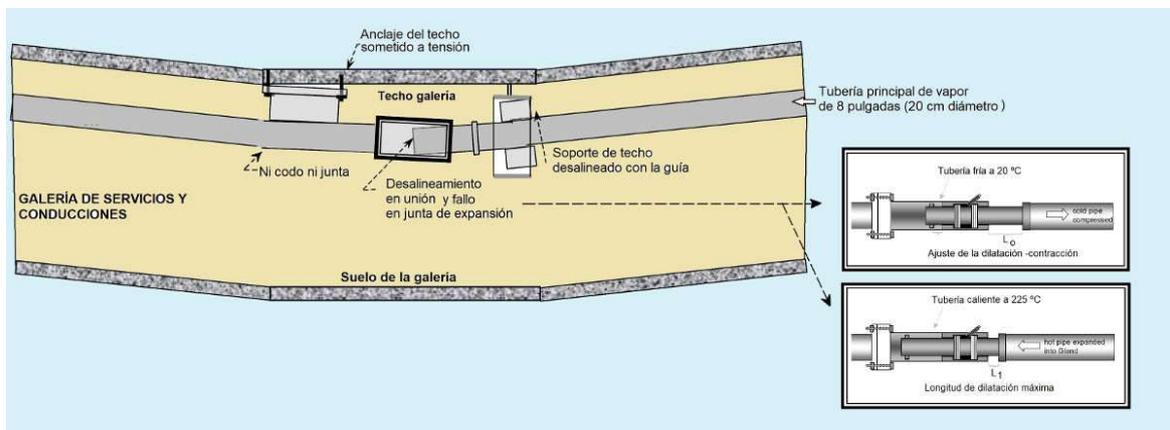


Caso práctico: el peligro del golpe de ariete

La [NASA tiene un centro de investigación en Langley \(Virginia\)](#). Este centro cuenta con un sistema de vapor a presión que se produce en una pequeña central térmica y, a través de una tubería que discurre por la galería de servicios nº 4, llega a sus laboratorios. Después de múltiples problemas en una parte de la tubería (grietas en el techo, fugas de vapor, rotura de anclajes, vibraciones, cambio de juntas,...) se solicitó un informe independiente a la ingeniería [Kirsner](#) para que mediara en el pleito que mantenían estos laboratorios con la empresa instaladora. En este informe se constataron varios fallos de diseño y de instalación.

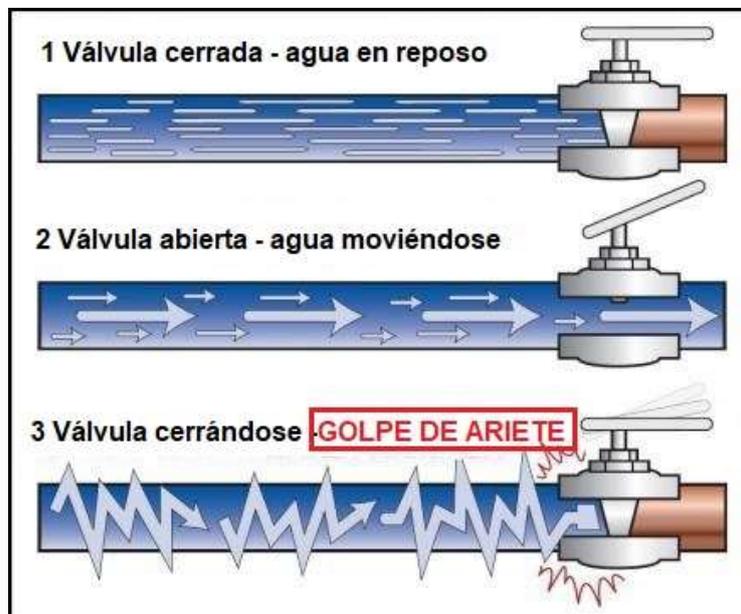
Se vieron claros fallos mecánicos en los anclajes y en el desalineamiento de la tubería, en relación a la unión de esta y en relación a las almohadillas de soporte en una de las juntas de sujeción al techo. Todo ello en una zona con cambio de pendiente en el túnel. Pero también se vieron otros dos problemas más. El primero ligado con una junta de dilatación mal graduada, que no permitía la libre dilatación a altas temperaturas y el segundo relacionado con las condensaciones de agua que se producían en la parte baja de la tubería y que originaban golpes de ariete (water hammer en inglés).

El problema de la dilatación y el golpe de ariete son más frecuentes de lo que parece en las instalaciones térmicas que conducen fluidos. En esta unidad entenderás perfectamente estos fenómenos, sus causas, sus consecuencias y las medidas para evitarlos. En la imagen puedes ver el plano de este caso real, con la situación de esta tubería.



[Kirsner](#). Galería de servicios del centro de investigación de la NASA

El golpe de ariete transmite fuertes vibraciones a través de la rigidez de las tuberías y en ciertos puntos, entre los que se encontraban los soportes y desalineamientos del esquema, se originaban esfuerzos mecánicos y fatiga en los materiales. El fenómeno está esquematizado en el siguiente dibujo:



Golpe de ariete en tubería plástica

Amortiguación del golpe de ariete

Para saber más

<https://www.youtube.com/embed/xoLmVFfj4?start=1&end=415&showinfo=0&rel=0>



Materiales formativos de FP Online propiedad del Ministerio de Educación y Formación Profesional

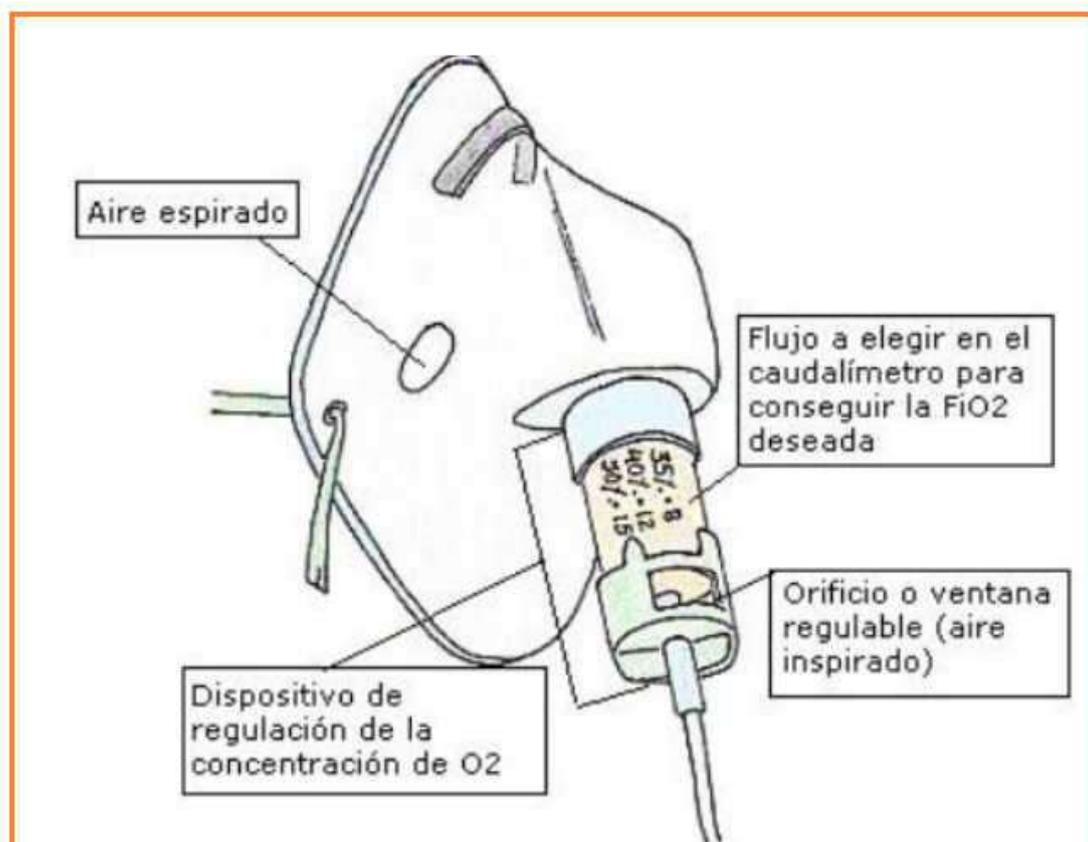
[Aviso Legal](#)

1.- Mecánica de fluidos.

Caso práctico: Oxigenoterapia

En los primeros meses de 2020, con la pandemia del Covid-19 surgió la necesidad de tratar a muchos pacientes con respiradores y oxigenoterapia. La oxigenoterapia con mascarilla, consiste en aplicar a los pacientes aire con mayor concentración de oxígeno que la que tenemos en el ambiente y regular la cantidad de oxígeno aportado con ayuda de una mascarilla especial, cuyo funcionamiento se basa en el **efecto Venturi**. Este efecto, basado en el teorema de Bernoulli y en la ecuación de continuidad, que luego veremos, consiste en que, **cuando un fluido pasa por un orificio pequeño** o una tubería más estrecha, aumenta su velocidad. Pero eso seguro que ya lo sabías, pero **¿sabías que disminuye su presión?**

La mascarilla de efecto Venturi tiene el mismo formato que las mascarillas simples con la salvedad de que dispone de un pequeño dispositivo, situado justo en su parte inferior antes de la mascarilla, que mediante una ventana regulable, permite ajustar la cantidad de oxígeno deseado. El aire tiene un 21 % de oxígeno, por lo que la Fracción inspiratoria de oxígeno (F_{iO_2}), empieza a partir de un valor próximo a este. Además posee un par de orificios en la parte superior de la mascarilla que permite expulsar el aire espirado. Las diferentes partes de la mascarilla de efecto Venturi las vemos en la imagen:



Concentraciones de oxígeno generadas por mascarilla de efecto Venturi.

Flujo O_2 l/min	FiO_2
3	0,24
6	0,28
9	0,35
12	0,40
15	0,60

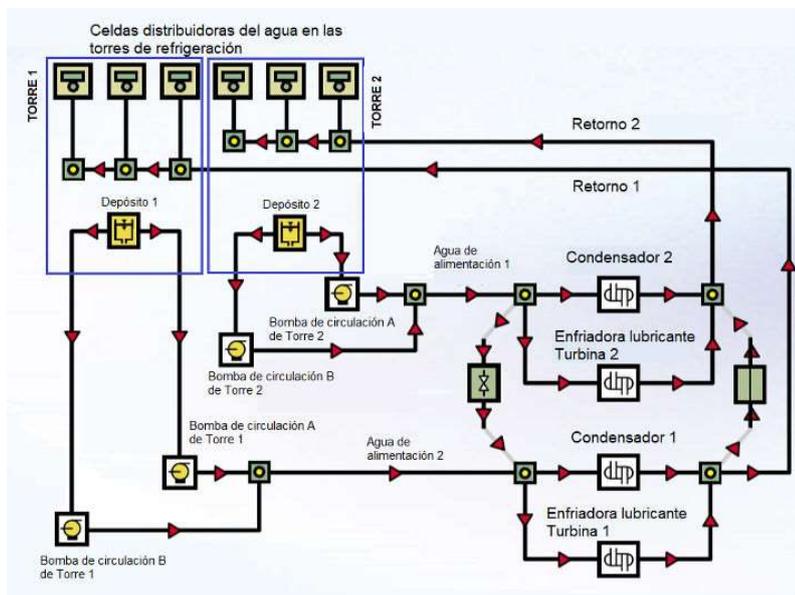
El funcionamiento de la mascarilla de efecto Venturi es el siguiente: desde la fuente de oxígeno sale el gas, que a través de una conexión, une la fuente con la mascarilla, que tiene un orificio muy estrecho por el que pasa el oxígeno a una velocidad alta y, por lo tanto, a una presión más baja. Esta presión, en el interior de la mascarilla, al ser más baja que la atmosférica, hace que, a través de la ventana regulable de la mascarilla, se aspire el aire ambiental, obteniendo así la mezcla y por tanto la F_iO_2 necesaria. Cuanto más pequeño es el orificio de entrada del oxígeno, menor es la presión y mayor es el caudal de aire que entra por los orificios superiores.

En instalaciones térmicas el calor se introduce o se extrae de un recinto, especialmente mediante dos tipos de fluidos: el agua y el aire. Son dos fluidos abundantes que tienen unas propiedades magníficas a las temperaturas a las que suele trabajarse. Para temperaturas mayores se emplea el vapor de agua y para temperaturas menores los fluidos refrigerantes. Por ello, es muy importante conocer las leyes y el funcionamiento mecánico de estos fluidos.

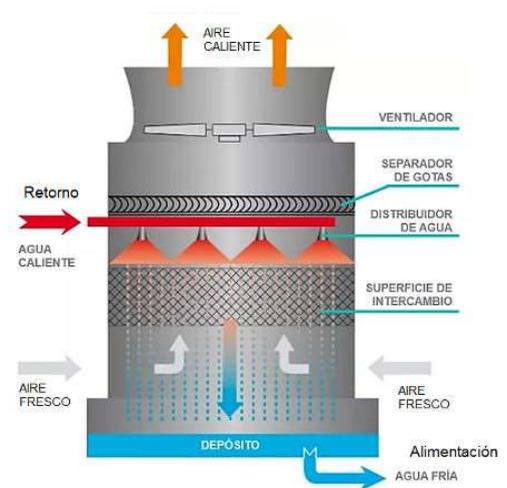
En esta unidad vamos a ver el comportamiento de estos fluidos desde el punto de vista mecánico. Desde el punto de vista termodinámico ya se ha visto en la unidad 1.

Cualquier instalación de calefacción y de acondicionamiento de aire tiene los denominados circuitos de aire y circuitos hidráulicos. Y esto es así a todas las escalas. Por ejemplo, en una central eléctrica tenemos un circuito que sirve para refrigerar el aceite lubricante y otro circuito para refrigerar el agua que, a su vez, refrigera el condensador de la central. El condensador es el equipo que permite que el vapor, a la salida de la turbina, se condense en agua y pueda volverse a calentar en la caldera para transformarlo nuevamente en vapor y que mueva la turbina que hace girar el alternador de electricidad.

Los circuitos hidráulicos, con frecuencia, tienen los correspondientes circuitos de aire que, en ocasiones son circuitos abiertos toman aire fresco del exterior y expulsan aire caliente. A su vez, estas instalaciones tienen, además de tuberías (para los líquidos) y conductos (para el aire), bombas y ventiladores, como vemos en este ejemplo:



Circuito de refrigeración mediante torre de refrigeración



1.1.- Parámetros más importantes

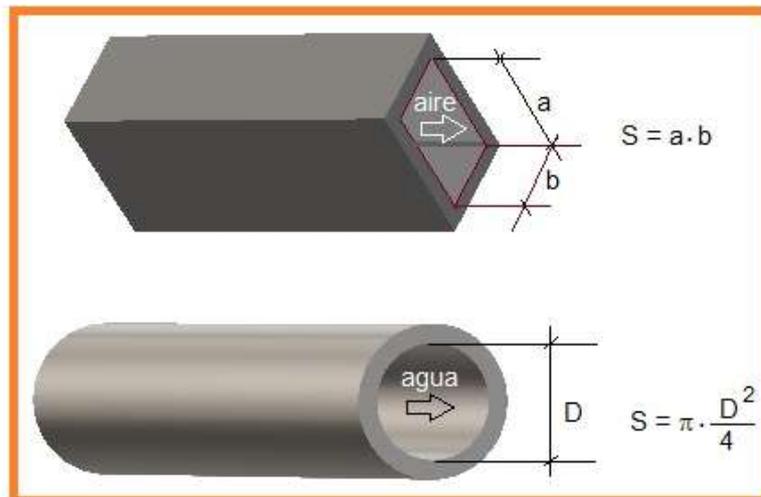
Debes conocer

Caudal

Es un concepto ya utilizado con anterioridad y puede ser másico o volumétrico. Sus fórmulas, aplicadas a tuberías (forma circular) o conductos (forma rectangular), son las siguientes:

$$\text{Caudal volumétrico: } \rightarrow q = \frac{V}{t} = \frac{S \cdot e}{t} = S \cdot v$$

$$\text{Caudal másico: } \rightarrow \dot{m} = q \cdot \rho = S \cdot v \cdot \rho$$



En donde:

q = caudal (m^3/s)

V = volumen (m^3)

t = tiempo (s)

e = espacio recorrido (m)

S = sección (m^2)

v = velocidad (m/s)

ρ = densidad (kg/m^3)

Viscosidad

La viscosidad es la resistencia que presentan las capas líquidas para deslizarse unas sobre otras, es pues un caso particular de fuerzas de rozamiento de deslizamiento. Las resistencias de viscosidad son fuerzas tangenciales que se oponen al movimiento del líquido y se demuestra experimentalmente que cuando se pone en movimiento un líquido en el interior de un conducto,

hay un gradiente o caída de velocidad desde las capas interiores hacia las exteriores (próximas a las paredes).

La viscosidad dinámica, también denominada viscosidad total, se designa por el coeficiente μ y se puede definir como la resistencia de los fluidos a fluir. A mayor valor de μ , menor flujo. En términos microscópicos se relaciona con las fuerzas intermoleculares, y con el tamaño y forma de las moléculas que constituyen el líquido. La viscosidad de la mayoría de los líquidos disminuye al aumentar la temperatura. También tenemos la viscosidad cinemática, que se obtiene dividiendo la viscosidad dinámica entre la densidad del líquido. Es decir:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

En donde:

ν = viscosidad cinemática (m^2/s)

μ = viscosidad dinámica ($\text{Pa}\cdot\text{s}$ o también $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)

ρ = densidad (kg/m^3)

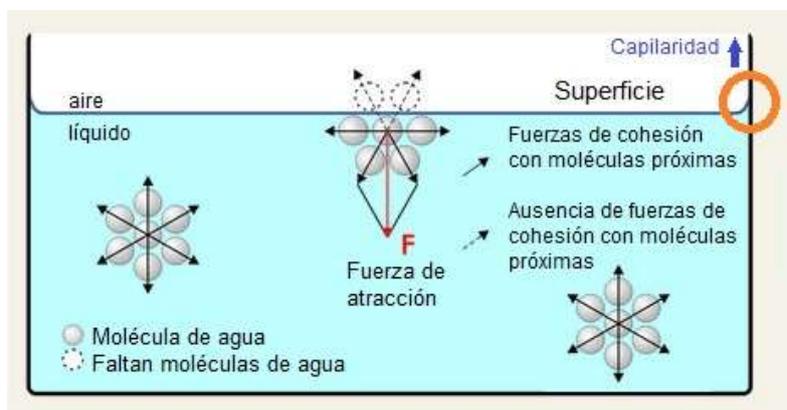
Viscosidad de distintos fluidos a temperatura ambiente

Viscosidad dinámica del agua a diferentes temperaturas

Viscosidad dinámica del aire a diferentes temperaturas

Tensión superficial y capilaridad

El efecto de las fuerzas intermoleculares es el de tirar las moléculas hacia el interior de la superficie de un líquido, manteniéndolas unidas y formando una superficie lisa. La tensión superficial mide las fuerzas internas que hay que vencer para poder expandir el área superficial de un líquido. La energía necesaria para crear una nueva área superficial, trasladando las moléculas de la masa líquida a la superficie de la misma, es lo que se llama **tensión superficial**. A mayor tensión superficial, mayor es la energía necesaria para transformar las moléculas interiores del líquido a moléculas superficiales. El agua tiene una alta tensión superficial por los puentes de hidrógeno.



Tensión superficial debido a las interacción molecular

La **capilaridad** es el fenómeno por el cual un líquido asciende por tubos muy estrechos. El líquido asciende debido a las fuerzas atractivas entre sus moléculas y la superficie interior del tubo. Estas fuerzas son las llamadas fuerzas de adhesión. El menisco de un líquido es la superficie curvada que forma en un tubo estrecho. Para el agua tiene la forma ascendente (como una U) porque las fuerzas que provocan la adhesión de las moléculas de agua al vidrio son

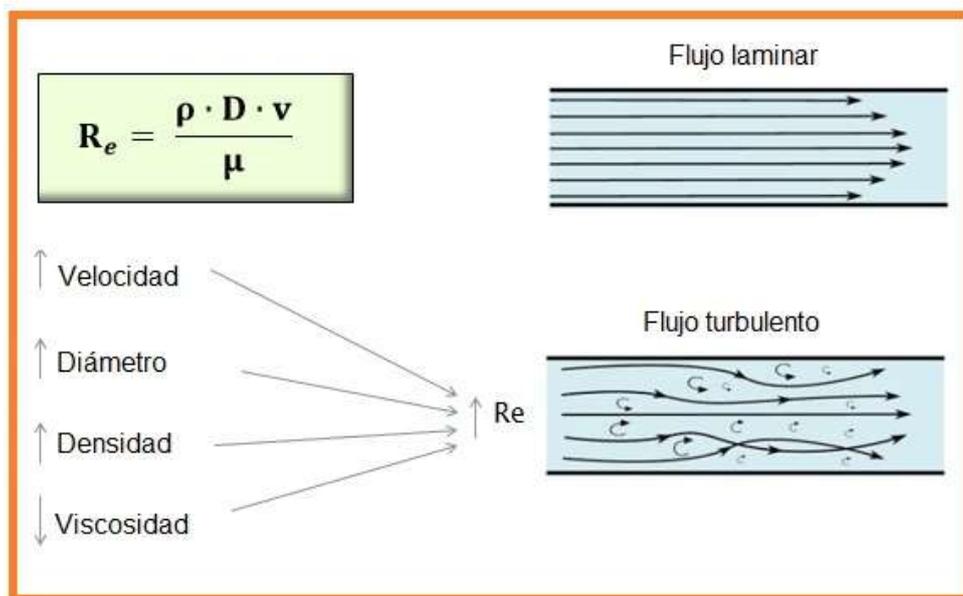
mayores que la fuerzas de cohesión. El fenómeno de la capilaridad es muy importante en instalaciones térmicas y origina el que la humedad del terreno o exterior a un local pueda ascender por las paredes de los cerramientos.

Presión de vapor

La presión de vapor de un líquido es la presión ejercida por su vapor cuando ambas fases están en equilibrio dinámico. La presión de vapor aumenta con la temperatura porque las moléculas del líquido caliente se mueven con más energía. Prácticamente toda la vaporización tiene lugar en la superficie del líquido. Las presiones del vapor de agua contenido en el aire son diferentes en el aire exterior y en el interior de un edificio. Esta diferencia de presiones origina un flujo de vapor de agua del lugar de mayor presión al de menor, pudiendo provocar condensaciones en los muros si no se colocan barreras de vapor.

Tipo de flujo

En las tuberías, dependiendo de la velocidad del fluido se pueden presentar diferentes regímenes de movimiento. Para velocidades bajas, el fluido se mueve ordenadamente denominándose **régimen laminar**, si se aumenta la velocidad el fluido pasa a **régimen turbulento**, presentándose éste cuando no existen trayectorias uniformes del flujo dando lugar a torbellinos. Un régimen laminar lo da un número de Reynolds inferior a 2 000 y por encima de 2 400 el régimen es turbulento. Con valores entre 2 000 y 2 400 del número de Reynolds el fluido tiene un régimen intermedio. La fórmula que nos permite encontrar este parámetro en una tubería por la que circula un fluido es:



En donde:

Re = Número de Reynolds (adimensional)

v = velocidad (m/s)

μ = viscosidad dinámica (Pa·s o también kg/m·s)

ρ = densidad (kg/m³)

D = diámetro de la tubería (m)

Ejercicios Para Resolver

1.- Si tenemos un conducto de 200 mm x 500 mm con una velocidad del aire 4 metros por segundo. Calcular el caudal en m³/h y en l/s

Mostrar retroalimentación

Solución: $q = 400 \text{ l/s} = 1\,440 \text{ m}^3/\text{h}$.

2.- Calcula el número de Reynolds y determina el régimen del flujo de una conducción de agua a 60 °C que circula por una tubería de 18 mm a una velocidad de 0,15 m/s, ¿y si el agua estuviera 10 °C?

Mostrar retroalimentación

Solución: $Re = 5\,683$ (régimen turbulento); $Re = 2\,064$ (régimen laminar) Date cuenta de que la densidad del agua a 60 °C es 983 kg/m^3 mientras que a 10 °C es $1\,000 \text{ kg/m}^3$

3.- Calcular el caudal en m³/h de un conducto circular de 300 mm de diámetro con una velocidad 10 m/s.

Mostrar retroalimentación

Solución: $q = 2\,544 \text{ m}^3/\text{h}$

Autoevaluación

¿Cuál es el régimen de una instalación de agua a 20 °C que circula por una tubería de 25 mm a una velocidad de 0,04 m/s, si sabemos que la viscosidad dinámica a esa temperatura es 0,001 Pa·s?

- Laminar.
- Intermedio.
- Turbulento.

Efectivamente, el número de Reynolds es 1000.

No es correcto, vuelve a calcular el número de Reynolds.

Es incorrecto. El resultado no llega a 3000.

Solución

1. Opción correcta
2. Incorrecto
3. Incorrecto



1.2.- Ecuación de continuidad

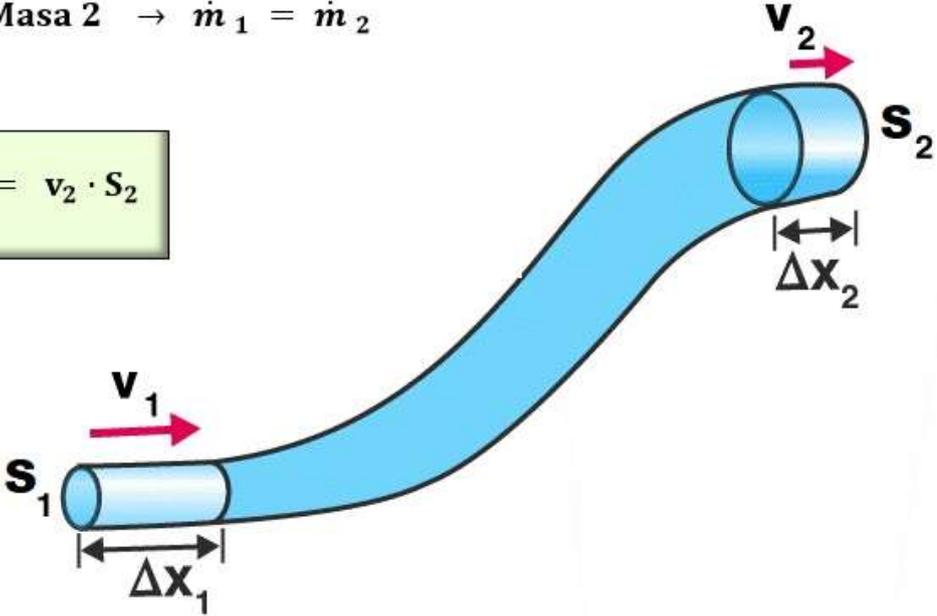
Un fluido puede ser considerado como formado por un gran número de partículas de material, muy pequeño y moverse libremente entre sí. Los fluidos, como sabes, podemos considerarlos divididos en dos categorías: líquidos y gases. Ambos, pueden considerarse isotrópicos, viscosos y móviles. La **isotropía** significa que tienen las mismas propiedades en todas las direcciones del espacio. La **movilidad**, significa que no tienen forma propia y toman la forma del recipiente que los contiene. La **viscosidad** supone que cualquier cambio en la forma de un fluido real se acompaña de una resistencia (fricción). La **propiedad física que los diferencia** es la capacidad de compresión: un gas es fácilmente compresible, mientras que un líquido podemos considerarlo incompresible.

A estos fluidos se les puede aplicar la **Ley de Conservación de Masa**. Es decir, la masa que circula por una tubería se mantiene constante si no hay aportación o extracción de flujo másico. O, dicho de otra manera, la cantidad de masa que circula por una red de tuberías permanece constante. Es ley es, precisamente la que nos permite obtener la Ecuación de Continuidad en una tubería de diámetro variable por la que circula un flujo de líquido (sería igual de gas)

$$\dot{m}_1 = q_1 \cdot \rho = \frac{V_1 \cdot \rho}{t} = \frac{\Delta x_1 \cdot S_1 \cdot \rho}{t} = v_1 \cdot S_1 \cdot \rho$$
$$\dot{m}_2 = q_2 \cdot \rho = \frac{V_2 \cdot \rho}{t} = \frac{\Delta x_2 \cdot S_2 \cdot \rho}{t} = v_2 \cdot S_2 \cdot \rho$$

Masa 1 = Masa 2 $\rightarrow \dot{m}_1 = \dot{m}_2$

$$v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2$$



Demostración de la ecuación de continuidad

Observa la figura. Representa una tubería de sección S_1 por la que circula un fluido a una velocidad v_1 . En un punto, esa tubería se ensancha hasta una sección S_2 . La velocidad a la que circula ahora el líquido es v_2 . Es evidente que la masa de líquido que circula no varía, por lo que al circular por una sección mayor tendrá que disminuir su velocidad.

Ejercicio Resuelto

1.- Por una tubería de 20" circula un caudal de agua de 80 l/s. Si se estrecha su diámetro a la mitad, averiguar:

- La velocidad del agua en el diámetro mayor
- Calcular el caudal en el diámetro más pequeño
- Calcular la velocidad en el diámetro más pequeño

Mostrar retroalimentación

En primer lugar, averiguaremos el área de ambas secciones de tubería

$$D_1 = 20 \cdot 2,54 = 50,8 \text{ cm} = 0,508 \text{ m}$$

$$S_1 = \pi \cdot D_1^2/4 = 0,2026 \text{ m}^2$$

$$D_2 = 0,508 : 2 = 0,254 \text{ m}$$

$$S_2 = \pi \cdot D_2^2/4 = 0,0506 \text{ m}^2$$

Hay que hacer notar, que un diámetro de la mitad equivale a la cuarta parte de la sección. Por ello, a mitad de diámetro le corresponde cuatro veces más de velocidad; la relación no es lineal, sino que es cuadrática (un diámetro de la tercera parte equivale a 9 veces más de velocidad).

Por otro lado, el caudal lo pasaremos a las unidades del SI:

$$q = 80 \text{ l/s} = 0,08 \text{ m}^3/\text{s}$$

Siguiendo con el ejercicio, tenemos:

$$\text{a) } 0,08 = 0,2026 \cdot v_1 \rightarrow v_1 = 0,395 \text{ m/s}$$

$$\text{b) el caudal es el mismo} \rightarrow q_1 = 80 \text{ l/s}$$

$$\text{c) } 0,08 = 0,0506 \cdot v_2 \rightarrow v_2 = 1,581 \text{ m/s (cuatro veces más de velocidad)}$$

2.- Determina si el agua, a 15 °C, circula en régimen laminar o turbulento en el ejercicio anterior, en cada uno de los dos tramos de tubería

Mostrar retroalimentación

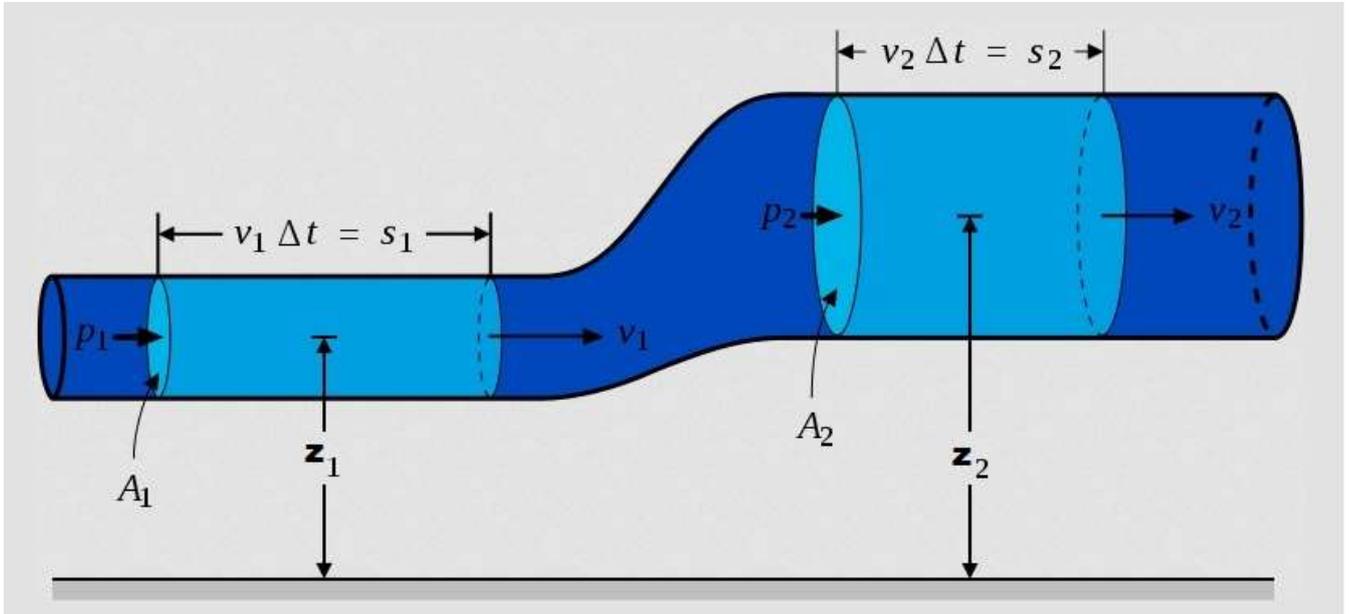
Calcularemos el número de Reynolds en ambos tramos, sabiendo que la densidad del agua a 15 °C es aproximadamente igual a 1 000 kg/m³ y el coeficiente de viscosidad a esta temperatura es $\mu = 0,001139 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$

$$R_{e1} = \frac{\rho \cdot D_1 \cdot v_1}{\mu} = \frac{1\,000 \cdot 0,508 \cdot 0,395}{0,001139} = 176\,172 \text{ turbulento}$$

$$R_{e2} = \frac{\rho \cdot D_2 \cdot v_2}{\mu} = \frac{1\,000 \cdot 0,254 \cdot 1,581}{0,001139} = 352\,567 \text{ turbulento}$$

1.3.- Principio de Bernoulli.

En un fluido ideal, que fluye sin rozamiento, la energía permanece constante a lo largo de su recorrido. Este principio es, en cierta forma, la aplicación a fluidos de la Ley de Conservación de la Energía. La energía de un fluido consta de dos partes: la energía térmica (que depende de su temperatura, calor específico, densidad y caudal) y la mecánica que, a su vez consta de los tres componentes siguientes:



Tubería en la que se cumple la Ecuación de Bernoulli

Cinética: es la energía debida a la velocidad que posea el fluido. Su variación, entre los puntos 1 y 2, viene dada por:

$$\frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_2^2 - v_1^2) = \frac{1}{2} \cdot q \cdot \rho \cdot (v_2^2 - v_1^2)$$

Potencial: es la energía debido a la altitud que un fluido posee. Su variación, entre los puntos 1 y 2, viene dada por:

$$\dot{m} \cdot g \cdot (z_2 - z_1) = q \cdot \rho \cdot g \cdot (z_2 - z_1)$$

Energía de flujo: es la energía que un fluido contiene debido a la presión que posee. También se llama energía piezométrica. Su variación se expresa:

$$q \cdot (p_2 - p_1)$$

La suma de estas tres energías deberá permanecer constante, según la Ley de Conservación de la Energía. Dicho de otro modo, si en un punto aumenta su energía cinética es a costa de la disminución de alguna de las otras dos. Es como en una montaña rusa, cuando el vehículo está en lo alto tiene elevada energía potencial y baja energía cinética, mientras que al descender tiene poca energía potencial y elevada energía cinética. Por lo tanto, la suma de las variaciones de potencia mecánica anteriores ha de valer cero:

$$\frac{1}{2} \cdot q \cdot \rho \cdot (v_2^2 - v_1^2) + q \cdot \rho \cdot g \cdot (z_2 - z_1) + q \cdot (p_2 - p_1) = 0$$

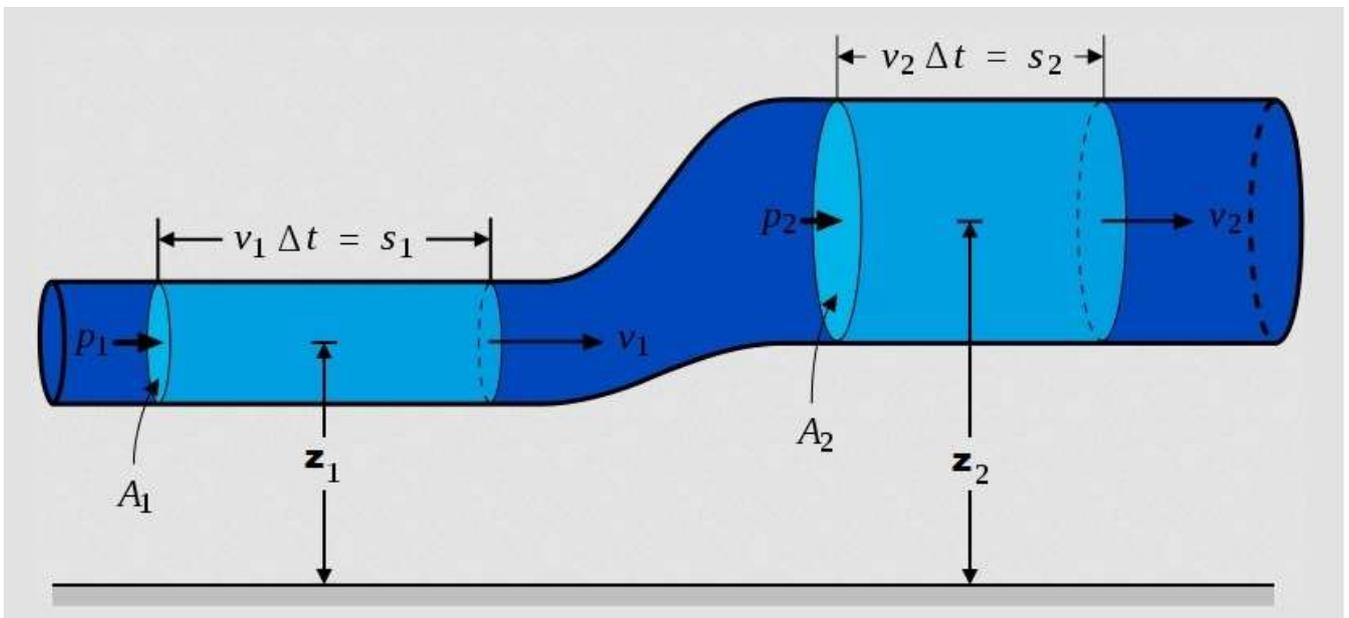
$$(1) \quad \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_2^2 - v_1^2) + \rho \cdot g \cdot (z_2 - z_1) + (p_2 - p_1) = 0$$

$$(2) \quad \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot z_1 + p_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot z_2 + p_2$$

$$(3) \quad \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + z_1 = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + z_2$$

La ecuación de Bernoulli se puede poner de varias formas. Si sumamos las tres ecuaciones de las energías (potencial, cinética y piezométrica) y dividimos cada uno de los términos entre el caudal, obtendremos la ecuación (1). En la ecuación (2) se han igualado las energías en los dos puntos y aparecen tres términos en cada miembro de la igualdad, correspondientes a lo que podríamos denominar presión dinámica (relacionada con la energía cinética), presión relacionada con la altura y presión estática (la interna que tiene el fluido). En la tercera ecuación, después de dividir la ecuación (2) por ρ y g , obtenemos una ecuación parecida, pero el término libre es la altura. Ello significa que las tres energías están expresadas en metros de la columna de agua o, dicho de otro modo, en formato de energía potencial

Finalmente, si se toma el punto más bajo de la tubería como una altura de 0 m, la fórmula nos queda más simplificada:



$$\frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + z$$

$$\frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} + p_2 + g \cdot \rho \cdot z = \text{Constante}$$

En el caso de que estemos ante una tubería horizontal, donde no hay desniveles ($z=0$) tendremos:

$$\frac{\rho \cdot v^2}{2} + p = \text{Constante}$$

donde:

v = velocidad del fluido en la sección considerada (m/s)

g = aceleración gravitatoria ($9,8 \text{ m/s}^2$)

z = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia (m)

p = presión a lo largo de la línea de corriente (Pa).

ρ = densidad del fluido (kg/m^3)

Para saber más

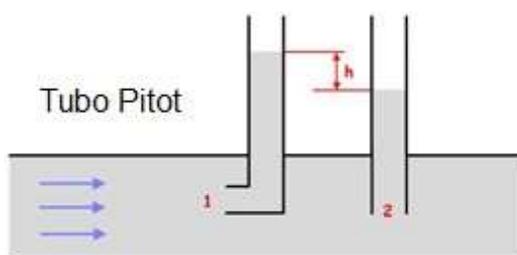
Puedes encontrar más información sobre el principio de Bernoulli en Wikipedia.

[Principio de Bernoulli.](#)

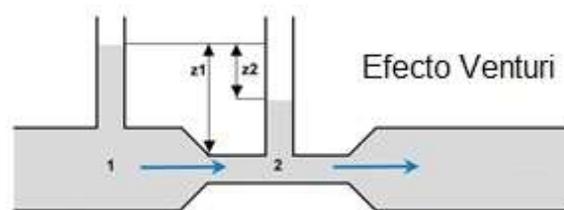
Casos prácticos

El principio de Bernoulli tiene diversas aplicaciones en la práctica. Dos de las más importantes son el tubo de Pitot y el efecto Venturi.

- **Tubo de Pitot** En la imagen puedes ver una tubería por la que fluye un líquido. En esa tubería introducimos dos tubos a la misma altura, uno que enfrenta el flujo y el otro simplemente perpendicular al flujo. Los dos tubos nos van a dar una medida distinta. El primero va a medir la presión estática y la presión dinámica. El segundo va a medir únicamente la presión estática. La diferencia entre las dos medidas es la presión dinámica, la cual es proporcional a la velocidad, por lo que este efecto sirve para medir velocidades de fluidos (velocidad avión).
- **Efecto Venturi.** En la imagen puedes ver una tubería que en su parte media sufre un estrechamiento. Si en una tubería se produce un estrangulamiento la velocidad del fluido tiene que aumentar para que se cumpla la ley de continuidad. Ese aumento de velocidad supone que la presión disminuye, como puede apreciarse en la figura.



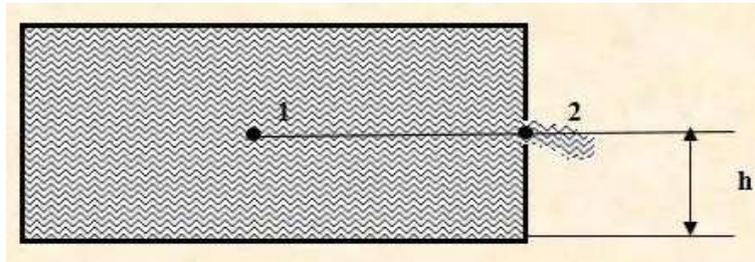
$$p_1 = p_2 + \frac{\rho \cdot v^2}{2} \Rightarrow p_1 - p_2 = \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$



$$p_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} \Rightarrow p_1 - p_2 = \frac{\rho \cdot (v_2^2 - v_1^2)}{2}$$

Ejercicios Resueltos

1.- Hallar la velocidad inicial de salida del agua a través de la pequeña abertura del depósito que se representa en la figura, siendo el valor de la presión, sobre la atmosférica, de 5 atm en el punto medio del recipiente. La velocidad del agua en el interior se supone que es cero.



Mostrar retroalimentación

Aplicando el teorema de Bernoulli, teniendo en cuenta que la altura geométrica del punto medio del recipiente y del orificio de salida, son las mismas ($h_1=h_2$), tendremos:

$$p + \frac{\rho \cdot v^2}{2} = \text{Constante}$$

$$\text{En el interior (punto 1)} \quad p_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = (5 + 1) \cdot 101.300 + \frac{\rho \cdot 0^2}{2} = 607.800$$

$$\text{En la salida (punto 2)} \quad p_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} = 1 \cdot 101.300 + \frac{1000 \cdot v_2^2}{2} = 101.300 + 500 \cdot v_2^2$$

De donde, igualando :

$$607.800 = 101.300 + 500 \cdot v_2^2 \quad \Rightarrow \quad v_2 = \sqrt{\frac{607.800 - 101.300}{500}} = 31,8 \text{ m/s}$$

1.4.- Pérdida de carga.

Te habrás dado cuenta de que en el principio de Bernouilli se habla de un fluido perfecto sin rozamiento. En la realidad esto no sucede así. Los fluidos están compuestos por moléculas que chocan con las paredes de las tuberías, es decir, sufren un rozamiento. En un fluido real la presión disminuye a lo largo de la tubería por la que discurre, aunque la tubería sea horizontal y de sección uniforme, contrariamente a lo que hemos visto en el principio de Bernouilli. También puede observarse una disminución de presión después de pasar por un codo, una válvula o un estrechamiento.

Un fluido real en movimiento sufre pérdidas de energía debidas al rozamiento contra las paredes de la tubería (pérdidas lineales) o por accidentes de recorrido (pérdidas singulares). Las pérdidas singulares se originan al generarse rozamiento y turbulencias. El número de Reynolds en una tubería lineal se calculaba con la fórmula vista en la que dependía de la viscosidad, densidad, diámetro y velocidad del fluido. Este número sirve, además de para determinar el régimen del flujo (laminar o turbulento) para calcular analíticamente las pérdidas por rozamiento en tuberías.

Las **pérdidas de carga lineales** se deben al rozamiento del fluido con las paredes de las tuberías. La pérdida de carga entre dos puntos separados por una longitud L en una tubería de diámetro D viene dada por:

$$\Delta p = \frac{\lambda \cdot \rho \cdot v^2 \cdot L}{2 \cdot D}$$

Donde:

Δp : pérdida de carga (Pa)

λ : coeficiente adimensional llamado coeficiente de pérdida de carga lineal.

ρ : es la densidad (kg/m³)

v : velocidad del fluido (m/s)

L : longitud del tramo (m)

D : diámetro (m)

El cálculo de ese coeficiente λ es fundamental para obtener la pérdida de carga en la tubería. La forma de calcularlo depende del régimen del fluido. Para un **régimen laminar**:

$$\lambda = \frac{64}{R_e}$$

El cálculo para el **régimen turbulento** es más complicado. En este caso tiene gran influencia la rugosidad de las paredes de la tubería y la magnitud de las turbulencias. Para determinar la pérdida se suelen utilizar ábacos, como el de Moody y fórmulas específicas para cada material.

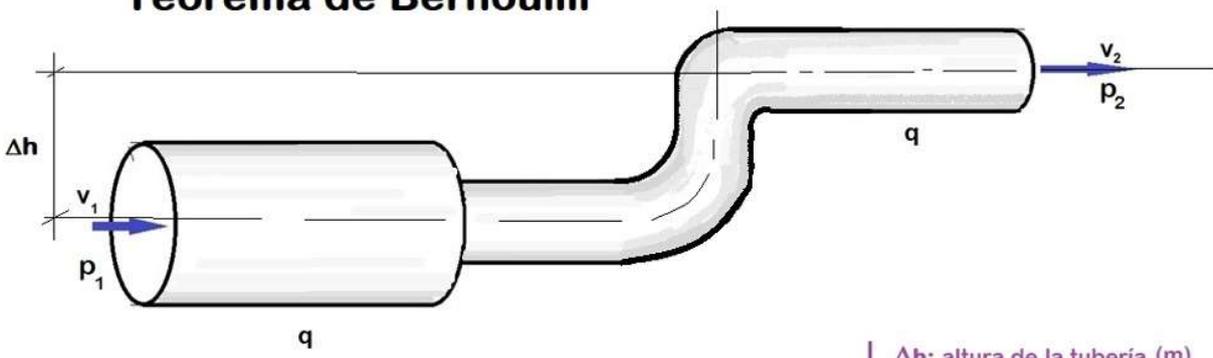
Abaco de Moody

Las pérdidas por accidentes son las que experimenta el fluido al dejar el tramo recto y enfrentarse a otros elementos de las tuberías como pueden ser codos, llaves, etc. Experimentalmente se ha visto que la pérdida de carga en un accidente viene dada por la siguiente expresión:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \xi \cdot \rho \cdot v^2$$

Hoja excel para facilitar los cálculos:

Teorema de Bernouilli



$$p_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} = p_2 + \rho g \Delta h + \rho \frac{v_2^2}{2} + \Delta p$$

- Δh : altura de la tubería (m)
- Δp : pérdida de carga (Pa)
- v: velocidad del fluido (m/s)
- p: presión (Pa)
- ρ : densidad líquido (kg/m³)
- q: caudal (m³/s)
- g: valor de la gravedad= 9,8 m/s²

© Javier Baigorrí

Hoja Excel con la Ecuación de Bernouilli

Reflexiona

La unidad de presión en el S.I. es el Pascal (Pa), pero todavía se utilizan mucho los milímetros de columna de agua, especialmente cuando se habla de pérdidas de carga. Esto es debido a que, hasta hace poco, la medición de la presión se hacía mediante tubos que contenían agua y una regla con lectura en milímetros. Actualmente existen los medidores digitales, aunque se sigue utilizando el método tradicional. La equivalencia es:

1mm.c.d.a. = 9,81 Pa.

2.- Conducción de fluidos

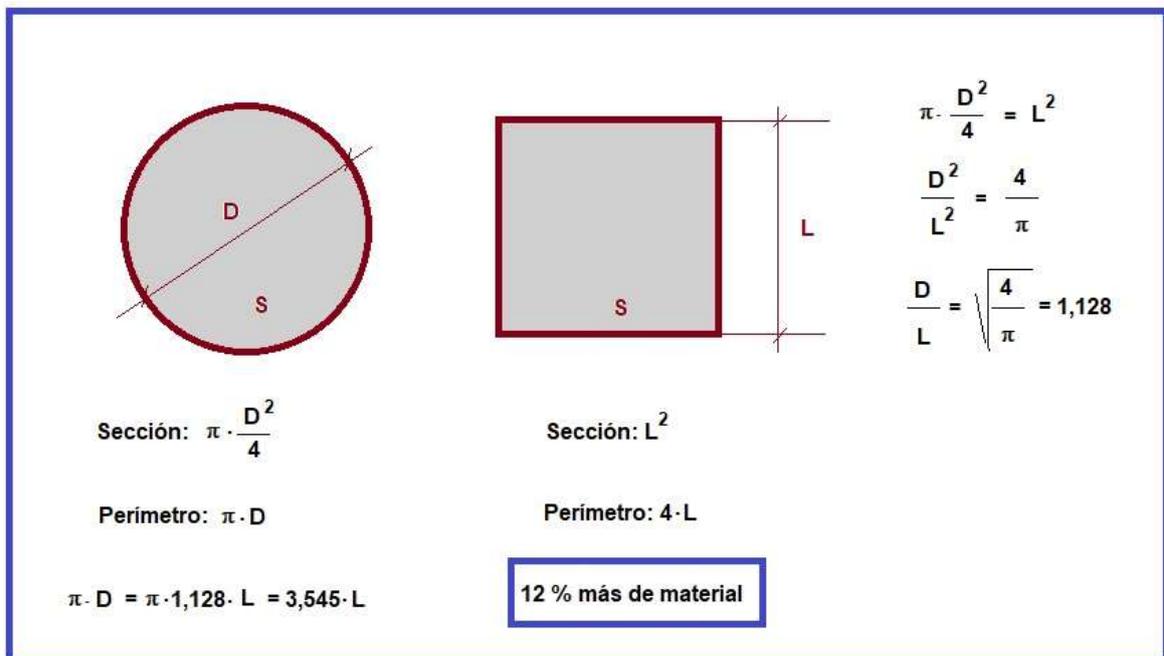
Caso práctico: ¿Por qué las tuberías son de sección circular?

¿Alguna vez te has parado a pensar sobre el porqué las conducciones de fluidos, especialmente de líquidos, son de sección redonda? Varias son las razones y seguro que si piensas un poco las descubres.



[Pikist \(CC BY\)](#)

Las tuberías son redondas porque, en relación con su sección, es la forma más económica, ya que **emplean la menor cantidad de material**. Lo podemos ver en el dibujo:



Relación entre la sección útil de una tubería y su forma

Pero, además de este argumento económico, tenemos algunos más. Las tuberías son redondas porque es la forma que **genera menos turbulencias** al circular un fluido y, por lo tanto, es la que menor pérdida de carga ofrece. Son redondas, también, porque **se pueden curvar** con facilidad para salvar obstáculos y porque **su unión es consistente y pueden emplearse roscas**. Si tenemos en cuenta su resistencia mecánica y el aguante de altas presiones y temperaturas, **la forma redonda es mucho más resistente**. Y, finalmente, una forma redonda facilita su **estandarización**, ya que, además de las características del material, solo se necesitan dos dimensiones: su diámetro y su espesor. En otras formas se necesitan, al menos tres datos (número de lados, dimensión de cada lado (supuesta regular) y espesor).

Intenta averiguar qué diferencia en material emplearíamos en una tubería de sección rectangular, por ejemplo con sus dos lados en los que uno es doble del otro, y compára el resultado con la misma sección de una tubería de sección circular. Ambas con el mismo espesor.

2.1.- Conductos de aire

Para enviar el aire acondicionado o el aire de ventilación, desde la unidad de tratamiento de aire hasta los puntos de consumo, es necesario hacerlo mediante una red de conductos. Como has visto anteriormente el aire al viajar por un conducto va perdiendo presión debido al rozamiento con las paredes de la tubería y a los accidentes del trazado. El ventilador instalado en la UTA se encargará de impulsar con la suficiente presión para hacer frente a esas caídas de presión.



Sistema de ventilación de una nave industrial

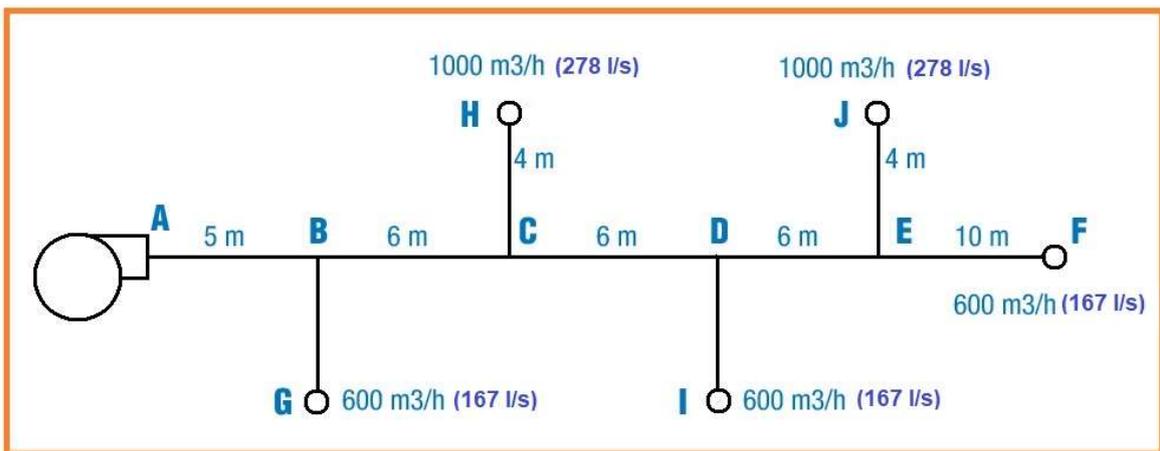
Por otra parte, como seguramente habrás sufrido en instalaciones mal dimensionadas, el aire que sale por las rejillas de climatización si lo hace muy rápido es muy desagradable para el usuario. Todo esto hace que un correcto cálculo de la red de conductos sea vital en este tipo de instalaciones.

Cada elemento de impulsión, ya sea rejilla o difusor, necesita que el aire llegue con una determinada presión estática. Este valor viene tabulado en los catálogos de los fabricantes. Si al final del conducto la presión es distinta de la requerida el caudal impulsado será distinto del calculado. Si el elemento impulsor dispone de compuerta se podrá, hasta cierto punto, absorber un exceso de presión. El límite lo va a marcar el ruido que hace el aire al pasar por esa compuerta. Se considera aceptable una pérdida de carga, en la unidad terminal (rejilla de salida del aire), de hasta 2 mm de c.d.a. en instalaciones de oficinas y hasta 6 mm c.d.a. en instalaciones industriales, o en Pascales, entre 20 Pa y 60 Pa. Siendo habitual pérdidas de carga del orden de 10 Pa en instalaciones en edificios de viviendas y oficinas.

Para el cálculo de la red de conductos hay varios métodos. **El más habitual, en instalaciones de baja presión, es el de la pérdida de carga constante.** Este es el método que vas a utilizar en el apartado siguiente. Otros métodos son reducción de velocidad y recuperación estática. El primero es adecuado para pequeñas instalaciones y se basa fundamentalmente en la experiencia del diseñador que irá disminuyendo la velocidad en las sucesivas derivaciones hasta llegar al elemento de impulsión. El segundo **es adecuado para instalaciones que mueven un caudal muy importante de aire en conductos de gran longitud.** Este último método de cálculo permite utilizar un ventilador de menor potencia con la contrapartida de conductos de mayor sección.

Caso práctico

Para comenzar el dimensionamiento, con el método de pérdida de carga constante se debe conocer el caudal a introducir en cada punto terminal y realizar un croquis con las medidas de los conductos. Como ejemplo utilizaremos la siguiente instalación en la que debe suministrarse aire acondicionado a 5 puntos.



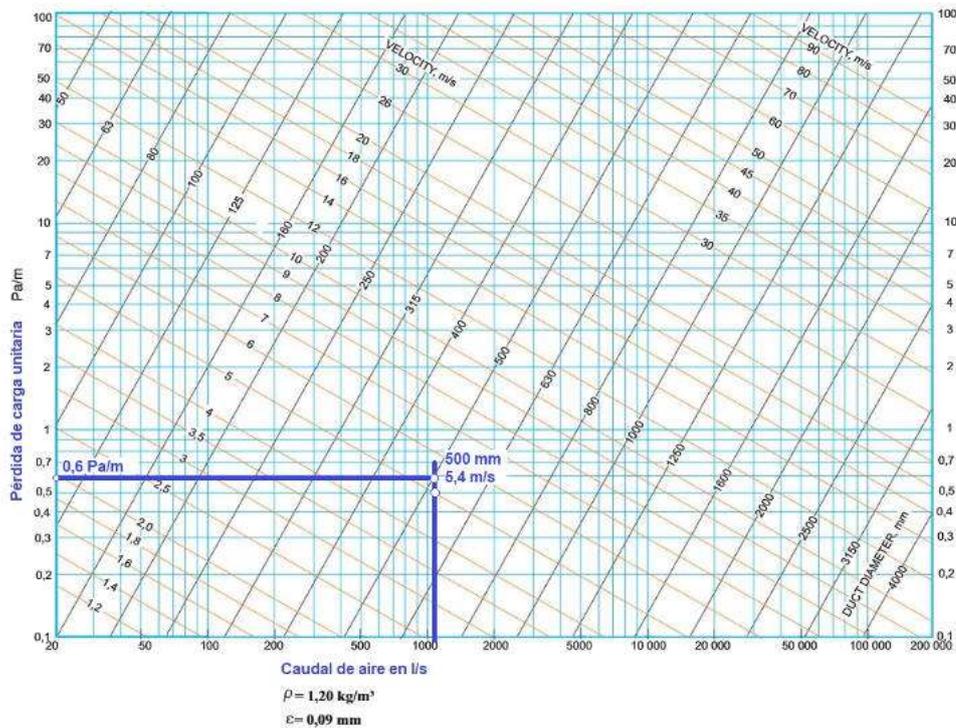
◀ 1 2 3 4 ▶

Tramo A-B

Suponiendo que la instalación es para unas oficinas, la velocidad seleccionada es de 5 m/s. Este es un valor de partida estimado. Si al resolver el cálculo resulta que es excesivo se debe disminuir y volver a calcular. El caudal que circulará por ese primer tramo es de 3 800 m³/h o, 1 057 l/s (ya que el ábaco adjunto tiene esta unidad para el caudal). Tal como se ha comentado anteriormente, para resolver el diámetro de conducto necesario se utiliza un diagrama de pérdidas de carga unitarias. También se pueden utilizar programas informáticos, como luego veremos.

En este caso el resultado puede verse en la figura. La línea de caudal de 1 057 l/s es vertical y la de velocidad de 5 m/s es oblicua. El punto donde se encuentran determina las otras dos variables, el diámetro equivalente y la pérdida de carga unitaria. En el diagrama los valores obtenidos son un Diámetro equivalente de 530 mm y una pérdida de carga unitaria de 0,5 Pa/m, pero el diámetro comercial más próximo es de 500 mm, por lo que tomando este, la velocidad aumenta hasta 5,4 m/s y la pérdida de carga unitaria es de 0,6 Pa/m.

Abáco para el cálculo de la pérdida de carga en conductos de aire de sección circular



Tramos B-C-D-E-F

Cálculo de diámetros y pérdidas de carga del conducto principal

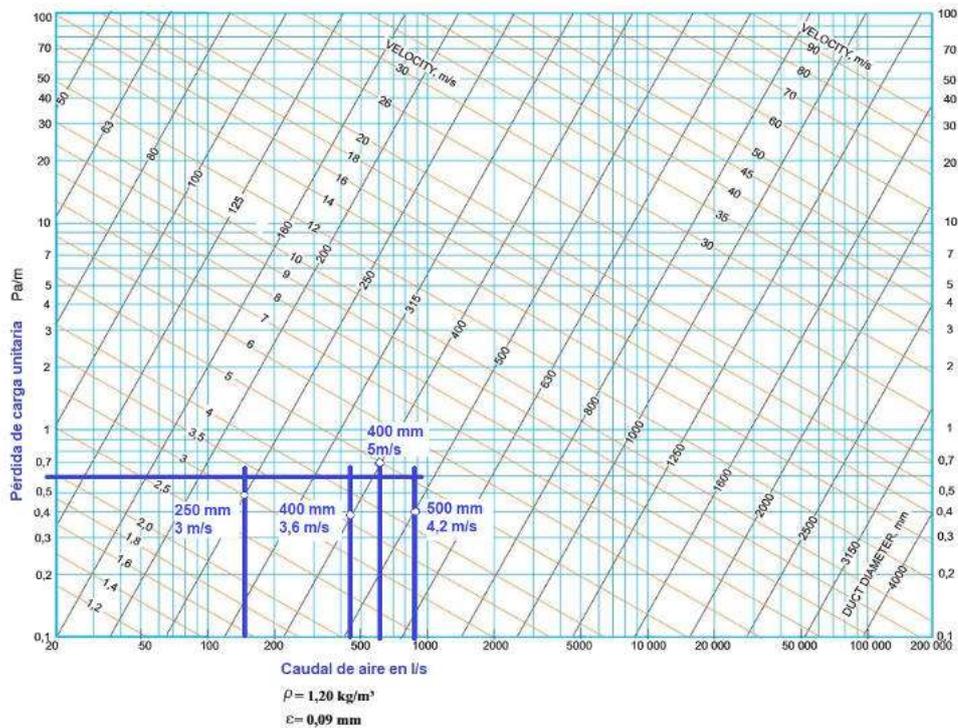
El cálculo se ha realizado para el tramo de conducto entre los puntos A y B. Esa pérdida de carga lineal unitaria (6 Pa/m) es la que vamos a mantener como referencia a lo largo de todo el tramo principal, que es el correspondiente a la mayor longitud. El resto de los tramos de conducto se denominan ramales.

En este caso el tramo principal será el A-B-C-D-E-F. Su longitud es $5+6+6+6+10 = 33 \text{ m}$. Esa es la longitud medida para los conductos, pero la longitud de cálculo será la medida más la producida por las pérdidas por accidentes o elementos singulares (curvas, conos de adelgazamiento, filtros, etc.). En caso de no conocer exactamente esos accidentes podemos sustituirlos aumentando un 25 % la longitud de cada tramo. Por lo tanto la longitud equivalente será $33 \times 1,25 = 41,25 \text{ m}$.

Para seguir dimensionando el tramo principal partiremos de la pérdida de carga seleccionada y del caudal que circula por cada uno de ellos. En el tramo B-C circulan 890 l/s, en el tramo C-D son 612 l/s, en el tramo D-E baja a 445 l/s y en el tramo E-F los 167 l/s restantes. En el diagrama siguiente obtenemos los diámetros equivalentes y las velocidades. Observar que el diámetro teórico para que se produzca una pérdida de carga de 0,6 Pa no coincide con el diámetro comercial disponible, por lo que tenemos otra pérdida de carga lineal de la utilizada como referencia (que es la que luego tomaremos).

Normalmente se suele tomar como diámetro comercial el inmediato superior al teórico, pero cuando hay poca diferencia y los tramos no son muy largos, como en este caso, podemos tomar el inmediato inferior si está próximo y, además, no es necesario emplear gran variedad de diámetros diferentes, lo cual siempre simplifica y abarata el montaje.

Abáco para el cálculo de la pérdida de carga en conductos de aire de sección circular



Los resultados obtenidos se ven mejor en forma de tabla:

Resultados del conducto principal

Tramo	L_{eq} (m)	q (l/s)	D_{eq} (mm)	v (m/s)	$\Delta p/l$ (Pa./m)
A-B	6,25	1 057	500	5,3	0,6
B-C	7,5	890	500	4,2	0,4
C-D	7,5	612	400	5	0,7
D-E	7,5	445	400	3,6	0,4
E-F	12,5	167	250	3	0,5

Es importante que la velocidad en la unidad terminal no sea muy alta. Se procura que la velocidad máxima al llegar a ese punto no supere los 5 m/s. En este caso la velocidad de 3 m/s es muy adecuada.

RAMAL B-G

Una vez que hemos calculado los diámetros del conducto principal nos corresponde calcular los de los ramales, pero previamente tenemos que calcular con que presión impulsará el ventilador al aire. La presión será la necesaria para contrarrestar las pérdidas de carga en la tubería más la pérdida de carga en la unidad terminal (en nuestro caso 20 Pa. Este valor lo dan los fabricantes). Si no conocemos este valor, ya hemos dicho que suele oscilar entre 20 Pa y 60 Pa.

En total, teniendo en cuenta todos los valores obtenidos, para el tramo más largo, será:

$$\Delta p_t = 6,25 \cdot 0,6 + 7,5 \cdot 0,4 + 7,5 \cdot 0,7 + 7,5 \cdot 0,4 + 12,5 \cdot 0,5 + 20 = 41,25 \text{ Pa}$$

Vamos a comenzar calculando el **ramal B-G**.

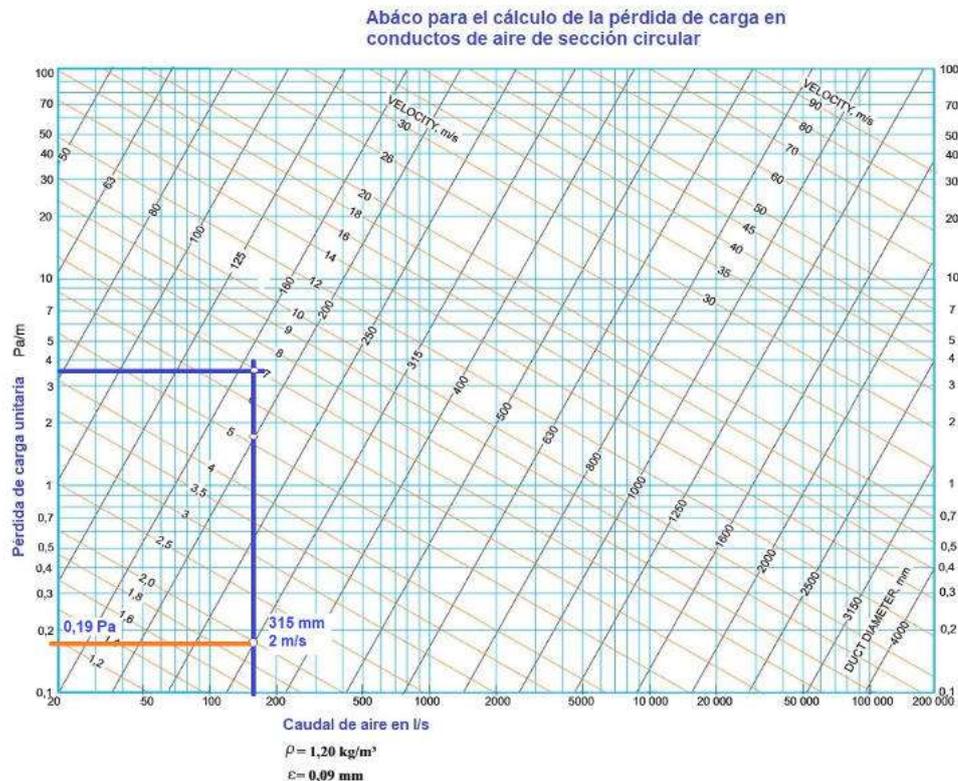
Su longitud es de 4 m por lo que la equivalente es de $4 \cdot 1,25 = 5$ m. El caudal que va a circular es de 167 l/s. La presión en el punto B será la que suministra el ventilador menos las pérdidas por la tubería entre A y B. Estas pérdidas son:

$$6,25 \cdot 0,6 = 3,75 \text{ Pa}$$

Por lo tanto la presión en B será:

$$41,25 - 3,75 = 37,5 \text{ Pa}$$

Esos 37,5 Pa son los que la tubería va a perder entre B y G. Si tenemos en cuenta que la unidad terminal tiene una pérdida de carga de 20 Pa, lo que se deberá perder por rozamiento serán $37,5 - 20 = 17,5$ Pa. La pérdida de carga unitaria se obtiene dividiendo ese valor por la longitud equivalente del ramal, que es de 5 m. El resultado es $17,5/5 = 3,5$ Pa/m. Con el valor del caudal de 167 l/s y la pérdida de carga unitaria vamos al diagrama y obtenemos el resto de variables: diámetro 200 mm y 5 m/s.



Resultados del ramal B-G

Tramo	L_{eq} (m)	q (l/s)	D_{eq} (mm)	v (m/s)	$\Delta p/l$ (Pa./m)
B-G	5	167	200	5	1,8

Como puedes ver la velocidad es excesiva. Este es uno de los problemas de este método de cálculo: normalmente la velocidad en las unidades terminales próximas al ventilador es demasiado grande. Para evitar este problema se puede poner una compuerta en la embocadura que haga perder el exceso de presión en grandes ramales o disponer de unidades terminales con compuertas, de este modo los 20 Pa pueden aumentarse hasta valores superiores mediante el ajuste de la compuerta, tal como vemos en la imagen. Lógicamente esta maniobra, además de disminuir la velocidad del aire de salida, tiene el inconveniente del aumento del ruido.



Resultados corregidos del ramal B-G

Tramo	L_{eq} (m)	q (l/s)	D_{eq} (mm)	v (m/s)	$\Delta p/l$ (Pa./m)
B-G	5	167	315	2	0,19

Con estos valores, la pérdida de carga en el difusor deberá ser:

$$\Delta p_{\text{difusor}} = 37,5 - 0,19 \cdot 5 = 36,55 \text{ Pa}$$

RAMAL C-H

Procederemos del mismo modo que en el ramal B-G, calcularemos la presión en C:

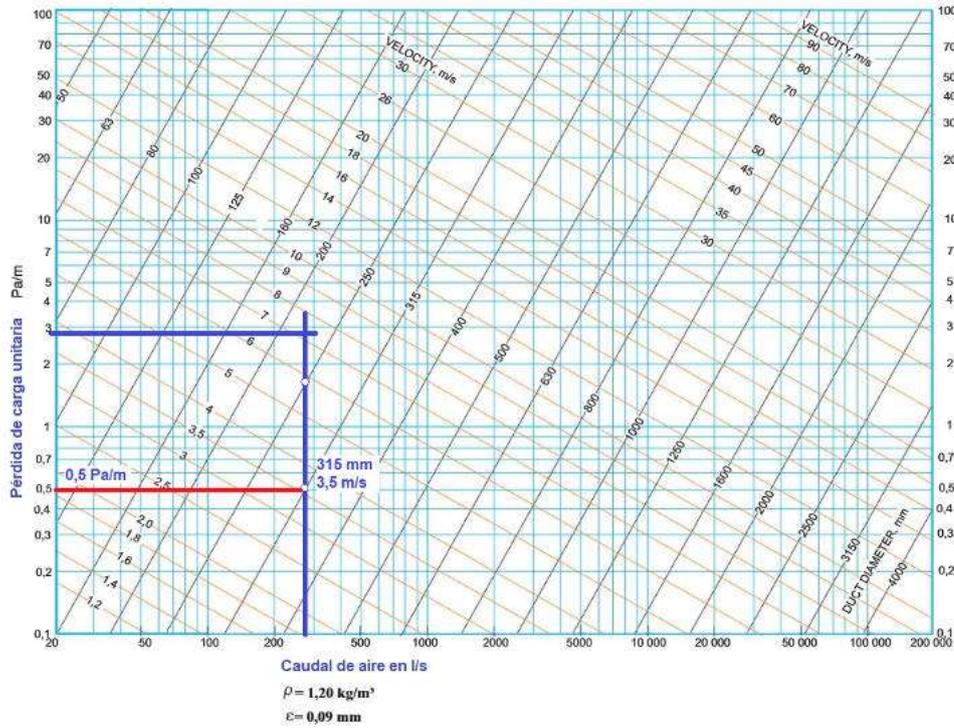
$$\Delta p_C = 41,25 - \Delta p_{AB} - \Delta p_{BC} = 41,25 - 6,25 \cdot 0,6 - 7,5 \cdot 0,4 = 34,5 \text{ Pa}$$

Si suponemos la misma pérdida de carga en la unidad terminal (20 Pa), nos quedará para la tubería una pérdida de carga de:

$$\Delta p_{CH} = \Delta p_C - 20 = 34,5 - 20 = 14,5 \text{ Pa} \rightarrow \Delta p_{CH\text{unitaria}} = 14,5/5 = 2,9 \text{ Pa/m}$$

Si vamos al ábaco, con esta pérdida de carga unitaria y el caudal de 278 l/s, encontramos el diámetro, pero con una velocidad excesiva. por ello, procederemos como en el caso anterior, tomamos el diámetro superior y la velocidad se reduce a un valor aceptable de 3,5 m/s (aunque un poco elevado).

Abáco para el cálculo de la pérdida de carga en conductos de aire de sección circular



Resultados corregidos del ramal C-H

Tramo	L_{eq} (m)	q (l/s)	D_{eq} (mm)	v (m/s)	$\Delta p/l$ (Pa./m)
B-G	5	268	315	3,5	0,5

Con estos valores, la pérdida de carga en el difusor deberá ser:

$$\Delta p_{\text{difusor}} = 34,5 - 0,19 \cdot 5 = 33,55 \text{ Pa}$$

Reflexiona

¿Qué problemas puede plantear que la velocidad en una unidad terminal sea muy alta?

Para saber más

Calcular pérdidas de carga y diseñar instalaciones de distribución de aire con programas informáticos es fácil con los conceptos claros. Por ejemplo, puedes descargarte el programa gratuito [DUCTO](#) o acceder a programas online como el que se muestra a continuación:



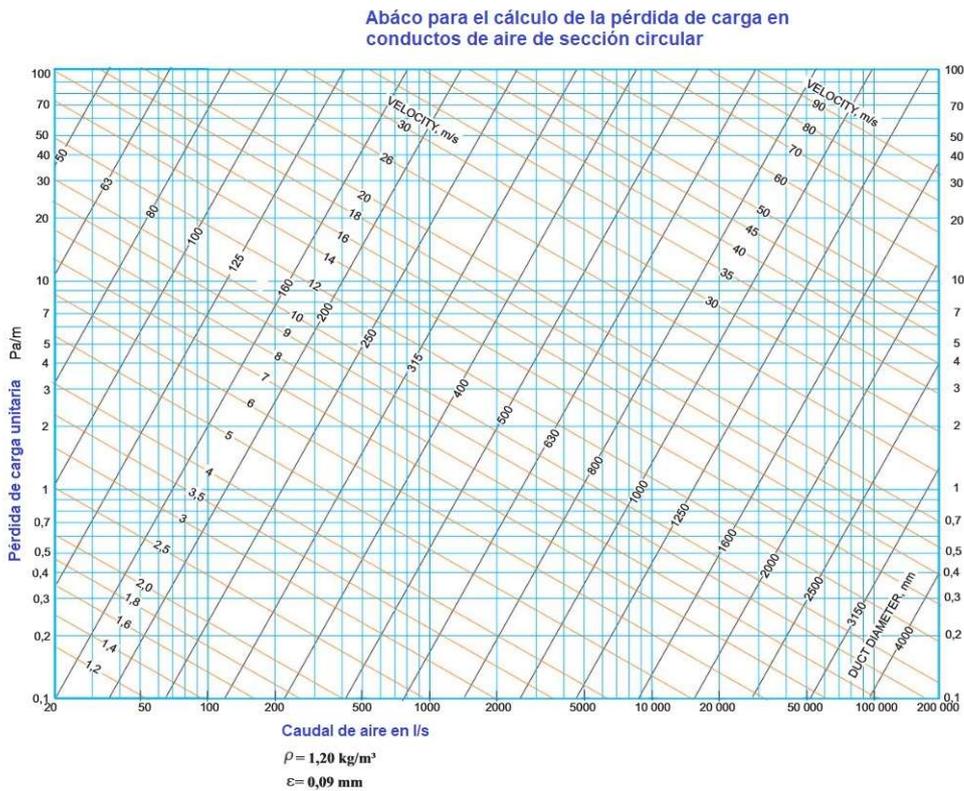
Calculadora: Dimensionamiento de Tubería para Aire por Caída de Presión-Velocidad

Ejercicios Para Resolver

1.- Calcula, en el caso práctico anterior, los diámetros de los conductos de los ramales que faltan por calcular: D-I y E-J. Determina también las velocidades del aire a la salida. Tomaremos como pérdida de presión en las unidades terminales un valor inicial de 20 Pa y, en caso necesario, para velocidades superiores a 3,5 m/s modificar este valor.

Mostrar retroalimentación

El procedimiento de cálculo es exactamente igual. Utilizar el siguiente diagrama:



2.- Calcula los conductos de aire del circuito principal del caso práctico con el programa TLV y compara resultados.

Mostrar retroalimentación

Los cálculos son muy simples y rápidos. Como vemos, rellenamos los valores conocidos de caudal y velocidad máxima y obtenemos el resto de valores. Observa que hemos puesto una velocidad máxima acorde con los resultados que hemos obtenido antes, para poder comparar diámetros: como ha salido 5,4 m/s ponemos como velocidad máxima 6 m/s. Observa también, que los diámetros del abáco son diámetros interiores, mientras que en el programa tenemos este valor, pero aparece en el encabezado la denominación comercial DN, que difiere algo del diámetro interior.

Por todas las anteriores razones, tenemos unos valores algo distintos.

TRAMO A-B

Calculador para Ingeniería

- Vapor
- Recuperación de Condensado
- Agua
- Aire
- Diseño de Tubería
- Orificios y Válvulas
- Rango de Condensado del Aire Comprimido
- Tablas de Aire Húmedo Saturado
- Gas
- Tablas de vapor
- Términos de Uso
- Soluciones por Productos
- Historias de éxito



Calculadora: Dimensionamiento de Tubería para Aire por Velocidad

 **Inscríbese en la Revista por e-mail!**

Introducir Datos Unidades SI(bar) ▾

Grado de Tubería ▾

Presión del Aire ▾

Temperatura del Aire ▾

Rango de Flujo de Aire (Real) ▾

Rango de Flujo de Aire (Normal) ▾

Longitud de la Tubería [?] ▾

Velocidad Máxima Permisible [?] ▾

[Mostrar Opciones Avanzadas](#)

Resultados

Tamaño de Tubería ▾

Diámetro Interno Tubería ▾

Velocidad del Aire ▾

Caída de Presión ▾

Longitud Equivalente a una Tubería Horizontal ▾

RESTO DE TRAMOS

Introduciendo los datos en los distintos tramos, tenemos los resultados de la tabla:

Resultados del conducto principal

Tramo	L_{eq} (m)	q (l/s)	D_{eq} (mm)	DN	v (m/s)	Δp (Pa)
A-B	6,25	1 057	486	500	5,69	4,16
B-C	7,5	890	486	500	4,79	3,64
C-D	7,5	612	437,2	450	4,07	3,07
D-E	7,5	445	388,8	400	3,74	3,04
E-F	12,5	167	260,4	250	3,13	5,98

2.2.- Tuberías de líquidos.

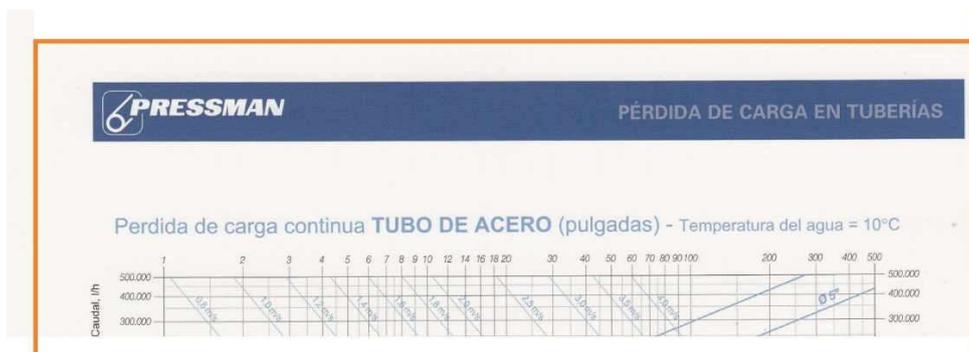
Ya has visto que las redes de tuberías se utilizan para mover fluidos líquidos o gaseosos a través de las instalaciones. El tipo de fluido y las instalaciones en las que se usa son numerosos, agua en un circuito de calefacción, refrigerante líquido o gaseoso en una instalación frigorífica, gas natural en una instalación de conducción de gas, etc. Los principios que rigen la dinámica de estos fluidos son los mismos que hemos visto para las instalaciones de conductos de aire. En este apartado vas a estudiar las redes de tuberías de agua, que son las más habituales. En otras unidades temáticas en módulos específicos de otros tipos de instalaciones podrás estudiar las características especiales de otros tipos de tuberías de fluidos.

Aunque el RITE no fija valores máximos para las pérdidas de carga lineales, resulta adecuado utilizar como valor límite de pérdida de carga en tramos rectos sea 40 mm cda/m, alrededor de 400 Pa/m, sin sobrepasar los 2 m/s de velocidad en los tramos que discurran por locales habitados. En la práctica, es conveniente dimensionar las tuberías de modo que la pérdida de carga lineal no supere los 20 mm cda/m, alrededor de 200 Pa/m, y habitualmente entre 10 y 15 mm cda/m, es decir 100 Pa/m a 150 Pa/m. En estas condiciones, las velocidades siempre serán inferiores a 2 m/s.

En los casos de distribuciones largas o con muchas ramificaciones, debe procurarse que las tuberías, sobre todo las más alejadas de las bombas de circulación, tengan pérdidas aún más bajas, de modo que la instalación presente desequilibrios hidráulicos pequeños.

Las **pérdidas de carga en las tuberías dependen** de varios factores, en primer lugar del **material** de las mismas, fundamentalmente de la rugosidad del material. También depende de la **viscosidad del fluido** y de su temperatura. Lógicamente de la longitud de la tubería y, finalmente de la velocidad y caudal del fluido, que están relacionadas con el diámetro interior de la tubería. En la práctica se utilizan ábacos y programas de cálculo semejantes a los que has visto para los conductos de aire.

El fluido más habitual en sistemas térmicos es el agua, por lo que son muy prácticas las tablas que dan los fabricantes. Clicando en la imagen adjunta pueden descargarse tablas y gráficos prácticos para la determinación de los diámetros, pérdidas de carga, etc. a las diferentes temperaturas usuales del agua.



De forma similar a lo que has estudiado anteriormente en el cálculo de conductos, el cálculo de las pérdidas de carga en una red de tuberías se compone de dos partes. Por un lado tendremos pérdidas en los tramos rectos (pérdidas lineales) y por otro el de los accidentes de recorrido (pérdidas singulares). Las pérdidas singulares, como se ha visto en apartados anteriores, se pueden calcular mediante el coeficiente de singularidad (ξ) o mediante la longitud de tubería equivalente. También puede determinarse, más fácilmente, con programas como los que venimos utilizando.

Para entender el proceso de cálculo, haremos lo mismo que en casos anteriores, utilizaremos un supuesto práctico y lo resolveremos detalladamente.

Para saber más

Si deseas conocer en detalle las características mecánicas de los diferentes tipos de tuberías, los volúmenes de líquido que contienen, sus diámetros y espesores, etc. puedes descargar el siguiente documento:

Donde

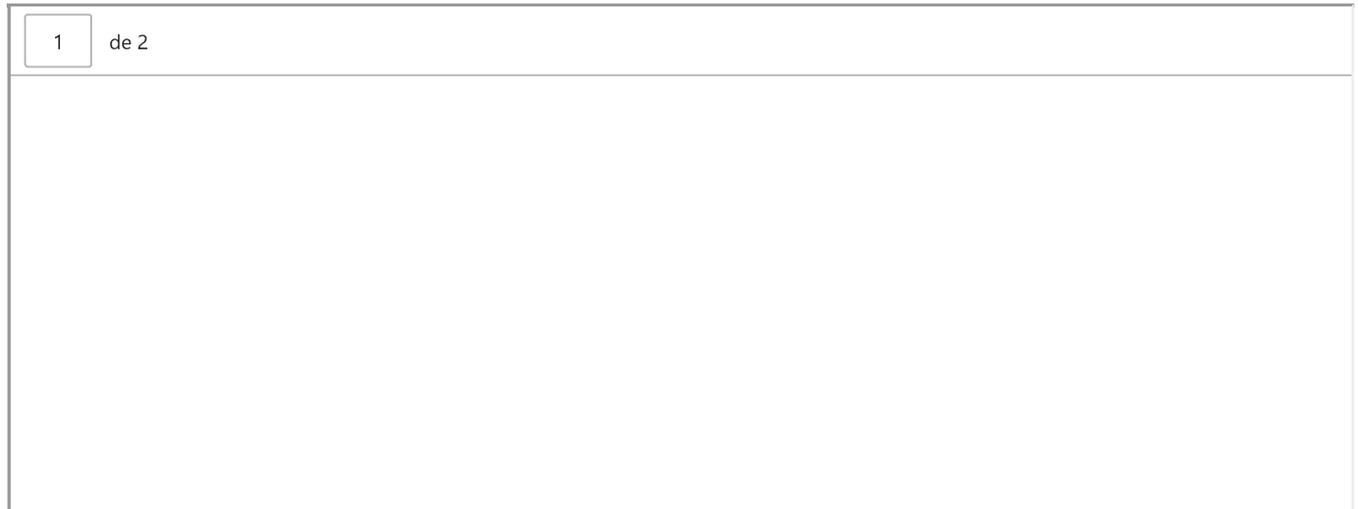
Δp : pérdida de carga (Pa)

ξ : coeficiente de singularidad

ρ : densidad (Kg/m³)

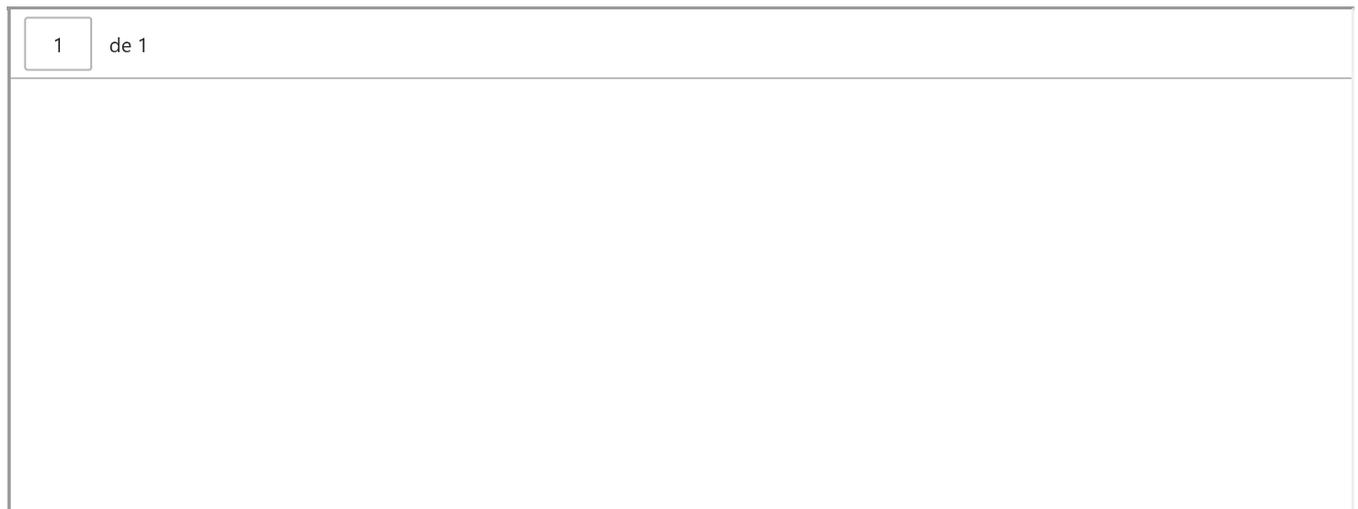
v : velocidad (m/s)

En este caso, tal como ocurre para las pérdidas lineales, la clave está en el valor de la constante adimensional ξ . Este valor se puede encontrar en distintas tablas. En el siguiente enlace tienes una tabla válida para diferentes fluidos, en donde podemos obtener la **pérdida de carga de los elementos singulares**:



Pérdidas en elementos singulares

Un método alternativo, más práctico, es el de la longitud equivalente. Este método consiste en relacionar cada accidente con una longitud equivalente de conducto recto del mismo diámetro. Esto facilita el cálculo al "linealizar" el conducto a calcular. Estas relaciones también se encuentran tabuladas. En el siguiente enlace puedes ver una **tabla de longitudes equivalentes**:



Longitudes equivalentes

Más adelante en esta unidad utilizarás estas tablas para el cálculo de conductos y de tuberías.

Ecuación de Bernouilli con pérdidas de carga

La ecuación de Bernouilli que hemos visto la podemos completar teniendo en cuenta las pérdidas de carga totales en una tubería, tal como vemos en la imagen. Igualmente, clicando la imagen puedes descargarte una

A continuación calculamos las pérdidas singulares utilizando el programa en red [Pressure Drop](#) tal como vemos a continuación.

Cono reductor

Curva

Pérdida de carga total

El total de la tubería es la suma de todas las pérdidas de carga (lineal + singulares):

$$30\ 900 + 54 + 397 = \mathbf{31\ 351\ Pa}$$

Otra forma de calcular las pérdidas singulares es mediante el uso de longitudes equivalentes. La ventaja es que los cálculos son más sencillos. Vamos a calcular el ejemplo anterior por este método utilizando la tabla de longitudes equivalentes en el siguiente ejercicio resuelto:

Ejercicio resuelto

Calcular la pérdida de carga de la siguiente tubería de cobre por la que hacemos circular 5.000 l/h de agua a 40 °C. Utilizar el método de las longitudes equivalentes para calcular las pérdidas de carga singulares.



Mostrar retroalimentación

Vamos a calcular la longitud equivalente de las pérdidas singulares. Una reducción en una tubería DN 42x1 según la tabla corresponde a una longitud equivalente de un metro. Un codo de 90° en una tubería DN 35 corresponde a una longitud equivalente de 1,01 m.

La pérdida total de carga será :

$$31\ m \times 310\ Pa/m + 31,1\ m \times 720\ Pa/m = 9\ 610\ Pa + 22\ 392\ Pa = \mathbf{32\ 002\ Pa}$$

2.3.- Materiales utilizados en las instalaciones.

En cualquier instalación, incluso en tu propia vivienda, has visto tuberías de diferentes materiales. Pero básicamente habrás comprobado que se trata de dos tipos: metálicas o plásticas. Incluso puedes encontrar tuberías híbridas, con una parte plástica y otra metálica. Hasta hace unos años lo habitual era utilizar tuberías metálicas. Esto viene haciéndose desde el tiempo de los romanos. Los romanos ya construían las tuberías de abastecimiento de agua con plomo. Se siguieron utilizando hasta que la revolución industrial trajo consigo la posibilidad de trabajar otros materiales metálicos.

METÁLICOS

Los metales presentan ventajas de resistencia mecánica y a la exposición solar, aunque sus limitaciones son la corrosión, el elevado precio y el sistema de montaje que puede requerir mano de obra altamente cualificada. Los principales materiales son:

Acero galvanizado: Los tubos de este material sustituyeron a los de plomo. Tiene la ventaja de ser un material económico y resistente, pero los inconvenientes de mecanizado difícil al servirse en barras de gran rigidez, y los sistemas de unión generalmente roscados son de lenta ejecución y de calidad dependiente del utillaje utilizado. Otro inconveniente de este material el que en su interior se produce corrosión, que provoca desprendimiento de óxido, aumento de la rugosidad y destrucción del tubo a largo plazo. Su vida media es de alrededor de 10 años se usan en diámetros medios, de 12 mm (1/2") a 15 cm (6"). Son baratos.



Tubos de acero galvanizado

Hierro fundido: tiene una gran resistencia a la corrosión y, por tanto, larga vida (hasta 100 años). Se usa con frecuencia en redes de distribución de agua potable y suelen ser grandes diámetros, desde 5 cm hasta 120 cm. Las uniones son mediante bridas, juntas de expansión, adaptadores Dresser, etc. que requieren mano de obra especializada.



Tubos de hierro fundido

Acero inoxidable: la gran ventaja de este material es su alta calidad que pueden presentar las redes de fluido, al ser muy resistente y apto para productos alimentarios. Además, su vida útil es muy superior al resto de los aceros en instalaciones de agua, al no sufrir corrosión. Como inconvenientes, lo son su elevado precio, su peso y la dificultad de mano de obra en operaciones de soldadura. Se puede utilizar en cualquier tipo de instalaciones, tanto de fluido frío como caliente. No requieren protección superficial añadida.



Tubos de acero inoxidable

Cobre: ha sido el material de mayor uso hasta el momento en calefacción, gas y ACS, actualmente, debido principalmente al gran aumento de su precio, está siendo sustituido por tuberías plásticas. Presenta ventajas de resistencia mecánica y a la corrosión si se toman las debidas precauciones en instalaciones de agua, y de compatibilidad de accesorios y uniones con facilidad de obtención de piezas y recambios. Al ser uniones soldadas es muy importante la calidad de la mano de obra, sobre todo para diámetros grandes. Además puede presentar problemas de corrosión electrofítica, y de incrustaciones.



Tubos de cobre

MATERIALES PLÁSTICOS

Los materiales plásticos son materiales que están desplazando en bastantes casos a los metales, por razones de economía, de facilidad de montaje y de durabilidad. Presentan limitaciones de resistencia mecánica y de resistencia a la intemperie y a la radiación solar directa.

La conductividad térmica de los materiales plásticos es muy baja en comparación con los metálicos, con lo que la capa de material aislante a añadir (para cumplir el RITE) se puede reducir, bajando costes. Además, su densidad es muy baja (es decir, pesan poco en relación a su volumen), por lo que los amarres necesarios son más simples y el montaje se simplifica.

Las principales ventajas de tuberías plásticas son:

- ✓ No tienen problemas de oxidación.
- ✓ La ausencia de par galvánico (no existe corrosión electroquímica).
- ✓ Menores pérdidas de carga debido a la baja rugosidad interna de los plásticos.
- ✓ Son perfectamente compatibles con el uso de agua glicolada.
- ✓ Tienen baja conductividad térmica (en torno a $0,24 \text{ W/mK}$), por lo que se puede reducir la capa de material aislante tanto en aplicaciones de fluido frío como caliente.
- ✓ Su precio es cada vez más competitivo debido al incremento del coste de los metales.
- ✓ Larga duración.
- ✓ Montaje rápido y sencillo, lo que puede implicar un menor costo en mano de obra.

Los plásticos más utilizados en instalaciones de fluidos son las siguientes:



Polipropileno (PP)



Poli-butileno (PB)



Poli-etileno (PE - PEX)



Poli-etileno multicapa



Poli-cloruro de vinilo (PVC)

Tubos de diferentes materiales plásticos

- ✓ **Polipropileno (PP):** Se utiliza tanto en AFCH y ACS como en circuitos primarios de climatización salvo excepciones (no se puede utilizar en el circuito primario de una instalación solar térmica, por no estar permitido por el documento HE4 del CTE). Los diámetros disponibles llegan hasta los 400 mm. El polipropileno es, además, reciclable. También se están utilizando en evacuación de aguas residuales (saneamiento) desplazando al PVC en instalaciones de gama alta, dado sus buenas propiedades fonoabsorbentes y su resistencia a una amplia variedad de compuestos químicos.
- ✓ **Polibutileno (PB):** El Polibutileno es muy usado en suministro de agua a viviendas y agua caliente sanitaria (ACS), y aplicaciones de calefacción (por radiadores, por suelo o techo radiante) y climatización por agua.
- ✓ **Polietileno (PE) y polietileno reticulado (PEX):** es un plástico muy utilizado para la conducción de fluidos a presión. Se pueden realizar uniones mediante electrosoldadura. Su resistencia a la corrosión, los agentes químicos y la abrasión es elevada, y no contamina el agua, por lo que es muy utilizado en la instalación y distribución de agua potable, gas combustible, e instalaciones de riego centralizado, depuración de aguas fecales, redes de saneamiento e, incluso, sistemas contra-incendios. El proceso de reticulación implica la formación de una red tridimensional formada por la unión de las diferentes **cadena poliméricas**. Esto conduce a que el material adquiera mayor rigidez.
- ✓ **Polietileno multicapa:** Es un tubo fabricado en este plástico, al que se le ha añadido una lámina intermedia de aluminio, que le proporciona una mayor resistencia mecánica y térmica. Las ventajas son similares a las del anterior, aunque el material es más caro. Además, la capa metálica intermedia limita las dilataciones, que es uno de los inconvenientes de las tuberías de plástico. Se aplica en suelos radiantes, instalaciones de calefacción convencionales y por fancoils.
- ✓ **Policloruro de Vinilo (PVC):** El PVC es un polímero termoplástico de color grisáceo, dúctil y tenaz, de gran estabilidad dimensional y resistencia ambiental y reciclable por varios métodos, que comienza a reblandecerse sobre los 80 °C y se descompone a 140 °C. Debido además a su precio competitivo, el PVC rígido es muy válido para el transporte de fluidos fríos, por lo que hoy por hoy es el plástico más utilizado en instalaciones de saneamiento. También para redes de agua industriales. Es interesante para tuberías de aspiración de bombas de agua.

Reflexiona

¿Sabías que el trabajo con plomo dio nombre a una profesión?

En español moderno utilizamos la palabra fontanero, pero antiguamente se usaba la palabra plomero. En algunos países de América se sigue utilizando esta palabra. En otros idiomas todavía existe esa relación con el plomo. En francés se dice plombier y en inglés plumber para designar al fontanero.

Autoevaluación

Las tuberías metálicas más utilizadas en las instalaciones de fluidos son las de cobre y acero.

- Verdadero.
- Falso.

Correcto. El cobre y el acero presentan ventajas de resistencia mecánica y baja corrosión, entre otras.

Creo que te convendría revisar este capítulo.

Solución

1. Opción correcta
2. Incorrecto

3.- Ventiladores.

Caso práctico: un invento barato y efectivo

Hay algunas empresas que se dedican a fabricar productos y diseñar soluciones para el ahorro energético en viviendas. Uno de estos inventos, sencillo, pero efectivo, consiste en instalar un ventilador solar en el tejado del edificio de viviendas unifamiliares con espacios bajo cubierta o áticos. En invierno estos áticos son una fuente de humedad y de filtraciones y, en verano, una verdadera sauna. Seguramente te habrá tocado alguna vez estar en alguno de estos espacios un día de calor de verano.

En el caso práctico que ves aquí, este problema se resuelve con un ventilador solar que está alimentado por un panel fotovoltaico y que, con la correspondiente sonda de temperatura e, incluso, de humedad, puede activarse y evacuar el aire para refrescar el espacio en verano y eliminar la humedad en invierno. La circulación de aire sana y evita humedades en los edificios. Sería algo parecido a las denominadas fachadas ventiladas que tanto se están desarrollando actualmente, y que resuelven los complejos sistemas de humedades en muchos edificios.

Observa el sencillo esquema del dibujo. Seguro que cuando finalices el ciclo y debas hacer un proyecto final, se te pueden ocurrir ideas como esta. De momento, en este apartado, vamos a saber algo más sobre los ventiladores.

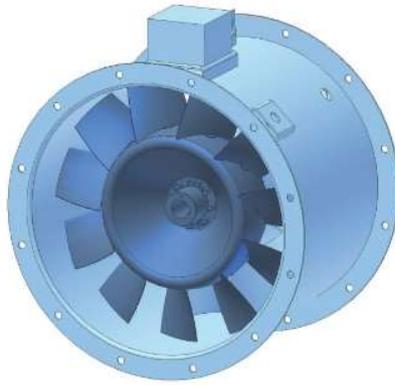


Ventilador solar

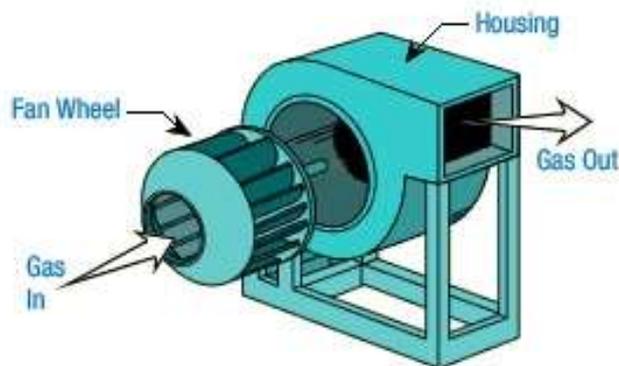
Anteriormente has visto que el aire en movimiento a través de un conducto sufre rozamientos que hacen que disminuya su presión. El aparato encargado de entregar la presión necesaria al aire para recorrer los conductos es el ventilador. Su funcionamiento se basa en la transformación de la energía mecánica a través de un rotor que gira a alta velocidad y que incrementa la energía cinética del fluido, que luego se transforma parcialmente en presión estática.

Los ventiladores se dividen en dos grupos: axiales y centrífugos.

En los **ventiladores axiales**, el movimiento del flujo se realiza **sin cambio de dirección**, conservando la dirección del eje. Se utilizan para mover grandes cantidades de aire en espacios abiertos. Al tener una resistencia al flujo baja, se requiere generar una presión estática pequeña, del orden de los 50 a 250 Pa. La principal aplicación de los ventiladores axiales se encuentra en el campo de la ventilación general y se los conoce con el nombre de extractores o inyectores de aire. Dentro de este tipo de ventiladores también se construyen modelos que llegan a generar alturas de presión estáticas hasta de 3 000 Pa.



En los **ventiladores centrífugos**, el aire de entrada lo hace en dirección paralela al eje del rotor, por la boca de aspiración, y la descarga se realiza tangencialmente al **rotor**, es decir que el aire **cambia de dirección noventa grados (90 °)**. Este tipo de ventiladores desarrolla presiones mucho mayores que los ventiladores axiales, alcanzando presiones de hasta 15.000 Pa. Se emplean mayormente, en los sistemas de ventilación localizada. El principio de funcionamiento de los ventiladores centrífugos es el mismo del las bombas centrífugas. Están constituidos por un rotor que posee una serie de álabes que giran aproximadamente entre 200 y 5 000 rpm dentro de una envoltura.



Las variables características que se manejan en un ventilador son:

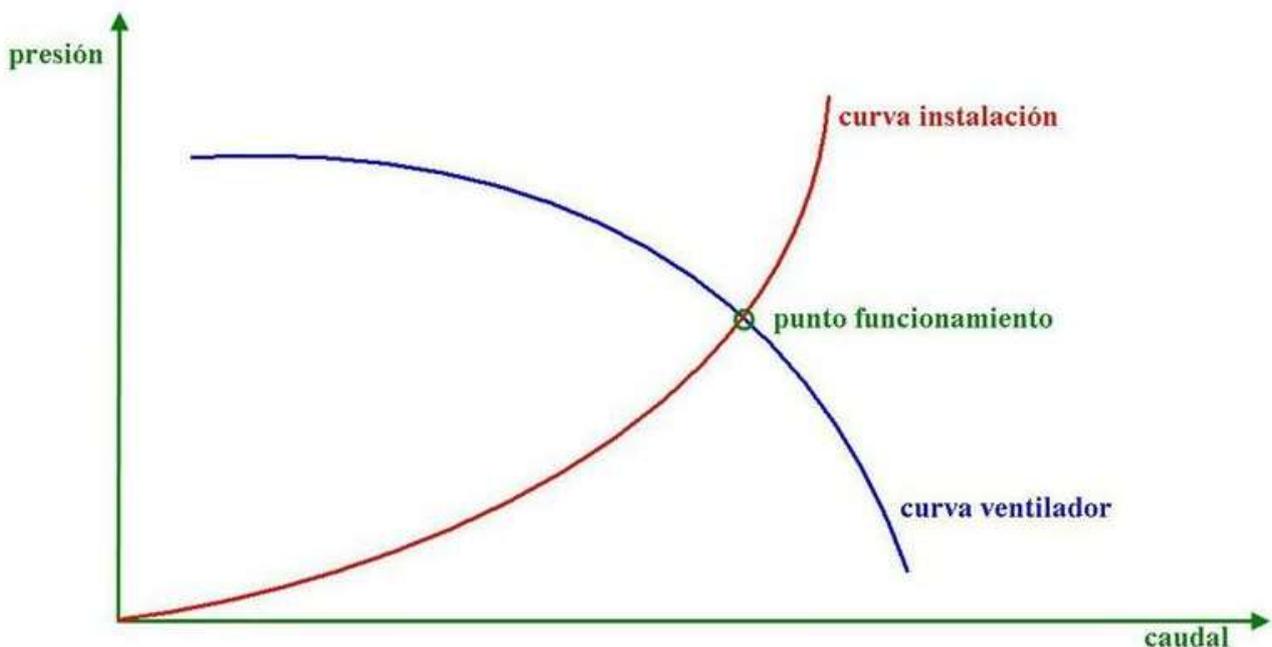
- Velocidad de rotación
- Diámetro de la hélice
- Presión total
- Presión estática
- Presión dinámica
- Caudal
- Densidad del gas
- Potencia absorbida
- Rendimiento
- Nivel sonoro.

3.1.- Leyes de los ventiladores.

Tienes que tener en cuenta que una vez que acoples el ventilador al sistema de aire acondicionado el punto de funcionamiento variará del que has proyectado. Esto es debido a que es difícil que coincidan las curvas del ventilador y la de la instalación en el punto calculado. En el sistema de conductos la presión es función del cuadrado del caudal multiplicado por un coeficiente característico de la instalación.

$$p = k \cdot q^2$$

Ese coeficiente no es posible conocerlo a priori. Sólo una vez puesta en marcha la instalación podremos calcularlo experimentalmente. La siguiente figura te muestra como casan las dos curvas en un punto de funcionamiento.



En la práctica, si quieres conseguir funcionar en un punto determinado tendrás que variar alguna de las características del ventilador.

La relación entre distintas variables de los ventiladores se recoge en tres leyes. La primera es la relación entre la velocidad de rotación y el caudal impulsado. La relación es directa, es decir un aumento de la velocidad produce un aumento en la misma proporción el caudal impulsado. Es decir, a doble velocidad, doble caudal:

$$q_1 = q_0 \cdot \left(\frac{n_1}{n_0}\right)$$

La relación entre la velocidad de rotación y la presión es cuadrática. Es decir, a doble velocidad, cuatro veces más de presión:

$$p_1 = p_0 \cdot \left(\frac{n_1}{n_0}\right)^2$$

La relación entre la velocidad de rotación y la potencia absorbida es de tercer grado.

$$P_1 = P_0 \cdot \left(\frac{n_1}{n_0}\right)^3$$

Donde:

n: velocidad del ventilador (puede ponerse cualquier unidad, siempre que ambas vayan en la misma - normalmente rpm)

p: presión total (puede ponerse cualquier unidad, siempre que ambas vayan en la misma - normalmente Pa)

q: caudal (puede ponerse cualquier unidad, siempre que ambas vayan en la misma - normalmente m³/s)

P: potencia del ventilador (puede ponerse cualquier unidad, siempre que ambas vayan en la misma - normalmente kW)

Finalmente, podemos relacionar la potencia, la presión y el caudal mediante la fórmula, fácilmente deducible:

$$P = q \cdot \Delta p$$

En esta última fórmula, es importante utilizar las unidades del SI para obtener los resultados en la unidad correcta (P en W, q en m³/s y Δp en Pa)

Como ejemplos de utilización de estas fórmulas vamos a realizar algunos ejercicios.

Ejercicios resueltos

1.- Un ventilador instalado en una conducción de aire está proyectado que mueva 2 500 m³/h. Sin embargo en la realidad comprobamos que circulan 2 100 m³/h. La velocidad de giro es 800 rpm, calcula a qué velocidad tendrá que girar para entregar el caudal requerido y cuáles serán las variaciones de presión y potencia absorbida.

Mostrar retroalimentación

Aplicando, sucesivamente, cada una de las tres leyes, tenemos:

$$2\,500 = 2\,100 \cdot \left(\frac{n_1}{800}\right) \rightarrow n_1 = 952 \text{ rpm}$$

$$p_1 = p_0 \cdot \left(\frac{952}{800}\right)^2 \rightarrow \frac{p_1}{p_0} = 1,41 \rightarrow p_1 \text{ un } 41 \% \text{ más de presión}$$

$$P_1 = P_0 \cdot \left(\frac{952}{800}\right)^3 \rightarrow \frac{P_1}{P_0} = 1,69 \rightarrow P_1 \text{ un } 69 \% \text{ más de Potencia}$$

Como puedes comprobar el aumento de potencia absorbida es muy grande. Esto nos enseña que podremos corregir pequeñas desviaciones de caudal variando la velocidad de giro, pero que si la diferencia es muy grande es más rentable cambiar el ventilador por otro que funcione en el rango deseado.

2.- La presión estática de un ventilador equivale a 20 mm cda y la presión dinámica a 5 mm cda. Calcular la presión total ejercida por el ventilador.

Mostrar retroalimentación

$$\begin{aligned}\Delta p_e &= 20 \cdot 9,8 = 196 \text{ Pa} \\ \Delta p_d &= 5 \cdot 9,8 = 49 \text{ Pa} \\ \Delta p_t &= 196 + 49 = \mathbf{245 \text{ Pa}}\end{aligned}$$

3.- Calcular el caudal de un ventilador que ha de producir 10 renovaciones de aire a la hora en una planta industrial que mide 50 m x 20 m x 8 m. Averiguar en qué porcentaje deberemos disminuir su velocidad para realizar 5 renovaciones a la hora.

Mostrar retroalimentación

$$q_1 = 8\,000 \cdot 5 = 40\,000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 22,22 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \rightarrow \frac{q_1}{q} = \frac{n_1}{n} = 0,5 \rightarrow -50\%$$

Ejercicios para resolver

1.- un ventilador en condiciones normales genera una presión estática de 20 mbar y una presión dinámica de 2 mbar. La potencia de accionamiento es de 75 kW. El rendimiento total del ventiladores del 75 %. Calcular el caudal del ventilador.

Mostrar retroalimentación

Solución: $q = 25,56 \text{ m}^3/\text{s}$

2.- Un ventilador de tiro forzado tiene que trabajar contra una presión estática de 8 mbar. Las velocidades de los gases calientes a la salida y entrada del ventilador pueden suponerse iguales (lo que significa que la presión dinámica ≈ 0). El caudal es de $5 \text{ m}^3/\text{s}$. El rendimiento total es del 65%. Calcular la potencia absorbida de la red por el ventilador.

Mostrar retroalimentación

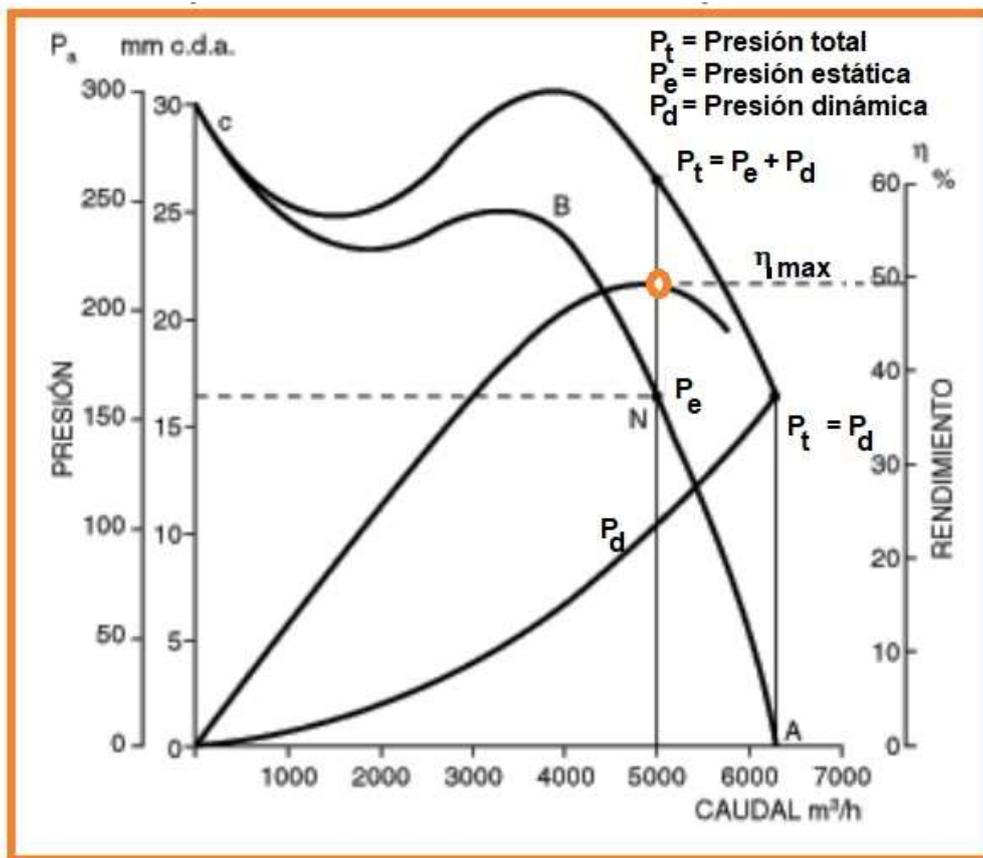
Solución: 6,15 kW

3.2.- Selección de ventiladores.

Cuando realizas el cálculo de un sistema de conductos tienes como datos los caudales necesarios en cada espacio a ventilar o acondicionar. De ahí obtienes los diámetros o secciones necesarias, junto con velocidades y presiones necesarias. Con todos estos datos tienes que entrar en el catálogo de los fabricantes y seleccionar el ventilador adecuado.

En el catálogo encontrarás varios ventiladores que cumplen las exigencias de caudal y presión. Para elegir dentro de la gama disponible habrá que tener en cuenta otras características como son el tamaño, el número de revoluciones a las que debe girar el rotor, la potencia que debe ser entregada a su eje, el rendimiento con el que funciona, la tensión y el tipo de corriente, la disposición de la transmisión y el ruido generado.

El punto ideal de funcionamiento es el que corresponde a su máximo rendimiento y es con el que debería coincidir el punto de diseño del mismo. En una auditoría energética, uno de los factores de comprobación es que el punto de funcionamiento aporte el máximo rendimiento, tal como se aprecia en la imagen siguiente:



Curvas de funcionamiento de un ventilador

Vamos a ver un ejemplo de selección con la ayuda del diagrama de un ventilador real.

Ejercicio resuelto

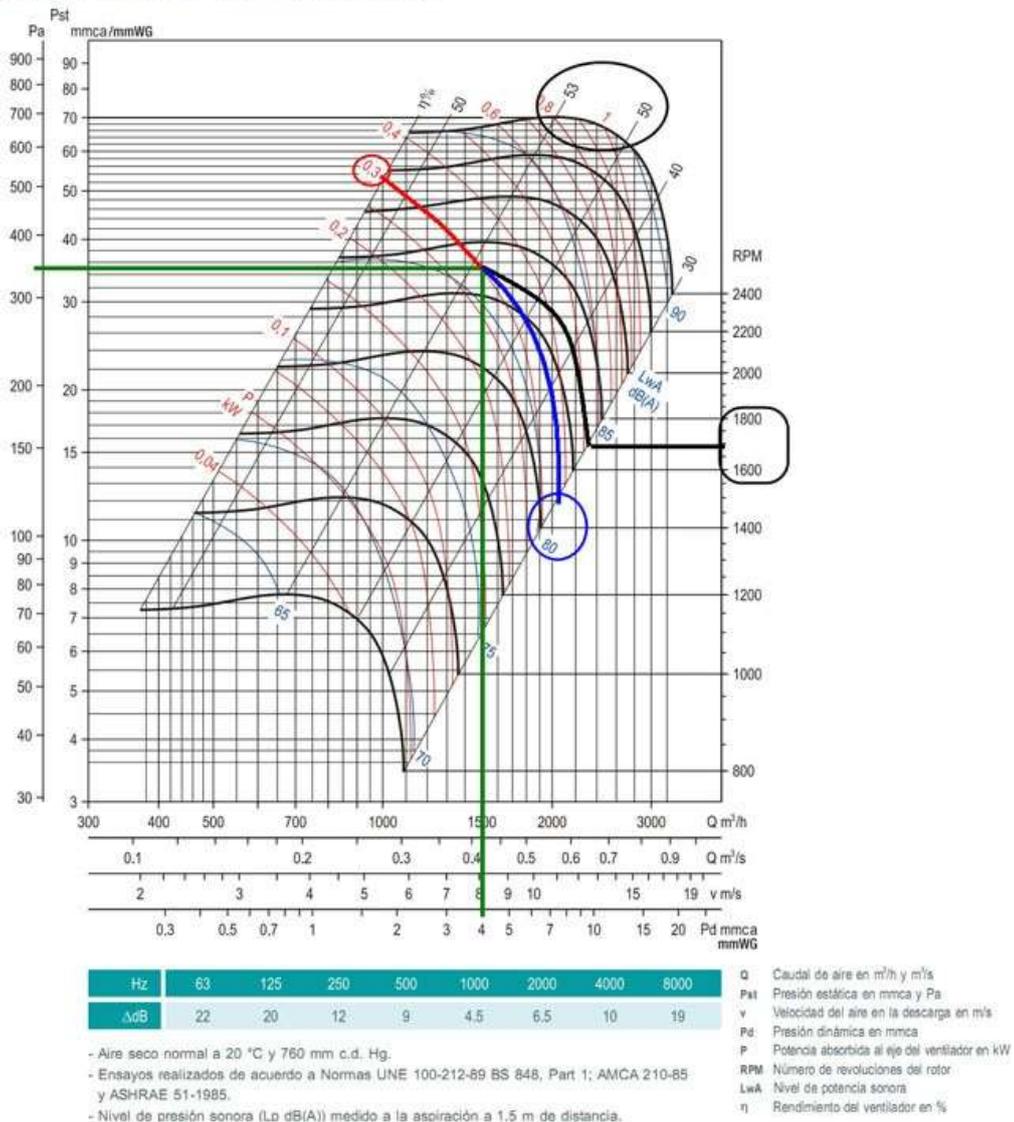
Determina las variables del ventilador para un caudal de 1 500 m³/h y una presión estática de 35 mm cda.

Mostrar retroalimentación

Trazamos una vertical desde 1 500 m³/h y una horizontal desde 35 mm cda. El punto donde coinciden es el de funcionamiento del ventilador. En ese punto puedes obtener el resto de las variables del ventilador:

CASIBA VCM 7/7 - VENTILADORES CENTRIFUGOS

Curvas de Funcionamiento



Potencia: 0,3 Kw.

Rendimiento: 54 %.

Revoluciones: 1 700 rpm.

Velocidad: 8 m/s.

Presión dinámica: 4 mm cda.

Nivel sonoro: 81 db.

La presión total será la suma de la estática y de la dinámica, en este caso 39 mm. cda.

Para saber más

Los sistemas de ventilación actuales han dado paso al clásico sistema de ventilación natural, por equipos mecánicos controlados que mejoran la eficiencia, donde cada vez es más frecuente encontrar un recuperador de calor. En los siguientes vídeos puedes ver una información simple

de en qué consisten, en primer lugar un sistema de ventilación mecánica controlada y en segundo lugar un sistema inteligente de mayor nivel de control.

<https://www.youtube.com/embed/IUvnuKYwJ-Q?start=3&end=174&showinfo=0&rel=0>

Ventilación mecánica controlada

<https://www.youtube.com/embed/JL62jgblh94?start=10&end=215&showinfo=0&rel=0>

Sistema inteligente de ventilación

Caso práctico

En el siguiente vídeo puedes ver un sistema simple de control de la ventilación de un restaurante. Las sondas de CO₂ asociadas a un ventilador de extracción controlada son soluciones baratas y eficientes en ventilación. Si, además acoplamos un sistema de recuperación de calor, tenemos una de las instalaciones más rentables. Prueba de ello es la gran cantidad de viviendas nuevas que los instalan en la actualidad. Un edificio de consumo casi nulo o de calificación energética A, casi está obligado a recurrir a estos sistemas.

<https://www.youtube.com/embed/p5VObaqtW-k?start=62&end=105&showinfo=0&rel=0>

Control de la ventilación mediante sonda CO2

4.- Bombas circuladoras.

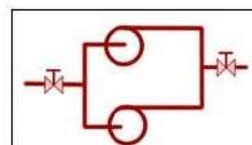
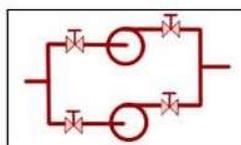
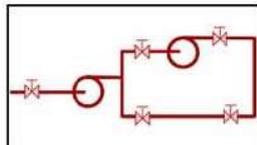
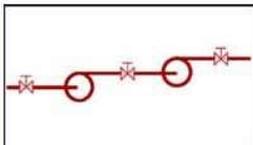
Caso práctico: ¿cómo llega el agua a los pisos altos de un rascacielos?

Seguramente te has preguntado en alguna ocasión, cómo puede ser posible que eleven el agua que consumen las últimas plantas de un rascacielos, cuando el agua potable fluyente o en depósitos está mucho más baja. La solución es el uso de bombas o grupos de presión, que aumentan la presión del líquido y, por consiguiente, pueden subirla a más altura. Estas bombas, como comprenderás, son fundamentales y no pueden fallar. Por ello se suelen colocar bombas gemelas que funcionan alternativamente y que, en caso de avería, pueden sustituirse sin interrumpir el servicio. También se utilizan depósitos de agua sucesivos en las plantas intermedias, como puedes ver en el vídeo siguiente:

<https://www.youtube.com/embed/PgxSD6H799Q?amp;showinfo=0&rel=0>

En un test realizado en el Reino Unido para obtención de un certificado de instalador térmico, se propuso la siguiente pregunta ¿serías capaz de saber la respuesta?

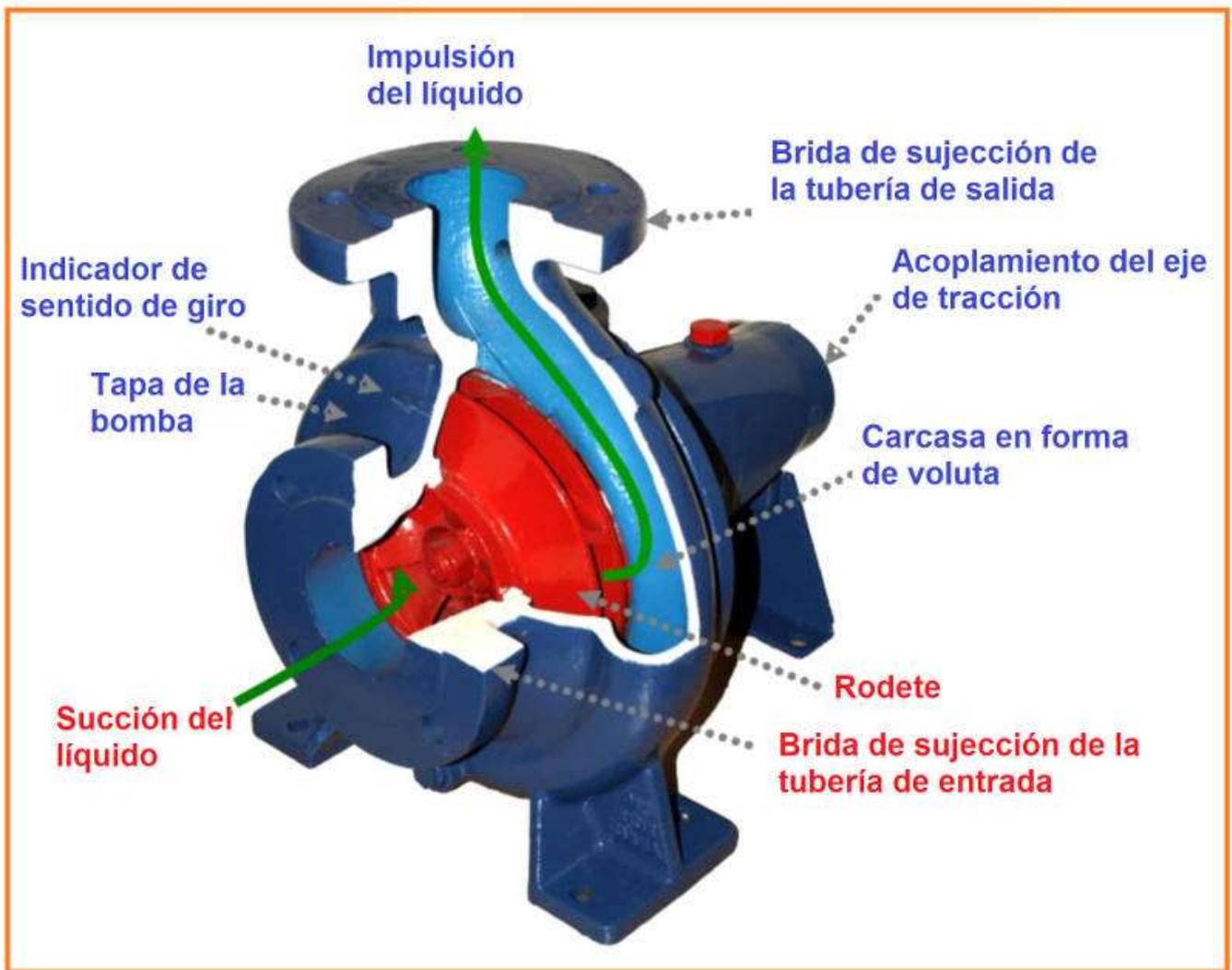
Which of the following arrangements allows changeover of pumps for maintenance, without stopping the flow to the process?



Citas Para Pensar

Los circuladores y las bombas son a los líquidos, como los ventiladores y los compresores son a los fluidos

En los catálogos puedes encontrar muchos tipos de bombas, pero las más habituales en las instalaciones térmicas son las centrífugas. Las bombas son máquinas hidráulicas cuyo objetivo es convertir energía mecánica de rotación en energía cinética o potencial del fluido dentro del sistema. Nos van a servir para hacer circular un fluido dentro de una instalación (por ejemplo el agua que lleva el calor a los emisores en un sistema de calefacción) o para elevar ese fluido (por ejemplo una instalación de bombeo de agua desde un pozo). El eje de la bomba lo mueve, normalmente, un motor eléctrico. Por ello, una bomba es una máquina que convierte energía eléctrica en energía potencial (si es una **bomba elevadora**), en energía cinética (si es una **bomba circuladora**) o en energía de presión-piezométrica (si es un **grupo de presión**)

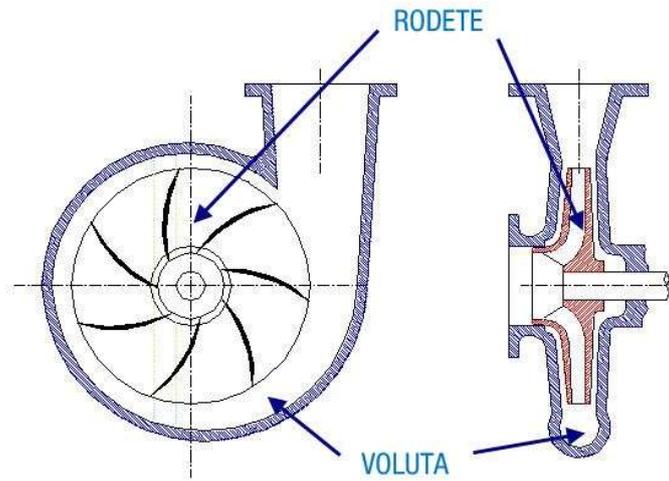


Partes de una bomba

Los elementos constructivos de que constan son:

- ✓ Una tubería de aspiración por la que llega el fluido a la bomba.
- ✓ El rotor o rodete, formado por una serie de álabes de diversas formas que giran dentro de una carcasa circular. El rodete va unido solidariamente al eje y es la parte móvil de la bomba. El fluido entra perpendicularmente a la rotación del rodete. Los álabes del rodete hacen girar las partículas de fluido muy rápido. El fluido es proyectado hacia el exterior debido a la fuerza centrífuga a gran velocidad.
- ✓ La voluta o carcasa está dispuesta en forma de caracol, es decir, la distancia entre el rodete y la voluta va aumentando según el fluido se dirige a la salida. Esto consigue una transformación de energía, ya que disminuye la velocidad y por lo tanto aumenta la presión a medida que el espacio entre el rodete y la voluta aumenta.
- ✓ Una tubería de impulsión por la que sale el fluido de la bomba.

En la figura puedes ver cómo encaja el rodete dentro de la voluta y el aumento de la distancia que va produciendo entre los dos.



Sistema para comprimir el líquido

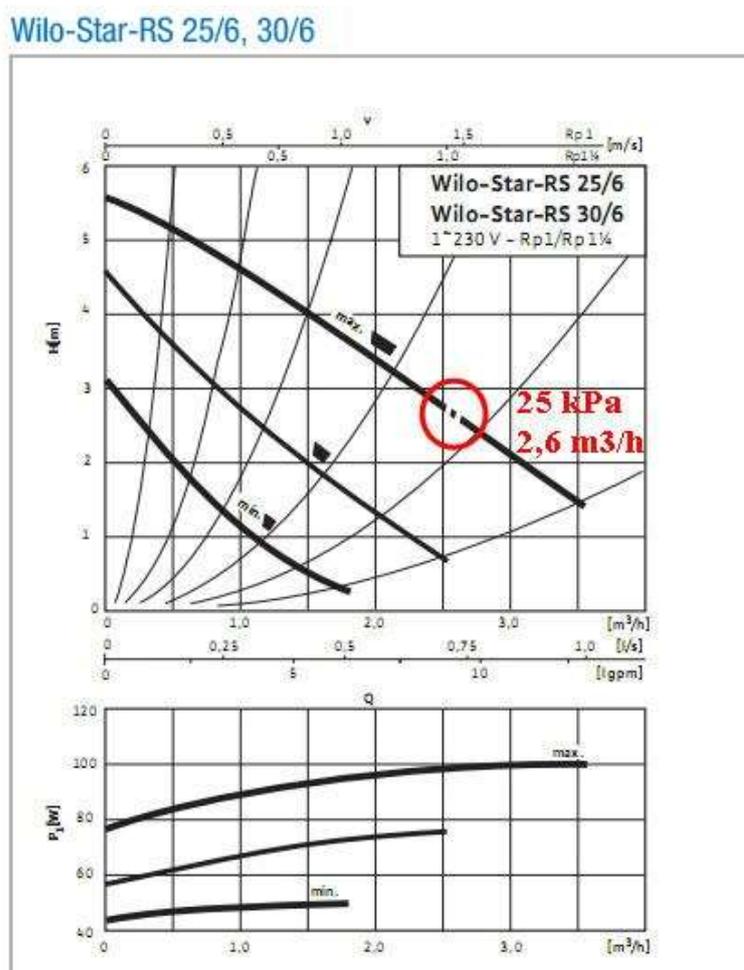
Para saber más

En el siguiente vídeo puedes ver cómo se realiza el montaje de las bombas de circulación de aguas residuales, con sistemas de control basados en sondas de nivel, muy habituales también en instalaciones térmicas. También puedes entrar en la web de este fabricante, [Grundfos](https://www.grundfos.com), y acceder a infinidad de recursos técnicos relacionados con las bombas.

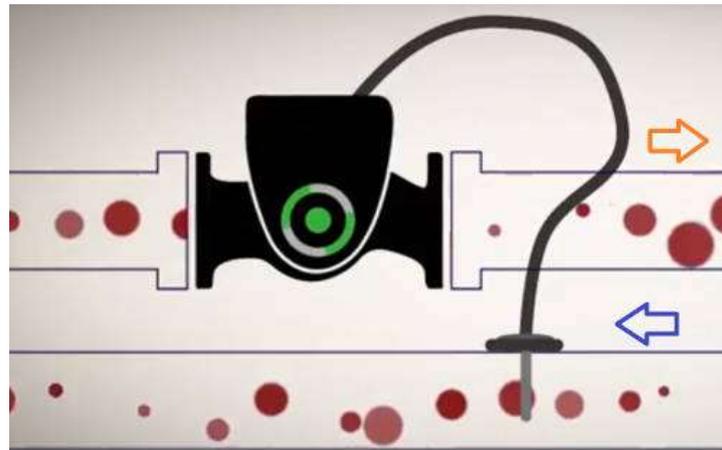
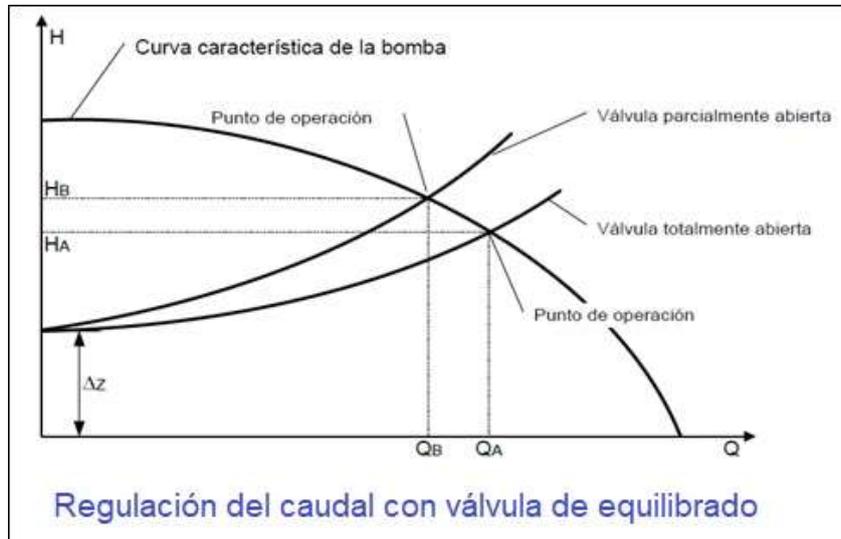
<https://www.youtube.com/embed/DcwNTWz2pEw?amp;showinfo=0&rel=0>

4.1.- Curva característica de una bomba.

Cuando vayas a escoger una bomba tendrás que buscar su curva característica. La curva característica de una bomba relaciona la altura manométrica con el caudal. También dispones en esas curvas de información de potencia consumida. En algunos catálogos, como el de la imagen nos indican el punto de máximo rendimiento de la bomba. Desde el punto de vista de la eficiencia energética es importante que nuestra instalación funcione cerca de ese punto. La imagen siguiente contiene las curvas características de la bomba que ilustra este punto. En la imagen se ve en el gráfico superior las curvas correspondientes a las tres velocidades de la bomba. En la parte inferior se ve el consumo de la bomba para cada una de las velocidades. El punto marcado indica el de máximo rendimiento que para esa bomba será para una pérdida de carga de 25 kPa y un caudal de 2,6 m³/h.



Actualmente, sin embargo, las bombas circuladoras son de velocidad variable y control automático, que permite regular su velocidad al caudal más conveniente. Para ello están dotadas de un circuito de control con una sonda en la tubería de retorno que indica si debe suministrar más caudal al circuito. Estas soluciones de velocidad variable permiten un mayor equilibrado en las instalaciones y hace innecesarias las válvulas de equilibrado que regulan el caudal que debe ir por cada ramal, pero de manera muy ineficiente (ya que para disminuir el caudal, se cierra la válvula y aumenta la pérdida de carga en ese ramal, sin disminuir la potencia consumida por el circulador).



Regulación de caudal mediante control de velocidad y sonda en la tubería de retorno

Autoevaluación

¿En el gráfico anterior cual es el caudal que se puede mover con una pérdida de carga de 20 kPa con la primera velocidad?

- 1,5 m³/h .
- 1 m³/h.
- 0,5 m³/h.

No es correcto, esto corresponde a la tercera velocidad.

Incorrecto, esto corresponde a la segunda velocidad.

Correcta. Efectivamente 0,5 m³/h es la respuesta correcta.

Solución

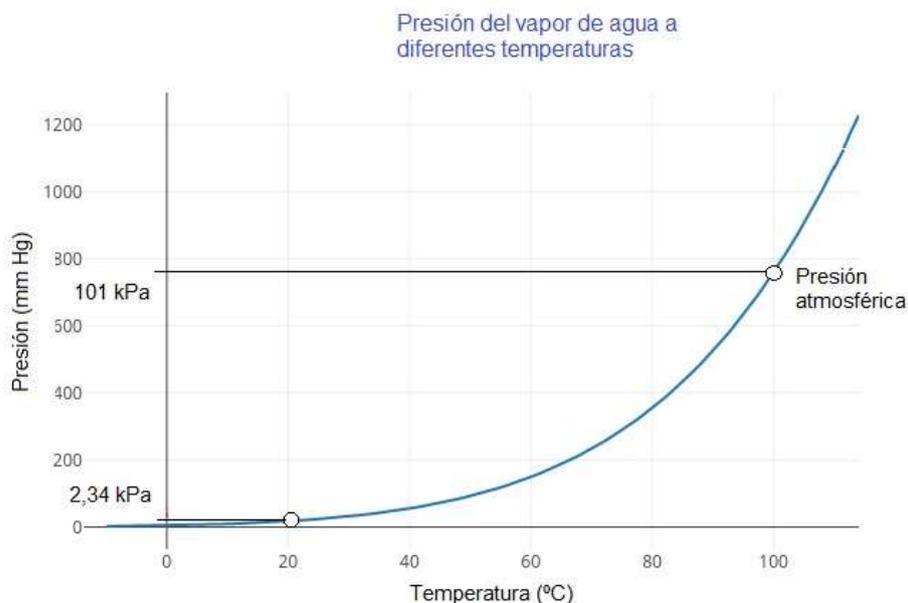
1. Incorrecto
2. Incorrecto
3. Opción correcta

4.2.- Selección de una bomba circuladora.

Para seleccionar una bomba circuladora es **necesario conocer el caudal a circular y la pérdida de carga a vencer**. Con esos datos entramos en los catálogos de los fabricantes para seleccionar dentro de la gama la más adecuada. Una vez seleccionada comprobaremos en su diagrama de funcionamiento que el punto de funcionamiento está dentro de las posibilidades.

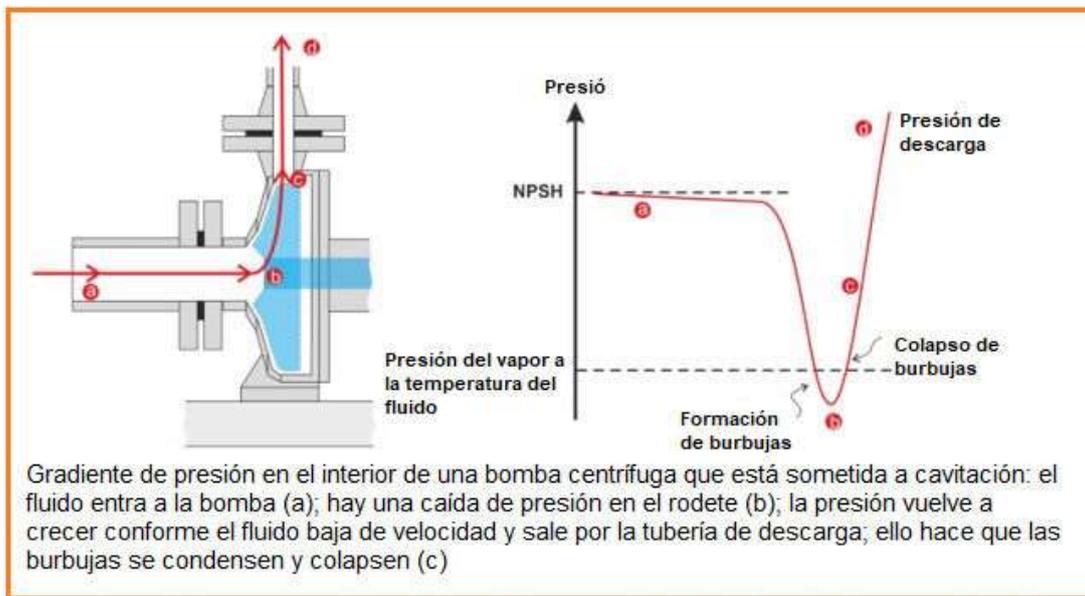
Debes conocer

Uno de los problemas que causan más averías en los circuitos de bombas es la **cavitación**. La cavitación se produce cuando la presión de un líquido a temperatura constante cae por debajo de su punto de presión de vapor saturado (o punto de ebullición). La figura muestra la curva de la presión de vapor de agua saturado como una función de la temperatura. La figura muestra que la presión de vapor saturado del líquido (equivalente a su punto de ebullición) se puede alcanzar, ya sea aumentando su temperatura o bajando su presión. O dicho de otro modo, si conseguimos bajar la presión, el agua se evaporará a menor temperatura.



Cálculo de la presión en un punto de la tubería conociendo la presión, velocidad y pérdida de carga en otro punto						
Altura (m)	Presión 1 (Pa)	Velocidad 1 (m/s)	Velocidad 2 (m/s)	Pérdida de carga (Pa)	Densidad (kg/m ³)	Presión 2
					Agua dulce	Pascal
0	101300	1	14,1	0	1000	2395

El Principio de Bernoulli nos demostraba que al aumentar la velocidad del agua en una tubería, bajaba su presión. También había una [Hoja Excel descargable](#) que nos permitía hacer cálculos rápidamente y ello es lo que se ha hecho en la imagen siguiente. Si, como vemos en gráfico, a 20 °C la presión a la que se evapora el agua es de 2,34 kPa, podría ocurrir que si hacemos circular el agua a una velocidad tan alta como para bajar la presión a este valor, conseguiremos su evaporación. Con los datos que vemos en la tabla, velocidad de entrada de 1 m/s, sin pérdidas de carga y con una velocidad interna de 14,1 m/s, conseguimos una presión de, aproximadamente, 2,4 kPa, lo cual origina la evaporación del agua en forma de microburbujas de vapor de agua que están mezcladas con el agua líquida y que, cuando recuperan su presión normal, "implotan" volviéndose a transformar el vapor en agua. Este es, precisamente, el fenómeno de la cavitación.



Cuando se produce la cavitación, las burbujas de aire se forman continuamente y se colapsan (implosionan) en el líquido. Este efecto genera ruido y puede llegar a dañar la instalación. En un sistema de calefacción, la cavitación se produce con frecuencia en las bombas si la presión del lado de aspiración de la bomba es demasiado baja. Para evitar la cavitación en una bomba, la presión de entrada mínima deberá estar por encima del valor NPSHR de la bomba dado por el fabricante.

Por lo tanto, la pregunta es cómo sabemos el valor de NPSHA de la instalación. Seguramente, podrás deducir la siguiente ecuación que te permite calcularlo:

$$NPSHA = \frac{p_a}{\rho \cdot g} - \Delta h - \Delta p - \frac{p_v}{\rho \cdot g}$$

Debe cumplirse, para que no haya cavitación que **NPSHA > NPSHR** (con una diferencia mínima de 1 m)

Donde:

P_a = presión absoluta en el nivel superficial del líquido de aspiración (Pa)

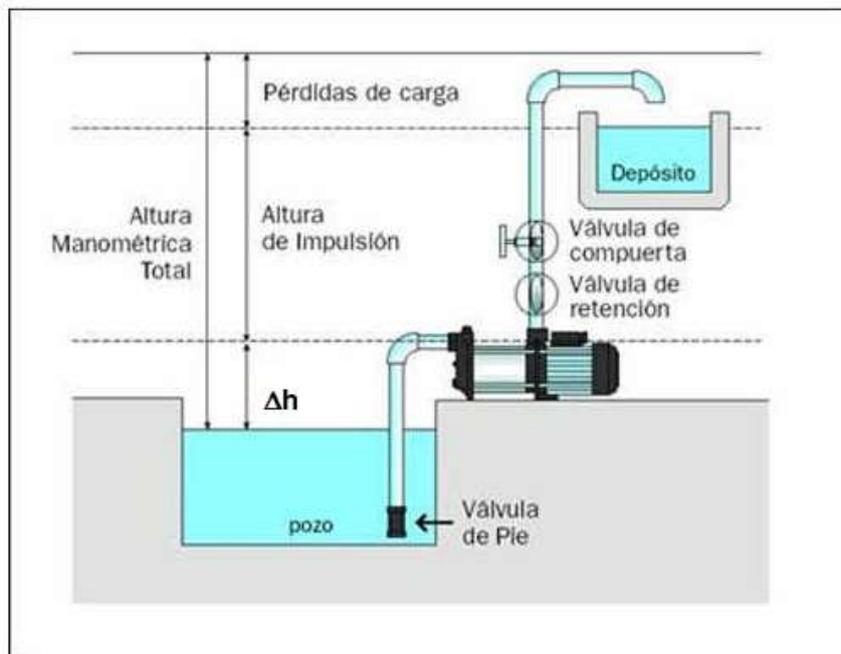
ρ = densidad del líquido en kg/m³

g = constante gravitatoria (9,8 m/s²)

Δh = altura de aspiración. Si la altura está por encima de la bomba, se tomará un valor negativo que, en la fórmula se convierte en positivo (m)

Δp = pérdida de carga en el tramo de la aspiración (m dca)

p_v = presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo (Pa)



Ejercicios resueltos

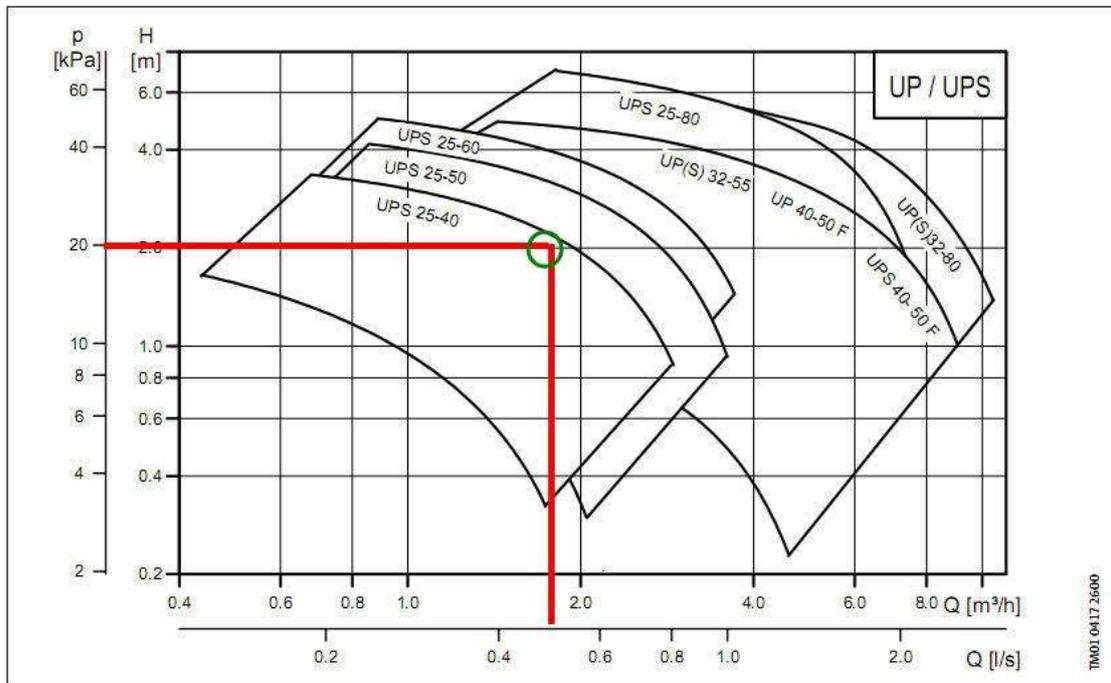
1.- Selecciona la bomba circuladora adecuada para un caudal de 0,5 l/s y una pérdida de carga de 20 kPa. Utiliza para ello las imágenes de catálogo:

Curvas caudal - presión

Características generales

Mostrar retroalimentación

En el primer diagrama se muestran las zonas de funcionamiento de la gama de bombas. Con los datos de caudal y pérdida de carga marcamos el punto de funcionamiento en el diagrama:



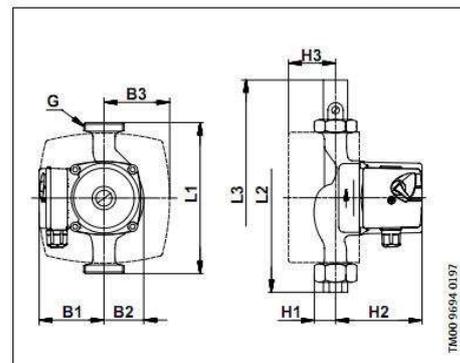
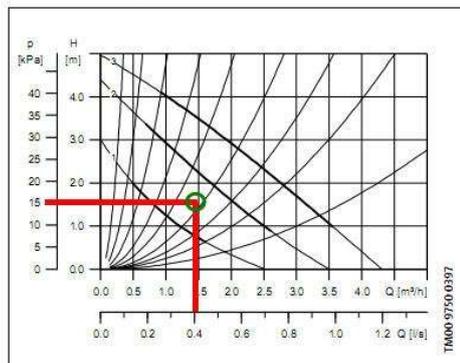
Curvas bombas Grundfos

Como puedes observar el punto de funcionamiento entra dentro de la zona de la UPS 25-40. Por detrás puedes ver que otras bombas también son posibles, por ejemplo la siguiente, la UPS 25-50.

Para asegurarnos de que la bomba seleccionada nos sirve tenemos que ir a su curva característica y volver a marcar el punto de funcionamiento. Como puedes ver, el punto de funcionamiento requerido está situado entre la segunda y la tercera velocidad de la bomba y a media altura de las curvas, por lo que la bomba seleccionada es válida.

UPS 25-50 / UPS 25-50 K

1 x 230 V, 50 Hz



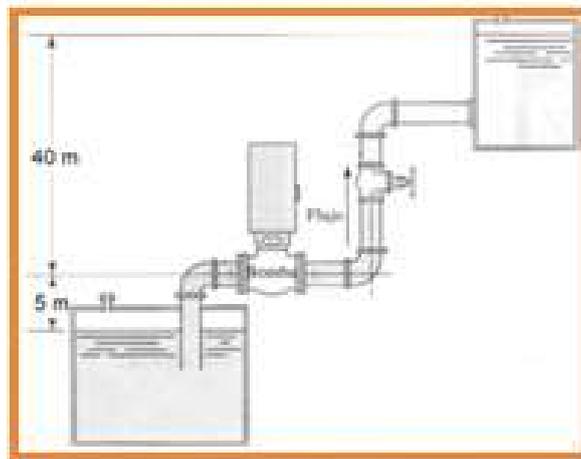
Velocidad	P_1 [W]	I_n [A]
3	80	0,34
2	55	0,24
1	35	0,15

Conexiones: uniones y válvulas de $\frac{3}{4}$ ", 1" ó 1½".
 Presión del sistema: máx. 10 bar.
 Temperatura del líquido: +2°C a +110°C (TF 110).
 Versión para agua fría: K para -25°C a +95°C.

Tipo de bomba	Dimensiones [mm]							Peso [kg]		Volumen [m³]			
	L1	L2	L3	H1	H2	H3	B1	B2	B3		G	Neto	Bruto
UPS 25-50	130	186	240	32	102	57	75	51	77	1½	2,4	2,6	0,004
UPS 25-50 (K)	180	236	290	32	102	57	75	51	77	1½	2,6	2,8	0,004

Curvas bombas Grundfos

2.- Determina si existe cavitación en la bomba del circuito hidráulico siguiente, sabiendo que su NPSHR es de 4 m. El agua está a 30 °C y la presión atmosférica es de 99 970 Pa. El caudal que mueve es de 60 l/s y la pérdida de carga en el tramo de succión es de 1,55 m cda.



Mostrar retroalimentación

En primer lugar, debemos obtener la presión de vapor del agua y su densidad a 30 °C. De las tablas siguientes obtenemos ambos valores:

$T/^{\circ}\text{C}$	P/hPa
0	6.1115
0.01	6.11657
1	6.5709
2	7.0599
3	7.5808
4	8.1355
5	8.7258
6	9.3536
7	10.021
8	10.730
9	11.483
10	12.282
11	13.130
12	14.028
13	14.981
14	15.990
15	17.058
16	18.188
17	19.384
18	20.647
19	21.983
20	23.393
21	24.882
22	26.453
23	28.111
24	29.858
25	31.699
26	33.639
27	35.681
28	37.831
29	40.092
30	42.470
31	44.969
32	47.596
33	50.354
34	53.251
35	56.290

Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Densidad kg/m^3	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Densidad kg/m^3	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Densidad kg/m^3
0 (hielo)	917,00	33	994,76	67	979,34
0	999,82	34	994,43	68	978,78
1	999,89	35	994,08	69	978,21
2	999,94	36	993,73	70	977,63
3	999,98	37	993,37	71	977,05
4	1000,00	38	993,00	72	976,47
5	1000,00	39	992,63	73	975,88
6	999,99	40	992,25	74	975,28
7	999,96	41	991,86	75	974,68
8	999,91	42	991,46	76	974,08
9	999,85	43	991,05	77	973,46
10	999,77	44	990,64	78	972,85
11	999,68	45	990,22	79	972,23
12	999,58	46	989,80	80	971,60
13	999,46	47	989,36	81	970,97
14	999,33	48	988,92	82	970,33
15	999,19	49	988,47	83	969,69
16	999,03	50	988,02	84	969,04
17	998,86	51	987,56	85	968,39
18	998,68	52	987,09	86	967,73
19	998,49	53	986,62	87	967,07
20	998,29	54	986,14	88	966,41
21	998,08	55	985,65	89	965,74
22	997,86	56	985,16	90	965,06
23	997,62	57	984,66	91	964,38
24	997,38	58	984,16	92	963,70
25	997,13	59	983,64	93	963,01
26	996,86	60	983,13	94	962,31
27	996,59	61	982,60	95	961,62
28	996,31	62	982,07	96	960,91
29	996,02	63	981,54	97	960,20
30	995,71	64	981,00	98	959,49
31	995,41	65	980,45	99	958,78
32	995,09	66	979,90	100	958,05

Sustituyendo todos los valores en la fórmula vista, obtenemos:

$$\text{NPSHA} = \frac{p_a}{\rho \cdot g} - \Delta h - \Delta p - \frac{p_v}{\rho \cdot g}$$

$$\text{NPSHA} = \frac{99\,970}{995,71 \cdot 9,8} - 5 - 1,55 - \frac{4\,247}{995,71 \cdot 9,8} = 10,245 - 6,55 - 0,435 = 3,26 \text{ m}$$

Como el valor de NPSHA es menor que el valor NPSHR, **se producirá cavitación.**

Caso práctico

Calcula la pérdida de carga de la siguiente tubería de cobre por la que circulan 5.000 l/h de agua a 40 °C en un recorrido totalmente horizontal.



Vamos a realizar los cálculos utilizando dos métodos diferentes, el método de usar tablas para el cálculo de la pérdida de carga en las tuberías lineales y el uso de la aplicación en red TLV para las pérdidas de carga singulares.

Pérdidas lineales

En primer lugar vamos a calcular las pérdidas lineales. Utilizamos las tablas mostradas sobre características mecánicas de tuberías, en la página 40 encontramos la tabla necesaria. Vemos que para el tramo de DN 42x1, la pérdida de carga para 4 900 l/h es de 300 Pa/m y para 5 129 l/h es de 325 Pa/m. Interpolando entre los dos valores el resultado aproximado es de 310 Pa/m. La velocidad es aproximadamente de 1,1 m/s.

Para los tramos de DN 35x1 en la página siguiente encontramos que la pérdida de carga para 4 320 l/h es de 600 Pa/m y para 5 091 es de 800 Pa/m. Interpolando entre los dos valores el resultado aproximado es de 720 Pa/m. La velocidad es aproximadamente de 1,44 m/s.

El total de las pérdidas lineales es de

$$30 \text{ m} \times 310 \text{ Pa/m} + 30 \text{ m} \times 720 \text{ Pa/m} = 30\,900 \text{ Pa}$$

Se podrían calcular estas mismas pérdidas utilizando las tablas de Pressman y los resultados diferirían poco.

Pérdidas singulares