

**DISPOSITIVO PARA PROTEGER UNA TUBERIA
DE IMPULSION DE BAJA ALTURA DE ELEVACION**

HORACIO MERY M.¹

RESUMEN

El presente trabajo muestra un dispositivo simple para proteger a una tubería de impulsión de una planta de bombeo de baja altura de elevación, del fenómeno de la cavitación transitoria en el caso de la detención súbita de las bombas (caso de falla de la alimentación eléctrica). El dispositivo consiste en una cámara cerrada, provista de una tubería que atraviesa la tapa superior de la cámara y que tiene en su extremo superior una válvula de entrada de aire o ventosa.

Al producirse la caída de la presión en la tubería de impulsión y particularmente en la zona donde se ubica la cámara, se abre la ventosa, produciéndose el vaciado de la cámara, manteniendo la presión prácticamente constante en ese punto. En la segunda fase del fenómeno, entra agua a la cámara y se produce la compresión del aire, actuando como cámara neumática. La presión aumenta en el punto de comunicación de la cámara con la tubería de impulsión, hasta que la masa de agua en la tubería vuelve nuevamente al reposo. El fenómeno continúa repitiéndose en ciclos y amortiguándose debido a las pérdidas de energía.

En el trabajo se dan fórmulas aproximadas para estimar las dimensiones del dispositivo presentado y se muestra un ejemplo de un caso que utiliza este sistema de protección.

¹ Ingeniero Civil, Profesor Titular y Académico del Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

1. GENERALIDADES

Las tuberías de impulsión de las Plantas de Bombeo pueden quedar sometidas a muy bajas presiones instantáneas durante la detención súbita de las bombas. Estas bajas presiones son inconvenientes cuando se acercan a la presión de vaporización de líquido, fenómeno conocido con el nombre de "cavitación transitoria". Al producirse las cavidades de vapor (burbujas de vacío), ellas son arrastradas a zonas de mayor presión produciéndose el colapso de las cavidades, lo que va acompañado de grandes aumentos de la presión local, la que se propaga hacia otros sectores de la tubería. Estas sobrepresiones pueden llegar a valores de varias veces la altura de elevación y en casos extremos provocar la ruptura de la tubería. Es recomendable evitar la cavitación transitoria protegiendo a la tubería con algún dispositivo adecuado.

Hay muchas formas de proteger a una tubería de impulsión de las bajas presiones locales, en la detención súbita de las bombas. Básicamente, todos los dispositivos que se utilizan deben ser capaces de entregar a la tubería, durante algunos instantes, el caudal deficitario de las bombas, haciendo más gradual la desaceleración de la masa de agua de la tubería.

Un dispositivo tradicional es la chimenea de equilibrio, pero su costo puede ser prohibitivo cuando la altura de elevación obliga a construir una estructura elevada. Otro dispositivo muy usado es la cámara neumática, muy eficiente para limitar las presiones mínimas a lo largo de la tubería, pero es un equipo complejo que requiere un control cuidadoso y una mantención permanente. Más simple es la chimenea de equilibrio con válvula check, que opera cuando la presión cae por debajo de la superficie libre del agua en la cámara.

Tiene el inconveniente de proteger sólo una zona local de la tubería. Además, debe incluir un sistema de llenado de la cámara una vez que ha operado, para quedar nuevamente en condiciones operativas.

Un dispositivo similar al anterior, pero que es de llenado automático y que puede operar continuamente todas las veces que sea necesario, consiste en una cámara cerrada provista de una válvula de entrada de aire (ventosa) ubicada en la tapa superior. (Esta válvula reemplaza a la válvula check).

La Figura 1-a muestra esquemáticamente una Planta de Bombeo que tiene este dispositivo de protección y en ella se indican las denominaciones que se utilizan en este trabajo. En la Figura 1-b se muestra un detalle de la cámara propuesta.

Una tubería de menor diámetro atraviesa la tapa superior de la cámara y en su extremo superior exterior se ubica la válvula ventosa (a cota Z_v). El extremo inferior de dicha tubería, en el interior de la cámara, está comunicado con el volumen disponible de la cámara y está a la cota Z_0 . El volumen de la cámara sobre la cota Z_0 es V_0 .

Al producirse la caída de servicio de la Planta de Bombeo, la presión a la salida de las bombas cae rápidamente produciéndose un estado general de bajas presiones en la tubería. Al llegar la altura de presión a un valor igual o levemente menor de Z_v , se abre la ventosa comunicando la cámara con la atmósfera. El nivel dentro de la tubería desciende rápidamente llegando al valor Z_0 . En ese momento, se mantiene la altura de presión produciéndose el vaciado de la cámara de volumen V_0 , entrando aire suficiente a través de la ventosa y de la tubería vertical a la cámara. Así, el agua que no entregan las bombas es aportado por la cámara, limitando el descenso de la altura de presión en dicho punto a Z_0 .

Una vez que se ha detenido la masa de agua en la tubería de impulsión se inicia la segunda fase del fenómeno transitorio. Debido al desequilibrio de las presiones en ambos extremos de la tubería, empieza a fluir agua desde el estanque superior hacia la cámara, acelerándose la masa de agua en sentido inverso, hasta alcanzar la velocidad un valor máximo de reflujo " v_r ". En esta fase entra agua a la cámara, sellándose la salida de la tubería

interior y la masa de aire en la cámara se comprime actuando como un colchón amortiguador. El aire alcanzará una presión máxima "H_m" y nuevamente la masa de agua en la tubería llegará al reposo. Después se produce una tercera fase, saliendo agua de la cámara y repitiéndose el proceso hasta amortiguarse completamente.

A continuación se expone un método simplificado para pre-dimensionar este dispositivo de protección de una tubería.

2. DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DE LA CAMARA

2.1 Volumen de la Cámara V₀

El volumen necesario de la cámara se puede estimar suponiendo que la presión a la salida de las bombas cae instantáneamente, desde la presión de trabajo al valor "Z₀", y se mantiene en dicho valor hasta que la velocidad en la tubería de impulsión se anula.

La ecuación dinámica de la masa de agua es la tubería aceptándola rígida y el fluido incomprensible es:

$$\frac{L}{g} \frac{dv}{dt} = HA - HB - P$$

siendo: HA = altura de presión en A = Z₀
 HB = altura de presión en B = HG
 P = pérdida de carga en la tubería
 reemplazando valores:

$$\frac{L}{g} \frac{dv}{dt} = Z_0 - HG - f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

ordenando la ecuación diferencial:

$$\frac{L}{g(HG - Z_0)} \frac{dv}{(1 + K \cdot v^2)} = -dt$$

siendo:

$$K = \frac{fL}{2gD \cdot (HG - Z_0)}$$

Denominado "T" al tiempo que transcurre desde el inicio del fenómeno hasta el momento en que se anula la velocidad, éste vale:

$$T = \text{arc} \cdot \text{tg}(\sqrt{K} \cdot v_0) \cdot \frac{L}{\sqrt{Kg}(HG - Z_0)} \quad (1)$$

y el volumen de agua que sale de la cámara es:

$$V_0 = 2 \frac{VT}{P_0} \cdot \frac{v_0^2}{2g} \left(-\text{Log}(\cos(\text{arc} \cdot \text{tg} \sqrt{\frac{P_0}{Hg - P_0}})) \right) \quad (2)$$

siendo "VT" el volumen de agua de la tubería, v₀ y P₀ corresponden a la velocidad y pérdida de carga de la tubería para las condiciones iniciales respectivamente.

2.2 Velocidad Máxima de Reflujo

En el momento en que la masa de agua de la tubería queda en reposo, hay un volumen V₀ de aire a presión atmosférica en la cámara y la cota piezométrica en B es HG. Debido a la diferencia de presiones, se inicia la segunda fase de aceleración de la masa de agua en la tubería, hacia la cámara. La máxima velocidad de reflujo se produce en el momento en que se igualan las cotas piezométricas en A y en B.

Es posible demostrar, despreciando las pérdidas de carga en la tubería, que la máxima velocidad de reflujo queda dada por la relación:

$$\frac{V_r^2}{2g} = G \cdot H_{at} \cdot \frac{V_0}{VT} \left(1 - \frac{K}{K-1} \cdot \frac{1}{G} \left[(1+G)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right] \right) \quad (3)$$

siendo:

$$G = \frac{HG - Z_0}{H_{at}}$$

H_{at} = altura de presión atmosférica (m.c.a.)

K = exponente de la expansión politrópica ($K = 1.2$)

2.3 Presión Máxima del Aire en la Cámara

Un antecedente importante en todo proyecto de un dispositivo de protección, es la máxima presión que solicitará a la tubería al final de la segunda fase del proceso (caracterizada por la compresión del aire en la cámara).

Denominada M a la relación entre la altura de presión máxima sobre la cota Z_0 y la atmosférica:

$$M = \frac{H_m - Z_0}{H_{at}}$$

Se puede demostrar que el trabajo requerido para comprimir al aire desde la presión " $G \cdot H_{at}$ " a " $M \cdot H_{at}$ ", está dado por la relación:

$$E = \frac{\gamma \nabla_0 \cdot H_{at}}{K-1} \left[\frac{M+K}{(1+M)^{1/K}} - \frac{G+K}{(1+G)^{1/K}} \right] \quad (4)$$

Igualando este trabajo con la energía cinética de la masa de agua en la tubería para la velocidad máxima de reflujos y despreciando las fuerzas friccionales, se obtiene:

$$E = \gamma \nabla_r \cdot \frac{V_r^2}{2g} \quad (5)$$

Reemplazando la relación (4) en la ec. (5) y teniendo en cuenta la ec. (3) se obtiene la igualdad:

$$\frac{M+K}{(1+M)^{1/K}} = G \cdot (K-1) \left[1 - \frac{1}{(1+G)^{1/K}} \right] + K \quad (6)$$

Esta relación (6) permite determinar el valor de M en función de G . La Tabla I de valores de M para G variando de 1 a 3:

TABLA I

G	M	G	M
1,0	2,153	2,0	6,630
1,2	2,816	2,2	7,949
1,4	3,582	2,4	9,449
1,6	4,463	2,6	11,150
1,8	5,474	2,8	13,074
		3,0	15,245

De la tabla se deduce que en una estación de bombeo con una altura geométrica de elevación de 30 m ($G=3$), se llegaría a una máxima altura de presión de 152,5 m, valor muy elevado. Este dispositivo no es apropiado para ser utilizado en plantas de bombeo con alturas geométricas mayores de unos 30 m. En todo caso los valores dados en la Tabla son sólo la primera aproximación puesto que se han despreciado las pérdidas friccionales en la tubería de impulsión.

3. EJEMPLO DE APLICACION

Una planta de bombeo tiene una tubería de impulsión de acero de 500 mm de diámetro interior con una longitud de 1500 m y una altura geométrica de elevación de 15 m. El máximo caudal de bombeo es de 550 l/s. La pérdida de carga prevista es de $F_0=15,50$ m y la altura de presión atmosférica del lugar es de 10 m.

Se desea determinar las características de una protección como la indicada.

3.1 Dimensionamiento Preliminar

Con los datos indicados se obtienen los siguientes valores de los parámetros característicos, adoptando $Z_0 = 5$ m y $Z_v = 9$ m.:

$$\begin{aligned}V_t &= 294,5 \text{ m}^3 \\v_0 &= 2,55 \text{ m/s} \\G &= 1\end{aligned}$$

Según la ecuación (2), para el volumen de la cámara se obtiene:

$$V_0 = 5,89 \text{ m}^3$$

De la relación (1) se obtiene para el instante de vaciado de la cámara:

$$T = 28 \text{ s}$$

A la cámara se le daría un diámetro interior de 1,50 m, con tapas superior e inferior semi-esféricas. La altura del cilindro debe ser de 2.85 m (ver Fig. 2-b). La tubería de admisión de aire con la ventosa en su extremo superior, puede aceptar un flujo de aire de 50 m/s, lo cual exige un diámetro de esta tubería de 150 mm.

La máxima velocidad de reflujo en la tubería de impulsión se determina con la relación (3):

$$v_r^2/2g = 0.053 \text{ m} \quad v_r = 1.018 \text{ m/s} \quad y \quad Q_r = 200 \text{ l/s}$$

La máxima altura de presión en la cámara (a la salida de las bombas), según la Tabla 1 sería:

$$M = 2.15 \quad y \quad H_m = 26.5 \text{ m}$$

3.2 Cálculo Detallado

Un cálculo detallado de comprobación ejecutado mediante un programa computacional ad-hoc para este caso, entregó los siguientes valores definitivos:

$$\begin{aligned}V_0 &= 5.825 \text{ m}^3 \\v_r &= 0.845 \text{ m/s} \\Q_r &= 166 \text{ l/s} \\H_m &= 31.6 \text{ m}\end{aligned}$$

En la Fig. 2-a se muestra la variación del nivel de la cámara en función del tiempo y también la altura de presión en la tubería bajo la cámara. Para el cálculo de detalle se dividió la tubería en 5 tramos de 300 m de longitud cada uno. En la Tabla II se indican las presiones extremas, positivas y negativas, calculadas en las diferentes secciones numeradas de 0 a 5.

TABLA II

Cotas Piezométricas

Sección	Máximo m	Mínimo m	Ubicación
0	31.60	4.59	Salida de bombas
1	30.74	1.78	
2	26.36	-1.04	
3	23.18	-3.84	
4	20.99	-6.65	
5	15.00	15.00	Estanque superior

Puede notarse, el inconveniente de este dispositivo de protección es que mantiene la presión mínima pre-fijada en una longitud reducida en torno a la zona donde se ubica la cámara. Igual inconveniente lo presenta la cámara con válvula check. Para subsanar este inconveniente deben instalarse otros dispositivos similares en otros puntos de la tubería dependiendo de la forma del perfil longitudinal.

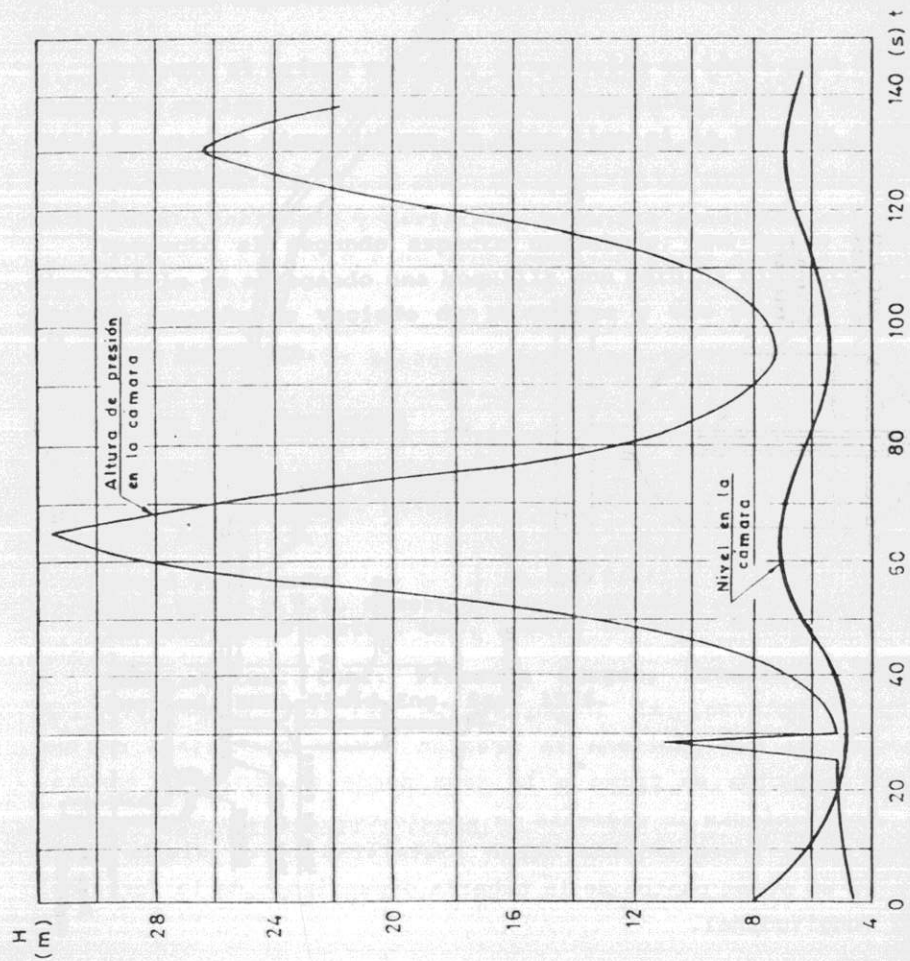


FIG. 2 - a

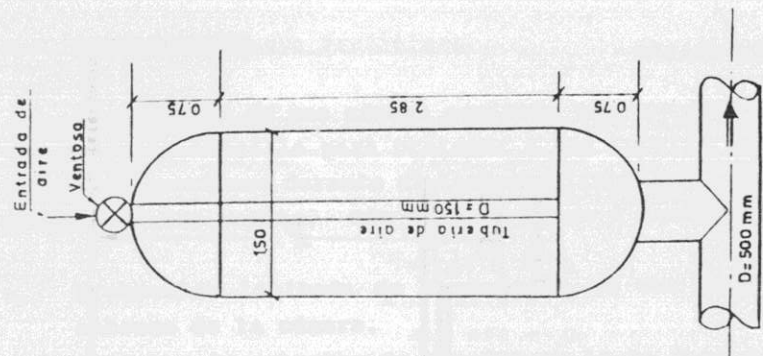


FIG. 2 - b

ANALISIS DEL CAUDAL DE DISEÑO DEL EVACUADOR
DE CRECIDAS DE LA CENTRAL RALCO
EN RELACION CON LA OPERACION DE LA OBRA

HARRY KING F

RESUMEN

El dimensionamiento de la obra de evacuación de un embalse depende del caudal de diseño, el que está relacionado con la capacidad de regulación de las crecidas afluentes, la que a su vez depende de la operación de las compuertas de la obra.

En el presente trabajo se analiza la magnitud del caudal de diseño del evacuador de crecidas de la central Ralco utilizando una determinada norma de operación, en la cual se ha considerado como variables de decisión el nivel del embalse, el caudal de regulación y el caudal evacuado por el vertedero.

Se concluye que es posible regular las crecidas afluentes al embalse Ralco operando las compuertas según una norma sencilla de aplicar y que es importante precisar una norma antes de realizar el proyecto definitivo de una obra de evacuación.

Ingeniero Civil. Empresa de Ingeniería Ingendesa S.A. (INGENDESA)
Profesor Auxiliar. Departamento de Ingeniería Civil. U. de Chile.