

01162  
16



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**“Predimensionamiento de dispositivos de  
control de transitorios en  
plantas de bombeo”**

TESIS

Que para obtener el grado de:

***MAESTRO EN INGENIERÍA  
(HIDRÁULICA)***

PRESENTA:

José Ángel Zarco Hernández

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Director de tesis: **Dr. Rafael B. Carmona P.**

Enero 2002



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

*Dedicatoria*

*Quiero dedicar este trabajo a la memoria de mi padre  
el Fr. Pablo Jarco Carlón*



*Agradecimientos*



Deseo agradecer al Instituto de Ingeniería de la UNAM, a través de la Coordinación de Mecánica, Fluidos y Térmica, por el apoyo recibido durante el desarrollo de este trabajo.

A mi tutor de tesis Dr. Rafael Carmona P. y a la Fis. Libia G. Carmona P, por las enseñanzas, comentarios y consejos al presente trabajo.

A los sinodales del examen los doctores Gabriel Echavez. Oscar Fuentes, Gustavo Paz Soldan y Moisés Berezowsky.

A mis padres, por haberme apoyado para realizar mis estudios de posgrado.

A mis familiares que me han brindado consuelo en los momentos difíciles.

A mis amigos del Instituto de Ingeniería.

Al CONACYT por el apoyo durante el desarrollo de mis estudios de posgrado

## ***Resumen***

El dimensionamiento óptimo de los dispositivos para el control de transitorios hidráulicos por corte de bombeo en sistemas de conducción de agua a presión se refleja en los costos de construcción y operación de los mismos. En este trabajo se presenta un método analítico basado en ecuaciones paramétricas adimensionales que permiten calcular de manera preeliminar el área de las torres de oscilación y los volúmenes de las cámaras de aire, necesarios para controlar depresiones durante los transitorios hidráulicos.

El método propuesto se reduce a la aplicación de ecuaciones algebraicas muy simples y se revisa aplicándolo a varios acueductos mexicanos los cuales tienen como dispositivo principal de control de transitorios torres de oscilación o cámaras de aire. Las dimensiones obtenidas con el método propuesto se comparan con otros métodos gráficos y con las dimensiones que según el método de las características requieren los dispositivos de control para obtener las mismas presiones mínimas transitorias con ambos métodos. Para las torres de oscilación y las cámaras de aire se obtienen diferencias menores que el 10 %.

## ***Abstract***

The construction and operation costs of hydraulics transients control devices are strongly related with their dimensions. A simplified procedure to size surge tanks and air vessels is developed in this thesis and is applied to several pumping systems.

Based on dimensionless parametric equations, surge tanks cross section and volume of air vessels can be determined prior to a detailed analysis using the Method of Characteristics. Comparing with a detailed analysis, the maximum difference found is less than 10%.



***“Predimensionamiento de dispositivos de control de transitorios en plantas de bombeo”***

<b>Introducción</b>	I
<b>I. Antecedentes</b>	1
I.1 Transitorios hidráulicos	1
I.2 Problemas creados por los transitorios hidráulicos	3
I.2.1 Problemas de sobrepresión	3
I.2.2 Problemas de depresión	3
I.2.3 Problemas de sobrevelocidad	6
I.3 Tubería rígida y fluido incompresible	6
I.3.1 Conservación de la masa	6
I.3.2 Cantidad de movimiento	6
I.4 Tubería elástica y fluido compresible	7
I.5 Método de las características	8
I.6 Análisis Dimensional	11
I.6.1 Dimensiones y unidades	12
I.6.2 Variables dependientes e independientes	13
I.6.3 Teorema $\Pi$ Buckingham	14
I.6.4 Recomendaciones para formar números adimensionales	15
<b>II. Dispositivos para el control de transitorios</b>	17
II.1 Torres de oscilación	18
II.1.1 Cómo controla las sobrepresiones y depresiones	19
II.1.2 Ventajas y desventajas	19
II.2 Cámaras de aire	20
II.2.1 Cómo controla las sobrepresiones y depresiones	22
II.2.2 Ventajas y desventajas	22

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

<b>III.</b>	<b>Método propuesto para el predimensionamiento de dispositivos de control</b>	<b>23</b>
III.1	Torres de oscilación	25
III.1.1	Formulación de variables adimensionales	26
III.1.2	Fundamentos teóricos	27
III.1.3	Solución numérica	28
III.1.4	Cálculo del área de la torre de oscilación mediante el método propuesto	29
III.2	Cámaras de aire	31
III.2.1	Formulación de variables adimensionales	32
III.2.2	Fundamentos teóricos	33
III.2.3	Solución numérica	34
III.2.4	Solución propuesta	35
III.2.4	Cálculo de volúmenes de cámaras de aire aplicando el método propuesto	39
III.2.5	Comparación del método propuesto contra métodos convencionales de diseño	41
<b>IV.</b>	<b>Aplicación a un caso real</b>	<b>44</b>
IV.1	Torres de oscilación	44
IV.1.1	Descripción del acueducto Río Colorado – Tijuana	44
IV.1.2	Campaña de mediciones	46
IV.1.3	Aplicación del método	47
IV.2	Cámaras de aire	49
IV.2.1	Descripción del acueducto El Cuchillo – Monterrey	49
IV.2.2	Campaña de mediciones	51
IV.2.3	Aplicación del método	52
<b>V.</b>	<b>Conclusiones y comentarios</b>	<b>55</b>
	<b>Apéndices</b>	<b>57</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>67</b>



## Nomenclatura

A	área, m <sup>2</sup>
C	constante de la tubería
D	diámetro, m
H	carga total, m
K	parámetro empleado en el método propuesto
P	presión absoluta, N/m <sup>2</sup>
PHR	plano horizontal de referencia
Q	gasto, m <sup>3</sup> /s
R	radio, m
R	constante del método propuesto
S	sección transversal de la tubería, m <sup>2</sup>
T	tiempo adimensional
V	velocidad media, m/s
V	volumen, m <sup>3</sup>
W	trabajo, J

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



*Nomenclatura*

---

Ca	constante de calculo del método de las características
Cp	línea característica positiva
Cn	línea característica negativa
E <sub>C</sub>	energía cinética, J
E <sub>P</sub>	energía potencial, J
H <sub>A</sub>	carga en el punto A, m
H <sub>B</sub>	carga en el punto B, m
H <sub>P</sub>	carga en el punto P, m
P <sub>0</sub>	presión absoluta de referencia, N/m <sup>2</sup>
P <sub>a</sub>	presión atmosférica, N/m <sup>2</sup>
P <sub>f</sub>	presión absoluta final, N/m <sup>2</sup>
P <sub>mín</sub>	presión absoluta mínima, N/m <sup>2</sup>
Q <sub>0</sub>	gasto de referencia, m <sup>3</sup> /s
Q <sub>A</sub>	gasto en el punto A, m <sup>3</sup> /s
Q <sub>B</sub>	Gasto en el punto, B m <sup>3</sup> /s
Q <sub>P</sub>	gasto en el punto P, m <sup>3</sup> /s
V <sub>0</sub>	volumen inicial de aire, m <sup>3</sup>
V <sub>f</sub>	volumen final de aire, m <sup>3</sup>
V <sub>max</sub>	volumen máximo de aire, m <sup>3</sup>
V <sub>W</sub>	volumen de agua, m <sup>3</sup>
V <sub>T</sub>	volumen total, m <sup>3</sup>
a	celeridad, m/s
α	relación de energías adimensional.
f	factor de fricción
g	aceleración de la gravedad, m/s <sup>2</sup>
h	carga piezométrica, m
k	coeficiente de pérdida de carga, s <sup>2</sup> /m <sup>5</sup>
l	longitud de la conducción, m
m	masa, kg
$\hat{p}$	presión adimensional
q	gasto adimensional
r	relación de presiones adimensional
t	tiempo, s
v	volumen adimensional
x	distancia horizontal, m
y	nivel del agua dentro de la cámara, m
z	diferencia de cargas adimensional
h <sub>l mín</sub>	carga mínima en donde se localiza en dispositivo de control, m
h <sub>1</sub>	carga en el punto donde se localiza el dispositivo de control, m
h <sub>1.0</sub>	carga de referencia en el punto donde se localiza el dispositivo de control, m
h <sub>2</sub>	carga en el punto de entrega, m

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## Nomenclatura

---

$t_0$	tiempo de referencia, s
$t_1$	tiempo en el instante 1, s
$t_2$	tiempo en el instante 2, s
$t^*$	tiempo en el cual la cámara ha dejado de entregar gasto a la línea, s
$v_{\max}$	volumen adimensional máximo
$z_{\min}$	valor mínimo del parámetro z
$\Delta h$	variación de cargas piezométricas, m
$\Delta h_0$	variación de cargas piezométricas de referencia, m
$\Delta x$	variación de longitud, m
$\Delta t$	variación del tiempo, s
$\Delta H$	Variación de carga total, m
$\Delta Q$	Variación de gasto, m <sup>3</sup> /s
$\alpha$	coeficiente politrópico
$\gamma$	peso específico, N/m <sup>3</sup>
$\rho$	densidad, m <sup>3</sup> /N
$\Pi_i$	parámetro adimensional i
$\Omega$	velocidad angular de la onda, 1/s

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## *Introducción*



Conforme aumenta la necesidad de operar eficientemente los sistemas hidráulicos de conductos a presión, se manifiesta la importancia que tiene el estudio de los problemas ocasionados por la presencia de los fenómenos transitorios. Durante los transitorios hidráulicos en conductos se pueden alcanzar sobrepresiones y depresiones que ponen en riesgo la integridad de la línea de conducción.

En algunos casos los efectos pueden ser catastróficos, por ejemplo, en una planta de bombeo cuando se presenta un paro de los equipos al producirse una falla en el suministro de la energía eléctrica. Las depresiones pueden causar graves problemas a las conducciones como son el colapso de la tubería, la separación de la columna líquida y el ingreso de aire. Por otra parte, las sobrepresiones pueden producir la rotura de la tubería al someterla a tensiones superiores a la de trabajo o exceder la presión de diseño.

Una de las finalidades básicas que se persiguen al realizar cualquier obra de ingeniería consiste en encontrar un diseño que ofrezca, simultáneamente, la máxima seguridad durante su funcionamiento y el menor costo para su realización. Entonces, cuando se diseñan los sistemas de conductos a presión es indispensable conjuntar estudios de los fenómenos transitorios con los análisis de los dispositivos de control para tener un sistema seguro y económico.

El propósito de los dispositivos de control es evitar el daño que pueda producir la caída y el incremento de presión. Existen varios dispositivos para el control de las presiones transitorias, entre ellas se pueden mencionar a las cámaras de aire y a las torres de oscilación.

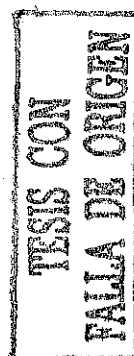
El método de las características es una de las herramientas que comúnmente se emplean para resolver problemas de flujo transitorio. Sin embargo, es necesario estar familiarizado con las ecuaciones para simular de forma correcta las torres de oscilación o las cámaras de aire. Se debe invertir una buena cantidad de tiempo y/o dinero para realizar una primera aproximación de las dimensiones de las estructuras de control, y en ocasiones resulta costoso.

El objetivo de este trabajo es presentar un método analítico para calcular de manera preliminar, pero muy rápida, el diámetro de las torres de oscilación y el volumen de las cámaras de aire, en función de variables adimensionales previamente establecidas. Con las dimensiones obtenidas es posible realizar una primera estimación del costo de las estructuras. El diseño final de los dispositivos de control implica, necesariamente, el uso de un programa numérico basado en el método de las características.

El análisis de los efectos del transitorio en los sistemas hidráulicos requiere del cálculo de las variaciones de presión y gasto durante la operación no permanente del sistema, es decir, durante el fenómeno transitorio. El estudio del flujo no estacionario es, en general, más complejo que el del flujo permanente. Al considerar el tiempo como una variable adicional, las ecuaciones resultantes son diferenciales, aún más, si la columna líquida se considera compresible, entonces las ecuaciones que modelan el transitorio son ecuaciones parciales de segundo orden hiperbólicas.

En el capítulo I se analizan distintos tipos transitorio hidráulico y se hace una clasificación de ellos. Se presentan las ecuaciones que modelan el fenómeno, ya sea lento o rápido. Los problemas que acarrearán, las presiones máximas y mínimas generadas por los transitorios se abordan en ese capítulo. Se muestran las ideas básicas del método de las características y se presenta un panorama general del análisis dimensional.

En el capítulo II se hace una descripción de los dispositivos hidráulicos para el control de los transitorios, como lo son las torres de oscilación y las cámaras de aire. Se hace una descripción del funcionamiento, así como de las ventajas y desventajas que ofrecen. Se presenta un cuadro con los tipos de dispositivos de protección; éstos se dividen en dos grupos las estructuras de acción directa (aquellas que ejercen un efecto inmediato desde el instante en que inicia el transitorio) y los de acción indirecta (aquellas que llevan a



cabo su efecto en un momento oportuno, cuando la presión aumenta demasiado o disminuye peligrosamente).

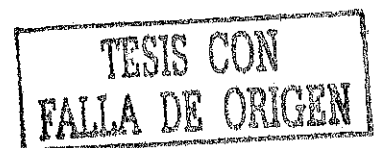
En el capítulo III se presenta el desarrollo del método para el cálculo preeliminar. Se presenta un método basado en ecuaciones adimensionales que permite calcular, con una buena aproximación, el área de las torres de oscilación y los volúmenes de las cámaras de aire necesarios para controlar las depresiones ocasionadas por el transitorio hidráulico. El método es aplicado a varios acueductos mexicanos, los resultados se comparan contra las dimensiones que según el método de las características son necesarias para obtener las presiones transitorias mínimas deseadas.

Para ejemplificar el método, en el capítulo IV, se desarrolla dicha metodología para algunos casos reales. Para el caso de las torres de oscilación, se seleccionó el acueducto "Río Colorado - Tijuana" ubicado en el estado de Baja California, México. El acueducto toma al agua del río "Colorado" para conducirla por un sistema de cinco plantas de bombeo a un tanque elevado y de ahí dejarla escurrir a una presa de regulación, desde donde es llevada la planta potabilizadora. El Instituto de Ingeniería de la UNAM participó en una campaña de medición con el fin de analizar el comportamiento actual del acueducto. El modelo fue alimentado con información recabada durante la campaña de medición. Para evaluar los resultados, se compararon los diámetros de las torres de oscilación según el método, contra los diámetros reales de éstas estructuras.

Para ejemplificar la aplicación del método propuesto a las cámaras de aire, se tomó información del acueducto "El Cuchillo - Monterrey". El acueducto toma agua de la presa "El Cuchillo" para llevarla por un sistema de cinco plantas de bombeo a la planta potabilizadora San Roque, ubicada en las afueras de la ciudad de Monterrey. El Instituto de Ingeniería de la UNAM participó en una campaña de medición con el fin de analizar el comportamiento de las cámaras de aire durante los transitorios hidráulicos. Al igual que en el caso anterior, el modelo fue alimentado con información recabada durante la campaña de medición. Para evaluar los resultados, se compararon los volúmenes que resultaron, por un lado, de la aplicación del método y, por otro, de la simulación numérica (método de las características).

En el capítulo V se presentan las conclusiones y comentarios del presente trabajo.

Finalmente, los anexos A y B se muestran las formulaciones de los parámetros adimensionales empleados en la solución de los sistemas de ecuaciones, tanto para las torres de oscilación como para las cámaras de aire.



## I. Antecedentes



### I.1 TRANSITORIOS HIDRÁULICOS

Los fenómenos no estacionarios o transitorios en conducciones de agua constituyen un aspecto que no se puede ignorar en el diseño y operación de un acueducto. La magnitud de las sobrepresiones que se pueden generar en ocasiones destruyen la conducción y las depresiones que algunas veces ocurren pueden reducir la presión interior al valor de la presión de vapor del agua a la temperatura ambiente (0.25 mca de presión absoluta a 20° C), lo que produce el colapso de la tubería. Todo ello obliga a analizar con todo detalle y a controlar estos fenómenos.

El movimiento de un fluido es usualmente muy complejo. Un flujo es estacionario o no permanente si la velocidad y la presión en cada sección de la corriente se mantienen constantes a lo largo del tiempo, aunque pueden variar de un punto a otro. Pero si en algún punto las condiciones cambian con el tiempo se dice que *el flujo es no estacionario o no permanente*.

Se denomina flujo transitorio a aquel que se produce entre dos estados de flujo estacionario.

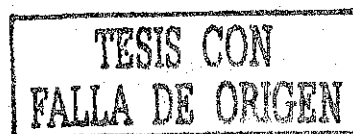
Un planteamiento tan general de los transitorios en sistemas hidráulicos a presión es susceptible, sin duda, de importantes matizaciones derivadas básicamente de la rapidez con que se producen en el tiempo los cambios en las variables más significativas del flujo. Así por ejemplo, se pueden presentar transitorios muy rápidos en donde los cambios que se generan en el flujo son ciertamente violentos (por ejemplo, el cierre instantáneo de una válvula en una conducción), o bien extremadamente lentos, como es el caso de la operación normal a lo largo de las 24 horas del día de una red de distribución de agua.

Este último supuesto implica una variación lenta de los caudales circulantes en las tuberías, así como una imperceptible modificación en los niveles de los tanques de la red cuando se analiza la variación de los mismos en intervalos temporales cortos (por ejemplo, de media hora).

Para Guarga Rafael [1995] los transitorios hidráulicos se clasifican como:

- a) **Transitorios muy lentos o cuasi-estáticos**, en los que las variables significativas del flujo, fundamentalmente caudales y presiones, varían de manera muy lenta en el tiempo; la hidráulica del sistema puede calcularse como una sucesión de estados estacionarios (se desprecian los fenómenos inerciales). Como ejemplo más significativo se tiene el comportamiento de las redes hidráulicas a presión.
- b) **Transitorios lentos denominados de oscilación en masa**, en los que los cambios temporales de las variables más significativas son importantes, pero no tanto como para tomar en consideración los efectos elásticos en fluido y tuberías. De hecho las variaciones de presión no llegan a modificar de manera significativa la energía elástica almacenada por el fluido y/o el material de la conducción. El modelo que lo analiza se conoce con el nombre de modelo rígido o de columna rígida y toma en cuenta efectos inerciales.
- c) **Transitorios rápidos o golpe de ariete**, en el que debido a la violencia de las perturbaciones introducidas en el sistema, los cambios de presión son muy importantes y varía de manera significativa la energía elástica almacenada en fluido y la tubería. El modelo para análisis considera la compresibilidad del fluido y la elasticidad de las paredes de la conducción y se llama modelo elástico o de columna elástica.

En resumen, se pueden considerar tres grandes tipos de transitorios hidráulicos. En primer lugar, los de muy lenta evolución y que se agrupan con el nombre genérico de cuasi-estáticos. Su estudio tiene interés en el análisis de la operación hidráulica de redes de distribución de agua potable, por lo que queda fuera del alcance del presente trabajo. El trío se completa con los transitorios lentos y rápidos, que se analizan a través de sus modelos de cálculo: el rígido y el elástico respectivamente.



## 1.2 PROBLEMAS CREADOS POR LOS TRANSITORIOS HIDRÁULICOS

Los problemas que se producen en las conducciones de agua a presión debido a los transitorios hidráulicos son de tres tipos:

- Problemas de sobrepresiones,
- Problemas de depresiones y
- Problemas de sobre velocidad de las máquinas.

### 1.2.1 Problemas de sobrepresión

Se denomina sobrepresión en una sección de una conducción a toda presión superior a la presión de trabajo. Los problemas que origina son los más sencillos de comprender puesto que la existencia de una presión superior a la de trabajo, aunque sea una sobrepresión transitoria, supone un incremento en las tensiones del material de la tubería. Si dicho aumento tiene magnitud tal que provoque deformaciones plásticas en la tubería o produce su rotura, es evidente que deberá evitarse. Cuando el proyectista calcula la tubería debe establecer una cota de presiones máxima admisibles en cada sección de la misma. Esta cota determinará la "clase" de la tubería en cada tramo de la conducción. Cuando se determina la clase, o lo que es lo mismo, la presión manométrica que la tubería es capaz de resistir sin daño, no se establecen diferencias entre presiones estacionarias y transitorias.

Por lo tanto, en el diseño se tratará siempre de que la clase de cada tramo de la tubería esté por encima de la presión manométrica máxima (estacionaria o transitoria) que el tramo deberá soportar cuando forme parte de la conducción. La elección de la clase de la tubería debe decidirse en función del costo de la misma. Cuanto más resistente sea mayor será su costo, pero en compensación habrá menores problemas con las sobrepresiones transitorias y, por lo tanto, será menos costoso el sistema de control de transitorios hidráulicos. A la inversa, una tubería con menos margen para soportar sobrepresiones costará menos, pero el sistema de control de los transitorios hidráulicos aumentará su costo. En consecuencia, el proyectista con una visión de conjunto de la conducción que está diseñando, será el que deberá tomar las decisiones que lleven a la solución de menor costo.

### 1.2.2 Problemas de depresiones

Se denomina depresión a toda presión absoluta menor que la atmosférica. Si la tubería está enterrada la presión media exterior que la tubería soporta es mayor que la atmosférica y depende del tipo de suelo y la profundidad. Ello debe tenerse en cuenta al diseñar estructuralmente las tuberías enterradas, pues debe resistir la presión exterior con la atmosférica en el interior. (Para más información ver Manual de Diseño de Obras Civiles B.3.2 "Obras subterráneas" de la CFE [1982]).

Los problemas de las depresiones en la conducción son los más frecuentes cuando se trata de transitorios creados por el paro accidental de una planta de bombeo. En orden de gravedad, estos problemas pueden clasificarse en tres clases.





Colapso de tubería

Al reducirse la presión interior y tomar valores por debajo de la presión media exterior, el tramo de tubería afectado trabajará a la compresión. Si estas tensiones son lo suficientemente altas se puede producir un fenómeno de pandeo en la pared de la tubería que lleve a su colapso (fig. I.1). Determinar cuál es la presión mínima interna que puede producir el colapso no es fácil, puesto que, una vez colocada la tubería la forma del perímetro puede modificarse respecto a la circunferencia original y de acuerdo a la forma resultante ésta será más o menos sensible al colapso.

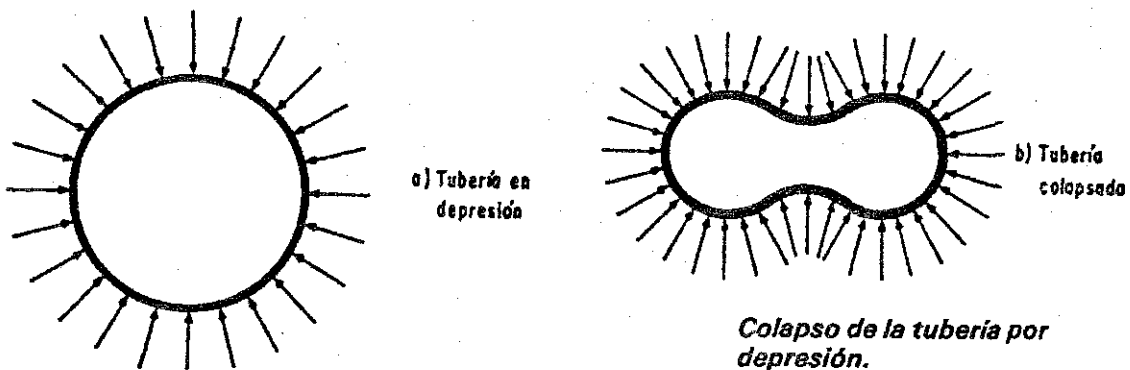


Fig. I.1

Separación de la columna rígida

Si la tubería no se colapsa, el descenso de la presión en el interior de la misma puede dar origen a la vaporización de agua a temperatura ambiente. En efecto, si la presión absoluta se aproximase a 0.25 mca para una temperatura ambiente de 20° C. la fase líquida se transforma en fase gaseosa y se forman burbujas de tamaños diversos en el seno del líquido. Este fenómeno en sí no es peligroso, pero sí es peligroso el fenómeno subsecuente en el tiempo. Si la burbuja inicialmente creada por una onda de depresión, es sometida a una presión levemente superior a la presión de vaporización, reducirá velozmente su volumen. Esta veloz reducción de volumen puede llevar a que las columnas líquidas separadas por la burbuja choquen violentamente. Por ello, este fenómeno de la reintegración de la columna líquida debe ser evitado en las conducciones que no se diseñen para soportarlo. Otros estudios de Sánchez H. Alejandro [1987] muestran que las sobrepresiones debidas a la separación de la columna rígida están más bien asociadas a la superposición de ondas reflejadas en la condición de frontera impuesta por la presión de vaporización del agua.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Entrada de aire en la tubería

El aire puede entrar a la tubería por las conexiones con la atmósfera que la tubería tiene a través de válvulas de admisión y expulsión de aire. La entrada de aire a la tubería es en principio un hecho que debe evitarse, pues puede dar lugar a dos tipos de fenómenos peligrosos por las sobrepresiones que puede generar. Uno de estos fenómenos puede sobrevenir en un orificio cuando al terminar la expulsión del aire el peso específico del fluido cambia de  $1.2 \text{ kg/m}^3$  (aire) a  $1000 \text{ kg/m}^3$  (agua) sin que se modifique el gasto. En consecuencia, para evitar la expulsión de aire por lugares no previstos de la conducción deberá evitarse su entrada. En el otro fenómeno, pequeñas cantidades de aire en la conducción pueden aumentar las sobrepresiones esperadas para un golpe de ariete sin aire, como sucede en un fenómeno de separación de columna líquida.

De lo expuesto anteriormente, se deduce que un acueducto bien diseñado tiene que presentar el siguiente comportamiento:

- La línea de cargas piezométricas máxima se ubica por debajo de “la línea de resistencia” de la conducción.
- La línea de cargas piezométricas mínima se ubica por encima del perfil del acueducto y obviamente también por encima de la “línea de presiones de vaporización”(fig. I.2).

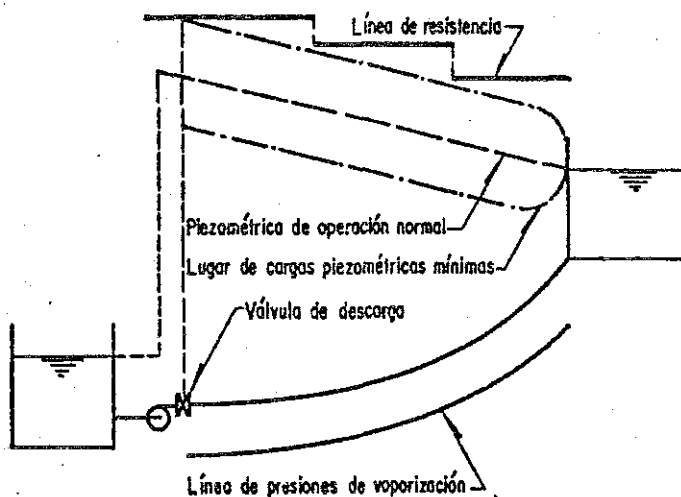


Fig. I.2 Acueducto bien diseñado

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 1.2.3 Problemas de sobrevelocidad

Al sufrir un paro accidental debido al cese del suministro eléctrico, las bombas hidráulicas quedan liberadas a la acción combinada del flujo que (en un acueducto ascendente) tiende a invertirse y de la inercia de las masas en rotación. De esta acción combinada resulta, en general, una inversión en la velocidad de la máquina que comienza al cabo de pocos segundos a girar al revés. Si esta velocidad en reversa aumenta por sobre la velocidad de régimen de las máquinas, las partes que giran serán sometidas a esfuerzos debidos a la fuerza centrífuga. Se tendrán en las partes rotantes esfuerzos del orden del doble que en rotación normal. Ello puede desbaratar las piezas rápidamente sobre todo si el fenómeno persiste en el tiempo, como puede ocurrir cuando una válvula de descarga queda abierta y el flujo se regresa de la línea de conducción al tanque de succión, a través de la máquina.

## 1.3 TUBERÍA RÍGIDA Y FLUIDO INCOMPRESIBLE

En esta sección se presentan las ecuaciones dinámicas y de conservación de la masa aplicadas a los transitorios hidráulicos en los que la tubería puede ser considerada rígida y el fluido incompresible. Esta hipótesis es "natural" para quien está habituado a trabajar con fenómenos hidráulicos, sin embargo, se trata de una simplificación extrema al tratar fenómenos transitorios. Su aplicación está limitada a casos muy particulares de oscilación entre dos tanques abiertos a la atmósfera.

### 1.3.1 Conservación de la masa

Se considera invariabilidad de la densidad ( $\rho$ ) y la no acumulación de fluido entre dos secciones por distantes que ellas estén entre sí. Por lo tanto, vale para flujo no estacionario, o no permanente, la ecuación:

$$Q_1(t) = Q_2(t) = \text{cte} \quad \dots (1.1)$$

entre los gastos que en el mismo instante  $t$  pasan por las secciones 1 y 2. Debe señalarse que esta ecuación tan sencilla se modifica para el modelo elástico con velocidad finita para la propagación de las perturbaciones, que es equivalente al admitir que la tubería no es rígida y/o el fluido es incompresible.

### 1.3.2 Cantidad de movimiento

Al aplicar la segunda ley de Newton al volumen de control contenido entre las secciones 1 y 2, según los fascículos de Diseño y operación de transitorios hidráulicos de agua a presión del Instituto de Ingeniería de la UNAM [1985], se llega a la ecuación para el flujo no estacionario que caracteriza el modelo de columna rígida:

$$\frac{l}{gS} \frac{dQ}{dt} = h_1 - h_2 - \frac{f l}{2gDS^2} |Q|Q \quad \dots (1.2)$$

- donde
- $Q$  - gasto volumétrico.  $m^3/s$
  - $S$  - sección transversal de la conducción,  $m^2$
  - $D$  - diámetro de la conducción.  $m$
  - $l$  - longitud de la conducción.  $m$
  - $t$  - tiempo,  $s$
  - $g$  - aceleración de la gravedad.  $m/s^2$
  - $f$  - factor de fricción de Darcy
  - $h_1$  - carga piezométrica en la sección 1,  $m$
  - $h_2$  - carga piezométrica en la sección 2,  $m$



#### I.4 TUBERÍA CON PARED ELÁSTICA Y FLUIDO COMPRESIBLE

Ahora se presentan las ecuaciones dinámica y de conservación de la masa aplicadas a los transitorios hidráulicos en los que la tubería puede ser considerada con paredes elásticas y el fluido compresible.

Según los fascículos de Diseño y operación de transitorios hidráulicos de agua a presión del Instituto de Ingeniería de la UNAM [1985], el modelo se caracteriza por las siguientes cuatro ecuaciones diferenciales.

- Conservación de la masa

$$\left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho}{S} \frac{\partial V}{\partial P} \right) \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + V \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \rho \frac{\partial S}{\partial x} = 0 \quad \dots (I.3)$$

- Ecuación dinámica

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + f \frac{V|V|}{2gD} = 0 \quad \dots (I.4)$$

- Ecuación constitutiva del fluido

$$\frac{\partial \rho}{\partial P} = \frac{\rho_0}{k} \quad \dots (I.5)$$

- Ecuación constitutiva de la tubería

$$\frac{\partial R}{\partial P} = C \quad \dots (I.6)$$

Luego de incorporar las ecuaciones constitutivas a la ecuación de la masa, el sistema de cuatro ecuaciones se reduce a dos, la ecuación dinámica y la de conservación de la masa.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{gS}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad \dots \text{(I.7) Conservación de la masa + constitutivas}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gS \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DS} = 0 \quad \dots \text{(I.8) Dinámica}$$

donde            H - carga total, m  
                     a - celeridad, m/s  
                     x - posición horizontal (coordenada axial). m

Las ecuaciones (I.7) y (I.8) constituyen un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de primer orden cuyas funciones incógnitas son  $Q(x,t)$  y  $H(x,t)$ . Para encontrarlas se requiere conocer las condiciones de frontera y las condiciones iniciales, que en este problema son:

$$\left. \begin{array}{l} Q = Q(x,0) \\ H = H(x,0) \end{array} \right\} \text{condiciones iniciales} \quad \dots \text{(I.9)}$$

Las ecuaciones anteriores indican que en el instante inicial  $t = 0$  debe conocerse el valor del gasto  $Q$  y de la carga  $H$  en todas las secciones del sistema.

Nótese que la ecuación de conservación de la masa más las constitutivas (I.7) es lineal en las derivadas parciales y los coeficientes son constantes. La ecuación (I.8) no es lineal debido a la fricción; en dicho término aparece el gasto al cuadrado.

## 1.5 METODO DE LAS CARACTERÍSTICAS

La ecuación dinámica y la de continuidad para flujo no permanente en tuberías, expresado en función de variables dependientes  $H$ ,  $Q$ , forman un sistema de ecuaciones diferenciales parciales, no lineales e hiperbólicas en función del tiempo y la distancia, es decir, las variables independientes son el tiempo y la distancia, y las dependientes el gasto y la carga. El resto de las variables involucradas son características del sistema, las cuales prácticamente no varían por lo que se les considera constantes. La solución exacta del sistema de ecuaciones es posible sólo en casos simplificados (sin fricción, por ejemplo), pero normalmente se resuelve mediante cálculo numérico. Algunas de las técnicas numéricas usadas para resolver el sistema de ecuaciones son el método de diferencias finitas y el método de las características.

En el método de las características, las ecuaciones diferenciales son transformadas primeramente a ecuaciones diferenciales ordinarias con un par de ecuaciones, llamadas ecuaciones características, para después resolver el sistema por medio de la técnica de diferencias finitas.



Las ecuaciones se pueden escribir como ecuaciones diferenciales ordinarias dependientes del tiempo (Chaudhry [1979]):

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gS}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{fQ|Q|}{2DS} = 0 \quad \dots (I.10)$$

si  $\frac{dx}{dt} = a \quad \dots (I.11)$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gS}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{fQ|Q|}{2DS} = 0 \quad \dots (I.12)$$

si  $\frac{dx}{dt} = -a \quad \dots (I.13)$

Las ecuaciones I.11 y I.13 representan dos líneas en el plano  $x, t$  con pendiente  $\pm 1/a$ , que representa el camino seguido por una perturbación. Sean  $A$  y  $B$  dos puntos separados de una tubería y suponga que se presenta una perturbación en el punto  $A$ , esta perturbación llegará al punto  $P$  en un tiempo  $\Delta t$  como se muestra en la figura I.3.

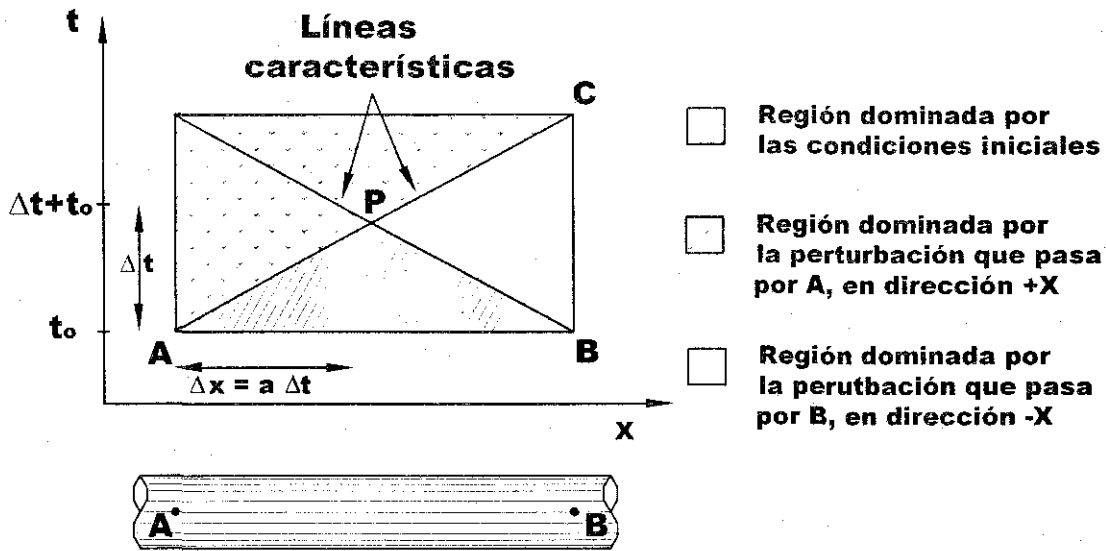


Fig. I.3 Líneas características plano  $x, t$

Si hay una perturbación en el punto  $A$  y en el punto  $B$  no se tiene perturbación alguna, la perturbación viaja a lo largo de la tubería de  $A$  a  $B$  y en el plano  $x, t$  se marcan dos regiones separadas por la línea con pendiente  $1/a$ , la que está por debajo de la línea no se ve afectada por la perturbación, mientras que la región arriba si es afectada.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En el caso de que en  $A$  y  $B$  se presenten perturbaciones simultaneas significa que se tienen dos perturbaciones que viajan en sentido contrario a lo largo de la tubería, el punto  $P$  es donde se intersectan, quedando en el plano  $x, t$  un área debajo de las líneas que no es afectada sino solamente por las condiciones de frontera y las condiciones iniciales.

Las ecuaciones I.10 y I.12 llamadas de compatibilidad, son válidas a todo lo largo de la tubería en que se analiza el transitorio; en los extremos de la línea es necesario modelar las condiciones de frontera que comúnmente están asociadas a tanques de nivel constante (aguas arriba o aguas abajo), bombas, válvulas, expansiones o disminuciones del área de la tubería, etc.

Para resolver el sistema de ecuaciones se procede a representarlas como ecuaciones en diferencias finitas, para lo que en el caso de la característica positiva:

$$\Delta Q = Q_P - Q_A \quad \dots (I.14)$$

$$\Delta H = H_P - H_A \quad \dots (I.15)$$

Y para la característica negativa:

$$\Delta Q = Q_P - Q_B \quad \dots (I.16)$$

$$\Delta H = H_P - H_B \quad \dots (I.17)$$

Si se sustituye en las ecuaciones I.10 y I.12 resulta:

$$Q_P = C_p - C_a H_P \quad \dots (I.18)$$

$$Q_P = C_n + C_a H_P \quad \dots (I.19)$$

Donde

$$C_p = Q_A + \frac{gA}{a} H_A - \frac{f \Delta t}{2DA} Q_A |Q_A| \quad \dots (I.20)$$

$$C_n = Q_B + \frac{gA}{a} H_B - \frac{f \Delta t}{2DA} Q_B |Q_B| \quad \dots (I.21)$$

y 
$$C_a = \frac{gA}{a} \quad \dots (I.22)$$

La ecuación I.20 es válida a lo largo de la línea característica positiva  $AP$  y la I.21 a lo largo de la línea de característica negativa  $BP$ . Las constantes  $C_p$  y  $C_n$  se reevalúan con base en los datos del intervalo anterior,  $C_a$  es una constante que solo varía si las características de la tubería cambian.

De las ecuaciones I.18 y I.19 se evalúan fácilmente  $Q_P$  y  $H_P$  como:



$$Q_p = 0.5 ( C_p + C_n ) \quad \dots (I.23)$$

$$H_p = 0.5 ( C_n - C_p ) / C_a \quad \dots (I.24)$$

Por lo que, estimar la presión y el gasto en un punto  $X_1$  de la tubería en el tiempo  $t_1$  es sencillo, ya que simplemente se aplican las ecuaciones I.23 y I.24 para formar una malla hasta llegar el punto  $X_1, t_1$  del plano  $x,t$  que interesa, tal como se ilustra en la figura I.4

Para definir los puntos de la malla en la frontera aguas abajo, se requiere la condición de frontera y la característica positiva, lo mismo sucede con los puntos de la malla en la frontera aguas arriba, donde se requiere la condición de frontera y la característica negativa.

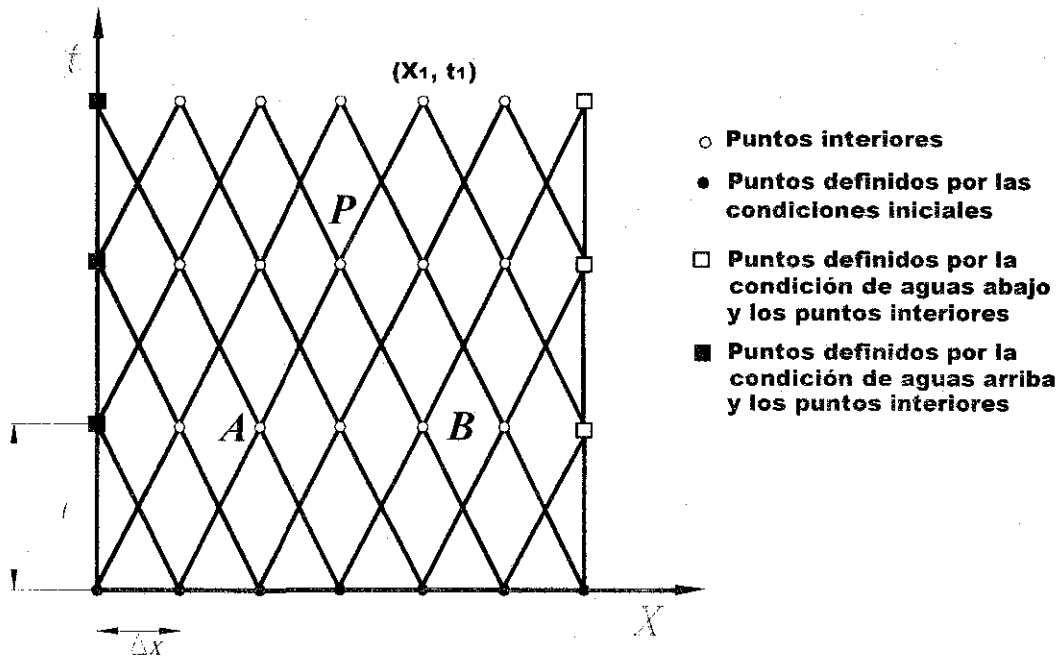


Fig. I.4 Malla de cálculo

## I.6 ANALISIS DIMENSIONAL

Para Echávez G.[1996] “el análisis dimensional es una técnica que da información utilizando las dimensiones de las variables que intervienen en un problema. En ingeniería se usa frecuentemente en la verificación de fórmulas, comprobando que las unidades de ambos lados de la ecuación sean iguales, y en la transformación de fórmulas de un sistema de unidades a otro, usualmente del inglés al sistema internacional. También, permite reducir el número de variables de un problema, simplificándolo en forma importante.”

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Los parámetros adimensionales profundizan en forma significativa el entendimiento sobre los fenómenos del movimiento de fluidos. Estos parámetros permiten que los resultados sean aplicados a situaciones que involucran dimensiones físicas y a menudo propiedades de los fluidos diferentes. Entonces, es posible describir por completo el fenómeno sin restringir alguna de las variables, incluso, se pueden llevar a cabo menos experimentos con el fin de descubrir las facetas escondidas del problema y, por lo tanto, lograr importantes ahorros en tiempo y dinero.

Usando parámetros adimensionales, los resultados de una investigación pueden presentarse, a otros ingenieros o investigadores, en forma más compacta y significativa con el fin de facilitar su uso. Es igualmente importante que, a través de esta presentación incisiva y ordenada de información, los investigadores pueden llegar a descubrir nuevos aspectos y áreas sobre el conocimiento del problema estudiado. Este avance directo del entendimiento del fenómeno se debilitaría si las herramientas del análisis dimensional no estuvieran disponibles.

Muchos de los parámetros adimensionales pueden ser vistos como la relación de fuerzas, cuya magnitud indica la importancia de una de las fuerzas con respecto a las otras. Si algunas fuerzas en una situación particular son mucho más grandes que las otras, a menudo es posible despreciar el efecto de las fuerzas menores y tratar el fenómeno como si estuviera completamente determinado por las fuerzas mayores. Esto significa que se pueden utilizar procedimientos matemáticos y experimentales más simples, aunque no necesariamente fáciles, para resolver el problema.

Para resolver problemas prácticos de diseño de mecánica de fluidos, usualmente se requiere tanto de desarrollos teóricos como de resultados experimentales. Al agrupar las cantidades importantes en parámetros adimensionales, es posible reducir el número de variables y hacer que este resultado compacto (gráficas o ecuaciones) sea aplicable a otros problemas similares.

Si se pudiera crear un modelo experimental con la misma geometría y las relaciones de fuerza que ocurren en la unidad completa, entonces la solución adimensional para el modelo es también válida para el prototipo. A menudo no es posible tener todas las relaciones igual en modelo y en prototipo. Por consiguiente, se debe planear la experimentación de tal forma que las relaciones entre las fuerzas dominantes sean tan cercanas como sea posible. Los resultados obtenidos en tal modelación incompleta usualmente son suficientes para describir el fenómeno en el detalle que se desea.

### ***1.6.1 Dimensiones y unidades***

Cuando una ecuación describe un fenómeno físico, las variables, ligadas entre sí por símbolos matemáticos y constantes de tal manera que se logre la igualdad, representan las cantidades físicas que intervienen en el fenómeno. Cada variable, además de tener un valor numérico, tiene un significado y una dimensión, es decir, una combinación de unidades de referencia (por ejemplo masa, longitud y tiempo), que denota la forma en que se definió la variable. La combinación anterior es, necesariamente, del tipo producto de potencias; esto

es. las unidades de referencia se encuentran multiplicadas, divididas o elevadas a una potencia, con exclusión de otros operadores, como suma, resta, seno, logaritmo, etc.

Las unidades de referencia son: masa, longitud y tiempo. **M** es la dimensión de masa, **L** la dimensión de longitud y **T** la dimensión del tiempo.

El análisis dimensional tiene una restricción: en él solamente pueden intervenir cantidades físicas que tengan un significado cuantitativo, es decir, que tenga sentido decir “dos veces más rápido” o “cinco veces más largo”

La tabla I.1 indica algunas de las variables utilizadas en fluidos, junto con sus símbolos y dimensiones.

Tipo	Variable	Símbolo	Dimensiones
Geométrica	Longitud	l	L
	Area	A	L <sup>2</sup>
	Volumen	V	L <sup>3</sup>
Cinemática	Tiempo	t	T
	Velocidad angular	$\omega$	T <sup>-1</sup>
	Frecuencia	f	T <sup>-1</sup>
	Velocidad	v	LT <sup>-1</sup>
	Aceleración	a	LT <sup>-2</sup>
	Gravedad	g	LT <sup>-2</sup>
	Viscosidad cinemática	$\nu$	L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>
	Caudal	Q	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>
Dinámica	Masa	m	M
	Fuerza	F	MLT <sup>-2</sup>
	Tensión superficial	$\sigma$	MT <sup>-2</sup>
	Presión	p	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
	Esfuerzo	$\tau$	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
	Modulo de elasticidad	k	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
	Peso específico	$\gamma$	ML <sup>-2</sup> T <sup>-2</sup>
	Trabajo	W	ML <sup>2</sup> T <sup>-2</sup>
	Energía	E	ML <sup>2</sup> T <sup>-2</sup>
	Momento	M	MLT <sup>-1</sup>
	Viscosidad dinámica	$\mu$	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
	Densidad	$\rho$	ML <sup>-3</sup>

Tabla I.1 Variables y dimensiones

### 1.6.2 Variables dependientes e independientes

En experimentación y/o modelación, las variables se clasifican en dos tipos: variables dependientes e independientes. La variable dependiente es la que interesa calcular y en hidráulica es común que ésta sea la velocidad o la presión, o alguna variable derivada de estas dos como gasto, empuje, sustentación, etc.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

La variable independiente es la que, junto con otras, interviene en un problema, y en función de las cuales interesa determinar la variable dependiente. En hidráulica generalmente las variables independientes son la posición y el tiempo. Si en un cierto problema o experimento una variable se conserva constante se le llama parámetro.

El aceptar que una ecuación representa un fenómeno físico implica restricciones en esa ecuación; además de que debe satisfacer la igualdad numérica se tiene que:

- a) Las dimensiones de los términos deben ser iguales, es decir, debe ser dimensionalmente homogénea, independientemente del sistema de unidades con que se exprese.
- b) La ecuación será válida para cierto intervalo de valores

### ***I.6.3 Teorema $\Pi$ Buckingham***

El teorema  $\Pi$  Buckingham (ver Murdock J [1993]) es un método que se emplea para determinar relaciones entre las variables que intervienen en un problema físico. Relaciona las variables dependientes con el resto de las variables independientes. El teorema  $\Pi$  se usa frecuentemente cuando el número de variables excede de cuatro. La aplicación de este método resulta en la formación de parámetros llamados  $\Pi$ .

## **APLICACIÓN DEL TEOREMA $\Pi$ BUCKINGHAM**

### **1. Organización de la Información**

- a) Enlistar todas las variables físicas involucradas de acuerdo a su tipo: geométricas, cinemáticas o dinámicas (ver tabla I.1).
- b) Con las dimensiones de las variables, formar la matriz de exponentes.
- c) Dividir las variables en dos grupos: variables dependientes e independientes. A las variables características (independientes) se les llama "grupo base" y se denotan como:  $B_1$ ,  $B_2$  hasta  $B_i$ .
- d) Nombrar con números  $A$  el resto de las variables (dependientes), iniciando con  $A_1$ .

### **2. Derivación de los parámetros $\Pi$**

- a) Escribir las ecuaciones básicas para cada una de los parámetros como:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= B_1^{X_1} B_2^{Y_1} B_3^{Z_1} \dots B_i^{\delta_1} A_1 \\ \Pi_2 &= B_1^{X_2} B_2^{Y_2} B_3^{Z_2} \dots B_i^{\delta_2} A_2 \\ &\vdots \\ \Pi_n &= B_1^{X_n} B_2^{Y_n} B_3^{Z_n} \dots B_i^{\delta_n} A_n \end{aligned} \quad \dots (I.25)$$

Observar que el número de parámetros  $\Pi$  es igual al número de variables dependientes  $A$ .

- b) Para cada uno de los parámetros  $\Pi$ , escribir las ecuaciones de los exponentes, de tal manera que la suma de los exponentes de cada dimensión sea cero  $\Sigma M = 0$ ,  $\Sigma L = 0$  y  $\Sigma T = 0$ .
- c) Resolver simultáneamente los sistemas de ecuaciones para obtener los valores de los exponentes  $X, Y, Z$  hasta  $\delta$ , para cada  $\Pi$ .

### 3. Convertir los parámetros $\Pi$ en relaciones más prácticas o conocidas

El teorema  $\Pi$  Buckingham enuncia que algunos de los parámetros  $\Pi$  pueden ser representados como una función de todos o de algunos de éstos, es decir:

$$f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n) = 0 \quad \dots (I.26)$$

La ecuación (I.26) es matemáticamente rescrita como una relación funcional. Esta puede ser expresada, por ejemplo, como:

$$\Pi_2 = f(\Pi_1, \Pi_3, \dots, \Pi_n) \quad \dots (I.27)$$

De la ecuación (I.27), se observa que  $\Pi_2$  función de los parámetros  $\Pi_1, \Pi_3$  hasta  $\Pi_n$ , pero no quiere decir que esté en función de todos, es posible que pueda ser representado solo por algunos. Esto puede ser determinado por análisis físicos o experimentales. De este manera, es posible afectar con alguna constante la ecuación (I.25) sin alterar los resultados, así por ejemplo,  $\Pi_1$  podría ser remplazado con  $2 \Pi_1^{-1}$ , o  $\Pi_n$  con  $a \Pi_n^b$ .

#### 1.6.4 Recomendaciones para formar números adimensionales

Una de las recomendaciones de Echávez G.[1996] es hacer que la variable dependiente aparezca en el numerador de un solo producto adimensional, de preferencia con el exponente 1, y no aparezca en ningún otro producto. La segunda recomendación es tratar de formar productos adimensionales ya conocidos, o estándar, como por ejemplo, número de Reynolds, de Froude, de Thoma, de Euler, etc.

La tercera es que las variables que describen la geometría del problema y cuya dimensión es similar, por ejemplo una longitud, se puedan hacer adimensionales simplemente seleccionando una longitud característica y dividiendo cada variable entre esa longitud. Finalmente, en los casos en que después de aplicar los tres criterios anteriores aún quedan productos por determinar, será necesario asignar valores a algunas de las variables  $A_i$ , para obtener las soluciones faltantes, observando las siguientes indicaciones:

- Las propiedades de los fluidos, exceptuando la densidad, deben aparecer solas en un solo producto adimensional.
- Hay que buscar productos no solo correctos sino también que sean sencillos y naturales.
- No deben aparecer demasiadas variables en un producto.
- En los productos adimensionales deben estar todas las variables que aparecen en el problema, si falta alguna, obviamente la solución será equivocada.

## ***II. Dispositivos para el control de transitorios***

El propósito de los dispositivos de control de los transitorios hidráulicos es evitar el daño que pueden producir la caída de presión y el consecuente el golpe de ariete, generado por el paro accidental de una planta de bombeo sobre las tuberías y bombas.

Para controlar los efectos del transitorio hidráulico se tienen dispositivos de acción directa y dispositivos de acción indirecta. Los primeros ejercen un efecto inmediato desde el instante en que inicia el transitorio, su objetivo es disminuir la rapidez con la que se reduce la velocidad de la columna líquida, lo que a la postre se manifestará en menores oscilaciones de presión y una menor exigencia en la resistencia de a tubería.

Los segundos llevan a cabo su efecto cuando la presión aumenta demasiado o disminuye peligrosamente. En los casos en que no se puede alargar el transitorio existe la posibilidad de minimizar sus consecuencias.

Para Guarga R. [1995] los dispositivos de protección contra los efectos del transitorio hidráulico se pueden agrupar de la siguiente manera:

- |                                  |   |  |
|----------------------------------|---|--|
| Dispositivos de acción directa   | { | • Volantes de inercia                      |
|                                  |   | • Cámaras de aire                          |
|                                  |   | • Válvulas de cierre programado            |
| Dispositivos de acción indirecta | { | • Torres de oscilación                     |
|                                  |   | • Tanques unidireccionales                 |
|                                  |   | • Válvulas de retención                    |
|                                  |   | • Válvulas de admisión y expulsión de aire |
|                                  |   | • Válvulas de alivio                       |

En este capítulo se exponen el funcionamiento de la torre de oscilación y de la cámara de aire por ser el tema central de este trabajo.

## II.1 TORRES DE OSCILACIÓN

En la figura II.1 se presenta el esquema de una torre de oscilación. Se trata de una torre cuya sección recta tiene un área  $A$  sustancialmente mayor que el área  $S$  de la tubería. La relación  $A / S$  debe ser suficientemente grande como para que los movimientos verticales del agua en la torre, durante el fenómeno transitorio, tengan aceleraciones despreciables frente al gradiente hidrostático. Se trata de que la torre de oscilación trabaje como un tanque de carga constante durante el transitorio rápido o por golpe de ariete, aunque después participe activamente en un transitorio por oscilación de masa. Ello implica que la onda incidente del transitorio rápido se refleje completamente y que la tubería aguas abajo del tanque se mantenga como una zona no perturbada.

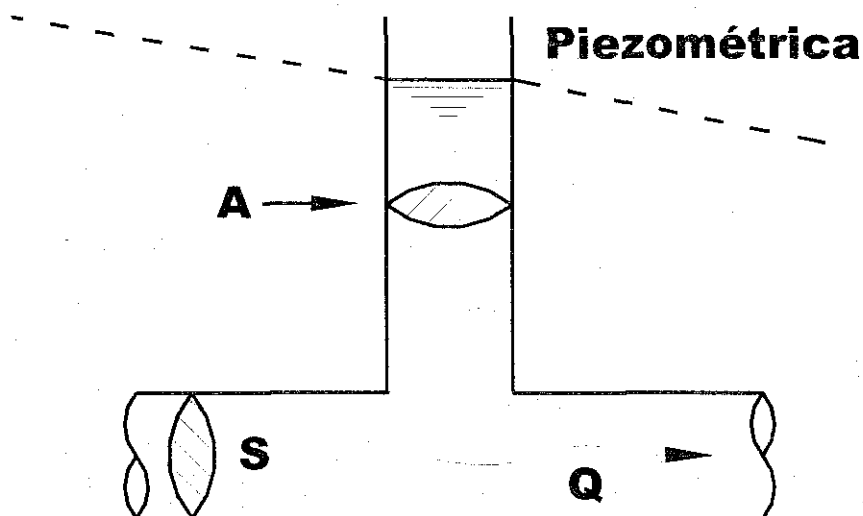


Fig. II.1 Esquema de la torre de oscilación

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

II.1.1 Cómo controla las sobrepresiones y depresiones

La acción de la torre de oscilación consiste en confinar la perturbación por golpe de ariete en el tramo de tubería comprendido entre la bomba y la torre. El resto de la tubería no es afectado por la onda de depresión, así como tampoco por las fases subsiguientes del fenómeno que se producirá en el tramo comprendido entre la bomba y la torre.

La perturbación, bien de depresión o sobrepresión, incidente en la torre de oscilación (Fig. II.2.a), llega a la torre (Fig. II.2.b) y se refleja (Fig. II.3 c), de forma que abajo de la torre aparece una zona con perturbaciones mucho menores, que en ocasiones puede considerarse como una zona no perturbada.

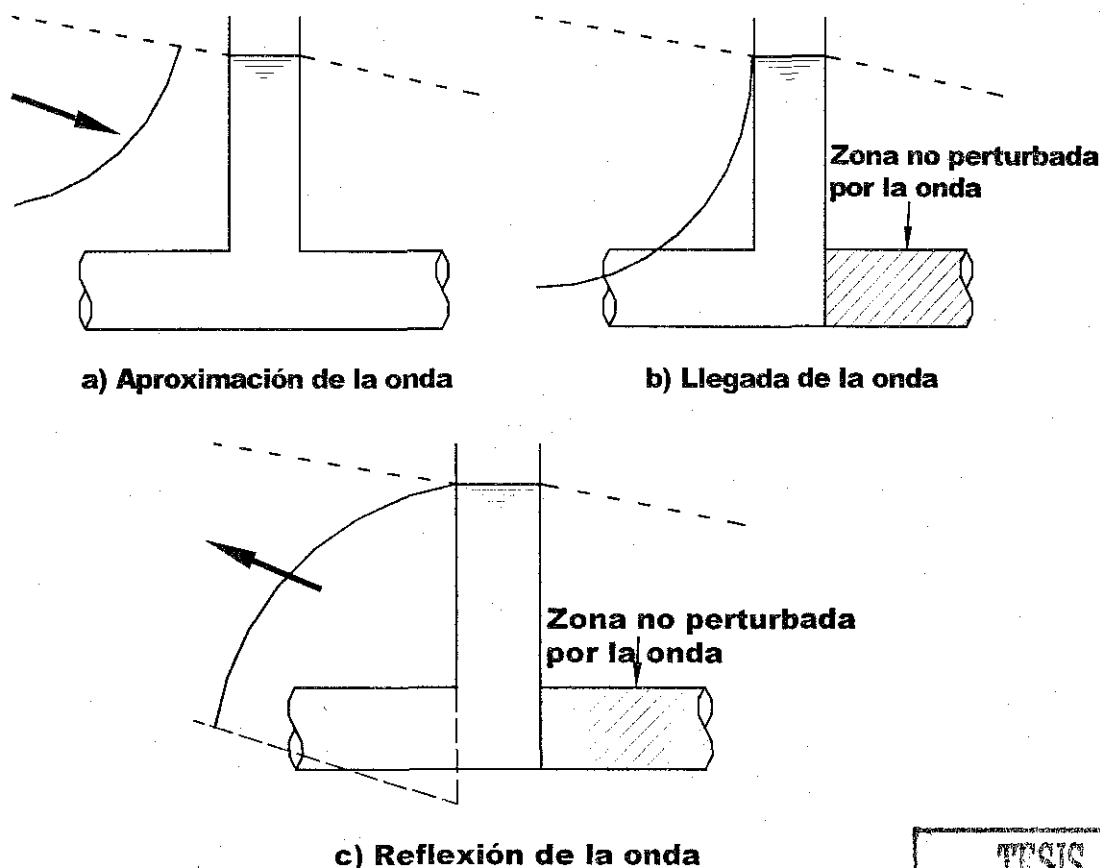


Fig. II.2 Operación de la torre de oscilación

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

II.1.2 Ventajas y desventajas

La torre de oscilación es un dispositivo del cual habitualmente el proyectista conoce las ventajas y desconoce los problemas que trae a la instalación. Si no se tienen en cuenta los efectos secundarios que pueden generarse en la conducción por la instalación de una torre pueden llegar a generarse sobrepresiones incluso mayores que las que se tendrían sin su instalación. Sus ventajas más notables son:

- No requiere mantenimiento mecánico.



## II. Dispositivos para el control de transitorios

- No necesita de mecanismos adicionales para llenar y reponer el volumen de agua aportado durante el transitorio.
- El fenómeno de golpe de ariete no afecta el tramo de aguas abajo, no se requiere por lo tanto de otros dispositivos (dispositivos secundarios).

Los problemas que la torre de oscilación introduce pueden resumirse en:

- Su coronamiento debe estar por encima del nivel de la piezométrica para gasto máximo en el punto donde se coloque el tanque.
- Su desplante debe estar por debajo de la piezométrica correspondiente al gasto nulo, para que no se vacíe.
- Permite fluctuaciones de presión el tramo entre la planta de bombeo y la torre, por lo que se requiere analizar la resistencia de la tubería en dicho tramo.
- Puede presentar derrames por incremento de la pérdida de carga en la conducción. Situación que se ha manifestado en varios acueductos.
- Aguas abajo del tanque de oscilación se desarrolla un transitorio lento o por oscilación de masa que termina cuando el nivel del agua en la torre de oscilación se iguala con el nivel del agua en el punto final de la conducción.

### II.2 CÁMARAS DE AIRE

En la figura II.3 se muestra el esquema de una cámara de aire y su ubicación típica en el sistema de bombeo. Se aprecia la línea piezométrica que normalmente se encuentra por arriba de la cámara; la cantidad de aire comprimido se mantienen con un compresor que trabaja en forma esporádica y, finalmente, que en ocasiones la cámara se conecta por medio de un orificio diferencial cuya pérdida de carga es grande para flujo de la línea a la cámara y menor para flujo que sale de la cámara a la línea.

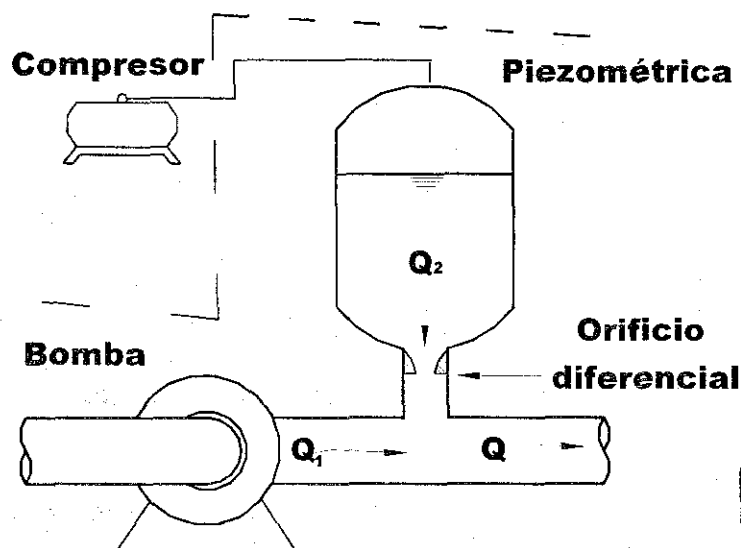


Fig. II.3 Esquema y ubicación de la cámara

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Generalmente, las cámaras de aire se ubican junto a las plantas de bombeo, por lo que su operación inicia inmediatamente después del paro de bombas.

La operación de la cámara se ilustra en la figura II.4 (a) donde se tiene la condición previa al paro accidental, en II.4 (b) la piezométrica después del corte de bombeo ha caído hasta una posición intermedia y por consiguiente también ha caído la presión en el interior de la cámara y el aire se ha expandido expulsando el volumen marcado hacia la línea. En la figura II.4 (c) la piezométrica ha descendido a su nivel más bajo, el volumen de aire se ha expandido al máximo y el volumen de agua marcado ha sido expulsado durante el intervalo de operación de la cámara.

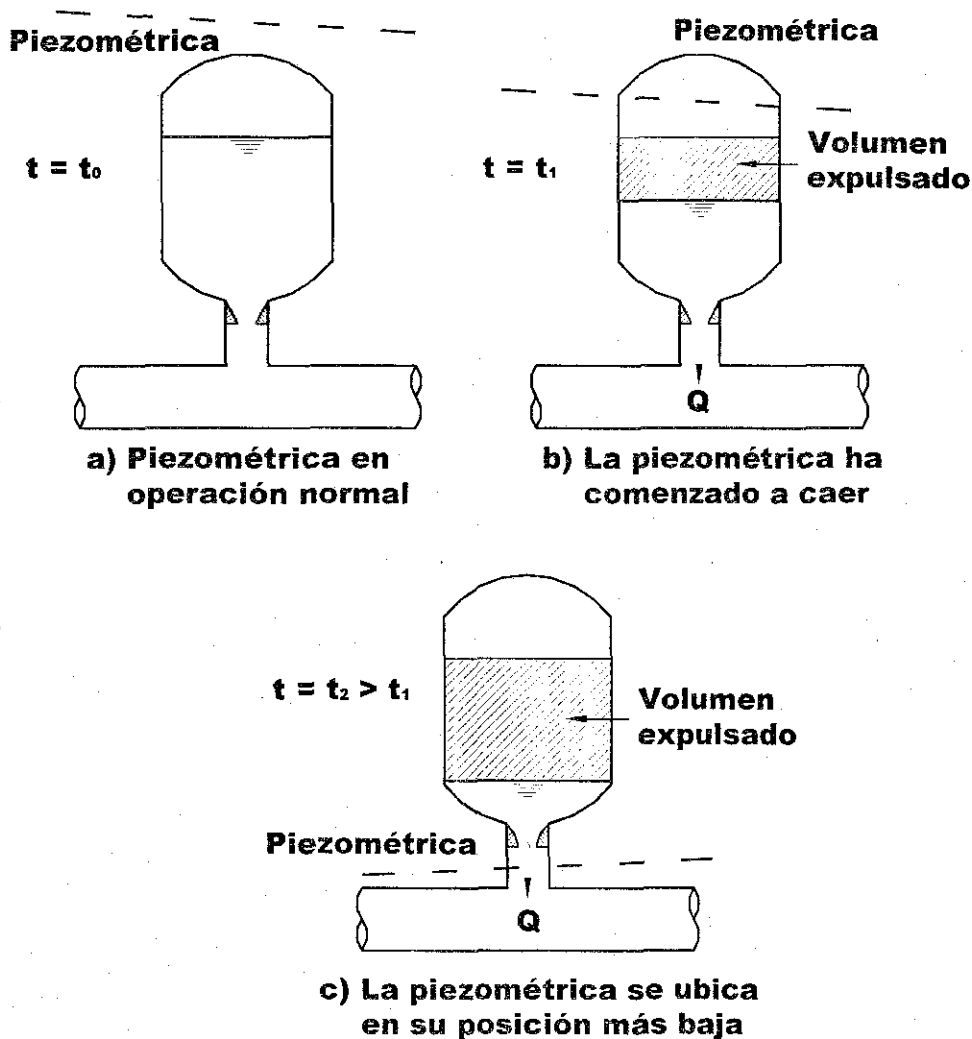


Fig. II.4 Operación de la cámara de aire

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### *II.2.1 Cómo controla las sobrepresiones y depresiones*

La cámara de aire controla el transitorio producido por el paro de la planta de bombeo mediante la reducción de la variación del gasto después del paro accidental. Inmediatamente después del corte de bombeo la cámara se convierte en una fuente de energía que tiende a mantener el movimiento del fluido en la conducción. Así, mientras el aire de la cámara se va expandiendo, la presión va disminuyendo, originando que el gasto en la tubería se reduzca de una forma controlada y mucho más lenta de lo que ocurriría sin la presencia de ésta. Se trata pues de convertir un transitorio rápido en un fenómeno de oscilación de masa disminuyendo la rapidez con la que se reduce la velocidad de la columna líquida.

### *II.2.2 Ventajas y desventajas*

Las ventajas más significativas que presenta una cámara de aire como dispositivo principal o secundario para el control del golpe de ariete, son los siguientes:

- Reduce, en función de la cantidad de aire comprimido, la magnitud de la onda de depresión que se produce luego del paro accidental de las bombas.
- Su efecto no depende de la cota inicial de la superficie libre del agua dentro de la cámara. Esta diferencia esencial con la torre de oscilación y con el tanque unidireccional permite que con la cámara se controle la caída de presión por corte de bombeo en topografías en las cuales la altura de los tanques sería prohibitiva.
- El volumen de agua estática existente dentro de la cámara de oscilación es sustancialmente menor que en una torre de oscilación o tanque unidireccional, por lo tanto, en zonas con clima frío es más fácil evitar la congelación mediante calentamiento.
- La cámara de aire puede colocarse siempre cerca de la planta de bombeo puesto que su efecto no depende de la cota inicial de la superficie libre del agua dentro de la cámara. Ello facilita su mantenimiento, la alimentación del aire comprimido y calentamiento, si fuese necesario.

Por otra parte, los problemas más importantes que presenta la cámara de aire son:

- Requiere de compresores para mantener el colchón de aire que, de otra manera, se disolvería en el agua y finalmente desaparecería. Ello implica agregar, a la planta de bombeo, nuevos equipos mecánicos.
- El orificio diferencial habitualmente se construye mediante un by – pass con válvulas de retención. Ello implica que estas válvulas deben recibir mantenimiento para asegurar su operación correcta.
- Como todo tanque a presión, debe ser revisado periódicamente para evitar fallas catastróficas.
- Como la cámara reduce, pero no suprime la onda de depresión, ésta viaja en la dirección aguas abajo. En función de la topografía, pueden requerirse otros dispositivos de control secundarios como pueden ser otras cámaras de menor volumen que la principal, tanques unidireccionales o torres de oscilación.

### ***III. Método propuesto para el predimensionamiento de dispositivos de control***

Existen varios métodos para el predimensionamiento de torres de oscilación y de cámaras de aire, algunos de ellos basados en ábacos, gráficas o nomogramas.

En el caso de las torres de oscilación Calame y Gaden (Berezowsky [1988]) desarrollaron una solución con gráficas introduciendo variables adimensionales. También se cuenta con las gráficas de Ruus E. (Chaudhry [1979]). Existen métodos numéricos como el de Presse y Scimeni (Gardea H. [1990]). También existen criterios para el diseño de torres de oscilación en las cuales se considera la estabilidad de las oscilaciones hidráulicas como el de Thoma (Soldán P. [1988]) para oscilaciones pequeñas y el de Jaeger Ch. ([1960]) para oscilaciones grandes.

Para las cámaras de aire se cuenta con los ábacos de Parmakian [1963], Graze y Horlacher [1986 y 1989] y los de Ruus E. (Chaudhry [1979]). Al final de este capítulo se hace una comparación de la aplicación de estos métodos con el método propuesto en este trabajo.

El dimensionamiento óptimo de los dispositivos de control de transitorios hidráulicos en sistemas de conducción de agua a presión se refleja en los costos de construcción y operación de los mismos. En este capítulo se presenta un método basado en ecuaciones paramétricas que permite calcular, con buena aproximación, el área de los tanques de oscilación y los volúmenes de las cámaras de aire necesarios para controlar las depresiones durante los transitorios hidráulicos generados por el disparo de equipos de bombeo. Como comprobación el método propuesto se aplica a varios acueductos mexicanos que tienen como dispositivo principal de control de transitorios cámaras de aire o tanques de oscilación. Los resultados se comparan con las dimensiones que según el método de las características son necesarias para obtener las presiones transitorias mínimas deseadas.

Una vez que se determina la presión mínima transitoria permitida en el punto de conexión del dispositivo de control de transitorios (tanque de oscilación o cámara de aire) con la tubería, las ecuaciones paramétricas permiten calcular el valor que debe tener un parámetro "a" y lo relaciona con las dimensiones del dispositivo. A partir de este parámetro se obtienen, mediante cálculos algebraicos, el área del tanque de oscilación o el volumen de la cámara de aire.

### Modelo matemático y ecuaciones adimensionales

El modelo matemático que se describe a continuación se basa en la siguientes hipótesis:

- Las torres de oscilación y las cámaras de aire tienen capacidad suficiente para que después de un disparo de bombas el transitorio sea suficientemente lento y pueda ser representado como el movimiento de una columna rígida, es decir, no ondulatorio.
- El tramo de alta presión entre la planta de bombeo y la torre de oscilación tiene resistencia estructural suficiente para absorber las presiones extremas, por lo que no entra en estudio (ver figura III.1).

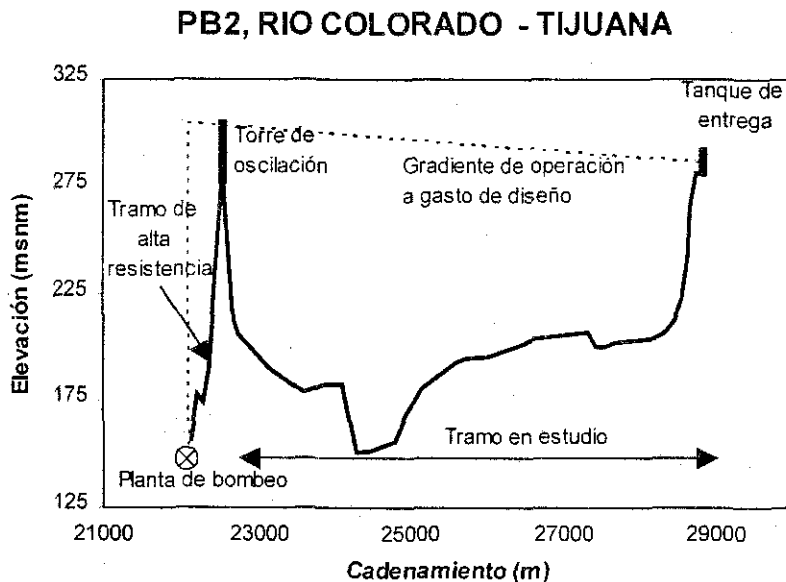


Fig.III.1 Acueducto protegido con torres de oscilación

- Las cámaras de aire se conectan a la tubería inmediatamente aguas abajo del múltiple de descarga de las bombas (ver figura III.2).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

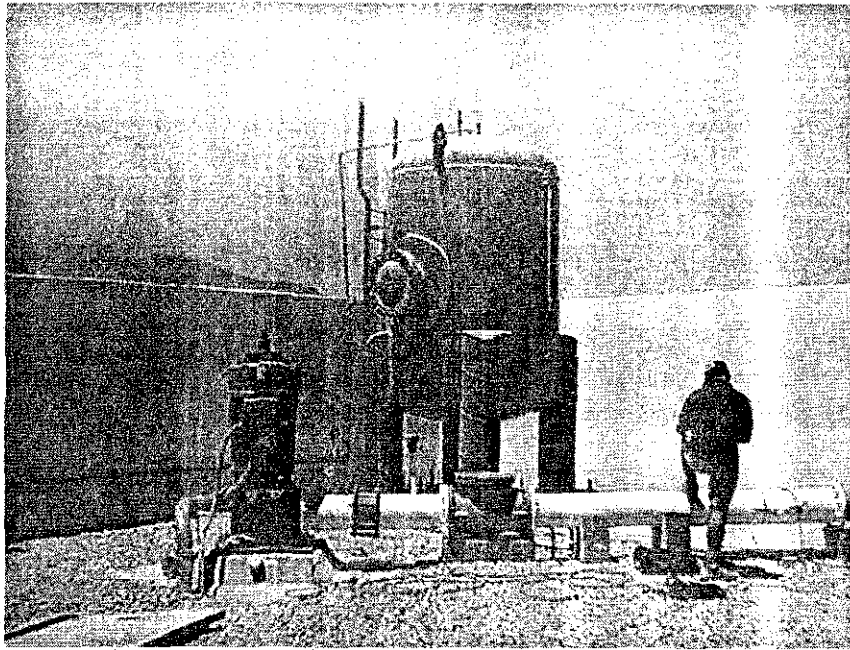


Fig. III.2 Equipo de bombeo y cámara de aire, Tepic, Nay.

### III.1 TORRE DE OSCILACIÓN

A partir del momento en que se presenta el corte de bombeo, el sistema de conducción puede modelarse a través de un esquema simplificado "torre de oscilación - tubería - tanque de entrega de nivel constante" (ver figura III.3). Las ecuaciones que modelan su comportamiento son: la ecuación de movimiento de la columna líquida

$$\frac{l}{gS} \frac{dQ}{dt} = h_1 - h_2 - kQQ \Rightarrow \frac{l}{gS} \frac{dQ}{dt} = \Delta h - \frac{\Delta h_0}{Q_0^2} |Q|Q \quad \dots \text{(III.1)}$$

y la ecuación de continuidad en la torre de oscilación

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{1}{A} Q \Rightarrow \frac{d}{dt}(\Delta h) = -\frac{1}{A} Q \quad \dots \text{(III.2)}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

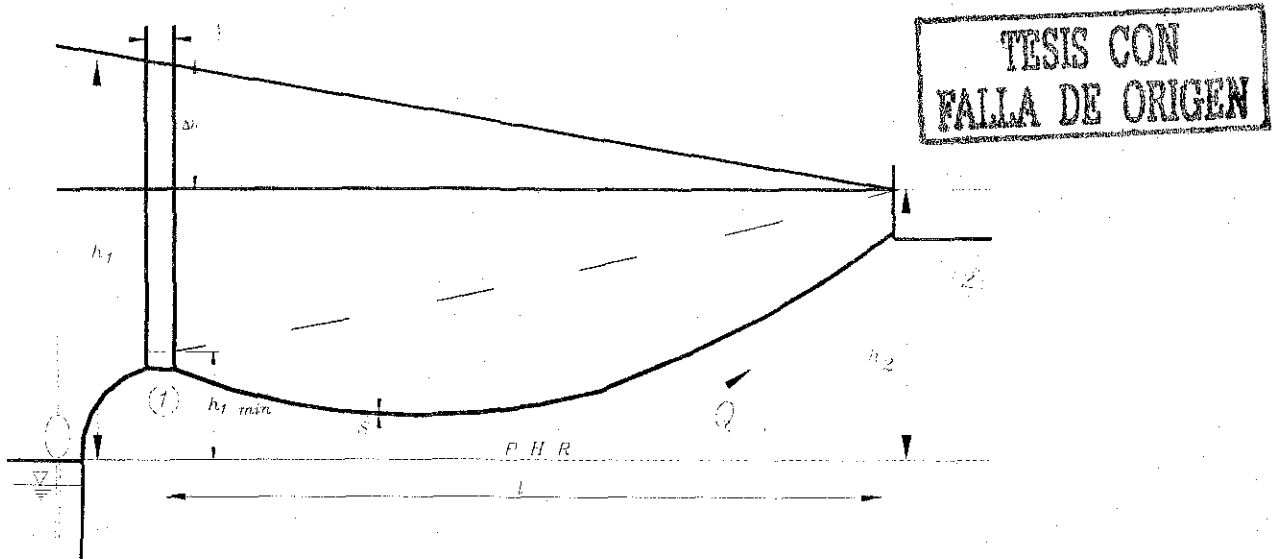


Fig. III.3 Torre de Oscilación

- donde
- A – sección transversal de la torre de oscilación,  $m^2$
  - Q – gasto volumétrico,  $m^3/s$
  - S – sección transversal de la conducción,  $m^2$
  - g – aceleración de la gravedad,  $m/s^2$
  - $h_1$  – carga piezométrica, referida a un plano horizontal de referencia, en la sección de conexión del dispositivo de control, m
  - $h_2$  – carga piezométrica, referida a un plano horizontal de referencia, en el tanque de entrega (carga constante), m
  - $\Delta h$  – diferencia de cargas piezométricas entre el dispositivo de control y el tanque de entrega, m
  - l – longitud de la conducción, m
  - t – tiempo, s
  - $Q_0$  – gasto volumétrico de referencia,  $m^3/s$
  - $\Delta h_0$  – diferencia de cargas piezométricas de referencia, entre el dispositivo de control y el tanque de entrega, m

### III.1.1 Formulación de variables adimensionales

Para el modelo de la torre de oscilación las variables empleadas son:  $Q_0$ ,  $\Delta h_0$ , l, A, S, Q, g,  $\Delta h$ , y t. En la tabla III.1 se presenta la clasificación de las variables (independientes o dependientes), su tipo (geométrica, cinemática o dinámica) y sus dimensiones:

	Variables independientes					Variables dependientes			
	$Q_0$	$\Delta h_0$	l	S	A	$\Delta h$	Q	g	t
Tipo	Cinemática	Dinámica	Geométrica			Dinámica	Cinemática		
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L	3	1	1	2	2	1	3	1	0
T	-1	0	0	0	0	0	-1	-2	1

Tabla III.1 Variables en la torre de oscilación

El número de variables dependientes es cuatro, por lo tanto, es posible formar cuatro parámetros adimensionales. Los productos adimensionales encontrados aplicando el teorema  $\Pi$  Buckingham son los siguientes:

$$\pi_1 = \frac{Q}{Q_0}$$

$$\pi_2 = \frac{\Delta h}{\Delta h_0}$$

$$\pi_3 = \frac{g \Delta h_0^2 S A}{l Q_0^2}$$

$$\pi_4 = \frac{Q_0 t}{A \Delta h_0}$$



En donde se tiene que:

$$q = \frac{Q}{Q_0} \quad (\text{Gasto adimensional})$$

$$z = \frac{\Delta h}{\Delta h_0} = \frac{h_1 - h_2}{h_{1,0} - h_2} \quad (\text{Diferencia de cargas adimensional})$$

$$T = \frac{g S t \Delta h_0}{Q_0 l} = \frac{g S h_{1,0} - h_2}{Q_0 l} t \quad (\text{T tiempo adimensional})$$

$$a = \frac{g \Delta h_0^2 S A}{l Q_0^2} = \frac{g S A (h_{1,0} - h_2)^2}{l Q_0^2} \quad (\text{Relación de energías})$$

donde  $h_{1,0}$  – carga piezométrica, referida a un plano horizontal de referencia, en la sección de conexión del dispositivo de control, previo al transitorio, m.

La deducción de los parámetros se presenta en el apéndice A.

### III.1.2 Fundamentos teóricos (aplicación de parámetros adimensionales)

Las ecuaciones que modelan el comportamiento de la torre de oscilación se simplifican escribiéndolas de manera adimensional a través de los parámetros adimensionales (III.4), de donde las ecuaciones (III.1) y (III.2) se reducen a la forma

$$\frac{dq}{dT} = z - q \quad \dots (III.5)$$

y

$$\frac{dz}{dT} = -\frac{q}{a} \quad \dots (III.6)$$



El parámetro "a" equivale al cociente de la energía potencial del agua acumulada en la torre de oscilación entre la energía cinética del flujo en la tubería. Considerando  $E_p = 0$  para  $h = h_2$ , se tiene:

$$a = \frac{\frac{1}{2} \gamma A (h_{1,0} - h_2)^2}{\frac{\gamma l S \left( \frac{Q_0}{S} \right)^2}{2g}} = \frac{\frac{1}{2} mg (h_{1,0} - h_2)}{\frac{1}{2} M u_0^2} = \frac{E_p}{E_c} \quad \dots (III.7)$$

donde

- m – masa del agua contenida en la torre, kg
- M – masa del agua que fluye por la tubería, kg
- $\gamma$  – peso específico del agua, N/m<sup>3</sup>
- $E_p$  – energía potencial, J
- $E_c$  – energía cinética, J

Entonces, el transitorio lento, después del corte de bombeo, al final del cual el nivel del agua en la torre se empata con el nivel en el tanque de entrega queda representado por las ecuaciones (III.5) y (III.6), con *a* como único parámetro. Es decir, cualquier combinación de longitud y diámetro de tubería, gradiente hidráulico y sección transversal de la torre queda representada por un valor de *a*.

### III.1.3 Solución numérica

El sistema de ecuaciones (III.5) y (III.6) es no lineal y puede resolverse con un esquema numérico simple. Ya que *z* representa el nivel del agua en la torre de oscilación,  $z_{min}$  representa el nivel mínimo que alcanzará el agua después de un disparo de bombas. En la figura III.4 se muestra la variación del nivel del agua en la torre de oscilación en función de *T* para distintos valores de *a*.

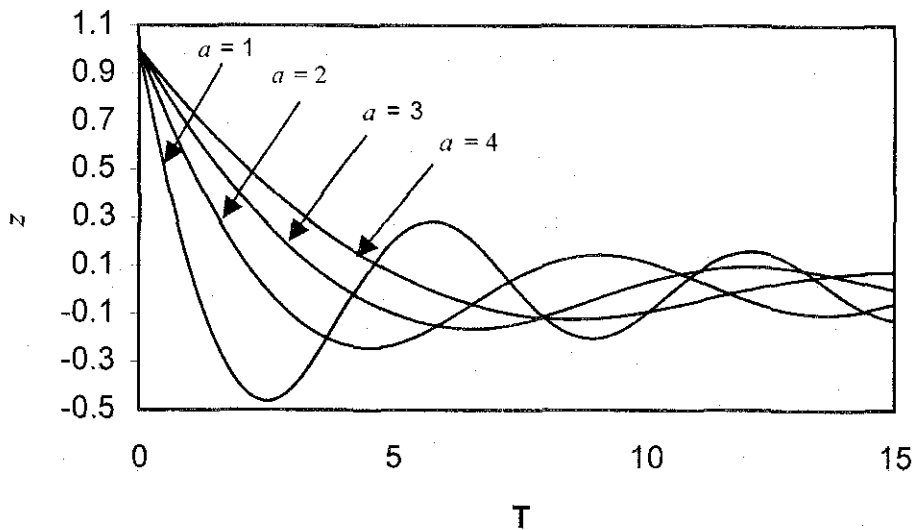
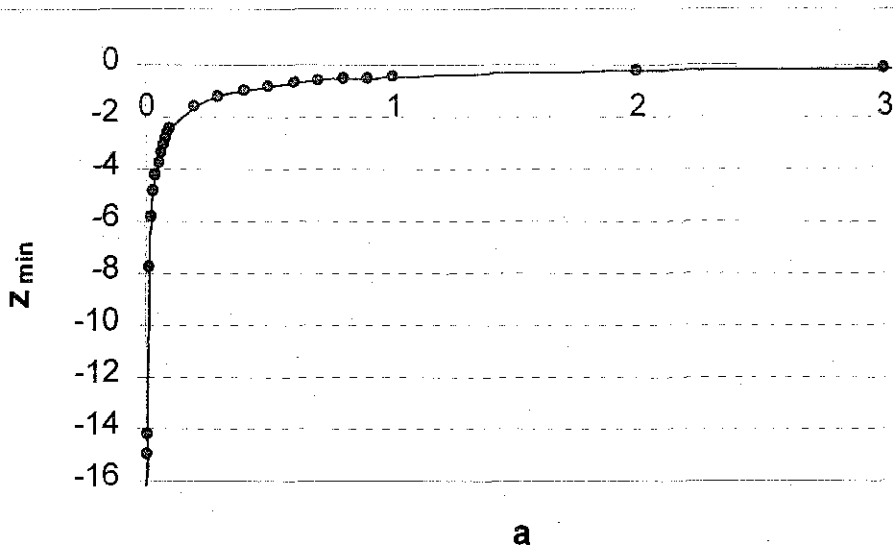


Fig. III.4 Variación temporal del nivel del agua en la torre para diferentes valores del parámetro *a*

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Se observa que el nivel mínimo alcanzado por el agua en la torre de oscilación depende del parámetro  $a$ , tal como se muestra en la figura III.5.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig. III. 5 Parámetro  $a$  en función del nivel mínimo del agua

En la figura III.5 se muestra la forma de la relación entre  $a$  y  $-z_{min}$ .

La curva mostrada en la figura III.5 queda bien representada por la ecuación (III.8).

$$a = 0.54175962(0.875282)^{-z_{min}} (-z_{min})^{-0.9825837} \quad \dots \text{(III.8)}$$

con un coeficiente de correlación de  $r = 0.99$

#### III.1.4 Cálculo del área de la torre de oscilación mediante el método propuesto

La sección de la torre de oscilación es función directa de  $a$ . Si se despeja de ecuación (III.7) para  $A$ , resulta

$$A = \frac{lQ_0^2}{gS(h_{10} - h_2)^2} a \quad \dots \text{(III.9)}$$

Se observa que  $A$  crece con la longitud y con el cuadrado del gasto y disminuye con la sección de la tubería y con la cantidad de agua almacenada en la torre, representada por el cuadrado de la diferencia de elevación del agua entre la torre y el tanque de entrega.

Elegido el valor mínimo permitido para  $z_{min}$  de la ecuación (III.8) se obtiene el valor de  $a$ . Así, por ejemplo, si  $z_{min} = -0.5$ , es decir, si el nivel mínimo del agua permitido en la torre de oscilación, por debajo del nivel del agua en el tanque de entrega, es el 50% del nivel inicial en la torre por encima del nivel del agua en el tanque de entrega (ver figura III.6), entonces  $a$  valdrá 0.916. Con las características particulares de la conducción y la ecuación (III.9) se obtiene el área de la torre de oscilación.

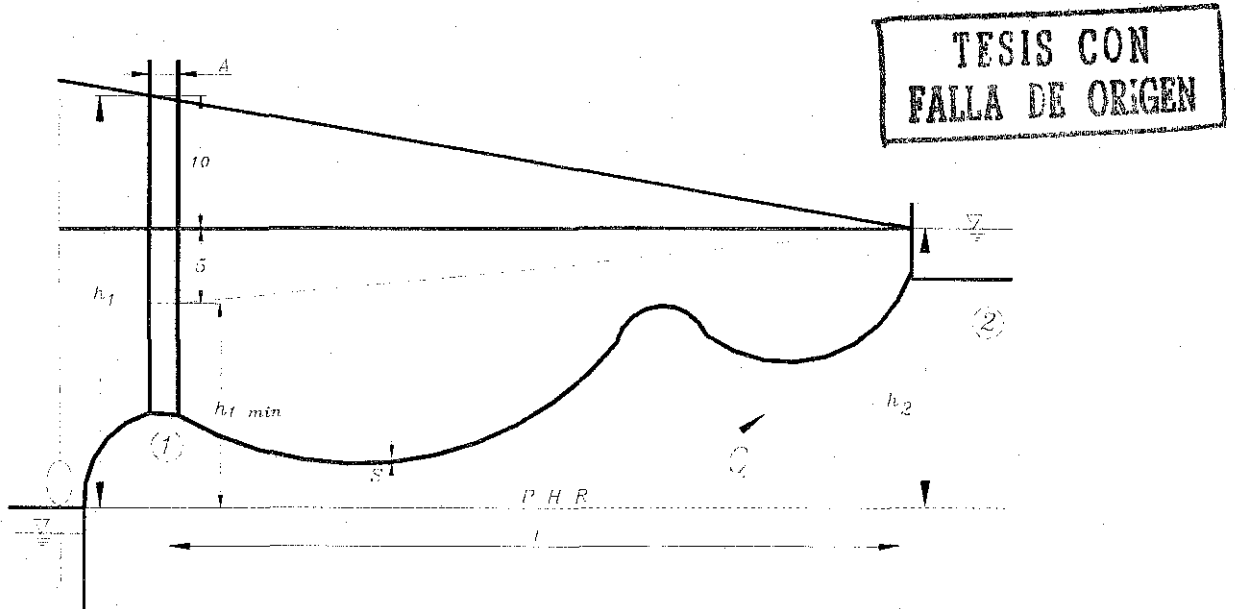


Fig. III.6 Representación del parámetro  $z_{min} = -0.5$

El procedimiento para la obtener el área de la torre de oscilación con el método se describe en tres pasos:

1. Elegir el valor mínimo permitido del  $z_{min}$  para evitar la presencia de presiones negativas a lo largo de la conducción
2. Obtener de la ecuación (III.8) el valor de  $a$

$$a = 0.54175962(0.875282)^{-z_{min}} (-z_{min})^{-0.982583}$$

3. Con la ecuación (III.9), estimar, directamente, el área de la torre de oscilación  $A$

$$A = \frac{lQ_0^2}{gS(h_{10} - h_2)^2} a$$

### III.2 CAMARAS DE AIRE

El transitorio lento con cámaras de aire debe modelarse con un sistema de ecuaciones que considere, además del cociente de la energía potencial almacenada en el dispositivo de control entre la energía cinética en la conducción, representado por el parámetro  $\alpha$ , la variación de la presión sobre la superficie libre del agua que depende de la expansión y compresión del aire contenido en la cámara. La figura III.7 muestra un esquema de un acueducto con cámara de aire como dispositivo de control ante transitorios hidráulicos.

En este caso, las ecuaciones que modelan un transitorio lento son:

$$\frac{l}{gS} \frac{dQ}{dt} = h_1 - h_2 - k|Q|Q = \Delta h - \frac{\Delta h_0}{Q_0^2} |Q|Q \quad \dots \text{(III.1)}$$

$$pV^\alpha = p_0V_0^\alpha \quad \dots \text{(III.10)}$$

$$\frac{dV}{dt} = Q \quad \dots \text{(III.11)}$$

$$h_1 = \frac{p}{\gamma} - \frac{p_{atm}}{\gamma} + y \quad \dots \text{(III.12)}$$

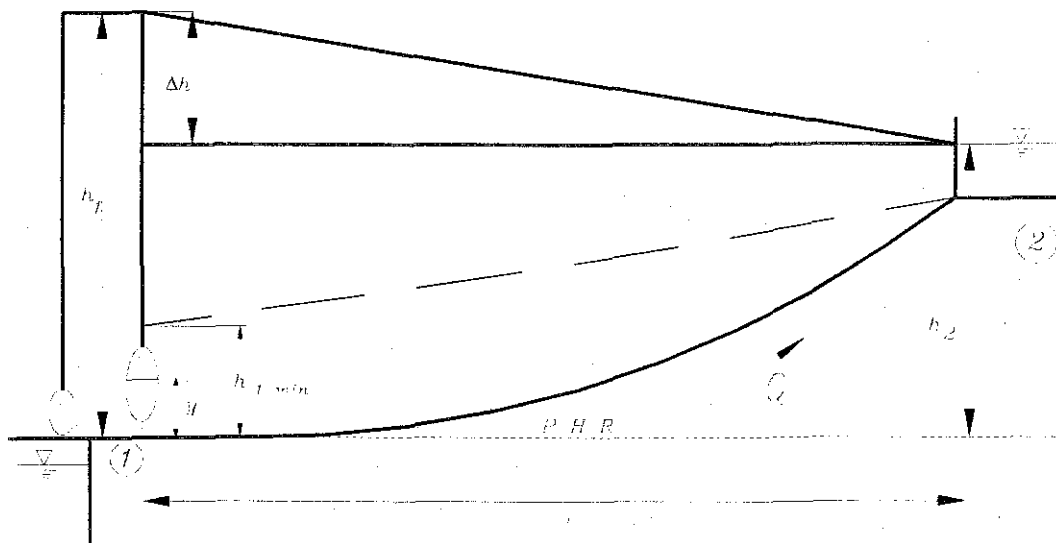


Fig. III.7 Cámara de aire

- donde
- $V$  – volumen de aire,  $m^3$
  - $y$  – nivel del espejo de agua dentro de la cámara, referida a un plano horizontal de referencia,  $m$
  - $p$  – presión absoluta,  $N/m^2$
  - $p_{atm}$  – presión atmosférica,  $N/m^2$
  - $\alpha$  – coeficiente politrópico ( $\alpha = 1.2$ )
  - $\gamma$  – peso específico del agua,  $N/m^3$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$V_0$  – volumen inicial de aire, o de referencia.  $m^3$   
 $p_0$  – presión absoluta de referencia.  $N/m^2$   
 $p_f$  – presión absoluta final,  $N/m^2$

III.2.1 Formulación de variables adimensionales

Para el modelo de las cámaras de aire las variables empleadas son:  $Q_0, \Delta h_0, l, S, P_0, V_0, Q, \Delta h, V, P, P_f, \gamma, g$ , y  $t$ . En la tabla III.2 se presenta la clasificación de las variables (independientes o dependientes), su tipo (geométrica, cinemática o dinámica) y sus dimensiones:

	Variables independientes						Variables dependientes							
	$Q_0$	$P_0$	$\Delta h_0$	$l$	$S$	$V_0$	$Q$	$g$	$t$	$\Delta h$	$P$	$P_f$	$\gamma$	$V$
Tipo	Cinemática		Dinámica	Geométrica			Cinemática			Dinámica			Geométrica	
M	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
L	3	-1	1	1	2	3	3	1	0	1	-1	-1	-2	3
T	-1	-2	0	0	0	0	-1	-2	1	0	-2	-2	-2	0

Tabla III.2 Variables de las cámaras de aire

De la tabla se observa que se tienen ocho variables dependientes, por lo tanto, se pueden formar ocho productos adimensionales. Los productos adimensionales encontrados, aplicando el teorema II Buckingham para el caso de las cámaras de aire, son los siguientes

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{Q}{Q_0} & \pi_2 &= \frac{\Delta h}{\Delta h_0} \\ \pi_3 &= \frac{V}{V_0} & \pi_4 &= \frac{P}{P_0} \\ \pi_5 &= \frac{P_0}{P_f} & \pi_6 &= \frac{\gamma l}{P_0} \\ \pi_7 &= \frac{Q_0^2}{gS V_0} & \pi_8 &= \frac{Q_0 \Delta h_0 t}{l V_0} \end{aligned}$$



En donde, se pueden escribir las siguientes variables adimensionales:

$$\begin{aligned} q &= \frac{Q}{Q_0} && \text{(Gasto adimensional)} \\ z &= \frac{\Delta h}{\Delta h_0} = \frac{h_1 - h_2}{h_{1,0} - h_2} && \text{(Diferencia de cargas adimensional)} \\ T &= \frac{g S t \Delta h_0}{Q_0 l} = \frac{g S h_{1,0} - h_2 t}{Q_0 l} && \text{(Tiempo adimensional)} \end{aligned}$$

$$v = \frac{V}{V_0} \quad (\text{Volumen adimensional})$$

$$\hat{p} = \frac{P}{P_0} \quad (\text{Presión adimensional})$$

$$r = \frac{P_0}{P_f} \quad (\text{Relación de presiones})$$

$$a = \frac{P_0}{\gamma l} \frac{g S V_0}{Q_0^2} \Rightarrow a = \frac{P_0 V_0}{\gamma l Q_0^2 / 2 g S} \quad (\text{Relación de energías})$$

La deducción de los parámetros se presenta en el apéndice B.

### III.2.2 Fundamentos teóricos (aplicación de parámetros adimensionales)

Si se consideran las variables adimensionales de gasto, diferencia de cargas y tiempo, la ecuación (III.10) se transforma en:

$$\hat{p} v^a = 1 \quad \dots \text{(III.13)}$$

la ecuación (III.12) en:

$$z = \hat{p} + \frac{\hat{p} - 1}{r - 1} \quad \dots \text{(III.14)}$$

y la ecuación (III.11) en:

$$\frac{dv}{d\Gamma} = \frac{2}{P_0 V_0 \left(1 - \frac{1}{r}\right)} \left( \gamma l \frac{Q_0^2}{2 g S} \right) q \quad \dots \text{(III.15)}$$

en la que el segundo paréntesis representa la energía cinética del agua en la tubería y el primer factor está relacionado con el trabajo requerido para comprimir el aire desde  $V_f$  hasta  $V_0$ .

Por definición

$$E_p = -W = - \int_{V_f}^{V_0} p dV \quad \dots \text{(III.16)}$$

por lo que



$$E_p = p_0 V_0 \frac{\left(\frac{p_0}{p_i}\right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} - 1}{1-\alpha}$$



de donde

$$p_0 V_0 = R E_p \quad \dots \text{(III.17)}$$

con

$$R = \frac{1-\alpha}{r^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} - 1} \quad \dots \text{(III.18)}$$

Si se sustituye en la ecuación (III.15) resulta

$$\frac{dv}{d\Gamma} = \frac{2}{R \left(1 - \frac{1}{r}\right) a} q \quad \dots \text{(III.19)}$$

con la inclusión del parámetro de relación de energías:

$$a = \frac{E_p}{E_c} = \frac{P_0 V_0}{\gamma l Q_0^2 / 2gS} \quad \dots \text{(III.20)}$$

En resumen, el sistema de ecuaciones adimensionales que modela un transitorio lento en un acueducto con cámaras de aire está formado por las ecuaciones (III.5), (III.19), (III.13) y (III.14) con los parámetros,  $\alpha$  (coeficiente politrópico),  $a$  (relación de energía potencial a energía cinética) y  $r$  (relación de compresión inicial del aire en las cámaras).

### III.2.3 Solución numérica

De la solución numérica de este sistema de ecuaciones se obtiene la variación del parámetro  $a$  en función de la presión mínima permitida ( $z_{min}$ ) en la conexión de la cámara con la línea principal. Los resultados de la solución numérica se presentan gráficamente en la figura III.8 para distintos valores de  $r$  y  $\alpha = 1.2$ .

Se observa que la variación de  $a$  respecto de  $-z_{min}$  tiene una forma similar al caso de la torre de oscilación, sin embargo, para las cámaras de aire es necesario ajustar una curva de la forma

$$a = bc^{-z_{min}} (-z_{min})^d \quad \text{para cada valor de } r$$

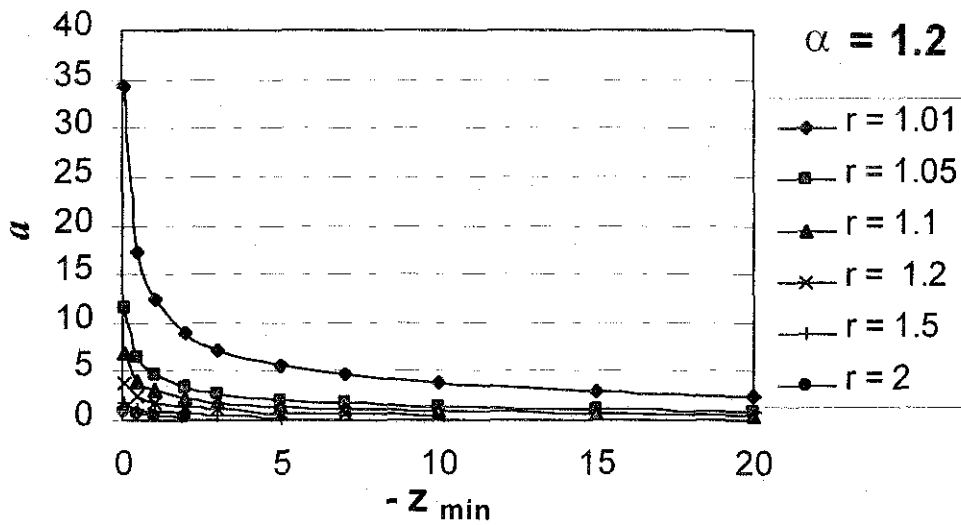


Fig. III.8 Variación del parámetro  $a$  en función de  $-z_{min}$

### III.2.4 Solución propuesta

Para ajustar una función analítica a la variación de  $a$  respecto de  $z_{min}$ , se propone una solución de la ecuación (III.5) de la forma:

$$q(T) = e^{-T} \cos(\Omega T) \quad \dots (III.21)$$

Derivando (III.21) respecto a  $T$ , se tiene:

$$\frac{dq}{dT} = -e^{-T} [\cos(\Omega T) + \Omega \text{sen}(\Omega T)] \quad \dots (III.22)$$

e integrando la ecuación (III.19), resulta:

$$v(T) = K \int q(\xi) d\xi = 1 + \frac{K}{1 + \Omega^2} \{1 + e^{-T} [\Omega \text{sen}(\Omega T) - \cos(\Omega T)]\} \quad \dots (III.23)$$

con

$$v(0) = 1$$

y

$$K = \frac{2}{R \left(1 - \frac{1}{r}\right) a} \quad \dots (III.24)$$



Después de la pérdida de presión en la conducción principal, la expansión del volumen de aire en las cámaras alcanza su valor máximo cuando el gasto que entregan se hace cero. En ese instante, la presión y la piezométrica en el punto de conexión con el acueducto son mínimas. Por lo tanto:

$$q(T^*) = 0 \Rightarrow \cos(\Omega T^*) = 0 \Rightarrow \Omega T^* = \frac{\pi}{2} \quad \dots (III.25)$$

Entonces, para

$$T = T^* \text{ se tiene que } v = v_{\max} \quad \hat{p} = \hat{p}_{\min} \quad \text{y} \quad z = z_{\min} \quad \dots (III.26)$$

Si se sustituyen (III.25) y (III.26) en (III.5) se tiene:

$$T^* e^{T^*} = -\frac{\pi}{2z_{\min}} \quad \dots (III.27)$$

Por otro lado, con (III.25) y (III.26) en (III.23):

$$v_{\max} = 1 + \frac{K}{1 + \frac{\pi^2}{4(T^*)^2}} \left( \frac{\pi e^{-T^*}}{2T^*} + 1 \right)$$

De (III.15) y (III.16) se obtiene:

$$v_{\max} = \frac{1}{P_{\min}^{1/\alpha}} = \frac{1}{\left[ z_{\min} + \frac{1 - z_{\min}}{r} \right]^{1/\alpha}}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

De la igualación y solución las dos últimas ecuaciones para  $K$  resulta:

$$K = \frac{1 + \left( \frac{\pi}{2T^*} \right)^2}{1 - z_{\min}} \left[ \frac{1}{\left( z_{\min} + \frac{1 - z_{\min}}{r} \right)^{1/\alpha}} - 1 \right] \quad \dots (III.28)$$

Finalmente, si se resuelve la expresión (III.24) para  $\alpha$ , resulta:

$$\alpha = \frac{2}{R \left( 1 - \frac{1}{r} \right) K} \quad \dots (III.29)$$

En la figura III.9 se muestra la relación entre el valor del parámetro  $a^*$  obtenido a través de la solución propuesta (ecuación III.29) y del parámetro  $a$  resultado de la solución numérica del sistema de ecuaciones (III.5), (III.19), (III.15) y (III.16), en ambos casos, cuando se ha fijado un valor para  $z_{min}$ .

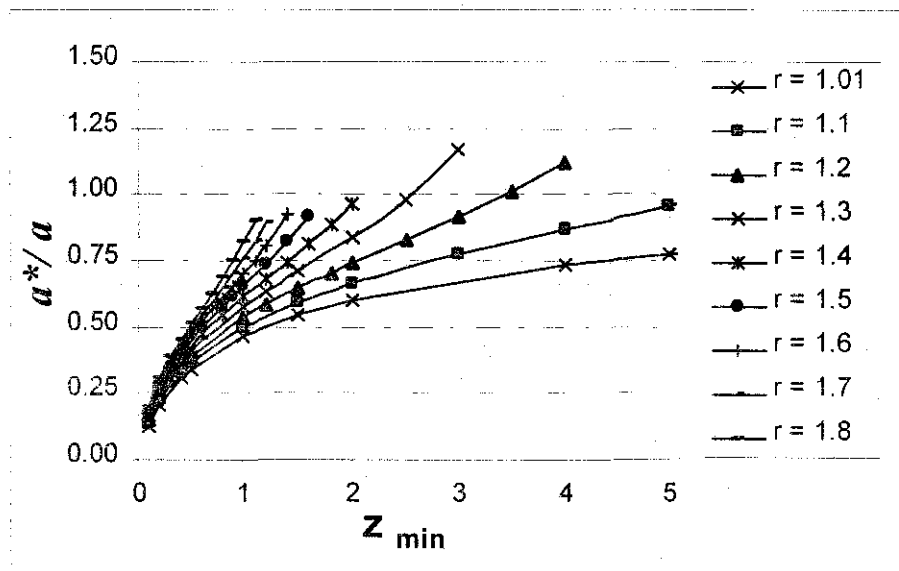


Fig. III.9 Relación entre  $z_{min}$  y el cociente de los parámetros  $a^*$  (método propuesto) y  $a$  (solución numérica)

Esta relación queda bien representada por una ecuación de la forma

$$\frac{a^*}{a} = f(r) \left[ -Z_{min}^{g(r)} \right] \quad \dots (III.30)$$

donde  $f(r)$  y  $g(r)$  son polinomios de 4º cuyas expresiones y gráficas se muestran a continuación.

$$f(r) = 0.038149r^4 - 0.497170r^3 + 1.624898r^2 - 1.525450r + 0.804374 \quad \dots (III.31)$$

$$g(r) = -2.428810r^4 + 15.288723r^3 - 36.070600r^2 + 37.970545r - 14.494640 \quad \dots (III.32)$$



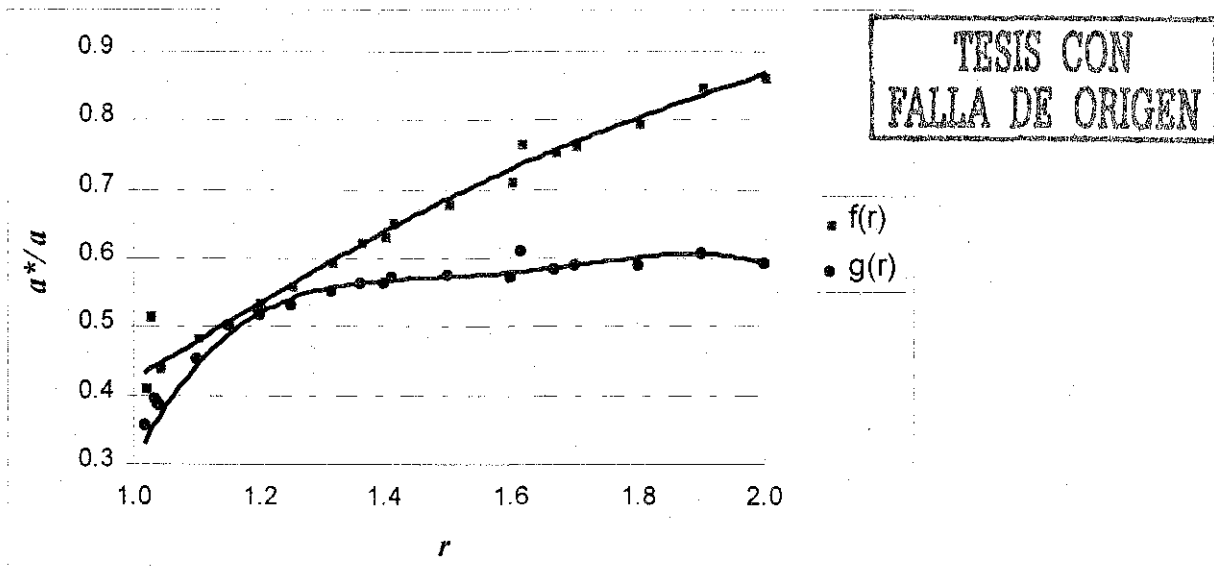


Fig. III.9 Gráficas de las funciones  $f(r)$  y  $g(r)$

Las funciones  $f(r)$  y  $g(r)$  permiten obtener una solución analítica con muy buena precisión en el cálculo del volumen inicial de aire en las cámaras donde el parámetro  $a$  está dado por la expresión:

$$a = \frac{2}{R \left(1 - \frac{1}{r}\right) K f(r) \left(-z_{mn}^{g(r)}\right)} \quad \dots \text{(III.33)}$$

Para estimar el volumen de agua que ingresa a la línea de conducción proveniente de la cámara de aire es necesario restar al volumen máximo del aire el volumen inicial de este, esto es:

$$V_w = V_{\max} - V_0 \quad \dots \text{(III.34)}$$

De la ecuación de estado del gas se obtiene una expresión para el volumen máximo:

$$V_{\max} = \left(\frac{P_0}{P_{\min}}\right)^{1/\alpha} V_0 \quad \dots \text{(III.35)}$$

Por lo tanto, si se sustituye (III.35) en (III.34), se tiene una expresión para estimar el volumen de agua:

$$V_w = V_0 \left[ \left(\frac{P_0}{P_{\min}}\right)^{1/\alpha} - 1 \right] \quad \dots \text{(III.36)}$$

III.2.5 Cálculo de volúmenes de cámaras de aire aplicando el método propuesto

El método propuesto se aplicó en los siguientes acueductos mexicanos, los cuales tienen la característica de tener cámaras de aire entre sus estructuras de control de transitorios. Cada tramo de bombeo queda representado por el parámetro  $r$  como se indica en la tabla III.3.

En la tabla III.4 se muestran los volúmenes de las cámaras de aire necesarios para mantener una carga mínima fijada de antemano ( $z_{min}$ ) durante la falla del bombeo en una conducción obtenidos con el método propuesto y se comparan con los volúmenes de aire necesarios para mantener esa carga según el método de las características.

Acueducto	$r$
Papagayo II	1.013
Los Cabos	1.033
Ciudad Victoria, rebompeo 2	1.035
Ciudad Victoria, rebompeo 1	1.040
Guadalajara	1.049
El Cuchillo-Monterrey, pb4	1.147
El Cuchillo-Monterrey, pb3	1.196
El Cuchillo-Monterrey, pb1	1.247
El Cuchillo-Monterrey, pb2	1.312
El Cuchillo-Monterrey, pb0	1.359
Veracruz*	1.519
Chetumal*	1.693

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tabla III.3 Clasificación de las plantas de bombeo según el valor del parámetro  $r$

\* celeridades muy bajas

$r$	$z_{min}$	Método propuesto (volúmenes en $m^3$ )			Método de las características (volúmenes en $m^3$ )			Diferencia (volumen total) %
		aire	agua	total	aire	agua	total	
1.013	-46.668	5.692	6.404	12.096	6.612	6.855	13.467	-10
1.033	-15.096	3.239	2.720	5.959	3.400	2.644	6.044	-1
1.035	-10.327	16.336	7.967	24.303	18.201	6.653	24.854	-2
1.040	-8.479	21.707	9.789	31.496	21.00	9.089	30.089	5
1.049	-11.416	65.511	68.351	133.862	70.00	59.336	129.336	3
1.147	-5.616	21.303	80.143	101.446	24.00	73.640	97.640	4
1.196	-4.387	21.500	105.39	126.890	35.00	97.009	132.009	-4
1.247	-3.823	9.099	110.509	119.679	20.00	102.910	122.91	-3
1.312	-2.735	25.932	135.558	161.490	45.00	133.123	178.123	-9
1.359	-2.407	30.326	175.360	205.686	52.00	168.382	220.382	-7
1.519*	-0.888	3.025	4.142	7.167	2.080	2.435	4.515	59
1.693*	-0.665	7.066	11.272	18.338	8.561	12.053	20.614	-11

Tabla III.4 Comparación de volúmenes de las cámaras obtenidos con el método propuesto y con el método de las características

De los resultados mostrados en la tabla III.4 se observa que el método propuesto arroja diferencias tan solo del 10% en el cálculo del volumen de las cámaras de aire comparado con los volúmenes obtenidos con el método de las características. Excepto para el caso del acueducto de Veracruz, este acueducto está formado por tubería de PVC por lo que la celeridad de la onda de depresión tiene un valor muy bajo (170 m/s). En este caso la hipótesis de que el transitorio se considere demasiado lento y pueda ser representado como el movimiento de una columna rígida no se está cumpliendo.

Otro caso en donde la hipótesis está lejos de cumplirse es en el acueducto Chetumal, en donde la celeridad de la onda de depresión varía de 230 a 980 m/s. Para las cámaras de este acueducto la diferencia en el volumen estimado es del 11 % respecto del volumen calculado con el método de las características.

El algoritmo para el cálculo del volumen inicial de aire es el siguiente:

1. Se fija  $z_{min}$  y se calcula  $r$
2. De la ecuación (III.18) se obtiene el valor de  $R$

$$R = \frac{1 - \alpha}{r^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} - 1}$$

3. De la ecuación (III.27) se obtiene implícitamente el valor de  $T^*$

$$T^* e^{r^*} = -\frac{\pi}{2z_{min}}$$

4. Se calcula el valor de  $K$  con la ecuación (III.28)

$$K = \frac{1 + \left(\frac{\pi}{2T^*}\right)^2}{1 - z_{min}} \left[ \frac{1}{\left(z_{min} + \frac{1 - z_{min}}{r}\right)^{1/\alpha}} - 1 \right]$$

5. Se encuentra los valores de  $f(r)$  y de  $g(r)$  con (III.31) y (III.32)

$$\begin{aligned} f(r) &= 0.038149r^4 - 0.47917r^3 - 1.624898r^2 - 1.5254r + 0.804 \\ g(r) &= 2.42881r^4 + 15.288723r^3 - 36.0706r^2 + 37.970545r - 14.5 \end{aligned}$$

6. Se obtiene el valor de  $a$  de (III.33)

$$a = \frac{2}{R \left(1 - \frac{1}{r}\right) K f(r) \left(-z_{min}^{g(r)}\right)}$$



7. Se encuentra la energía cinética

$$E_c = \frac{\gamma l Q_0^2}{2gS}$$



8. Se calcula el volumen inicial como

$$V_0 = \frac{aE_c}{P_0}$$

9. De la ecuación (III.35), se estima la cantidad de agua que ingresa a la cámara:

$$V_w = V_0 \left[ \left( \frac{P_0}{P_{\min}} \right)^{1/\alpha} - 1 \right]$$

10. Finalmente, se calcula el volumen total de las cámaras de aire como la suma del volumen de agua mas el volumen inicial de aire, es decir:

$$V_T = V_0 + V_w$$

### III.2.5 Comparación del método propuesto contra métodos convencionales de diseño

En la tabla III.5 se presentan los resultados del cálculo de los volúmenes totales de las cámaras para los diferentes acueductos en estudio.

Acueducto	V <sub>T</sub> (m <sup>3</sup> )				
	Parmakian	Horlacher	Ruus (Chaudhry)	Método Características	Método Propuesto
Papagayo	18.497	22.196	22.196	13.467	12.096
Cd. Victoria 1	39.409	35.643	51.854	30.089	31.496
Cd. Victoria 2	33.905	22.423	21.850	24.854	24.303
El Cuchillo pb4	118.900	228.287	129.091	97.640	101.446
El Cuchillo pb3	180.470	375.377	216.563	132.009	126.890
El Cuchillo pb2	239.661	418.317	261.448	178.123	161.490
El Cuchillo pb1	371.711	606.633	327.106	122.910	119.608
El Cuchillo pb0	523.458	319.786	437.802	220.382	205.686
Chetumal	17.256	10.354	16.178	20.614	18.338
Guadalajara	198.376	208.269	156.202	129.336	133.862
Veracruz	9.041	9.747	5.584	4.515	7.167
Los Cabos	7.096	8.110	7.029	6.044	5.959

Tabla III.5 Volúmenes totales

En la tabla III.6 se presentan diferencias porcentuales de los resultados obtenidos con los métodos de Parmakian, Graze – Horlacher, Ruus y el aquí propuesto, contra los valores estimados con el método de las características.

Acueducto	Diferencia (%)			
	Parmakian	Horlacher	Ruus (Chaudhry)	Método Propuesto
Papagayo	37%	65%	65%	10%
Cd. Victoria 1	31%	18%	72%	5%
Cd. Victoria 2	36%	10%	12%	2%
El Cuchillo pb4	22%	134%	32%	4%
El Cuchillo pb3	37%	184%	64%	4%
El Cuchillo pb2	35%	135%	47%	9%
El Cuchillo pb1	202%	394%	166%	3%
El Cuchillo pb0	138%	45%	99%	7%
Chetumal	16%	50%	22%	11%
Guadalajara	53%	61%	21%	3%
Veracruz	100%	116%	24%	59%
Los Cabos	17%	34%	16%	1%
<b>Promedio</b>	<b>60%</b>	<b>104%</b>	<b>53%</b>	<b>10%</b>

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

**Tabla III.6 Diferencias porcentuales en el cálculo del volumen total de las cámaras**

Los mejores resultados se obtienen con el método de Ruus E. para la estimación del volumen inicial de aire en las cámaras, mientras que el método analítico que aquí se presenta permite obtener los mejores volúmenes totales de las cámaras.

De la tabla III.6 se observa que el método propuesto presenta una diferencia, en promedio, tan sólo del 10% en el cálculo del volumen total de las cámaras de aire. Con las gráficas de Ruus E. se tiene una diferencia del 53%, en promedio. Con el método de Graze – Horlacher es de 104% y, finalmente, con los ábacos de Parmakian se tienen diferencias del orden de 60%.

El método de Parmakian tiene el inconveniente de ser un método gráfico en el que se pueden cometer errores en las lecturas de los coeficientes. Además, se debe seleccionar una de las gráficas mediante el valor de cierto parámetro  $K$  (parámetro de fricción), sin embargo, solo se tienen gráficas para  $K$  igual a 0, 0.3, 0.5, y 0.7. Es difícil leer los valores para los cuales no se tenga una línea en el gráfico. Por ejemplo, solo se tienen valores de  $2\rho^*$  (parámetro asociado a la tubería) para 1, 2 y 4; para valores dentro del intervalo  $1 < 2\rho^* < 4$  se tiene que interpolar, y para valores fuera de él se debe extrapolar. La relación entre la máxima depresión y la carga normal de operación sólo proporciona información para valores de hasta - 0.6, pero para cocientes inferiores no se cuenta con más información. Finalmente, los valores mínimo y máximo del coeficiente ( $2 V_0 a / Q_0 L$ ) son de 2 y 80, respectivamente.

El método Graze y Horlacher también es un método gráfico y presenta una problemática similar a la del método de Parmakian. Para el parámetro  $\Delta h_f$  (parámetro de fricción) sólo hay valores de 0, 0.05, 0.1, 0.2 y 0.5, debiendo aproximarse para valores intermedios. El coeficiente  $h'_0$  (carga absoluta inicial en la cámara entre la sobrepresión de Joukousky) está sólo graficado para algunos casos y si el valor calculado analíticamente no coincide con ellos se debe interpolar o bien extrapolar, según se requiera. En algunos casos las curvas se vuelven asíntotas a los ejes y se dificulta la lectura de los coeficientes. La relación entre la depresión máxima y la sobrepresión de Joukousky proporciona información hasta -0.8.

La gráfica de Ruus E, que presenta Chaudry, presenta una problemática similar a las descritas en los métodos anteriores. Los valores del parámetro característico de la tubería  $2\rho^*$  son de 0.1 y hasta 0.8, en intervalos de 0.1. Los valores mínimo y máximo del coeficiente  $(2 V_0 a / Q_0 L)$  son de 2 y 100, respectivamente. Los valores del parámetro asociado a la fricción son de 0.0, 0.3, 0.6, 1 y 2.

El método propuesto en este trabajo es un método analítico que presenta una mayor sencillez en comparación con el resto de los métodos y es el que tiene una mejor aproximación al volumen total de las cámaras. Este método no presenta tantas dificultades como en los mencionados anteriormente, dado que los valores de los distintos parámetros se sustituyen directamente en fórmulas, y no se hacen redondeos o ajustes que puedan influir en la obtención del volumen de las cámaras.



## ***IV. Aplicación práctica***

Como ejemplo de aplicación del método propuesto, se seleccionaron los acueductos Río Colorado – Tijuana y El Cuchillo – Monterrey, para obtener la sección transversal de las torres de oscilación y el volumen de las cámaras, respectivamente.

### **IV.1 TORRES DE OSCILACIÓN**

#### ***IV.1.1 Descripción del acueducto Río Colorado - Tijuana***

El acueducto Río Colorado – Tijuana, ubicado en el estado de Baja California, entrega agua a la ciudad de Tijuana, teniendo como fuente de abastecimiento el Río Colorado (ver figura IV.1). El agua es conducida por canales a través del Valle de Mexicali, hasta el cárcamo de la primera planta de bombeo (PB0). El acueducto en tubería a presión tiene una longitud total del 112.7 km, incluyendo dos túneles. El gasto de diseño es de 4 m<sup>3</sup>/s y la carga dinámica total de 1136 m es proporcionada por seis plantas de bombeo.

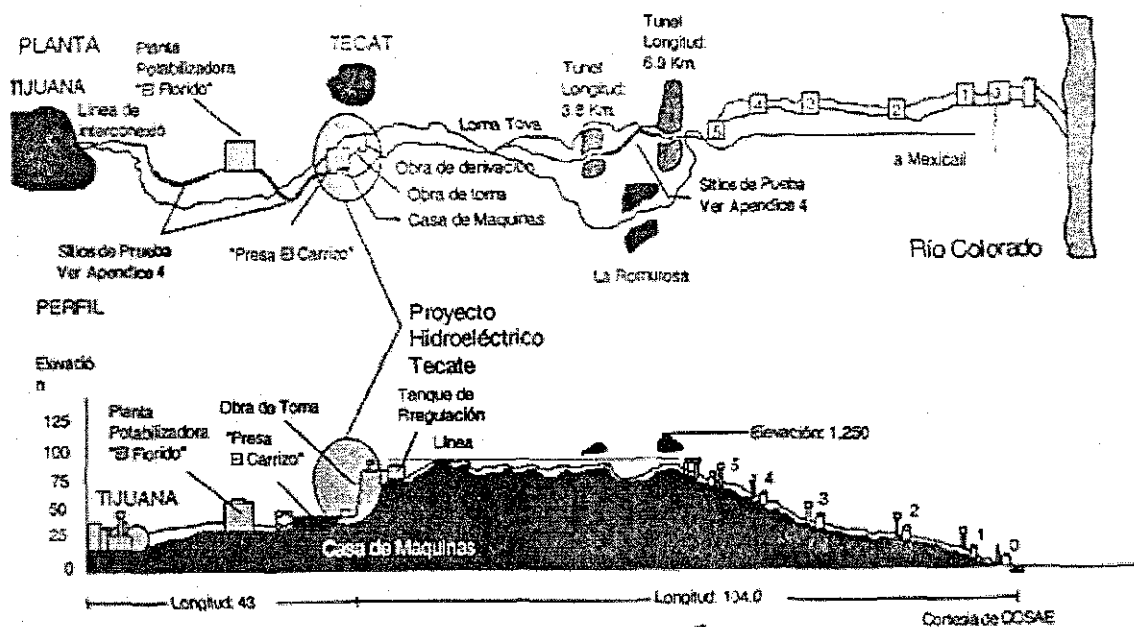


Fig. IV.1 Esquema del acueducto Río Colorado - Tijuana

El acueducto cuenta con los siguientes equipos por planta de bombeo: PB 0, con 4 motobombas de eje vertical de 1, 500 HP, para  $1.33 \text{ m}^3/\text{s}$  y altura de bombeo de 53.6 m; PB 1, PB 2 y PB 3 con 4 motobombas de eje vertical de 3, 000 HP, de un paso, para  $1.33 \text{ m}^3/\text{s}$  y altura de 140 m, y finalmente; PB 4 y PB 5 con 4 motobombas de eje horizontal de 8, 000 HP, de dos pasos, para  $1.33 \text{ m}^3/\text{s}$  y altura de bombeo de 345 m. La capacidad nominal de  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  se obtiene con un arreglo de tres bombas en operación más una de respaldo.

El agua del Río Colorado es captada y conducida por una canal abierto hasta el cárcamo de succión ubicado en la planta de bombeo N° 0 (PB0), esta planta descarga en el tanque de sumergencia de la planta N° 1 (PB 1), que a su vez descarga en el tanque de sumergencia de la PB2 y así, sucesivamente, hasta que la última planta (PB5) bombea el agua hacia la torre de oscilación N° 5 (TO5) y desde ahí el agua es conducida por gravedad, pasando por los túneles 2 y 3 hasta descargar libremente en el arroyo "El Carrizo". El agua escurre hasta llegar a la presa "El Carrizo", ubicada a 16 Km al suroeste de la ciudad de Tecate. Desde la presa el agua es conducida por gravedad hacia la planta potabilizadora "El Florido", ya que muy cerca de la ciudad de Tijuana.

Aunque este punto constituye el sitio de entrega en bloque del Acueducto, todavía desde la planta potabilizadora el agua es conducida hacia el tanque Aguaje de la Tuna y finalmente desde ahí es distribuida a la ciudad de Tijuana.

El acueducto tiene instaladas tuberías de acero de 54 y 48 in, en algunos tramos de la conducción se cuenta con tuberías de concreto de 54 y 72 in y en la parte a gravedad el agua es conducida a través de los túneles 1 y 2.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En su tramo a bombeo, aproximadamente 43 km. el acueducto cuenta con torres de oscilación (TO) y tanques unidireccionales (TU) como dispositivos de control para las depresiones y sobrepresiones ocasionadas por corte de bombeo. En la figura IV.2 se muestran sus ubicaciones en el arreglo.

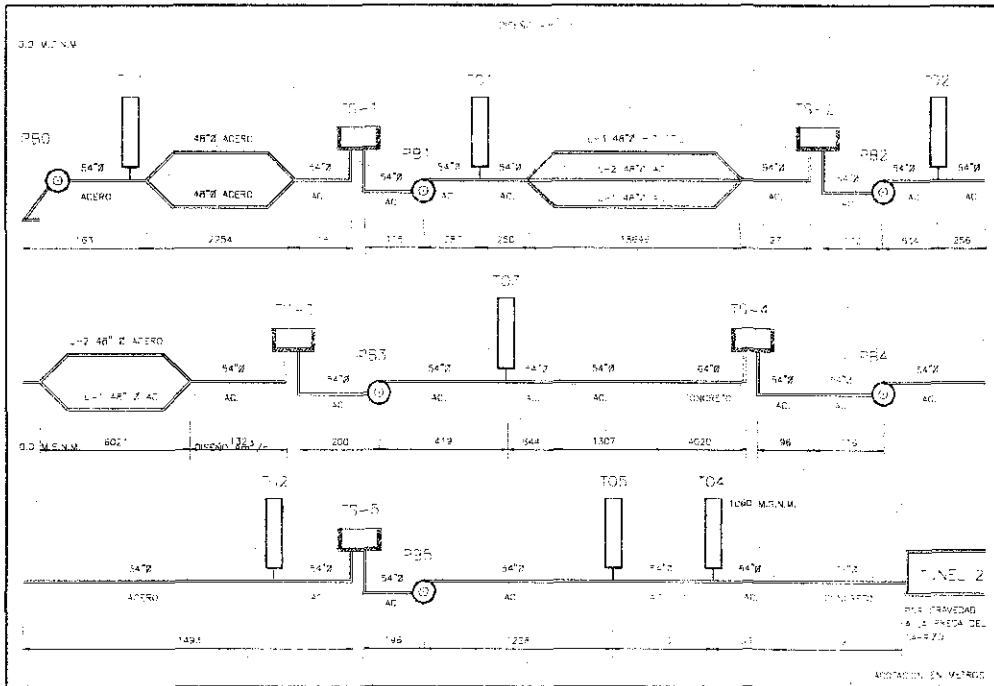


Fig. IV. 2 Croquis de la zona a bombeo acueducto Río Colorado Tijuana

#### IV.1.2 Campaña de mediciones

El mes de Julio del 2000, el Instituto de Ingeniería llevó a cabo mediciones de presión, gasto y niveles en estructuras a lo largo de todo el acueducto con el fin de realizar análisis del comportamiento actual del acueducto con tres equipos de bombeo operando.

Con ayuda del programa TRANS, desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se realizaron análisis en flujo transitorio para determinar el comportamiento actual del acueducto ante paros no programados de los equipos de bombeo, la condición más crítica en cada planta de bombeo es cuando se presenta el disparo de tres bombas.

Con los resultados obtenidos para flujo establecido y con las mediciones realizadas se realizaron cálculos numéricos para determinar el comportamiento transitorio para la condición más desfavorable.

En la tabla IV.1 se presentan los gastos aforados durante la campaña de medición.



Planta	Gasto (m <sup>3</sup> /s)
PB 0	3.606
PB 1	3.574
PB 2	3.560
PB 3	3.510
PB 4	3.484
PB 5	3.491

Tabla IV.1 Gastos aforados

La tabla IV.2 muestra las características de las torres de oscilación y el nivel mínimo que alcanzaron durante la simulación numérica.

Nombre	Elev. Desplante (msnm)	Elev. Máxima (msnm)	Area real (m <sup>2</sup> )	h <sub>mín</sub> (msnm)
TO1	154.112	191.112	38.5	160.44
TO2	277.98	304.288	38.5	283.56
TO3	398.60	431.15	38.5	407.14
TO4	1050.729	1066.729	21.24	1046.91
TO5	1035.245	1067.995	38.5	1047.42

Tabla IV.2 Características físicas de las torres de oscilación

#### IV.1.3 Aplicación del método propuesto

Ahora se aplicará el método propuesto para estimar el área de la torre de oscilación N° 1 (TO1) del acueducto Río Colorado Tijuana. El tramo en estudio será de PB1 a TS2. La información disponible es la siguiente:

- Gasto de operación  $Q = 3.574 \text{ m}^3/\text{s}$
- Longitud del tramo (de TO1 a TS2)  $l = 19,000 \text{ m}$
- Diámetro equivalente de las líneas de 54" y 48"  $D = 2.11 \text{ m}$  ( $S = 3.5 \text{ m}^2$ )
- La carga piezométrica en la torre de oscilación  $h_{10} = 188.41 \text{ m}$
- La carga piezométrica en el tanque de entrega  $h_2 = 164.41 \text{ m}$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

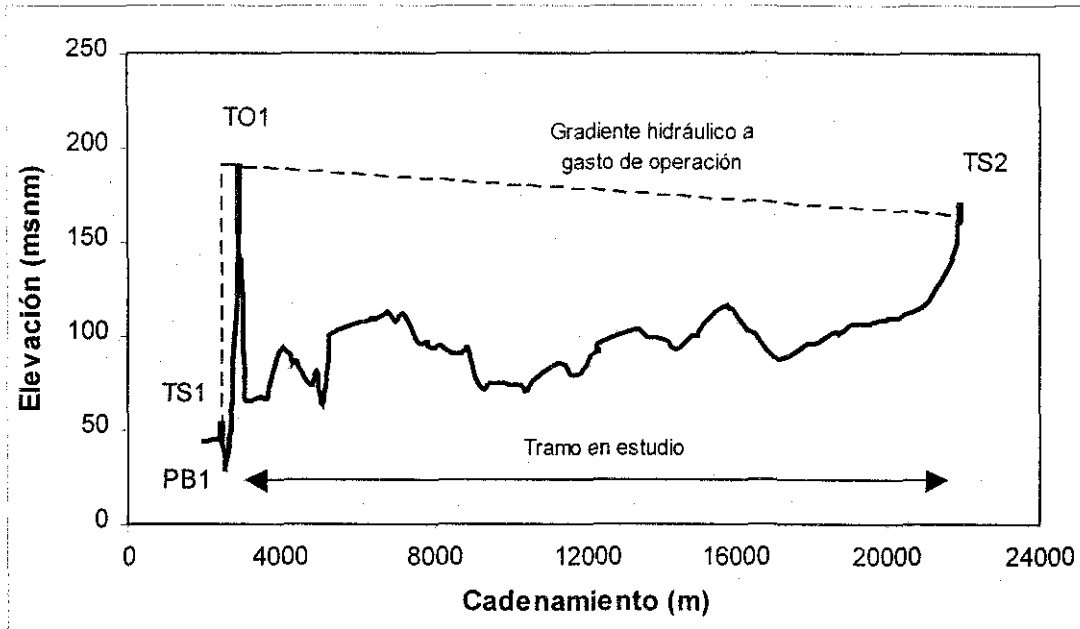


Fig. IV.3 Perfil del acueducto entre PB1 y TS2

**Algoritmo de cálculo**

1. Elección del valor de  $z_{min}$  permitido.

Se elige un valor de  $h_{min} = 160.44$  m, tomado de los resultados de la simulación numérica.

$$z_{min} = \frac{h_{min} - h_2}{h_{10} - h_2} = \frac{160.44 - 164.41}{188.41 - 164.41} = -0.16516$$

2. Obtención del parámetro  $a$

$$a = 0.54175962(0.875282)^{-z_{min}} (-z_{min})^{-0.9825837}$$

$$a = 0.54175962(0.875282)^{0.16516} (0.16516)^{-0.9825837}$$

$$a = 3.11$$

3. Estimación del área de la torre

$$A = \frac{lQ_0^2}{gS(h_{10} - h_2)^2} a$$

$$A = \frac{(19000)(3.754)^2}{(9.81)(3.5)(188.41 - 164.41)^2} (3.11)$$

$$A = 42.118 \text{ m}^2$$

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Entonces, si se compara el área que resulta de la aplicación del método propuesto de  $42.12 \text{ m}^2$ , contra los  $35 \text{ m}^2$  que tienen las torres, se observa que existe una diferencia del 9 %.

En la tabla IV.3 se presenta información para la estimación del área de las torres de oscilación N° 1, 2 y 3.

Torre	Q ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	l (m)	S ( $\text{m}^2$ )	$h_{10}$ (msnm)	$h_2$ (msnm)	$h_{\text{mín}}$ (msnm)
TO1	3.574	19,000	3.50	188.41	164.41	160.44
TO2	3.560	6,300	2.32	302.00	286.61	283.56
TO3	3.510	6,000	1.86	430.75	409.95	407.14

Tabla IV. 3 Información de las torres de oscilación

La tabla IV.4 presenta, en forma tabular, los resultados de la aplicación del método.

Torre	$z_{\text{mín}}$	a	Ac ( $\text{m}^2$ )	Error (%)
TO1	0.16516	3.11	42.12	9
TO2	0.19777	2.59	38.15	1
TO3	0.13504	3.81	35.57	8

Tabla IV. 4 Resultados de la aplicación del método

Donde Ac – Área calculada con el método

De la tabla IV.4 se observa que los resultados tiene una muy buena aproximación al área real de las torres de oscilación. La máxima diferencia que se cometió no rebasa el 10 %, incluso para el caso de TO2 se tuvo una diferencia tan sólo del 1 %.

## IV. 2 CÁMARAS DE AIRE

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### IV.2.1 Descripción del acueducto El Cuchillo - Monterrey

Para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Monterrey, en el estado de Nuevo León, se cuenta actualmente con los acueductos Linares – Monterrey y El Cuchillo – Monterrey, cuyas obras de toma se ubican en las presas de Cerro Prieto y El Cuchillo – Solidaridad, respectivamente. Ambos acueductos entregan su caudal en el tanque de aguas crudas de la Planta Potabilizadora de San Roque, donde se localiza la planta de bombeo 5 (PB 5) que, finalmente, envía el agua a la ciudad de Monterrey.

El acueducto Linares – Monterrey fue diseñado para operar en dos etapas. En la primera etapa, el proyecto original pretendía entregar  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que en la segunda etapa se elevaría éste caudal hasta llegar a  $12 \text{ m}^3/\text{s}$ . Lamentablemente, a quince años de operación, la escasa precipitación en la zona no permitió contar con el gasto proyectado.

Lo anterior, aunado a la creciente demanda de agua, obligó la construcción del acueducto El Cuchillo – Monterrey. Cuyo proyecto considera aportar un gasto máximo adicional de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  con la operación de 5 equipos en todas sus plantas de bombeo.

El acueducto El Cuchillo – Monterrey tiene una longitud total de 90 km, con un desnivel topográfico de 326 m y toda la conducción trabaja a presión mediante la operación de cinco estaciones de bombeo (PB 0 a PB 4). Cada estación está formada con cinco bombas, más una de reserva, para impulsar hasta  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Las cargas de bombeo van desde 79.32 m en PB 2, hasta 100.76 m en PB 4 para un gasto de referencia de  $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$  por bomba. La tubería es de acero de 2.5 m y 2.13 m de diámetro en los tramos de succión (comprendido entre el tanque de sumergencia y la planta de bombeo) y descarga (comprendido entre la planta de bombeo y el tanque de sumergencia de la siguiente planta), respectivamente.

El sistema para control de transitorios hidráulicos consta de 3 cámaras de aire a la salida de cada planta de bombeo (15 en total), 11 tanques unidireccionales y tres torres de oscilación.

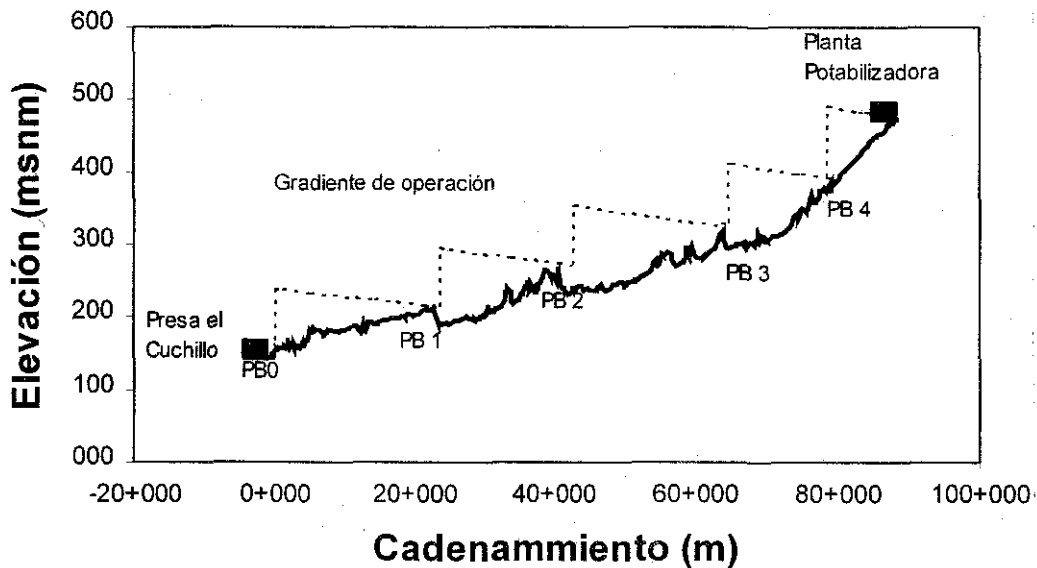


Fig. IV. 4 Perfil del acueducto El Cuchillo – Monterrey

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**IV.2.2 Campaña de mediciones**

Los días 1 a 3 de septiembre de 1999, se efectuaron las mediciones de campo en los cinco tramos de bombeo (PB0 a PB4) del acueducto El Cuchillo – Monterrey. En cada planta las mediciones, en flujo establecido y flujo transitorio, se efectuaron con la operación de cinco equipos de bombeo, manteniendo en funcionamiento las tres cámaras de aire instaladas en la descarga de cada una de las plantas.

En forma previa al disparo simultáneo de las 5 bombas, se efectuaron mediciones de la presión manométrica y del nivel del agua en diferentes puntos y estructuras localizados a lo largo del tramo en prueba. La tabla IV.5 presenta un resumen de las presiones y niveles registrados en cada caso. En esta misma tabla se presenta la elevación de referencia y la carga piezométrica correspondiente.

Ubicación	Cadenamiento (m)	Elevación (msnm)	Presión (mca)	Piezométrica (msnm)
<b>PB0</b>				
P. El Cuchillo	-0+481.80	152.58	0.00	152.58
Múltiple de succión	-0+097.80	151.95	0.00	151.95
Múltiple de descarga	-0+097.80	150.23	88.67	238.90
TS1	22+721.40	216.63	0.00	216.63
<b>PB1</b>				
TS1	22+721.40	214.33	0.00	214.33
Múltiple de succión	23+724.00	199.05	14.68	213.73
Múltiple de descarga	23+724.00	197.20	99.84	297.04
TS2	40+900.00	276.60	0.00	276.60
<b>PB2</b>				
TS2	40+900.00	274.80	0.00	274.80
Múltiple de succión	42+720.00	242.32	31.31	273.63
Múltiple de descarga	42+720.00	238.27	116.11	354.38
TS3	63+939.00	326.30	0.00	326.30
<b>PB3</b>				
TS3	63+939.00	329.64	0.00	329.64
Múltiple de succión	64+889.00	300.53	27.51	328.04
Múltiple de descarga	64+889.00	296.61	114.00	410.61
TS4	79+536.00	393.70	0.00	393.70
<b>PB4</b>				
TS4	79+536.00	394.68	0.00	394.68
Múltiple de succión	78+692.00	378.25	16.04	394.29
Múltiple de descarga	78+692.00	376.05	114.00	490.05
T. Aguas Crudas (PP)	88+358.92	477.00	0.00	477.00

**Fig. IV.5 Mediciones de la carga piezométrica**





Adicionalmente, en cada planta se midieron las presiones en la succión y descarga de cada uno de los 5 equipos de bombeo que se encontraban en operación antes del disparo. La tabla IV.6 presenta un resumen del cálculo de la carga dinámica total correspondiente, y también se incluye la estimación del gasto bombeado, obtenido a partir de las curvas de operación de las bombas

Planta de bombeo (#)	Carga dinámica (m)	Gasto ( $m^3/s$ )
PB0	87.73	5.147
PB1	85.69	5.520
PB2	83.30	5.522
PB3	84.80	5.839
PB4	98.53	6.214

Tabla IV.6 Gasto y carga dinámica en cada planta de bombeo

### IV.2.3 Aplicación del método propuesto

Como en el caso de las torres de oscilación, ahora se aplicará el método propuesto para estimar el volumen de las cámaras de aire éste acueducto El tramo en estudio será de PB4 a tanque de aguas crudas en la planta potabilizadora. La información disponible es la siguiente:

- Gasto de operación  $Q = 6.214 m^3/s$
- Longitud del tramo (PB4 a PP)  $l = 9,567 m$
- Diámetro equivalente de la línea de 84"  $D = 2.13 m$  ( $S = 3.563 m^2$ )
- La carga piezométrica en la torre de cámara  $h_{10} = 492.92 msnm$
- La carga piezométrica en el tanque de entrega  $h_2 = 477.74 msnm$
- La elevación del espejo de agua dentro de la cámara es  $y = 384.60 msnm$

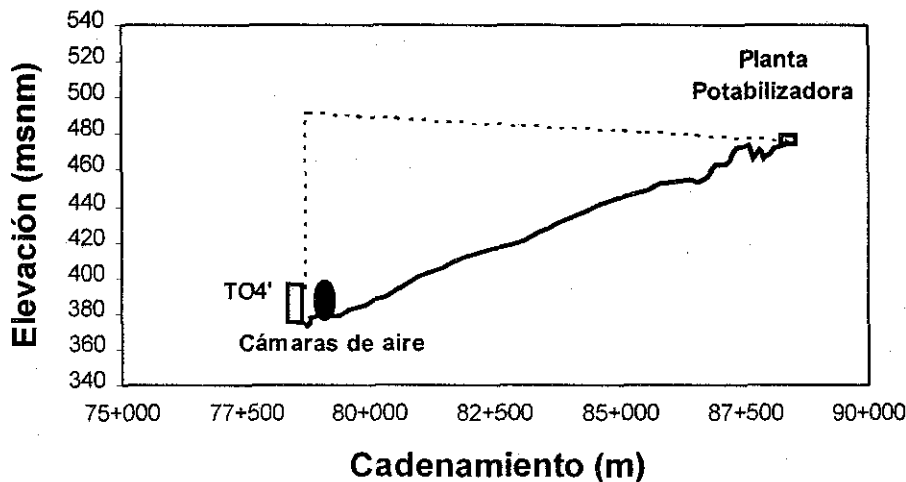


Fig. IV.5 Perfil del tramo en estudio

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

**Algoritmo de cálculo**

1. Se fija  $z_{min}$  y se calcula  $r$

Se elige un valor de  $h_{l\ min} = 392.5\ m$ , de donde

$$z_{min} = -5.616 \quad \text{y} \quad r = 1.147$$

2. De la ecuación (III.18) se obtiene el valor de R

$$R = \frac{1-\alpha}{\frac{1-\alpha}{r^\alpha} - 1}$$

$$R = 8.867$$

3. De la ecuación (III.27) se obtiene implícitamente el valor de  $T^*$

$$T^* e^{T^*} = -\frac{\pi}{2z_{min}}$$

$$T^* = 0.224$$

4. Se calcula el valor de  $K$  con la ecuación (III.28)

$$K = \frac{1 + \left(\frac{\pi}{2T^*}\right)^2}{1 - z_{min}} \left[ \frac{1}{\left(z_{min} + \frac{1 - z_{min}}{r}\right)^{1/\alpha}} - 1 \right]$$

$$K = 28.621$$

5. Se encuentra los valores de  $f(r)$  y de  $g(r)$  con (III.31) y (III.32)

$$f(r) = 0.038149r^4 - 0.47917r^3 - 1.624898r^2 - 1.5254r + 0.804$$

$$f(r) = 0.5080$$

$$g(r) = 2.42881r^4 + 15.288723r^3 - 36.0706r^2 + 37.970545r - 14.5$$

$$g(r) = 0.4693$$

6. Se obtiene el valor de  $a$  de (III.33)

$$a = \frac{2}{R \left(1 - \frac{1}{r}\right) K} \frac{1}{f(r) \left(-z_{min}^{g(r)}\right)}$$

$$a = 0.0539$$

7. Se encuentra la energía cinética

$$E_c = \frac{\gamma l Q_0^2}{2gS}$$

$$E_c = 51740457 \text{ J}$$

8. Se calcula el volumen inicial como

$$V_0 = \frac{aE_c}{p_0}$$

$$V_0 = 21.303 \text{ m}^3$$

9. De la ecuación (III.35), se estima la cantidad de agua que ingresa a la cámara:

$$V_w = V_0 \left[ \left( \frac{P_0}{P_{\min}} \right)^{1/\alpha} - 1 \right]$$

$$V_w = 80.143 \text{ m}^3$$

10. Finalmente, se calcula el volumen total de las cámaras de aire como la suma del volumen de agua mas el volumen inicial de aire, es decir:

$$V_T = V_0 + V_w$$

$$V_T = 101.446 \text{ m}^3$$

Por otra parte, para comparar los resultados del método se realizaron simulaciones numéricas mediante un programa que se basa en el método de las características. Se alimentó el programa con la información antes mostrada y garantizando que  $h_{1\min} = 392.5 \text{ m}$ , los resultados se muestran a continuación:

$$V_0 = 24 \text{ m}^3$$

$$V_w = 73.64 \text{ m}^3$$

$$V_T = 97.64 \text{ m}^3$$

Si observamos los valores, tenemos que tanto el volumen inicial de aire como el volumen total de las cámaras son similares. La diferencia que se obtiene al estimar el volumen inicial de aire es de 11% aproximadamente, sin embargo, cuando se comparan los valores de volúmenes totales se tiene una diferencia tan sólo del 4%.



## **V. Comentarios y conclusiones**

Las cámaras de aire y las torres de oscilación son dispositivos eficaces para el control de transitorios hidráulicos en plantas de bombeo.

La cámara de aire es un tanque que se caracteriza por ceder o admitir flujo de la tubería donde se presentan las variaciones de gasto y de presión; amortigua las oscilaciones mediante la compresión y expansión del aire confinado en el mismo.

La torre de oscilación es una estructura que transforma las ondas de presión en oscilaciones mucho más lentas y con menor amplitud. Reduce las fluctuaciones de presión en un paro repentino de los equipos de bombeo, suministra agua a la línea para limitar el descenso de presión.

Se ha desarrollado un método analítico muy sencillo para calcular de manera preliminar, pero muy rápida, el diámetro de las torres de oscilación y los volúmenes de las cámaras de aire.

Con las dimensiones de las torres de oscilación y las cámaras de aire que se obtienen con este método, es posible realizar una primera estimación del costo de las estructuras de control de los transitorios hidráulicos. Sin embargo, es indispensable afinar el cálculo de las dimensiones, tanto del área de la torre de oscilación como los volúmenes de las cámaras de aire, con herramientas más precisas que emplean para la solución el método de las características.

La aplicación de esta metodología a casos reales y la comparación de resultados con resultados de simulaciones numéricas y de otros métodos convencionales de diseño, confirman la sencillez y validez del método propuesto.

Por otra parte, el análisis dimensional es una técnica ayuda a la solución de problemas; proporciona información empleando las dimensiones de las variables que intervienen en los fenómenos. En ingeniería, se usa en la comprobación de fórmulas y, además, permite reducir el número de variables de un problema simplificándolo en forma significativa.

Los parámetros adimensionales profundizan el entendimiento sobre los fenómenos, es posible describirlos por completo sin restringir ninguna de las variables. Los resultados de una investigación pueden presentarse en forma más compacta y significativa (gráficas o ecuaciones), incluso, pueden ser aplicados a otros problemas similares.

## Apéndice A

### TEOREMA $\Pi$ BUCKINGHAM

#### Formulación de variables adimensionales para las torres de oscilación

##### *1. Organización de la información*

Para el modelo de la torre de oscilación las variables empleadas son:

$Q_0$	gasto volumétrico de referencia, $m^3/s$
$\Delta h_0$	diferencia de cargas piezométricas de referencia, entre el dispositivo de control y el tanque de entrega, m
$l$	longitud de la conducción, m
$A$	sección transversal de la torre de oscilación, $m^2$
$S$	sección transversal de la conducción, $m^2$
$Q$	gasto volumétrico, $m^3/s$
$g$	aceleración de la gravedad, $m/s^2$
$\Delta h$	diferencia de cargas piezométricas entre el dispositivo de control y el tanque de entrega, m
$t$	tiempo, s

En la siguiente tabla se presenta la clasificación de las variables (independientes o dependientes), su tipo (geométrica, cinemática o dinámica) y sus dimensiones:

	Variables independientes					Variables dependientes			
	$Q_0$	$\Delta h_0$	$l$	$S$	$A$	$\Delta h$	$Q$	$g$	$t$
Tipo	Cinemática	Dinámica	Geométrica			Dinámica	Cinemática		
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L	3	1	1	2	2	1	3	1	0
T	-1	0	0	0	0	0	-1	-2	1

El "grupo base" de variables lo integran las variables independientes. El número de variables dependientes es cuatro, por lo tanto, es posible formar cuatro parámetros adimensionales.

### 2. Derivación de los parámetros $\Pi$

1<sup>er</sup> parámetro  $\Pi_1 = Q_0^a \Delta h_0^b l^c S^d A^e Q$

De la matriz de exponentes

L)  $3a + b + c + 2d + e + 3 = 0$

T)  $-a - 1 = 0$

De la segunda ecuación  $a = -1$

Si  $b = c = d = e = 0$

$$\pi_1 = \frac{Q}{Q_0}$$

TESIS CON  
 FALLA LE ORIGEN

2<sup>o</sup> parámetro  $\Pi_2 = Q_0^a \Delta h_0^b l^c S^d A^e \Delta h$

De la matriz de exponentes

L)  $3a + b + c + 2d + e + 1 = 0$

T)  $-a = 0$

De la segunda ecuación  $a = 0$

Si  $b = -1$  y  $c = d = e = 0$

$$\pi_2 = \frac{\Delta h}{\Delta h_0}$$

3<sup>er</sup> parámetro  $\Pi_3 = Q_0^a \Delta h_0^b l^c S^d A^e g$

De la matriz de exponentes

L)  $3a + b + c + 2d + e + 1 = 0$

T)  $-a - 2 = 0$

De la segunda ecuación  $a = -2$

Si  $b = 2$   $c = -1$   $d = 1$  y  $e = 1$

$$\pi_3 = \frac{g \Delta h_0^2 S A}{l Q_0^2}$$

4<sup>o</sup> parámetro  $\Pi_4 = Q_0^a \Delta h_0^b l^c S^d A^e t$

De la matriz de exponentes

L)  $3a + b + c + 2d + e = 0$

T)  $-a + 1 = 0$

De la segunda ecuación  $a = 1$

Si  $b = -1$   $c = 0$   $d = 0$  y  $e = -1$

$$\pi_4 = \frac{Q_0 t}{A \Delta h_0}$$

### 3. Conversión de los parámetros

Los productos adimensionales encontrados son los siguientes:

$$\pi_1 = \frac{Q}{Q_0} \quad (\text{Gasto adimensional})$$

$$\pi_2 = \frac{\Delta h}{\Delta h_0} \quad (\text{Diferencia de cargas adimensional})$$

$$\pi_3 = \frac{g \Delta h_0^2 S A}{l Q_0^2} \quad (\text{Cociente de energías potencial y cinéticas})$$

$$\pi_4 = \frac{Q_0 t}{A \Delta h_0} \quad (\text{Cociente de velocidades})$$



Por lo tanto,

$$\frac{Q}{Q_0} = f \left( \frac{\Delta h}{\Delta h_0}, \frac{g \Delta h_0^2 S A}{l Q_0^2}, \frac{g \Delta h_0^2 S A}{l Q_0^2} \frac{Q_0 t}{A \Delta h_0} \right)$$

$$\frac{Q}{Q_0} = f \left( \frac{\Delta h}{\Delta h_0}, \frac{g \Delta h_0^2 S A}{l Q_0^2}, \frac{g \Delta h_0 S t}{l Q_0} \right)$$

$$\mathbf{q} = \mathbf{z}, \mathbf{a}, \mathbf{T}$$

La modelación del funcionamiento de la torre de oscilación puede ser representada con los parámetros adimensionales anteriores.



## Apéndice B

### TEOREMA $\Pi$ BUCKINGHAM

#### Formulación de variables adimensionales para las cámaras de aire

##### *1. Organización de la información*

Para el modelo de la torre de oscilación las variables empleadas son:

$Q_0$	gasto volumétrico de referencia, $m^3/s$
$\Delta h_0$	diferencia de cargas piezométricas de referencia, entre el dispositivo de control y el tanque de entrega, m
$l$	longitud de la conducción, m
$S$	sección transversal de la conducción, $m^2$
$P_0$	presión absoluta de referencia, $N/m^2$
$V_0$	volumen inicial, o de referencia, en la cámara, $m^3$
$Q$	gasto volumétrico, $m^3/s$
$g$	aceleración de la gravedad, $m/s^2$
$\Delta h$	diferencia de cargas piezométricas entre el dispositivo de control y el tanque de entrega, m
$P$	presión absoluta, $N/m^2$
$P_f$	presión absoluta en el punto de entrega, $N/m^2$
$\gamma$	peso específico del agua, $N/m^3$
$t$	tiempo, s

Para el modelo de las cámaras de aire las variables empleadas son:  $Q_0, \Delta h_0, l, S, P_0, V_0, Q, \Delta h, V, P, P_f, \gamma, g, y t$ . En la siguiente tabla se presenta la clasificación de las variables (independientes o dependientes), su tipo (geométrica, cinemática o dinámica) y sus dimensiones:

	Variables independientes						Variables dependientes							
	$Q_0$	$P_0$	$\Delta h_0$	$l$	$S$	$V_0$	$Q$	$g$	$t$	$\Delta h$	$P$	$P_f$	$\gamma$	$V$
Tipo	Cinemática		Dinámica	Geométrica			Cinemática			Dinámica			Geométrica	
M	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
L	3	-1	1	1	2	3	3	1	0	1	-1	-1	-2	3
T	-1	-2	0	0	0	0	-1	-2	1	0	-2	-2	-2	0

El "grupo base" de variables lo integran las variables independientes. De la tabla se observa que se tienen ocho variables dependientes, por lo tanto, se pueden formar ocho productos adimensionales.

### 2. Derivación de los parámetros $\Pi$

1<sup>er</sup> parámetro  $\Pi_1 = Q_0^a \Delta h_0^b l^c S^d P_0^e V_0^f Q$

De la matriz de exponentes

- M)  $e = 0$
- L)  $3a + b + c + 2d - e + 3f + 3 = 0$
- T)  $-a - 2e - 1 = 0$

De la primera ecuación  $e = 0$   
 Por lo tanto, de la tercera ecuación  $a = -1$

Si  $b = c = d = f = 0$

$$\pi_1 = \frac{Q}{Q_0}$$

2<sup>o</sup> parámetro  $\Pi_2 = Q_0^a \Delta h_0^b l^c S^d P_0^e V_0^f \Delta h$

De la matriz de exponentes

- M)  $e = 0$
- L)  $3a + b + c + 2d - e + 3f + 1 = 0$
- T)  $-a - 2e = 0$

De la primera ecuación  $e = 0$   
 Por lo tanto, de la tercera ecuación  $a = 0$



Si  $b = -1$  y  $c = d = f = 0$

$$\pi_2 = \frac{\Delta h}{\Delta h_0}$$

3<sup>er</sup> parámetro  $\Pi_3 = Q_0^a \Delta h_0^b l^c S^d P_0^e V_0^f V$

De la matriz de exponentes

M)  $e = 0$

L)  $3a + b + c + 2d - e + 3f + 3 = 0$

T)  $-a - 2e = 0$

De la primera ecuación  $e = 0$

Por lo tanto, de la tercera ecuación  $a = 0$

Si  $b = c = d = 0$  y  $f = -1$

$$\pi_3 = \frac{V}{V_0}$$

4<sup>o</sup> parámetro  $\Pi_4 = Q_0^a \Delta h_0^b l^c S^d P_0^e V_0^f P$

De la matriz de exponentes

M)  $e + 1 = 0$

L)  $3a + b + c + 2d - e + 3f - 1 = 0$

T)  $-a - 2e - 2 = 0$

De la primera ecuación  $e = -1$

Por lo tanto, de la tercera ecuación  $a = 0$

Si  $b = c = d = f = 0$

$$\pi_4 = \frac{P}{P_0}$$

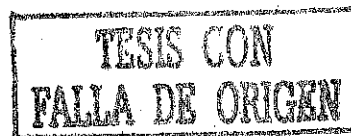
5<sup>o</sup> parámetro  $\Pi_5 = Q_0^a \Delta h_0^b l^c S^d P_0^e V_0^f P_f$

De la matriz de exponentes

M)  $e + 1 = 0$

L)  $3a + b + c + 2d - e + 3f - 1 = 0$

T)  $-a - 2e - 2 = 0$



De la primera ecuación  $e = -1$

Por lo tanto, de la tercera ecuación  $a = 0$

Si  $b = c = d = f = 0$

$$\pi_5 = \frac{P_f}{P_0} \Rightarrow \pi_5 = \frac{P_0}{P_f}$$

6° parámetro  $\Pi_6 = Q_0^a \Delta h_0^b l^c S^d P_0^e V_0^f \gamma$

De la matriz de exponentes

M)  $e + 1 = 0$

L)  $3a + b + c + 2d - e + 3f - 2 = 0$

T)  $-a - 2e - 2 = 0$

De la primera ecuación  $e = -1$

Por lo tanto, de la tercera ecuación  $a = 0$

Si  $b = d = f = 0$  y  $c = 1$

$$\pi_6 = \frac{\gamma l}{P_0}$$

7° parámetro  $\Pi_7 = Q_0^a \Delta h_0^b l^c S^d P_0^e V_0^f g$

De la matriz de exponentes

M)  $e = 0$

L)  $3a + b + c + 2d - e + 3f + 1 = 0$

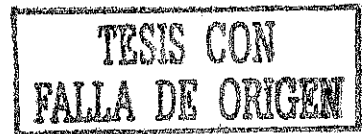
T)  $-a - 2e - 2 = 0$

De la primera ecuación  $e = 0$

Por lo tanto, de la tercera ecuación  $a = -2$

Si  $b = c = 0$  y  $d = f = 1$

$$\pi_7 = \frac{Q_0^2}{gSV_0}$$



8° parámetro  $\Pi_8 = Q_0^a \Delta h_0^b l^c S^d P_0^e V_0^f t$

De la matriz de exponentes

- M)  $e = 0$   
 L)  $3a + b + c + 2d - e + 3f = 0$   
 T)  $-a - 2e + 1 = 0$

De la primera ecuación  $e = 0$

Por lo tanto, de la tercera ecuación  $a = -1$

Si  $b = 1$   $c = f = -1$  y  $d = 0$

$$\pi_8 = \frac{Q_0 \Delta h_0 t}{l V_0}$$

### 3. Conversión de los parámetros

Los productos adimensionales encontrados son los siguientes:

- $\pi_1 = \frac{Q}{Q_0}$  (Gasto adimensional)  
 $\pi_2 = \frac{\Delta h}{\Delta h_0}$  (Diferencia de cargas adimensional)  
 $\pi_3 = \frac{V}{V_0}$  (Volumen adimensional)  
 $\pi_4 = \frac{P}{P_0}$  (Cociente de presiones)  
 $\pi_5 = \frac{P_0}{P_f}$  (Cociente de presiones inicial y final)  
 $\pi_6 = \frac{\gamma l}{P_0}$   
 $\pi_7 = \frac{Q_0^2}{g S V_0}$   
 $\pi_8 = \frac{Q_0 \Delta h_0 t}{l V_0}$



La solución puede presentarse como:

$$\frac{Q}{Q_0} = f \left( \frac{\Delta h}{\Delta h_0}, \frac{V}{V_0}, \frac{P}{P_0}, \frac{P_0}{P_f}, \frac{\gamma l}{P_0}, \frac{Q_0^2}{g S V_0}, \frac{Q_0 \Delta h_0 t}{l V_0}, \frac{g S V_0}{Q_0^2} \right)$$

$$\frac{Q}{Q_0} = f\left(\frac{\Delta h}{\Delta h_0}, \frac{V}{V_0}, \frac{P}{P_0}, \frac{P_f}{P_0}, \frac{\gamma l}{P_0} \frac{Q_0^2}{gSV_0}, \frac{\Delta h_0 t gS}{l Q_0}\right)$$

en donde ordenando los parámetros adimensionales se tiene que:

$$q = \frac{Q}{Q_0}$$

$$z = \frac{\Delta h}{\Delta h_0} = \frac{h_1 - h_2}{h_{10} - h_2}$$

$$v = \frac{V}{V_0}$$

$$\hat{p} = \frac{P_f}{P_0}$$

$$r = \frac{P}{P_0}$$

$$T = \frac{gSt}{Q_0} \frac{\Delta h_0}{l} = \frac{gS}{Q_0} \frac{h_{10} - h_2}{l} t$$

$$a = \frac{P_0}{\gamma l} \frac{gSV_0}{Q_0^2} \Rightarrow a = \frac{\gamma l Q_0^2 / gS}{P_0 V_0} \Rightarrow a = \frac{\gamma l Q_0^2 / 2gS}{P_0 V_0 c}$$

TESIS CON  
FALLA LE ORIGEN

$$q = f(Z, T, v, r, \hat{p}, a)$$

La modelación del funcionamiento de las cámaras de aire puede ser representada con los parámetros adimensionales anteriores.

## **Bibliografía**

Berezowsky V. Moisés

Cámaras de Oscilación. Análisis y diseño hidráulico,

Serie del Instituto de Ingeniería de la UNAM

Nº D - 28

Mayo 1988

Carmona Rafael, Rodal Eduardo

Análisis de la operación del acueducto presa Vicente Guerrero – Cd. Victoria,

Reporte del Instituto de Ingeniería para la Comisión Nacional del Agua,

Febrero de 1993

Carmona Rafael, Sánchez Alejandro

Estudio del funcionamiento hidráulico y puesta en operación del acueducto Chapala – Guadalajara,

Reporte del Instituto de Ingeniería para la Comisión Nacional del Agua,

Enero de 1991

Carmona Rafael, Sánchez Alejandro

Revisión de la operación de las cámaras de aire y puesta en marcha del sistema con 5 equipos de bombeo en cada planta de bombeo acueducto El Cuchillo – Monterrey,

Reporte del Instituto de Ingeniería para la Comisión Nacional del Agua,

Noviembre de 1999

Carmona Rafael, Sánchez Alejandro

Puesta en servicio de las cámaras de aire de Papagayo II,

Reporte del Instituto de Ingeniería para la Comisión Nacional del Agua,

Julio de 1999



- Carmona Rafael, Sánchez Alejandro, Zarco José  
Prueba de campo de los dispositivos de protección instalados en el acueducto presa Moralillo – Cerro Azul,  
Reporte del Instituto de Ingeniería para la Comisión Nacional del Agua,  
Octubre de 1999
- Chaudhry M. H.  
Applied hydraulics transients,  
Van Nostrand Reinhold Co., 1979
- Comisión Federal de Electricidad. Instituto de Investigaciones Eléctricas.  
Manual de Diseño de Obras Civiles. Hidrotécnica, Hidráulica  
A.2.5 Cámaras de oscilación  
Manual de Diseño de Obras Civiles. Geotecnia, Mecánica de Rocas,  
B.3.2. Obras subterráneas  
México, 1982
- Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Construcción, Gerencia de  
Proyectos de Agua Potable y Saneamiento.  
Proyecto ejecutivo de los dispositivos para el control del transitorio hidráulico en el  
acueducto González Ortega II UCUM II. Chetumal, Quintana Roo,  
Elaborado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM  
Diciembre 1996.
- Echávez A. Gabriel  
Introducción a los modelos hidráulicos de fondo fijo y a la ingeniería experimental,  
Universidad Nacional Autónoma de México, Consejo Nacional de Ciencia y  
Tecnología, Asociación Mexicana de Hidráulica  
1ª Edición, 1996
- Gardea Villegas Humberto  
Aprovechamientos hidroeléctricos y de bombeo  
Editorial Trillas, México,  
1ª Edición, 1992
- Guarga Rafael, Abreu José M., Izquierdo Joaquín  
Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión,  
Editado por Universidad de Coimbra, Universidad de la República Oriental de  
Uruguay, Universidad Politécnica de Valencia.  
1ª Edición 1995  
Impreso en España

Guarga Rafael, Sánchez Bribiesca José Luis, Carmona Rafael, Aguilar Lázaro  
Diseño y operación hidráulicas de conducciones de agua a presión,  
Fascículo II. Llenado, vaciado y operación estacionaria de las conducciones de  
agua a presión  
III. Transitorios hidráulicos en conducciones de agua a presión  
IV. Control de transitorios hidráulicos  
Instituto de Ingeniería de la UNAM  
México, Diciembre 1985

Mobayed, N.  
Análisis de cámaras de aire como dispositivos de protección en tuberías a presión,  
Tesis de Maestría, DEPMI, UNAM  
México, 1986

Murdock James W.  
Fundamental fluid mechanics for the practicing engineer,  
Marcel Dekker, Inc.  
1993, USA

Parmakian John  
Waterhammer Analysis,  
Editorial Dover INC. New York  
1ª Publicación en 1963

Soldán C. Paz  
Optimación de sistemas de bombeo considerando al flujo transitorio  
Tesis de doctorado, DEPMI, UNAM,  
México, 1989

Sánchez H. Alejandro  
Análisis Teórico – Experimental de las presiones causadas por separación de  
columna,  
Tesis de maestría, DEPMI, UNAM,  
México, 1987

Sánchez Alejandro, Ramos Sergio  
Análisis del funcionamiento hidráulico del acueducto Río Colorado – Tijuana,  
Informe final del Instituto de Ingeniería para la Comisión Nacional del Agua,  
Diciembre de 2000

Sánchez Alejandro, Zarco José  
Análisis del transitorio hidráulico en el rebombeo Twin Dolphins, Los Cabos,  
Reporte del Instituto de Ingeniería para la Comisión Nacional del Agua,  
Agosto de 2000

**ESTA TESIS NO SALE  
A BIBLIOTECA**

Streeter Victor L.

Mecánica de Fluidos,

Mc Graw Hill

9ª Edición 1999

Thorley A.R.D.

Fluid Transients in pipeline systems,

1ª Publicación en 1991 por D. & L. George Ltd.

British Library Cataloging in Publication Data

Wylie E. Benjamin

Fluid Transients,

Mac Graw Hill, 1978

British Library Cataloging in Publication Data