Tema 7. Fórmulas empíricas para el cálculo de pérdidas de carga continuas en tuberías

1. Fórmulas para el régimen turbulento liso
2. Fórmulas para el régimen turbulento en la zona de transición
3. Fórmulas para el régimen turbulento rugoso
4. Velocidades mínimas y máximas
5. Diseño económico de tuberías. Concepto de diámetro óptimo

Las fórmulas empíricas han sido deducidas experimentalmente para los distintos materiales y responden a la forma general $h_c = c \cdot Q^{\alpha} \cdot D^{-\beta} \cdot L$, siendo *c* un coeficiente de proporcionalidad y $1.75 \leq \beta \leq 2$. El coeficiente *c* no es adimensional, y por tanto, hay que utilizar las unidades adecuadas.

Siempre que no se indique lo contrario, las unidades empleadas en las fórmulas corresponden al sistema internacional, es decir:

$Q = m^3/s$ $D = m$ $L = m$ $v = m/s$ $J = {}^{o}/_{1}$ $h_c = mca$

En cierto modo, β es un indicador del régimen hidráulico, ya que aumenta conforme se incrementa el número de Reynolds, es decir, según el régimen es más turbulento. En riegos localizados de alta frecuencia se aconseja el empleo de fórmulas con $\beta=1.75$, no siendo adecuadas aquéllas en que $\beta>1.80$. Es por ello que, al adoptar el coeficiente reductor de las pérdidas de carga en función del número de derivaciones de la tubería o *coeficiente de Christiansen* (F), se toma $\beta=1.75$ para riego por goteo mientras que $\beta=1.80$ en riegos por aspersión, como veremos en el siguiente bloque temático.

En el ***régimen crítico***, $2000<Re<4000$ y $f=f(Re)$, pero ya no es válida la relación de Hagen-Poiseuille para régimen laminar $\left(f = \frac{64}{Re}\right)$, ya que el flujo es inestable y se comporta unas veces como laminar y otras como turbulento. En el caso de tuberías de plástico (PVC ó PE) puede utilizarse la fórmula de Blasius para el régimen turbulento liso con bastante aproximación, ya que el error cometido no supera el 2%.

1. Fórmulas para el régimen turbulento liso.

En el régimen turbulento liso, f = $f(R_e)$, $(R_e)_r \leq 3.5\text{-}5$ y β=1.75.

Blasius (1911)

$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}}$$

Para una temperatura del agua de 20ºC, $h_C = 0.00078 \cdot \frac{Q^{1.75}}{D^{4.75}} \cdot L$

Con Q (l/h) y D (mm), la ecuación quedaría:

$$h_C = 0.473 \cdot \frac{Q^{1.75}}{D^{4.75}} \cdot L$$

Válida para tubos lisos y $3{\cdot}10^3 < Re < 10^5$. Muy indicada para tuberías de plástico en riego localizado.

Cruciani – Margaritora

$$J(\%) = \frac{0.099}{D^{4.75}} \cdot Q^{1.75}$$

Se emplea en tuberías de polietileno (PE) y para $10^5 < R_e < 10^6$.

2. Fórmulas para el régimen turbulento en la zona de transición.

En este caso, f = $f(R_e, K/D)$, $5 < (R_e)_r \leq 70$ y $1.75 < \beta < 2$.

Scimeni

Se emplea en tuberías de fibrocemento.

La ecuación de Scimeni para la velocidad es $v = 158 \cdot R^{0.68} \cdot J^{0.56}$, y como el radio hidráulico para tuberías circulares es R = D/4, quedaría:

$$v = 61.5 \cdot D^{0.68} \cdot J^{0.56}$$

$$Q = v \cdot s \quad \Rightarrow \quad Q = 48.3 \cdot D^{2.68} \cdot J^{0.56}$$

Despejando: $$J = 0.00098 \cdot \frac{Q^{1.79}}{D^{4.79}}$$

Hazen – Williams (1903)

$$f = \frac{13.69 \cdot g}{c^{1.85} \cdot v^{0.15} \cdot D^{0.17}}$$

Introduciendo este valor en la ecuación general de Darcy-Weisbach, poniendo la velocidad en función del caudal y operando, se obtiene:

$$h_C = \frac{10.7}{c^{1.85} \cdot D^{4.87}} \cdot Q^{1.85} \cdot L$$

Ecuación válida para diámetros no inferiores a 50 mm.

Los valores del coeficiente c de Hazen-Williams para los distintos materiales, clase y estado de los tubos, son los siguientes:

Material, clase y estado del tubo	c
Tuberías de plástico nuevas	150
Tuberías muy pulidas (fibrocemento)	140
Tuberías de hierro nuevas y pulidas	130
Tuberías de hormigón armado	128
Tuberías de acero nuevas	120
Tuberías de palastro roblonado nuevas	114
Tuberías de acero usadas	110
Tuberías de fundición nuevas	100
Tuberías de palastro roblonado usadas	97
Tuberías de fundición usadas	90-80

Scobey

Se emplea fundamentalmente en tuberías de aluminio. En el cálculo de tuberías en riegos por aspersión hay que tener en cuenta que la fórmula incluye también las pérdidas accidentales o singulares que se producen por acoples y derivaciones propias de los ramales, es decir, proporciona *las pérdidas de carga totales*. Viene a mayorar las pérdidas de carga continuas en un 20%.

$$h_T = 2.587 \cdot 10^{-3} \cdot K \cdot \frac{v^{1.9}}{D^{1.1}} \cdot L$$

Expresando la velocidad en función del caudal mediante la relación $v = \frac{Q}{S} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}$, la ecuación quedaría:

$$h_T = 4.098 \cdot 10^{-3} \cdot K \cdot \frac{Q^{1.9}}{D^{4.9}} \cdot L$$

El valor del coeficiente K, que se recoge en la tabla siguiente, depende del material de la tubería.

Material	**K**
Tubos de acero galvanizado con acoples	0.42
Tubos de aluminio	0.40
Tuberías de acero nuevas	0.36
Tuberías de fibrocemento y plásticos	0.32

Veronesse – Datei

Se emplea en tuberías de PVC y para $4 \cdot 10^4 < Re < 10^6$

$$J(\%) = \frac{0.092}{D^{4.8}} \cdot Q^{1.8} \qquad h_C = \frac{0.00092}{D^{4.8}} \cdot Q^{1.8} \cdot L$$

3. Fórmulas para el régimen turbulento rugoso.

En el régimen turbulento rugoso, $f = f(K/D)$, $(R_e)_r > 70$ y $\beta = 2$.

Manning

$$h_C = \frac{10.3 \cdot n^2}{D^{5.33}} \cdot Q^2 \cdot L$$

siendo n el *coeficiente de rugosidad de la tubería*, cuyo valor depende del tipo de material.

Material	n
Plástico (PE)	0.006 – 0.007
Plástico (PVC)	0.007 – 0.009
Fibrocemento	0.011 – 0.012
Fundición	0.012 – 0.013
Hormigón	0.013 – 0.014
Acero comercial	0.015

En función del ***material de la tubería***, las fórmulas más adecuadas son:

Material	Fórmula
PVC	Veronesse – Datei
PE	Blasius
Fibrocemento	Scimeni
Aluminio	Scobey
Fundición Acero	Hazen - Williams

4. Velocidades mínimas y máximas.

Es necesario establecer un criterio que fije un valor máximo y otro mínimo para la velocidad del agua en las tuberías, ya que puede ser perjudicial tanto una velocidad demasiado alta como demasiado baja.

Un exceso de velocidad puede:

- Originar golpes de ariete, cuyo valor de sobrepresión puede provocar roturas.
- Producir excesivas pérdidas de carga.
- Favorecer las corrosiones por erosión.
- Producir ruidos, que pueden ser muy molestos.

Una velocidad demasiado baja:

- Propicia la formación de depósitos de las sustancias en suspensión que pudiera llevar el agua, provocando obstrucciones.
- Implica un diámetro de tubería excesivo, sobredimensionado, con lo que la instalación se encarece de forma innecesaria.

Para presiones normales, de 2 a 5 atm, puede utilizarse la ***fórmula de Mougnie*** para establecer las velocidades límites admisibles:

$$v = 1.5 \cdot \sqrt{D + 0.05}$$

A partir de la fórmula de Mougnie y de la ecuación $v = \frac{Q}{s} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}$, se obtiene:

$$Q = 1.178 \cdot D^2 \cdot \sqrt{D + 0.05}$$

Ecuación que permite calcular el diámetro mínimo de una tubería conocido el caudal aproximado que va a circular por ella.

En principio, *valores adecuados de la velocidad son los comprendidos entre 0.5 y 2.5 m/s*.

5. Diseño económico de tuberías. Concepto de diámetro óptimo.

Cuando se tiene que impulsar un caudal de agua a un desnivel dado, *la altura que debe generar la bomba es igual a la altura geométrica a vencer más las pérdidas de carga existentes.*

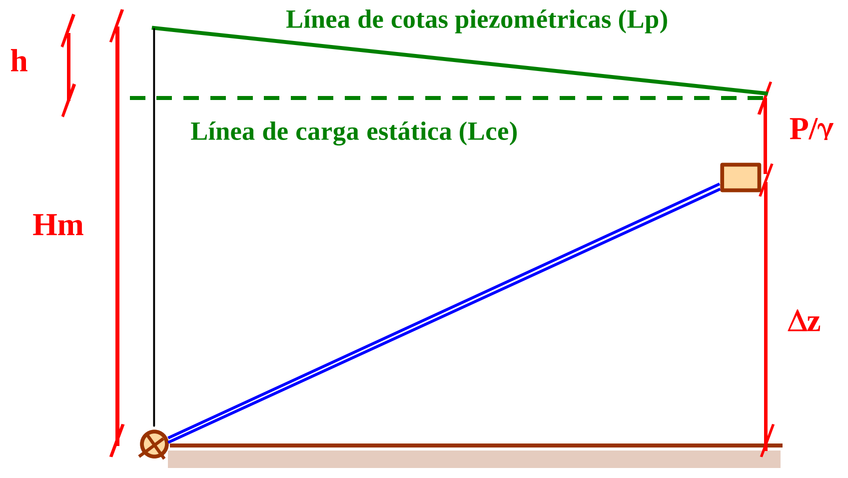
$$Hm = Hg + h$$

El primer sumando (Hg) depende exclusivamente de las *cotas del terreno* (desnivel entre la bomba y el depósito) y de la *presión residual* o *mínima necesaria* al final del trayecto, por lo que se trata de una energía que es independiente del diámetro.

$$Hg = \Delta z + \frac{P}{\gamma}$$

Sin embargo, para un caudal dado, el segundo sumando (h) *depende exclusivamente del diámetro adoptado*, de manera que como las pérdidas de carga disminuyen considerablemente al aumentar el diámetro, se precisaría menos energía para transportar el agua. Por el contrario, un aumento del diámetro da lugar a un mayor coste de la instalación.

En toda instalación existe una solución que hace mínima la suma del coste de la energía necesaria para vencer las pérdidas (calculadas para un año medio) más la anualidad de amortización de la tubería.



Fórmulas para el dimensionado económico de tuberías

Fórmula de Bresse

Es la primera fórmula que aparece en la bibliografía hidráulica sobre el dimensionado económico de tuberías.

$$D = 1.5 \cdot \sqrt{Q}$$

Se trata de un criterio muy elemental y conservador, ya que corresponde a una velocidad constante de 0.57 m/s, velocidad ampliamente superada hoy en día.

Fórmula de Mendiluce

$$v_{\text{óptima}} = 0.348 \cdot \sqrt[3]{\frac{c \cdot a \cdot \eta}{k \cdot p \cdot n}}$$

$$D = 1.913 \cdot \left(\frac{k \cdot p \cdot n}{c \cdot a \cdot \eta} \right)^{0.166} \cdot \sqrt{Q}$$

Siendo:

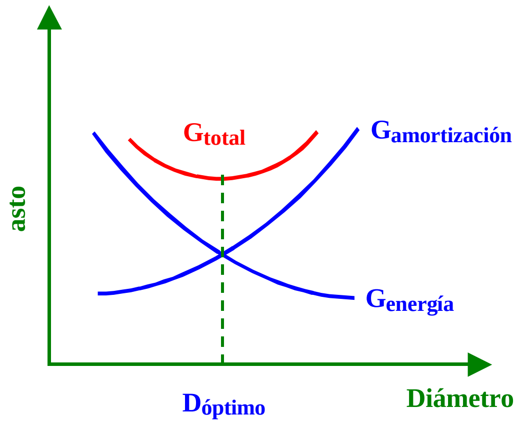
c = coste de la tubería instalada por metro de ϕ y por metro de longitud (pts/m.l.$\times$ m)
a = factor de amortización
η = rendimiento global del grupo motor – bomba
k = coeficiente de pérdida de carga en la tubería
p = precio del kw·h
n = número de horas de funcionamiento anual

Hay más fórmulas propuestas por distintos autores, como ***Melzer***, ***Vibert***, etc., que tratan de determinar el diámetro óptimo para una conducción.

Cálculo basado en la evaluación real de los costes.

El diámetro más económico es aquél cuya suma de los gastos anuales debidos a la energía consumida más el valor de la anualidad por la inversión efectuada, es mínima. Por tanto, la ecuación a cumplir es:

$G_{amortización} + G_{energía} = Mínimo$



Estos cálculos requieren de programas informáticos por el volumen de datos a tener en cuenta y lo tedioso y reiterativo de su ejecución.