VII. ANALISIS Y DISEÑO DE SISTEMAS DE TUBERÍAS

- Al **analizar sistemas hidráulicos** pretendemos conocer *P* y *V* en cada punto de la instalación, para ello debemos conocer perfectamente la geometría de la instalación (D, L, k, K_i,…)

- Al **proyectar** una conducción por tuberías entre dos puntos tendremos normalmente como datos de partida:
    - Q a transportar
    - Perfil de la conducción en planta y alzado
    - Desniveles piezométricos o geométricos entre el punto inicial y final
    - Rugosidad del material elegido

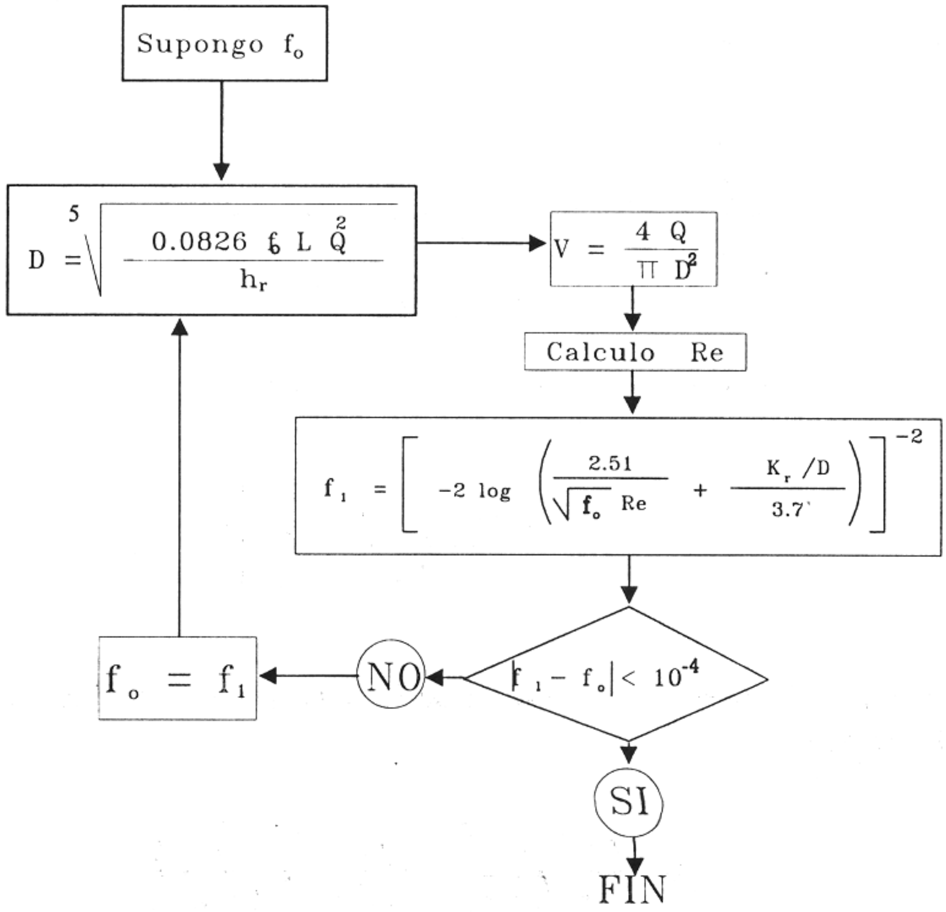
- A partir de estos datos se procede al dimensionamiento hidráulico y mecánico de la conducción determinando:
    - Diámetro o diámetros comerciales elegidos
    - Timbrajes
    - Piezas especiales y dispositivos que exija el trazado y las condiciones de funcionamiento de la instalación.

DISEÑO DE TUBERÍAS SIMPLES

A partir de Darcy-Weisbach:

$$D = \left(\frac{0{,}0826 \cdot f \cdot L \cdot Q^2}{h_r} \right)^{\frac{1}{5}}$$

A priori, el nº de Reynolds es desconocido, al ser función del diámetro, por lo que no puede calcularse el valor de *f* directamente y debe seguirse un proceso iterativo para su cálculo (este procedimiento se puede evitar empleando formulas de pérdidas de carga exponenciales o suponiendo un valor de *f* que se comprobará



posteriormente):

Dado que el resultado obtenido corresponde a un valor teórico, que no tiene por que coincidir con cualquiera de los diámetros interiores de la serie comercial disponible, se plantean dos soluciones:

1. Tubería de característica única. Se adoptará el diámetro comercial inmediatamente superior al calculado. En este caso, las h_r reales serán menores. La *P* resultante en el extremo de agua abajo será mayor que la prevista, o el *Q* mayor al considerado inicialmente.

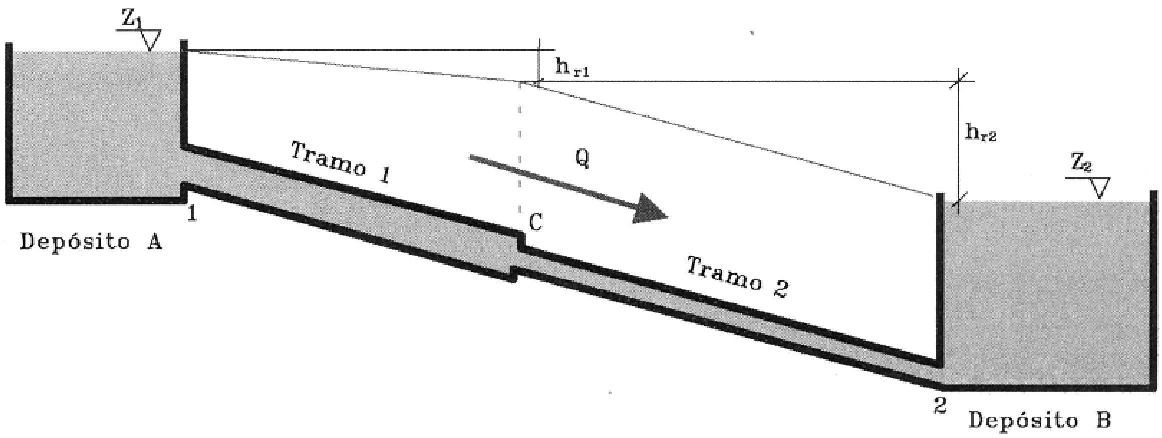
2. Tubería telescópica. Consiste en colocar dos tramos de dos diámetros distintos. Se deberá cumplir:

$D_1 > D_{calculado} > D_2$

$L_1 + L_2 = L$

$h_{r1} + h_{r2} = h_r \quad \Rightarrow$ Incógnitas L_1 y L_2

TUBERÍAS CONECTADAS EN SERIE



$$D_1, f_1, L_1 \qquad D_2, f_2, L_2$$

$$\Delta H_{1\to 2} = h_{r1} + h_{r2}$$

$$Q = Q_1 = Q_2$$

$$\Delta H_{1\to 2} = \left(\frac{P_1}{\gamma} + z_1\right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + z_2\right) = z_1 - z_2 = \Delta z$$

$$\Delta H_{1\to 2} = f_1 \cdot \frac{L_1}{D_1} \cdot \frac{V_1^2}{2g} + f_2 \cdot \frac{L_2}{D_2} \cdot \frac{V_2^2}{2g}$$

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CARTAGENA
ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIERIA AGRONOMICA
Departamento de Ingeniería de Alimentos y del Equipamiento Agrícola
Edificio Minas, Pº Alfonso XIII, 48 • 30203 Cartagena (SPAIN)
Tel. 968-325732 – Fax. 968-325732

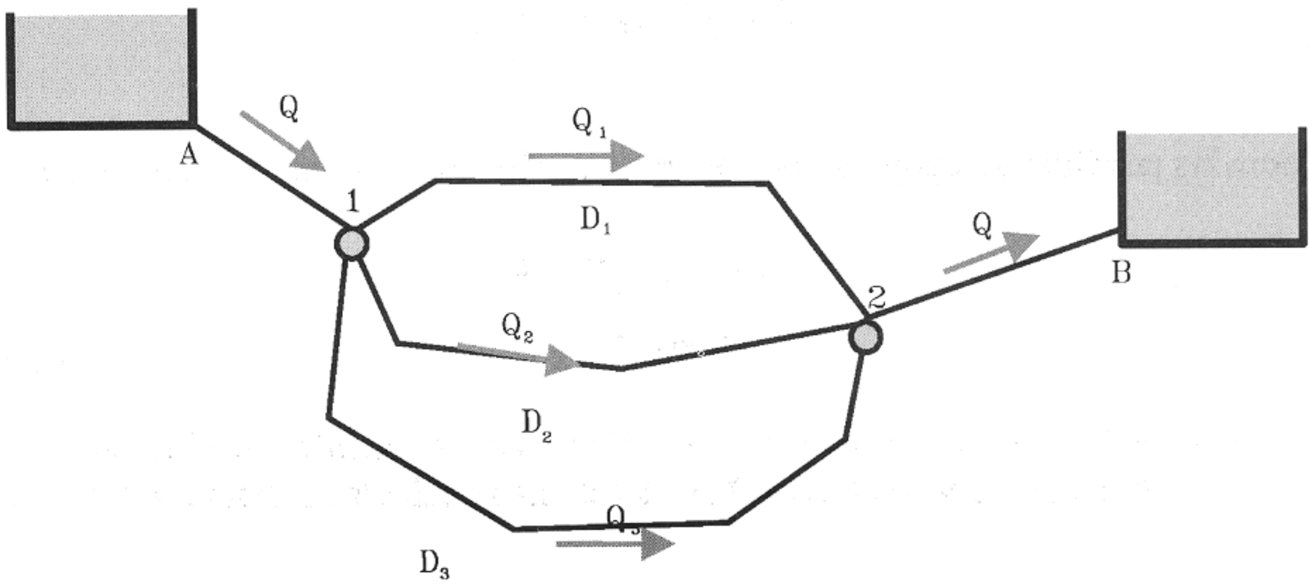
$$Q = V_1 \cdot S_1 = V_2 \cdot S_2 \quad \Rightarrow \quad V_2 = \left(\frac{D_1^2}{D_2^3}\right) \cdot V_1$$

$$\Delta H_{1\to 2} = \frac{V_1^2}{2g} \cdot \left[f_1 \cdot \frac{L_1}{D_1} + f_2 \cdot \frac{L_2}{D_2} \cdot \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4 \right]$$

$$Q = V_1 \cdot S_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2 \cdot V_1}{4} \quad \Rightarrow \quad V_1^2 = \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D_1^4}$$

$$Q = \left[\frac{\Delta H_{1\to 2} \cdot D_1^4}{0.0826 \cdot \left[f_1 \cdot \frac{L_1}{D_1} + f_2 \cdot \frac{L_2}{D_2} \cdot \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4 \right]} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{\Delta H_{1\to 2}}{0.0826 \cdot \left[f_1 \cdot \frac{L_1}{D_1^5} + f_2 \cdot \frac{L_2}{D_2^5} \right]} \right]^{\frac{1}{2}}$$

TUBERÍAS CONECTADAS EN PARALELO



$$D_1, f_1, L_1 \qquad D_2, f_2, L_2 \qquad D_3, f_3, L_3$$

$$Q = \sum_i Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$\Delta H_{1\to 2} = \left(\frac{P_1}{\gamma} + z_1\right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + z_2\right) = h_{r1} = h_{r2} = h_{r3}$$

$$h_{r1} = 0.0826 \cdot f_1 \cdot L_1 \cdot \frac{Q_1^2}{D_1^5}$$

$$h_{r2} = 0.0826 \cdot f_2 \cdot L_2 \cdot \frac{Q_2^2}{D_2^5}$$

$$h_{r3} = 0.0826 \cdot f_3 \cdot L_3 \cdot \frac{Q_3^2}{D_3^5}$$

$$Q = \sum_i Q_i = \sqrt{\frac{\Delta H_{1\to 2} \cdot D_1^5}{0.0826 \cdot f_1 \cdot L_1}} + \sqrt{\frac{\Delta H_{1\to 2} \cdot D_2^5}{0.0826 \cdot f_2 \cdot L_2}} + \sqrt{\frac{\Delta H_{1\to 2} \cdot D_3^5}{0.0826 \cdot f_3 \cdot L_3}}$$

TUBERÍAS EQUIVALENTES

Una tubería es equivalente a otras cuando transporta la misma cantidad de agua Q bajo la misma pérdida de carga total h_{ct}.

- Tuberías en serie:

$$h_{ci} = 0.0826 \cdot f_i \cdot L_i \cdot \frac{Q^2}{D_i^5} \Rightarrow h_{ct} = 0.0826 \cdot Q^2 \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{f_i \cdot L_i}{D_i^5} = 0.0826 \cdot Q^2 \cdot \frac{f_e \cdot L_e}{D_e^5}$$

$$\frac{f_e \cdot L_e}{D_e^5} = \sum_{i=1}^{n} \frac{f_i \cdot L_i}{D_i^5}$$

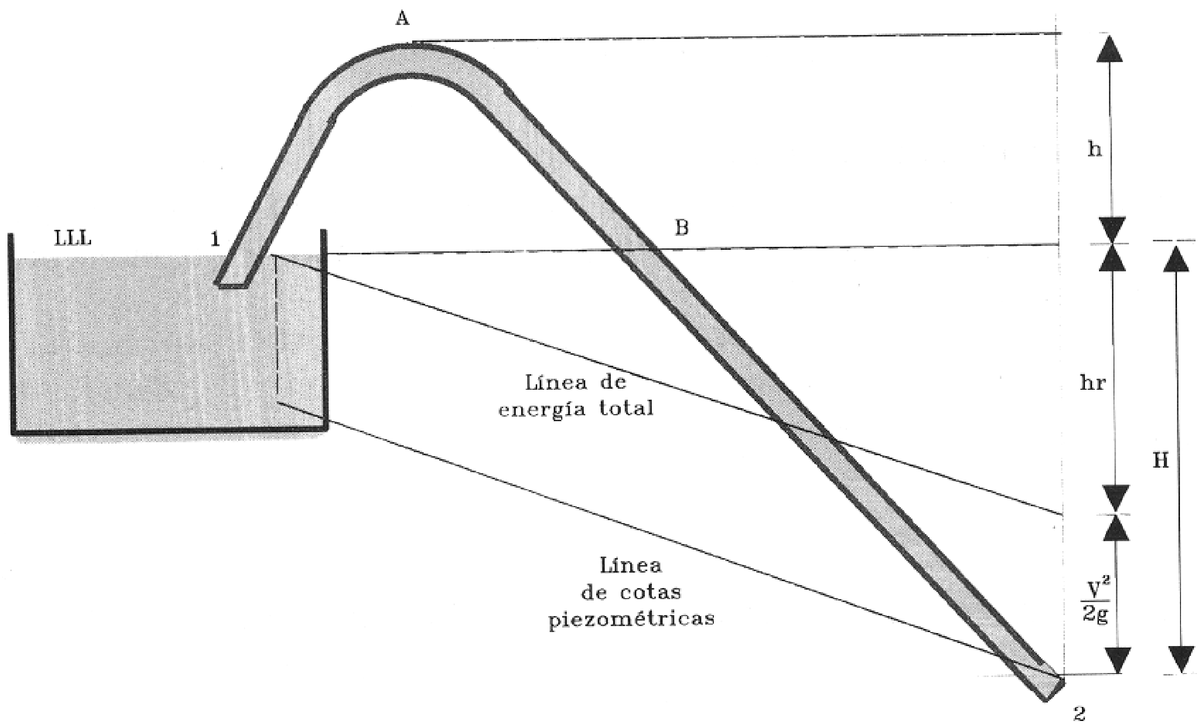
- Tuberías en paralelo:

$$h_{ct_{AB}} = 0.0826 \cdot f_i \cdot L_i \cdot \frac{Q^2}{D_i^5} = 0.0826 \cdot f_e \cdot L_e \frac{Q^2}{D_e^5}$$

$$Q = \sum_{i=1}^{n} Q_i = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{\frac{h_{ct_{AB}} \cdot D_i^5}{0.0826 \cdot f_i \cdot L_i}} = \sqrt{\frac{h_{ct_{AB}} \cdot D_e^5}{0.0826 \cdot f_e \cdot L_e}}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sqrt{\frac{D_i^5}{f_i \cdot L_i}} = \sqrt{\frac{D_e^5}{f_e \cdot L_e}}$$

SIFONES



Es una conducción cerrada que eleva líquido a una altura superior a la de la superficie libre del líquido en el origen, descargando posteriormente a una altura inferior a la del origen (punto 2).

- Calculo del caudal circulante. Se aplica Bernouilli entre 1 y 2:

$$z_1 = z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H_{1\to 2}$$

$$z_1 - z_2 = H = \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H_{1\to 2} = \frac{V_2^2}{2g} + f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V_2^2}{2g} + \sum K_i \cdot \frac{V_2^2}{2g} = \frac{V_2^2}{2g}\left(1 + f \cdot \frac{L}{D} + \sum K_i\right)$$

$$Q = V_2 \cdot S = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{1 + f \cdot \frac{L}{D} + \sum K_i}} \cdot S$$

- Presión mínima en el sifón. Se aplica Bernouilli ente 1 y A:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + \Delta H_{1\to A}$$

$$\frac{P_A}{\gamma} = (z_1 - z_A) - \frac{V_A^2}{2g} - f \cdot \frac{L'}{D} \cdot \frac{V_A^2}{2g} - \sum K_i \cdot \frac{V_A^2}{2g} = -H_A - \frac{V_A^2}{2g}\left(1 + f\frac{L'}{D} + \sum K_i\right)$$

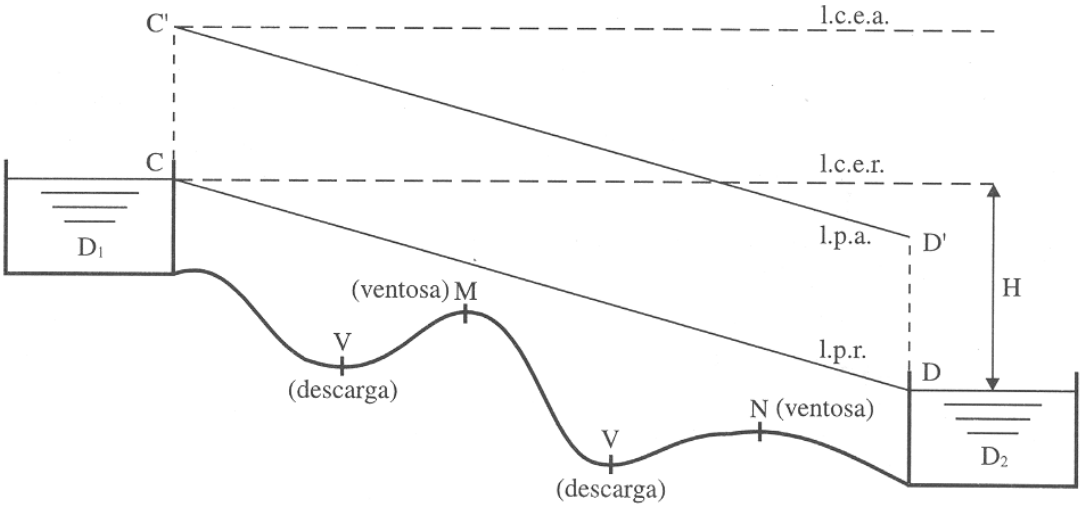
Para que no se produzca cavitación e interrupción del flujo debe cumplirse:

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{P_0}{\gamma} > \frac{P_V}{\gamma}$$

SITUACIONES BÁSICAS EN CONDUCCIONES SIMPLES EN FUNCIÓN DE LA LINEA PIEZOMÉTRICA Y EL PERFIL DE LA TUBERÍA.

Se exponen una serie de casos con el fin de conocer los fenómenos que pueden hacer que nuestras instalaciones hidráulicas no respondan a los caudales obtenidos analíticamente.

1. Funcionamiento normal. $Q_{real} = Q_{calculado}$. Eliminación automática del aire con ventosas sencillas.



2. Sifón con cebado automático. $Q_{real} = Q_{calculado}$, pero el funcionamiento puede ser anormal (no continuo). Es necesario instalar ventosas para presiones negativas.

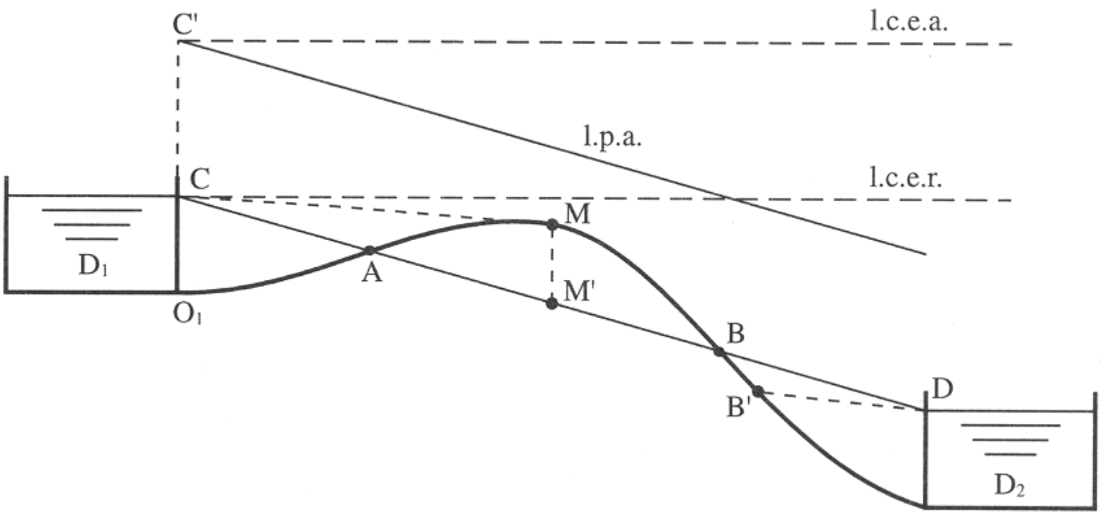


FIGURA 10.2

3. Sifón con cebado automático en peores condiciones. Nunca puede transportar el $Q_{calculado}$ porque el agua cavitaría.

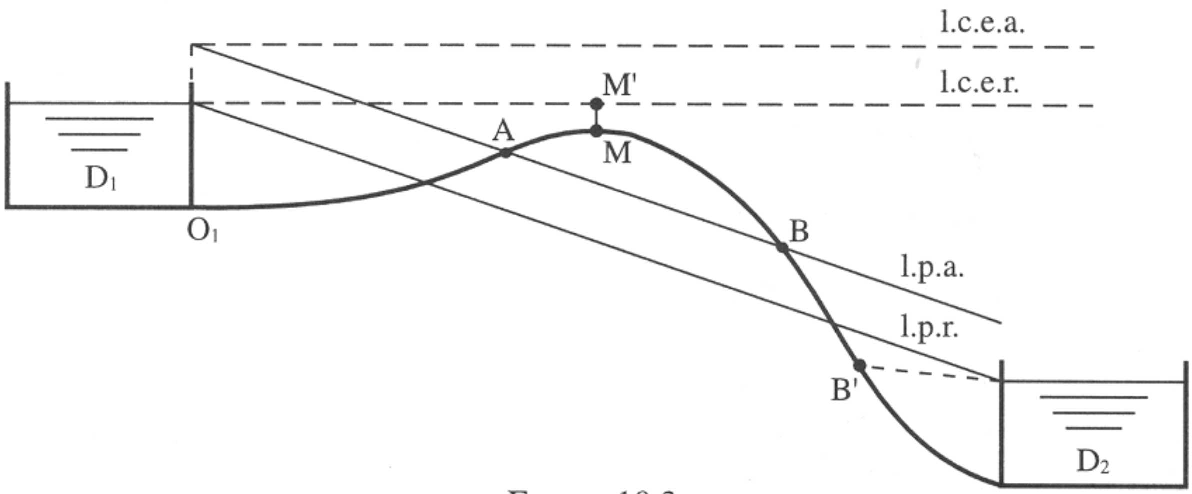
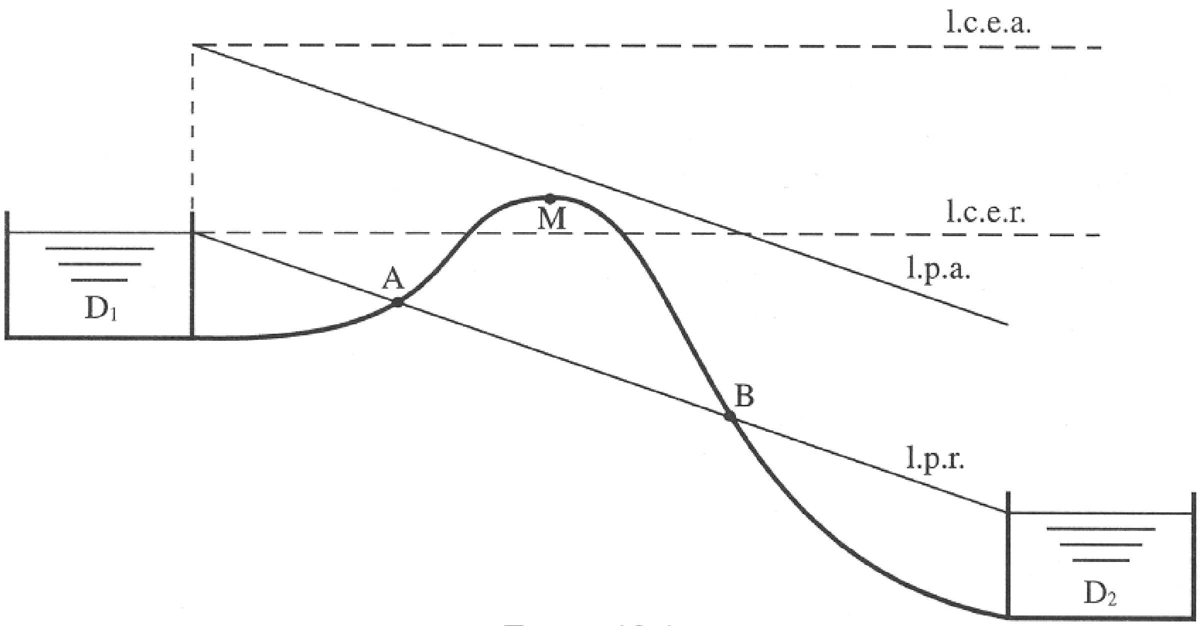
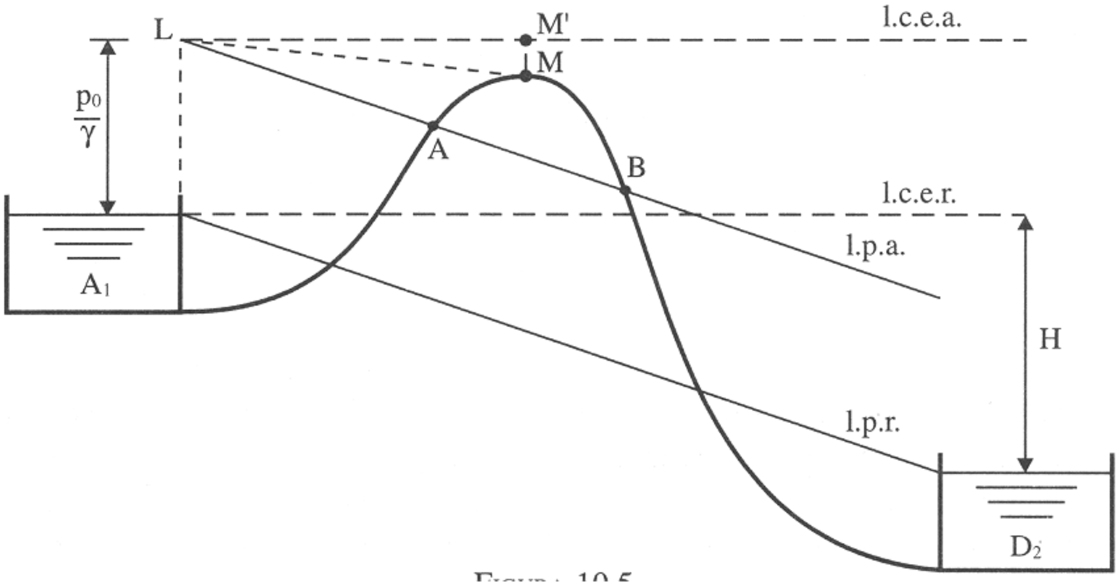


FIGURA 10.3

4. Sifón sin cebado automático.Inicialmente Q_{real} = $Q_{calculado}$, pero el funcionamieno puede ser anormal (no continuo) si no se instalan ventosas para presiones negativas.

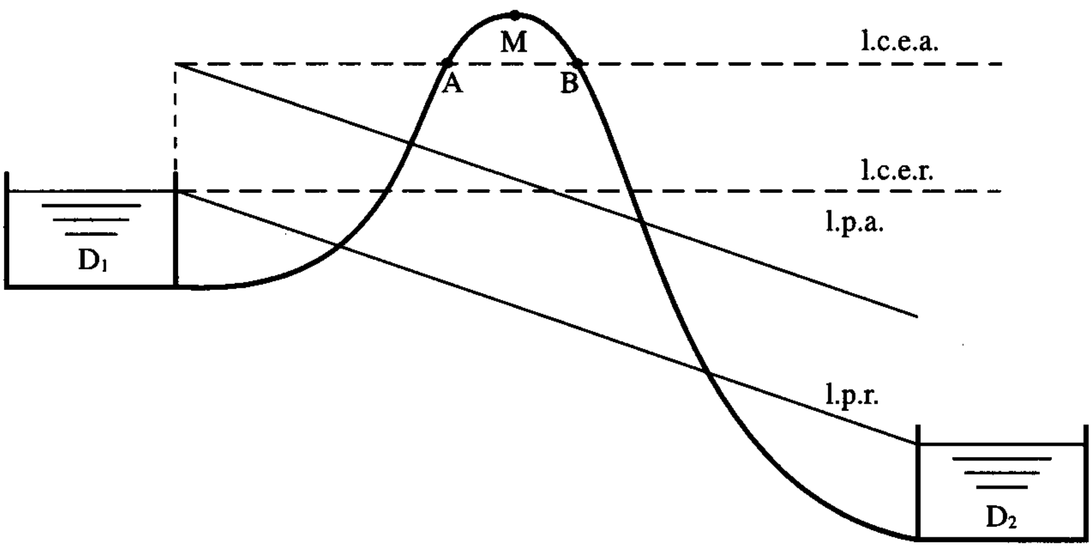


5. Sifón sin cebado automático en peores condiciones. Nunca



puede transportar el $Q_{calculado}$ porque el agua cavitaría.

6. La tubería corta la línea de carga estática absoluta. Es imposible



el flujo por gravedad.

CONCLUSIONES

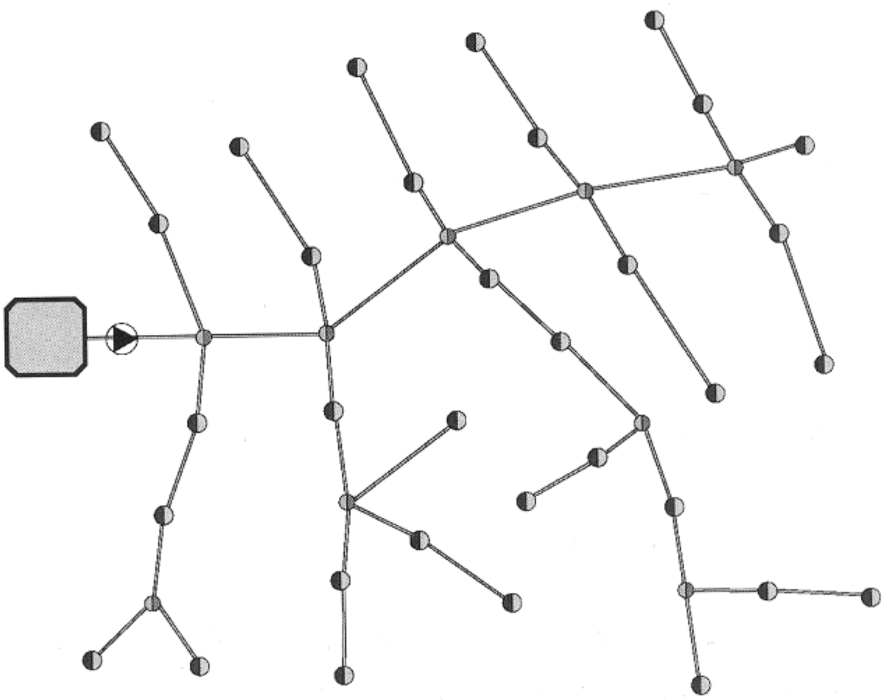
1. Para que la tubería funcione normalmente, de modo que $Q_{real} = Q_{calculado}$, es preciso que su perfil esté siempre por debajo de la línea piezométrica relativa (l.p.r.).
2. Cuando el perfil de la tubería se sitúa por encima de la l.p.r., la máxima distancia posible entre ambas para que no haya cavitación es :

$$\frac{P_0}{\gamma} - \frac{P_V}{\gamma} = \frac{P_M}{\gamma}$$

Para que el flujo se mantenga en el tiempo será necesario instalar ventosas para presiones negativas que eliminen el aire de las zonas altas.

REDES RAMIFICADAS DE TUBERÍAS

- Objetivo: Transporte y distribución de agua desde el punto de captación hasta cada uno de los puntos de consumo en las debidas condiciones de caudal y presión para que los sistemas abastecidos funcionen adecuadamente.
- La configuración ramificada o arborescente, con un único punto de alimentación, es la más habitual en la ingeniería del riego. En suministro urbano suelen emplearse las de tipo mallado.



- Nudo: extremo inicial y final de cada tubería. Unen tuberías entre si o representan puntos de consumo (hidrántes).
- Línea: tramo de tubería localizada entre 2 nudos.
- En cualquier nudo de la red debe de cumplirse la ecuación de continuidad:

$$\sum_{k=1}^{j} Q_{ik} \pm q_i = 0$$

Q_{ik} en el caudal correspondiente a la línea k que se conecta al nudo i

q_i es el consumo o aportación en el nudo *i*
j es el conjunto de líneas que se conectan al nudo *i*

- ANÁLISIS DE REDES RAMIFICADAS (se conoce la geometría de la red y los caudales en los puntos de consumo):

  1. Conociendo los consumos en los nudos (hidrántes) se puede calcular el caudal circulante por cada tramo de la red aplicando la ecuación de continuidad desde los nudos extremos y siguiendo el sentido inverso al de circulación del agua.
  2. Tanto si se parte de un embalse elevado como de un grupo de bombeo, aplicando la ecuación de Bernouilli entre el origen y cada uno de los nudos, teniendo en cuenta las pérdidas de carga en cada tramo, se puede calcular la presión en los nudos.

- Para el DISEÑO DE REDES RAMIFICADAS debe conocerse:

  1. Número de líneas.
  2. Longitud de cada línea.
  3. Cota de todos los nudos de la red.
  4. Consumos o aportaciones en los nudos de la red.
  5. Presiones requeridas en los nudos de la red.
  6. Presión disponible en el origen de la red.

El dimensionado se puede abordar siguiendo dos criterios:

1. Tradicional. Supone establecer unas hipótesis de velocidad en cada uno de los tramos de la red. Esto permite calcular los diámetros mediante la ecuación de continuidad:

$$Q_i = V \cdot S_i = V \cdot \frac{\pi \cdot D_i^2}{4} \quad \Rightarrow \quad D_i = \sqrt{\frac{4Q_i}{\pi \cdot V}}$$

Seleccionados los diámetros de cada tramo, se ANALIZA la red aplicando el teorema de Bernouilli entre el origen y todos los nudos de la red para verificar que se cumplen las restricciones de presión, a priori impuestas.

En caso contrario se debe proceder a introducir modificaciones en los diámetros seleccionados hasta que se cumplan todas las condiciones impuestas.

Si la red necesita una estación de bombeo, también se puede calcular la altura manométrica de la misma H_m aplicando la ecuación de Bernouilli y fijando en el punto más desfavorable la presión mínima requerida.

Las velocidades recomendables son:

- Velocidad de diseño: 1,5 m/s. No presenta problemas técnicos y ofrece soluciones aceptables desde un punto de vista económico.
- Máxima velocidad admisible: 2,5 m/s. Si se supera se pueden presentar problemas por sobrepresiones asociadas al golpe de ariete o esfuerzos excesivos en los anclajes.
- Mínima velocidad admisible: 0,5 m/s. Si estamos por debajo de esta velocidad se presentan problemas de sedimentación de finos en la red, con los consiguientes cambios de sección útil.

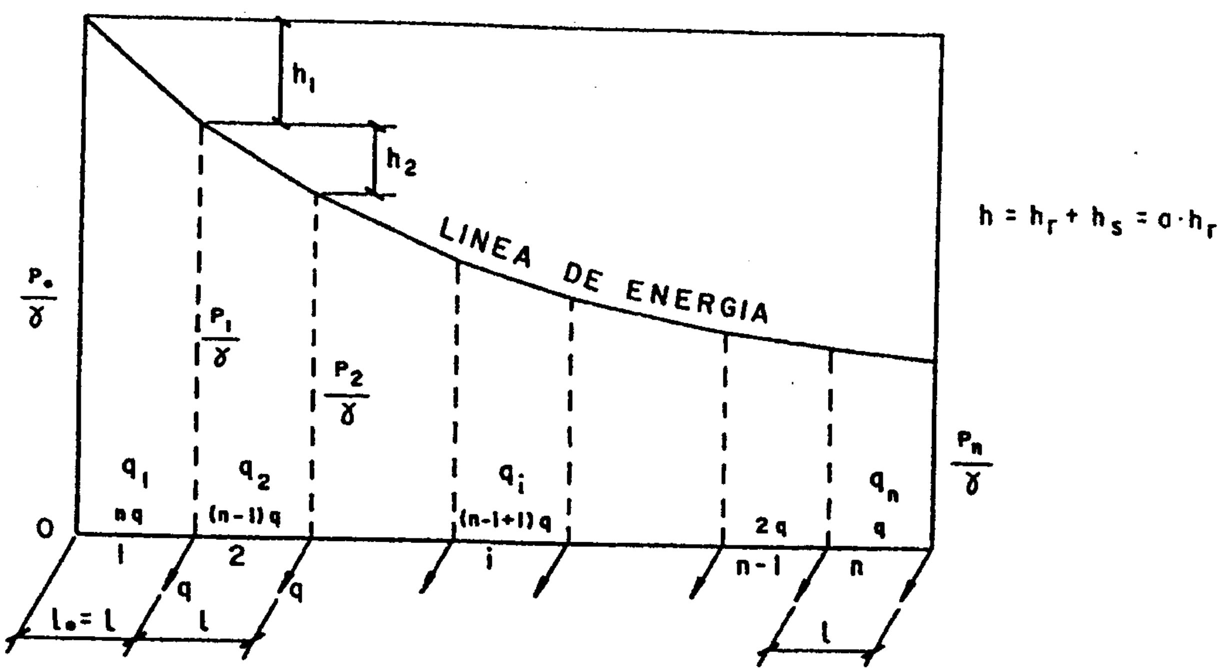
2. Utilizando técnicas de optimización matemática. Tienen en cuenta el coste de las tuberías, siendo necesario recurrir a herramientas informáticas para su aplicación. Normalmente

fijan un función de coste objetivo, cumpliendo las condiciones de caudal y presión impuestas, que es necesario minimizar. Se estudian en 4º curso.

TUBERÍAS CON DISTRIBUCIÓN DISCRETA DE CAUDALES

Supongamos una tubería de diámetro *D*, con *n* emisores, uniformemente espaciados a la distancia *l*, que descargan un caudal q (teóricamente igual) a lo largo de la conducción de longitud $L=n\cdot l$.

Se desprecian las alturas cinéticas, por lo que coincidirá la línea piezométrica con la de energía.



Consideremos una fórmula empírica o exponencial de pérdidas de carga:

$$J = \frac{h_r}{L} = M \cdot D^{-b} \cdot Q^m = cte \cdot Q^m \quad J(m/m),\ D(m),\ Q(m^3/s)$$

donde 1,75 < m < 2, en función de la fórmula empleada.

La pérdida de carga unitaria entre dos emisores consecutivos será:

$$J_i = cte \cdot q_i^m = cte \cdot (n - i + 1)^m \cdot q^m$$

La pérdida de carga por rozamiento en el tramo será $h_{ri} = J_i \cdot l$.

La pérdida de carga total por rozamiento continuo en el ramal valdrá:

$$h_r = \sum_i h_{ri} = cte \cdot q^m \cdot \left(1^m + 2^m + ... + n^m\right) \cdot l = cte \cdot q^m \cdot l \cdot \sum_i i^m$$

$$h_r = \frac{\sum_i i^m}{n^{m+1}} \cdot m \cdot \left(n \cdot q\right)^m \cdot (n \cdot l) = F \cdot cte \cdot Q^m \cdot L = F \cdot J' \cdot L = F \cdot h'_r$$

Siendo h'_r la pérdida de carga continua total en una tubería simple de igual L, D y k que el ramal, por la que circula un caudal contante $Q = n \cdot q$.

El factor F se denomina **factor de CHRISTIANSEN** y es un coeficiente reductor que depende de n, m y l_o, y tiene en cuenta la disminución del caudal a lo largo del ramal.

Para $l_o = l$:

$$F = \frac{1}{1+m} + \frac{1}{2n} + \frac{\sqrt{m-1}}{6 \cdot n^2}$$

Los valores de F para $l_o = l$ y para $l_o = l/2$ se encuentran tabulados

Para tuberías de polietileno (PE) m = 1,75.
Para tuberías de policloruro de vinilo (PVC) m = 1,8.
Para tuberías de aluminio (PE) m = 1,9.

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CARTAGENA
ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIERIA AGRONOMICA
Departamento de Ingeniería de Alimentos y del Equipamiento Agrícola
Edificio Minas, Pº Alfonso XIII, 48 • 30203 Cartagena (SPAIN)
Tel. 968-325732 – Fax. 968-325732

COEFICIENTES DE CHRISTIANSEN (F)

$l_o = S_e$

n	$\beta = 1{,}75$	$\beta = 1{,}80$	$\beta = 1{,}85$	$\beta = 1{,}90$	$\beta = 2{,}00$
1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2	0,650	0,644	0,639	0,634	0,625
3	0,546	0,540	0,535	0,528	0,518
4	0,497	0,491	0,486	0,480	0,469
5	0,469	0,463	0,457	0,451	0,440
6	0,451	0,445	0,435	0,433	0,421
7	0,438	0,432	0,425	0,419	0,408
8	0,428	0,422	0,415	0,410	0,398
9	0,421	0,414	0,409	0,402	0,391
10	0,415	0,409	0,402	0,396	0,385
11	0,410	0,404	0,397	0,392	0,380
12	0,406	0,400	0,394	0,388	0,376
13	0,403	0,396	0,391	0,384	0,373
14	0,400	0,394	0,387	0,381	0,370
15	0,397	0,391	0,384	0,379	0,367
16	0,395	0,389	0,382	0,377	0,365
17	0,393	0,387	0,380	0,375	0,363
18	0,392	0,385	0,379	0,373	0,361
19	0,390	0,384	0,377	0,372	0,360
20	0,389	0,382	0,376	0,370	0,359
22	0,387	0,380	0,374	0,368	0,357
24	0,385	0,378	0,372	0,365	0,355
26	0,383	0,376	0,370	0,364	0,353
28	0,382	0,375	0,369	0,363	0,351
30	0,380	0,374	0,368	0,362	0,350
35	0,378	0,371	0,365	0,359	0,347
40	0,376	0,370	0,364	0,357	0,345
50	0,374	0,367	0,361	0,355	0,343
60	0,372	0,366	0,359	0,353	0,342
80	0,370	0,363	0,357	0,351	0,340
100	0,369	0,362	0,356	0,350	0,338
150	0,367	0,360	0,354	0,348	0,337
300	0,365	0,359	0,353	0,346	0,335
∞	0,364	0,357	0,351	0,345	0,333

$l_o = S_e/2$

n	$\beta = 1{,}75$	$\beta = 1{,}80$	$\beta = 1{,}85$	$\beta = 1{,}90$	$\beta = 2{,}00$
1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2	0,532	0,525	0,518	0,512	0,500
3	0,455	0,448	0,441	0,434	0,422
4	0,426	0,419	0,412	0,405	0,393
5	0,410	0,403	0,397	0,390	0,378
6	0,401	0,394	0,387	0,381	0,369
7	0,395	0,388	0,381	0,375	0,363
8	0,390	0,383	0,377	0,370	0,358
9	0,387	0,380	0,374	0,367	0,355
10	0,384	0,378	0,371	0,365	0,353
11	0,382	0,375	0,369	0,363	0,351
12	0,380	0,374	0,367	0,361	0,349
13	0,379	0,372	0,366	0,360	0,348
14	0,378	0,371	0,365	0,358	0,347
15	0,377	0,370	0,364	0,357	0,346
16	0,376	0,369	0,363	0,357	0,345
17	0,375	0,368	0,362	0,356	0,344
18	0,374	0,368	0,361	0,355	0,343
19	0,374	0,367	0,361	0,355	0,343
20	0,373	0,367	0,360	0,354	0,342
22	0,372	0,366	0,359	0,353	0,341
24	0,372	0,365	0,359	0,352	0,341
26	0,371	0,364	0,358	0,351	0,340
28	0,370	0,364	0,357	0,351	0,340
30	0,370	0,363	0,357	0,350	0,339
35	0,369	0,362	0,356	0,350	0,338
40	0,368	0,362	0,355	0,349	0,338
50	0,367	0,361	0,354	0,348	0,337
100	0,365	0,359	0,353	0,347	0,335
200	0,365	0,358	0,352	0,346	0,334

En RLAF se recomienda $\beta = 1{,}75$

EMISORES: CURVAS CARACTERÍSTICAS

Curva característica del emisor :

$$q = K\,h^x$$

siendo:

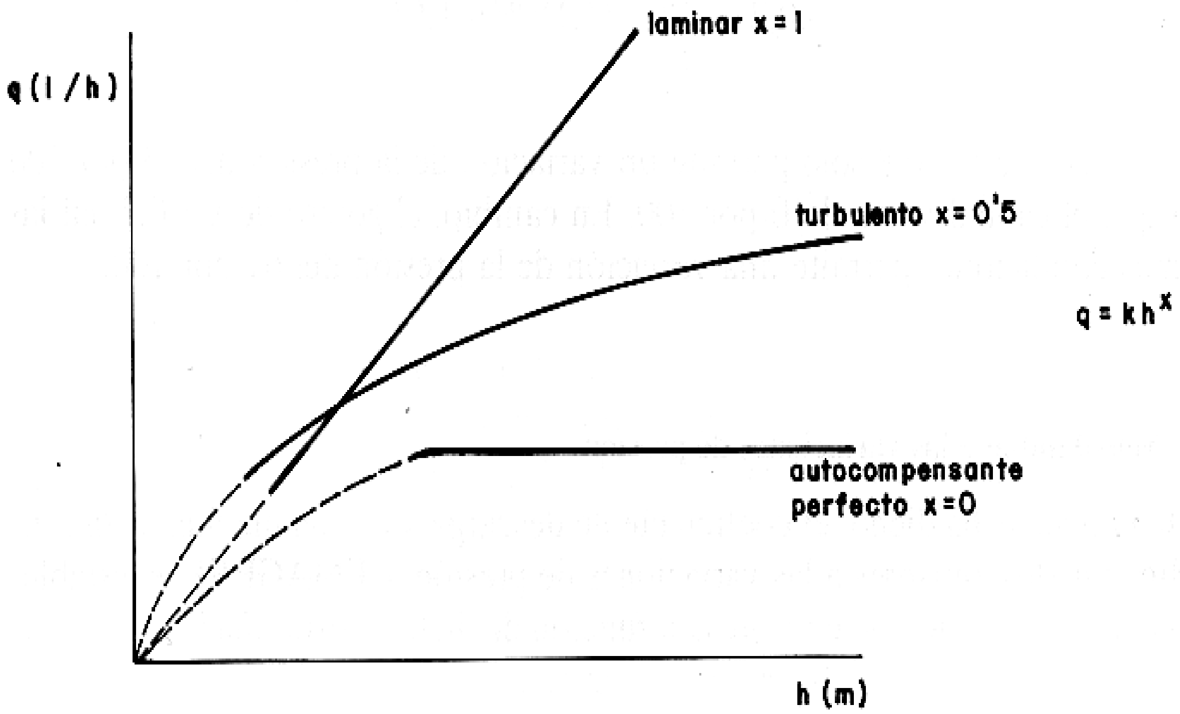
K = coeficiente de descarga del emisor

x = exponente del emisor ($0 < x < 1$)

h = presión de funcionamiento. Generalmente se mide en m.c.a. o kPa (1 m.c.a ≈ 10 kPa).

q = caudal descargado por el emisor (l/h)

Los valores de K y x son característicos de cada tipo de emisor. Cuanto mayor sea el valor de x, mayor es la sensibilidad del emisor a las variaciones de presión.



Para conocer el exponente x de un emisor cuando solo nos dan la gráfica, hay que tomar dos puntos de la misma y deducirlo como sigue:

$$\log q_1 = \log K + x \log h_1$$
$$\log q_2 = \log K + x \log h_2$$
$$x = \frac{\log q_1 - \log q_2}{\log h_1 - \log h_2}$$
$$k = q / h^x$$

La variación de caudal con la presión puede obtenerse derivando la ecuación de descarga:

$$q = K\,h^x$$
$$dq = K \cdot x \cdot h^{X-1} \cdot dh$$
$$\frac{dq}{q} = x \cdot \frac{dh}{h}$$

Así, para un aspersor, que es un emisor de tipo tobera con x = 0,5, una variación en el caudal de un 10%, máximo admitido de forma convencional por criterios de uniformidad de reparto, se consigue una variación del 20%:

$$\Delta h = \frac{1}{x} \cdot \frac{\Delta q}{q} \cdot h = \frac{1}{0,5} \cdot \frac{0,1 \cdot q}{q} \cdot h = 0,2 \cdot h$$