

# Uso de chimeneas de equilibrio con cámara de aire en instalaciones por gravedad

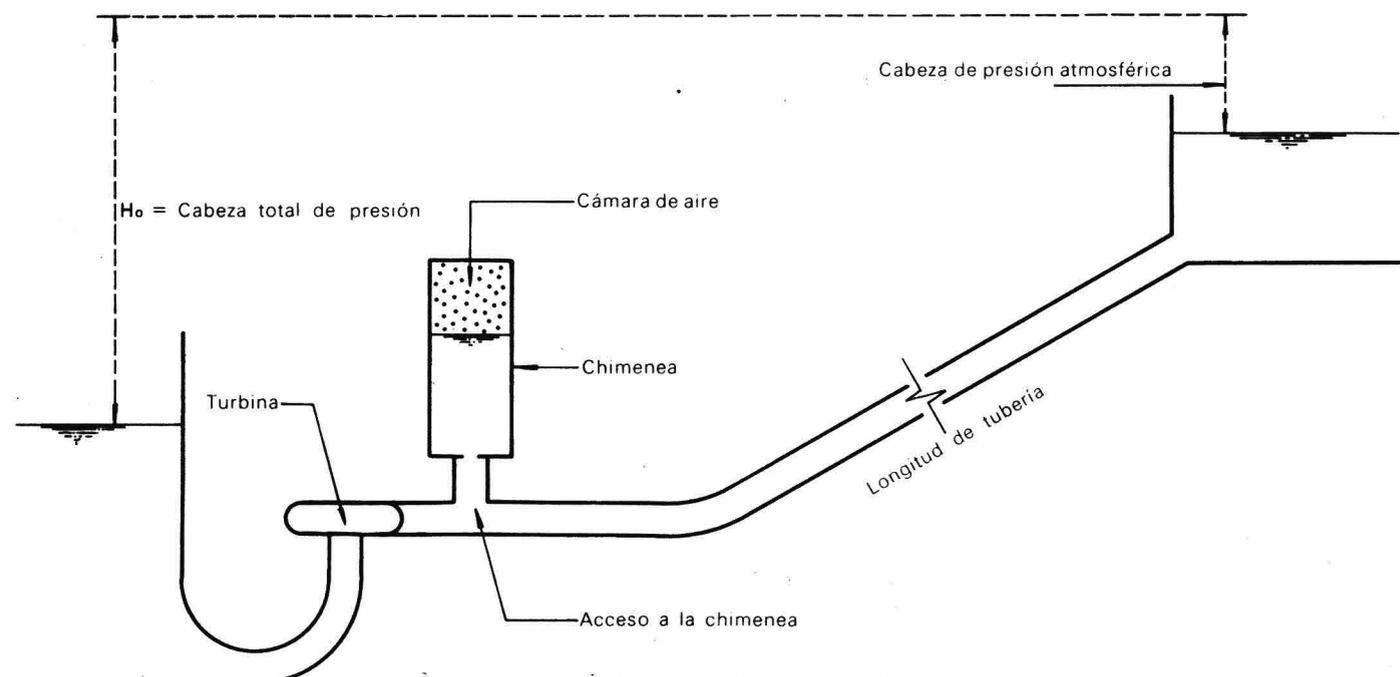
Este artículo surgió de una inquietud personal del autor, ante la falta de bibliografía para solucionar problemas de Golpe de ariete en sistemas por gravedad, especialmente en microcentrales. La investigación se desarrolló mediante dos proyectos de grado para ingenieros civiles, el primero por Alvaro Ramírez Calderón y el segundo, por Germán Nava Gutiérrez y Martha Lucía Avila González.

**JORGE ARMANDO GRANADOS ROBAYO**  
Ingeniero Civil  
M. Sc. Recursos Hidráulicos  
Profesor Asociado,  
Facultad de Ingeniería, U.N.

El control del Golpe de ariete en líneas de conducción es un factor importante para el correcto funcionamiento y protección de la instalación. El uso de chimeneas de equilibrio con cámara de aire se recomienda para estaciones de bombeo, dejando el sistema tradicional de chimenea en contacto con la presión atmosférica para instalaciones por gravedad; sin embargo, no en todos los casos la topografía es favorable para su construcción y en proyectos de poca capacidad, su costo obliga a optar soluciones imprácticas o a no proteger la conducción.

La bibliografía existente sobre este tipo de chimeneas, da parámetros de diseño y recomendaciones para el caso de bombeo pero no contempla pequeñas centrales hidroeléctricas o conducciones de acueducto y plantas de tratamiento cuyo funcionamiento se basa en la acción de la gravedad.

En el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad



**FIGURA 1. Instalación general**

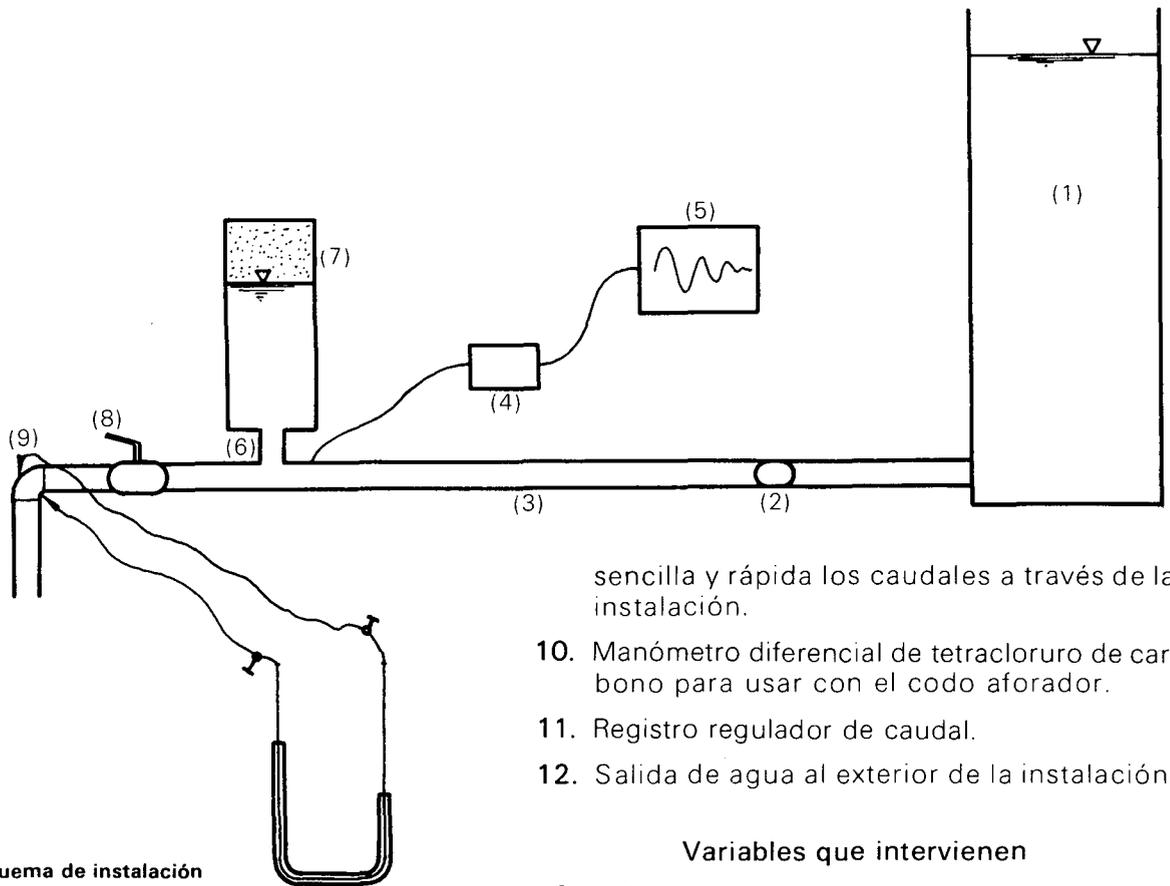


FIGURA 2. Esquema de instalación en el laboratorio.

Nacional, se realizó una investigación teórico-práctica a través de Proyectos de Grado, dejando como resultado una guía de diseño similar en su presentación a la recomendada para estaciones de bombeo. El desarrollo de la investigación y los resultados obtenidos se muestran a continuación:

1. Tanque de almacenamiento con rebosadero que permite mantener el nivel del agua constante dentro del mismo.
2. Tramo de tubería y accesorios cuyas pérdidas en función del caudal se evaluaron mediante ensayos de laboratorio.
3. Tramo recto de tubería.
4. Transductor de presiones, que se conecta a la tubería en un punto cercano a la Tee de acceso a la cámara, mediante una manguera y un racor.
5. Osciloscopio de persistencia donde se observan y miden las sobrepresiones producidas por el golpe de ariete.
6. Tee de acceso a la cámara.
7. Chimenea cerrada con cámara de aire.
8. Válvula de esfera, usada para producir cierres rápidos y simular el efecto de parada súbita de una turbina o cierre rápido de un registro de control.
9. Codo aforador, para medir de una manera

sencilla y rápida los caudales a través de la instalación.

10. Manómetro diferencial de tetracloruro de carbono para usar con el codo aforador.
11. Registro regulador de caudal.
12. Salida de agua al exterior de la instalación.

#### Variables que intervienen

- $C_o$  = Volumen de aire para flujo permanente:  $m^3$ .
- $a$  = Celeridad de la onda de presión:  $m/seg$ .
- $Q_o$  = Caudal para flujo permanente:  $m^3/seg$ .
- $L$  = Longitud de la tubería:  $m$ .
- $V_o$  = Velocidad en la tubería para flujo permanente:  $m/seg$ .
- $g$  = Aceleración de la gravedad:  $m/seg^2$ .
- $H_o^*$  = Cabeza absoluta de presión disponible.
- $h_f$  = Sumatoria de pérdidas producidas por  $Q_o$  en la tubería, accesorios y en la entrada a la cámara o chimenea.
- $p$  = Sobrepresión creada por el golpe de Ariete:  $m$ .

Parámetros adimensionales que se forman con las variables y con los cuales se trabaja la solución del problema.

$$\frac{2C_o a}{Q_o L} \quad K = \frac{h_f}{H_o^*} \quad 2g^* = \frac{a V_o}{g H_o^*}, \quad \frac{\Delta p}{H_o^*}$$

El valor de la celeridad se calcula según la expresión

$$a = \sqrt{\frac{1}{\frac{\gamma}{g} \left( \frac{1}{K} + \frac{D C I}{E e} \right)}}; \text{ donde}$$

- $\gamma$  = Peso específico del fluido:  $\text{kgf}/\text{m}^3$ .
- $K$  = Módulo de compresibilidad volumétrico del agua:  $\text{kgf}/\text{m}^2$ .
- $E$  = Módulo de elasticidad del material de la tubería:  $\text{kgf}/\text{m}^2$ .
- $D$  = Diámetro interior de la tubería: m.
- $e$  = Espesor de la tubería: m.
- $C_I$  = Coeficiente adimensional que depende del tipo de anclaje de la tubería y del material de la misma.  
Se puede tomar como la unidad.

**Orientación de los ensayos**

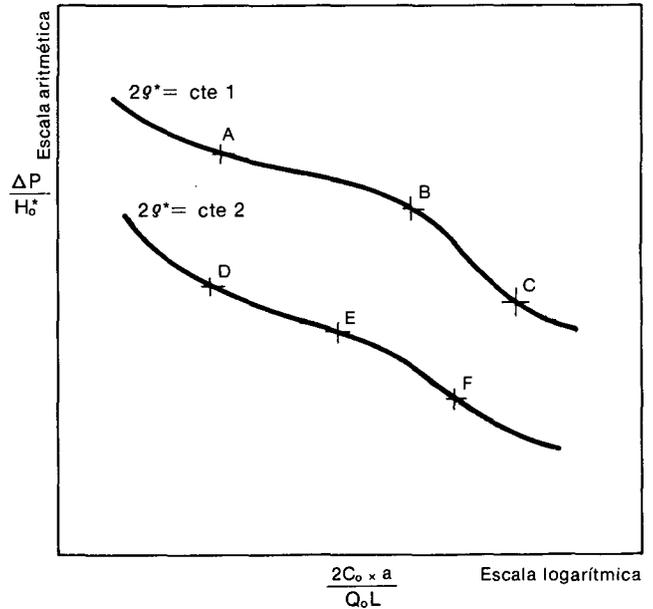
Tomando como referencia la solución para estaciones de bombeo, los ensayos se diseñaron para combinar los parámetros adimensionales de la siguiente manera:

**Abcisas:**  $\frac{2 C_o a}{Q_o L}$  en escala logarítmica.

Este parámetro se hace variar fácilmente cambiando el volumen  $C_o, K = \frac{hf}{H_o^*}$

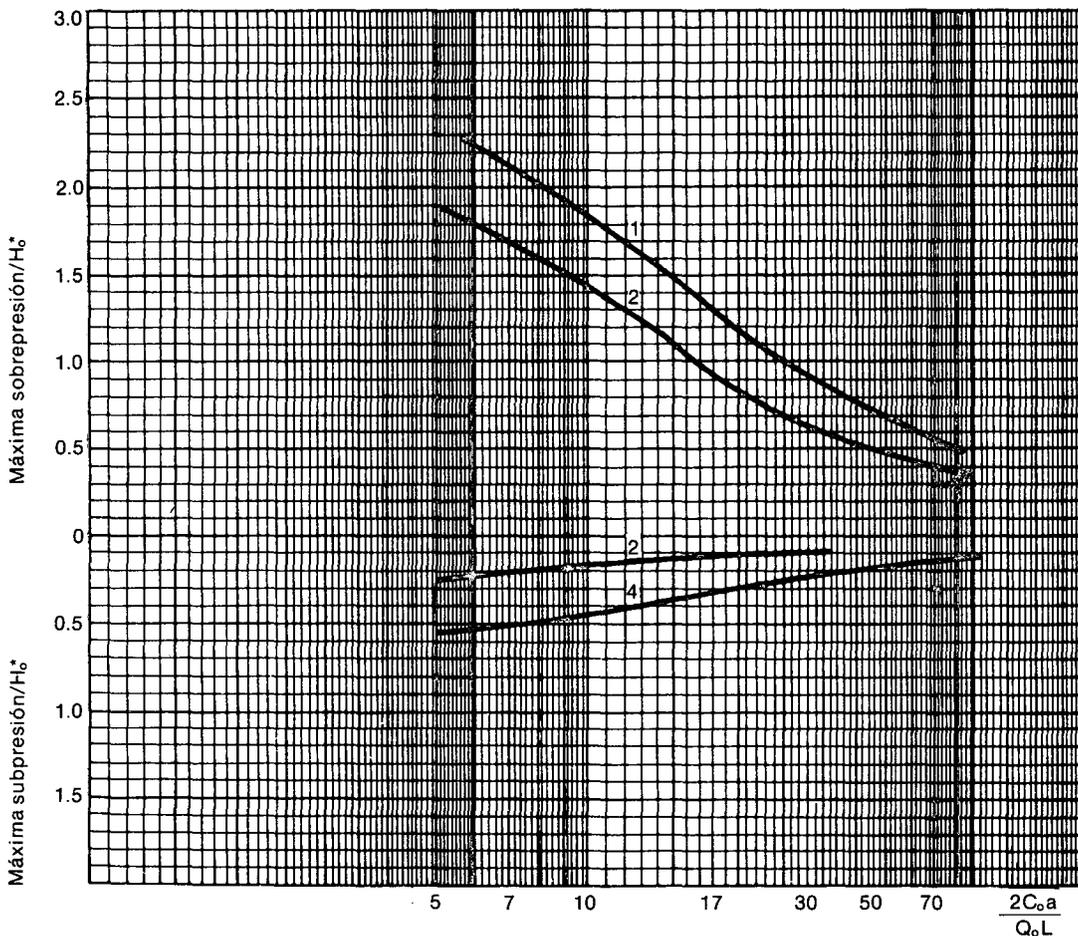
se mantiene constante para toda la gráfica que se pretende obtener.

Gráfica guía para  $K = hf/H_o^* = \text{cte}$

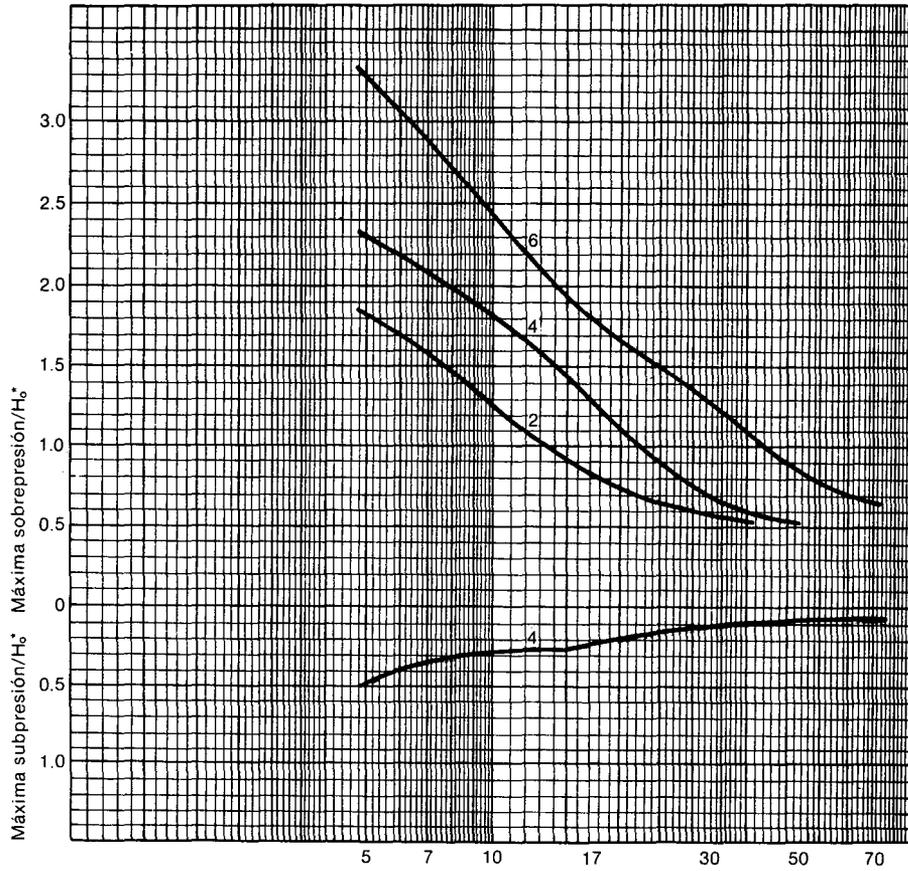


A, B, C, etc., puntos experimentales resultantes de parejas de valores de abcisas y ordenadas. Deben cumplir la condición de mantener constante el parámetro.

$$2\phi^* = \frac{aV_o}{\phi H_o^*}$$



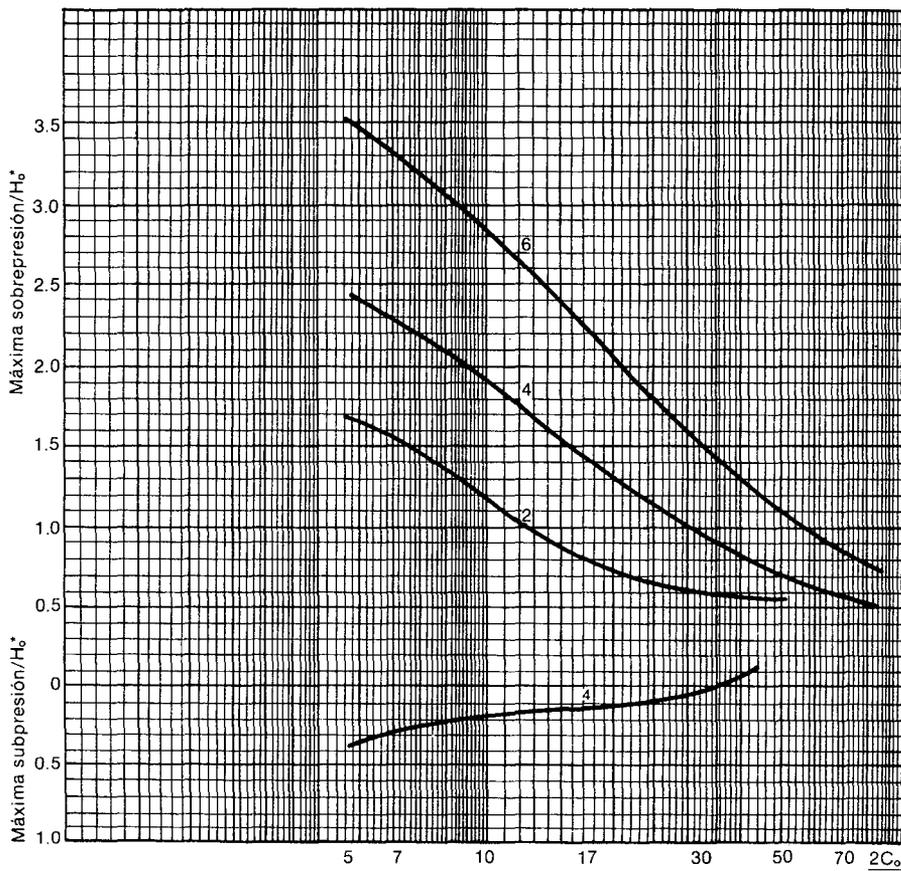
**GRAFICA 1**  
 $K = 0.1$



Los números en las curvas corresponden a valores de  $2\rho^*$

$$\frac{2C_{0a}}{Q_0L}$$

GRAFICA 2.  
K = 0.2



Los números en las curvas corresponden a valores de  $2\rho^*$

$$\frac{2C_{0a}}{Q_0L}$$

GRAFICA 3.  
K = 0.3

ya que van a formar una curva identificada por este valor.

**Ordenadas:**  $\frac{\Delta p}{H_o^*}$  Se obtienen con el valor

$\Delta p$  observado en el osciloscopio como exceso de presión sobre la presión normal de trabajo en el sitio donde se encuentra la chimenea.

En la investigación se estudiaron diferentes posibilidades para obtener las curvas deseadas, trabajo laborioso por las diversas condiciones que se deben cumplir a la vez, como son mantener constante  $2g^*$  y  $K$  que dependen a su vez de otras variables. Se empleó tubería PVC RDE 21 y se determinaron experimentalmente las pérdidas de diferentes accesorios que se pudieran acoplar a la instalación y ayudaran a satisfacer las condiciones planteadas.

Finalmente, se obtuvieron tres gráficas que se ofrecen como guía de diseño para sistemas por gravedad. Las ventajas de este tipo de chimenea son inmediatas si se comparan con la solución tradicional de chimenea con extremo superior en contacto con la atmósfera, en cuanto a espacio, costos y facilidad de construcción.

**Ejemplo de empleo de las guías de diseño**

Diseñar una chimenea con cámara de aire para el sistema mostrado en la figura, con el fin de limitar los valores de las sobrepresiones producidas por el golpe de ariete, de tal manera que la presión total sea dos veces la presión normal de trabajo de la instalación para puntos cercanos a la chimenea (valor tomado según presión de trabajo de la tubería).

Datos básicos:

Caudal:  $Q_o = 50 \text{ Lt/seg} = 5 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{seg}$

Diámetro de la tubería:  $D = 8 \text{ pulg} = 0,203 \text{ m}$ .

Sección transversal de la tubería:  $= 3,2 \times 10^{-2} \text{ m}^2$

Longitud de la tubería:  $L = 500 \text{ m}$

Material de la tubería: Asbesto cemento

**(C = 130) Clase 30 RDE = 200/22 = 9,1**

(tomado del catálogo de Eternit)

Cabeza estática:  $H_o = 70 \text{ m}$

Presión atmosférica  $H_b = 7,6 \text{ m}$

— Velocidad en la tubería:  $v_o = \frac{Q_o}{A}$

$$v_o = \frac{5 \times 10^{-2}}{3,2 \times 10^{-2}} = 1,56 \text{ m/s}$$

— Cabeza absoluta de presión:  $H_o^* = H_o + H_b$

$$H_o^* = 70 + 7,6 = 77,6 \text{ m}$$

Cálculo de la celeridad:  $a$ .

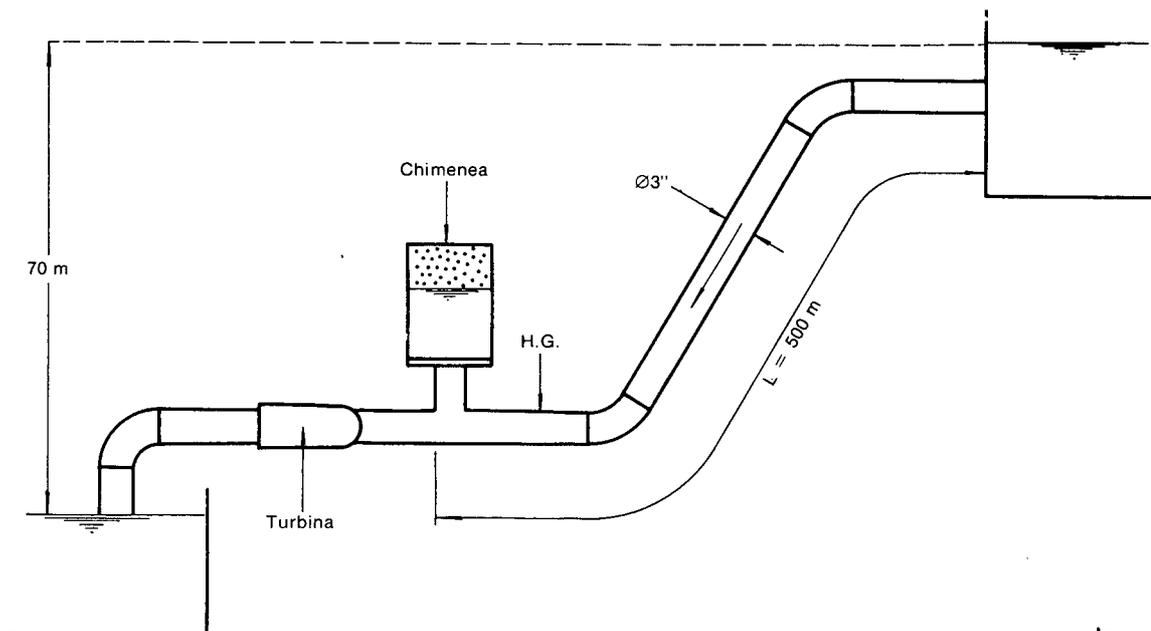
$$a = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{K} + \frac{RDE}{E}\right)g}} = \sqrt{\frac{1}{1 \times 10^{-5} \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^3} \left(\frac{1}{2,05 \times 10^5 \frac{\text{Newt.}}{\text{cm}^2}} + \frac{9,1}{2,5 \times 10^6 \frac{\text{Newt.}}{\text{cm}^2}}\right)}}$$

$$a = 1,08 \times 10^5 \text{ cm/seg} = 1,08 \times 10^3 \text{ m/seg}$$

Cálculo de la curva de diseño  $2g^*$

$$2g^* = \frac{a v_o}{g H_o^*} = \frac{1.080 \text{ m/s} \cdot 1,56 \text{ m/s}}{9,81 \text{ m/s}^2 \times 77,6 \text{ m}} = 2,21$$

Se toma  $2g^* = 2$



**FIGURA 3.** Instalación para ejercicio de aplicación.

— Determinación de las pérdidas por fricción en la tubería:  $h_f$  según expresión de Hazen-Williams.

$$h_f = 3 \times 10^{-5} \frac{L(m)}{D^{4,86}(m)} \frac{Q(l/s)^{1,85}}{C^{1,85}}$$

$$h_f = 3 \times 10^{-5} \times \frac{500}{0,203^{4,86}} \left( \frac{50}{130} \right)^{1,85} = 5,94 \text{ m}$$

— Cabeza de velocidad:  $\frac{V_o^2}{2g}$

$$\frac{V_o^2}{2g} = \frac{1,56^2}{19,62} = 0,12 \text{ m.}$$

— Caída de la línea de energía para el punto en estudio cercano a la chimenea:  $h_l$

$$h_l = h_{fl} + \frac{V_o^2}{2} = 5,94 + 0,12 = 6,06 \text{ m.}$$

Presión normal de trabajo:  $P_n$

$$P_n = H_o - H_l = 70 \text{ m} - 6,06 \text{ m} = 63,94 \text{ m}$$

— Sobrepresión máxima admisible para el punto en estudio:

Sobrepresión máxima

$$= 2,0 P_n - P_n = P_n = 63,94 \text{ m.}$$

Presión máxima en la tubería:  $2P_n = 127,88 \text{ m.}$

— Determinación del valor empleado para entrar en las guías de diseño de chimeneas con cámara de aire:

$$\frac{\text{Sobrepresión máxima}}{H_o^*} = \frac{63,94 \text{ m}}{77,6 \text{ m}} = 0,82$$

Este valor de 0,82 es válido para las tres gráficas. Por tanto, es necesario analizar cuál solución es más factible técnica y económicamente.

Para  $K = 0,1$

$$K = \frac{h_f}{H_o^*}; h_f = K \cdot H_o^* = 0,1 \cdot 77,6 \text{ m} = 7,76 \text{ m}$$

Las pérdidas por tubería hasta el sitio de la chimenea son 5,94 m. Es necesario disipar un remanente de energía con respecto al valor resultante de la guía, que se puede lograr

mediante el accesorio de entrada a la chimenea.

$$h_{\text{accesorios}} = 7,76 - 5,94 = 1,82 \text{ m.}$$

Se debe escoger un accesorio como Tee reducida, tobera, orificio, etc., que produzca esta pérdida para el caudal  $Q_o$ .

Volumen de aire que debe contener la chimenea para contrarrestar los efectos del golpe de ariete:  $C_o$ . Con el valor de sobrepresión

$$\Delta p / H_o^* = 0,82 \quad \text{y } K = 0,1; 2g^* = 2$$

se obtiene el valor de las abscisas de 20

$$\frac{2C_o a}{Q_o L} = 20; C_o = \frac{10Q_o L}{a}$$

$$C_o = \frac{10 \times 5 \times 10^{-2} \times 500}{1,08 \times 10^3} = 0,23 \text{ m}^3 = 230 \text{ lts.}$$

Suponiendo una chimenea de 16 pulgadas de diámetro, la cantidad de aire medida de la parte superior de la chimenea hacia abajo, es en altura ( $h$ ):

$$C_o = A \times h$$

$$h = 1,77 \text{ m.}$$

Se puede dejar finalmente una chimenea de 2,5 m. de altura con 1,77 m. de aire y 0,73 m. de agua que evitan la pérdida de aire hacia la conducción.

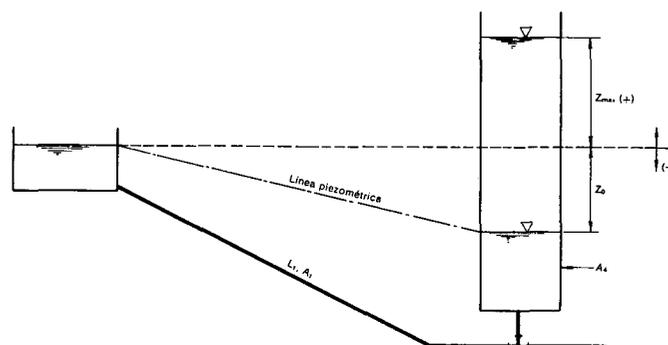
Se puede usar como complemento un compresor para reponer el aire que se alcance a mezclar con el agua, o separar los dos elementos mediante membranas de un material elástico como el neopreno.

### Comparación con la chimenea tradicional

Resolviendo la ecuación para flujo no permanente, para encontrar la altura  $Z_{mx}$ . por encima del nivel estático que alcanzaría el agua en el momento de cierre instantáneo, se tiene:

$$0 = \frac{Z_{max}}{K_1} + \frac{L_1 A_1}{A_4 K_1^2} \left[ 1 - \frac{K_1 A_4 (Z_{mx} - Z_o)}{L_1 A_1} \right]^*$$

\* Tomado de Guías de Laboratorio de Hidráulica, Universidad Nacional de Colombia.



$$Z_o = H_f + \frac{V_o^2}{2g} = 5,94 + 0,12 = 6,06 \text{ m}$$

$$Z_o = K_1 \frac{V_o^2}{2g} \quad K_1 = \frac{Z_o \times 2g}{V_o^2} =$$

$$= \frac{6,06 \times 19,62}{(1,56)^2} = 48,86$$

D1: 8"    D4: 16"

Resolviendo la ecuación por tanteos se obtiene

$$Z_{mx} = 10,17 \text{ m}$$

Esto quiere decir que la chimenea tendría en total una altura mínima de: 70 m + 10,17 m. = 80,17 m.

#### Comparación con sistema sin protección

La presión generada por el golpe de ariete en la eventualidad de no proteger la instalación con ninguno de los dos sistemas anteriores, sería:

$$\Delta p = \frac{a \times \Delta V}{g} = \frac{1,080D \text{ m/seg } 1,56 \text{ m/seg}}{9,81 \text{ m/seg}^2}$$

$$= 171,74 \text{ m}$$

La presión total sobre la tubería en sitios cercanos a la válvula es:

$$171,74 + 63,94 = 235,68 \text{ m}$$