$C_o = \frac{LQ_oV_o}{gP_oB} \quad (3.3.12)$$

Para calcular el volumen de aire máximo esperado durante el comportamiento transitorio, y consecuentemente la capa

cidad de la cámara, es necesario encontrar el valor de presión mínima $P_{\text{mín}}$ asociado a dicho volumen. Durante el proceso de selección de B para cada uno de los cuatro pares de datos (A_i, K_j) puede encontrarse el valor de $P_{\text{mín}}/P_s$ en la intersección de la envolvente asociada a B con el eje de las abscisas; después, se interpolan los valores de $P_{\text{mín}}$ obtenidos, respecto a A y K :

$$\begin{array}{c} \begin{array}{c|c} A_1 & A_2 \\ \hline K_1 & \begin{array}{c} P_{\text{mín}11} & P_{\text{mín}12} \\ P_{\text{mín}21} & P_{\text{mín}22} \end{array} \\ K_2 & \end{array} \end{array} \longrightarrow \begin{array}{c} A(\text{dato}) \\ \hline K_1 & P_{\text{mín}1} \\ K_2 & P_{\text{mín}2} \end{array} \longrightarrow K(\text{dato}) \begin{array}{c} \hline P_{\text{mín}} \end{array}$$

Así, el volumen máximo de aire al final de la fase de vaciado y la capacidad de la cámara, considerando un coeficiente de seguridad de 20%, resultan (capítulo 2.3) :

$$C_{\text{máx}} = C_o \left(\frac{P_o}{P_{\text{mín}}} \right)^{1/n} \quad (3.3.13)$$

$$C_{\text{total}} = 1.20 C_{\text{máx}}$$

- e) Cálculo de la pérdida de carga K_r , durante la fase de llenado. Como se indicó antes, con las gráficas de dimensionamiento para sobrepresiones se obtiene $P_{\text{máx}}$, en función de las pérdidas de carga (K y K_r) y el volumen de aire

inicial (B) en la cámara.

En forma similar al análisis de subpresiones, el primer paso consiste en trazar la línea de presiones máximas admisibles, la cual está forzosamente asociada a la presión nominal que resiste la tubería en estudio; la elevación de la línea de sobrepresiones admisibles resulta ser ahora

$$\frac{p}{P_s} = \frac{z(x) - z_{\text{cámara}} + P_{\text{nominal}}}{P_s} \quad (3.3.14)$$

En cuanto a la envolvente de presiones máximas, existen dos casos generales :

— Cuando $A > 1$ (con $A/B > 10$) el fenómeno oscilatorio de la cámara se manifiesta en una oscilación de masa del sistema y la envolvente de presiones es una recta (capítulo 3.3.1). Para limitar las presiones, puede trazarse dicha recta de manera que pase por el nivel del depósito final ($x=L$) y el punto más bajo de la línea de sobrepresiones admisibles, con lo que forzosamente se define un valor de $P_{\text{máx}}$ en la cámara ($x=0$).

— Cuando $A < 1$, pueden tenerse presiones mayores a las que limita la recta del caso anterior, aunque las envolventes coincidan en sus extremos. En estas condiciones puede suponerse que la envolvente sea, por seguridad, una

línea horizontal cuya carga piezométrica corresponda al punto más bajo de la línea de presiones máximas admisibles; en muchos casos este punto corresponde a la posición de la cámara ($x=0$) y la presión máxima puede limitarse a P_0 , como criterio preliminar.

Una vez definido el valor de $P_{\text{máx}}$ y conocidos los valores de A , K y B , se deduce el valor de K_r con las gráficas correspondientes (figuras 3.16 a 3.18). Al diseñar posteriormente la conexión de la cámara de aire, deberá tomarse en cuenta que la pérdida de carga en ésta durante la fase de llenado debe ser por lo menos $\Delta H_r = K_r \cdot P_s$, para que no se tengan presiones mayores que el valor máximo prefijado en la selección del coeficiente.

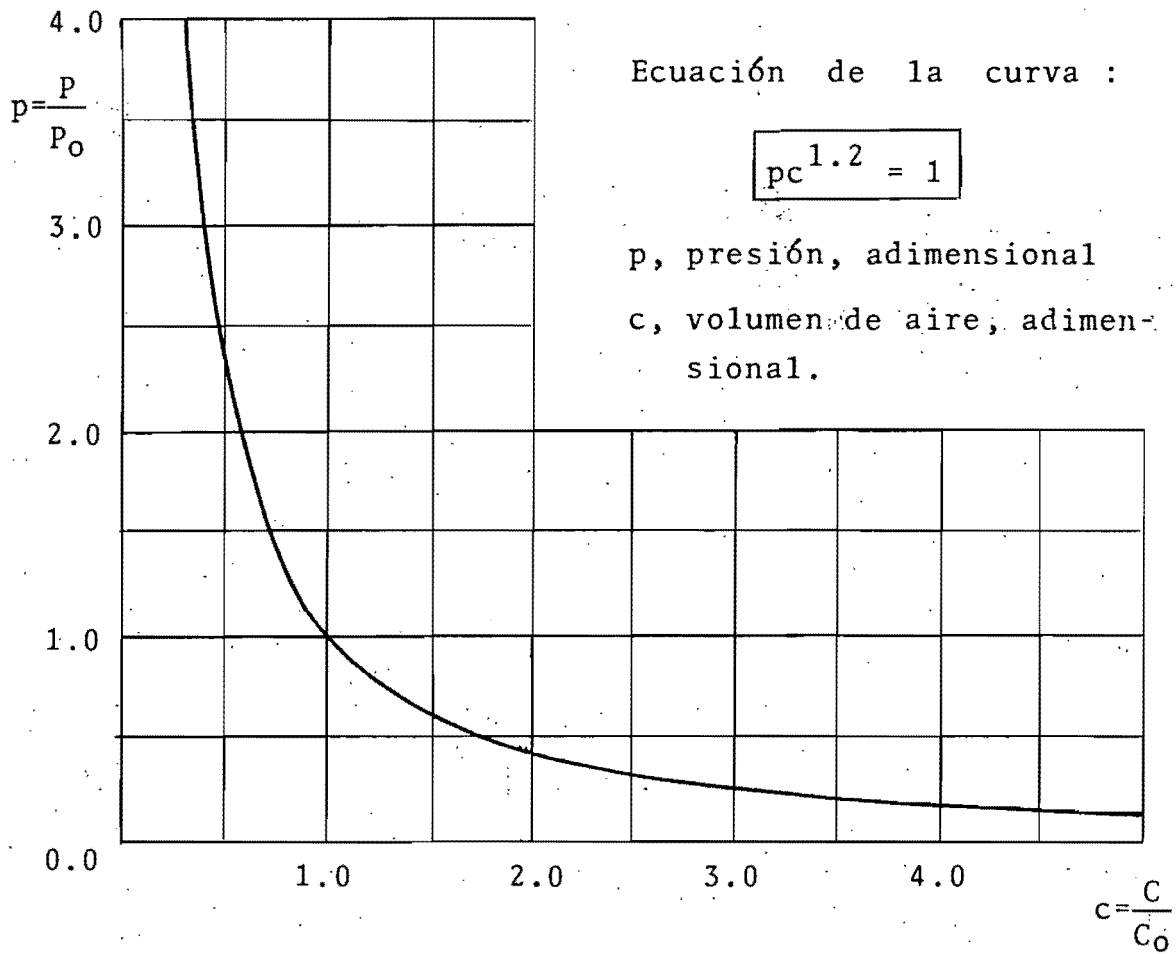


FIGURA 3.1 RELACIÓN POLITRÓPICA PRESIÓN-VOLUMEN DE AIRE

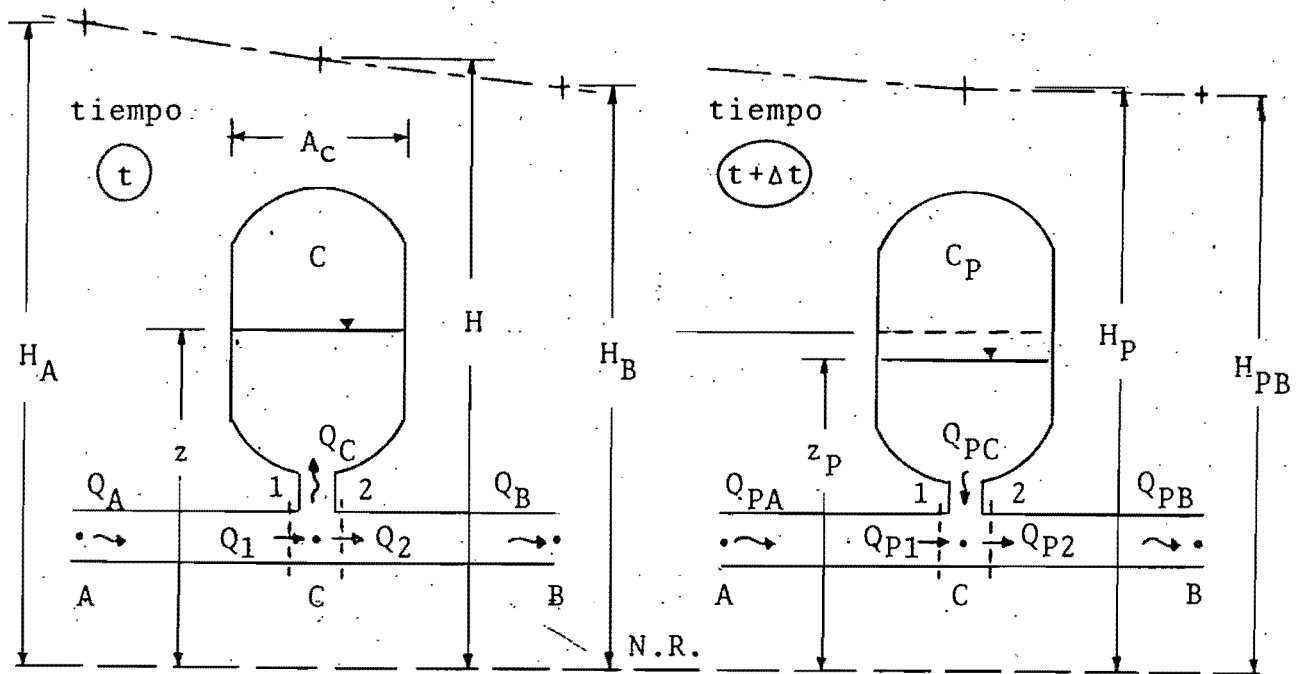


FIGURA 3.2 VARIABLES EMPLEADAS EN LAS ECUACIONES PARA CÁMARA DE AIRE, EN EL TIEMPO T Y T+ΔT.

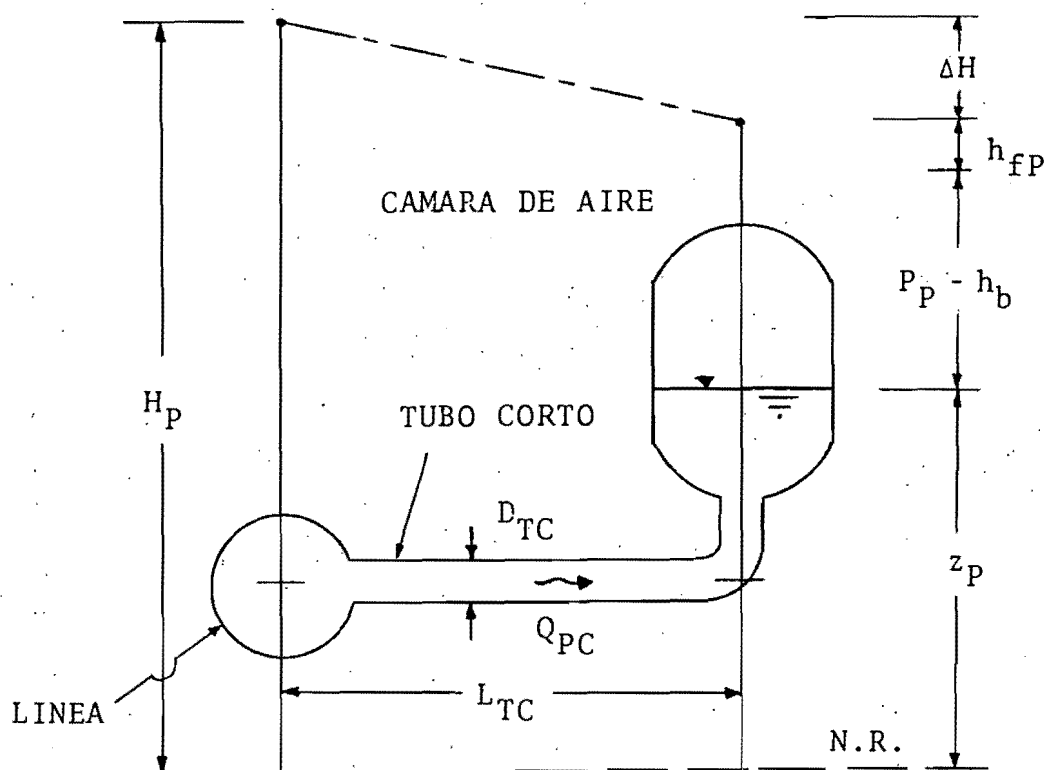


FIGURA 3.3 CÁMARA DE AIRE CONECTADA MEDIANTE TUBO CORTO

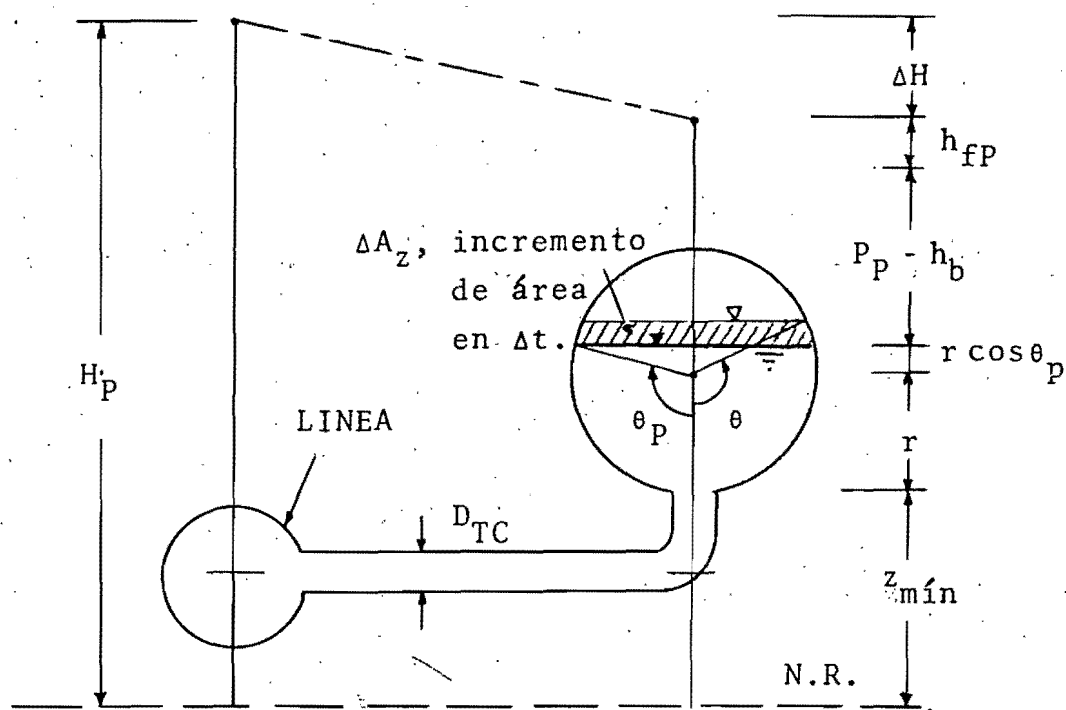


FIGURA 3.4 CORTE VERTICAL-TRANSVERSAL EN UNA CÁMARA CILÍNDRICA (C.C.H) Ó ESFÉRICA (C.E).

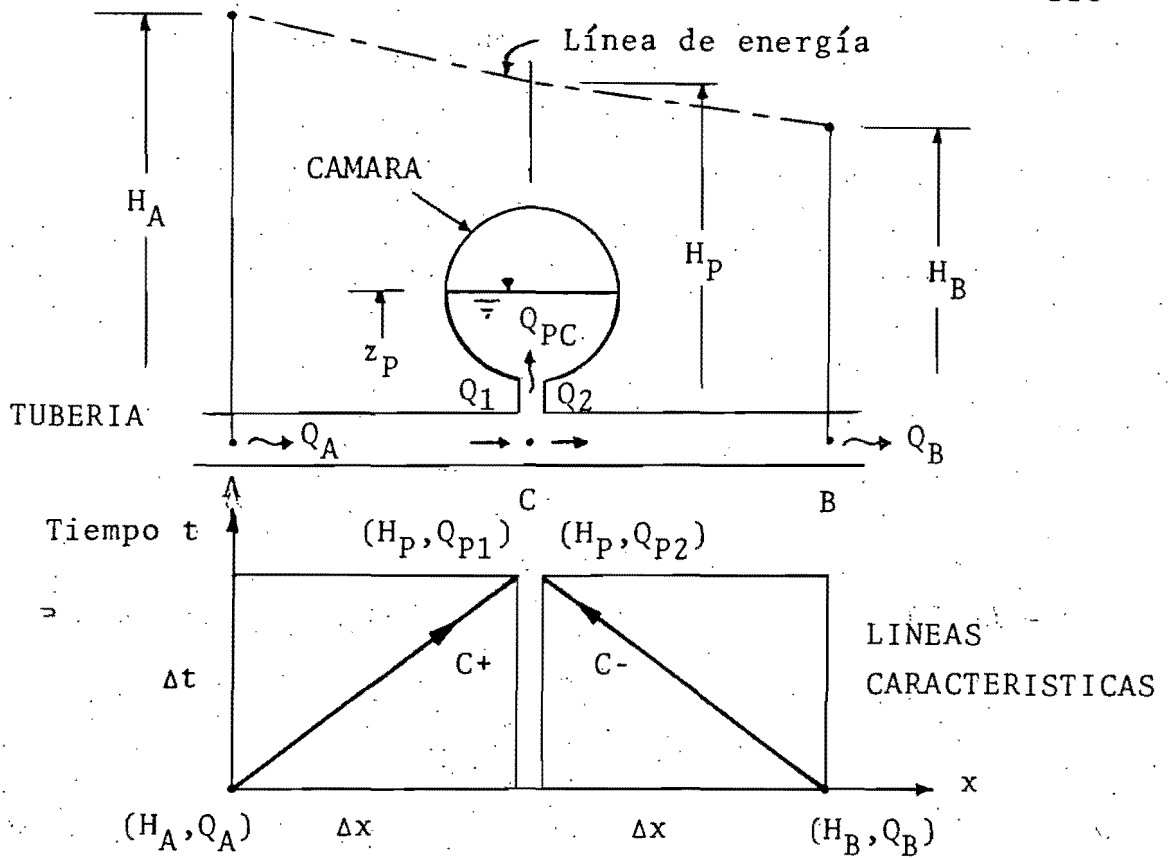


FIGURA 3.5 CÁMARA DE AIRE, COMO FRONTERA INTERNA EN EL MÉTODO DE LAS CARACTERÍSTICAS.

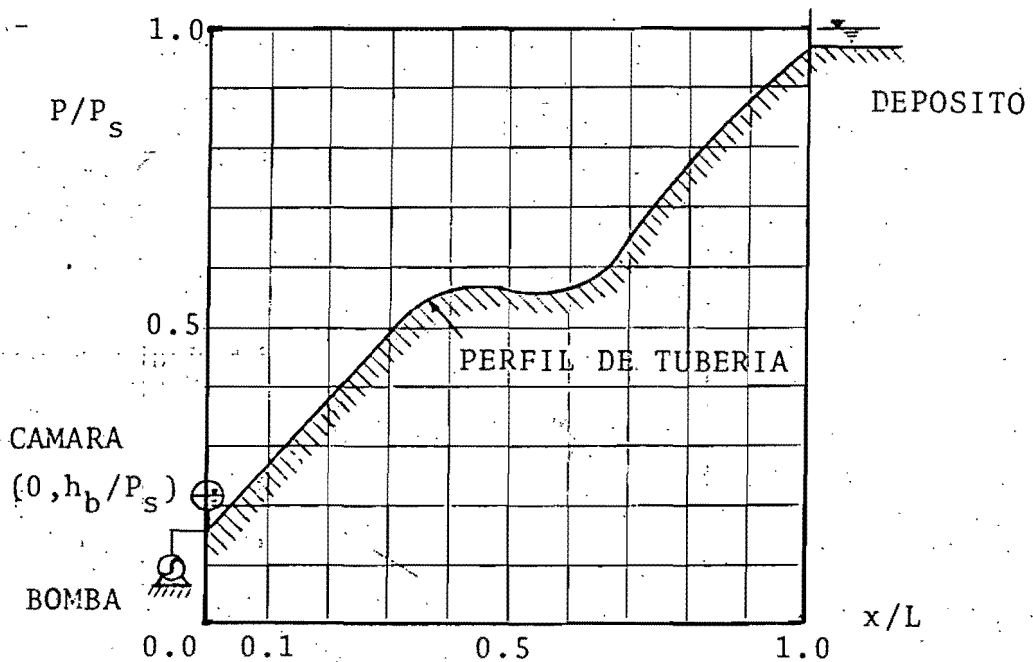
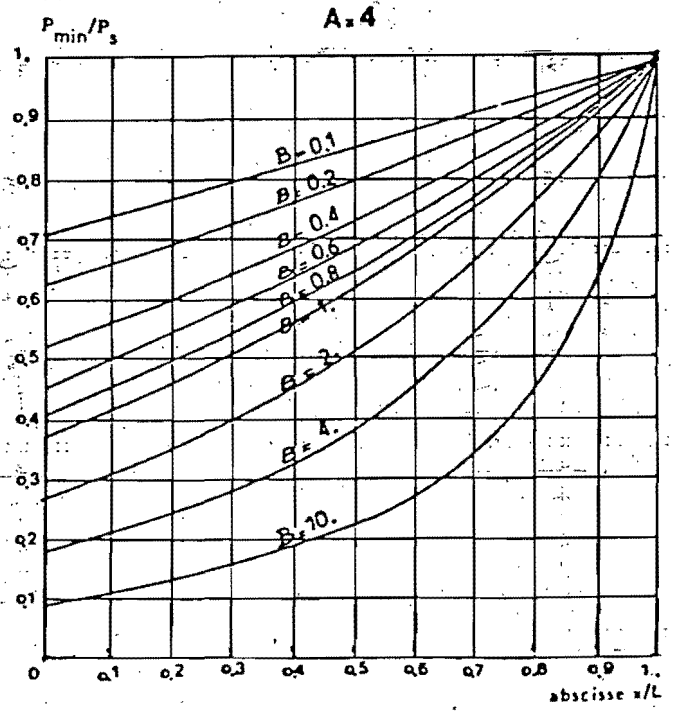
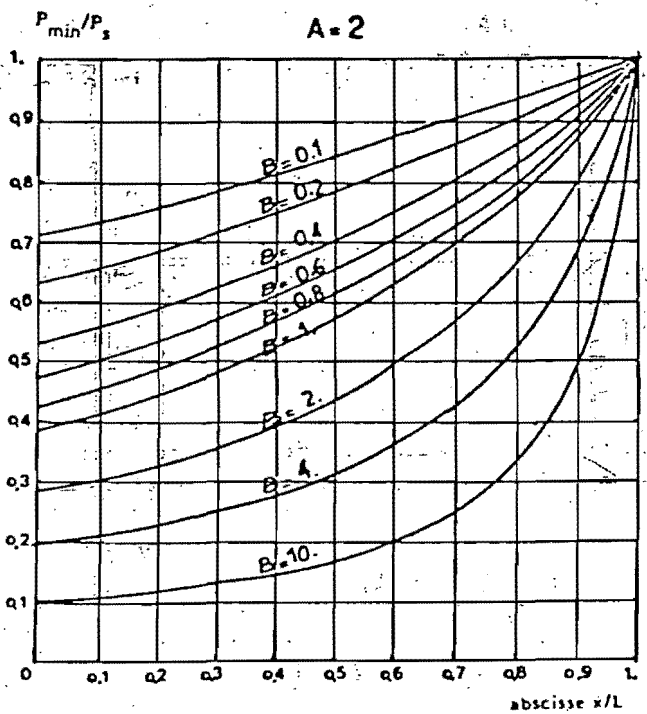
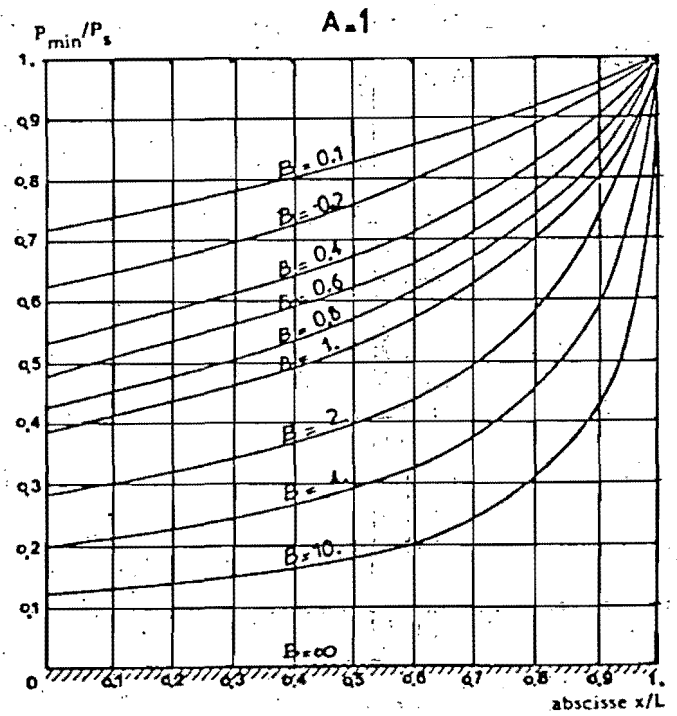
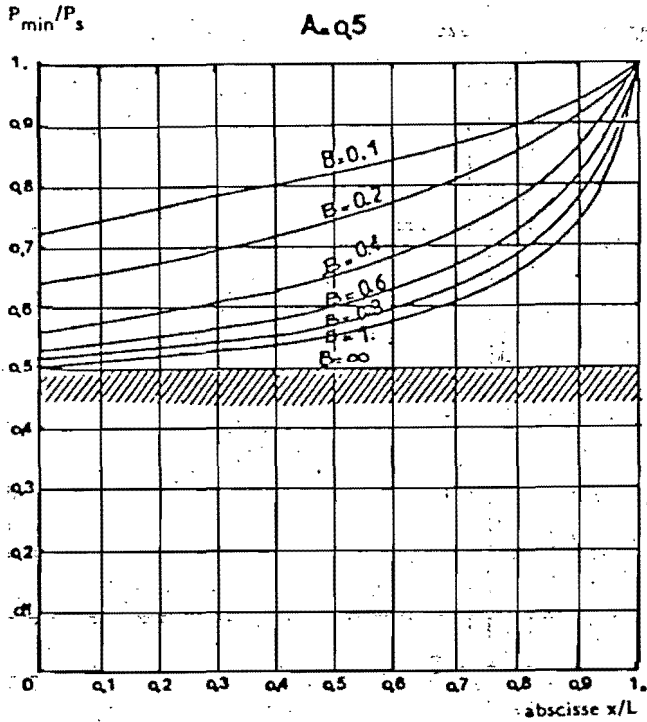


FIGURA 3.6 SISTEMA ADIMENSIONAL DE LONGITUDES Y ELEVACIONES

DIMENSIONAMIENTO DE CAMARAS DE AIRE
 PROTECCION EN SUBPRESIONES

DETERMINACION DEL COEFICIENTE B

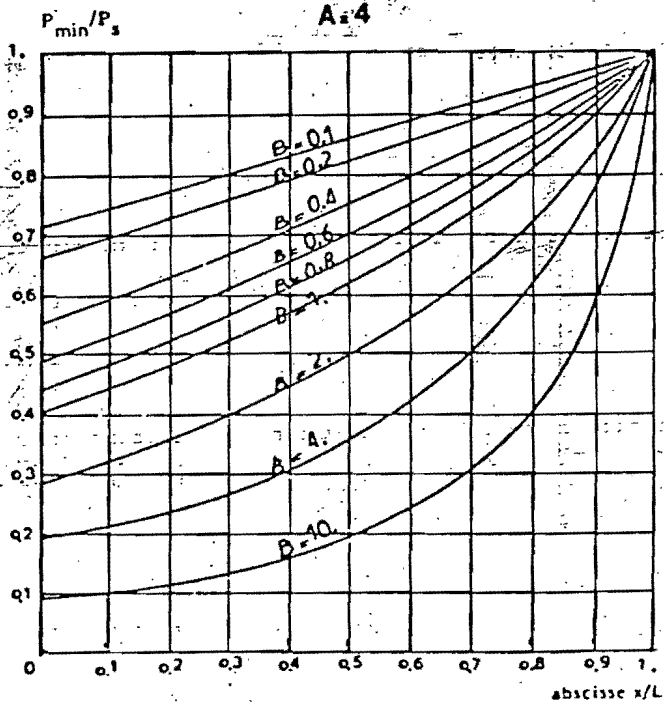
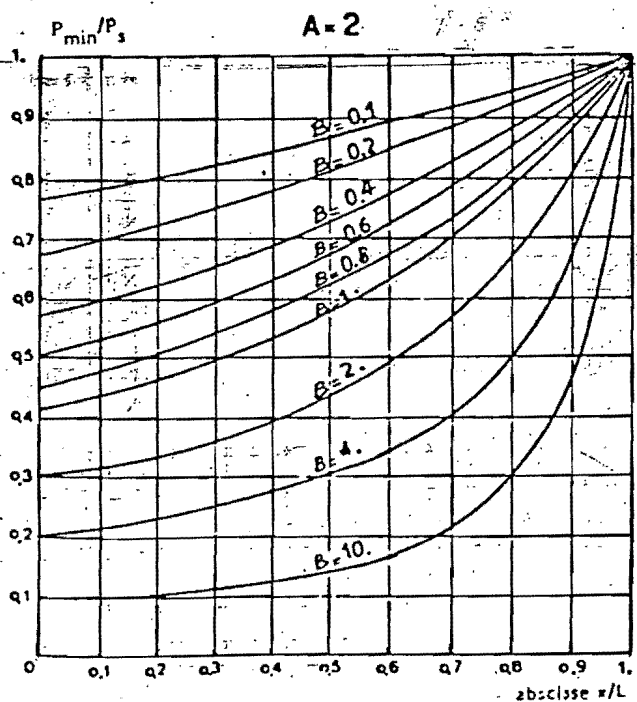
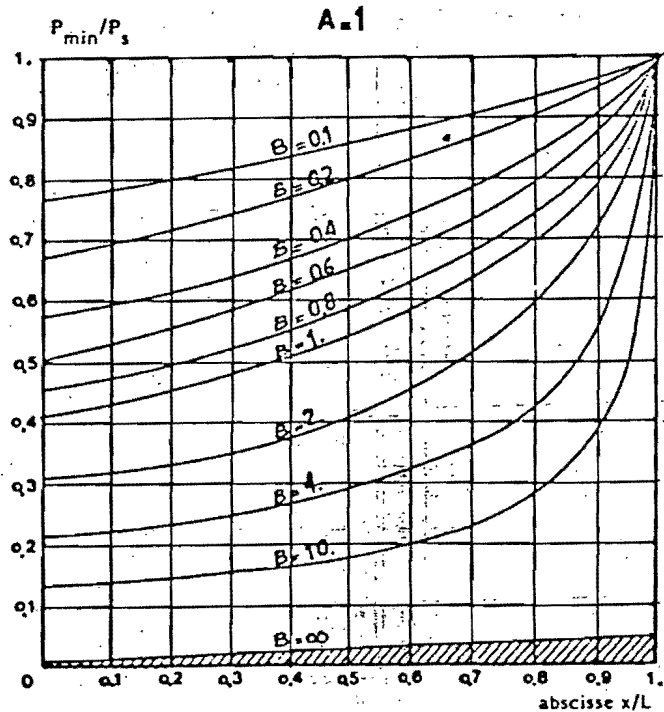
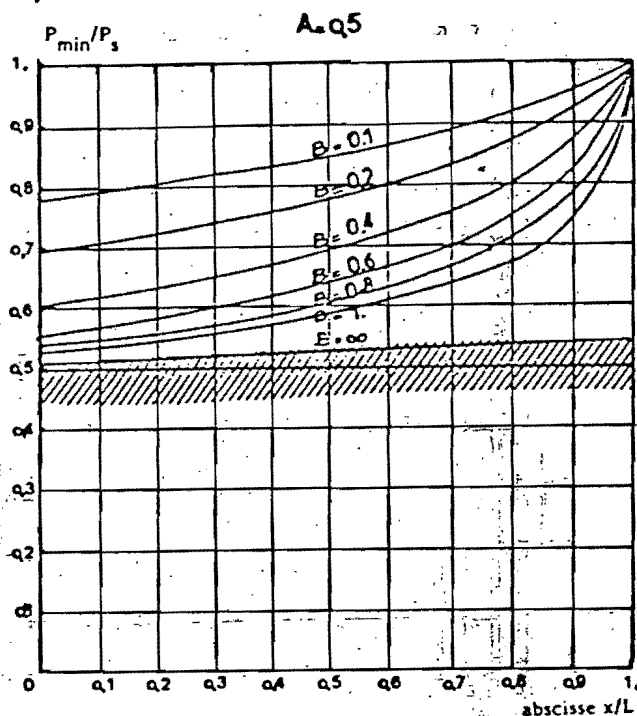
$K = 0$



DIMENSIONAMIENTO DE CAMARAS DE AIRE
 PROTECCION EN SUBPRESIONES

DÉTERMINACION DEL COEFICIENTE B

K=0.1



DIMENSIONAMIENTO DE CAMARAS DE AIRE
 PROTECCION EN SUBPRESIONES

DETERMINACION DEL COEFICIENTE B

K=0.2

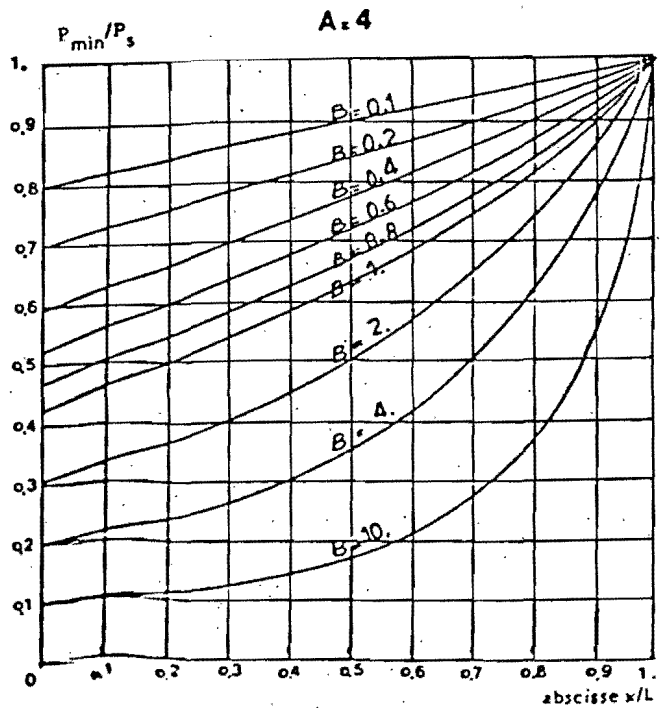
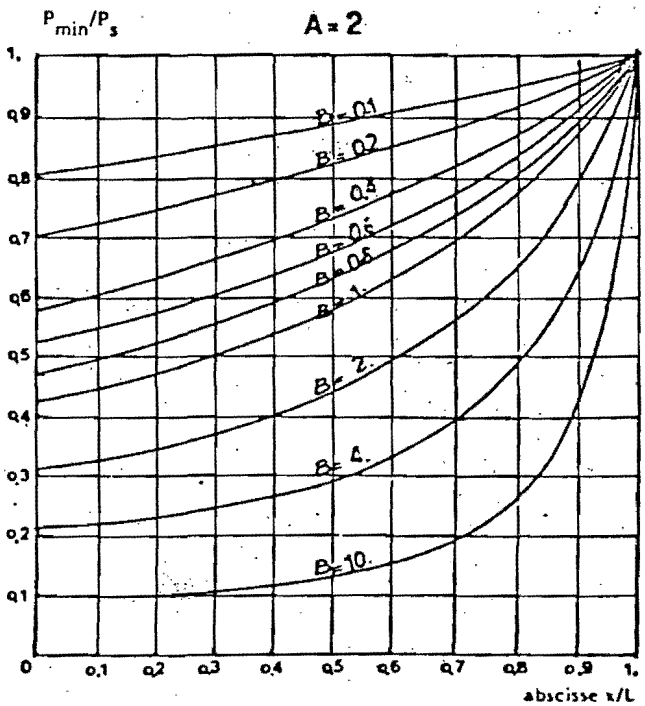
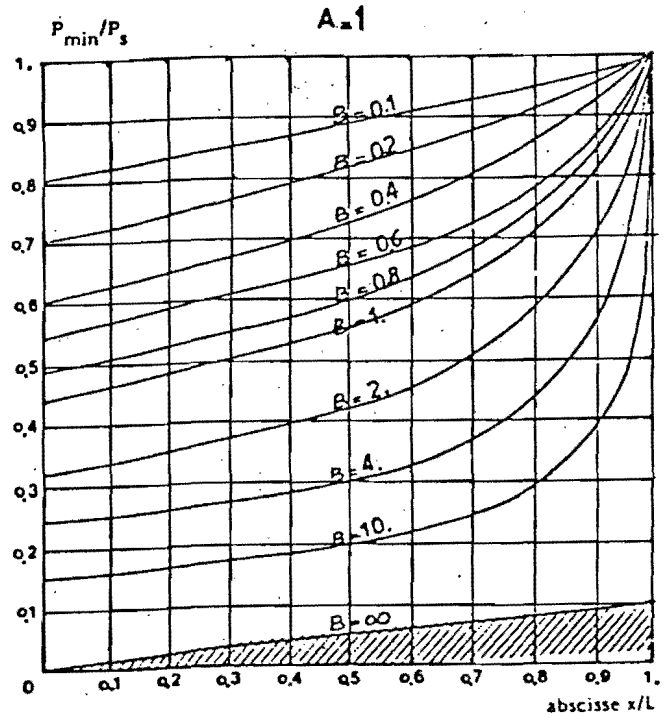
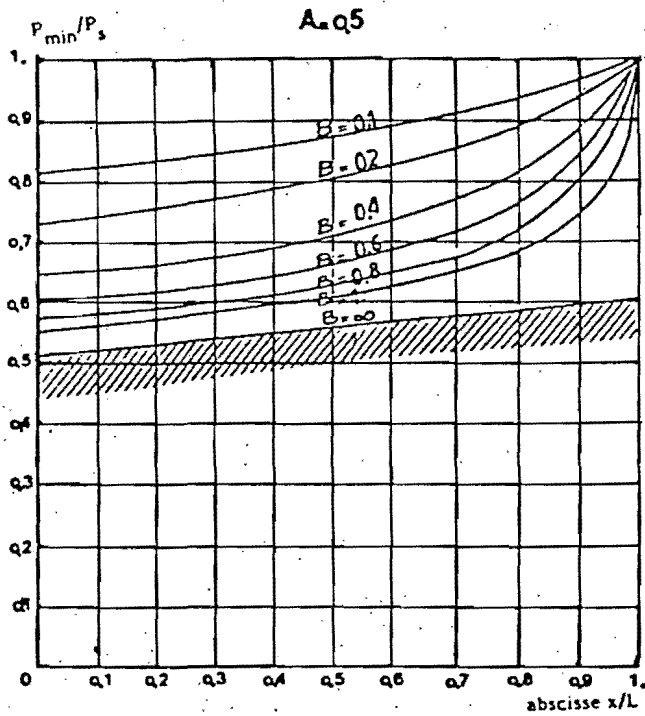


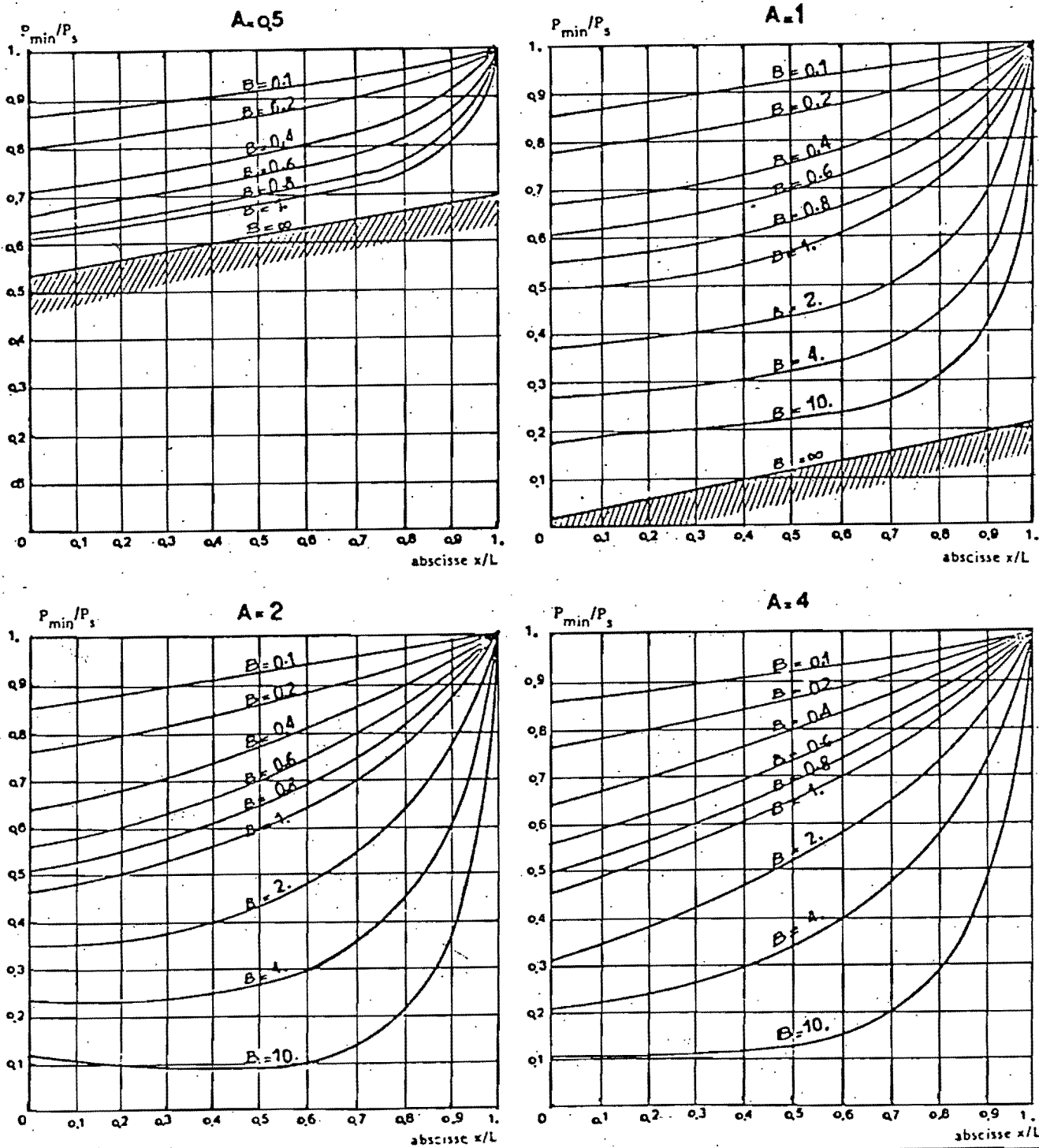
FIGURA 3.10

DIMENSIONAMIENTO DE CAMARAS DE AIRE

PROTECCION ES SUBPRESIONES

DETERMINACION DEL COEFICIENTE B

$K = 0.4$



DIMENSIONAMIENTO DE CAMARAS DE AIRE
 PROTECCION EN SUBPRESIONES

DETERMINACION DEL COEFICIENTE B

K = 0.6

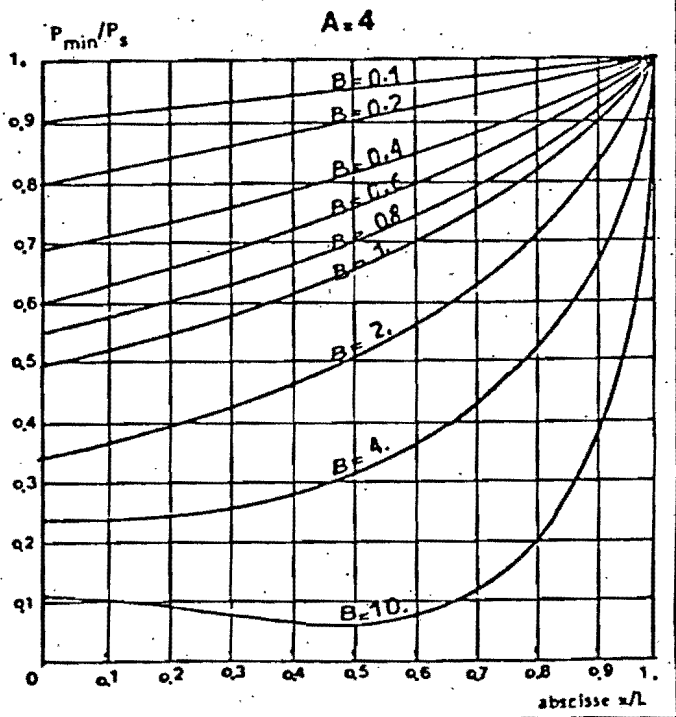
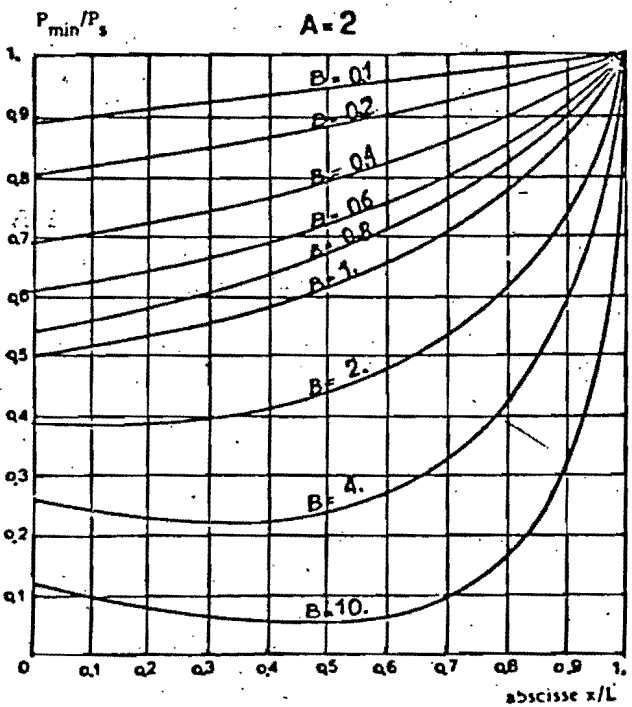
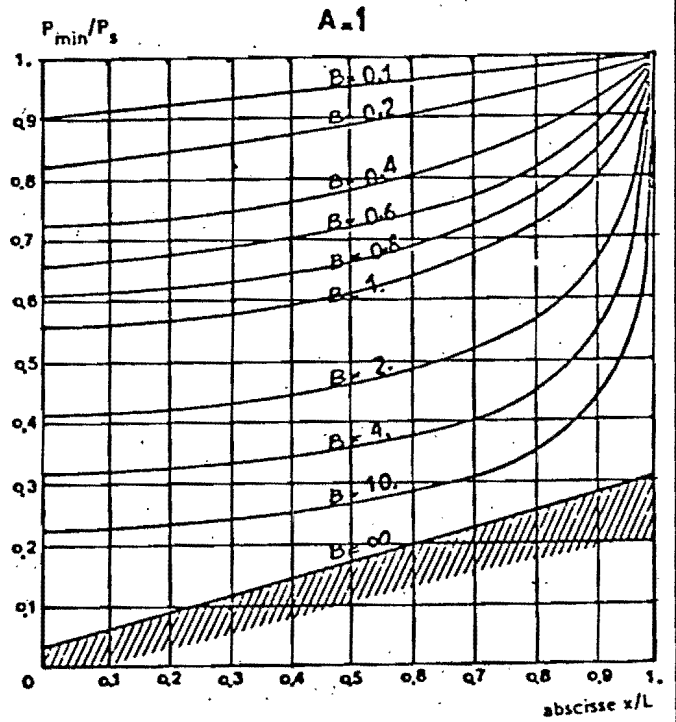
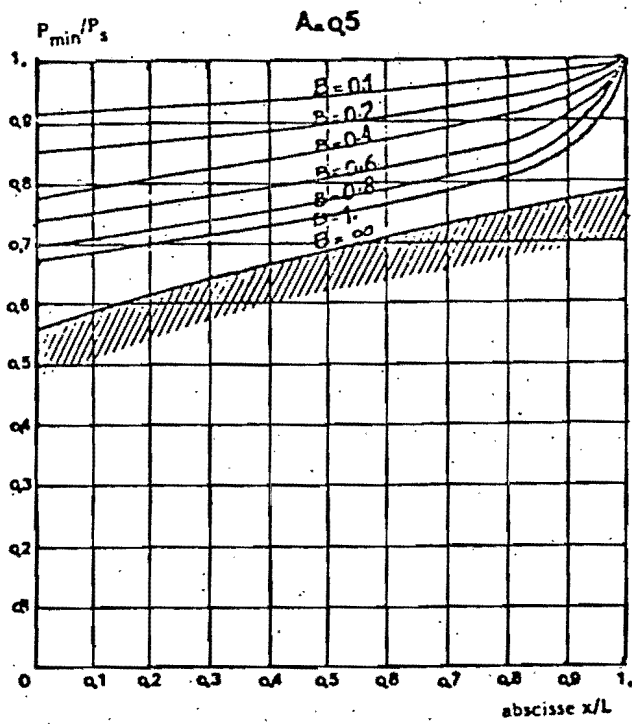


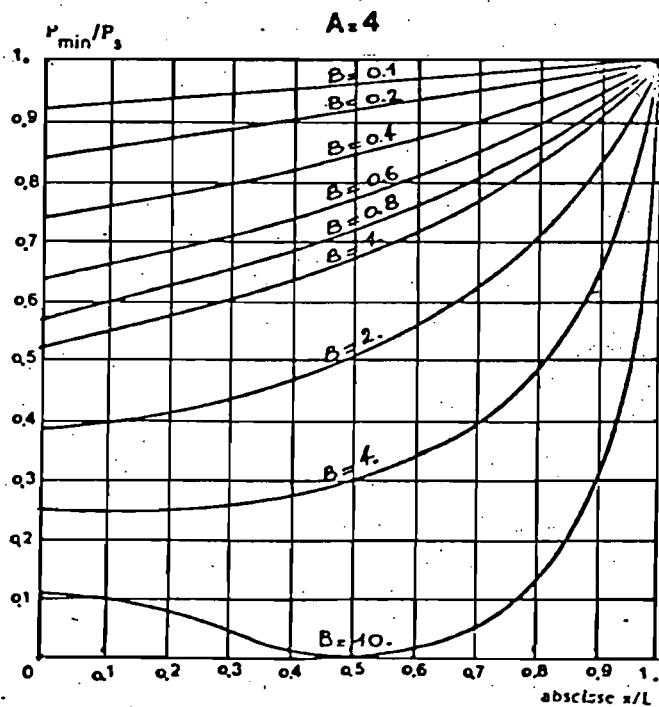
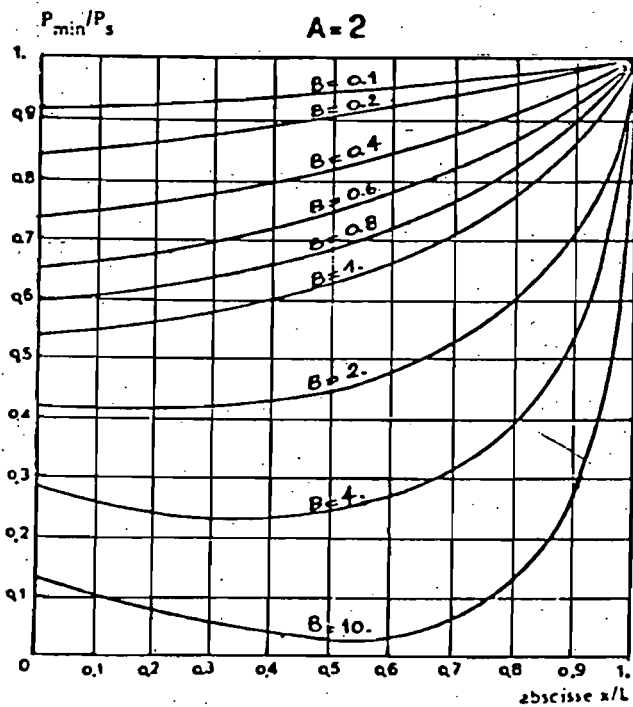
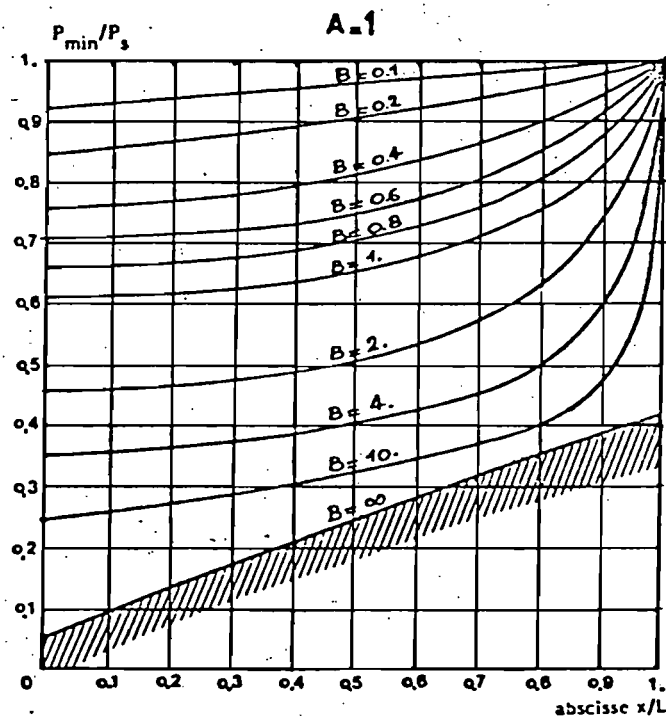
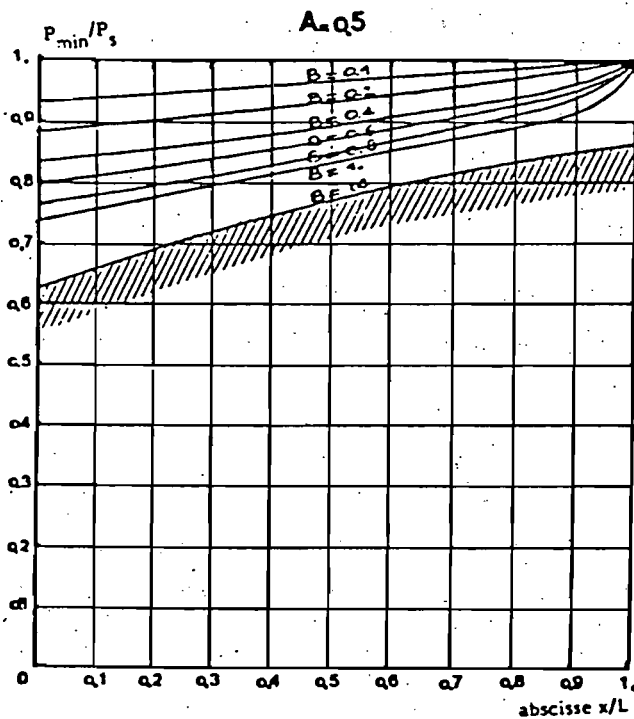
FIGURA 3.12

DIEMENSIONAMIENTO DE CAMARAS DE AIRE

PROTECCION EN SUBPRESIONES

DETERMINACION DEL COEFICIENTE B

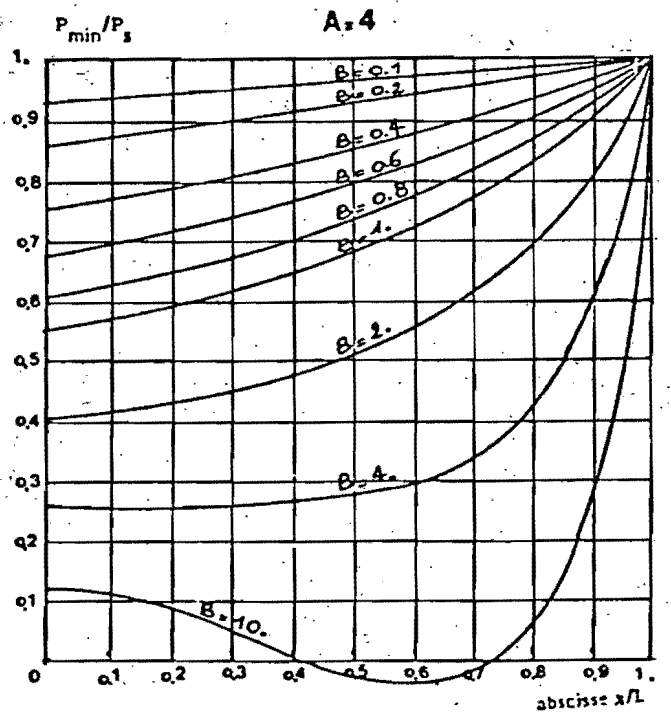
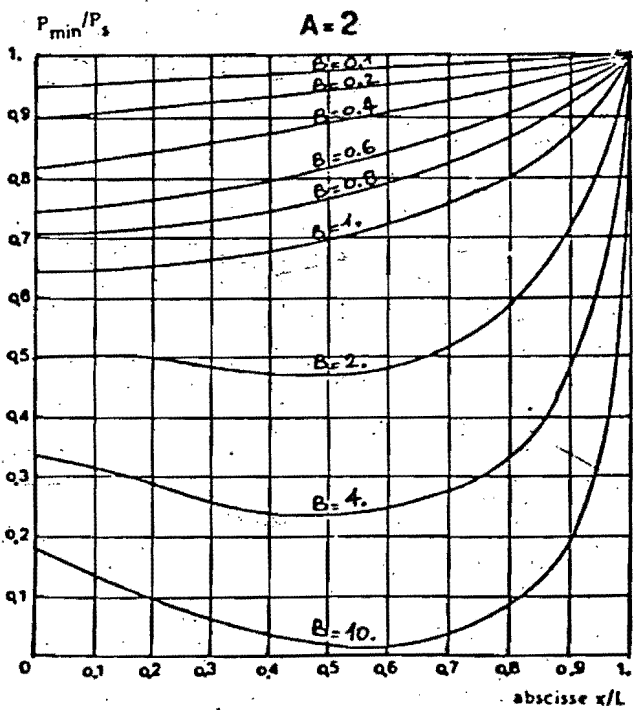
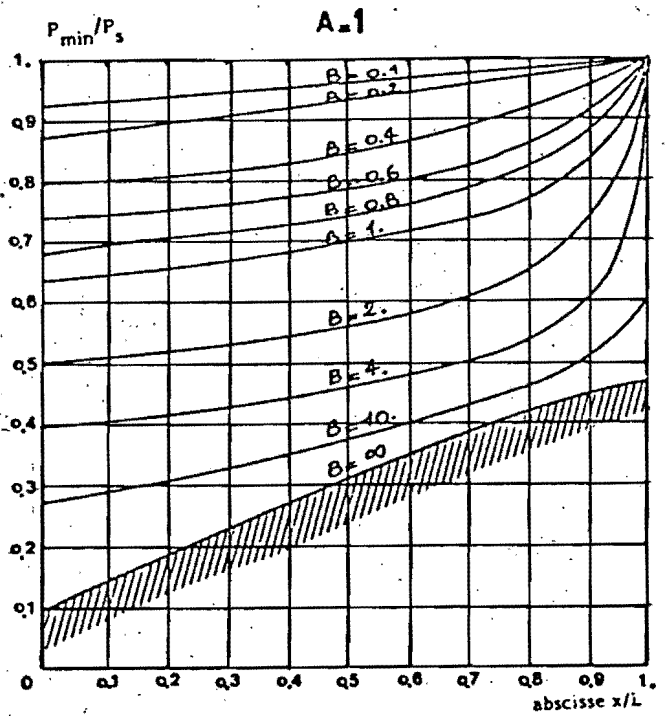
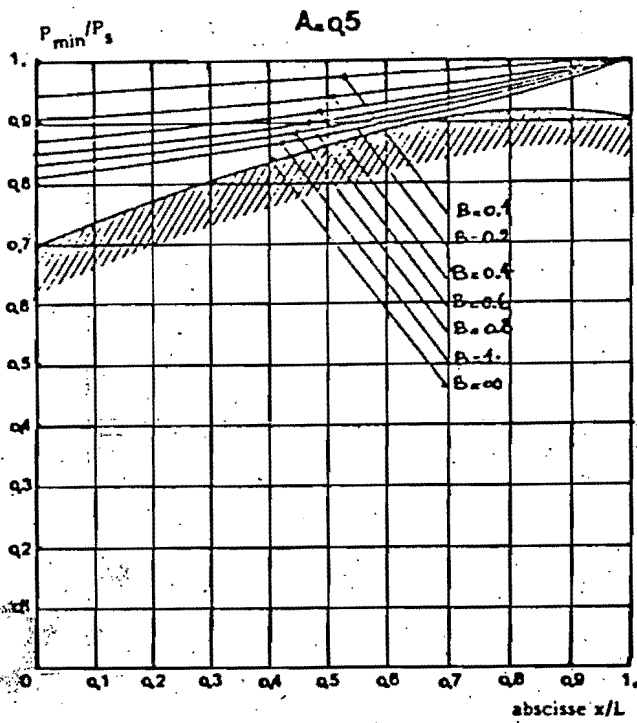
$K = 0.8$



DIMENSIONAMIENTO DE CAMARAS DE AIRE
 PROTECCION EN SUBPRESIONES

DETERMINACION DEL COEFICIENTE B

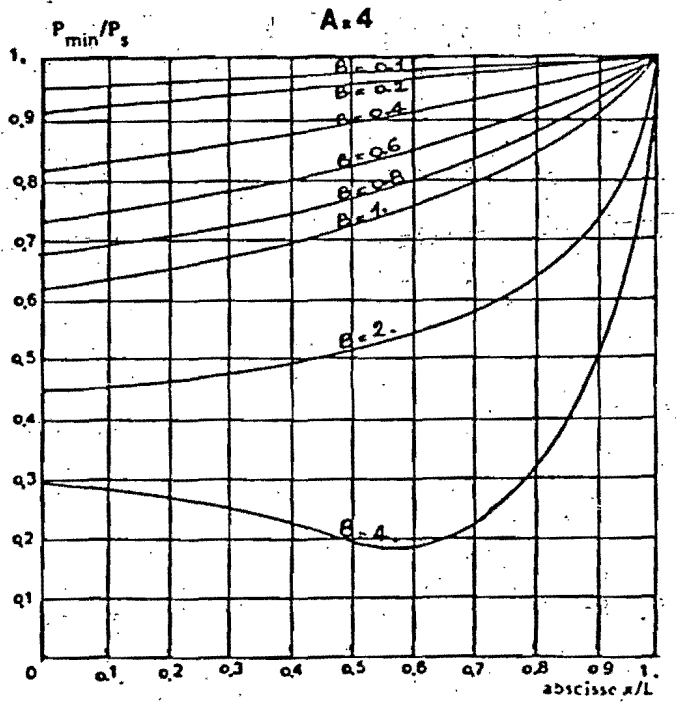
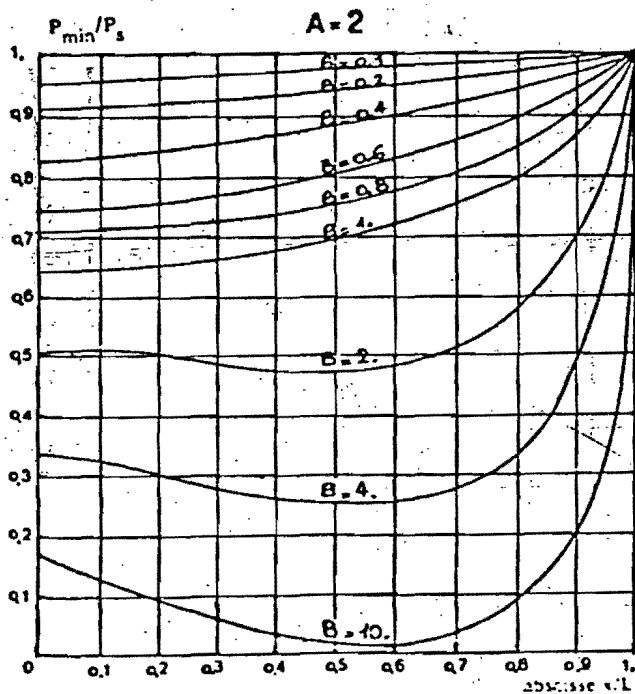
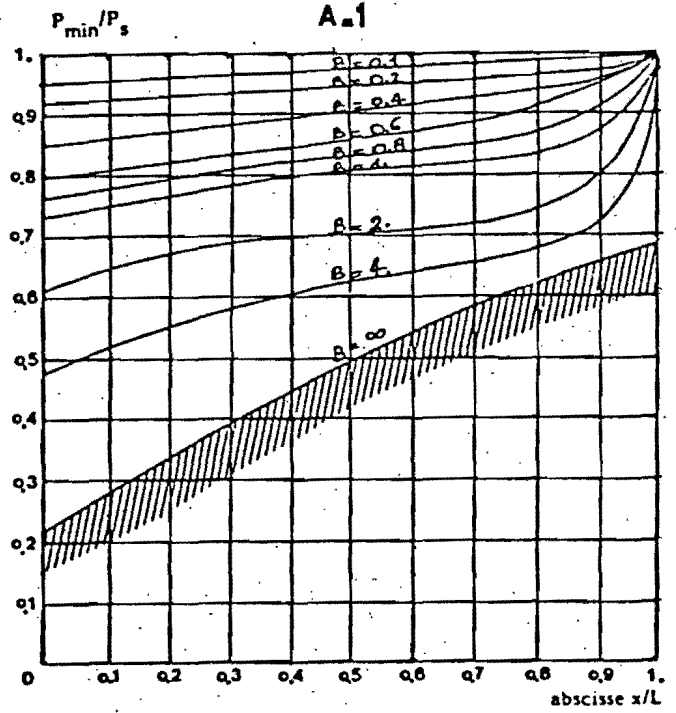
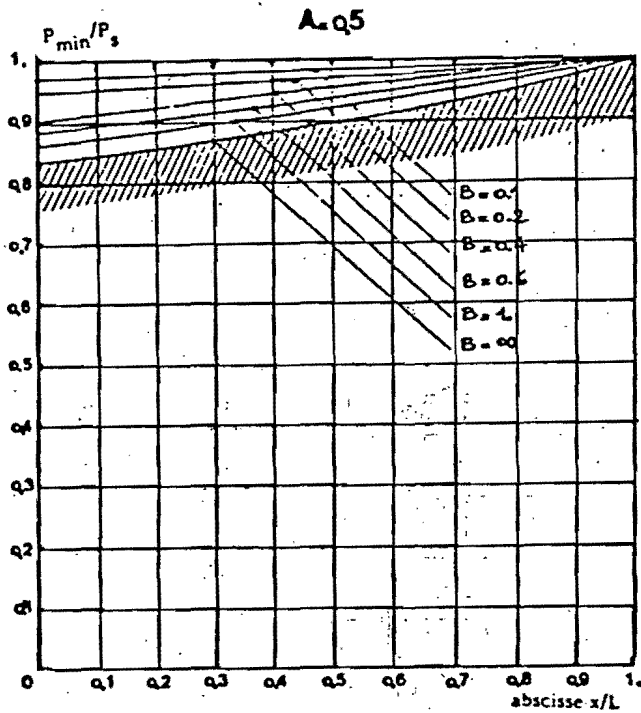
K = 1



DIMENSIONAMIENTO DE CAMARAS DE AIRE
 PROTECCION EN SUBPRESIONES

DETERMINACION DEL COEFICIENTE B

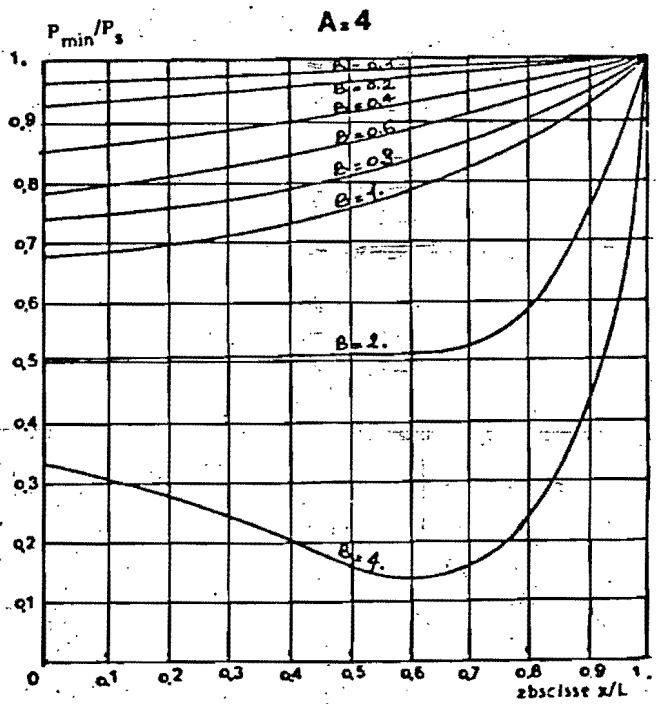
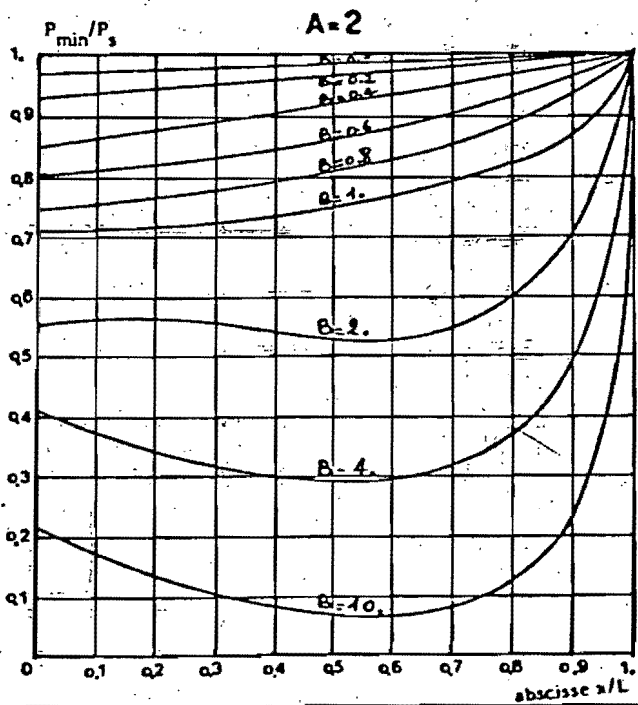
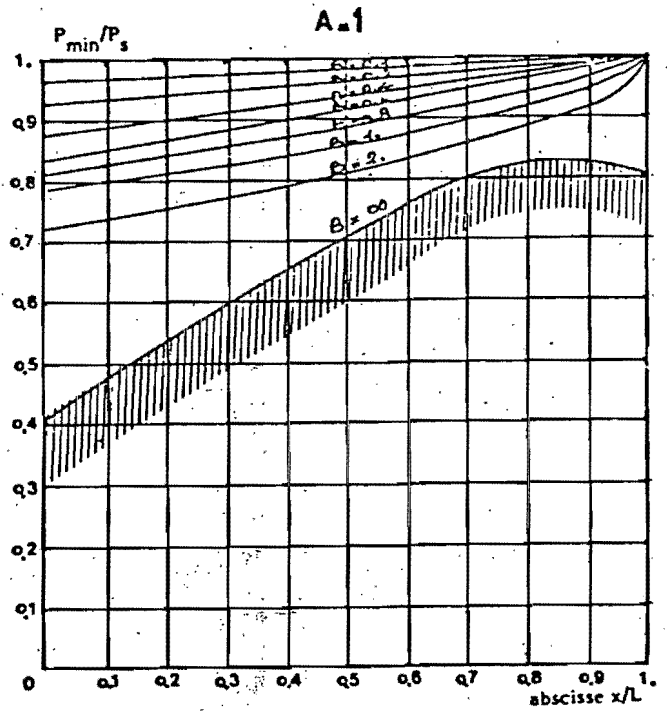
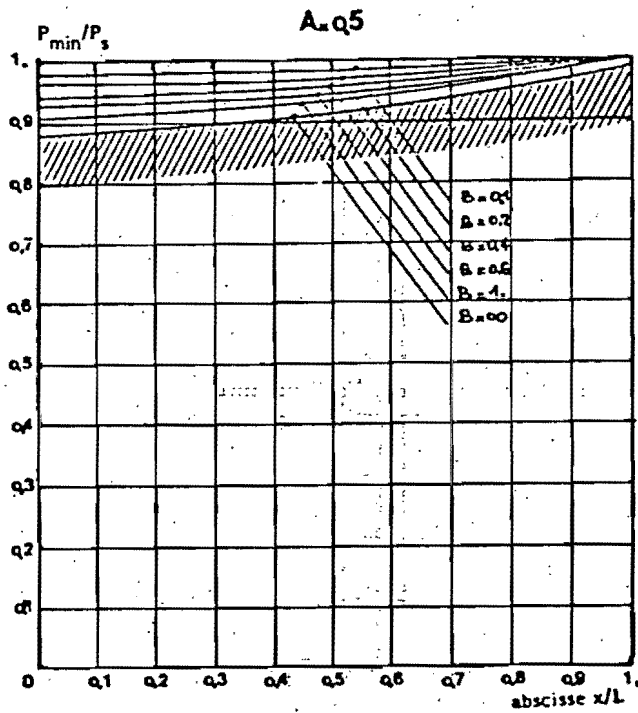
$K = 1.5$



DIMENSIONAMIENTO DE CAMARAS DE AIRE
 PROTECCION ES SUBPRESIONES

DETERMINACION DEL COEFICIENTE B

$K = 2$



DIMENSIONAMIENTO DE CAMARAS DE AIRE
 PROTECCION EN SOBREPRESIONES

DETERMINACION DEL COEFICIENTE K_T

$K = 0$

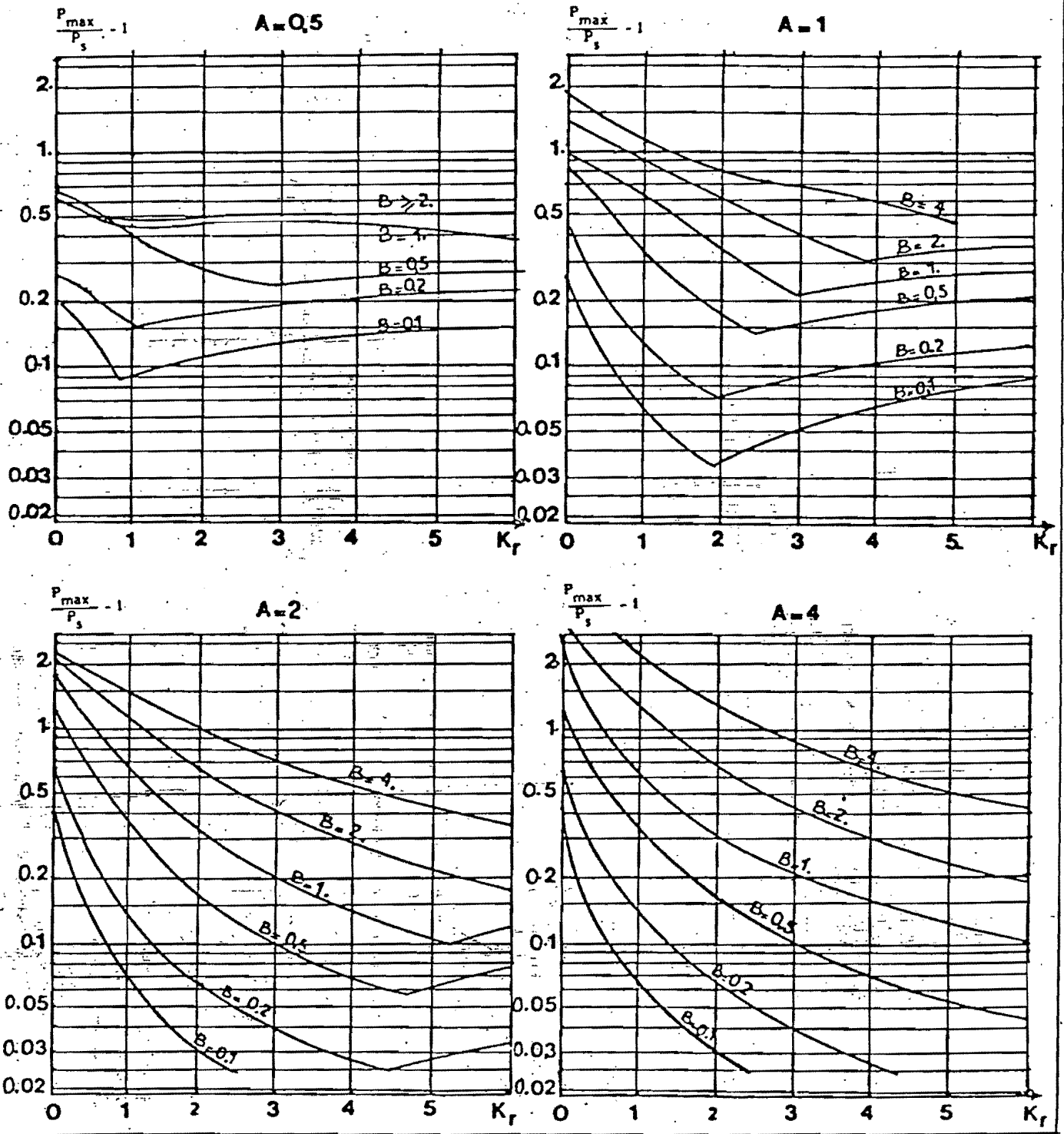
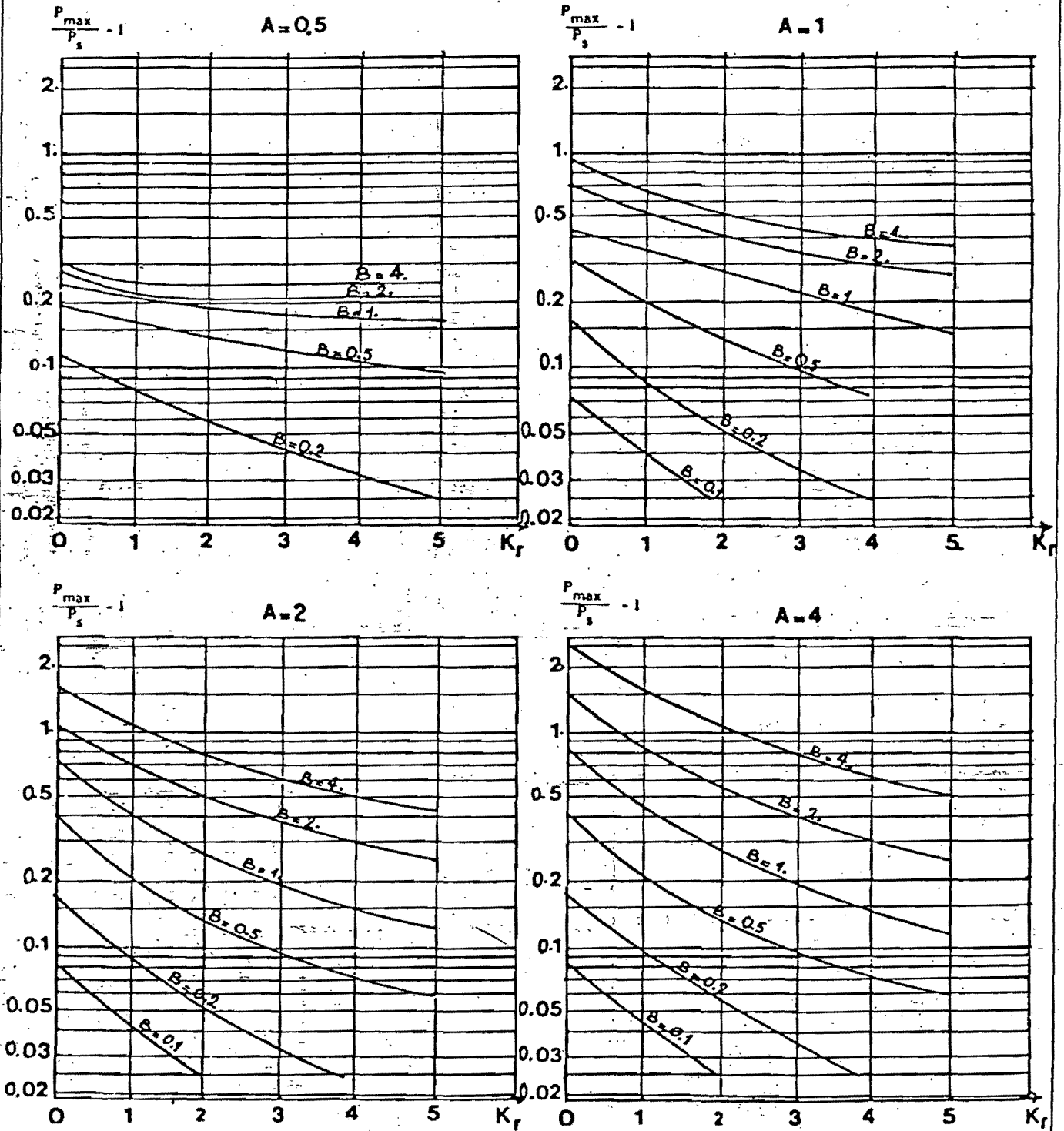


FIGURA 3.17

DIMENSIONAMIENTO DE CAMARAS DE AIRE
 PROTECCION EN SOBREPRESIONES

DETERMINACION DEL COEFICIENTE K_T

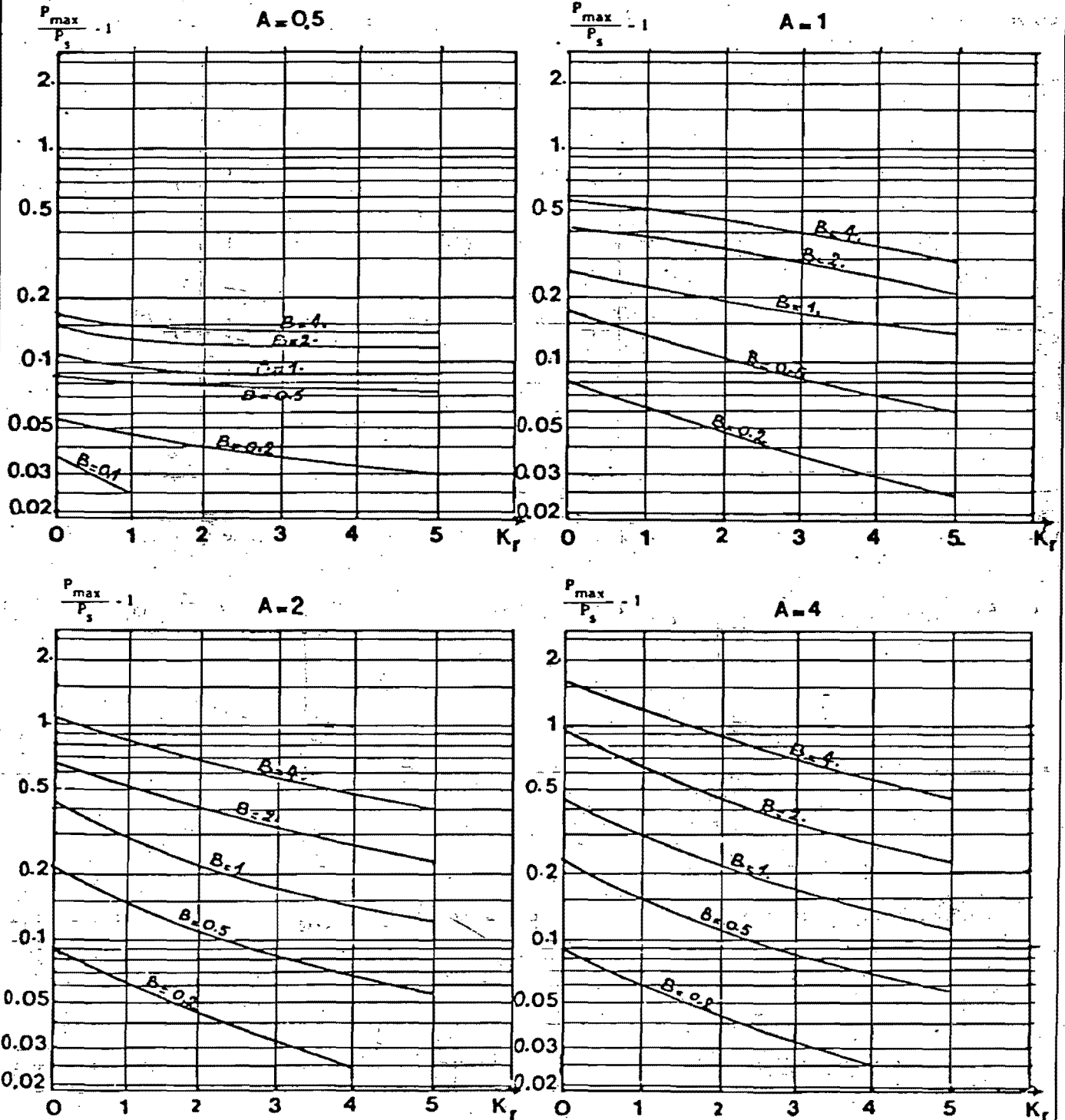
$K = 0.5$



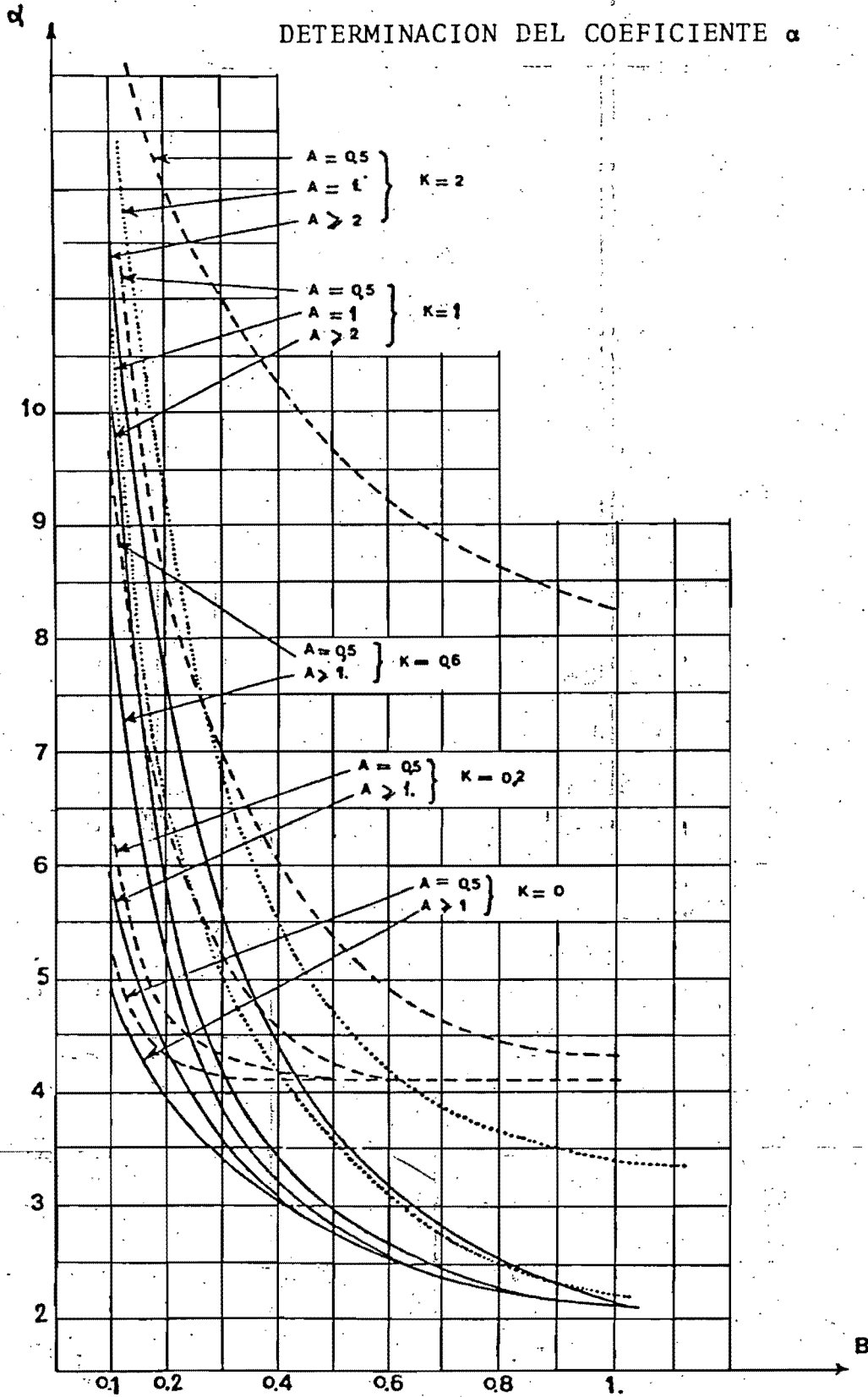
DIMENSIONAMIENTO DE CAMARAS DE AIRE
 PROTECCION EN SOBREPRESIONES

DETERMINACION DEL COEFICIENTE K_T

$K=1$



DIMENSIONAMIENTO DE CAMARAS DE AIRE
 DURACIÓN DEL VACIADO



4. APLICACIONES

Este capítulo tiene como finalidad presentar un ejemplo de dimensionamiento de una cámara de aire anti-ariete, con el empleo preliminar de criterios aproximados y posteriormente con una revisión de diseño mediante el modelo numérico de solución que se presentó en el capítulo 3.2.

En forma complementaria, se hace una presentación de dos programas de procesamiento electrónico empleados en la solución del ejemplo estudiado, aunque para mayores detalles se han incluido los apéndices B y C al final del trabajo. Así mismo, se ha llevado a cabo una verificación preliminar del modelo matemático, con los criterios de golpe de ariete y osci

lación de masa, mediante pruebas obtenidas de una instalación experimental.

4.1 VERIFICACION DEL MODELO MATEMATICO

Un procedimiento común de verificación de un modelo matemático en fenómenos hidráulicos transitorios consiste en comparar los registros de cargas de presión y velocidades de un modelo experimental o un prototipo con los resultados que se obtienen mediante la simulación numérica.

Como se estudió en el capítulo anterior, con el planteamiento de ecuaciones para cámara de aire y la solución encontrada de las mismas, fué posible desarrollar un programa de cálculo para analizar el golpe de ariete en una línea de conducción por bombeo, protegida con este dispositivo. El diagrama de flujo y listado general se muestran en el apéndice B.

En relación al modelo físico, se ha recurrido a la instalación experimental de fenómenos hidráulicos transitorios del Instituto de Ingeniería de la UNAM, cuyo croquis y descripción general se muestran en la figura 4.1. Para simular una falla de bombeo, a partir de condiciones establecidas de flu

jo en la línea, se procedió a aislar la tubería mediante el cierre rápido de una válvula de seccionamiento entre bomba y cámara de aire, y se obtuvo un registro de oscilaciones de presión aguas abajo de la conexión del aparato. Durante la prueba se fijaron pérdidas de carga simétricas en dicha conexión, al mantener abierta su derivación lateral en las fases de llenado de la cámara (ver figura 2.7).

Posteriormente se llevó a cabo el cálculo numérico de las oscilaciones con ayuda del programa. Cabe señalar que uno de los problemas presentados en la simulación matemática fué considerar que la frontera extrema es también una cámara de aire, dado que este dispositivo permite simular en el modelo físico la presencia de un depósito elevado al final de la conducción. Por otro lado, una simplificación que se tomó en cuenta fué suponer que el cierre de la válvula de retención entre bomba y cámara de aire es instantáneo.

Los datos de la prueba efectuada en la instalación, así como algunos datos geométricos del modelo, se pueden observar en la tabla 4.1a; en cuanto a los resultados del procesamiento electrónico se muestran en la tabla 4.1b y en la figura 4.2 en forma gráfica. En la figura se observa, además, la comparación de resultados con los registros de carga de presión

medidos directamente sobre el modelo de laboratorio.

De acuerdo a los resultados se puede concluir que el modelo matemático basado en el criterio de golpe de ariete permite simular con suficiente veracidad el comportamiento de una cámara de aire en una línea de bombeo, durante condiciones transitorias.

En relación al modelo matemático basado en el criterio de oscilación de masa, la prueba de laboratorio puede simularse numéricamente siempre y cuando se considere que la carga de presión en el extremo final esté asociada al nivel del tanque hidroneumático instalado en lugar del depósito de almacenamiento.

En efecto, las condiciones transitorias del modelo físico imponen el cálculo de tres valores, variables con el tiempo : el nivel de la cámara de aire, z_1 , el gasto en la línea, Q , y el nivel en la segunda cámara, z_2 . Además de las ecuaciones de continuidad (3.3.6) y de cantidad de movimiento (3.3.7), es necesario definir una tercera expresión, que en este caso es la ecuación de continuidad en la conexión de la segunda cámara, es decir,

$$R(z_1, Q, z_2) = \frac{dz_2}{dt} = \frac{Q - Q_s}{A_c} \quad (4.1.1)$$

donde Q_s es el gasto de salida del sistema, después de la cámara; en el caso de la prueba, las oscilaciones obtenidas corresponden a $Q_s=0$. La carga de presión H_s en la segunda cámara es variable y está dada por

$$H_s = K_6/C_2^{1.2} + z_2 - h_b + K_7|R|R \quad (4.1.2)$$

siendo $K_6 = (H_{s(0)} + h_b - z_{2(0)}) \cdot C_{2(0)}^{1.2}$ correspondiente a condiciones iniciales, en la que C_2 es el volumen de aire en la segunda cámara, y

$K_7 = K_8/A_c^2$ correspondiente al coeficiente de pérdidas de entrada ($K_8=k_e$) y salida ($K_8=k_s$) de la conexión.

Hay que destacar que la solución numérica de las ecuaciones diferenciales F, G y R con el método de Runge-Kutta (empleado en el programa) resulta relativamente simple, dado que es un procedimiento explícito que permite obtener la solución paso por paso, con cada incremento de tiempo.

Finalmente, los datos de la simulación y los resultados obtenidos se muestran en las tablas 4.2a y 4.2b, respectivamente, en tanto que la comparación de resultados con el programa anterior y con los registros reales se muestra en la figura 4.2, observándose una gran similitud entre ellos. Se puede concluir igualmente que el modelo matemático basado en el

criterio de oscilación de masa es apropiado, además de verificarse la condición para la cual es válida la simulación del modelo (ecuación 3.3.1), o sea

$$C_o \geq 0.01 LQ_o$$

$$0.304 \geq 0.01 (1453)(0.0084) = 0.122$$

4.2 EJEMPLO DE DIMENSIONAMIENTO DE UNA CAMARA DE AIRE

Antes de hacer un análisis detallado del golpe de ariete en una tubería protegida con cámara de aire, es conveniente hacer un dimensionamiento preliminar con ayuda de criterios aproximados como los que se estudiaron en el capítulo 3.3. Para ilustrar lo anterior se hará el diseño de una cámara, siguiendo el procedimiento señalado.

Se trata de determinar las dimensiones de una cámara de aire anti-ariete para proteger una línea de bombeo. La conducción tiene una longitud L de 3800 m, diámetro D de 0.60 m, coeficiente de fricción f igual a 0.023 (de Darcy) y una celeridad a de 950 m/s; la planta de bombeo desarrolla una carga nominal de 140.00 msnm con un gasto Q_o de $0.80 \text{ m}^3/\text{s}$. En cuan

to a los niveles geométricos, se definen el nivel de succión igual a 94.50 msnm, la elevación factible de agua en la cámara de 100.00 msnm y el nivel del depósito final de almacenamiento H_s con una elevación fija de 175.00 msnm. La forma del perfil de la tubería se muestra en la figura 4.3, donde se observa que el punto intermedio más desfavorable se ubica en la cota 140.50 msnm y estación 0+950 m, con origen de cadnamiento en la planta de bombeo.

SOLUCION. El primer paso consiste en verificar si la línea de bombeo requiere la protección de una cámara de aire. De acuerdo con los capítulos 2.2 y 2.3.1, este dispositivo es necesario cuando $aV_o/gP_s > 1$.

Aún cuando existan criterios más conservadores que sugieren no utilizar cámaras de aire en tales condiciones, dado que las envolventes de subpresión pueden ser desfavorables al perfil [2], o se inclinan por adoptar tanques unidireccionales en puntos intermedios elevados [12], es conveniente revisar varios diseños de protección y seleccionar alguno mediante la comparación de sus costos respectivos.

Para el ejemplo, se tienen las siguientes velocidades, elevaciones y cargas de presión :

$$V_o = \frac{Q_o}{\pi(D/2)^2} = 2.829 \text{ m/s} , \text{ velocidad inicial}$$

$H_s = 175.00$ msnm, elevación piezométrica en el almacenamiento

$H_o = 94.50$ (succión) + 140.00 (carga) = 234.50 msnm,

elevación piezométrica en planta de bombeo

$$P_s = H_s - z_{\text{cámara}} + h_b = 85.30 \text{ m (carga, en el almacenamiento)}$$

$$P_o = H_o - z_{\text{cámara}} + h_b = 144.80 \text{ m (carga, en planta de bombeo).}$$

$$\text{Se tiene : } \frac{V_{oa}}{gP_s} = \frac{2.83(950)}{9.8(85.3)} = 3.22 > 1$$

lo cual indica que puede requerirse cámara de aire; este valor no es otra cosa que el parámetro adimensional A.

Para tener un diseño preliminar de la cámara de aire, es conveniente utilizar las gráficas de dimensionamiento estudiadas y adoptar la secuencia de cálculo descrita en el capítulo 3.3.3. En primer lugar, se calculan los parámetros A y K, característicos de la tubería :

$$A = V_{oa}/gP_s = 3.22$$

$$K = \frac{P_o - P_s}{P_s} = \frac{144.80 - 85.30}{85.30} = 0.70$$

Se selecciona el intervalo donde se encuentran dichos números adimensionales, en este caso

$$2.0 < A < 4.0$$

$$0.6 < K < 0.8$$

El siguiente paso es encontrar el valor de B correspondiente a los parámetros A y K y a su vez el que determine la envolvente de subpresiones más favorable al perfil de la tubería. Para ello es preciso representar la línea de presiones mínimas admisibles, paralela al perfil, al considerar algún margen de seguridad comprendido entre 0 y $h_b - P_v$; en forma ilustrativa se considerará como limitante el perfil de la tubería ($m=10.0$). En la figura 4.4 se muestra este procedimiento para los valores de $K=0.8$ y $A=4.0$; por ejemplo, el punto crítico ubicado a la cota $z=140.50$ y $x=950$, se representa en el plano adimensional con las coordenadas siguientes :

$$\frac{P}{P_s} = \frac{z(x) - z_{\text{cámara}} + m + P_v}{P_s} = \frac{140.5 - 100.0 + 10.3}{85.3} = 0.596$$

$$\frac{x}{L} = \frac{950}{3800} = 0.25$$

La curva B más próxima a la línea de subpresiones corresponde a $B=0.95$, es decir, ningún punto de ésta puede quedar por encima de la envolvente asociada a dicho valor. Este proceso se repite para las otras combinaciones de A y K, y al final se hace la interpolación de los valores obtenidos :

$$\begin{array}{c|c|c} & A = 2 & A = 4 \\ \hline K=0.6 & 0.80 & 0.85 \\ \hline K=0.8 & 0.88 & 0.95 \\ \hline \end{array} \rightarrow \begin{array}{c|c} A=3.22 \\ \hline K=0.6 & 0.830 \\ \hline K=0.8 & 0.923 \\ \hline \end{array} \rightarrow K=0.7 \left[B = 0.88 \right]$$

Recuérdese que, durante la selección de las envolventes de subpresión, se puede leer en las gráficas el valor de $P_{\text{mín}}/P_s$ para cada uno de los cuatro valores de B. En la figura 4.4 puede verse el valor $P_{\text{mín}}/P_s = 0.54$ donde interseca la envolvente asociada a $B=0.95$ con el eje de coordenadas (lugar de la cámara). La interpolación de los valores obtenidos respecto a A y K se muestra a continuación :

$$\begin{array}{c|c|c} & A = 2 & A = 4 \\ \hline K=0.6 & 0.54 & 0.53 \\ \hline K=0.8 & 0.56 & 0.54 \\ \hline \end{array} \rightarrow \begin{array}{c|c} A=3.22 \\ \hline K=0.6 & 0.536 \\ \hline K=0.8 & 0.552 \\ \hline \end{array} \rightarrow K=0.7 \left[P_{\text{mín}}/P_s = 0.77 \right]$$

Finalmente se calcula el volumen de aire C_o , el volumen máximo $C_{\text{máx}}$ y el volumen total de la cámara C_{total} (fórmulas 3.3.12 y 3.3.13) :

$$C_o = \frac{LQ_oV_o}{gP_oB} = \frac{3800(0.8)(2.83)}{9.8(144.8)(0.88)} = 6.90 \text{ m}^3$$

$P_{\text{mín}} = 0.54 P_s = 46.05 \text{ m}$; la elevación piezométrica correspondiente es

$$H_{\text{mín}} = P_{\text{mín}} + z_{\text{cámara}} - h_b =$$

$$= 46.06 + 100.00 - 10.30 = 135.75 \text{ msnm}$$

$$C_{\text{máx}} = C_o \left(\frac{P_o}{P_{\text{mín}}} \right)^{1/1.2} = 6.9 \left(\frac{144.8}{46.05} \right)^{0.833} = 17.92 \text{ m}^3$$

$C_{\text{total}} = 1.20 \times 17.92 = 21.50 \text{ m}^3$, que es el volumen total de la cámara de aire.

4.3 REVISION DE DISEÑO

Los programas de cálculo desarrollados tienen como principal finalidad revisar el diseño preliminar de una cámara de aire. En el caso del método de cálculo basado en el criterio de oscilación de masa, pueden revisarse con cierta confiabilidad las elevaciones máximas y mínimas en la cámara, así como la duración de los ciclos de oscilación (capítulo 3.3.1); pueden estudiarse, además, condiciones particulares de falla parcial o arranque de equipos, cuando se tiene más de una bomba en la planta, o inclusive analizar el depósito como protección de tuberías a presión en otro tipo de esquemas (por ejemplo, en plantas hidroeléctricas [13]).

El programa de análisis por golpe de ariete es más confiable y, en todo caso, más versátil. Además de emplearse en los

procedimientos de revisión, es también una herramienta útil de diseño en condiciones transitorias con sistemas hidráulicos y de protección más complejos, y ante cualquier tipo de maniobra que provoque fluctuaciones de presión. Por ejemplo, con el programa del apéndice B puede analizarse una falla de bombeo sin protección alguna en la línea, con ubicaciones diversas de la cámara de aire, o con más de un dispositivo de protección a la vez.

Para ejemplificar la revisión de diseño de una cámara de aire, se ha llevado a cabo la verificación de presiones máximas y mínimas con el dimensionamiento preliminar obtenido en las condiciones del ejemplo estudiado.

- a) Criterio de oscilación de masa. En primer lugar, se definió una geometría de cámara, de acuerdo con los volúmenes calculados en forma preliminar. En la tabla 4.3a se indican los datos generales utilizados y en la tabla 4.3b se presentan los resultados de solución con el programa del apéndice C.

Como se observa, la elevación piezométrica mínima en la cámara de aire ($H = 133.93$ msnm) es muy similar a la obtenida con las gráficas ($H = 135.75$ msnm). Sin embargo, los resultados difieren en $x/L = 0.25$, tal como se muestra en

la comparación de envolventes obtenidas de las gráficas adimensionales y por oscilación de masa, que aparece en la figura 4.5. De aquí puede concluirse que el resultado obtenido por este criterio solo es confiable en el lugar donde se ubica la cámara de aire.

En relación a la duración de la fase de vaciado inicial, mediante la gráfica de la figura 3.19 puede estimarse el valor de α para $B=0.88$ y $A \geq 2$, del ejemplo; en este caso se obtiene $\alpha = 2.2$ para $0.6 < K < 1.0$. Con la fórmula 3.3.1 resulta

$$t = \alpha \left(A \frac{L}{a} \right) = 2.2 (3.22) \frac{3800}{950} = 28 \text{ s}$$

De acuerdo con la tabla 4.3b, la elevación piezométrica mínima que corresponde al final de la fase de vaciado se presenta en un tiempo de 27s, con lo cual se verifica que el ciclo de oscilación de masa determina la duración de los ciclos de llenado y vaciado de la cámara.

- b) Criterio de golpe de ariete. Al emplear el modelo numérico de solución del apéndice B, para resolver el ejemplo del capítulo 4.2, se obtuvieron los datos y resultados que se muestran en las tablas 4.4a y 4.4b. La solución es muy similar a la obtenida con los métodos aproximados, o sea con

las gráficas de dimensionamiento y el criterio de oscilación de masa. Por ejemplo, las cargas mínimas de presión en el lugar de la cámara y en $x/L = 0.25$ son las siguientes :

<u>CRITERIO</u>	<u>H_{cámara}</u>	<u>H_{x/L=0.25}</u>
_ Golpe de ariete	135.05	140.86
_ Gráficas de Dimensionamiento	135.75	140.50
_ Oscilación de masa	133.93	144.20

La envolvente de presiones mínimas obtenida con el criterio del golpe de ariete se muestra también en la figura 4.5.

Por último, es importante señalar que en el análisis de presiones transitorias mediante los criterios de oscilación de masa y golpe de ariete, las sobrepresiones a lo largo de la línea no excedieron la línea piezométrica inicial (tablas 4.3b y 4.4b), por lo cual ésta se considera como equivalente a la envolvente de presiones máximas. Lo anterior puede comprobarse con las gráficas de dimensionamiento 3.16 a 3.18, si se analizan las condiciones del problema con $K_T = 0$ (pérdidas nulas a la entrada de la cámara).

En efecto, se observa que para $K=0.50$ (fig 3.17) y $K=1.0$ (fig 3.18) los valores de $P_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}}/P_s$, cuando $A=3.22$ y $B=0.88$, resultan los siguientes, al hacer las interpolaciones necesarias :

K	$P_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}}/P_s$	$P_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} \text{ (m)}$	
0.50	1.67	142.5	$K=0.70$ $\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} \text{ (m)} \\ 133.3 \end{array} \right.$
1.00	1.40	119.4	

Evidentemente, dado que el coeficiente de pérdidas en la línea vale 0.70, la presión no excede al valor inicial en la cámara, $P_o = 144.80$ m. Este resultado es congruente con lo señalado en el capítulo 2.3.3 acerca del riesgo por sobrepresiones.

Asimismo, de acuerdo con los resultados de las tablas 4.3b y 4.4b se verifica que el primer máximo ocurre cuando $t=68$ s, con un valor aproximado de $H_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} = 221$ msnm; dicho valor corresponde a una presión $P_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} = H_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} - z_{\text{c}\acute{\text{a}}\text{m}\text{a}\text{r}\text{a}} + h_b = 131.3$ m, muy similar a la obtenida con las gráficas de dimensionamiento.

ANALISIS DE GOLPE DE ARIETE

PROYECTO: INSTALACION EXPERIMENTAL
 DETALLE : CAMARA DE AIRE CILINDRICA

DATOS

NUMERO DE TUBOS = 2
 NUM. DE TRAMOS DEL TUBO MAS CORTO = 3
 GASTO INICIAL (ESTABLECIDO) = $8.4E-03$ M³/S
 TIEMPO DE SIMULACION (TRANSITORIO) = 100 S

TUBO-NO.T	LONGITUD (M)	DIAM. (M)	CELERIDAD (M/S)	FRICCION
1 - 1	726.3	0.105	1345.0	0.0230
2 - 1	726.3	0.105	1345.0	0.0230

TUBO NO.	CELERIDAD AJUSTADA M ³ /S
1	1345.0
2	1345.0

FRONTERA IZQUIERDA

CAMARA DE AIRE
 GEOMETRIA : CAMARA CILINDRICA VERTICAL
 RADIO = .443 M
 LONGITUD (O ALTURA) = 2 M
 ELEVACIONES : Z₀ = 1.52 M ; Z MIN = 0 M
 CONEXION TUBO CORTO : LT = 2.5 M ; DT = .102 M
 VOLUMEN DE AIRE (O GAS) INICIAL = .3043 M³
 K(ENTRADA) = 14660 ; K(SALIDA) = 14860

FRONTERAS INTERNAS
ENTRE DATOS

1 Y 2 UNION DE TUBOS (CAMBIAN D, A, F Y/O NO.T)

FRONTERA DERECHA

NIVEL FINAL (AGUAS ABAJO) = 24.7327 MSNM
 CAMARA DE AIRE
 GEOMETRIA : CAMARA CILINDRICA VERTICAL
 RADIO = .443 M
 LONGITUD (O ALTURA) = 2 M
 ELEVACIONES : Z₀ = .8 M ; Z MIN = 0 M
 CONEXION TUBO CORTO : LT = 0 M ; DT = .105 M
 VOLUMEN DE AIRE (O GAS) INICIAL = .7143 M³
 K(ENTRADA) = 340 ; K(SALIDA) = 680

R E S U L T A D O S

T(S)	Z(CAMARA)	TUBO NO	C A R G A S		(M)	GASTOS(LT/S)		
			(1)	(N+1)	ELEV. ZC	(1)	(N+1)	QC
0.0	1.520	1	40.00	32.37	---	8.400	8.400	---
		2	32.37	24.73	0.800	8.400	8.400	0.000
0.9	1.509	1	36.33	29.82	---	8.181	8.220	---
		2	29.82	25.16	0.811	8.220	8.374	8.374
1.8	1.497	1	35.05	31.09	---	8.082	7.993	---
		2	31.09	25.61	0.823	7.993	7.976	7.976
2.7	1.486	1	33.99	31.10	---	7.688	7.830	---
		2	31.10	26.05	0.834	7.830	7.820	7.820
3.6	1.475	1	32.95	28.81	---	7.481	7.517	---
		2	28.81	26.49	0.846	7.517	7.411	7.411
4.5	1.464	1	32.06	30.22	---	7.087	7.177	---
		2	30.22	26.91	0.856	7.177	7.177	7.177
5.4	1.454	1	31.23	28.67	---	6.815	6.842	---
		2	28.67	27.33	0.867	6.842	6.929	6.929
6.3	1.444	1	30.45	29.60	---	6.555	6.486	---
		2	29.60	27.74	0.876	6.486	6.484	6.484
7.2	1.435	1	29.82	28.56	---	6.113	6.140	---
		2	28.56	28.13	0.886	6.140	6.194	6.194
8.1	1.426	1	29.20	28.25	---	5.824	5.839	---
		2	28.25	28.51	0.894	5.839	5.773	5.773
9.0	1.418	1	28.67	29.27	---	5.404	5.475	---
		2	29.27	28.87	0.902	5.475	5.461	5.461
9.9	1.410	1	28.18	28.26	---	5.097	5.104	---
		2	28.26	29.21	0.910	5.104	5.060	5.060
10.8	1.403	1	27.72	29.01	---	4.790	4.745	---
		2	29.01	29.54	0.917	4.745	4.735	4.735
11.7	1.396	1	27.36	28.29	---	4.375	4.380	---
		2	28.29	29.85	0.924	4.380	4.428	4.428
12.6	1.390	1	27.01	28.84	---	4.056	4.026	---
		2	28.84	30.13	0.930	4.026	4.013	4.013
13.5	1.385	1	26.72	28.93	---	3.660	3.704	---
		2	28.93	30.40	0.936	3.704	3.700	3.700
14.4	1.379	1	26.45	28.21	---	3.337	3.349	---
		2	28.21	30.64	0.941	3.349	3.303	3.303
15.3	1.375	1	26.23	28.84	---	2.957	2.987	---
		2	28.84	30.86	0.946	2.987	2.987	2.987
16.2	1.371	1	26.04	28.29	---	2.631	2.639	---
		2	28.29	31.06	0.950	2.639	2.671	2.671
17.1	1.367	1	25.87	28.79	---	2.322	2.285	---
		2	28.79	31.24	0.953	2.285	2.284	2.284
18.0	1.364	1	25.76	28.37	---	1.935	1.943	---
		2	28.37	31.39	0.956	1.943	1.966	1.966
18.9	1.361	1	25.66	28.31	---	1.625	1.625	---
		2	28.31	31.52	0.959	1.625	1.593	1.593

T(S)	Z(CAMARA)	TUBO NO.	C A R G A S		(M) ELEV. ZC	GASTOS(LT/S)		
			(1)	(N+1)		(1)	(N+1)	QC
19.8	1.359	1	25.60	28.87	---	1.251	1.284	---
		2	28.87	31.63	0.961	1.284	1.276	1.276
20.7	1.358	1	25.56	28.40	---	0.942	0.939	---
		2	28.40	31.71	0.963	0.939	0.915	0.915
21.6	1.357	1	25.55	28.88	---	0.635	0.605	---
		2	28.88	31.77	0.964	0.605	0.600	0.600
22.5	1.356	1	25.58	28.48	---	0.271	0.267	---
		2	28.48	31.80	0.964	0.267	0.299	0.299
23.4	1.356	1	25.62	28.91	---	-0.035	-0.060	---
		2	28.91	31.81	0.965	-0.060	-0.066	-0.066
24.3	1.356	1	25.70	28.99	---	-0.386	-0.363	---
		2	28.99	31.79	0.964	-0.363	-0.362	-0.362
25.2	1.357	1	25.81	28.54	---	-0.681	-0.679	---
		2	28.54	31.75	0.963	-0.679	-0.709	-0.709
26.1	1.358	1	25.95	29.03	---	-1.005	-0.988	---
		2	29.03	31.69	0.962	-0.988	-0.984	-0.984
27.0	1.360	1	26.11	28.66	---	-1.270	-1.271	---
		2	28.66	31.61	0.961	-1.271	-1.244	-1.244
27.9	1.362	1	26.29	29.09	---	-1.504	-1.538	---
		2	29.09	31.50	0.959	-1.538	-1.534	-1.534
28.8	1.364	1	26.51	28.77	---	-1.773	-1.773	---
		2	28.77	31.38	0.956	-1.773	-1.751	-1.751
29.7	1.367	1	26.73	28.78	---	-1.957	-1.964	---
		2	28.78	31.25	0.953	-1.964	-1.984	-1.984
30.6	1.370	1	26.98	29.23	---	-2.165	-2.145	---
		2	29.23	31.10	0.950	-2.145	-2.147	-2.147
31.5	1.373	1	27.23	28.91	---	-2.294	-2.303	---
		2	28.91	30.94	0.947	-2.303	-2.318	-2.318
32.4	1.377	1	27.49	29.30	---	-2.397	-2.424	---
		2	29.30	30.77	0.944	-2.424	-2.424	-2.424
33.3	1.380	1	27.77	29.03	---	-2.513	-2.521	---
		2	29.03	30.59	0.940	-2.521	-2.495	-2.495
34.2	1.384	1	28.04	29.37	---	-2.562	-2.585	---
		2	29.37	30.42	0.936	-2.585	-2.586	-2.586
35.1	1.388	1	28.32	29.44	---	-2.618	-2.607	---
		2	29.44	30.24	0.933	-2.607	-2.603	-2.603
36.0	1.391	1	28.60	29.18	---	-2.616	-2.619	---
		2	29.18	30.06	0.929	-2.619	-2.637	-2.637
36.9	1.395	1	28.87	29.51	---	-2.619	-2.612	---
		2	29.51	29.88	0.925	-2.612	-2.607	-2.607
37.8	1.399	1	29.14	29.29	---	-2.572	-2.576	---
		2	29.29	29.70	0.921	-2.576	-2.558	-2.558
38.7	1.403	1	29.40	29.59	---	-2.500	-2.525	---
		2	29.59	29.53	0.917	-2.525	-2.520	-2.520
39.6	1.406	1	29.66	29.40	---	-2.447	-2.449	---
		2	29.40	29.37	0.914	-2.449	-2.435	-2.435

TUBO NO.	SECCION	PR. MAX	TIEMPO	PR. MIN	TIEMPO
1	1	40.00	0.00	25.55	21.60
1	2	37.46	0.00	26.48	21.42
1	3	34.91	0.00	27.40	19.08
1	4	32.37	0.18	28.16	12.42
2	1	32.37	0.18	28.16	12.42
2	2	29.97	0.72	27.17	1.44
2	3	30.87	24.66	25.19	1.26
2	4	31.81	23.22	24.73	0.00

3300 DATOS DEL MODELO (CAPITULO IV)

3310 DATA 2

3320 DATA 1,3,5,0.0084,100

3330 DATA 3,3

3340 DATA 1

3350 DATA 726.3,0.105,1345,0.023,1,

726.3,0.105,1345,0.023,1 : MODELO II-UNAM, C/2 TRAMOS

3360 DATA 1,6,INSTALACION EXPERIMENTAL, CAMARA DE AIRE CILINDRICA

3370 DATA 40.00

3380 DATA 0,10.3,1.52,0.00,14250,14450,

0.3043,0.443,2.00,0.022,0.102,2.50

3390 DATA 0,10.3,0.80,0.00,340,680,

0.7143,0.443,2.00,0.020,0.105,0.00

TABLA 4.1B RESUMEN

ANALISIS DE CAMARA DE AIRE

PROYECTO : INSTALACION EXPERIMENTAL
 DETALLE : CRITERIO DE OSCILACION DE MASA

DATOS

CAMARA DE AIRE CILINDRICA (VERTICAL)
 TANQUE HIDRONEUMATICO COMO DEPOSITO FINAL
 MANIOBRA : FALLA SUBITA EN LINEA DE BOMBEO

DATOS DE LA CONDUCCION : LONGITUD (M)= 1453
 DIAM.TUBO(M)= .105
 COEF.DARCY = .023

DATOS DE LA CAMARA DE AIRE : VOLUMEN AIRE C1 (M3)= .3043
 DIAM.TRANSVERSAL (M)= .886
 PERDIDA CONEXION KE = 14660 (ENTRADA)
 KS = 14860 (SALIDA)

DATOS DEL DEPOSITO (CAMARA) : VOLUMEN AIRE C2 (M3)= .7143
 DIAM.TRANSVERSAL (M)= .886
 PERDIDA CONEXION KE = 340 (ENTRADA)
 KS = 680 (SALIDA)

CONDICIONES INICIALES : GASTO DE BOMBEO (M3/S) = 8.4E-03
 NIVEL (MSNM) CAMARA Z1= 1.52
 DINAMICO H0= 40
 CAMARA Z2= .8
 DEPOSITO HS= 24.7285

DATOS SIMULACION (TIEMPOS) : INCREMENTO TIEMPO (S)= .5
 TIEMPO P/ANALIZAR (S)= 120

TABLA 4.2A

R E S U L T A D O S

T(S)	Q(LT/S)	H0(MSNM)	C1(M3)	HS(MSNM)	C2(M3)
0	8.400	40.000	0.304	24.729	0.714
2	8.091	36.011	0.321	25.776	0.698
4	7.531	33.570	0.336	26.767	0.682
6	6.840	31.574	0.351	27.721	0.668
8	6.081	29.950	0.364	28.616	0.655
10	5.289	28.636	0.375	29.436	0.643
12	4.482	27.583	0.385	30.166	0.634
14	3.670	26.753	0.393	30.794	0.625
16	2.857	26.118	0.400	31.309	0.619
18	2.044	25.658	0.405	31.704	0.614
20	1.232	25.358	0.408	31.972	0.611
22	0.421	25.208	0.409	32.108	0.609
24	-0.388	25.210	0.410	32.111	0.609
26	-1.163	25.387	0.408	31.981	0.611
28	-1.843	25.731	0.405	31.731	0.614
30	-2.383	26.213	0.401	31.384	0.618
32	-2.761	26.801	0.395	30.970	0.623
34	-2.974	27.461	0.390	30.517	0.629
36	-3.033	28.161	0.384	30.053	0.635
38	-2.957	28.871	0.378	29.600	0.641
40	-2.768	29.562	0.372	29.176	0.647
42	-2.486	30.211	0.367	28.794	0.652
44	-2.130	30.793	0.362	28.465	0.657
46	-1.718	31.287	0.358	28.194	0.660
48	-1.262	31.677	0.355	27.986	0.663
50	-0.778	31.947	0.353	27.845	0.665
52	-0.277	32.088	0.352	27.773	0.666
54	0.230	32.093	0.352	27.770	0.667
56	0.719	31.951	0.353	27.836	0.666
58	1.155	31.676	0.355	27.966	0.664
60	1.511	31.293	0.358	28.154	0.661
62	1.770	30.835	0.361	28.386	0.658
64	1.925	30.335	0.365	28.650	0.654
66	1.979	29.825	0.369	28.932	0.650
68	1.939	29.330	0.372	29.218	0.646
70	1.819	28.871	0.376	29.496	0.642
72	1.630	28.462	0.380	29.754	0.639
74	1.387	28.113	0.383	29.982	0.636
76	1.100	27.832	0.385	30.171	0.633
78	0.782	27.623	0.387	30.316	0.632
80	0.443	27.488	0.388	30.410	0.630
82	0.092	27.430	0.389	30.452	0.630
84	-0.260	27.450	0.389	30.438	0.630
86	-0.595	27.553	0.388	30.372	0.631
88	-0.895	27.731	0.386	30.256	0.632
90	-1.141	27.976	0.384	30.100	0.634
92	-1.322	28.274	0.382	29.912	0.637
94	-1.434	28.609	0.379	29.703	0.640
96	-1.475	28.965	0.376	29.485	0.642

- 2 -

T(S)	Q(LT/S)	H0(MSNM)	C1(M3)	HS(MSNM)	C2(M3)
98	-1.447	29.325	0.373	29.269	0.645
100	-1.358	29.675	0.370	29.063	0.648
102	-1.214	29.998	0.368	28.876	0.651
104	-1.024	30.282	0.366	28.715	0.653
106	-0.797	30.514	0.364	28.584	0.655
108	-0.544	30.687	0.362	28.489	0.656
110	-0.272	30.792	0.362	28.431	0.657
112	0.009	30.826	0.361	28.412	0.657
114	0.288	30.785	0.362	28.434	0.657
116	0.549	30.670	0.362	28.493	0.656
118	0.777	30.490	0.364	28.588	0.655
120	0.960	30.257	0.366	28.713	0.653

CONDICIONES EXTREMAS (Z, C, H)

T(S)	Q(LT/S)	H0(MSNM)	C1(M3)	HS(MSNM)	C2(M3)
0	0.000	40.000	0.304	24.729	0.714
24	0.000	25.194	0.410	32.123	0.609
54	0.000	32.105	0.352	27.764	0.667
83	0.000	27.430	0.389	30.452	0.630
112	0.000	30.826	0.361	28.412	0.657

TABLA 4.2B RESUMEN

ANALISIS DE CAMARA DE AIRE

PROYECTO : EJEMPLO DEL CAPITULO 4
 DETALLE : CRITERIO DE OSCILACION DE MASA

D A T O S

CAMARA DE AIRE CILINDRICA (VERTICAL)
 MANIOBRA : FALLA SUBITA EN LINEA DE BOMBEO

DATOS DE LA CONDUCCION	:	LONGITUD (M)= 3800
		DIAM.TUBO(M)= .6
		COEF.DARCY = .023
DATOS DE LA CAMARA DE AIRE	:	VOLUMEN DE AIRE (M3)= 6.9
		DIAM.TRANSVERSAL (M)= 2.5
		PERDIDA CONEXION KE = 0 (ENTRADA)
		KS = 0 (SALIDA)
CONDICIONES INICIALES	:	GASTO DE BOMBEO (M3/S)= .8
		NIVEL EN CAMARA (MSNM)= 100
		NIVEL CARGA DE BOMBEO = 234.5
		NIVEL DEPOSITO (MSNM) = 175.001
DATOS SIMULACION (TIEMPOS)	:	INCREMENTO TIEMPO (S) = .5
		TIEMPO P/ANALIZAR (S) = 150

TABLA 4.3A

TABLA 4.3B

R E S U L T A D O S

T(S)	NIVEL CAMARA	VOLUMEN (M3)	CARGA (MSNM)	GASTO (M3/S)
0	100.000	6.900	234.500	0.800
2	99.677	8.483	202.384	0.776
4	99.371	9.987	181.984	0.724
6	99.089	11.370	168.307	0.658
8	98.835	12.618	158.716	0.588
10	98.610	13.724	151.758	0.518
12	98.413	14.689	146.590	0.448
14	98.244	15.518	142.695	0.380
16	98.103	16.213	139.750	0.315
18	97.988	16.778	137.543	0.251
20	97.898	17.216	135.933	0.188
22	97.834	17.531	134.829	0.127
24	97.795	17.724	134.172	0.066
26	97.780	17.797	133.928	0.006
28	97.790	17.750	134.085	-0.053
30	97.823	17.585	134.646	-0.112
32	97.880	17.305	135.618	-0.167
34	97.959	16.918	137.017	-0.219
36	98.058	16.434	138.867	-0.265
38	98.174	15.863	141.198	-0.305
40	98.305	15.219	144.049	-0.338
42	98.449	14.516	147.466	-0.364
44	98.601	13.768	151.505	-0.382
46	98.759	12.991	156.224	-0.393
48	98.920	12.202	161.680	-0.395
50	99.080	11.416	167.916	-0.389
52	99.236	10.650	174.946	-0.375
54	99.384	9.923	182.715	-0.351
56	99.521	9.252	191.064	-0.319
58	99.643	8.655	199.673	-0.277
60	99.745	8.150	208.017	-0.226
62	99.826	7.756	215.366	-0.167
64	99.880	7.487	220.869	-0.101
66	99.908	7.354	223.750	-0.031
68	99.906	7.363	223.551	0.040
70	99.875	7.512	220.332	0.108
72	99.819	7.790	214.701	0.168
74	99.740	8.176	207.572	0.216
76	99.645	8.643	199.845	0.250
78	99.538	9.167	192.208	0.271
80	99.425	9.721	185.093	0.281
82	99.311	10.284	178.715	0.280
84	99.198	10.836	173.144	0.271
86	99.091	11.363	168.368	0.255
88	98.991	11.854	164.333	0.234
90	98.900	12.298	160.973	0.210
92	98.820	12.690	158.220	0.182
94	98.752	13.024	156.013	0.152
96	98.697	13.297	154.300	0.120

- 2 -

T(S)	NIVEL CAMARA	VOLUMEN (M3)	CARGA (MSNM)	GASTO (M3/S)
98	98.655	13.505	153.040	0.088
100	98.626	13.647	152.204	0.054
102	98.610	13.721	151.772	0.020
104	98.609	13.728	151.732	-0.014
106	98.621	13.667	152.083	-0.047
108	98.647	13.540	152.828	-0.080
110	98.686	13.351	153.968	-0.110
112	98.736	13.103	155.510	-0.137
114	98.797	12.803	157.458	-0.161
116	98.867	12.460	159.816	-0.181
118	98.945	12.081	162.583	-0.197
120	99.027	11.676	165.750	-0.207
122	99.113	11.256	169.295	-0.212
124	99.199	10.832	173.180	-0.211
126	99.284	10.415	177.335	-0.205
128	99.365	10.015	181.660	-0.193
130	99.441	9.646	186.011	-0.176
132	99.508	9.316	190.201	-0.153
134	99.565	9.038	194.006	-0.125
136	99.609	8.819	197.181	-0.093
138	99.640	8.666	199.489	-0.058
140	99.656	8.586	200.738	-0.021
142	99.657	8.582	200.816	0.016
144	99.643	8.651	199.721	0.053
146	99.614	8.792	197.571	0.087
148	99.573	8.997	194.582	0.117
150	99.520	9.255	191.017	0.140

CONDICIONES EXTREMAS (Z, C, H)

T(S)	NIVEL CAMARA	VOLUMEN (M3)	CARGA (MSNM)	GASTO (M3/S)
0	100.000	6.900	234.500	0.000
27	97.780	17.797	133.930	0.000
67	99.910	7.341	224.046	0.000
104	98.608	13.733	151.705	0.000
142	99.659	8.576	200.908	0.000

TABLA 4.3B RESUMEN

ANALISIS DE GOLPE DE ARIETE

PROYECTO : EJEMPLO DEL CAPITULO 4
 DETALLE : SOLUCION NUMERICA

D A T O S

NUMERO DE TUBOS = 2
 NUM. DE TRAMOS DEL TUBO MAS CORTO = 2
 GASTO INICIAL (ESTABLECIDO) = .8 M3/S
 TIEMPO DE SIMULACION (TRANSITORIO) = 120 S

TUBO-NO.T	LONGITUD (M)	DIAM. (M)	CELERIDAD (M/S)	FRICCION
1 - 1	1900.0	0.600	950.0	0.0230
2 - 1	1900.0	0.600	950.0	0.0230

TUBO NO.	CELERIDAD AJUSTADA M3/S
1	950.0
2	950.0

* FRONTERA IZQUIERDA

CAMARA DE AIRE
 GEOMETRIA : CAMARA CILINDRICA VERTICAL
 RADIO = 1.25 M
 LONGITUD (O ALTURA) = 4.4 M
 ELEVACIONES : Z0 = 100 M ; Z MIN = 97 M
 CONEXION TUBO CORTO : LT = 0 M ; DT = .45 M
 VOLUMEN DE AIRE (O GAS) INICIAL = 6.9 M3
 K(ENTRADA) = 0 ; K(SALIDA) = 0

* FRONTERAS INTERNAS
 ENTRE DATOS

1 Y 2 UNION DE TUBOS (CAMBIAN D, A, F Y/O NO.T)

* FRONTERA DERECHA

NIVEL FINAL (AGUAS ABAJO) = 175 MSNM

TABLA 4.4A

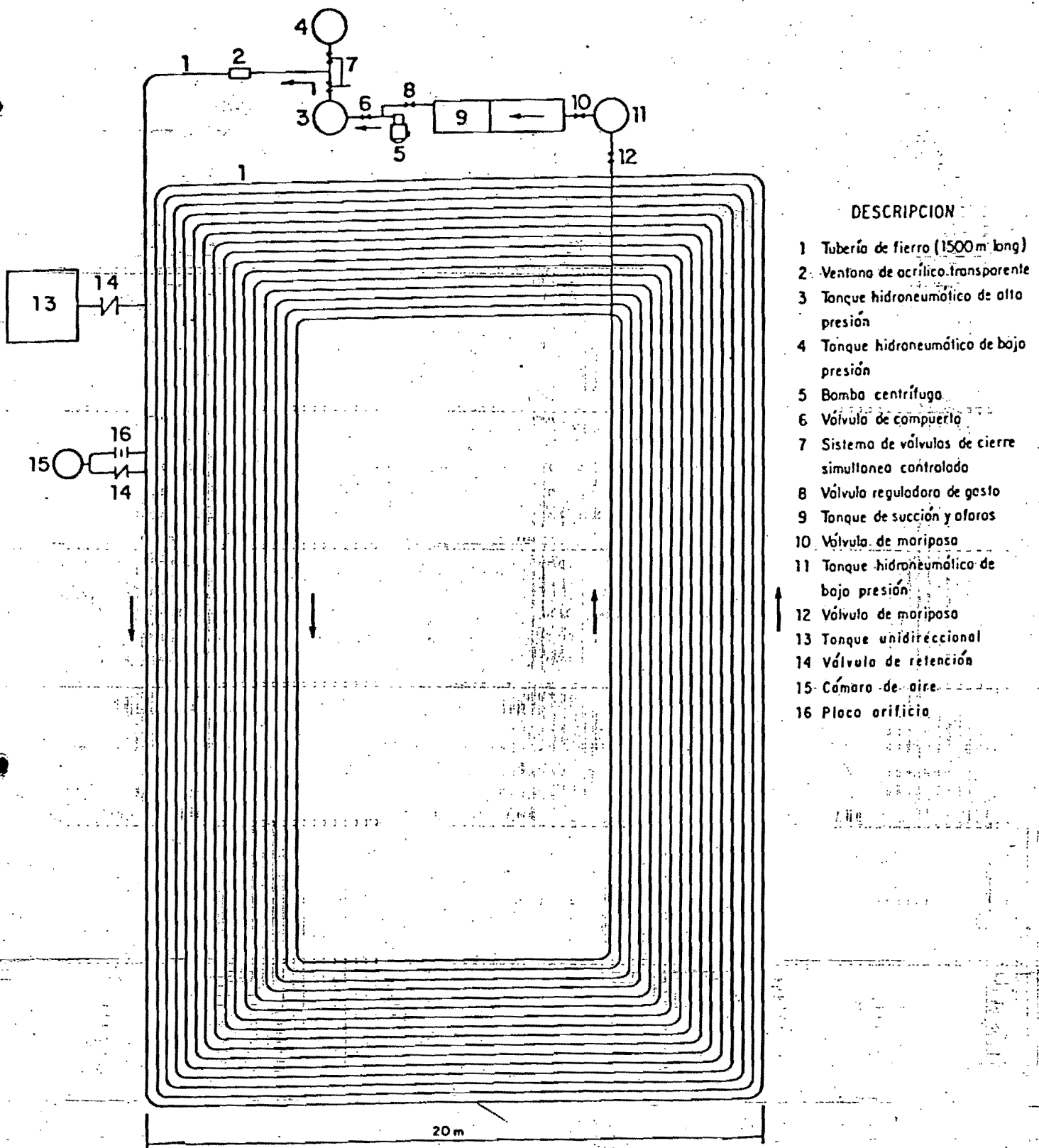
R E S U L T A D O S

T(S)	Z(CAMARA)	TUBO NO	C A R G A S (M)		ELEV.ZC	GASTOS(M3/S)		QC
			(1)	(N+1)		(1)	(N+1)	
0.0	100.000	1	234.50	204.75	---	0.800	0.800	---
		2	204.75	175.00	---	0.800	0.800	---
2.0	99.768	1	210.04	204.75	---	0.729	0.800	---
		2	204.75	175.00	---	0.800	0.800	---
4.0	99.484	1	188.65	182.77	---	0.673	0.736	---
		2	182.77	175.00	---	0.736	0.800	---
6.0	99.216	1	173.99	163.27	---	0.642	0.685	---
		2	163.27	175.00	---	0.685	0.685	---
8.0	98.958	1	163.09	167.66	---	0.624	0.604	---
		2	167.66	175.00	---	0.604	0.592	---
10.0	98.723	1	155.09	173.92	---	0.520	0.543	---
		2	173.92	175.00	---	0.543	0.536	---
12.0	98.529	1	149.55	162.78	---	0.436	0.463	---
		2	162.78	175.00	---	0.463	0.502	---
14.0	98.362	1	145.37	152.07	---	0.386	0.404	---
		2	152.07	175.00	---	0.404	0.399	---
16.0	98.212	1	142.00	157.89	---	0.354	0.330	---
		2	157.89	175.00	---	0.330	0.318	---
18.0	98.085	1	139.40	164.36	---	0.262	0.274	---
		2	164.36	175.00	---	0.274	0.267	---
20.0	97.994	1	137.66	156.53	---	0.187	0.204	---
		2	156.53	175.00	---	0.204	0.234	---
22.0	97.928	1	136.46	148.75	---	0.140	0.151	---
		2	148.75	175.00	---	0.151	0.145	---
24.0	97.877	1	135.57	154.99	---	0.110	0.084	---
		2	154.99	175.00	---	0.084	0.072	---
26.0	97.848	1	135.07	161.66	---	0.025	0.032	---
		2	161.66	175.00	---	0.032	0.025	---
28.0	97.853	1	135.15	155.06	---	-0.045	-0.033	---
		2	155.06	175.00	---	-0.033	-0.007	---
30.0	97.881	1	135.63	148.55	---	-0.090	-0.084	---
		2	148.55	175.00	---	-0.084	-0.091	---
32.0	97.924	1	136.38	155.54	---	-0.118	-0.147	---
		2	155.54	175.00	---	-0.147	-0.159	---
34.0	97.986	1	137.52	162.57	---	-0.196	-0.192	---
		2	162.57	175.00	---	-0.192	-0.200	---
36.0	98.079	1	139.28	156.96	---	-0.254	-0.247	---
		2	156.96	175.00	---	-0.247	-0.222	---
38.0	98.189	1	141.51	152.06	---	-0.283	-0.282	---
		2	152.06	175.00	---	-0.282	-0.291	---
40.0	98.307	1	144.08	159.43	---	-0.294	-0.324	---
		2	159.43	175.00	---	-0.324	-0.336	---
42.0	98.436	1	147.14	166.39	---	-0.345	-0.346	---
		2	166.39	175.00	---	-0.346	-0.354	---

T(S)	Z(CAMARA)	TUBO NO	C A R G A S (M)		ELEV.ZC	GASTOS(M3/S)		QC
			(1)	(N+1)		(1)	(N+1)	
44.0	98.583	1	151.01	162.58	---	-0.374	-0.373	---
		2	162.58	175.00	---	-0.373	-0.354	---
46.0	98.736	1	155.49	159.94	---	-0.375	-0.380	---
		2	159.94	175.00	---	-0.380	-0.391	---
48.0	98.886	1	160.46	167.63	---	-0.360	-0.391	---
		2	167.63	175.00	---	-0.391	-0.404	---
50.0	99.035	1	166.06	174.72	---	-0.376	-0.383	---
		2	174.72	175.00	---	-0.383	-0.391	---
52.0	99.187	1	172.64	173.14	---	-0.369	-0.377	---
		2	173.14	175.00	---	-0.377	-0.364	---
54.0	99.332	1	179.84	173.00	---	-0.339	-0.352	---
		2	173.00	175.00	---	-0.352	-0.364	---
56.0	99.461	1	187.25	181.30	---	-0.295	-0.328	---
		2	181.30	175.00	---	-0.328	-0.341	---
58.0	99.577	1	194.85	188.56	---	-0.275	-0.287	---
		2	188.56	175.00	---	-0.287	-0.295	---
60.0	99.681	1	202.68	188.27	---	-0.235	-0.246	---
		2	188.27	175.00	---	-0.246	-0.237	---
62.0	99.765	1	209.77	189.11	---	-0.176	-0.188	---
		2	189.11	175.00	---	-0.188	-0.200	---
64.0	99.823	1	215.14	196.31	---	-0.109	-0.133	---
		2	196.31	175.00	---	-0.133	-0.143	---
66.0	99.858	1	218.60	200.83	---	-0.066	-0.065	---
		2	200.83	175.00	---	-0.065	-0.069	---
68.0	99.874	1	220.20	197.27	---	-0.008	-0.003	---
		2	197.27	175.00	---	-0.003	0.010	---
70.0	99.864	1	219.13	194.39	---	0.060	0.067	---
		2	194.39	175.00	---	0.067	0.061	---
72.0	99.825	1	215.33	196.85	---	0.127	0.124	---
		2	196.85	175.00	---	0.124	0.123	---
74.0	99.766	1	209.85	195.92	---	0.160	0.181	---
		2	195.92	175.00	---	0.181	0.185	---
76.0	99.693	1	203.66	188.22	---	0.199	0.219	---
		2	188.22	175.00	---	0.219	0.237	---
78.0	99.604	1	196.82	183.12	---	0.237	0.253	---
		2	183.12	175.00	---	0.253	0.250	---
80.0	99.502	1	189.83	183.75	---	0.263	0.267	---
		2	183.75	175.00	---	0.267	0.267	---
82.0	99.396	1	183.37	181.76	---	0.256	0.277	---
		2	181.76	175.00	---	0.277	0.282	---
84.0	99.292	1	177.73	174.95	---	0.255	0.271	---
		2	174.95	175.00	---	0.271	0.286	---
86.0	99.187	1	172.65	171.36	---	0.255	0.265	---
		2	171.36	175.00	---	0.265	0.261	---
88.0	99.085	1	168.13	172.78	---	0.246	0.246	---
		2	172.78	175.00	---	0.246	0.245	---

T(S)	Z(CAMARA)	TUBO NO	C A R G A S		(M) ELEV. ZC	GASTOS(M3/S)		
			(1)	(N+1)		(1)	(N+1)	QC
90.0	98.991	1	164.35	171.76	---	0.213	0.228	---
		2	171.76	175.00	---	0.228	0.231	---
92.0	98.909	1	161.29	166.75	---	0.191	0.200	---
		2	166.75	175.00	---	0.200	0.212	---
94.0	98.835	1	158.72	164.73	---	0.172	0.176	---
		2	164.73	175.00	---	0.176	0.171	---
96.0	98.770	1	156.57	166.96	---	0.148	0.144	---
		2	166.96	175.00	---	0.144	0.142	---
98.0	98.718	1	154.94	166.80	---	0.106	0.116	---
		2	166.80	175.00	---	0.116	0.118	---
100.0	98.681	1	153.82	163.03	---	0.076	0.081	---
		2	163.03	175.00	---	0.081	0.090	---
102.0	98.655	1	153.05	162.08	---	0.051	0.052	---
		2	162.08	175.00	---	0.052	0.045	---
104.0	98.639	1	152.60	165.01	---	0.024	0.016	---
		2	165.01	175.00	---	0.016	0.014	---
106.0	98.639	1	152.58	165.51	---	-0.020	-0.014	---
		2	165.51	175.00	---	-0.014	-0.013	---
108.0	98.653	1	153.00	162.57	---	-0.050	-0.049	---
		2	162.57	175.00	---	-0.049	-0.042	---
110.0	98.679	1	153.75	162.50	---	-0.075	-0.078	---
		2	162.50	175.00	---	-0.078	-0.085	---
112.0	98.714	1	154.82	166.14	---	-0.099	-0.110	---
		2	166.14	175.00	---	-0.110	-0.113	---
114.0	98.762	1	156.32	167.25	---	-0.137	-0.134	---
		2	167.25	175.00	---	-0.134	-0.134	---
116.0	98.822	1	158.28	165.20	---	-0.157	-0.160	---
		2	165.20	175.00	---	-0.160	-0.154	---
118.0	98.889	1	160.57	166.05	---	-0.170	-0.176	---
		2	166.05	175.00	---	-0.176	-0.185	---
120.0	98.960	1	163.17	170.25	---	-0.181	-0.194	---
		2	170.25	175.00	---	-0.194	-0.198	---

TUBO NO	SECCION	PR. MAX	-	TIEMPO	PR. MIN	-	TIEMPO
1	1	234.50	-	0.00	135.05	-	27.00
1	2	219.63	-	0.00	140.86	-	23.00
1	3	204.75	-	1.00	148.55	-	30.00
2	1	204.75	-	1.00	148.55	-	30.00
2	2	189.88	-	3.00	159.82	-	30.00
2	3	175.00	-	0.00	175.00	-	0.00



DESCRIPCION

- 1 Tubería de hierro (1500 m lmg)
- 2 Ventosa de acrílico transparente
- 3 Tanque hidroneumático de alta presión
- 4 Tanque hidroneumático de baja presión
- 5 Bomba centrífuga
- 6 Válvula de compuerta
- 7 Sistema de válvulas de cierre simultáneo controlado
- 8 Válvula reguladora de gasto
- 9 Tanque de succión y oraros
- 10 Válvula de mariposa
- 11 Tanque hidroneumático de baja presión
- 12 Válvula de mariposa
- 13 Tanque unidireccional
- 14 Válvula de retención
- 15 Cámara de aire
- 16 Placa orificio

Fig 4.1 Instalación experimental de fenómenos hidráulicos transitorios

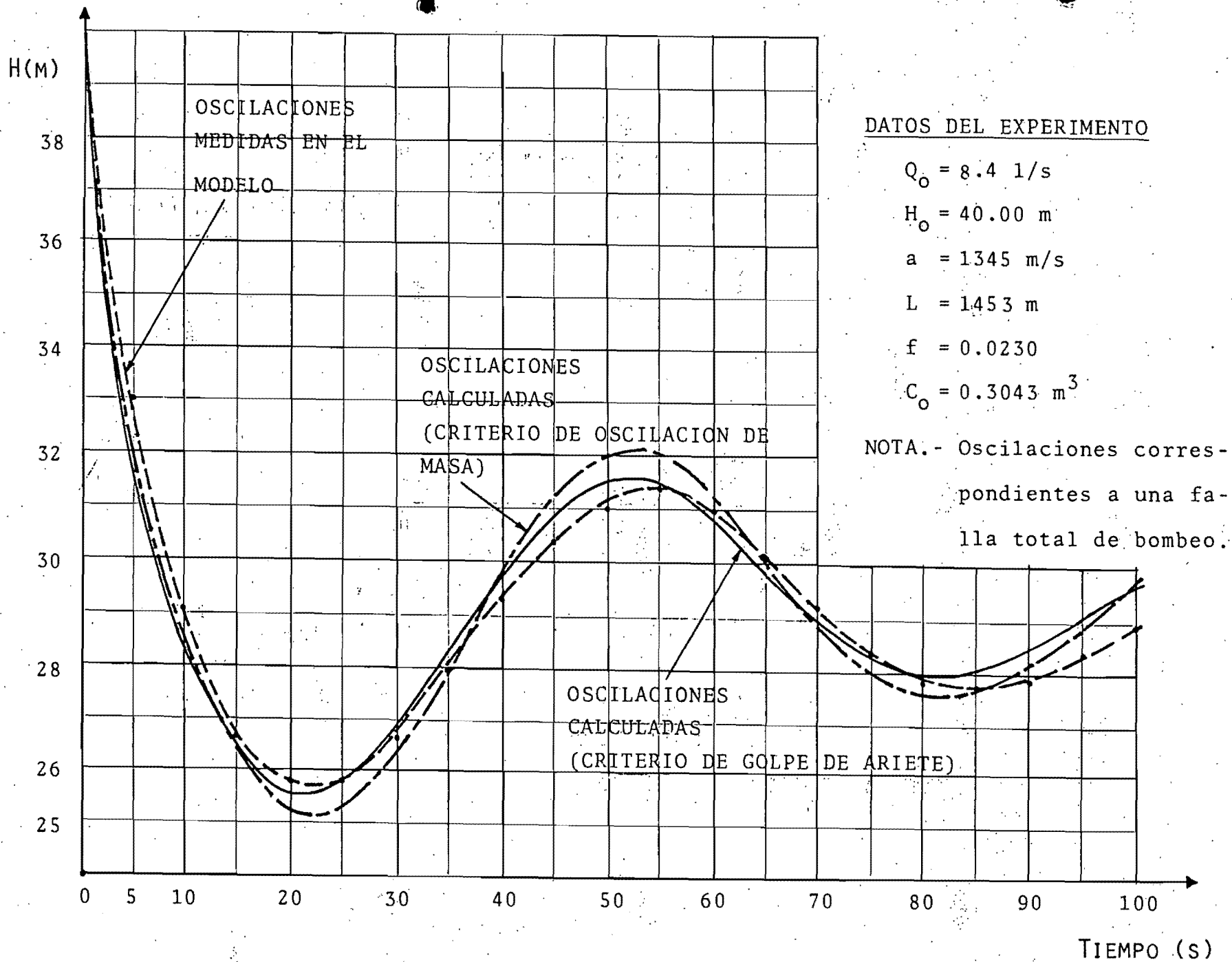


FIGURA 4.2 VARIACION DE LA CARGA DE PRESION EN EL PUNTO DE CONEXION DE LA CAMARA DE AIRE CON LA LINEA. MODELO EXPERIMENTAL.

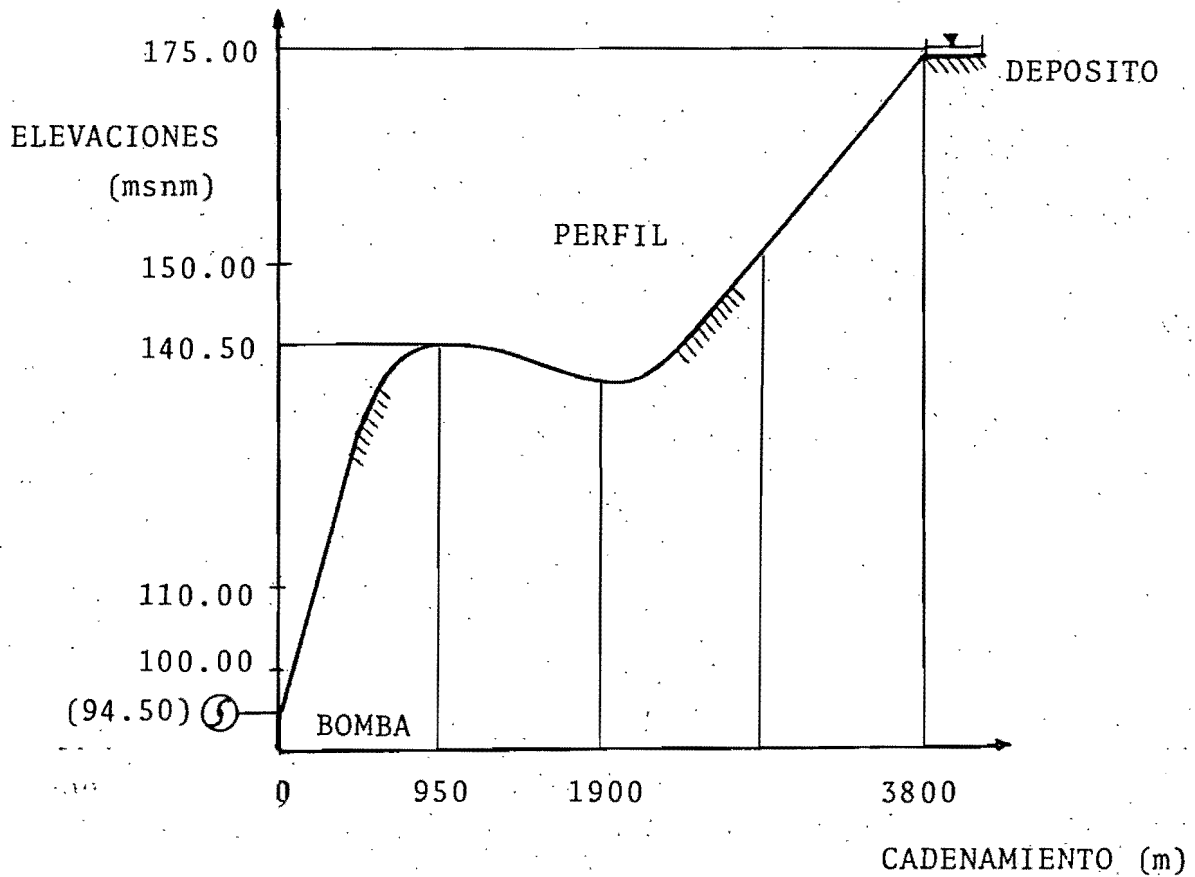


FIGURA 4.3 PERFIL DE LA CONDUCCION, EN EL EJEMPLO (CAP 4.2)

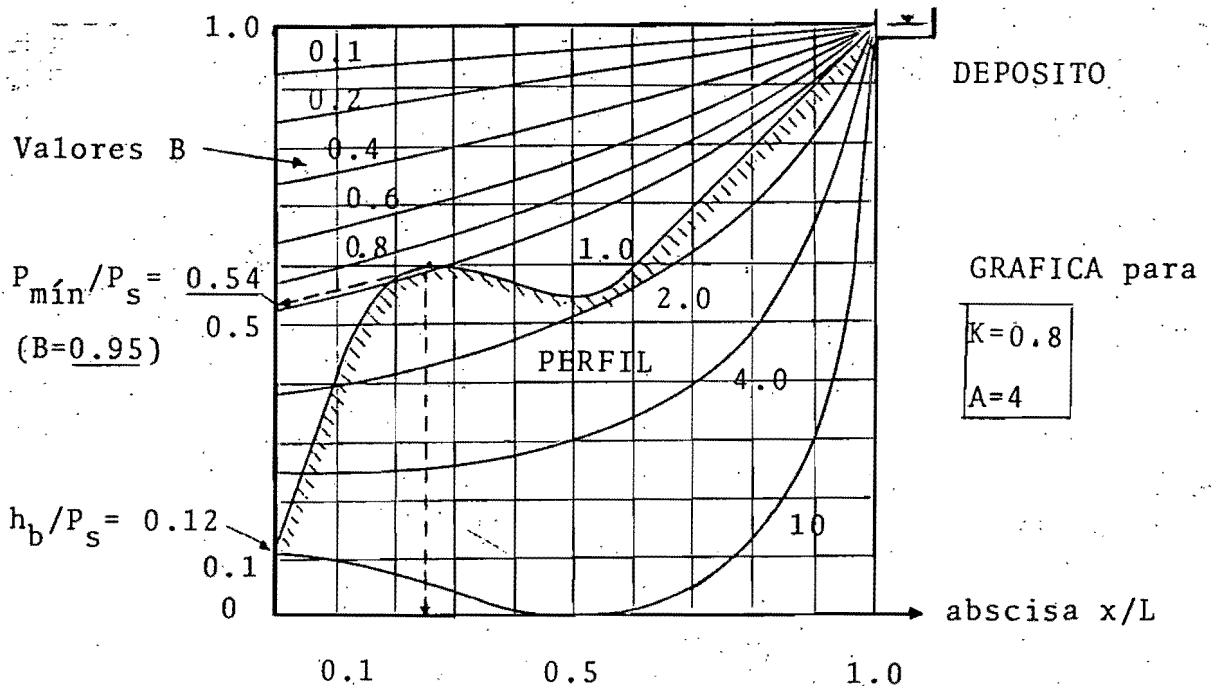


FIGURA 4.4 EMPLEO DE GRAFICA DE DIMENSIONAMIENTO (SUBPRESION)

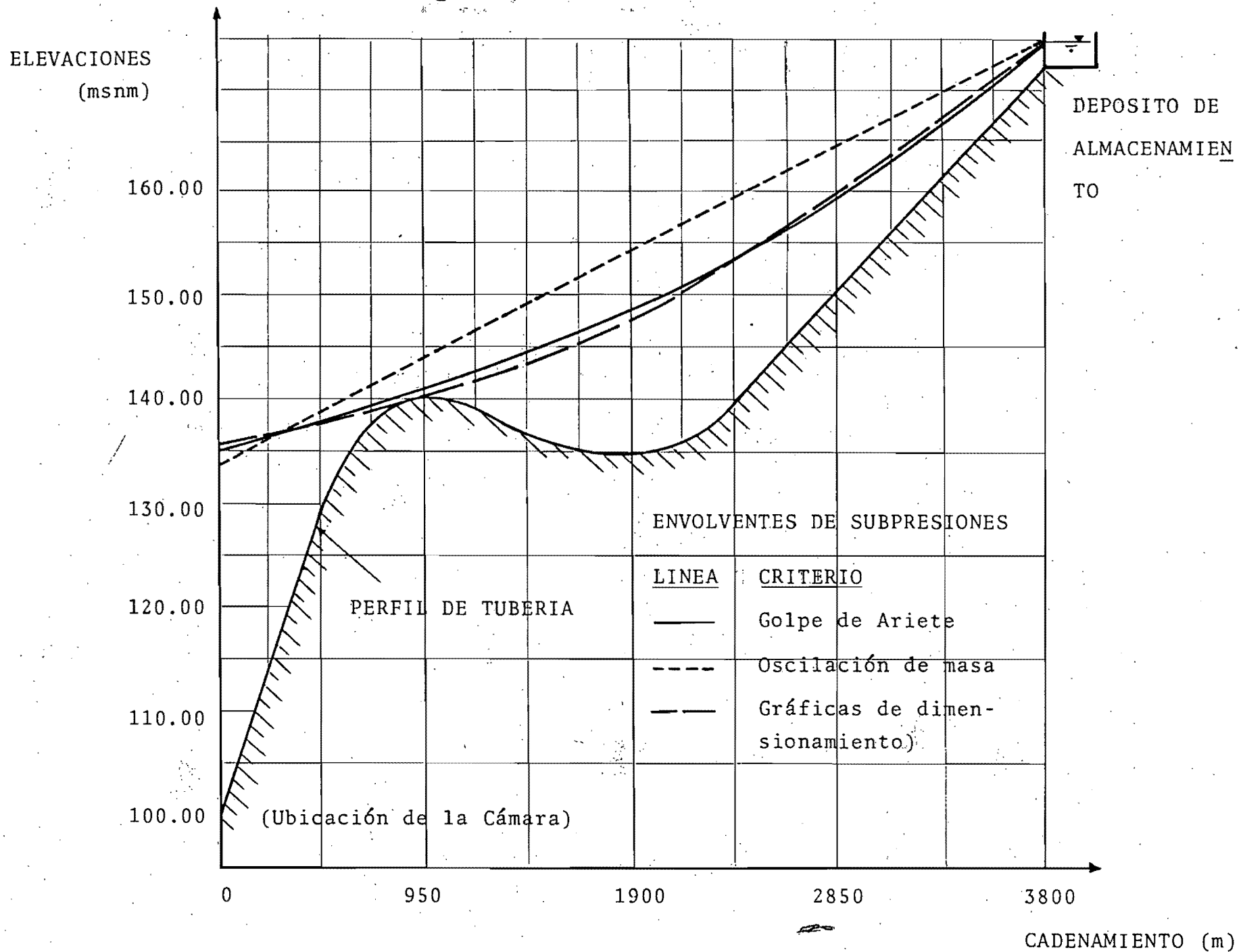


FIGURA 4.5 ENVOLVENTES DE PRESIONES MÍNIMAS (EJEMPLO)

CONCLUSIONES

A través del desarrollo de cada uno de los capítulos que integran el presente trabajo, se plantea la necesidad de puntualizar una serie de conclusiones o recomendaciones propios de cada tema tratado. Las conclusiones que se presentan a continuación no son más que una síntesis de los razonamientos expuestos a lo largo de la tesis y requieren, para su mayor claridad, formar parte del contexto de los capítulos.

- 1) La cámara de aire es un dispositivo de protección para tuberías que contienen fluido a presión y se caracteriza por prevenir la ocurrencia de fluctuaciones rápidas de flujo

debidas al golpe de ariete.

- 2) En condiciones transitorias, la cámara cede o admite líquido de la tubería, imponiendo al sistema una oscilación de masa, sin embargo, debido a que se trata de un tanque cerrado con un volumen confinado de aire, las fluctuaciones de carga en la cámara son restringidas y existe un efecto de las ondas de presión que se propaga a lo largo de la línea.
- 3) El efecto del golpe de ariete se puede despreciar en una línea protegida con cámara de aire cuando el valor de la celeridad es alto ($a \rightarrow \infty$) o cuando el volumen de aire es mayor que $0.01Q_0L$; Q_0 es el gasto en la tubería en condiciones iniciales y L su longitud.
- 4) Se considera favorable la protección de una línea de bombeo con cámara de aire cuando $aV_0/gP_s > 1$, donde a es la celeridad, V_0 la velocidad en la línea en condiciones establecidas, g la aceleración de la gravedad y P_s la carga de presión absoluta (en la bomba) en condiciones estáticas. Sin embargo, la envolvente de presiones mínimas, después de una falla total de los equipos, es desfavorable cuando el perfil de terreno no tiene forma cóncava y es necesario adoptar dimensiones adecuadas de la cámara para

que no existan riesgos de cavitación. En todo caso, es recomendable revisar el costo del dispositivo con el de otros sistemas de protección.

- 5) Las ventajas de la cámara de aire sobre otros dispositivos que previenen las fluctuaciones rápidas de presión, en condiciones similares, son su localización inmediata a la planta de bombeo y su mantenimiento mínimo, sobre todo cuando está provista de un depósito flexible interior donde se confina el gas, limitándose el problema de pérdidas de volumen. La desventaja principal es que se requiere un control constante del volumen de aire.
- 6) En relación a la geometría de las cámaras se observa que su forma no influye directamente en la magnitud de las presiones críticas, pero se requiere definir la variación del volumen de aire y niveles para la revisión de su diseño geométrico. El volumen total del aparato debe ser tal que alcance a contener el volumen máximo de aire $C_{m\acute{a}x}$, cuando ocurre la presión mínima; por seguridad, el volumen total puede considerarse igual a $1.2C_{m\acute{a}x}$.
- 7) En cuanto a las pérdidas de carga en la conexión de la cámara y tubería, es recomendable reducirlas al mínimo en fases de vaciado, para no impedir el buen funcionamiento

del dispositivo al ceder flujo a la línea. En cambio, resulta favorable incrementar las pérdidas en fases de llenado, para restringir la entrada de gasto a la cámara y retardar la aceleración de la columna líquida; con ello las sobrepresiones se reducen, siempre y cuando no se admitan valores cercanos a los inducidos por golpe de ariete, en ausencia de toda protección.

- 8) El diseño preliminar más común utilizado para cámaras de aire se hace mediante gráficas de dimensionamiento. De la diversidad de gráficas existentes, se recomendaron para su presentación las elaboradas por Puech y Meunier porque, además de utilizar en el cálculo el criterio del golpe de ariete y la relación politrópica de $PC^{1.2} = \text{constante}$ para la expansión y compresión del aire, se pueden calcular valores de presión mínima para cualquier punto del perfil y a su vez, determinar diversos valores de presión máxima en la cámara para cualquier valor del coeficiente de pérdidas de entrada en la conexión.

Por otro lado, el planteamiento de ecuaciones que definen el comportamiento hidráulico de la cámara de aire, en condiciones transitorias, permitió definir una ecuación general implí

cita en función de la carga de presión en el punto de conexión del dispositivo y del gasto a través de la misma; adicionalmente, se establecieron varias expresiones auxiliares asociadas a la geometría del tanque hidroneumático. Para resolver la ecuación general, se completó el sistema con las ecuaciones explícitas que se emplean en el método de las características para análisis del golpe de ariete; la solución de la ecuación converge rápidamente con el algoritmo de Newton-Raphson cuando se plantea como incógnita el gasto a través de la conexión.

Finalmente, el procedimiento de diseño recomendado es el siguiente :

- a) Factibilidad de la cámara de aire. Se revisa si la cámara es un dispositivo adecuado para proteger la tubería a presión que se estudia; para ello puede emplearse la tabla 2.1 ó seguir los criterios de utilización del capítulo 2.3.3.
- b) Dimensionamiento preliminar. Se determinan los volúmenes de aire y total de la cámara , para que las presiones críticas que se presenten no excedan los límites que impone el sistema hidráulico; para ello se recomienda utilizar las gráficas de dimensionamiento descritas en el capítulo

3.3.3. En el caso de protección para una red de tubos, puede adoptarse el criterio de simplificación descrito en el capítulo 2.3.3, antes de utilizar las gráficas.

- c) Revisión de diseño. Se revisan las presiones máximas y mínimas que ocurren, en condiciones transitorias, en el sistema hidráulico. Este procedimiento puede llevarse a cabo con ayuda de los programas presentados en el capítulo 3 y cuyos listados se incluyen en los apéndices B y C.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Chaudry, M.H., Applied Hydraulic Transients, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1979.
- [2] Thorley, A.R.P. y Enever K.J., Control and Suppression of pressure surges in pipelines and tunnels, CIRIA Report 84, London, 1979.
- [3] Puech Ch. y Meunier M., Etude du Fonctionnement et du Dimensionnement des Ballons d'air Anti-Bélier, Bulletin Technique de Genie Rural 124, France, Mayo 1978.
- [4] Manuel A.R., Waterhammer in Pressure Conduits, Delft Hydraulics Laboratory, Enero 1970.
- [5] Sliosberg, P., Calcul des Réservoirs d'air, La Houille Blanche, Junio 1952.
- [6] Combes y Borot, Nouvel Abaque pour le calcul des Réservoirs d'air compte tenu des pertes de charge, La Houille Blanche, Noviembre 1952.
- [7] Lupton, H.R., Volume of Air Vessels for Surge Protection, Journal of Civil Engineering, Junio 1953.
- [8] Dubin Ch. y Gueneau A., Détermination des dimensions caractéristiques d'un réservoir d'air sur une installa-

tion élévatoire, La Houille Blanche, Diciembre 1955.

- [9] Parmakian, J., Waterhammer Analysis, Dover Publications, Inc., New York, 1963.
- [10] Graze, H.R. y Forrest, J.A., New Design Charts for Air Chambers, Fifth Australian Conference on Hydraulics and Fluid Mechanics, New Zeland, 1974.
- [11] Ruus, E., Charts for Waterhammer in Pipelines with Air Chamber, Canadian Journal Of Civil Engineering, vol.4, no.3, Septiembre 1977.
- [12] Guarga, R., Carmona, R. y Aguilar, L., Relación entre topografía y dispositivos para el control de transitorios en Acueductos, XI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Noviembre 1982.
- [13] Bergh-Christiansen, J., Surge chamber design for Hydro-power Station (Jukla), Water Power, London, Octubre 1982.
- [14] Reynolds, W.C. y Perkins, H.C., Engineering Thermodynamics, Mc-Graw-Hill, New York, 1977.
- [15] Manual de Diseño de Obras Civiles, Hidrotecnia, A.2.16 Métodos Numéricos, CFE, México, 1983.

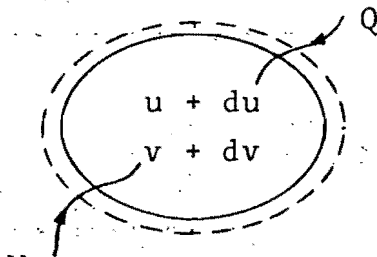
APENDICE A . VARIACION PRESION-VOLUMEN EN CAMARAS DE AIRE. FUNDAMENTOS TERMODINAMICOS [14]

La entropía es una propiedad de la materia que mide el grado de desorden microscópico que ocurre durante algún proceso termodinámico; se manifiesta como un cambio en la energía del proceso y se mide en unidades de energía por unidad de masa.

Considérese el sistema de volumen o masa de control de la fi-

gura

Fig. A.1.



W

gura A.1. Al producirse una entrada de energía en forma de trabajo, como ocurre al aplicar presión sobre las fronteras del volumen de control, el incremento diferencial de la entropía del sistema está dado por la ecuación de Gibbs

Fig. A.1 Masa o volumen de control con entrada de energía (trabajo o calor).

$$ds = \frac{1}{T} du + \frac{P}{T} dv \quad (A.1)$$

donde

du es el incremento diferencial de la energía interna por unidad de masa.

dv es el incremento diferencial del volumen de control por unidad de masa

T la temperatura del sistema

P la presión aplicada al sistema, en unidades de fuerza por unidad de área.

La energía específica interna u es función de la temperatura y el volumen de la masa de control, o sea, $u = u(T, v)$. La diferencia de energía interna entre dos estados distintos con diferencias infinitesimales de temperatura y volumen, resulta ser

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv \quad (A.2)$$

Otra propiedad termodinámica a la cual se asocia el estado de compresibilidad de una masa o volumen de control es la entalpía, definida por

$$h = u + Pv \quad (A.3)$$

y es función de la temperatura y presión asociada a la masa de control, es decir, $h = h(T, P)$. En este caso la diferencial total es

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_T dP \quad (A.4)$$

Las derivadas $\left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$ y $\left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P$ representan la pendiente

te, a volumen y presión constante, de una línea graficada en el plano termodinámico $u - T$ y $h - T$ respectivamente. Estas derivadas se representan así :

$$C_V = (\partial u / \partial T)_V \quad (A.5)$$

$$C_P = (\partial h / \partial T)_P \quad (A.6)$$

definiendo como C_V , calor específico a volumen constante y C_P , calor específico a presión constante.

Las derivadas C_V y C_P constituyen dos importantes funciones termodinámicas, cuyos valores se han determinado experimentalmente para un gran número de fluidos compresibles. En el caso del aire (y otros gases), estos coeficientes son prácticamente constantes en rangos importantes de variación de presión y temperatura y valen, en promedio,

$$C_V \text{ (aire)} = 0.172 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{K}}$$

$$C_P \text{ (aire)} = 0.240 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{K}}$$

Por otro lado, un gas perfecto se define como cualquier gas cuya relación de presión-volumen-temperatura es de la forma

$$Pv = RT \quad (A.7)$$

donde R es una constante relacionada a su vez con la constan

te universal de los gases. Con la ecuación de Gibbs y (A.7) puede demostrarse que para gases perfectos, C_v y C_p solo dependen de la temperatura. Así, dado que la diferencial ds es exacta (ecuación A.1)

$$\left(\frac{\partial(1/T)}{\partial v}\right)_u = \left(\frac{\partial(P/T)}{\partial u}\right)_v = \left(\frac{\partial(R/v)}{\partial u}\right)_v = 0$$

T es por tanto independiente de v a lo largo de cualquier línea de u constante, y en consecuencia $T=T(u)$, ó $u=u(T)$. También la diferencial puede expresarse en términos de la temperatura; de la ecuación (A.5)

$$du = C_v dT \quad (A.8)$$

Dado que u depende solo de T , C_v debe ser solamente función de la temperatura $C_v=C_v(T)$.

Por su parte, la entalpía es también función de la temperatura para un gas ideal, es decir, $h = u + Pv = u(T) + RT = h(T)$ y en forma similar puede escribirse que

$$\begin{aligned} dh &= C_p dT \\ C_p &= C_p(T) \end{aligned} \quad (A.9)$$

Para integrar una expresión que relacione la presión y el volumen de la masa de control previamente descrita, antes y después de algún proceso termodinámico, se hará lo siguiente :

Se sustituye P/T y du en la ecuación (A.1) de acuerdo a las expresiones (A.7) y (A.8),

$$ds = \frac{du}{T} + \frac{P}{T}dv = \frac{C_v}{T}dT + R\frac{dv}{v} \quad (\text{A.10})$$

Alternativamente, considerando la expresión diferencial de (A.3) $dh = du + Pdv + v dP$, y las ecuaciones (A.7) y (A.9), se tiene

$$ds = \frac{1}{T}(du + Pdv) = \frac{dh}{T} - \frac{v}{T}dP$$

$$ds = \frac{C_p}{T}dT - R\frac{dP}{P} \quad (\text{A.11})$$

Igualando (A.10) y (A.11) se encuentra que

$$(C_p - C_v)\frac{dT}{T} = R\left(\frac{dv}{v} + \frac{dP}{P}\right)$$

Al expresar (A.7) en forma logarítmica y derivar posteriormente, se observa que las diferenciales en ambos miembros de la expresión anterior son iguales y por lo tanto

$$C_p - C_v = R \quad (\text{A.12})$$

Finalmente, una forma simplificada de las ecuaciones se obtiene si C_p es constante. Para este caso, C_v también es constante como puede deducirse de (A.12). Integrando así la expresión (A.11) entre dos estados 1 y 2, inicial y final, se tie

ne :

$$s_2 - s_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{A.13})$$

al sustituir (A.7) y (A.12) en (A.13),

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= C_p \ln \frac{P_2 v_2}{P_1 v_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \\ &= C_p \ln \frac{v_2}{v_1} + C_v \ln \frac{P_2}{P_1} \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

Dividiendo la expresión (A.14) entre C_v y agrupando términos, resulta

$$\frac{s_2 - s_1}{C_v} = \ln \left[\left(\frac{v_2}{v_1} \right)^k \frac{P_2}{P_1} \right]$$

o también,

$$P_2 v_2^k = P_1 v_1^k \exp \left(- \frac{s_2 - s_1}{C_v} \right) \quad (\text{A.15})$$

donde $k = C_p / C_v$ (A.16)

$k = 0.240 / 0.172 = 1.40$ en el caso de aire. (El aire puede con-

siderarse un gas ideal siempre y cuando no se someta a presiones muy elevadas; por ejemplo $k=1.35$ a 70 atm de presión).

De la última ecuación se observa que para dos condiciones, inicial y final, con la misma entropía se tendrá para ambas

el mismo valor de Pv^k , tomando en cuenta todas las idealizaciones señaladas. Este cambio de estado se conoce como un proceso isentrópico.

Solamente un proceso adiabático reversible es isentrópico, es decir, es un proceso de compresibilidad de un gas donde no hay transmisión de energía en forma de calor a través de las fronteras del sistema y además es reversible, porque puede pasar por el mismo estado termodinámico inicial si se invierte el proceso (expansión del gas, por ejemplo). En cambio, si la temperatura se mantiene constante, de la ecuación general de los gases se encuentra que

$$P_1 v_1 = P_2 v_2 \quad (\text{A.16})$$

En este caso el exponente de v vale 1.0 y se trata de un proceso isotérmico o de temperatura constante.

La expresión general de los dos casos analizados es

$$Pv^n = \text{constante} \quad (\text{A.17})$$

Para un gas perfecto con C_p constante, la ecuación (A.17) con $n=k$ representa al proceso isentrópico (adiabático reversible) y con $n=1.0$ al proceso isotérmico. El fenómeno representado por $Pv^n = \text{constante}$ se llama proceso politrópico y resulta ser una generalización adecuada :

$n = 0$, proceso isobárico (presión constante)

$n = 1$, proceso isotérmico

$n = k$, proceso isentrópico

$n \rightarrow \infty$, proceso a volumen constante.

En el estudio del comportamiento transitorio de compresibilidad y expansión en las cámaras de aire (o gas), la presión y el volumen son variables por lo que se trata de un proceso politrópico en el cual $1 \leq n \leq k$. Dado que el proceso no puede ser totalmente adiabático ni tampoco conservarse isotérmico, por la rapidez de variación del fenómeno, n toma un valor intermedio entre 1 y k . Mediante modelos experimentales de las cámaras se ha observado que la variación de presión y volumen se ajusta más a una ecuación politrópica, con $n=1.2$ en el caso de aire, observándose que $1 < n < 1.4$.

En las cámaras con gas confinado dentro de un depósito flexible de goma (ver descripción en el capítulo 2.3) se emplea normalmente nitrógeno, que tiene también un valor de $k=1.4$, de tal manera que $n=1.2$ corresponde igualmente a un valor intermedio en el rango señalado previamente.

APENDICE B . PROGRAMA PARA CALCULO DE CONDICIONES TRANSITORIAS EN TUBERIAS A PRESION

En el apéndice se presenta el listado del programa para calcular condiciones transitorias en una tubería a presión mediante el método de las características. Se dispone una estructuración similar a la utilizada en el programa de la referencia [15] y se emplea la notación propuesta por Chaudry [1]. El criterio de manejo de variables y diagrama de flujo (fig. B.1) se describen a continuación :

Primeramente, la línea se divide en NP tubos, separados entre sí por determinado tipo de frontera TF (cámara de aire, planeta de bombeo, etc), y en los extremos se definen los tipos de frontera FI y FD (inicial y final). Al seleccionar un incremento de tiempo Δt , cada tubo se subdivide en N tramos de longitud $\Delta x = a \Delta t$ y se ajusta la celeridad a para que resulten iguales (ver capítulo 2.1.3). De esta manera, las cargas de presión y gastos conocidos del sistema se identifican como $H(I, J)$ y $Q(I, J)$, donde I es el número del tubo y J el número de sección entre dos tramos del mismo.

Antes de iniciar el proceso de cálculo, se efectúa la lectura, impresión de datos iniciales y el cálculo de las constantes de

cada tubo, así como de las fronteras extremas e internas mediante las subrutinas DATO correspondientes, de acuerdo al valor de FI, TF(I) y FD. Asimismo, se calculan las condiciones iniciales de Q y H en la línea, en el instante $t = 0.0$.

A continuación, se establece el proceso de cálculo en condiciones transitorias, en el cual se estiman cargas HP(I,J) y gastos QP(I,J) desconocidos en el instante $t + \Delta t$, a partir de los datos conocidos en t , mediante el método de las características. Para las fronteras, se utilizan las subrutinas CALCULO correspondientes, según el valor de FI, TE(I) y FD, las cuales resuelven conjuntamente las ecuaciones propias de la frontera y las ecuaciones características. El manejo de datos y proceso de cálculo para una frontera con cámara de aire se describe en el capítulo 3.2; el proceso para implementación de las subrutinas de frontera restantes, indicadas en la figura B.1, se describe en las referencias señaladas.

Finalmente, el cálculo de cargas y gastos se repite para cada incremento de tiempo, al registrar los valores de QP y HP obtenidos como los datos Q y H de cada iteración. El proceso termina cuando $t = TU$ (tiempo de simulación).

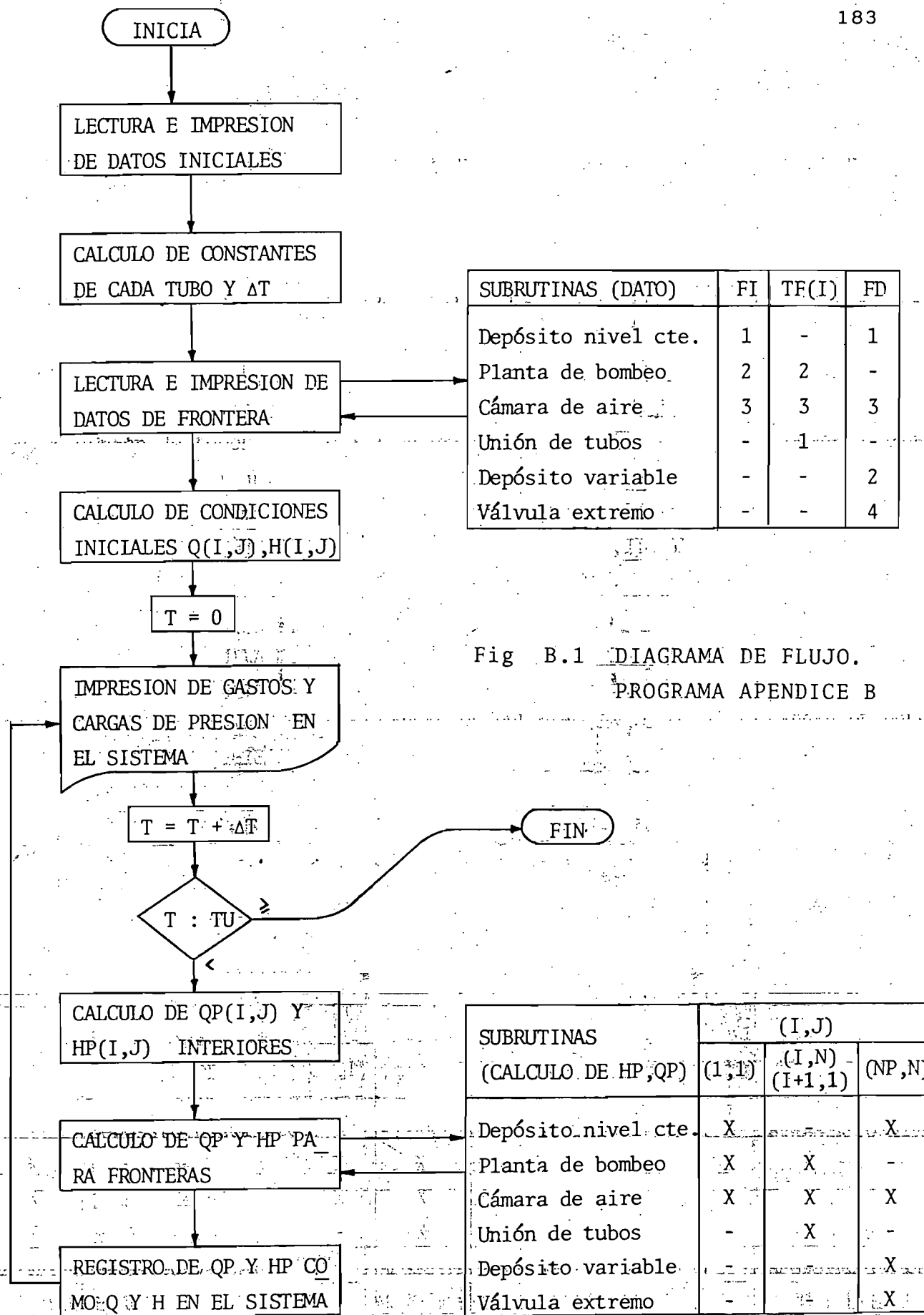


Fig B.1 DIAGRAMA DE FLUJO.
PROGRAMA APENDICE B

L I S T A D O G E N E R A L

```

1000 'CALCULO DE PRESIONES Y GASTOS TRANSITORIOS EN UNA LINEA DE
      CONDUCCION POR GOLPE DE ARIETE

1010 READ NP:
      DIM Q(NP,20),H(NP,20),QP(NP,20),HP(NP,20),CA(NP),F(NP),CF(NP),
      AR(NP),A(NP),L(NP),N(NP),D(NP),TF(NP),QC(NP),Z(NP),FH(60),
      FB(60),HX(NP,20),HN(NP,20),TX(NP,20),TN(NP,20),M(NP),Y(30),
      HF(NP)

1020 'LECTURA DE DATOS GENERALES
1030 G=9.8065: P=3.14159: READ II,NT,IP,QO,TU:
      READ FI,FD:
      IF NP=1 THEN 1040 ELSE
      FOR I=1 TO NP-1: READ TF(I): NEXT I
1040 FOR I=1 TO NP: READ L(I),D(I),A(I),F(I),M(I): NEXT I

1050 'IMPRESION DE DATOS
1060 READ IM,RP,PR$,DT$: IF IM=0 THEN 1110
1070 LPRINT:CHR$(31)"ANALISIS DE GOLPE DE ARIETE"CHR$(30): LPRINT:
      LPRINT:
      LPRINT TAB(12)"P R O Y E C T O": "PR$":
      LPRINT TAB(12)"D E T A L L E": "DT$": LPRINT:
      LPRINT: LPRINT: LPRINT CHR$(31)"D A T O S"CHR$(30): LPRINT

1080 X1$=" ##.###":
      LPRINT:
      LPRINT"NUMERO DE TUBOS ="NP:
      LPRINT"NUM. DE TRAMOS DEL TUBO MAS CORTO ="NT:
      LPRINT"GASTO INICIAL (ESTABLECIDO) ="QO"M3/S":
      LPRINT"TIEMPO DE SIMULACION (TRANSITORIO) ="TU"S": LPRINT

1090 LPRINT" TUBO-NO. T    LONGITUD    DIAM.    CELERIDAD    FRICCION":
      LPRINT:
      X2$="    ## -###    ####.#    #.###    #####.#    #.####"

1100 FOR I=1 TO NP:
      LPRINT USING X2$;I,M(I),L(I),D(I),A(I),F(I):
      NEXT I:
      LPRINT: LPRINT" TUBO NO.    CELERIDAD AJUSTADA":
      LPRINT TAB(18)"M3/S":
      X3$="    ##    #####.#"

1110 'CONSTANTES DE TUBOS
1120 TT= L(II)/(NT*A(II)):
      FOR I=1 TO NP
1130 AR(I)= P/4*D(I)^2: N(I)= INT(L(I)/(TT*A(I))+.5):
      A(I)= L(I)/(TT*N(I)): CF(I)= F(I)*TT/(2*D(I)*AR(I)):
      CA(I)= G*AR(I)/A(I):
      F(I)= F(I)*L(I)/(2*G*D(I)*N(I)*AR(I)^2):
      IF IM=1 THEN LPRINT USING X3$;I,A(I)
1140 NEXT I

```

1150 'DATOS DE FRONTERA IZQUIERDA. IMPRESION
(1-NIVEL FIJO, 2-BOMBEO, 3-CAMARA AIRE, 4-CAMARA OSCILACION)

1160 LPRINT: LPRINT" ' FRONTERA IZQUIERDA": LPRINT

1170 TB=0: I=0: CA(I)=1: READ HC: C5=1: B=1:

ON FI GOSUB 1180, 1310, 1450, 1700, 1570:

LPRINT: GOTO 1200

1180 'DEPOSITO DE NIVEL CONSTANTE (DATOS)

1190 H(1,1)= HC:

LPRINT"NIVEL DEPOSITO O EMBALSE (AGUAS ARRIBA)="HC"MSNM":
RETURN

1200 'CALCULO DE CONDICIONES ESTABLECIDAS.

DATOS DE FRONTERAS INTERNAS.

(1-UNION TUBOS, 2-BOMBEO, 3-CAMARA AIRE, 4-CAMARA OSCILACION)

1210 FOR I=1 TO NP: NN= N(I)+1:

FOR J=1 TO NN:

Q(I,J)= Q0/M(I): H(I,J)= H(I,1)-(J-1)*F(I)*Q(I,J)²:

HX(I,J)=H(I,J): HN(I,J)=H(I,J):

J NEXT J

1220 IF NP=1 THEN 1250 ELSE IF N1=1 THEN

LPRINT: LPRINT" ' FRONTERAS INTERNAS":

LPRINT"ENTRE DATOS": LPRINT:

X4\$="# Y #"

1230 IF I=NP THEN 1250 ELSE A=TF(I): TB=12: C5=0:

LPRINT USING X4\$:I,I+1:

H0=H(I,NN):

ON A GOSUB 1240, 1310, 1450, 1700:

H(I+1,1)= H0+HF(I): GOTO 1250

1240 LPRINT TAB(TB)"UNION DE TUBOS (CAMBIAN D,A,F,Y/O NOTO)":
RETURN

1250 NEXT I:

NN= N(NP)+1: HT=H(NP,NN)

1260 'DATOS DE FRONTERA DERECHA. IMPRESION

(1-NIVEL FIJO, 2-DEPOSITO (N.VAR.), 3-CAMARA AIRE, 4-VALVULA)

1270 LPRINT: LPRINT: LPRINT" ' FRONTERA DERECHA": LPRINT:

LPRINT"NIVEL FINAL (AGUAS ABAJO)="HT"MSNM":

TB=0: I=NP: TF(I)=FD

1280 ON FD GOSUB 1300, 1290, 1450, 1590:

GOTO 2000

1290 READ AD:

LPRINT"AREA DEL DEPOSITO DE NIVEL VARIABLE ="AD"M2."

1300 RETURN

```

1310 PLANTA DE BOMBEO (DATOS)
1320 READ NB,NO:
      READ NC,D,QR,HR,NR,ER,WR,HS,CV,IC:
      FOR I1=1 TO NC: READ FH(I1): NEXT I1:
      FOR I1=1 TO NC: READ FB(I1): NEXT I1
1330 LPRINT TAB(TB)"PLANTA DE BOMBEO":
      IF FI<>2 THEN HS=HO: IB=1
1340 IF IM=0 THEN 1400 ELSE
      LPRINT TAB(TB)"NUMERO DE BOMBAS EN PARALELO ="NB:
      LPRINT TAB(TB)"NIVEL DE LA SUCCION (BOMBAS) ="HS"MSNM":
      LPRINT TAB(TB)"VELOCIDAD INICIAL DE LA(S) BOMBA(S) ="NO"RPM":
1350 LPRINT TAB(TB)"PUNTOS DE LA CURVA CARACTERISTICA="NC:
      LPRINT TAB(TB)"INTERVALO DEL ANGULO 'THETA' EN C.C. ="D:
      LPRINT TAB(TB)"GASTO NOMINAL ="QR"M3/S":
      LPRINT TAB(TB)"CARGA NOMINAL ="HR"M":
1360 LPRINT TAB(TB)"VELOCIDAD NOM. ="NR"RPM":
      LPRINT TAB(TB)"EFICIENCIA NOM. ="ER:
      LPRINT TAB(TB)"WR↑2 ="WR"KG-M2"
1370 IF FI<>2 THEN 1400 ELSE
      LPRINT: LPRINT"VALORES DE CARGA CARACTERISTICA":
      FOR I1=1 TO NC: LPRINT USING X1$;FH(I1):
      IF INT(I1/10)<>I1/10 THEN 1380 ELSE LPRINT
1380 NEXT I1: LPRINT: LPRINT:
      LPRINT"VALORES DE TORQUE CARACTERISTICO":
      FOR I1=1 TO NC: LPRINT USING X1$;FB(I1):
      IF INT(I1/10)<>I1/10 THEN 1390 ELSE LPRINT
1390 NEXT I1: LPRINT: LPRINT
1400 TA=1: TV=0: IF IC=1 THEN GOSUB 1590
1410 TR= (93605*HR*QR)/(NR*ER):
      C6= -(4.775*TR*TT)/(NR*WR):
      C7= NB*(CA(I)+CA(I+1)-C6)-C5)*QR/(CA(I)*CA(I+1)*HR):
      CV= CV*QR↑2/HR:
      AL= NO/NR: AL$=STR$(AL)
1420 V= QO/(NB*QR): DV=0: DA=0:
      TH=0: IF V=0 THEN 1430 ELSE:
      VC=V: AC=AL: GOSUB 3070
1430 IJ=1:TS=TH:DS=D: GOSUB 3110:
      HF(I)= Z*HR*(AL↑2+V↑2)-CV*(QR*V)↑2:
      IJ=2: GOSUB 3110: BE= Z*(AL↑2+V↑2):
      IF FI=2 THEN H(1,1)= HS+HF(I)
1440 RETURN

```

```

1450 'CAMARA DE AIRE (DATOS)
1460 READ BT,HB,Z(I),ZN,KX,KN:
READ C,RC,LC,FT,DT,LT:
AA= BT/2*(3-BT):
C$(0)="CILINDRICA VERTICAL": C$(1)="CILINDRICA HORIZONTAL":
C$(2)="ESFERICA"
1470 LPRINT TAB(TB)"CAMARA DE AIRE":
IF IM=0 THEN 1500
1480 LPRINT TAB(TB)"GEOMETRIA : CAMARA "C$(BT):
LPRINT TAB(TB)"RADIO ="RC"M":
LPRINT TAB(TB)"LONGITUD (O ALTURA) ="LC"M":
LPRINT TAB(TB)"ELEVACIONES : Z0="Z(I)"M ; Z MIN ="ZN"M"
1490 LPRINT TAB(TB)"CONEXION TUBO CORTO : LT="LT"M ; DT="DT"M":
LPRINT TAB(TB)"VOLUMEN DE AIRE (O GAS) INICIAL ="C"M3"
1500 QC(I)=0: HF(I)=0:
RT=DT/2: KT(B)= LT/(G*TT*P*RT^2):
IF FI=3 THEN H(1,1)= HC+HF(I): HO=HC
1510 IF FD=3 AND HT<>0 THEN KB=CA(I) : HO=HT ELSE
KB= CA(I)+CA(I+1)-C5
1520 K1(B)= (HO+HB-Z(I))*C^1.2:
K2=TT/2: K5= FT*LT/(4*G*P^2*RT^5):
KX(B)= INT((K5+KX)/10+.5)*10:
KN(B)= INT((K5+KN)/10+.5)*10
1530 K6(B)=KT(B)+(1-AA)*K2/(P*RC^2)+1/KB: K0(B)=1.2*K1*K2:
IF IM<>0 THEN LPRINT TAB(TB)"K(ENTRADA) ="KX(B)
" ; K(SALIDA) ="KN(B)
1540 TE=P/2: IF BT<>0 THEN
CT= (RC-Z(I)+ZN)/RC: TE= -ATN(CT/SQR(=CT*CT+1))+1.5708:
IF BT=1 THEN K8(B)=LC*RC^2/(2*K2): K9(B)= K8(B)*(2*TE-SIN(2*TE))
ELSE K8(B)=P*RC^3/(12*K2): K9(B)=K8(B)*(COS(3*TE)-9*COS(TE))
1550 ZN(B)=ZN: C(B)=C: RC(B)=RC: BT(B)=BT:
AA(B)=AA: KB(B)=KB: TE(B)=TE: B=B+1
1560 RETURN

1570 'VALVULA DE RETENCION (CIERRE INSTANTANEO)
1580 H(1,1)=HC:
LPRINT"VALVULA DE RETENCION (CIERRE INSTANTANEO), NIVEL="HC"MSNM":
RETURN

1590 'VALVULA EN LA TUBERIA (DATOS)
1600 READ M1,TY,DY,TI,TL,QF,ZV:
FOR I1=1 TO M1: READ Y(I1): NEXT I1:
TA=TI: TC=0:
LPRINT TAB(TB)"VALVULA DE CONTROL (O CHECK)"
1610 IF IM=0 OR A=2 THEN 1640 ELSE
LPRINT"ELEVACION EJE DE VALVULA(S) ="ZV"MSNM":
LPRINT"TIEMPO DE OPERACION DE VALVULA(S) ="TY"S":
LPRINT"INTERVALO DE TIEMPO EN CURVA TAU-T="DY"S":
LPRINT"VALORES DE TAU REGISTRADOS"
1620 FOR I1=1 TO M1: LPRINT USING X1$;Y(I1):
IF INT(I1/7)<>I1/7 THEN 1630 ELSE LPRINT
1630 NEXT I1: LPRINT:LPRINT
1640 IF Q0=0 THEN Q0=QF:
'SE ASIGNA GASTO FINAL A Q0
1650 RETURN

```

2000 'INICIO DE CALCULO. IMPRESIONES

2010 T=0:

RN=0: INPUT "COLOCAR HOJA-1-...<ENTER>"; X1:

LPRINT CHR\$(31)"R E S U L T A D O S"CHR\$(30): LPRINT

2020 IF FI=2 OR IB=1 THEN X5\$="##.# % % ##.##": TB=20

ELSE X5\$="##.# ####.### " : TB=18

2030 X6\$="## ####.## ####.## ##.## ##.## ##.##":

X7\$="## ####.## ####.## ##.## ##.## ---"

2070 K=0:

GOSUB 3200:

IF FI=2 OR IB=1 THEN LPRINT USING X5\$;T,AL\$,V;: GOTO 2090

ELSE IF Z(0)<>0 THEN PR=Z(0) ELSE PR=TA

2080 LPRINT USING X5\$;T,PR:

2090 FOR I=1 TO NP:NN=N(I)+1:LPRINT TAB(TB);:

IF TF(I)<3 THEN

LPRINT USING X7\$;I,H(I,1),H(I,NN),Q(I,1),Q(I,NN) ELSE

LPRINT USING X6\$;I,H(I,1),H(I,NN),Z(I),Q(I,1),Q(I,NN),Q(I,

2100 NEXT I: RN= RN+NP

2110 'CALCULO DE CONDICIONES TRANSITORIAS

2120 T=T+TT:

K=K+1:

IF T>TU+.01 THEN 3040:

'FRONTERA AGUAS ARRIBA

2130 CN= Q(1,2)-H(1,2)*CA(1)-CF(1)*Q(1,2)*ABS(Q(1,2)):

CP=0: I=0: B=1

2140 ON FI GOSUB 2150, 2300, 2460, 2610:

GOTO 2160

2150 HP(1,1)= HC: QP(1,1)= CN+CA(1)*HC:

RETURN

2160 'PUNTOS INTERIORES

2170 FOR I=1 TO NP: NN=N(I):

FOR J=2 TO NN

2180 CN= Q(I,J+1)-CA(I)*H(I,J+1)-CF(I)*Q(I,J+1)*ABS(Q(I,J+1)):

CP= Q(I,J-1)+CA(I)*H(I,J-1)-CF(I)*Q(I,J-1)*ABS(Q(I,J-1)):

QP(I,J)= 0.5*(CP+CN):

HP(I,J)= (CP-QP(I,J))/CA(I):

NEXT J: NEXT I

2190 'FRONTERAS INTERNAS

2200 IF NP=1 THEN 2240 ELSE

FOR I=1 TO NP-1: A=TF(I): N1=N(I): NN=N(I)+1:

CN= Q(I+1,2)-CA(I+1)*H(I+1,2)-CF(I+1)*Q(I+1,2)*ABS(Q(I+1,2)):

CP= Q(I,N1)+CA(I)*H(I,N1)-CF(I)*Q(I,N1)*ABS(Q(I,N1))

2210 ON A GOSUB 2220, 2300, 2460:

NEXT I: GOTO 2240

2220 'SUBROUTINA UNION DE TUBOS

2230 HP(I,NN)= (CP*M(I)-CN*M(I+1))/(CA(I)*M(I)+CA(I+1)*M(I+1)):

HP(I+1,1)= HP(I,NN):

QP(I,NN)= CP-CA(I)*HP(I,NN):

QP(I+1,1)= CN+CA(I+1)*HP(I+1,1):

RETURN

2240 'FRONTERA AGUAS ABAJO

2250 N1=N(NP): NN= N(NP)+1:

CP= Q(NP,N1)+CA(NP)*H(NP,N1)-CF(NP)*Q(NP,N1)*ABS(Q(NP,N1)):

CN=0: I=NP

2260 ON FD GOSUB 2270, 2270, 2460, 2610:

GOTO 3000

2270 'SUBROUTINA EMBALSE FINAL AGUAS ABAJO

2280 IF FD=1 THEN HP(NP,NN)=HT ELSE CD=TT/(2*AD):

HP(NP,NN)= (CD*(Q(NP,NN)+CP)+H(NP,NN))/(1+CA(NP)*CD)

2290 QP(NP,NN)= CP-CA(NP)*HP(NP,NN):

RETURN

2300 'SUBROUTINA BOMBAS

2310 KK=0: JJ=0: VE=V+DV: AE=AL+DA:

IF IC=1 THEN IF Q(I+1,1)<0 AND TC=0 THEN TV=T-TT

2320 IF TV<>0 AND TA>0 THEN TC=T-TV: IJ=3: TS=TC: DS=DY:

GOSUB 3110

2330 IF TA<=0 THEN V=0: AL\$=" ---": GOTO 2430

2340 IF FI=2 THEN CP=HS

2350 C8= (CN*CA(I)+CP*CA(I+1))/(CA(I)*CA(I+1)*HR):

TA=TA+2

2360 JJ=JJ+1:

VC=VE: AC=AE: GOSUB 3070: M=INT(TH/D+1)

2370 A1= FH(M)*M-FH(M+1)*(M-1): A2= (FH(M+1)-FH(M))/(D*P/180):

A3= FB(M)*M-FB(M+1)*(M-1): A4= (FB(M+1)-FB(M))/(D*P/180):

AV= AE*AE+VE*VE

2380 DV= A1+A2*T1: DA=CV*ABS(VE):

F1= TA*(AV*DV-C7*VE+C8)-DA*VE:

F3= TA*(2*AE*DV+A2*VE):

F4= TA*(2*VE*DV-A2*AE-C7)-2*DA

2390 DV= A3+A4*T1:

F2= AE-C6*(AV*DV+BE)-AL:

F5= 1-C6*(2*AE*DV+A4*VE):

F6= -C6*(2*VE*DV-A4*AE)

```

2400 DM= F3*F6-F4*F5:
DA= (F2*F4-F1*F6)/DM: DV=(F1*F5-F2*F3)/DM:
AE= AE+DA: VE= VE+DV:
IF ABS(DV)+ABS(DA)<0.0002 THEN 2410 ELSE
IF JJ>30 THEN 2450 ELSE 2360
2410 AC=AE: VC=VE: GOSUB 3070: TS=TH: DS=D:
IJ=2: GOSUB 3110: IF MB=M THEN 2420 ELSE MB=INT(TH/D+1):
IF MB<>M THEN 2360
2420 DA=AE-AL: DV=VE-V: AL=AE: V=VE:
AL$=STR$(AL): BE= Z*(AL*AL+V*V)
2430 QP(I+1,1)= NB*V*QR: HP(I+1,1)= (QP(I+1,1)-CN)/CA(I+1):
IF FI<>2 THEN QP(I,NN)= QP(I+1,1): HP(I,NN)= (CP-QP(I,NN))/CA(I)
2440 RETURN
2450 LPRINT"MAS DE 30 ITERACIONES EN SUBROUTINA BOMBAS":
LPRINT USING X5%;T,AE,VE: GOTO 3060

2460 'SUBROUTINA CAMARA DE AIRE
2470 ZN=ZN(B): C=C(B): RC=RC(B): BT=BT(B):
AA=AA(B): KB=KB(B): TE=TE(B)
2480 K3= C-K2*QC(I): KH=CP-CN:
K7= QC(I)*(K2*(1-AA)/(P*RC^2)-KT)-HB+AA*(RC+ZN)=KH/KB+
(1-AA)*Z(I):
JJ=0: KK=0: QC=QC(I):
IF BT<>0 THEN K9(B)= K9(B)+2*QC(I)
2490 DQ=1: IF BT<>0 THEN
IF BT=1 THEN QC(I)= KB(B)*(2*TE-SIN(2*TE))-K9(B):
DQ= 2*KB(B)*(1-COS(2*TE)) ELSE
QC(I)= KB(B)*(COS(3*TE)+9*COS(TE))-K9(B):
DQ= 3*KB(B)*(3*SIN(TE)-SIN(3*TE))
2500 IF QC(I)>0 THEN K5=KX(B) ELSE K5=KN(B)
2510 IF KK<>0 THEN 2560 ELSE
G= K1(B)*(K3-K2*QC(I))^1.2+K5*QC(I)*ABS(QC(I))+K6(B)*QC(I)+K7-
RC*COS(TE):
DG= (K0(B)*(K3-K2*QC(I))^2+2*2*K5*ABS(QC(I))+K6(B))*DQ+AA*
RC*SIN(TE):
IF BT=0 THEN X=QC(I) ELSE X=TE
2520 X=X-G/DG:
IF ABS(G)<0.005 THEN KK=1
2530 JJ=JJ+1: IF JJ>30 THEN 2550 ELSE
IF BT=0 THEN QC(I)=X ELSE TE=X
2540 GOTO 2490
2550 LPRINT"MAS DE 30 ITERACIONES PARA QC(CAMARA DE AIRE)":
GOTO 3060
2560 IF I<NP THEN HP(I+1,1)= (KH-QC(I))/KB:
QP(I+1,1)= CN+CA(I+1)*HP(I+1,1)
2570 IF I>0 THEN HP(I,NN)=(KH-QC(I))/KB:
QP(I,NN)=CP-CA(I)*HP(I,NN)
2580 IF BT=0 THEN Z(I)= Z(I)+K2/(P*RC^2)*(QC+QC(I))
ELSE Z(I)= ZN+RC-RC*COS(TE)
2590 TE(B)=TE: C(B) = C(B)-K2*(QC+QC(I)):
B=B+1:
RETURN

```



```
2600 'SUBROUTINA CAMARA DE OSCILACION:
      RETURN
```

```
2610 'SUBROUTINA VALVULA DE RETENCION
```

```
2620 IF FI=5 THEN QP(1,1)=0: HP(1,1)= -CN/CA(1):
      GOTO 2660
```

```
2630 IF T>TY THEN TA=TL: IF TA<=0 THEN QP(NP,NN)=0:
      HP(NP,NN)= CP/CA(NP): GOTO 2660 ELSE 2650
```

```
2640 IJ=3: TS=T: DS=DY: GOSUB 3110
```

```
2650 CV= (Q0/M(NP)*TA)↑2/((HT-ZV)*CA(NP)):
      QP(NP,NN)= 0.5*(-CV+SQR(CV*CV+4*CV*(CP-CA(NP)*ZV)):
      HP(NP,NN)= (CP-QP(NP,NN))/CA(NP)
```

```
2660 RETURN
```

```
3000 'REGISTRO DE VARIABLES PARA SIGUIENTE PASO
```

```
3010 FOR I=1 TO NP: NN=N(I)+1:
```

```
      FOR J=1 TO NN:
```

```
        Q(I,J)=QP(I,J): H(I,J)=HP(I,J):
```

```
3020 IF H(I,J)>HX(I,J) THEN HX(I,J)=H(I,J): TX(I,J)=T ELSE
```

```
      IF H(I,J)<HN(I,J) THEN HN(I,J)=H(I,J): TN(I,J)=T
```

```
3030 NEXT J: NEXT I:
```

```
      IF K=IP THEN 2070 ELSE 2110
```

```
3040 INPUT "COLOCAR HOJA-2-...<ENTER>"; X1:
```

```
      X8$=" ## ## ##### - ##.## ###.## - ##.##":
```

```
      LPRINT "TUBO NO SECCION PR. MAX - TIEMPO PR. MIN - TIEMPO":
```

```
3050 LPRINT CHR$(27)CHR$(54):
```

```
      FOR I=1 TO NP: NN=N(I)+1:
```

```
        FOR J=1 TO NN:
```

```
          LPRINT USING X8$: I, J, HX(I,J), TX(I,J), HN(I,J), TN(I,J):
```

```
        NEXT J: NEXT I
```

```
3060 END
```

```
3070 'SUBROUTINA FUNCION INVERSO TANGENTE
```

```
3080 T1=0: IF AC=0 AND VC>=0 THEN 3100 ELSE
```

```
      T1= ATN(AC/VC): IF T1<0 THEN T1=T1+P
```

```
3090 IF AC<=0 THEN T1=T1+P
```

```
3100 TH= T1*180/P: RETURN
```

```
3110 'SUBROUTINA AJUSTE PARABOLICO
```

```
3120 Y=INT(TS/DS): R1= (TS-Y*DS)/DS:
```

```
      IF Y=0 THEN R1=R1-1
```

```
3130 Y=Y+1: IF Y<2 THEN Y=2
```

```
3140 IF IJ=1 THEN R2=FH(Y-1): R3=FH(Y): R4=FH(Y+1) ELSE
```

```
      IF IJ=2 THEN R2=FB(Y-1): R3=FB(Y): R4=FB(Y+1) ELSE
```

```
      R2=Y(Y-1): R3=Y(Y): R4=Y(Y+1)
```

```
3150 Z= R3+.5*R1*(R4-R2+R1*(R4+R2-2*R3)): IF IJ=3 THEN TA=Z
```

```
3160 RETURN
```

3200 'SUBRUTINA PARA IMPRESIONES

3210 IF T=0 THEN NL=15 ELSE IF RN=NL THEN NL=16:

FOR I1=1 TO EL: LPRINT: NEXT I1:

RN=0 ELSE 3250

3220 EL= NL*RP/2-1: NL= INT(EL/NP)*NP:

EL= 5*RP/2+EL-NL: LPRINT CHR\$(27)CHR\$(54)

3230 IF FI=2 OR IB=1 THEN LPRINT" T(S) ALFA V ";

ELSE IF FI=3 THEN LPRINT" T(S) Z(CAMARA) " : ELSE

LPRINT" T(S) TAU " ;

3240 LPRINT" TUBO CAIR G A S (M) GASTOS(M3/S) " :

LPRINT TAB(TB) ; :

LPRINT "NO (1) (N+1) ELEV.ZC (1) (N+1) QC" :

LPRINT CHR\$(27)CHR\$(RP+48)

3250 RETURN

3300 DATOS DEL MODELO (CAPITULO 4)

3310 DATA 2

3320 DATA 1,3,5,0.0084,100

3330 DATA 3,3

3340 DATA 1

3350 DATA 726.3,0.105,1345,0.023,1,

726.3,0.105,1345,0.023,1 : MODELO II-UNAM, C/2 TRAMOS

3360 DATA 1,6,INSTALACION EXPERIMENTAL, CAMARA DE AIRE CILINDRICA

3370 DATA 40.00

3380 DATA 0,10.3,1.52,0.00,14250,14450,

0.3043,0.443,2.00,0.022,0.102,2.50

3390 DATA 0,10.3,0.80,0.00,340,680,

0.7143,0.443,2.00,0.020,0.105,0.00

3400 DATOS DEL EJEMPLO (CAPITULO 4)

3410 DATA 2

3420 DATA 1,2,2,0.800,120

3430 DATA 3,1

3440 DATA 1

3450 DATA 1900,0.60,950,0.023,1,

1900,0.60,950,0.023,1

3460 DATA 1,6,EJEMPLO DEL CAPITULO 4, SOLUCION NUMERICA

3470 DATA 234.00

3480 DATA 0,10.3,100,97.00,0,0,

6.90,1.25,4.40,0.020,0.45,0.00

APENDICE C . PROGRAMA PARA CALCULO DE OSCILACIONES DE MASA
EN UNA TUBERIA PROTEGIDA CON CAMARA DE AIRE

El programa presentado en este apéndice resuelve las ecuaciones de oscilación de masa en un sistema de conducción por bombeo protegido con una cámara de aire. Se utilizan los algoritmos del método de Runge-Kutta de cuarto orden para la solución aproximada de las ecuaciones diferenciales que definen el comportamiento transitorio del sistema. La secuencia de cálculo del programa es la siguiente :

Inicialmente, se efectúa la lectura e impresión de datos de la conducción, cámara de aire y de las condiciones estacionarias de carga H_0 en la cámara y Q_0 en la línea. Asimismo se calculan las constantes K de las ecuaciones de continuidad y dinámica, 3.3.6 y 3.3.7, previamente estudiadas.

El proceso de cálculo consiste en estimar la carga de presión H_1 y el gasto Q_1 desconocidos en el instante $t + \Delta t$, a partir de los datos conocidos en t , H y Q . El algoritmo del método evalúa cuatro incrementos ΔH y ΔQ de las variables y los promedia, de tal manera que $H_1 = H + \overline{\Delta H}$ y $Q_1 = Q + \overline{\Delta Q}$.

El ciclo de cálculo se repite para cada Δt , al registrar los valores H_1 y Q_1 obtenidos como los datos conocidos H y Q .

L I S T A D O G E N E R A L

1000 CAMARA DE AIRE : OSCILACION DE MASA EN UN SISTEMA DE CONDUCCION,
INTEGRACION METODO DE RUNGE-KUTTA.
1010 DIM C(10),TP(20),ZP(20),CP(20),HP(20) :

LECTURA DE DATOS INICIALES

1020 READ L,D,FF,H0,HB :
READ C0,DC,Z0,KE,KS :
READ Q,QE,TT,TU,NI,IM :
GR=9.8065 : PI=3.141593 :

CALCULO DE CONSTANTES

1030 AC=PI*DC↑2/4 : A=PI*D↑2/4 :
K0=A*GR/L : K1=(H0+HB-Z0)*C0↑1.2 :
KE=KE*AC↑2 : KS=KS*AC↑2
1040 HS=H0-FF*L/D*(Q/A)↑2/(2*GR) :
K3=-HS-HB : K5=FF/(2*D*A) :

CONDICIONES INICIALES

1050 Z=Z0 : Z1=Z : Q1=Q : H1=H0 :
C=C0 : K2=KS : I1=0 : GOSUB 1300 :

INICIO DE CALCULO. IMPRESIONES

1100 T=0 :
RN=0 : NH=1 : INPUT "COLOCAR HOJA-1-...<ENTER>";XX :
LPRINT CHR\$(31)"R E S U L T A D O S"CHR\$(30) : LPRINT :
X\$=" ### #####.###.###.###.###.###.###.###"
1110 KK=0 :
GOSUB 1400 :
IF IMK>1 THEN LPRINT USING X\$:T,Z1,C,H1,Q1 : RN=RN+1 :

CALCULO DE CONDICIONES TRANSITORIAS

1200 T=T+TT :
KK=KK+1 :
IF T>TU+TT THEN 1270
1210 CC=C(1) :
FOR O=1 TO 4 :
IF O=1 THEN 1220 ELSE R=2↑(O-2)-(O-1)*O/4 :
Z=Z1+R*C(O-1) :
Q=Q1+R*C(O+3) :
IF Z1>Z THEN K2=KS ELSE K2=KE :
Ecuaciones Difs. de Continuidad y Dinamica (oscilacion de masa)
1220 F=(QE-Q)/AC :
G=K0*(K1↑(C0+(Z0-Z)*AC)↑1.2+Z+K2*F*ABS(F)+K3)-K5*Q*ABS(Q)
1230 C(O)=TT*F : C(O+4)=TT*G :
NEXT O :
FOR O=1 TO 5 STEP 4 :
C(O)=(C(O)+2*C(O+1)+2*C(O+2)+C(O+3))/6 :
NEXT O

```

1240 ZC=Z1 : Z1=Z1+C(1) :
      QC=Q1 : Q1=Q1+C(5) :
      C1=C : C=C0+(Z0-Z1)*AC : F=(QE-Q1)/AC :
      HC=H1 : H1=K1/C*1.2+Z-HB+K2*F*ABS(F) :

```

'SELECCION DE MAXIMOS Y MINIMOS

```

1250 IF CC*C(1)>0 THEN 1260 ELSE I1=I1+1 :
      IF ABS(C(1))<=ABS(CC) THEN TP(I1)=T : ZP(I1)=Z1 : CP(I1)=C : HP(I1)=H
      ELSE TP(I1)=T-TT : ZP(I1)=ZC : CP(I1)=C1 : HP(I1)=HC
1260 IF KK=NI THEN 1110 ELSE 1200

```

'IMPRESIONES FINALES

```

1270 INPUT "COLOCAR HOJA-2-...<ENTER>";XX :
      LPRINT CHR$(31)"CONDICIONES EXTREMAS (Z,C,H)"CHR$(30) : LPRINT :
      GOSUB 1420
1280 FOR KK=1 TO I1 :
      LPRINT USING X$;TP(KK),ZP(KK),CP(KK),HP(KK),QQ :
      NEXT KK
1290 END

```

'SUBROUTINA IMPRESION DE DATOS

```

1310 LPRINT CHR$(31)"ANALISIS DE CAMARA DE AIRE"CHR$(30) :
      LPRINT : LPRINT :
      LPRINT TAB(16)"P R O Y E C T O : EJEMPLO DEL CAPITULO 4" :
      LPRINT TAB(16)"D E T A L L E : CRITERIO DE OSCILACION DE MASA" :
      LPRINT :
1320 LPRINT : LPRINT : LPRINT CHR$(31)"D A T O S"CHR$(30) : LPRINT :
      LPRINT TAB(16)"CAMARA DE AIRE CILINDRICA (VERTICAL)" :
      LPRINT TAB(16)"MANIOBRA : FALLA SUBITA EN LINEA DE BOMBEO" :
      LPRINT : LPRINT :
1330 LPRINT "DATOS DE LA CONDUCCION : LONGITUD (M)= " ; L :
      LPRINT TAB(30)"DIAM.TUBO(M)= " ; D :
      LPRINT TAB(30)"COEF.DARCY = " ; INT(FF*1E3+.5)/1E3 : LPRINT :
1340 LPRINT "DATOS DE LA CAMARA DE AIRE : VOLUMEN DE AIRE (M3)= " ; C0 :
      LPRINT TAB(30)"DIAM.TRANSVERSAL (M)= " ; DC :
      LPRINT TAB(30)"PERDIDA CONEXION KE = " ; KE ; " (ENTRADA)" :
      LPRINT TAB(47)"KS = " ; KS ; " (SALIDA)" : LPRINT :
1350 LPRINT "CONDICIONES INICIALES : GASTO DE BOMBEO (M3/S)= " ; Q :
      LPRINT TAB(30)"NIVEL EN CAMARA (MSNM)= " ; Z0 :
      LPRINT TAB(30)"NIVEL CARGA DE BOMBEO = " ; H0 :
      LPRINT TAB(30)"NIVEL DEPOSITO (MSNM) = " ; HS : LPRINT :
1360 LPRINT "DATOS SIMULACION (TIEMPOS) : INCREMENTO TIEMPO (S) = " ; TT :
      LPRINT TAB(30)"TIEMPO P/ANALIZAR (S) = " ; TU :
      RETURN

```

'SUBROUTINA CONTROL DE IMPRESION

```

1410 IF RN=0 AND IM<>1 THEN 1420 ELSE IF RN<49 THEN 1430 ELSE
      NH=NH+1 : RN=0 :
      FOR KR=1 TO 13 : LPRINT : NEXT KR :
      LPRINT " - " ; NH ; " - " : LPRINT :
1420 LPRINT " T(S) NIVEL CAMARA VOLUMEN (M3) " ; :
      LPRINT "CARGA (MSNM) GASTO (M3/S)" :
      LPRINT :
1430 RETURN

```