



# Aprovechamientos Hidráulicos

## Trabajo Práctico

### - TUBERÍA FORZADA -

## Contenido

1. Función.....	2
2. Dimensionamiento .....	2
2.1. Sección transversal .....	2
2.2. Velocidades límite .....	3
2.3. Presión dimensionante .....	3
2.4. Costos.....	5
3. Procedimiento de diseño .....	7
4. Protecciones.....	10
5. Bibliografía.....	10

## 1. Función

En los saltos de agua, las tuberías de presión tienen por objeto conducir el agua desde la cámara de carga o chimenea de equilibrio hasta las turbinas, para transformar la energía potencial de posición que posee el agua en energía potencial de presión. Deben ser capaces también de soportar las presiones de la conducción del agua y las sobrepresiones que puedan producirse debidas principalmente al golpe de ariete, muy perjudicial para estas instalaciones.

## 2. Dimensionamiento

El dimensionamiento consiste en determinar tanto la geometría de la sección transversal de la tubería como su diámetro, siendo el mismo el resultado de un análisis técnico económico. Para ello es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Sección transversal
- Velocidades máximas y mínimas
- Presión interna y sobrepresiones (golpe de ariete)
- Costos de construcción, financieros y pérdidas de energía

### 2.1. Sección transversal

Para comenzar conviene definir qué forma se adoptará para la sección transversal. Esto va a estar directamente relacionado con el material que constituya la conducción, el mismo puede ser, dependiendo de la magnitud del aprovechamiento, de acero, PEAD (Polietileno de alta densidad), PVC (Policloruro de vinilo), PRFV (Plástico reforzado con fibra de vidrio), hormigón armado o incluso madera (hoy en desuso, pero utilizado a principios del siglo XX). Generalmente la mayoría de estos materiales se fabrican en forma de tubos, es decir con sección circular, a diferencia del hormigón armado que podría adoptar una forma cualquiera al ser de fabricación in situ.

Por otro lado, es muy importante tener en cuenta, como se trata siempre de maximizar los beneficios, que existan las menores pérdidas posibles. Es por ello que se conviene en adoptar la sección de forma circular por ser ésta la hidráulicamente más eficiente. La distribución de velocidades es más uniforme y no se generan zonas de vorticidad, por otro lado, el perímetro mojado es mínimo para el círculo para cualquier valor de área, es decir el radio hidráulico es máximo y por lo tanto las pérdidas por fricción son mínimas.

Entre los métodos de cálculo para las pérdidas de carga generalizadas (fricción) mencionamos la fórmula de Chèzy-Manning:

$$U = C\sqrt{R_H \cdot J}; \quad C = \frac{R_H^{1/6}}{n}$$

$$J = \frac{U^2}{C^2 \cdot R_H} = \frac{U^2 \cdot n^2}{R_H^{1/3} \cdot R_H} = \frac{U^2 \cdot n^2}{R_H^{4/3}}$$

$$\Delta h = L \cdot J = \frac{U^2 \cdot n^2 \cdot L}{R_H^{4/3}}$$

Siendo

$U$ : velocidad media

$C$ : coeficiente de Chèzy

$n$ : coeficiente de Manning

$R_H$ : radio hidráulico

$J$ : pérdida de carga unitaria

$L$ : longitud de la conducción

$\Delta h$ : pérdida de carga

Con esta fórmula se demuestra que a mayor  $R_H$ , menores son las pérdidas de carga por fricción.

## 2.2. Velocidades límite

Una vez adoptada la forma de la sección, es necesario acotar el análisis del dimensionamiento a valores limitantes tales como:

- Velocidad mínima:

Este criterio responde a adoptar como conveniente y siempre que se pueda, que las líneas de corriente sean convergentes a medida que avanza el agua en el aprovechamiento. El objetivo es evitar efectos no deseados tales como despegues de los filetes líquidos, vibraciones, vórtices y pulsaciones de presión. En este aspecto es aconsejable que la velocidad mínima a adoptar en la tubería forzada ( $v_{min}^{TF}$ ) sea mayor que la velocidad adoptada para la galería a presión ( $v^{GP}$ ).

$$v_{min}^{TF} > v^{GP}$$

- Diámetro máximo:

Como límite inferior se sugiere que el diámetro de la tubería forzada ( $D_{TF}$ ) no sea menor al diámetro de la entrada a la cámara espiral ( $D_{CE}$ ) por los mismos motivos expuestos anteriormente (filetes convergentes). En este caso se presenta un punto de encuentro entre dos caminos de diseño, ya que las dimensiones de la cámara espiral responden a la selección de la turbina hidráulica elegida por criterios de potencia, caudal, salto y eficiencia, entre otros.

$$D_{TF} > D_{CE}$$

- Velocidad máxima:

Teniendo en cuenta consideraciones de erosión, la velocidad límite máxima va a depender del material de revestimiento de la conducción. Al adoptar acero, por ejemplo, se puede tomar como liberado el límite superior de velocidad, ya que, este material tiene una alta resistencia a las velocidades de arrastre que normalmente se desarrollan en esta etapa. Sin embargo, como la sobrepresión en la tubería dependerá de la velocidad adoptada tal cual se demuestra más adelante, entonces la velocidad máxima vendrá determinada por condiciones transitorias tanto hidráulicas como eléctricas.

## 2.3. Presión dimensionante

Cómo toda tubería que trabaja a presión es necesario establecer los criterios de dimensionamiento en base a este parámetro fundamental. En el caso de los A.H. las presiones que se generan son de tres tipos:

- La presión estática, producto simplemente del desnivel topográfico que genera el salto hidráulico,
- La presión dinámica, la cual representa la presión estática máxima menos las pérdidas de carga por fricción al estar en movimiento el agua, y
- El incremento de la presión dinámica, producto de transitorios hidráulicos tales como apertura o cierre del distribuidor para entrar en operación o sacar de funcionamiento las turbinas.

El fenómeno de transitorios hidráulicos a tener en cuenta en este caso es el Golpe de ariete y se puede explicar de la siguiente forma:

Si un fluido (en este caso agua) que circula por una conducción con velocidad constante sufre una brusca desaceleración producto, por ejemplo, del cierre de una válvula que regula su paso (distribuidor), se solicita internamente el conducto con una sobrepresión definida por:

$$F = m \cdot a$$

$$m = \rho \cdot L \cdot A; \quad a = \frac{dv}{dt}$$

$$F = \rho \cdot L \cdot A \cdot \frac{dv}{dt}$$

$$\Delta P = \frac{F}{A}$$

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot L \cdot A \cdot \frac{dv}{dt}}{A} = \rho \cdot L \cdot \frac{dv}{dt}$$

Siendo

$F$ : fuerza del fluido en movimiento

$m$ : masa del fluido

$a$ : aceleración del fluido

$v$ : velocidad del fluido

$\rho$ : densidad del fluido

$L$ : longitud de la conducción

$A$ : sección transversal de la conducción

$\Delta P$ : sobrepresión en la conducción

Esta sobrepresión es transmitida en todas direcciones inmediatamente aguas arriba de la sección de cierre en donde se interrumpe el movimiento del fluido. Se transporta a su vez hacia aguas arriba en forma de onda elástica con una velocidad, denominada en este caso celeridad de la onda, que viene definida por la siguiente expresión:

$$a = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K \cdot D}{E \cdot e}}}$$

Donde

$a$ : celeridad de la onda elástica del fluido en la tubería  $\left[\frac{m}{s}\right]$

$K$ : módulo de elasticidad volumétrico del agua  $\left[\frac{N}{m^2}\right]$  (agua,  $K = 1\,962 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2}$ )

$\rho$ : densidad del líquido  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$D$ : diámetro de la tubería  $[m]$

$E$ : módulo de elasticidad de la tubería  $\left[\frac{N}{m^2}\right]$  (agua,  $E_S = 2\,200\,000 \frac{kg}{cm^2}$ , PRFV  $E_{PRFV} = 280\,000 \frac{kg}{cm^2}$ )

$e$ : espesor de la tubería  $[m]$

Pudiendo adoptarse como valor aproximado para  $a = 1\,000 \frac{m}{s}$ , pero este valor depende de las condiciones de confinamiento y apoyo de la tubería.

Para estimar la sobrepresión máxima debido al golpe de ariete en una tubería, se puede utilizar la fórmula de Michaud, siempre y cuando el cierre sea lento  $\left(tc > \frac{2L}{a}\right)$ :

$$\Delta p = \frac{2 \cdot L \cdot v}{tc \cdot g}$$

Siendo

$\Delta p$ : incremento de presión  $[m]$

$L$ : longitud de la tubería sometida a los efectos del golpe de ariete  $[m]$

$v$ : velocidad del flujo en la tubería  $\left[\frac{m}{s}\right]$

$g$ : constante gravitatoria  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

$tc$ : tiempo de cierre del distribuidor  $[s]$

Entonces, la presión interna dimensionante estará dada por la presión normal de trabajo (dinámica) adicionadas las condiciones más desfavorables de sobrepresión originadas por fenómenos transitorios ( $\Delta p$ ). Suponiendo el caso de una tubería de sección circular de acero, el espesor necesario para soportar únicamente como sollicitación a la presión interior se determina como:

$$e = \frac{P_d \cdot D_i}{2 \cdot \sigma_{adm}}$$

Siendo

$e$ : espesor mínimo de la tubería  $[m]$

$P_d$ : presión interna dimensionante  $[m]$

$D_i$ : diámetro interno de la tubería  $[m]$

$\sigma_{adm}$ : tensión admisible de fluencia para acero  $\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$ ,  $[mca]$

#### 2.4. Costos

El proceso de diseño de tuberías forzadas incluye además de los aspectos técnicos, tener en cuenta los aspectos económicos. En este caso, y siguiendo hasta ahora el caso más generalizado de tuberías forzadas de acero de sección circular, el objetivo a alcanzar es la

determinación del diámetro económico más conveniente. Para ello el análisis económico debe tener en cuenta las siguientes variables:

- Costos de construcción: Si bien requiere de un detalle pormenorizado de cada uno de los costos intervinientes, se podrían considerar a grandes rasgos los siguientes:
  - o Costos de excavación y recubrimiento (hormigón) en caso de que fuese factible colocar la tubería forzada en el interior del macizo rocoso,
  - o Costos de montaje de tubería en caso de que la traza sea exterior,
  - o Costos de materiales, como por ejemplo acero u hormigón.
- Costo anual equivalente (CAE): Es el costo por año de poseer y operar un activo durante su vida entera considerando una tasa de interés de referencia. Este se determina como:

$$CAE = \frac{C_t \cdot r \cdot (1 + r)^T}{(1 + r)^T - 1}$$

Siendo

$r$ : tasa de interés anual [%]

$T$ : tiempo de análisis económico [años]

- Costo de la energía perdida: Corresponde a la reducción de generación originada por pérdidas de carga en la conducción:

$$E = \frac{Q_M \cdot \Delta h \cdot \rho \cdot g \cdot \eta \cdot t}{1000} \quad [kWh]$$

Siendo:

$Q_M$ : caudal medio [ $\frac{m^3}{s}$ ]

$\Delta h$ : pérdidas de carga totales [m]

$\eta$ : eficiencia del aprovechamiento [%]

$t$ : tiempo medio de funcionamiento anual [horas]

Es útil representar estas variables en un gráfico como el mostrado a continuación:

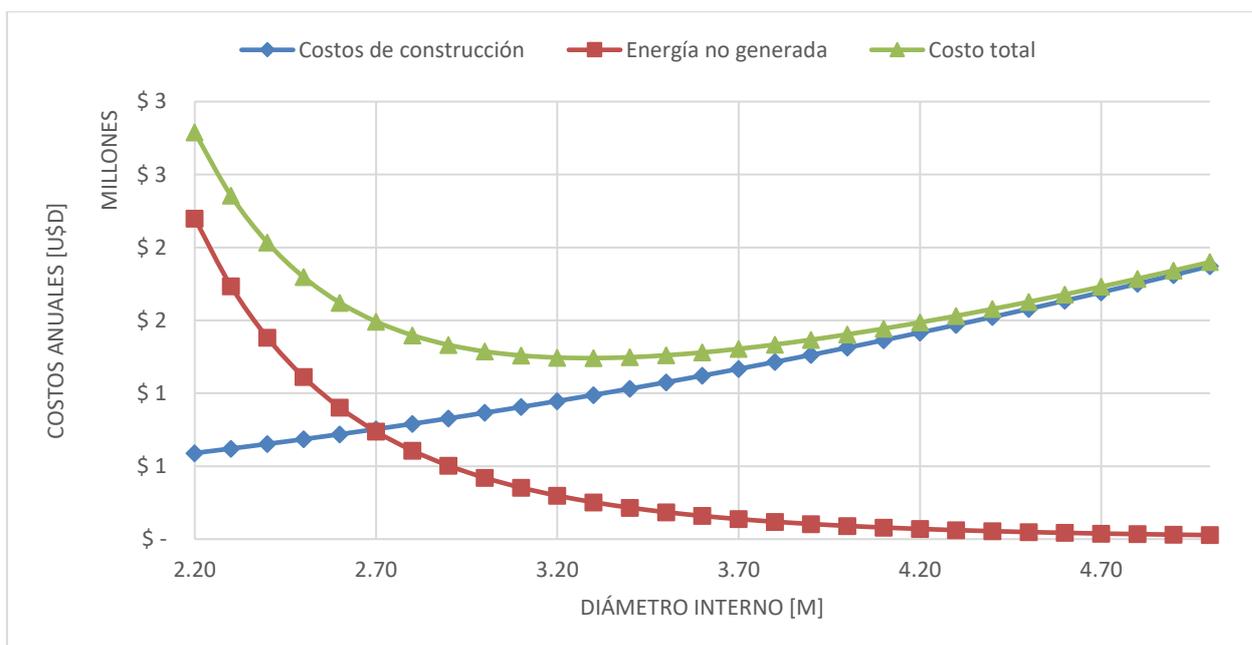


Figura 1: Análisis de diámetro económico

De este modo se puede llevar a cabo un análisis económico comparando los costos de construcción versus las pérdidas de energía. Siendo estos inversamente proporcionales, se adopta como punto de equilibrio el que, producto de la suma de ambos costos, da un costo final menor.

Por simple observación se ve como a medida que se incrementa el diámetro de la tubería se reducen las pérdidas de carga y por ende las pérdidas de energía, pero se incrementan los costos de construcción.

### 3. Procedimiento de diseño

A continuación, se enumeran los pasos a seguir para el dimensionamiento de una tubería forzada de un A.H. mediante la utilización de planillas de cálculo:

- Diámetro mínimo: Debería ser mayor al diámetro de la entrada a la cámara espiral, como en este caso todavía no se selecciona la máquina se deja abierto este límite.

$$D_{TF} > D_{CE}$$

- Diámetro máximo:

$$D_{max} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{v_{min} \cdot \pi}}$$

Se debe realizar un “barrido” de diámetros variando los valores de análisis cada 0,50 m hasta encontrar el rango en el que se generan los costos mínimos y posteriormente densificar el barrido variando el análisis cada 0,10 m para obtener mayor exactitud en la determinación. Por último, verificar que el diámetro de la tubería forzada adoptado sea mayor al diámetro de entrada de la cámara espiral:

$$D_{TF} > D_{CE}$$

- Velocidad:

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{Q}{\frac{D_i^2 \cdot \pi}{4}}$$

Donde:

$\omega$ : área sección transversal [ $m^2$ ]

$Q$ : caudal nominal [ $\frac{m^3}{s}$ ]

- Sobrepresión: Calculada con la fórmula de Michaud.

$$\Delta p = \frac{2 \cdot L \cdot v}{tc \cdot g}$$

Se suponer inicialmente cierre lento y luego se verifica:

$$tc > \frac{2 \cdot L}{a}$$

- Presión dimensionante:

$$P_d = N_{Dmax} + \Delta p$$

Siendo:

$N_{Dmax}$ : Nivel dinámico máximo [ $m$ ]

$$N_{Dmax} = N_{MME} - \Delta h - N_{RmaxQ}$$

$N_{MME}$ : nivel máximo maximorum estático en embalse [m]

$\Delta h$ : pérdidas de carga entre la obra de toma y la chimenea de equilibrio [m]

$N_{RmaxQ}$ : nivel de restitución correspondiente al total de los grupos generando a plena potencia [m]

- Espesor:

Para tubos de pared delgada, si se verifica que  $\frac{e}{D} < \frac{1}{20}$ , entonces:

$$e = \frac{P_d \cdot D_i}{2 \cdot \sigma_{adm}}$$

Siendo:

$\sigma_{adm}$ : tensión admisible de fluencia para acero  $\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$ , [mca]

- Espesor mínimo de manipulación:

Hay que verificar que el espesor dado por cálculo sea mayor que los espesores mínimos por manipulación y montaje. Para acero ASTM A 537:

$$e_{min1} = \frac{D_i + 500}{400}$$

$$e_{min2} \geq 6 \text{ mm}$$

Donde:

$e_{min1}$ : espesor mínimo para manipulación [mm]

$e_{min2}$ : espesor mínimo de un conducto forzado para normas de referencia [mm]

Sobre espesor mínimo por corrosión: 2 mm a no ser que se pida específicamente un valor más elevado.

- Diámetro externo:

$$D_e = D_i + 2e$$

- Radio hidráulico:

$$Rh = \frac{D_i}{4}$$

- Pérdidas generalizadas Chèzy-Manning:

$$\Delta hG = \frac{n^2 \cdot v^2 \cdot L}{Rh^{4/3}} \quad [m]$$

- Pérdidas singulares:

Se deben determinar de una forma precisa aquellas pérdidas de carga originadas por grandes singularidades tales como bifurcaciones, codos, reducciones, etc. Para etapa de anteproyecto se pueden considerar como:

$$\Delta hS = 10 \% \cdot \Delta hG \quad [m]$$

- Energía no generada:

$$E = \frac{Q_M \cdot \Delta hT \cdot \rho \cdot g \cdot \eta \cdot t}{1000} \quad [kWh]$$

Siendo:

$Q_M$ : caudal medio  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

$\Delta hT = \Delta hG + \Delta hS$ : pérdidas de carga totales [m]

$t$ : tiempo medio de funcionamiento anual [horas]

- Volumen excavado:

$$Ve = \frac{\pi \cdot (De + eh)^2}{4} \cdot L \quad [m^3]$$

Siendo:

$eh$ : espesor de relleno de hormigón para asiento de tubería

- Volumen de hormigón:

$$Vh = eh \cdot \pi \cdot De \cdot L \quad [m^3]$$

- Pérdidas por energía no generada:

$$Ep = E \cdot PE$$

Siendo

$PE$ : precio de energía  $\left[\frac{US\$}{kWh}\right]$

- Costos de excavación

$$Cp = Ve \cdot Pe$$

Siendo:

$Pe$ : precio de excavación  $\left[\frac{US\$}{m^3}\right]$

- Costos de hormigón:

$$Ch = Vh \cdot Ph$$

Siendo:

$Ph$ : precio del hormigón  $\left[\frac{US\$}{m^3}\right]$

$Vh$ : volumen de hormigón de revestimiento  $[m^3]$

- Costos de acero:

$$Ca = e \cdot \pi \cdot De \cdot L \cdot \gamma \cdot Pa$$

Siendo:

$Pa$ : precio del acero  $\left[\frac{US\$}{kg}\right]$

$De$ : diámetro externo [m]

- Costos de construcción:

$$Ct = Ch + Cp + Ca$$

- Costo anual equivalente:

$$CAE = \frac{Ct \cdot r \cdot (1 + r)^T}{(1 + r)^T - 1}$$

- Costo total de inversión:

$$CT = Ep + Ct$$

- Condición de regulación:

Se debe verificar que, para un correcto funcionamiento de la central, una buena regulación, el golpe de ariete o sobrepresión respecto del salto neto debe ser:

$$\frac{\Delta p}{H_{nM}} < 40 \%$$

Siendo:

$H_{nM}$ : salto neto máximo [m]

#### 4. Protecciones

Como acciones básicas para control de incrementos de presión se mencionan:

- Incrementar la magnitud de los conductos
- Incorporar una chimenea de equilibrio
- Regular la tasa de incremento de apertura o cierre de las válvulas o distribuidor
- Disminuir la aceleración de la unidad por incremento del momento de inercia de las partes rotantes, principalmente del generador a los fines de incrementar el tiempo de cierre
- Adicionar o sustraer cantidad de agua proveyendo válvulas reguladoras o válvulas

La mejor solución puede ser una combinación de alternativas, pero debe tenerse en cuenta que las variaciones efectuadas (chimenea de equilibrio, la variación del diámetro de los conductos o redimensionamiento de la conducción) pueden cambiar la frecuencia natural del sistema por lo que deber reestudiarse posibles efectos de resonancia.

#### 5. Bibliografía

- Apuntes de Cátedra "Aprovechamientos Hidráulicos", Facultad de Ingeniería, UNCuyo.