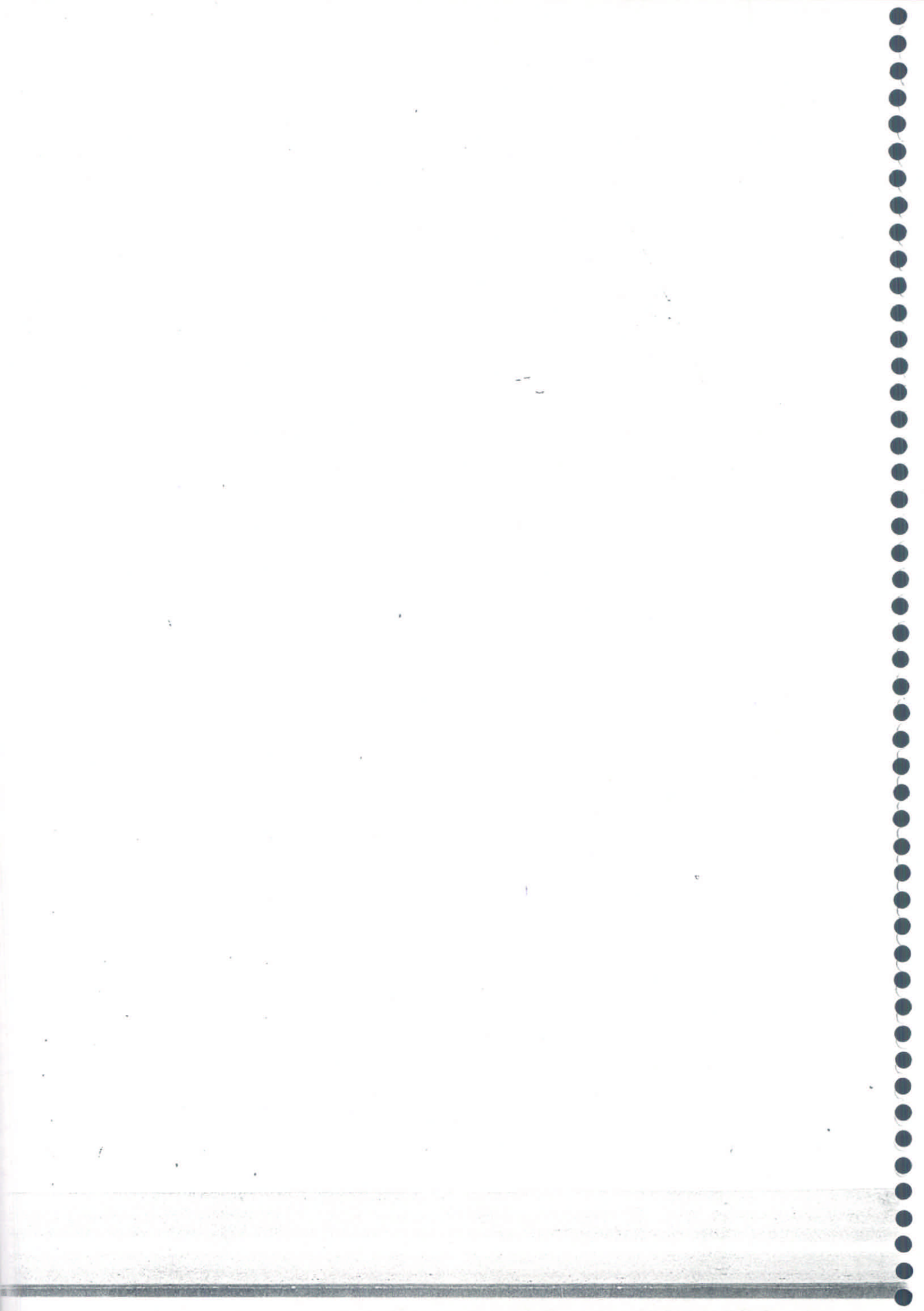


FASCICULO IV

CONTROL DE LOS TRANSITORIOS HIDRAULICOS

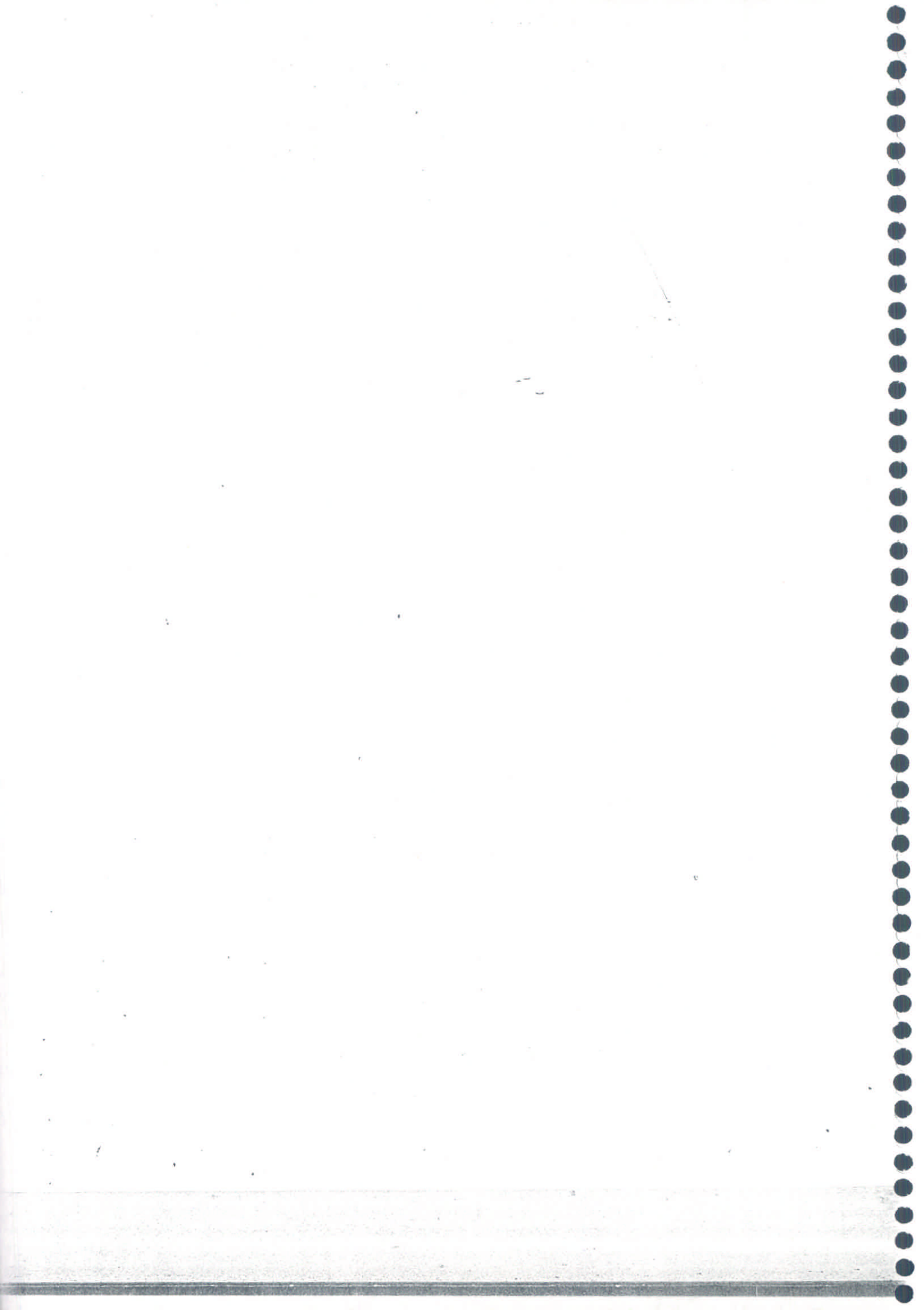


## INDICE

1.	Introducción	1
2.	Descripción de los problemas creados en las instalaciones industriales por los transitorios hidráulicos	2
2.1	Problemas de sobrepresiones	2
2.2	Problemas de depresiones	2
2.3	Problemas de sobrevelocidad	5
2.4	Conclusiones	6
3.	Lugar geométrico de las cargas piezométricas máximas o mínimas	6
3.1	Cargas piezométricas máximas o mínimas	6
3.2	Lugar geométrico de las cargas piezométricas máximas o mínimas	6
3.3	Examen de las sobrepresiones	8
3.4	Examen de las depresiones	9
3.5	Acueducto bien diseñado en relación con sobrepresiones y depresiones producidas por el transitorio hidráulico	10
4.	Problemas de la incorporación de aire en la tubería	11
4.1	Problema de la expulsión del aire	11
4.2	Problema de la compresión del aire	11

5.	Condiciones de operación más desfavorables	15
5.1	Condiciones de operación	15
5.2	Condiciones de operación más adversas	16
6.	Dispositivos de control	17
6.1	Golpe de ariete creado por la detención de una bomba	17
6.2	Tanque de oscilación	20
6.3	Tanque unidireccional	27
6.4	Cámara de aire	37
6.5	Otros dispositivos de control de los transitorios hidráulicos	53
7.	Relación entre la topografía y los dispositivos para el control de los transitorios hidráulicos	59
7.1	Introducción	59
7.2	Fundamentos del criterio	60
7.3	Criterio de diseño	62
7.4	Comentarios al criterio propuesto	64
7.5	Ejemplos de aplicación del criterio expuesto	65
7.6	Conclusión	70
8.	Criterios de seguridad	70
8.1	Diseño aceptable	71

8.2	Condiciones catastróficas	71
9.	Mediciones realizadas en un prototipo	74
9.1	Descripción del tramo medido	74
9.2	Condiciones de la prueba realizada	75
9.3	Dispositivos de medición empleados y medidas realizadas	75
9.4	Resultados obtenidos	76
9.5	Conclusiones	79
	Bibliografía	80



## 1. INTRODUCCION

En este fascículo el lector encontrará la aplicación práctica al diseño de conducciones de agua a presión, de los elementos teóricos referidos a fenómenos hidráulicos transitorios elaborados en el fascículo III. El desarrollo que se realizará excluye al fenómeno de la separación y la reintegración de la columna líquida como fenómeno que pueda ocurrir normalmente en los acueductos de los que se trata.

El fascículo comienza con una breve descripción de los problemas que acontecen en las instalaciones industriales como consecuencia de un paro de la planta de bombeo (capítulo 2). En el capítulo 3 se desarrolla el concepto de "lugar o envolvente" de las cargas piezométricas máximas y mínimas a lo largo de la tubería. En el capítulo 4 se explica en detalle el problema de posibles sobrepresiones por inclusión de aire en la tubería. Ello muestra la necesidad de evitar la entrada de aire a la tubería. En el capítulo 5 se demuestra que, para cada problema de los que pueden acontecer en el sistema luego de un paro accidental del bombeo, existen condiciones especialmente adversas y que en general éstas no son las mismas para todos los problemas.

En el capítulo 6 se realiza una revisión detallada de la operación de cinco dispositivos de control de fenómenos transitorios. Ellos son el tanque de oscilación, el tanque unidireccional, la cámara de aire, la válvula de alivio y el incremento de la inercia de las masas giratorias de la unidad motor-bomba.

En el capítulo 7 se expone un criterio para decidir el tipo de dispositivo de control que debe emplearse en cada acueducto, en función de la topografía.

En el capítulo 8 se resumen los criterios fundamentales de diseño del acueducto desde el punto de vista de los transitorios hidráulicos; se presenta asimismo una reflexión de tipo general referida a las condiciones de operación segura del sistema de la cual se extraen consecuencias prácticas referidas al diseño.

El fascículo finaliza presentando un caso real de un tramo del acueducto destinado a abastecer de agua la ciudad de Monterrey (Nvo. León, México), en el cual el control de los transitorios hidráulicos se efectúa por medio de tres tanques unidireccionales.

Se exponen los resultados del modelo teórico y su verificación experimental en dicho prototipo.

## 2. DESCRIPCION DE LOS PROBLEMAS CREADOS EN LAS INSTALACIONES INDUSTRIALES POR LOS TRANSITORIOS HIDRAULICOS

Los problemas que se producen en las conducciones de agua de uso industrial debido a los transitorios hidráulicos son de tres tipos, a saber: problemas de sobrepresiones, problemas de depresiones y problemas de sobrevelocidad en las máquinas.

### 2.1 Problemas de sobrepresiones

Se denomina sobrepresión en un punto de una conducción a presión a toda presión superior a la presión de trabajo. Los problemas de sobrepresión son los más sencillos de comprender puesto que la existencia de una presión superior a la presión de trabajo, aunque sea una sobrepresión transitoria, supone un incremento de las tensiones en el material de la tubería. Si dicho aumento tiene tal magnitud que produce deformaciones plásticas en la tubería o produce su rotura, es evidente que desde la etapa del proyecto deberá evitarse. Cuando el proyectista calcula la tubería debe establecer una cota de presiones máximas admisibles en todo punto de la misma. Esta cota determinará la "clase" de la tubería en cada tramo de la misma. Los fabricantes cuando determinan la "clase", o lo que es lo mismo la presión manométrica que la tubería soporta sin daño, no establecen diferencias entre presiones estacionarias y transitorias. Por lo tanto, en el diseño se tratará siempre de que la "clase" de cada tramo de 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 tubería debe decidirse en función del costo de la misma. Cuanto más resistente ésta 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 los 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 segura de menor costo.

### 2.2 Problemas de depresiones

Se denomina depresión a toda presión absoluta menor que la presión atmosférica. Si la tubería está enterrada la presión media exterior que la tubería

$$\tau = \frac{2PR_i}{2e}$$

$$\begin{aligned} P_i &= \text{dada} \\ \tau \text{ adm. dado} \\ D &= \text{dado} \end{aligned}$$

halla  $e$   
↓  
clase



soporta es mayor que la atmosférica dependiendo del tipo de suelo y la profundidad. Ello debe tenerse en cuenta al diseñar estructuralmente las tuberías enterradas pues deben resistir la presión exterior con la presión atmosférica en el interior (condición de tubería vacía).

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 un orden de gravedad decreciente, estos problemas pueden clasificarse en tres clases.

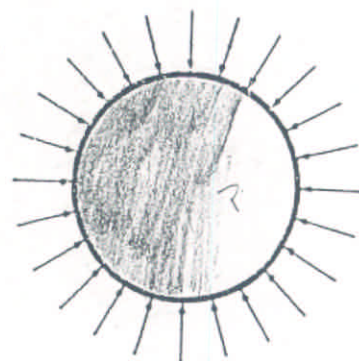
### 2.2.1 Colapso de la tubería

Al reducirse la presión interior y tomar valores por debajo de la presión media exterior, el tramo de tubería afectado trabajará a la compresión en el sentido de las tensiones según la circunferencia. Si estas tensiones son suficientemente altas se comprende que puede producirse un fenómeno de pandeo de la pared de la tubería que lleve a su colapso, como se ilustra en la figura 2.2.1. Cuál es la depresión mínima que puede producir el colapso no es fácil establecerlo, 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.

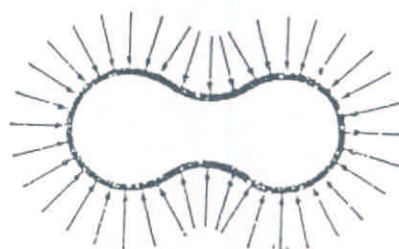
### 2.2.2 Separación de la columna líquida

Si la tubería no se colapsa, el descenso de la presión en el interior de la misma puede dar origen a la vaporización del agua a la temperatura ambiente. En efecto, si la presión absoluta se aproximase a 0.25 m.c.a. 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 reducción veloz del volumen puede llevar a que las columnas líquidas separadas por la burbuja choquen violentamente. En la figura 2.2.2 se ilustra esta secuencia. Para evaluar el incremento de presión que puede sobrevenir como producto del choque se emplea la relación ya vista en III 3.9.3

$$|\Delta h| = \frac{a}{gA} |\Delta Q|$$



a) Tubería depresión



b) Tubería colapso

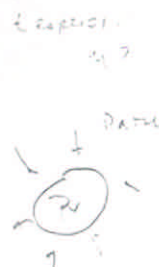
Fig 2.2.1 Colapso de la tubería por depresión.

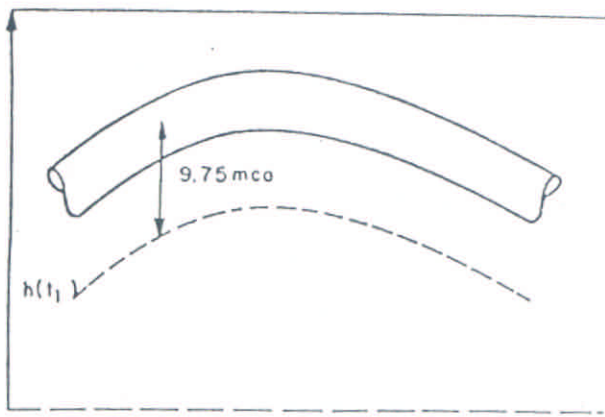
Ver fórmula de colapso para tubería de acero

$$P_{crit} = \frac{2.5E t^3}{(1-\mu^2) D^3}$$

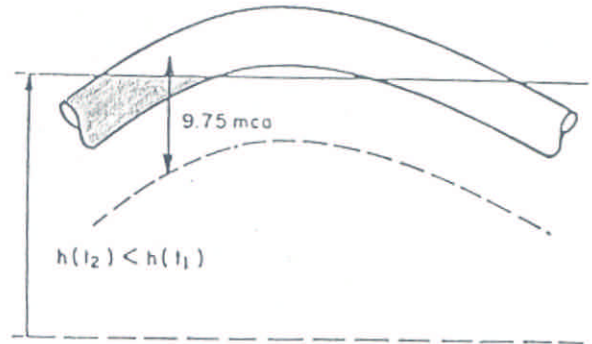
↓

$$P_{ext} = P_{int}$$

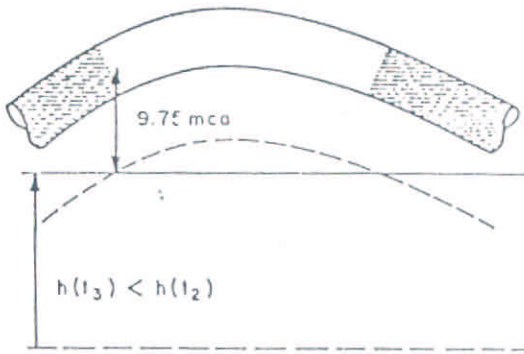




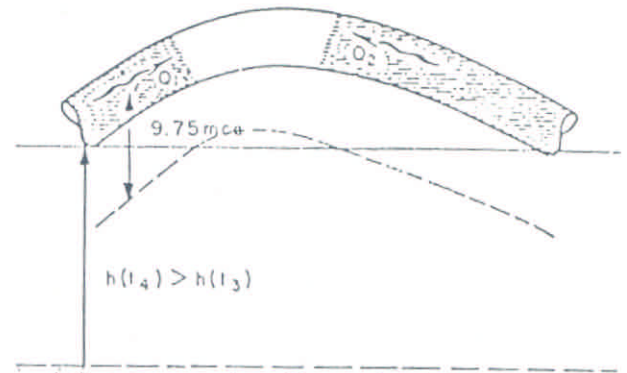
(a)  $t=t_1$  la presión comienza a descender



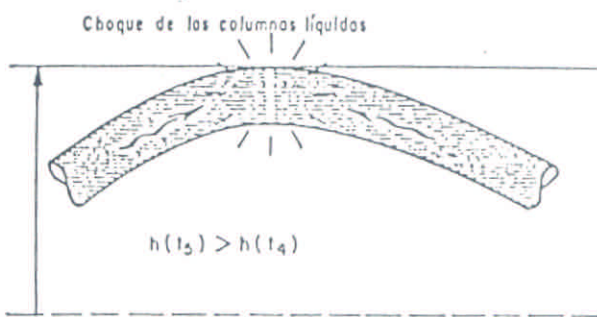
(b)  $t=t_2$ , la presión sigue descendiendo



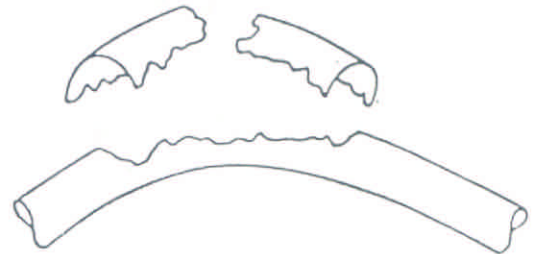
(c)  $t=t_3$ , se forma la burbuja de vapor



(d)  $t=t_4$ , crece la presión se reduce la burbuja



(e)  $t=t_5$ , la burbuja desaparece



(f)  $t=t_6$ , rotura de la tubería por sobrepresión

Fig 2.2.2 *Proceso de separación y reintegración de la columna líquida.*

donde, para este caso, se tiene aproximadamente, según puede demostrarse:

$$|\Delta Q| = \frac{Q_1 + Q_2}{2}$$

recordando que  $a \approx 1000 \text{ m/s}$  y  $g \approx 10 \text{ m/s}^2$ , el lector puede apreciar que para  $\Delta Q/A$  del orden de  $1 \text{ m/s}$ , se tiene  $\Delta h$  del orden de  $100 \text{ m.c.a.}$  Por ello, este fenómeno de la reintegración de la columna líquida, debe ser evitado en las conducciones que no se diseñen especialmente para soportarlo.

### 2.2.3 Entrada de aire en la tubería

La tercera clase de fenómenos asociados a la depresión en un tramo de una tubería es la entrada de aire atmosférico, en virtud de las conexiones con la atmósfera que la tubería debe tener a través de las 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 pueden generarse. Uno de estos fenómenos fue estudiado en II.4.2.3 y consiste en el aumento de presión que puede sobrevenir en un orificio cuando el peso específico del fluido pasa 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 accidental de aire por lugares no previstos de la conducción deberá evitarse su entrada. El otro fenómeno se estudiará en el capítulo 4 de este fascículo y, como se verá, pequeñas cantidades de aire en la conducción pueden aumentar las sobrepresiones esperadas para un golpe de ariete sin aire.

### 2.3 Problemas de sobrevelocidad

Al sufrir un paro accidental debido al cese del suministro eléctrico, las bombas hidráulicas quedan libradas 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. El lector comprenderá de inmediato que si esta velocidad en reversa aumenta por sobre la velocidad de régimen de la máquina, las partes que giran serán sometidas a esfuerzos debido a la fuerza centrífuga que son proporcionales, como lo es la aceleración centrípeta, a  $N^2$  donde  $N$  es la velocidad angular de rotación. Por lo tanto si  $N/N_R = 1.4$  siendo  $N_R$  la velocidad angular de diseño, 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.



## 2.4 Conclusiones

Estos son los problemas de mayor significación que el proyectista deberá resolver en el diseño de la conducción. En lo que sigue de este fascículo y haciendo uso de la teoría ya desarrollada en el fascículo III, se le darán al proyectista los elementos para saber cómo evaluar y controlar los problemas descritos.

## 3. LUGAR GEOMETRICO DE LAS CARGAS PIEZOMETRICAS MAXIMAS O MINIMAS

Una herramienta que se emplea comúnmente para determinar la existencia de sobrepresiones o depresiones en algunos puntos de una tubería, durante el fenómeno transitorio hidráulico, es el lugar geométrico de las cargas piezométricas máximas o mínimas.

### 3.1 Cargas piezométricas máximas o mínimas

La carga piezométrica  $h = p/\gamma + z$  medida desde un nivel de referencia  $z = 0$ , depende, como se vió en el fascículo III, del punto de la tubería considerado  $s$  y del tiempo  $t$

$$h = h(s,t) \quad (3.1.1)$$

Si se considera un transitorio hidráulico, para un punto determinado ( $s$  fijo)  $h$  evoluciona con el tiempo durante dicho transitorio. Se denominará  $h_M(s)$  al valor máximo que  $h$  toma en dicha evolución en el punto  $s$  y  $h_m(s)$  al valor mínimo, esto es

$h_M(s)$  - valor máximo de  $h$  en  $s$  durante el transitorio hidráulico (3.1.2)

$h_m(s)$  - valor mínimo de  $h$  en  $s$  durante el transitorio hidráulico

### 3.2 Lugar geométrico de las cargas piezométricas máximas o mínimas

Se denomina lugar geométrico de las cargas piezométricas máximas a la función:

$$h = h_M(s) \quad \text{para} \quad 0 \leq s \leq \ell \quad (3.2.1)$$

siendo  $\ell$  la longitud de la tubería.

Análogamente, se denomina lugar geométrico de las cargas piezométricas mínimas, a la función:

$$h = h_m(s) \quad \text{para} \quad 0 \leq s \leq \ell \quad (3.2.2)$$

En la figura 3.2.1 (a), se presenta la instalación de bombeo ya vista en III.5.6 a la cual se le ha incorporado una válvula esférica en la descarga de la bomba. El cierre de dicha válvula se efectúa en 30 segundos. El propósito de la válvula es evitar el vaciado del tanque de aguas arriba cuando se detiene el bombeo. Asimismo, se ha definido un trazado en elevación de la tubería. En (b) de la misma figura se presenta la evolución de  $h$  con el tiempo para el transitorio provocado por el paro accidental de la bomba en tres puntos de la tubería ( $s = 0$ ,  $s = \ell/3$ ,  $s = 2\ell/3$ ). En dichas gráficas se han marcado los puntos  $h_M$  y  $h_m$  correspondientes. Finalmente en la figura 3.2.1 (c) se presentan  $h_M(s)$  y  $h_m(s)$  para  $0 \leq s \leq \ell$ .

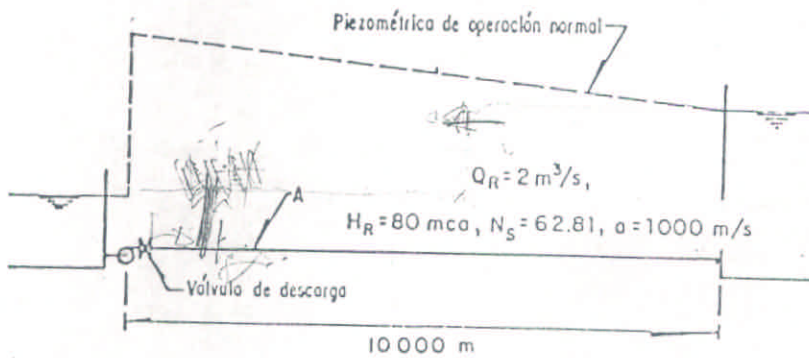
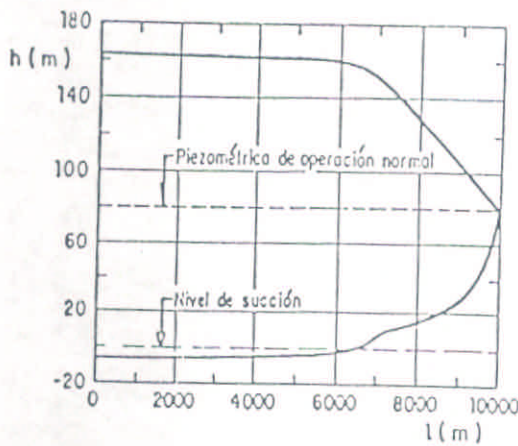


Fig 3.2.1a Esquema del sistema de bombeo estudiado.



Tiempo de cierre de la válvula de descarga  $t_c = 30s$

Fig 3.2.1c Lugar de las piezométricas máximas y mínimas para el sistema sin disposición de control de transitorios.

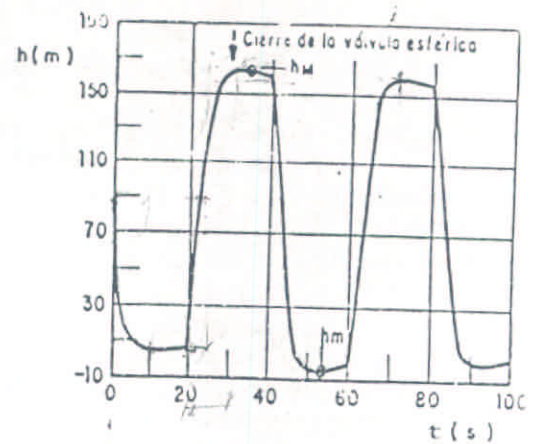


Fig 3.2.1b Evolución de  $h$  en el tiempo en la descarga de la bomba ( $s = 0$ ).

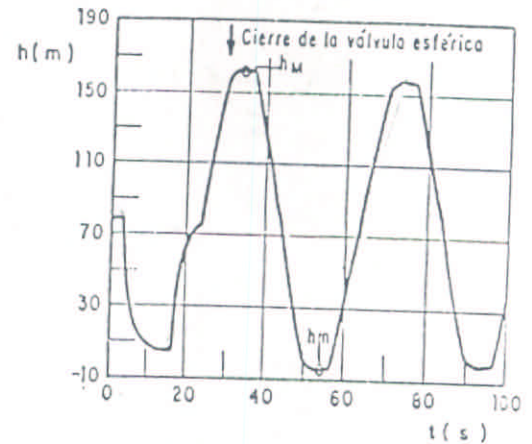


Fig 3.2.1b Evolución de  $h$  en el tiempo en  $s = l/3$ .

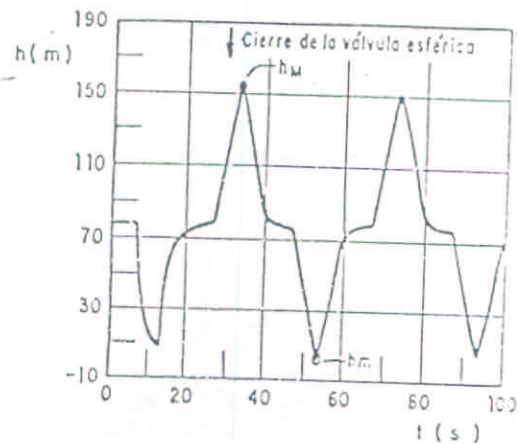
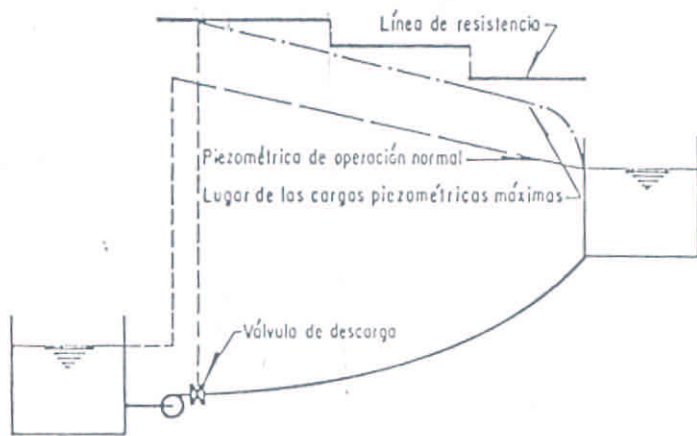


Fig 3.2.1b Evolución de  $h$  en el tiempo en  $s = 2l/3$ .

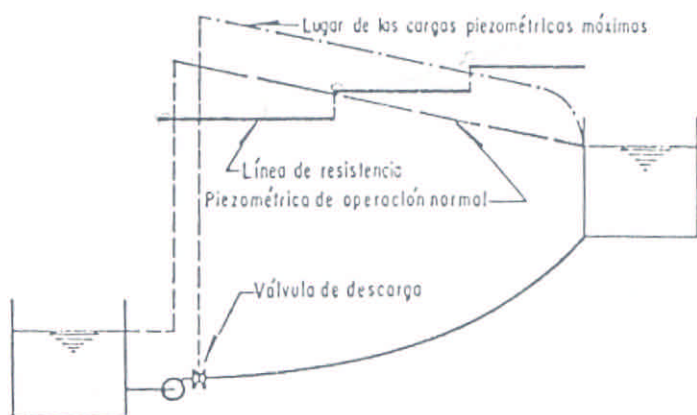
Por el cierre de la válvula el mínimo producido en el  $t$  de la parada de la bomba.

### 3.3 Examen de las sobrepresiones

A partir de definir el lugar de las cargas piezométricas máximas en cada punto de la tubería, queda establecida la resistencia mínima que la tubería debe poseer para soportar dichas cargas piezométricas. Dibujando por sobre el perfil de la tubería una línea que diste de la tubería, en vertical y a la escala del dibujo, una distancia igual al valor de la presión manométrica que la tubería soporta, expresada en m.c.a., el lugar de cargas piezométricas máximas debe localizarse dentro de la franja comprendida entre el perfil de la tubería y la "línea de resistencia" de la tubería. Si el lugar de cargas piezométricas máximas escapara fuera de la franja indicada, en los tramos donde ello ocurra la tubería corre peligro de rotura en un transitorio hidráulico. En la figura 3.3.1 (a) se muestra un acueducto seguro respecto a las sobrepresiones y en la 3.3.1 (b) un acueducto con riesgo de rotura por sobrepresión.

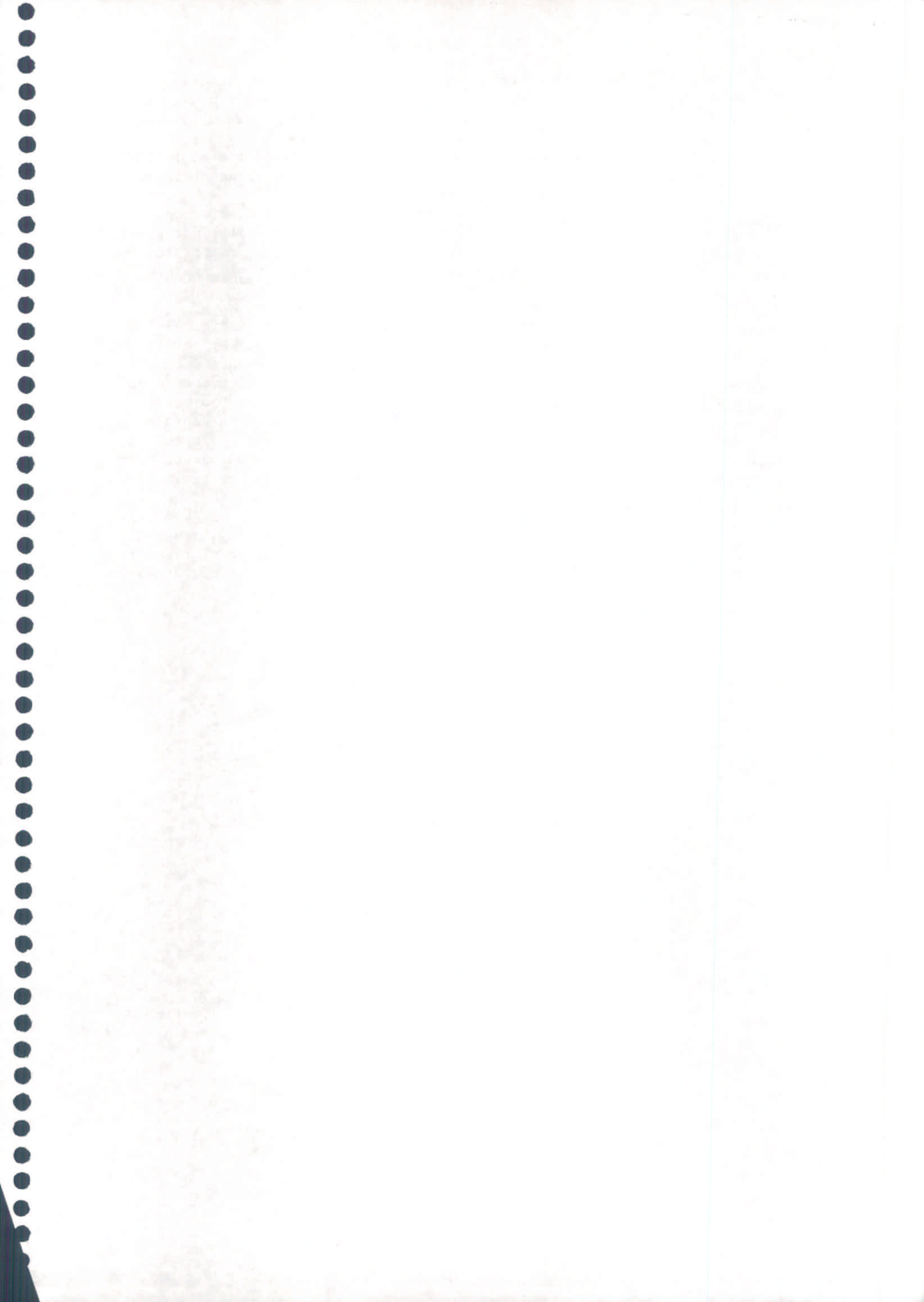


a) Instalación segura frente a las sobrepresiones

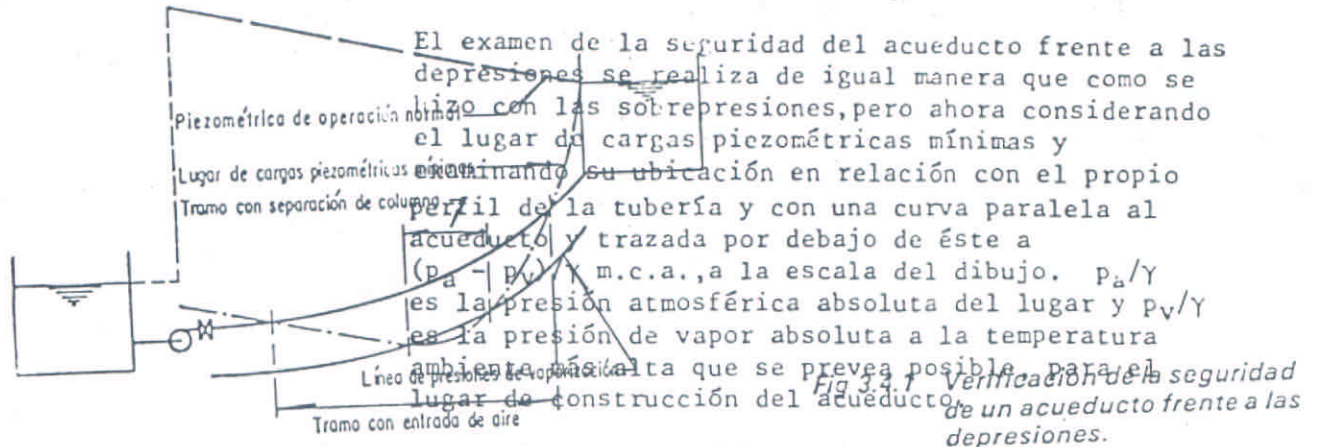


b) Instalación con riesgo de rotura frente a las sobrepresiones

Fig 3.3.1 Verificación de la seguridad de un acueducto frente a las sobrepresiones.



### 3.4 Examen de las depresiones

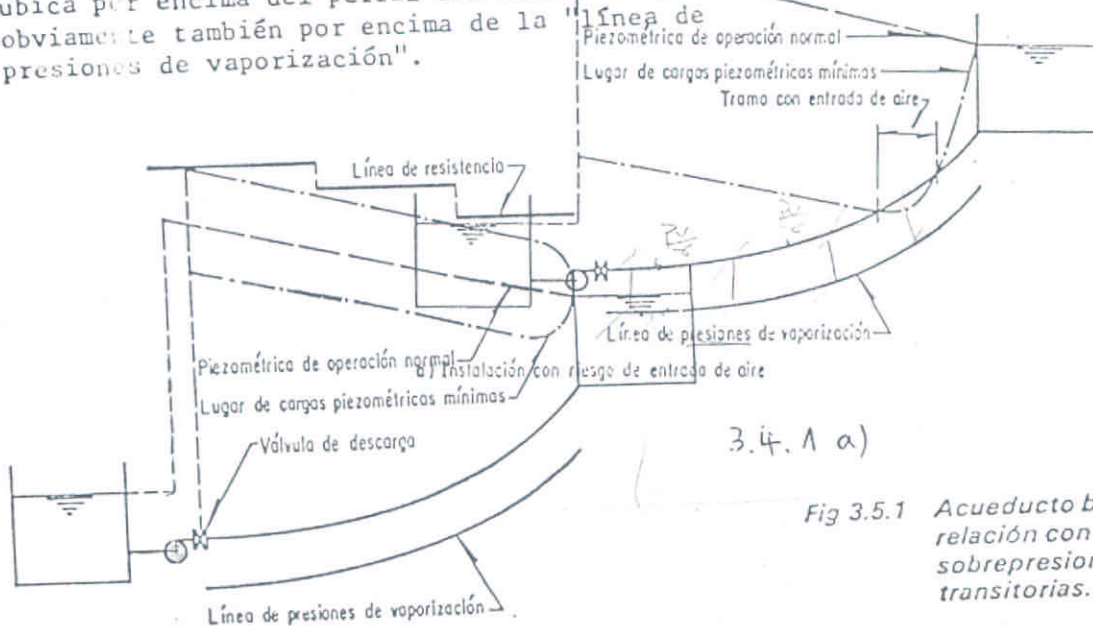


b) Instalación con riesgo de separación de columna. En la figura 3.4.1 (a) la línea que indica el lugar de cargas piezométricas mínimas corta el perfil del acueducto pero no la "línea de presiones de vaporización".

3.5 Acueducto bien diseñado en relación con las sobrepresiones y depresiones transitorias hidráulico del perfil del acueducto, hay riesgo de entrada de aire a la instalación. En esta figura sin embargo

De lo expuesto anteriormente se deduce que un acueducto bien diseñado tiene el comportamiento que describe en la figura 3.5.1 frente a las sobrepresiones y a las depresiones. En efecto, examinando las líneas representativas de los lugares de cargas piezométricas máximas y mínimas se observa que:

- 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".







En consecuencia, en dicho acueducto no existe el peligro de rotura de la tubería por sobrepresiones transitorias ni el peligro tampoco de entrada de aire a la conducción. En el capítulo siguiente se examinará en detalle cuáles son los problemas que trae consigo la entrada de aire a la conducción.

#### 4. PROBLEMAS DE LA INCORPORACION DE AIRE EN LA TUBERIA

##### 4.1 Problema de la expulsión del aire

En II.4.2.3 se examinó uno de los problemas que causa la incorporación de aire a la tubería. Se trataba del problema de la expulsión posterior de ese volumen de aire por alguna conexión entre la tubería y la atmósfera. Estas conexiones pueden ser las válvulas de expulsión rápida de aire o también de conexión de la tubería con un tanque de oscilación o almacenamiento. La expulsión puede generar un golpe de ariete en la conexión de la tubería a la atmósfera puesto que, para igual diferencia de presión a través de un orificio (la conexión a la atmósfera), el gasto de agua expulsado es 29 veces menor que el gasto de aire expulsado para dicha diferencia de presión. Por lo tanto, cuando la burbuja de aire contenida dentro de la tubería es expulsada, el agua que la sigue sufre un verdadero choque contra el orificio. Ello produce un súbito descenso de la velocidad ( $\Delta V$ ) con la que estaba fluyendo el agua que era la velocidad con que fluía la columna de aire. Este descenso de velocidad produce un incremento de carga en la conexión de  $|\Delta h| = |\Delta V| a/g$ . Siendo  $a \approx 1000$  m/s y  $g \approx 10$  m/s<sup>2</sup>, el factor  $a/g$  vale  $\approx 100$ . Si  $\Delta V = 1$  m/s se tendrá  $\Delta h = 100$  m.c.a. En consecuencia el lector constatará que un proceso de incorporación de aire con posterior expulsión en algún punto del acueducto puede dar lugar a golpes de ariete con origen en dicho punto y cuya magnitud puede ser peligrosa.

Si bien el fenómeno descrito ya es de por sí suficiente riesgoso como para que en el proyecto se procure evitar la entrada al acueducto de aire atmosférico, no es sin embargo el único fenómeno peligroso relacionado con la entrada de aire en la conducción.

A continuación se explicará otro fenómeno de sobrepresiones que están creadas también por la entrada del aire a la conducción.

##### 4.2 Problema de la compresión del aire

Considérese el acueducto que se presenta en la

figura 4.2.1. En la figura 4.2.1 a se observa el siguiente problema ante el paro accidental de la bomba; el lugar de las piezométricas mínimas corta el perfil de la tubería generándose en consecuencia una leve depresión que no separa la columna. Sin embargo, el acueducto carece en esa zona de válvulas de admisión de aire y el problema de operación consiste en que al regresar la onda de depresión generada por el paro de la bomba se refleja como una onda de sobrepresión en la válvula de retención a la que encuentra cerrada. Ello produce una sobrepresión máxima que puede estimarse del orden de  $aQ_0/gA$ .

Con el fin de evitar esta sobrepresión el proyectista, sin mayor análisis del problema, decide colocar una válvula de admisión de aire (figura 4.2.1 b). Dicha válvula, al operar por la depresión creada debida al paro accidental de la bomba, permite la entrada de un volumen  $\psi$  de aire.

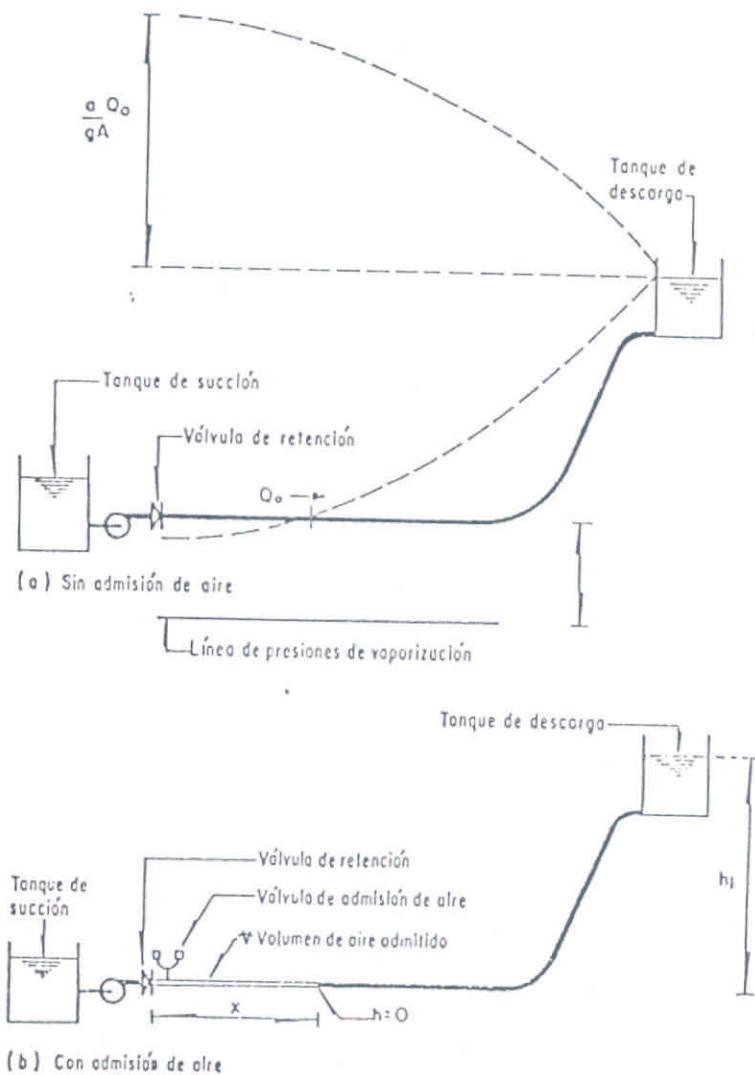


Fig 4.2.1 Problema de la compresión del aire admitido.

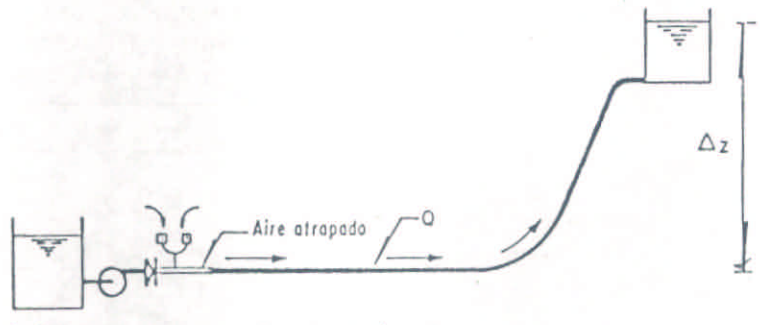
Se supone que el aire que entra a la tubería a través de la válvula se mantiene como una masa concentrada y no se distribuye a lo largo de la tubería. Se admite además que esa masa de aire se comprime y expande mediante un proceso isotérmico valiéndose la relación:

$$p \Psi = \text{cte} \quad (4.2.1)$$

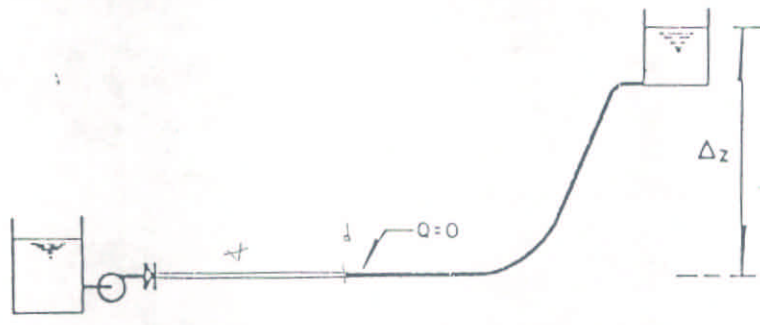
siendo  $p$  la presión absoluta y  $\Psi$  el volumen de aire.

La columna de agua se considera incompresible y no se consideran pérdidas por fricción ni concentradas.

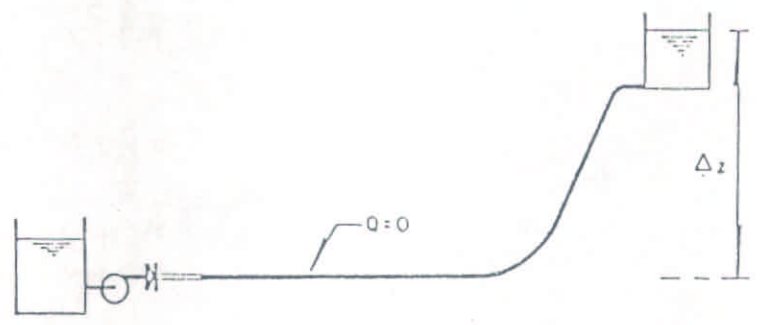
El fenómeno en estudio se muestra en la figura 4.2.2 a, b y c.



(a) Falla la bomba y entra aire a la tubería por la válvula de admisión de aire.



(b) El flujo se detiene ( $Q=0$ ). En el instante siguiente se cerró la válvula de retención y el aire atrapado se comprimirá.



(c) El aire finaliza su compresión. Nuevamente  $Q=0$

Fig 4.2.2 Evolución del aire dentro la tubería.

El análisis se hace partiendo de un estado inicial que corresponde a la figura 4.2.2 b y que se esquematiza en la figura 4.2.3 llegándose al estado final que corresponde a la figura 4.2.2 c que se esquematiza en la figura 4.2.4.

Llamando  $p_i$ ,  $V_i$  y  $p_f$ ,  $V_f$  a la presión y el volumen del aire en la situación inicial y final respectivamente, se cumplirá por (4.2.1)

$$p_i V_i = p_f V_f \quad (4.2.2)$$

y para cualquier instante intermedio se puede escribir:

$$p = \frac{p_i V_i}{V} \quad (4.2.3)$$

Por otra parte se cumple que:

$$V = x A \quad (4.2.4)$$

siendo A el área de la sección transversal de la tubería y x la longitud de la burbuja según se indica en la figura 4.2.4, por lo tanto:

$$p = \frac{p_i V_i}{xA} \quad (4.2.5)$$

La fuerza necesaria para comprimir el aire será entonces:

$$F = pA = \frac{p_i V_i A}{xA} \quad (4.2.6)$$

y el trabajo necesario para llegar a la posición final:

$$\int_{x_i}^{x_f} -F dx = -p_i V_i A \int_{x_i}^{x_f} \frac{1}{xA} dx = p_i V_i \ln \frac{V_i}{V_f} \quad (4.2.7)$$

La energía contenida en el aire comprimido evaluada por (4.2.7) tiene que ser igual a la pérdida de energía potencial de la masa de agua que ocupa el volumen  $V_i - V_f$  al descender  $\Delta z$  (figura 4.2.4). Por lo tanto

$$E_p = mg \Delta z = \gamma (V_i - V_f) \Delta z \quad (4.2.8)$$

e igualando con (4.2.7) y eliminando el logaritmo se obtiene:

$$\frac{V_i}{V_f} = e^{\gamma \left(1 - \frac{V_f}{V_i}\right) \frac{\Delta z}{P_i}} \quad (4.2.9)$$

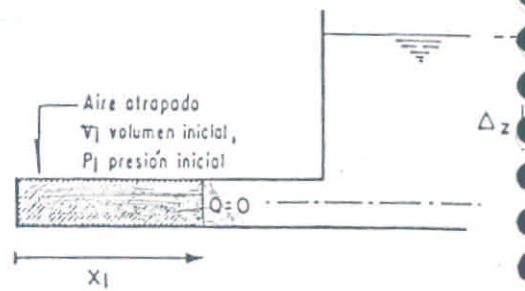


Fig 4.2.3 Estado inicial del aire atrapado.

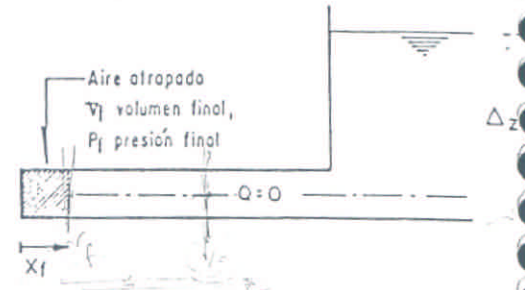


Fig 4.2.4 Estado final del aire atrapado.

Handwritten notes:  $\ln(A_i)$ ,  $\gamma \Delta z = \gamma$ ,  $p_i V_i \ln \frac{V_i}{V_f} = \gamma (V_i - V_f) \Delta z$

Handwritten notes:  $p_i V_i \ln \frac{V_i}{V_f} = \gamma (V_i - V_f) \Delta z$   
 ganancia de  
 del gas  
 14  
 pérdida de  
 =  $\gamma (V_i - V_f) \Delta z$

o bien recordando (4.2.2) resulta:

$$\frac{P_f}{P_i} = e^{\frac{\gamma}{\rho_i} \left(1 - \frac{v_f}{v_i}\right) \Delta z} \quad (4.2.10)$$

Suponiendo conocida la magnitud  $\Delta z$  y la presión  $p_i$  (usualmente la presión atmosférica) la fórmula anterior permite acotar la presión máxima esperada  $p_f$ . En efecto, de (4.2.10) se obtiene que la peor condición es  $v_f/v_i \ll 1$ , en consecuencia, la relación  $p_f/p_i$  máxima será:

$$\max \left( \frac{P_f}{P_i} \right) = e^{\frac{\Delta z}{10}} \quad (4.2.11)$$

admitiendo  $p_i/\gamma = 10$  m.c.a. Para  $\Delta z = 30$  m por ejemplo (4.2.11) da  $\max (p_f/p_i) = 20$ , lo cual implica una presión  $p_f \approx 200$  m.c.a.

Como el lector observará el fenómeno descrito puede causar sobrepresiones considerables en el acueducto, en particular si  $v_f/v_i \ll 1$  y  $\Delta z/10 \gg 1$ .

## 5. CONDICIONES DE OPERACION MAS DESFAVORABLES

Examinados los tres tipos de problemas que ocurren en las conducciones de agua a presión (sobrepresiones, depresiones y sobrevelocidad), es necesario analizar en qué condiciones de operación del acueducto puede sobrevenir uno u otro tipo de problema.

### 5.1 Condiciones de operación

Es rara la instalación que posee una sola condición de operación, esto es, un solo gasto  $Q$  y una sola carga estática de bombeo  $H_e$ . En general, el acueducto se debe diseñar para operar correctamente con varios gastos  $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$ . En dicho caso el acueducto debe disponer de varias máquinas en paralelo. Sean  $m$  dichas máquinas. Es más preciso caracterizar la condición de operación por el número de bombas en paralelo que están trabajando. Asimismo pueden variar las cargas estáticas de bombeo por variación de los niveles de los tanques de succión y de descarga. En particular, este último fenómeno es muy acentuado cuando el tanque de succión es una presa cuyo nivel está condicionado al balance hidrológico. Las cargas estáticas se designarán como  $H_{e1}, H_{e2}, \dots, H_{en}$ . En consecuencia, las condiciones de operación pueden representarse en un cuadro como el que se indica a continuación donde se ha caracterizado el gasto por el número de máquinas en operación.

Cada casillero del cuadro 5.1.1 puede representar una condición de operación posible. Puede ocurrir que haya cuadros vacíos (condiciones imposibles) en los que el acueducto no pueda operar por salirse las máquinas del intervalo de operación recomendado por el fabricante. En todas las condiciones posibles el acueducto debe operar satisfactoriamente. Esto es, no debe presentar problemas de sobrepresiones, depresiones y sobrevelocidades que afecten a las tuberías o a las máquinas.

Cuadro 5.1.1 Cuadro de las posibles condiciones de operación.

$H$	$m$	1	2	....	$m$
$H_{e1}$					
$H_{e2}$					
⋮					
$H_{en}$					

$$H_{e1} > H_{e2} \dots \dots > H_{en}$$

## 5.2 Condiciones de operación más adversas

Para el proyectista es necesario tener idea en cuanto a cuáles condiciones de operación son las más adversas en relación con las sobrepresiones, cuáles son las más adversas en relación con las depresiones y cuáles lo son para la sobrevelocidad.

Al decir condición más adversa se entiende que es la condición que pone en mayor peligro estructural la instalación.

Importa tener una orientación al respecto puesto que es en estas condiciones más adversas en las que debe estudiarse el comportamiento del sistema. Si en ellas el comportamiento es satisfactorio, puede inferirse que en cualquier otra condición el peligro será menor.

En general no puede decidirse con todo rigor cuáles serán las condiciones más adversas. Ello depende considerablemente de las condiciones particulares de cada instalación, en especial de la longitud de la tubería y de las curvas características de la máquina. Sin embargo, de la experiencia que poseen los autores en diversos acueductos industriales de diferentes dimensiones y características, un punto de partida adecuado para el análisis durante el proyecto es el que se indica en el cuadro 5.1.2.

Debe insistirse que el cuadro 5.1.2 solo debe servir de orientación al proyectista. Puede haber casos particulares en que las condiciones más adversas no sean las que allí se establecen. Sin embargo advierte al proyectista de un hecho muy significativo y éste es que rara vez la condición de máximo gasto (número de máquinas  $m$  y mínima carga estática  $H_{en}$ ) es la condición más adversa para los tres problemas que deben examinarse siempre en la etapa de diseño.

Cuadro 5.1.2 Condición más adversa de operación

	Número de máquinas	Carga Estática
Sobrepresiones	$m$	$H_{e1}$
Depresiones	$m$	$H_{en}$
Sobrevelocidad (*)	1	$H_{e1}$

(\*) La sobrevelocidad debe examinarse siempre bajo la hipótesis de que la válvula en la descarga de la bomba no cierre luego del paro accidental.

## 6. DISPOSITIVOS DE CONTROL

El propósito de los dispositivos de control de los transitorios hidráulicos es evitar el daño estructural que puede producir el golpe de ariete generado por el paro accidental de la planta de bombeo sobre las tuberías y/o las máquinas. En este capítulo se examinarán en detalle cinco de estos dispositivos, a saber: el tanque de oscilación, el tanque unidireccional, la cámara de aire, la válvula de alivio y el incremento de la inercia  $WR^2$  de la unidad motor - bomba. Antes de abordar el exámen de cada uno de estos dispositivos, se le presentará al lector en forma cualitativa el fenómeno de golpe de ariete que produce una bomba al detenerse en forma accidental cuando alimenta una tubería suficientemente larga.

### 6.1 Golpe de ariete creado por la detención de una bomba

#### 6.1.1 Paro programado y paro accidental

La detención de una bomba puede ser realizada por el operador (paro programado) o producirse por interrupción del suministro de energía eléctrica al

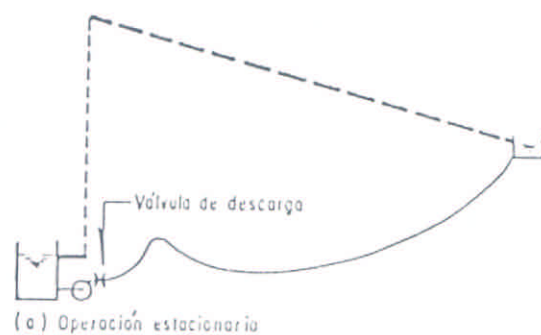
motor de la bomba (paro accidental). El paro accidental puede deberse a un problema que afecta a la planta de bombeo en su conjunto (por ejemplo la caída de un rayo en la subestación eléctrica) o puede deberse a un problema que afecta a una máquina solamente (por ejemplo sobrecalentamiento de una chumacera que acciona la protección correspondiente, deteniendo la máquina).

La diferencia esencial entre el paro programado y el paro accidental radica en que, en el primero, el paro comienza con el cierre, a velocidad controlada, de la válvula de descarga de la unidad y la bomba se desenergiza luego de que dicha válvula cerró completamente. En el paro accidental lo primero que ocurre es que la máquina se desenergiza. Ello elimina el par motor (de origen eléctrico) sobre la bomba y ésta queda librada a la acción del fluido sobre ella. El cierre de la válvula de descarga se produce en una segunda etapa, y por medios mecánicos puesto que el suministro eléctrico puede estar cortado. La acción del fluido sobre la bomba en un acueducto globalmente ascendente implica, luego de unos pocos segundos, que el flujo invertido por la acción de la gravedad lleva a la máquina a la condición de turbina girando en sentido inverso. Si este flujo invertido se mantiene, la máquina puede ir incrementando su velocidad de rotación invertida y sobrepasar los límites de sobrevelocidad establecidos por el fabricante (por ejemplo 140 % de la velocidad de rotación en régimen). Ello puede ocasionar daños muy serios a la máquina por las tensiones centrífugas que se producen en el rodete y los empujes incrementados sobre las chumaceras. El cierre de la válvula de descarga interrumpe el flujo inverso y detiene a la máquina.

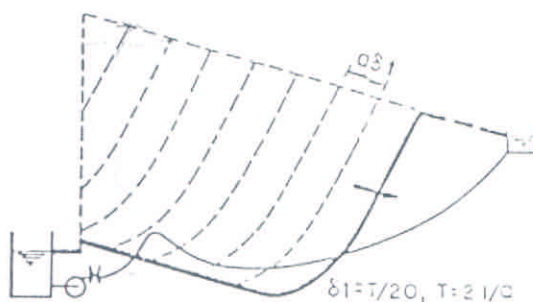
Por todo lo dicho el lector comprenderá que el paro accidental es la causa de los transitorios más peligrosos y donde la máquina se expone más a sufrir daños significativos. Con estas ideas claras invitamos al lector a examinar el comportamiento de una instalación real ante el paro de la planta de bombeo.

### 6.1.2 Examen del golpe de ariete causado por el paro de la planta de bombeo

En la figura 6.1.1 se muestra el efecto sobre la instalación del paro accidental. En (a) antes del paro, en (b)  $8\delta t$  después del paro siendo  $\delta t = T/20$  donde  $T = 2L/a$  y en (c)  $10\delta t$  después del paro cuando la onda llega al tanque de descarga. Se observa con claridad que en esta primera fase los problemas que pueden presentarse en el acueducto son problemas de depresión.

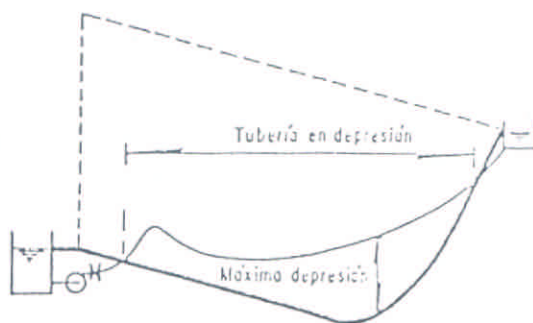


(a) Operación estacionaria



$a$ : Celeridad de la onda ( $\sim 1000$  m/s)

(b) Estado del sistema  $8\delta t$  después del paro



(c) Estado del sistema  $10\delta t$  después del paro

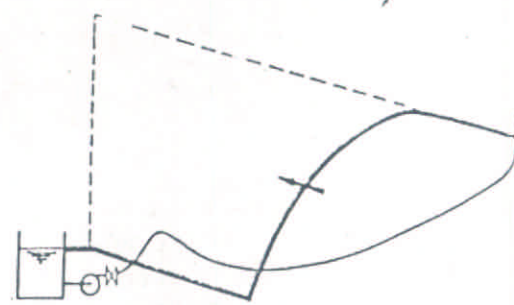
Fig 6.1.1 Paro accidental de una planta de bombeo. Fase desde  $t = 0$  a  $t = 1/a$ .



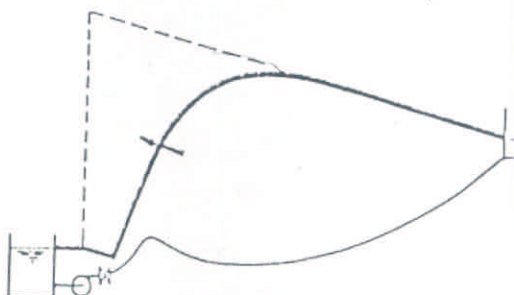
En la figura 6.1.2 a se presenta la segunda fase del fenómeno que se inicia con la reflexión de la onda opuesta en el tanque de descarga. La onda de sobrepresión resultante lleva el acueducto a una situación muy similar a la de partida (figura 6.1.2 b) en tanto llega a la válvula de descarga. Si esta válvula se encuentra abierta el proceso de reflexión es complejo y puede afectar negativamente la sobrevelocidad inversa que se produce en la máquina si la válvula de descarga cerrase lentamente. Si por el contrario la onda encontrase la válvula cerrada, se produce una reflexión de la misma onda (sobrepresión) (c) por lo cual en la fase siguiente se propaga esta onda de sobrepresión a lo largo de la tubería (figura 6.1.3 a) para reflejarse en el tanque de descarga como una onda de depresión de igual magnitud (b) que al llegar a la válvula de descarga cerrada se refleja como onda de depresión y se reinicia el ciclo que comenzó con el paro de la bomba. Como puede observarse, la tubería está sometida a las siguientes fases durante el ciclo de  $4l/a$  de duración siempre que la válvula de descarga cierre en un tiempo menor que  $2l/a$ .

Primera fase	Depresión
Segunda fase	Presión de trabajo
Tercera fase	Sobrepresión
Cuarta fase	Presión de trabajo

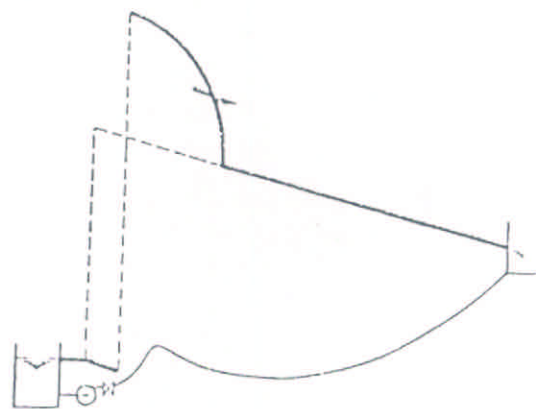
Estos fenómenos son los que deben controlarse mediante dispositivos que los eviten o los reduzcan. El proceso que se ha descrito corresponde a un fenómeno rápido de acuerdo a la clasificación realizada en 11.3.11. En las secciones siguientes se examinarán cinco dispositivos de control de transitorios.



(a) Reflexión de la onda en el tanque de descarga

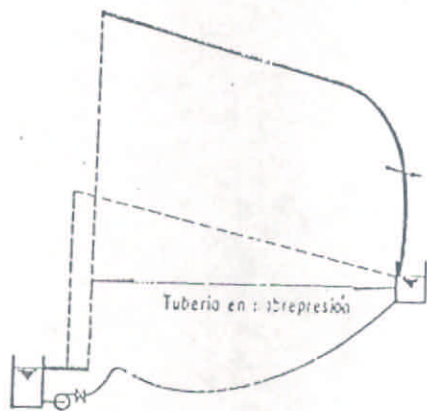


(b) La onda llega a la válvula de descarga cerrada en  $t=2l/a$

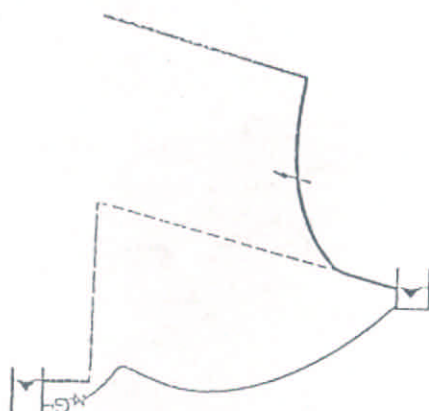


(c) La onda se refleja en la válvula de descarga cerrada

Fig 6.1.2 Paro accidental de una planta de bombeo. Fase desde  $t > 2l/a$  a  $t < 3l/a$ .



(a) La onda de sobrepresión llega al tanque de descarga  $t=3l/a$



(b) La onda de depresión se refleja en el tanque de descarga

Fig 6.1.3 Paro accidental de una planta de bombeo. Fase desde  $t = 3l/a$  a  $3l/a < t < 4l/a$ .

## 6.2 Tanque de oscilación

En la figura 6.2.1 se presenta el esquema de un tanque de oscilación. Se trata de un tanque cuya sección recta tiene un área  $A_T$  sustancialmente mayor que el área  $A$  de la tubería. La relación  $A_T/A$  debe ser suficientemente grande como para que los movimientos verticales del agua en el tanque, durante el fenómeno transitorio, tengan aceleraciones despreciables frente al gradiente hidrostático que es la aceleración de la gravedad. De acuerdo a lo visto en III.3.11 referido al comportamiento de un tanque de carga constante, se trata de que el tanque de oscilación trabaje como un tanque de carga constante durante el transitorio hidráulico. Ello implica que la onda incidente se refleje completamente y que la tubería que sale del tanque y en la cual no se produce la perturbación se mantenga como zona no perturbada. En la figura 6.2.2 se presenta en forma gráfica la operación idealizada de un tanque de oscilación ante una onda de depresión. El lector se preguntará cuál es la relación  $A_T/A$  mínima para obtener un comportamiento razonablemente bueno en un tanque real con  $A_T$  finita. En la figura 6.2.3 se contesta esta pregunta mediante una gráfica construida a partir de una evaluación teórica y datos experimentales proporcionados en el trabajo de Mosonyi y Seth ("The surge tank - a device for controlling water hammer", Mosonyi, E. y Seth, H., Water Power and Dam Construction, Part I, Febrero 1975, Part II, Marzo 1975) que es una referencia obligada para quien desee un análisis detallado del comportamiento de estos dispositivos.

De la figura 6.2.3 se deduce que si se desea una reflexión no menor que el 90% (coeficiente de reflexión  $S \leq 0.1$ ) la relación  $A_T/A$  debe ser no menor que 16.

### 6.2.1 Cómo controla el golpe de ariete un tanque de oscilación

En la figura 6.2.4 se presenta, en forma gráfica, la acción de un tanque de oscilación sobre una instalación similar a la analizada al comienzo de este capítulo. En 6.2.4 a se presenta la primera fase de la evolución de la onda de depresión luego de un paro accidental de la bomba. En 6.2.4 b se observa que la acción del tanque de oscilación consiste en confinar la perturbación en el tramo de tubería comprendido entre la bomba y el tanque. El resto de la tubería no es afectado por la onda de depresión así como tampoco por las fases subsiguientes del fenómeno que se producirán en el tramo comprendido entre la bomba y el tanque.

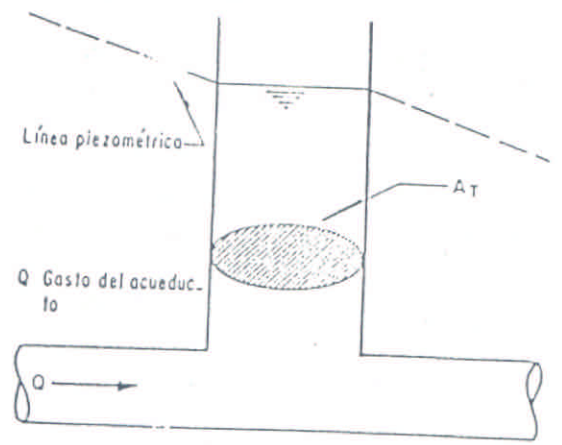
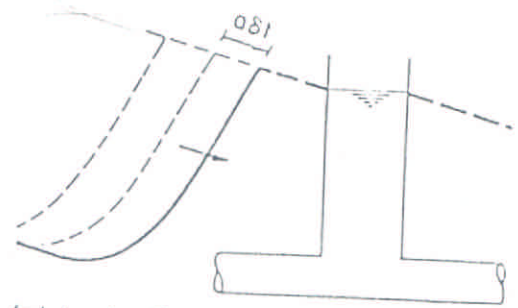
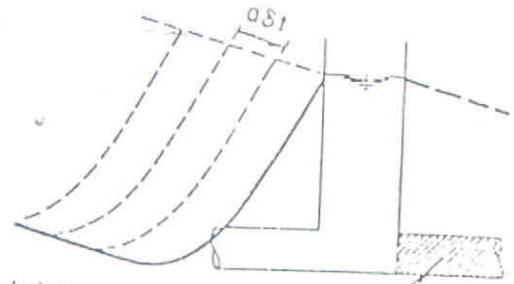


Fig 6.2.1 Esquema de un tanque de oscilación.

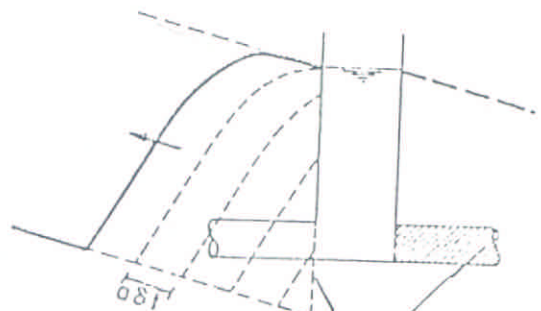


(a) Aproximación de la onda



(b) Llegada de la onda

Zona no perturbada por la onda



(c) Reflexión de la onda

Zona no perturbada por la onda

Fig 6.2.2 Comportamiento del tanque de oscilación ante una onda de depresión.

Nótese que en la operación descrita del tanque de oscilación éste siempre se considera lleno. Ello en general ocurre durante los pocos segundos que dura el fenómeno transitorio. Sin embargo, esto deberá verificarse en el cálculo y, como se verá, el método que será propuesto realiza una evaluación del nivel en el tanque para todo  $t$ . Luego de que el fenómeno transitorio con ondas desaparece puede continuar por decenas de minutos un fenómeno de oscilación de masa entre el tanque de oscilación y el tanque de descarga. En dicho fenómeno no debe vaciarse el tanque de oscilación puesto que, como ya se ha dicho repetidas veces, debe evitarse todo fenómeno capaz de introducir aire a la conducción.

### 6.2.2 Ventajas y problemas del tanque de oscilación

El tanque de oscilación es un dispositivo del cual habitualmente el proyectista conoce las ventajas y desconoce los problemas que trae a la instalación. Ello ha hecho que su aplicación se haya extendido mucho más de lo que hubiera correspondido a partir de un análisis más pormenorizado de las instalaciones de bombeo. Muchas veces el proyectista aconseja el tanque de oscilación por la sencilla razón que es el único dispositivo de control que se tuvo presente cuando se realizó el diseño. En el capítulo 7 de este fascículo se desarrollará un criterio para ayudar al proyectista a la elección, entre diversos dispositivos de control, de aquel más adecuado a la instalación considerada.

Respecto al tanque de oscilación, sus ventajas más notables son dos, a saber:

- 1.- No requiere mantenimiento mecánico
- 2.- El fenómeno de golpe de ariete no afecta el tramo de aguas abajo, no requiriéndose por lo tanto otros dispositivos (dispositivos secundarios).

Los problemas que el tanque de oscilación introduce pueden resumirse en tres, a saber:

- 1.- Su coronamiento debe estar por encima del nivel de la piezométrica para gasto máximo en el punto donde se coloque el tanque, y su desplante debe estar por debajo de la piezométrica correspondiente al gasto nulo, para que no se vacíe.
- 2.- Castiga el tramo entre la planta de bombeo y el tanque, requiriéndose en dicho tramo analizar la resistencia de la tubería a las sobrepresiones.

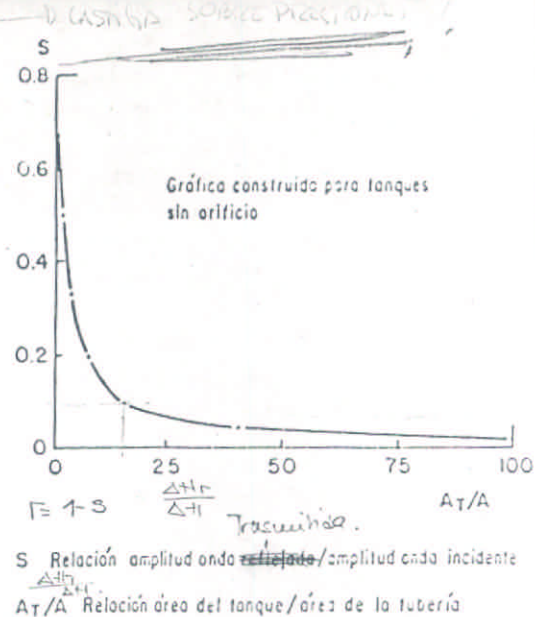


Fig 6.2.3 Coeficiente de reflexión en función de la relación de áreas.

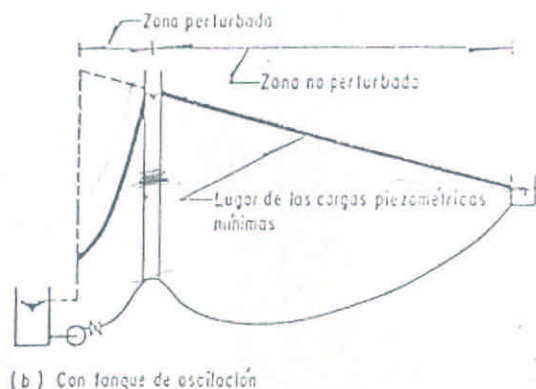
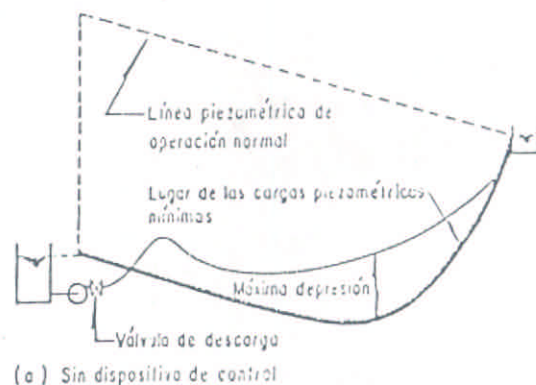


Fig 6.2.4 Acción de un tanque de oscilación en el sistema de bombeo.

3.- Castiga a las máquinas que deberán soportar fuertes velocidades en reversa.

Respecto al problema No. 1, se refiere a que si la piezométrica más alta de operación normal pasase por sobre el coronamiento del tanque, como éste es abierto, se derramaría agua por encima de dicho coronamiento. Por otro lado, el tanque debe permanecer con una buena altura de agua al estar detenido el acueducto puesto que si así no ocurriera al arrancar las máquinas no habría protección alguna durante el tiempo que emplea el tanque en llenarse. Estos dos aspectos obligan en general a buscar puntos altos en la topografía del lugar. Si estos puntos altos no están próximos a la planta de bombeo el proyectista debe decidir entre alejar el tanque o mantenerlo próximo a la planta y elevar su altura para cumplir con la primera exigencia respecto a que el coronamiento debe estar por encima de la piezométrica más alta. Ahora bien, si el tanque por razones de topografía y economía se coloca lejos de la planta, en el entendido de que el paro de la bomba opera como un cierre rápido, deben esperarse sobrepresiones muy considerables en la fase correspondiente a  $2l/a \leq t \leq 3l/a$ . Esto ocurre en virtud de que el cierre es rápido y la disipación por fricción que ayuda a disminuir la amplitud de las ondas prácticamente no influye en tuberías de 1000 a 2000 m. Todo ello obliga a construir con tuberías de acero que en general son más caras que las de otros materiales. A ello se refiere el problema No. 2 expuesto más arriba. Asimismo el hecho de que el tanque deba desplantarse en una elevación del terreno obliga a construir rampas de ascenso que, para tuberías de varios metros de diámetro, pasan a ser las estructuras más caras de todo el sistema.

El problema No. 3 es quizás el más serio y el que menos se considera habitualmente puesto que al efectuarse el proyecto hidráulico las máquinas aún no se han elegido. Por ello se piensa que el problema de la sobrevelocidad podrá ser resuelto imponiéndole al fabricante límites altos. Ello es así por cierto, pero también límites altos en la sobrevelocidad en reversa permitida en la máquina suponen costos constructivos más elevados de la máquina. En consecuencia, un tanque de oscilación ubicado en las cercanías de la planta de bombeo, puede implicar tener que elevar los límites máximos de la sobrevelocidad permitida.

La razón por la cual la máquina es castigada es sencilla de comprender. Al producirse el paro de emergencia, el tanque de oscilación mantiene la

Alta para q' no desborde  
Profunda para q' no  
entre agua

Nivel mínimo en condiciones  
estáticas tal que si al  
arrancar y el tanq' no  
se llenó se cortan las  
bombas momentáneamente  
quien banca el transitorio  
etc...

Desde la onda llega a  
la válvula y vuelve al  
tanq' duplicada

piezométrica como se observa en la figura 6.2.4 b. Sin embargo, en la planta la piezométrica cae decenas de metros en segundos. Este fuerte gradiente de carga piezométrica que va del tanque a la planta, induce muy rápidamente un gasto invertido muy fuerte que pasa a través de las máquinas mientras las válvulas de descarga no cierran. Ello obliga a las máquinas a invertir su rotación e incrementar violentamente la velocidad en reversa.

### 6.2.3 Ecuaciones del tanque de oscilación en una tubería con ondas

En la figura 6.2.5 se presenta el esquema que se empleará para el planteo de las ecuaciones de conservación de masa y dinámica del tanque de oscilación. Ellas son:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= Q_2 + Q_T ; -Q_T = A_T \frac{dZ}{dt} && \text{conservación de la masa} \\ h_1 &= h_2 = Z && \text{dinámica} \end{aligned} \right\} (6.2.1)$$

siendo  $Z$  la cota de la superficie libre medida desde un nivel de referencia dado.

Nótese que la ecuación dinámica implica aceleraciones en el interior del tanque tan pequeñas como para que cualquiera que sea  $Q_T$ , en el fondo del tanque se tenga la presión hidrostática.

Ello es equivalente a admitir <sup>En el tanque</sup> que las aceleraciones son despreciables frente a  $g$ . En consecuencia, dicha ecuación supone relaciones  $A_T/A$  grandes. De acuerdo con la figura 6.2.3 puede considerarse, en una primera aproximación que  $A_T/A > 16$ .

Las ecuaciones (6.2.1) se transforman en el siguiente sistema algebraico lineal, al escribirlas en diferencias finitas:

$$\left. \begin{aligned} Q_{1P} &= Q_{2P} + Q_{TP} \\ Q_{TP} &= A_T \dot{Z}_P \\ \dot{Z}_P &= \frac{Z_P - Z}{\Delta t} \\ h_{1P} &= Z_P \\ h_{2P} &= Z_P \end{aligned} \right\} (6.2.2)$$

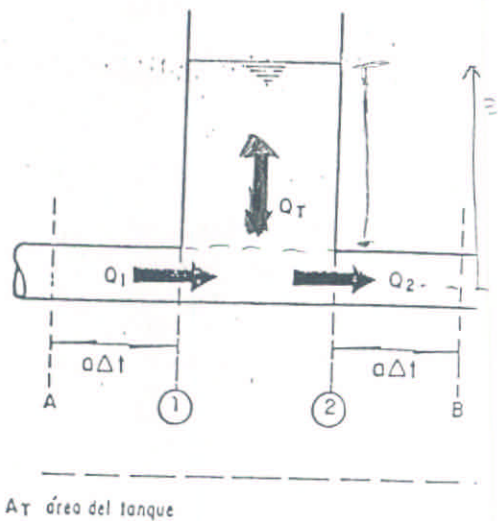


Fig 6.2.5 Esquema para el planteo de las ecuaciones del tanque de oscilación.

(6.2.2) es un sistema con cinco ecuaciones y siete incógnitas,  $Q_{1P}$ ,  $Q_{2P}$ ,  $Q_{TP}$ ,  $Z_P$ ,  $Z_p$ ,  $h_{1P}$  y  $h_{2P}$ . Las dos ecuaciones que faltan son las ecuaciones de las características positiva y negativa en el acueducto, a saber:

$$\left. \begin{aligned} Q_{1P} &= C_p - C_a h_{1P} && \text{característica} \\ &&& \text{positiva} \\ Q_{2P} &= C_n + C_a h_{2P} && \text{característica} \\ &&& \text{negativa} \end{aligned} \right\} (6.2.3)$$

El sistema algebraico lineal de siete ecuaciones (6.2.2) y (6.2.3) con siete incógnitas permite encontrar los valores de  $Q_1, Q_2, Q_T, Z, Z_p, h_1$  y  $h_2$  en el instante  $t$  a partir de los valores correspondientes al instante  $t - \Delta t$ .

En las ecuaciones (6.2.3),  $C_a = gA/a$  y  $C_p$  depende de los valores  $Q_A$  y  $h_A$  en  $t - \Delta t$  para un punto A ubicado a  $a\Delta t$  aguas arriba del tanque y  $C_n$  depende de los valores de  $Q_B$  y  $h_B$  en  $t - \Delta t$  para un punto B ubicado a  $a\Delta t$  aguas abajo del tanque. Las expresiones de  $C_p$  en función de  $Q_A, h_A$  y de  $C_n$  en función de  $Q_B, h_B$  fueron vistas en III.3.13. Los valores  $Q_A, h_A; Q_B, h_B$  en  $t - \Delta t$  se obtienen mediante la aplicación del método de las características a la tubería de aguas arriba y de aguas abajo respectivamente, tal como se vio en III.3.13.

El tratamiento numérico de estas ecuaciones, que como el lector notará no presenta problemas especiales por la sencillez de su estructura, se estudiará en el fascículo VII.

#### 6.2.4 Operación de un tanque de oscilación en un sistema de bombeo. Ejemplo.

A continuación se presentará un ejemplo de la operación de un tanque de oscilación en un sistema de bombeo de características similares al sistema estudiado en III.5.6. Para hacer más real este análisis al sistema se le incorporará una válvula en la descarga de la bomba. El coeficiente de pérdida de la válvula  $K_v$  depende del tiempo  $t$  tal como se indica en la figura 6.2.6. A 1500 m de la planta de bombeo se ha colocado un tanque de oscilación con  $A_T/A = 25$ . En la figura 6.2.7 se presenta la instalación completa.

En la figura 6.2.8 se muestra el lugar de piezométricas máximas y mínimas para el sistema sin tanque de oscilación, en la figura 6.2.9 la

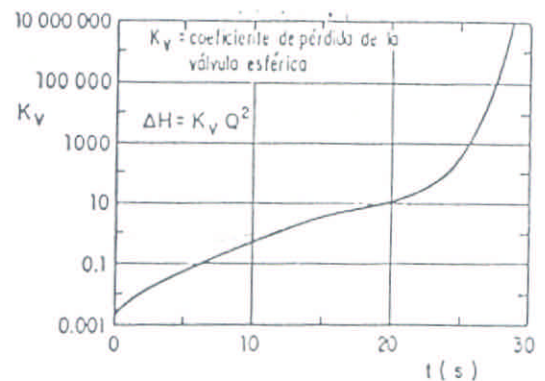


Fig 6.2.6 Relación funcional entre  $K_v$  y  $t$ .

evolución en el tiempo de la velocidad de rotación de la máquina, en la figura 6.2.10 la evolución en el tiempo del gasto en la tubería y en la figura 6.2.11 una perspectiva de la evolución de la onda en el sistema durante  $3T$ , siendo  $T = 2l/a$  (periodo del sistema).

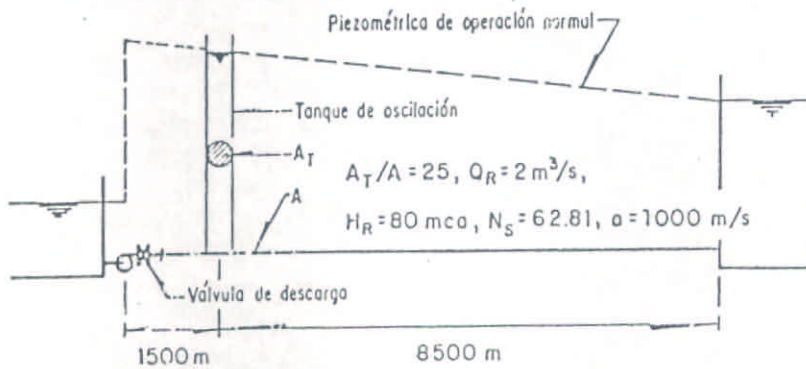


Fig 6.2.7 Instalación de bombeo con tanque de oscilación.

En la figura 6.2.12 se presenta el lugar de las piezométricas máximas y mínimas para el sistema pero ahora con el tanque de oscilación, en la figura 6.2.13 la evolución en el tiempo de la velocidad de rotación de la máquina, en la figura 6.2.14 la evolución en el tiempo del gasto en la descarga de la bomba, en la figura 6.2.15 la evolución del nivel de la superficie libre en el tanque de oscilación y en la figura 6.2.16 una perspectiva de la evolución de las ondas en el acueducto durante  $3T$ .

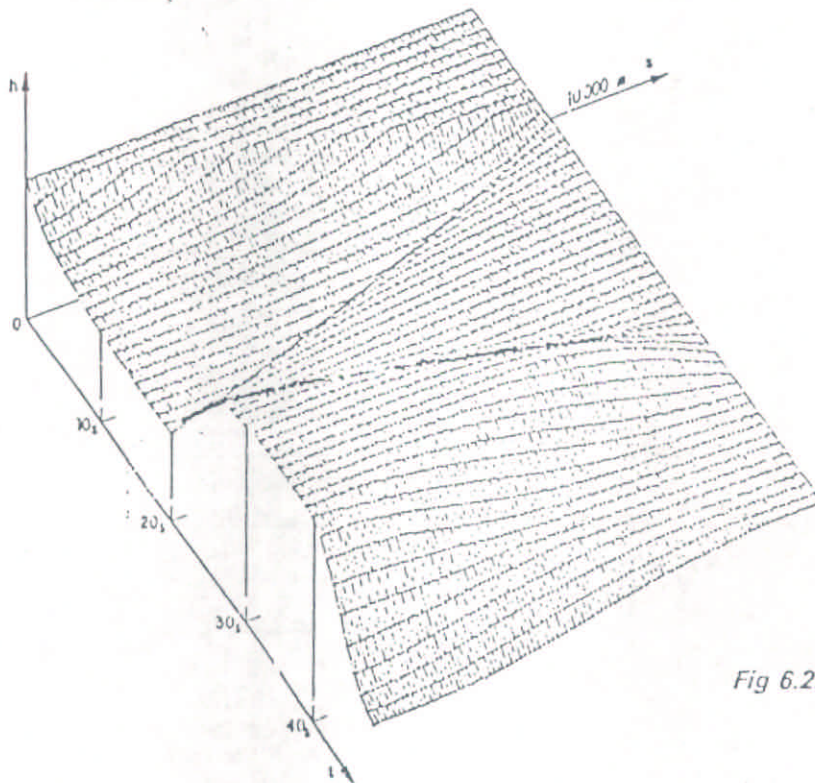


Fig 6.2.11 Perspectiva de la evolución en el tiempo de las ondas de carga piezométrica sin dispositivo de control.

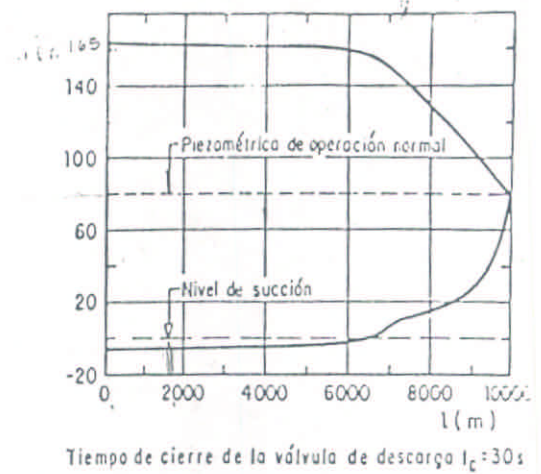


Fig 6.2.8 Lugar de las piezométricas máximas y mínimas para el sistema sin dispositivo de control de transitorios.

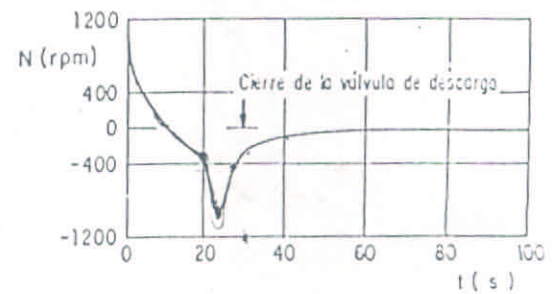


Fig 6.2.9 Evolución en el tiempo de la velocidad de rotación de la máquina para el sistema sin dispositivo de control de transitorios.

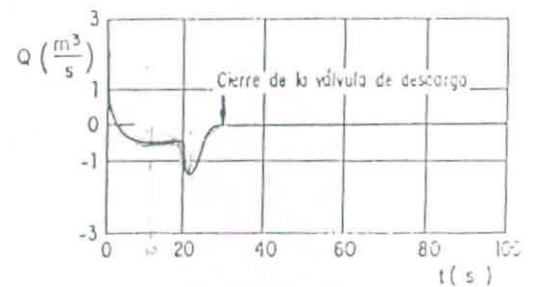


Fig 6.2.10 Evolución del gasto en la tubería para el sistema sin dispositivo de control de transitorios.

Interesa comentar brevemente las figuras 6.2.8 a 6.2.16 y recomendar al lector un examen detenido de las mismas. Los comentarios más significativos referidos al sistema sin dispositivo de control son los siguientes:

- Si bien el tiempo de cierre de la válvula esférica  $t_c = 30$  s es mayor que  $T = 20$  s, la onda de caída del gasto se conforma en 10 segundos aproximadamente (ver figura 6.2.10). Ello implica que se trata de un cierre rápido. Esto explica la gran caída de presión (85 m.c.a.) que se observa en la proximidad de la bomba (figura 6.2.8).
- La onda regresa en 20 segundos encontrando a la máquina girando a  $-320$  r.p.m. (figura 6.2.9). La onda prácticamente se refleja como en un extremo cerrado y la piezométrica asciende hasta 155 m.c.a. en la bomba (figura 6.2.8).
- La velocidad en reversa llega a  $-870$  r.p.m. a los 23 segundos. Luego, debido al cierre de la válvula esférica, la velocidad de rotación tiende a cero.
- Nótese que el gasto inverso llega a  $-1.3$  m<sup>3</sup>/s y luego tiende a cero debido al cierre de la válvula esférica.

Considerando ahora el sistema con tanque de oscilación los comentarios de interés son los siguientes:

- Como puede observarse el tanque prácticamente evita la propagación de las perturbaciones aguas abajo. La piezométrica asciende a 94 m.c.a. puesto que para el tramo de 1500 m ( $T = 3$  s) el cierre es lento y la caída de presión es significativamente menor (59 m.c.a.) que en el caso anterior (85 m.c.a.).
- Debido a que el tanque mantiene la piezométrica en la cota a 78 m (fig 6.2.12) a 1500 m de la planta y en ésta cae a 20 m en la planta, este fuerte gradiente induce un gasto inverso considerablemente mayor ( $-2.2$  m<sup>3</sup>/s) (figura 6.2.14) que en el caso anterior ( $-1.3$  m<sup>3</sup>/s).
- En consecuencia la velocidad de rotación inversa de la máquina crece hasta  $-1680$  r.p.m. (fig 6.2.13). Nótese que acá se tiene una sobrevelocidad de 141%. Comparando con el caso anterior ( $-900$  r.p.m.) se observa cómo el

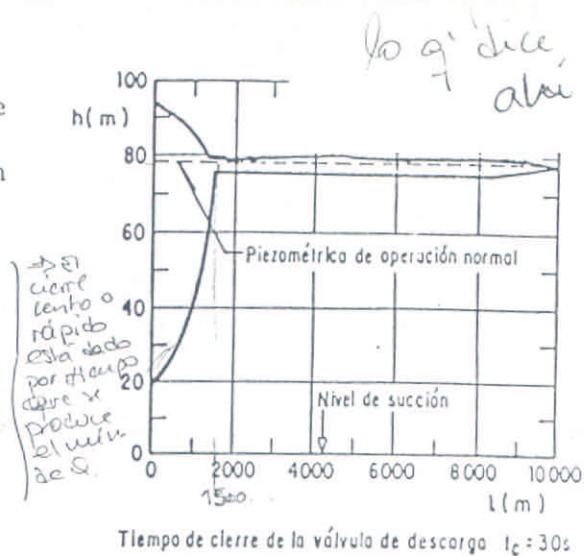


Fig 6.2.12 Lugar de las piezométricas máximas y mínimas para el sistema con tanque de oscilación.

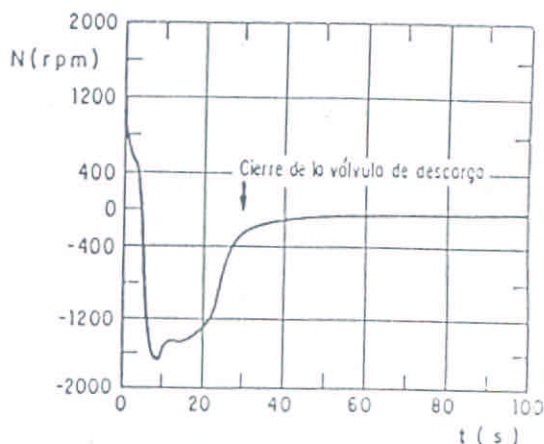


Fig 6.2.13 Evolución en el tiempo de la velocidad de rotación de la máquina. Sistema con tanque de oscilación.

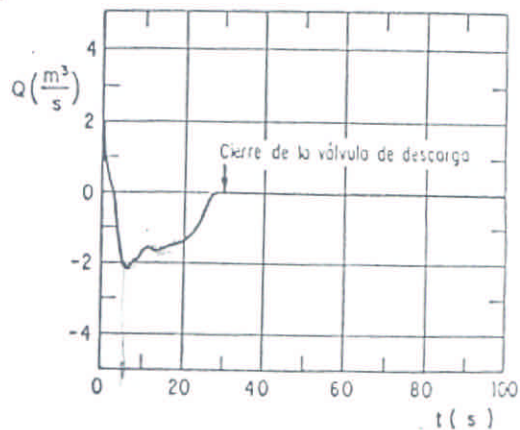


Fig 6.2.14 Gasto en la descarga de la bomba. Sistema con tanque de oscilación.



tanque de oscilación castiga a la máquina, según se había mencionado anteriormente.

d.- Nótese que la variación del nivel en el tanque (figura 6.2.15) es muy lenta respecto a la rapidez del fenómeno transitorio. El nivel en el tanque desciende 2.2 m en 100 segundos que duró el cálculo. Posteriormente ascenderá como producto de la oscilación de masa que se establece entre el tanque de oscilación y el de descarga.

Las perspectivas de la evolución en el tiempo de las ondas, presentadas en las figuras 6.2.11 y 6.2.16, dan una idea gráfica de la sucesión de los eventos descritos.

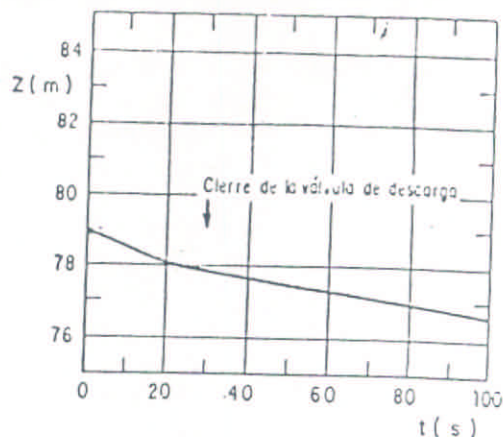


Fig 6.2.15 Evolución en el tiempo del nivel de la superficie libre en el tanque de oscilación.

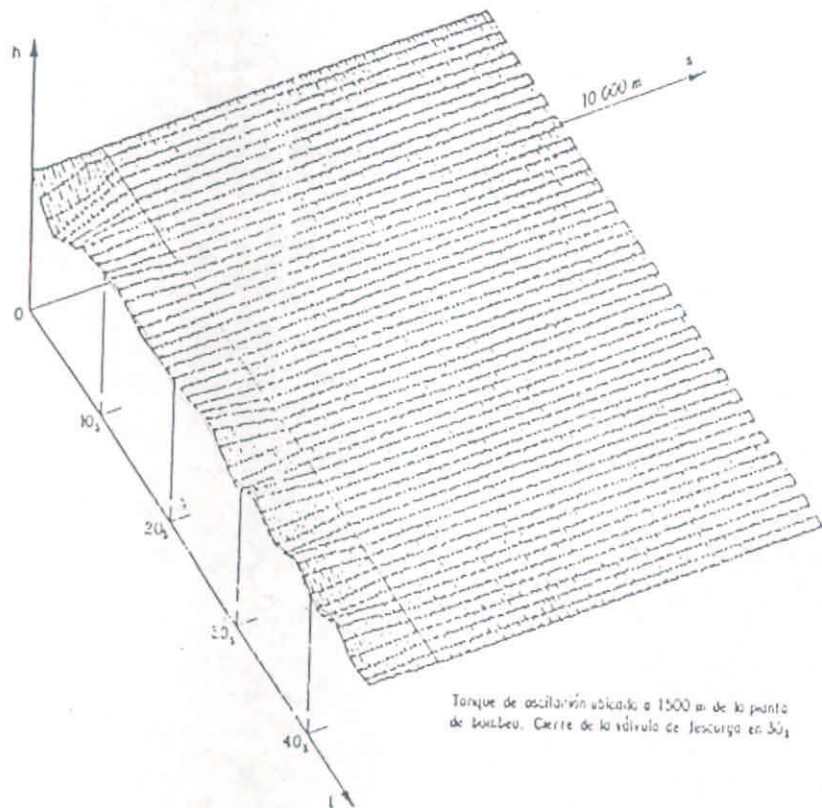


Fig 6.2.16 Perspectiva de la evolución en el tiempo de las ondas de carga piezométrica con un tanque de oscilación como dispositivo de control.

### 6.3 Tanque unidireccional

En la figura 6.3.1 se presenta el esquema de un tanque unidireccional. En dicho esquema se observa que el tanque unidireccional se conecta al acueducto mediante una línea que tiene una válvula de retención (o varias en paralelo). Dicha válvula de retención impide el flujo desde el acueducto al tanque aun cuando la piezométrica en la línea esté por encima del nivel del agua en el tanque, tal como se pinta en la figura. La operación del tanque se produce cuando la piezométrica en el acueducto

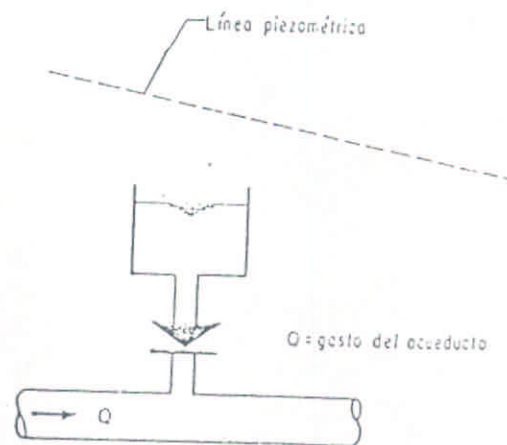


Fig 6.3.1 Esquema de un tanque unidireccional.

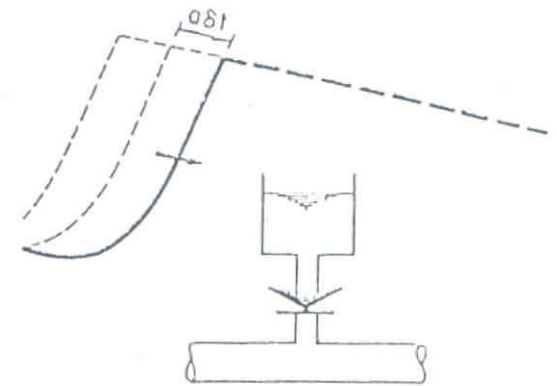
baja por debajo del nivel de la superficie libre del tanque. En dicha situación la válvula de retención se abre y fluye agua desde el tanque a la línea. Si la comunicación entre el tanque y la línea es suficientemente franca (pocas pérdidas y poca inercia) el lector comprenderá que al comunicarse el tanque con la línea, la piezométrica del acueducto se mantendrá sensiblemente próxima al nivel de la superficie libre del tanque. Ello impedirá que se produzcan depresiones indeseables en las proximidades del tanque.

### 6.3.1 Cómo controla el golpe de ariete un tanque unidireccional

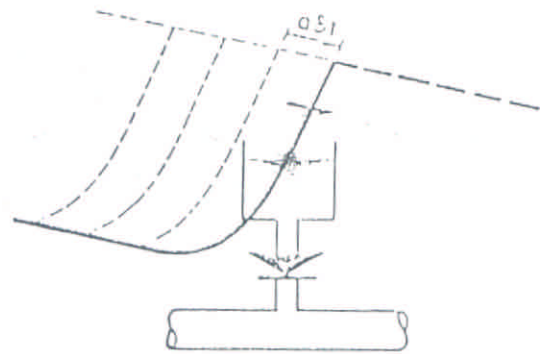
La acción del tanque respecto a la onda de depresión generada en la planta de bombeo en virtud de un paro accidental de ésta, se ilustra en la figura 6.3.2. En esta figura se observa en (a) la aproximación de la onda, en (b) la llegada de la onda y en (c) la transmisión de una onda cuya amplitud es la diferencia de altura entre la piezométrica de trabajo y el nivel de la superficie libre del tanque y la reflexión de la porción restante de la onda incidente. Este comportamiento es sencillo de comprender si se observa que al incidir la onda de depresión el tanque está cerrado y la onda no percibe la presencia del tanque. Cuando la piezométrica ha descendido lo necesario para que se abra la conexión entre el tanque y el acueducto, el tanque actúa como un reflector tal como lo hacía el tanque de oscilación.

En la figura 6.3.3 se observa la acción de un tanque unidireccional en un sistema de bombeo luego de un paro accidental o de emergencia. Como puede verse, el tanque unidireccional no evita la propagación de parte de la onda incidente hacia el tramo de acueducto aguas abajo del tanque. También se observa que, a diferencia del tanque de oscilación, el nivel de la superficie libre del tanque puede ubicarse por debajo de la piezométrica de operación normal.

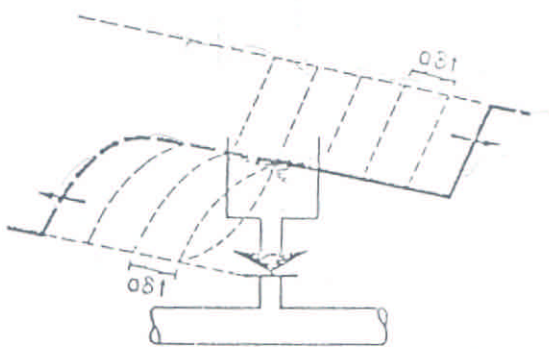
Finalmente debe señalarse que una vez que el tanque opera, debe llenarse nuevamente para estar disponible para la próxima operación. Este llenado debe ser rápido para reducir al máximo el tiempo durante el cual el tanque no tiene su nivel máximo. Para ello el tanque dispone de válvulas de llenado, operadas mecánicamente mediante un flotador o con un presostato fijado a la pared del tanque que abre la válvula cuando la presión en la pared está por debajo de la correspondiente al tanque lleno.



(a) Aproximación de la onda



(b) Llegada de la onda



(c) Reflexión de la onda

Fig 6.3.2 Comportamiento del tanque unidireccional ante una onda de depresión.

### 6.3.2 Ventajas y problemas del tanque unidireccional

Con la descripción cualitativa del comportamiento del tanque unidireccional, el lector ya puede percibir algunas de sus ventajas y algunos de los problemas asociados a este dispositivo. A continuación se intentará hacer una síntesis de ventajas y problemas para el tanque unidireccional de igual forma como se hizo para el tanque de oscilación.

Las ventajas más notables de este dispositivo son dos; a saber:

- 1.- Su coronamiento está por debajo de la piezométrica para gasto máximo. Por lo tanto se adecúa a topografías que al carecer de elevaciones implicarían tanques de oscilación muy altos.
- 2.- Al reflejar parcialmente las ondas de depresión no induce sobre la máquina grandes sobrevelocidades en reversa.

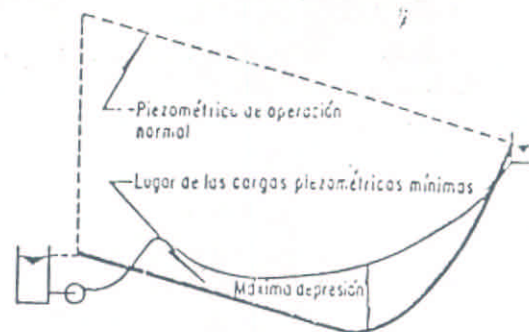
Como contrapartida a estas ventajas, el tanque unidireccional incorpora los siguientes problemas en la instalación, a saber:

- 1.- Requiere mantenimiento mecánico periódico para asegurar un buen funcionamiento de las válvulas de retención y llenado.
- 2.- Al reflejar la onda de depresión, la parte de la onda transmitida puede producir depresiones indeseables aguas abajo. Ello implica que pueden requerirse otros tanques unidireccionales (dispositivos secundarios) para controlar el transitorio en todo el acueducto.

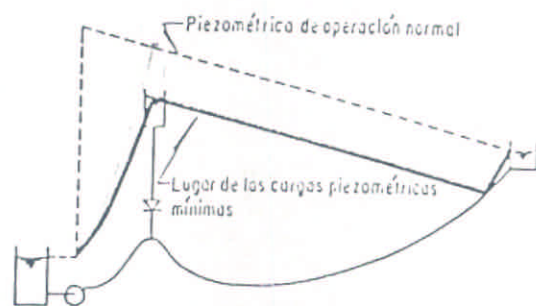
Respecto al problema No. 1 debe decirse que las válvulas de retención y de llenado si bien requieren algo de mantenimiento, éste no es más exigente ni requiere personal más calificado que el mantenimiento de la propia planta de bombeo. Respecto al segundo problema, es necesario tenerlo siempre presente puesto que, al comparar costos de dispositivos de control de transitorios, debe compararse habitualmente un tanque de oscilación contra varios tanques unidireccionales.

### 6.3.3 Serie de tanques unidireccionales

El tanque unidireccional, como se vió en 6.3.1 permite el pasaje de una fracción de la onda



(a) Sin dispositivo de control



(b) Con tanque unidireccional

Fig 6.3.3 Acción de un tanque unidireccional en el sistema de bombeo.



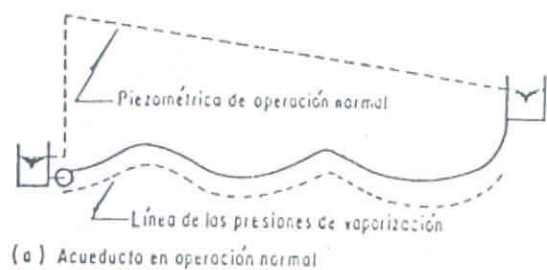
incidente en la dirección de aguas abajo. Ello implica que en general los tanques unidireccionales deberán disponerse en serie para que el segundo tanque evite que la fracción de onda de depresión transmitida produzca problemas entre el primer tanque y el segundo y así sucesivamente. A continuación se mostrará cómo el proyectista puede tener una idea preliminar de la operación de una serie de tanques unidireccionales.

En la figura 6.3.4 (a) se presenta un acueducto en operación normal. En 6.3.4 (b) se muestra el efecto de un paro accidental de la planta de bombeo sobre las cargas piezométricas a lo largo del acueducto. Como se observa un tramo significativo del acueducto tendrá depresiones que producirán vaporización en la línea. Para corregir este fenómeno disminuyendo la amplitud de la onda de depresión que transita por la conducción se coloca un tanque unidireccional como dispositivo primario en la primera elevación del perfil del acueducto. En la figura 6.3.5 (a) se observa el efecto de la colocación de este primer tanque unidireccional. Como puede verse se reduce el tramo en depresión pero no logra eliminarse. Para ello habría que aumentar la altura del tanque unidireccional y ello lo haría muy costoso. Aquí es donde un segundo tanque (dispositivo secundario) puede resolver el problema como se evidencia en la figura 6.3.5 (b).

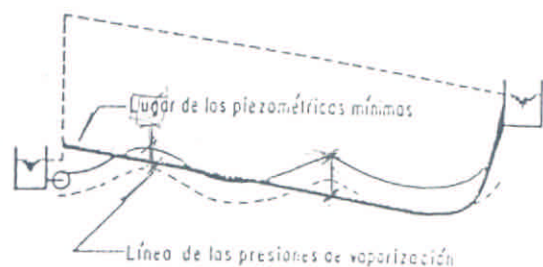
Como el lector habrá notado el esquema de análisis propuesto es muy sencillo y permite tener una idea global de la acción de un conjunto de tanques unidireccionales colocados en serie en un acueducto. Más aún permite hacer una determinación preliminar de las diferencias de cotas  $Z_T$  entre el nivel de la superficie libre en el tanque antes de actuar y la clave de la tubería del acueducto en el punto de conexión. En lo que sigue se mostrará como debe dimensionarse estos tanques para que su comportamiento real no difiera sustancialmente del supuesto, en el análisis recién realizado.

#### 6.3.4 Capacidad del tanque

El tanque unidireccional habitualmente posee en su interior menor volumen de agua que un tanque de oscilación diseñado para el mismo acueducto y localizado en la misma posición, puesto que debe poseer un área cuya relación con la de la tubería no difiera sustancialmente entre un dispositivo y el otro y el tanque unidireccional tiene menor altura que el tanque de oscilación. Por ello el peligro de vaciado de un tanque unidireccional cuya capacidad (volumen) no se ha estudiado adecuadamente es grande.

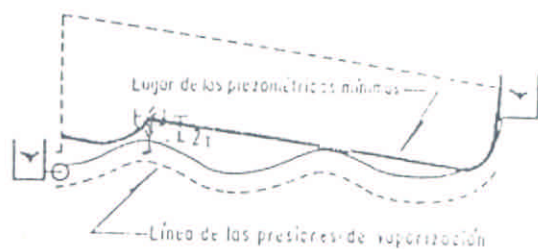


(a) Acueducto en operación normal

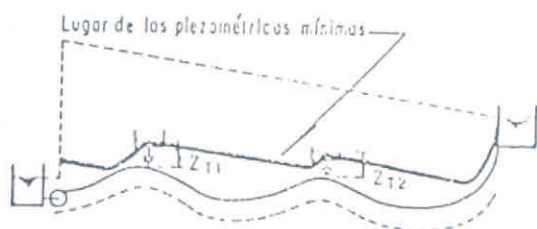


(b) Paro accidental de la planta de bombeo

Fig 6.3.4 Acueducto en operación normal y luego de un paro accidental de la planta de bombeo.



(a) Acueducto con un tanque unidireccional



(b) Acueducto con dos tanques unidireccionales en serie

Fig 6.3.5 Acueducto luego de un paro accidental con uno y con dos tanques unidireccionales.

Para estimar el volumen necesario del tanque se procede de la siguiente forma.

- 1.- Se calcula el tanque con el modelo teórico que se verá más adelante, pero considerando una sección recta cuya área sea exageradamente grande, por ejemplo  $10^6$  veces el área de la tubería. Ello significa que el nivel de agua en el tanque prácticamente no desciende luego de que el tanque actúa.
- 2.- El tanque así definido da lugar a un gasto  $Q_T(t)$  desde el tanque a la tubería. El volumen extraído del tanque se calcula como:

$$\int_{t_1}^{t_2} Q_T dt = \Psi \quad (6.3.1)$$

siendo  $t_1$  el instante en el cual comienza a trabajar el tanque y  $t_2$  el instante en el que finaliza su acción.

- 3.- El volumen total del tanque debe ser sustancialmente mayor que el  $\Psi$  calculado, puesto que al extraerse  $\Psi$  el tanque debe poder operar de inmediato por lo menos otra vez más sin que entre agua por las válvulas de llenado.

Ello da un margen adecuado de seguridad en caso de que inmediatamente después del paro accidental se arranque el acueducto sin dar tiempo al llenado de los tanques unidireccionales a través de sus válvulas de llenado. Puede adoptarse como criterio preliminar que el volumen total del tanque  $V_T$  sea como mínimo:

$$V_T = 10 \Psi \quad (6.3.2)$$

### 6.3.5 Area de la sección recta del tanque

Definido el volumen mínimo de agua que debe contener el tanque, importa que el descenso de nivel que experimenta la superficie libre luego de actuar una vez, no sea superior al 10% de la diferencia de cota existente entre la clave de la tubería y el nivel inicial de la superficie libre en el tanque antes de actuar. Si  $Z_T$  es dicha diferencia de cota, el área de la sección recta del tanque  $A_T$  se determina de la siguiente expresión

$Z_T =$  medido desde la tubería

$$\frac{\Psi}{0.1 Z_T} = A_T \quad (6.3.3)$$

$\Rightarrow A_T \cdot Z_T$  no es el volumen del tanque.

Obsérvese que  $Z_T$  queda definida a partir de un análisis preliminar del tipo indicado en la figura 6.3.5.

También en el caso de los tanques unidireccionales se admitirá que las aceleraciones en el interior del tanque son tan pequeñas como para poder suponer hidrostática la distribución de presiones. Por lo tanto, también acá deberá imponerse que

$$\frac{\Delta T}{A} > 16 \quad (6.3.4)$$

siendo A en este caso el área de la sección recta del acueducto.

### 6.3.6 Conexión entre el tanque y el acueducto

El tanque se conecta al acueducto a través de una tubería que normalmente tiene una longitud de varias decenas de metros. Cuando el gasto  $Q_T(t)$  pasa a través de la tubería, la caída de carga piezométrica entre el tanque y la presión en el acueducto está dada por la expresión (III.2.7.2) a saber:

$$h_0 - h_1 = \frac{\ell}{gA} \frac{dQ_T}{dt} + f \frac{\ell}{D} \frac{Q_T |Q_T|}{A^2 2g} + K_V Q_T |Q_T| \quad (6.3.5)$$

En esta expresión se sustituyó V por  $Q_T/A$  siendo A el área de la sección recta de la tubería de conexión entre el tanque y la línea y se agregó un término de pérdidas localizadas. En la figura 6.3.6 se ilustran estos elementos.

La caída  $h_0 - h_1$  reduce la efectividad del tanque puesto que la piezométrica en el acueducto no será mantenida al nivel de  $h_0$  (cota de la superficie libre del tanque) sino al nivel  $h_1 < h_0$ . Por tanto como criterio de diseño se adoptará que

$$\max (h_0 - h_1) \leq 0.1 Z_T \quad (6.3.6)$$

Para calcular el máximo de  $h_0 - h_1$  en el tiempo, puede procederse a sustituir el  $Q_T(t)$  calculado en el párrafo 6.3.4 y evaluar  $(h_0 - h_1)$  en función de t para diferentes  $\ell$  y A de la tubería de conexión. En general conviene tomar la menor  $\ell$  posible compatible con una buena localización del tanque en la topografía del lugar y aumentar A hasta que  $\max (h_0 - h_1)$  cumpla la condición (6.3.6). Finalmente debe señalarse que los coeficientes propuestos en las expresiones (6.3.2), (6.3.3) y (6.3.6) definen un tanque seguro en extremo. El proyectista, observando las condiciones particulares de su diseño podrá modificarlos hacia diseños menos conservadores.

### 6.3.7 Diseño final

Luego de realizado el análisis preliminar que se indica en los párrafos 6.3.3, 6.3.4, 6.3.5 y 6.3.6

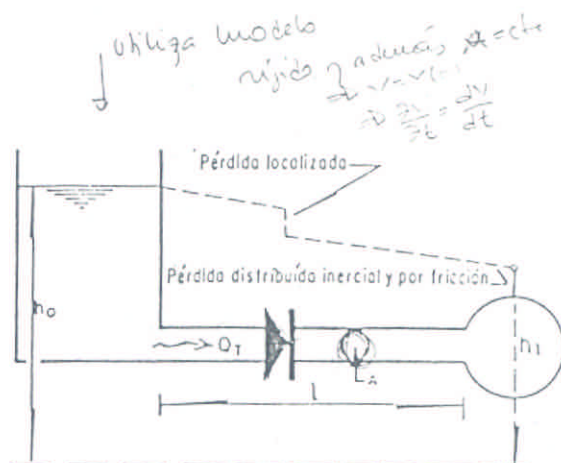


Fig 6.3.6 Esquema de las pérdidas entre el tanque unidireccional y el acueducto.

limita la conexión

se obtiene una definición preliminar de las siguientes variables

$Z_T$  - Diferencia entre el nivel de la superficie libre del tanque antes de operar y la clave de la tubería en el punto donde se conecta el tanque

$V_T$  - Volumen total de agua en el tanque

$A_T$  - Área de la sección recta del tanque

$l$  - Longitud de la tubería de conexión entre el tanque y el acueducto

$A$  - Área de la sección recta de la tubería de conexión entre el tanque y el acueducto.

Estas magnitudes, definidas en forma preliminar, se introducen ahora al modelo que se presentará a continuación y se examina el comportamiento del tanque en cuanto a su capacidad para controlar el descenso de la curva de piezométricas mínimas. Asimismo se calcula  $Q_T$  y  $h_0 - h_1$  para cada tanque en función del tiempo y se verifican con estos valores las expresiones (6.3.1), (6.3.2), (6.3.3), (6.3.4), (6.3.5) y (6.3.6).

### 6.3.8 Ecuaciones del tanque unidireccional en una tubería con ondas

Las ecuaciones que describen los fenómenos presentados anteriormente son las siguientes (figura 6.3.7).

Ecuaciones en la conexión con el acueducto:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 + Q_T &= Q_2 && \text{conservación de la masa} \\ h_1 &= h_2 && \text{dinámica} \end{aligned} \right\} (6.3.7)$$

Ecuaciones de la tubería que conecta el tanque con el acueducto:

$$Q_T = Q_T(t) \quad \text{conservación de la masa}$$

*No se consideran fenómenos transitorios en la conexión. Modelo tubería rígida*

$$h_0 - h_1 = \frac{l}{gA} \frac{dQ_T}{dt} + f \frac{l}{DA^2 2g} \cdot Q_T |Q_T| + K_V Q_T |Q_T|$$

dinámica

$$(6.3.8)$$

donde  $K_V$  es el coeficiente de pérdidas de la válvula de retención si  $Q_T \geq 0$ . Si  $Q_T < 0$   $K_V$  es el

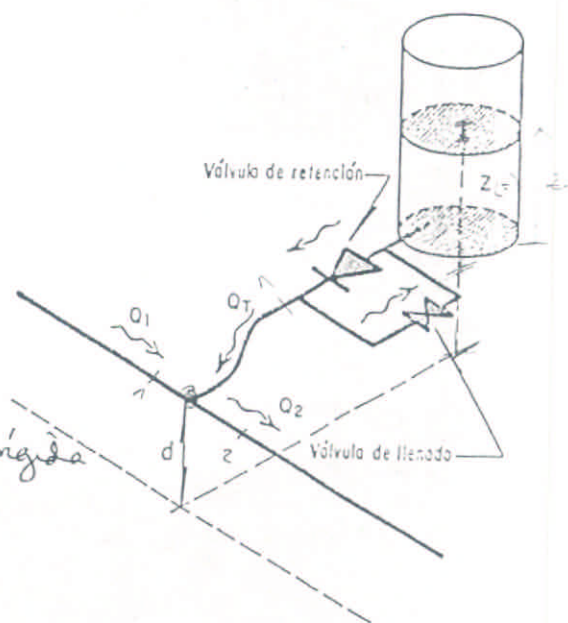


Fig 6.3.7 Esquema para el planteo de las ecuaciones del tanque unidireccional.

coeficiente de pérdida de la válvula de llenado.  
Ecuaciones del tanque:

$$\left. \begin{aligned} Q_T &= -A_T \frac{dZ}{dt} && \text{conservación de la masa} \\ h_o &= Z(t) && \text{dinámica} \end{aligned} \right\} (6.3.9)$$

donde  $Z(t)$  es la elevación de la superficie libre respecto al nivel de referencia de las cargas piezométricas.

Si el tanque  $t=0$   
está lleno  
 $\rightarrow Z(t=0) = Z_T + d$

Cuando luego de operar el tanque se llena nuevamente a través de las válvulas de llenado, se tiene  $Z = Z_T + d$  donde  $d$  es la cota de la clave de la tubería respecto al nivel de referencia de las cargas piezométricas y las ecuaciones (6.3.7), (6.3.8) y (6.3.9) se sustituyen por:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= Q_2 \\ h_1 &= h_2 \end{aligned} \right\} (6.3.10)$$

Para proceder a la resolución numérica de las ecuaciones (6.3.7), (6.3.8) y (6.3.9) estas se transforman en el siguiente sistema algebraico escribiéndolo en diferencias finitas:

$$\left. \begin{aligned} Q_{1P} + Q_{TP} &= Q_{2P} && (p \text{ presente}) \\ h_{1P} &= h_{2P} \\ h_{oP} - h_{1P} &= \frac{\ell}{gA} \dot{Q}_{TP} + \left( f \frac{\ell}{DA^2 2g} + K_v \right) Q_{TP} |Q_{TP}| \\ \dot{Q}_{TP} &= \frac{Q_{TP} - Q_T}{\Delta t} \\ Q_{TP} &= -A_T \dot{Z}_{TP} \\ \dot{Z}_{TP} &= \frac{Z_P - Z}{\Delta t} \\ h_{oP} &= Z_P \end{aligned} \right\} (6.3.11)$$

(6.3.11) es un sistema con siete ecuaciones y nueve incógnitas  $Q_{1P}$ ,  $Q_{2P}$ ,  $Q_{TP}$ ,  $h_{1P}$ ,  $h_{2P}$ ,  $h_{oP}$ ,  $Z_P$ ,  $Z_P$ . Las dos ecuaciones que faltan son las ecuaciones de las características positiva y negativa en el acueducto, a saber:

$$\left. \begin{aligned} Q_{1P} &= C_p - C_a h_{1P} && \text{característica positiva} \\ Q_{2P} &= C_n + C_a h_{2P} && \text{característica negativa} \end{aligned} \right\} (6.3.12)$$

El sistema algebraico no lineal de nueve ecuaciones (6.3.11) y (6.3.12) con nueve incógnitas permite



encontrar  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_T$ ,  $Z$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  y  $h_0$  en el instante  $t$  a partir de los valores correspondientes al instante  $t - \Delta t$ .

Si al resolver (6.3.11) y (6.3.12) resulta  $Q_{Tp} \leq 0$  el cálculo realizado debe sustituirse por la resolución del mismo sistema pero con  $K_V$  correspondiente a la válvula de llenado, hasta que  $Z_p = Z_T + d$  (cota del nivel inicial). Cuando  $Z_p = Z_T + d$  el sistema (6.3.11) y (6.3.12) se sustituye por el siguiente:

$$\left. \begin{aligned} Q_{1p} &= Q_{2p} \\ h_{1p} &= h_{2p} \\ Q_{1p} &= C_p - C_a h_{1p} \\ Q_{2p} &= C_n + C_a h_{2p} \end{aligned} \right\} (6.3.13)$$

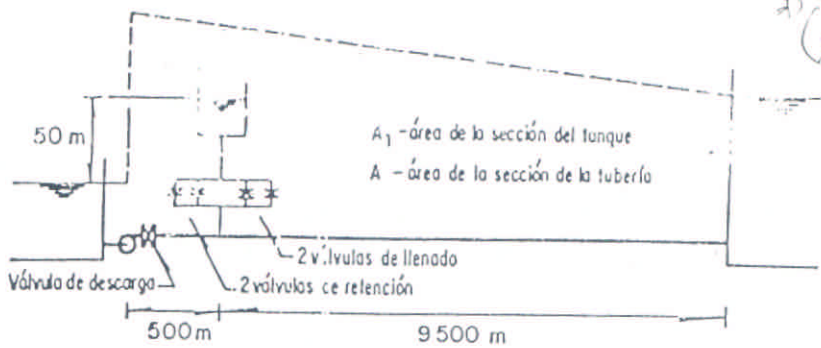
que implica que el tanque no afecta al acueducto.

Respecto a los coeficientes  $C_p$ ,  $C_n$ , valen las consideraciones realizadas en 6.2.3 para el tanque de oscilación.

El algoritmo numérico para resolver (6.3.11) y (6.3.12) o alternativamente (6.3.13) se desarrollará en el fascículo VII.

#### 6.3.9 Operación de un tanque unidireccional en un sistema de bombeo. Ejemplo.

El ejemplo a desarrollar coincide con el desarrollado en 6.2.4 para el tanque de oscilación salvo que en este caso se ha sustituido el tanque de oscilación por un tanque unidireccional ubicado a 500 m de la planta de bombeo. En la figura 6.3.8 se presenta la instalación con el tanque. En la figura 6.3.9 se muestra el lugar de las piezométricas máximas y mínimas para el sistema con tanque unidireccional. Se le sugiere al lector comparar estas piezométricas con las de la figura 6.2.8 que corresponden al sistema sin ningún dispositivo de control. En la figura 6.3.10 se muestra la velocidad de rotación de la máquina en función del tiempo. En la figura 6.3.11 se presenta el gasto en la descarga de la bomba, en la figura 6.3.12 la evolución en el tiempo del nivel de la superficie libre del tanque y en la figura 6.3.13 una perspectiva de la evolución de las ondas durante  $3T$ . Del análisis de las figuras precedentes se concluye lo siguiente.



$A_T/A = 25$ ,  $Q_R = 2 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $H_R = 50 \text{ mca}$ ,  $N_B = 62.81$ ,  $a = 1000 \text{ m/s}$

Se considera una conexión del tanque al acueducto de longitud despreciable, No. válvulas de retención=2 con diámetro=24" y tipo "disco basculante", No. de válvulas de llenado=2 con diámetro=12"

Fig 6.3.8 Instalación de bombeo con tanque unidireccional.

Interesa comentar las figuras 6.3.9 a 6.3.13 comparándolas con las figuras correspondientes a la instalación sin dispositivo de control de transitorios y a la instalación con tanque de oscilación, analizadas en la sección 6.2.

a.- En la figura 6.3.9 se observa que la caída de la piezométrica en la planta de bombeo es de 49 m.c.a. aproximadamente. Es pues mayor que con el tanque de oscilación (36 m.c.a.) y menor que sin dispositivo de control (85 m.c.a.). El ascenso de la piezométrica en la planta llega a 110 m.c.a. Con el tanque de oscilación llegaba a 87 m.c.a. y sin dispositivo a 165 m.c.a.

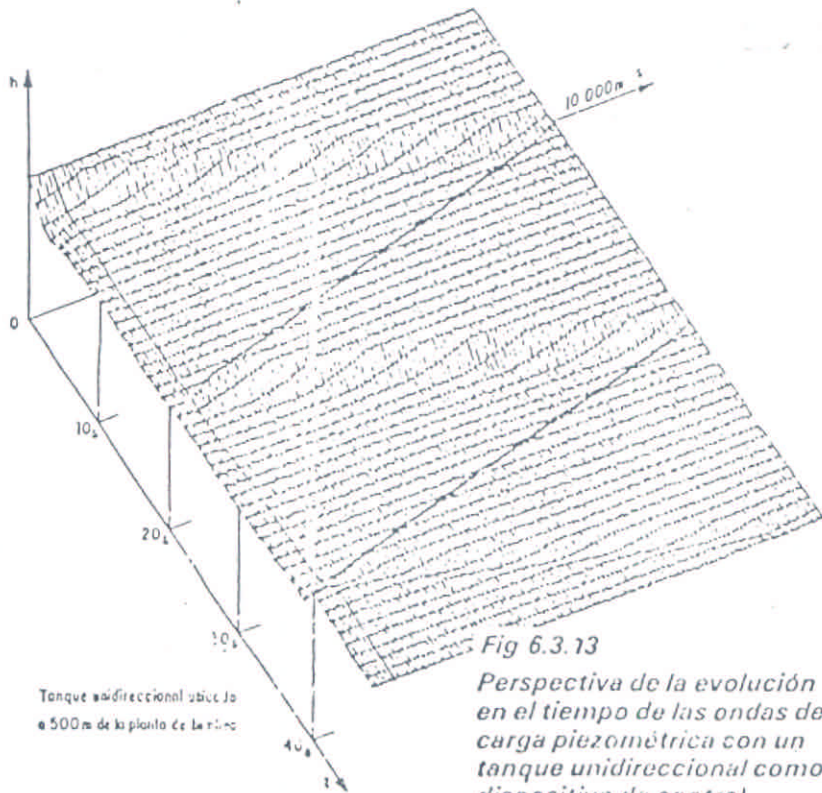


Fig 6.3.13 Perspectiva de la evolución en el tiempo de las ondas de carga piezométrica con un tanque unidireccional como dispositivo de control.

de las bombas (N)

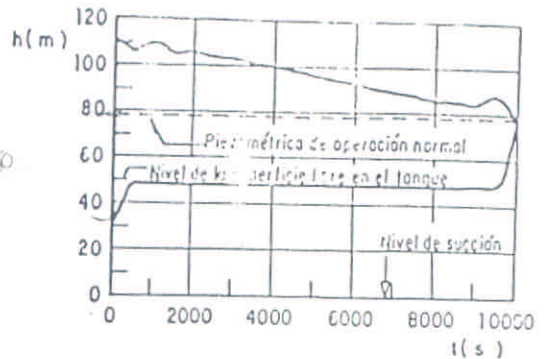


Fig 6.3.9 Lugar de las piezométricas máximas y mínimas para el sistema con tanque unidireccional. Tiempo de cierre de la válvula de descarga  $t_c = 30 \text{ s}$

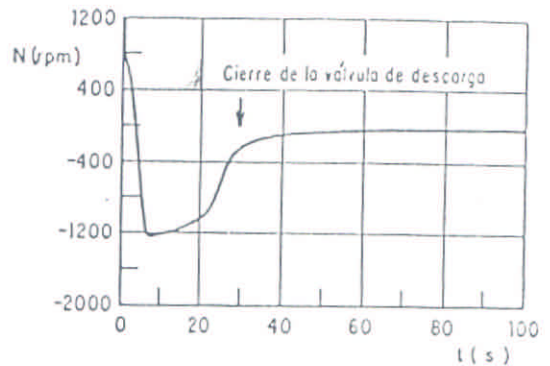


Fig 6.3.10 Evolución en el tiempo de la velocidad de rotación de la máquina. Sistema con tanque unidireccional.

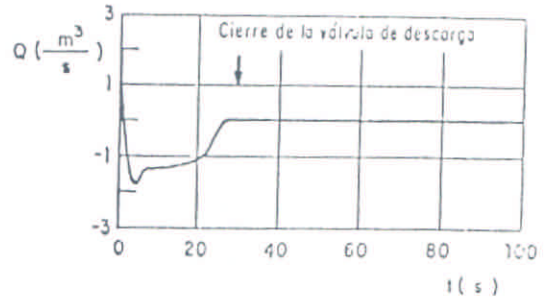


Fig 6.3.11 Evolución en el tiempo del gasto en la descarga de la bomba. Sistema con tanque unidireccional.

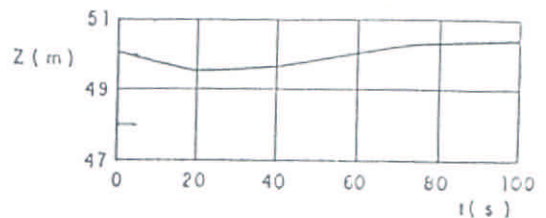


Fig 6.3.12 Evolución en el tiempo del nivel de la superficie libre del tanque unidireccional.