

Hidráulica II



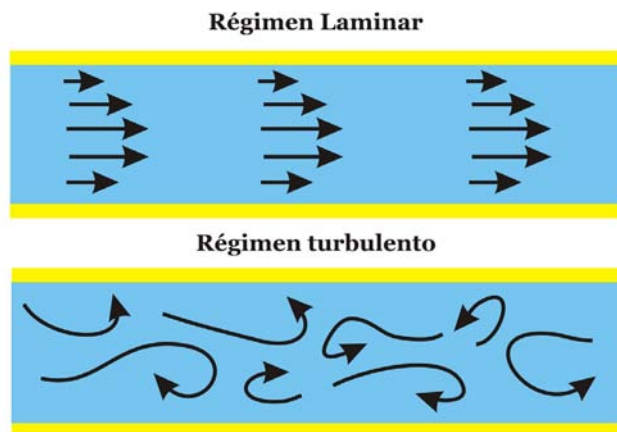
Hidrodinámica.

Introducción

La **hidrodinámica** es la parte de la mecánica de fluidos que se ocupa de las leyes o principios que rigen el comportamiento de los fluidos en movimiento, estas leyes son muy complejas, y aunque la hidrodinámica tiene una importancia práctica, para el trabajo del bombero, mayor que la hidrostática, sólo trataremos aquí los conceptos básicos que nos ayuden a comprender los fenómenos que se producen en una instalación de extinción.

El comportamiento de un fluido se encuentra bien definido, si por medio de una ecuación matemática somos capaces de definir la presión, la velocidad y la densidad que posee el fluido en cada punto. Por medio de una serie de herramientas matemáticas se llega a una expresión muy compleja conocida como **ecuación de Navier-Stokes**. Si esta ecuación se resolviera podríamos saber en cada momento la velocidad, la presión y la densidad en el fluido con tan solo sustituir valores en la solución de esta ecuación. Pero como no tiene solución hay que empezar a realizar simplificaciones en el comportamiento del fluido.

La primera que se puede hacer es que el fluido sea incompresible, es decir que la densidad no varíe a lo largo de su movimiento, esta simplificación es aceptable para el agua a presiones en las que se trabaja en hidráulica y para el aire a velocidad por debajo de la mitad de la velocidad del sonido.



La segunda simplificación es en cuanto a la viscosidad, es decir, que el fluido no posea rozamientos internos o contra las conducciones por la que circula. Si la viscosidad de un fluido se puede despreciar se dice que el flujo es no viscoso y si encima es incompresible, entonces es lo que se conoce como **fluido ideal**, en este caso la ecuación de Navier Stokes, se resuelve y da la conocida ecuación de Bernoulli.

Si consideramos que la viscosidad del fluido no se puede despreciar, estamos ante el denominado **fluido viscoso**. Las consecuencias de considerar la viscosidad en un fluido es que la solución de la ecuación de Navier-Stokes, ya no sea tan sencilla. La aparición de estas fuerzas de rozamiento interno, trae consigo que el fluido que circula por una conducción, dependiendo de la velocidad, de la densidad, la viscosidad y las dimensiones de la tubería lo haga de dos maneras en el denominado **régimen laminar**, en que el fluido circula en capas que se deslizan unas contra otras como los naipes en una baraja o en **régimen turbulento** en el que aparecen remolinos donde es imposible distinguir los filetes fluidos.

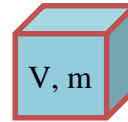
1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA

1.1. Densidad

Cantidad de masa por unidad de volumen. Se expresa con el símbolo ρ (“ro”).

$$\rho = \frac{m}{V}$$

ρ : densidad
 m : masa
 V : volumen



Unidades habituales: kg/m^3 , g/cm^3 , kg/l

La densidad depende de la presión y la temperatura pero, a efectos prácticos, por su muy baja variación en el caso del agua, para nuestro estudio podemos considerarla como constante, con el valor:

$$\rho_{\text{agua}} = 1\text{g/cm}^3 = 1000\text{kg/m}^3 = 1\text{ kg/l}$$

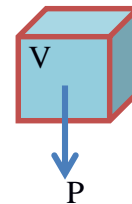
Los fluidos, como el agua en nuestro caso, cuya variación de la densidad por el efecto de la presión es lo suficientemente pequeña como para considerarla despreciable, se denominan **fluidos incompresibles**.

1.2. Peso específico

Peso por unidad de volumen. Se expresa con el símbolo γ (“gamma”). Conocida la densidad ρ , el valor del peso específico se obtiene directamente multiplicando ésta por el valor de la aceleración de la gravedad g ($g = 9,8\text{m/s}^2$ en unidades del Sistema Internacional).

$$\gamma = \frac{P}{V} = \frac{m \cdot g}{V} = \rho \cdot g$$

γ : peso específico
 P : peso
 V : volumen



Unidades habituales: N/m^3 , kgf/m^3 , kgf/l

$$\gamma_{\text{agua}} = 1000\text{kgf/m}^3 = 1\text{ kgf/l}$$

1.3. Viscosidad

Resistencia de un fluido a una fuerza cortante. Para entenderlo podemos imaginar una barca flotando sobre el agua o flotando sobre aceite. En el segundo caso desplazar la barca nos supondría un mayor esfuerzo, y aún más si el aceite se enfría y se convierte en grasa. Podríamos suponer que esta dificultad es debida a una mayor densidad, pero de hecho aceite y grasa son menos densos que el agua, por lo tanto, la explicación viene dada por otra característica física inherente a la naturaleza del fluido: la *viscosidad*, u oposición dentro de un fluido al deslizamiento de unas capas sobre otras.

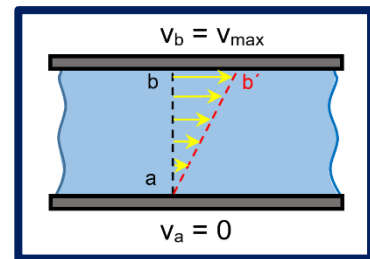
En el caso de líquidos esta resistencia es debida principalmente a las fuerzas de cohesión entre las moléculas.

La viscosidad está muy influida por la temperatura. En general, en el caso de líquidos, la viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura (el líquido se hace “más fluido”). Dos formas de expresarla: viscosidad dinámica, μ , (“mu”), y viscosidad cinemática ν (“nu”), relacionadas mediante la expresión:

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

Unidades (viscosidad dinámica μ): Pa·s, N·s/m², kg/(m·s)

Unidades (viscosidad cinemática ν): m²/s



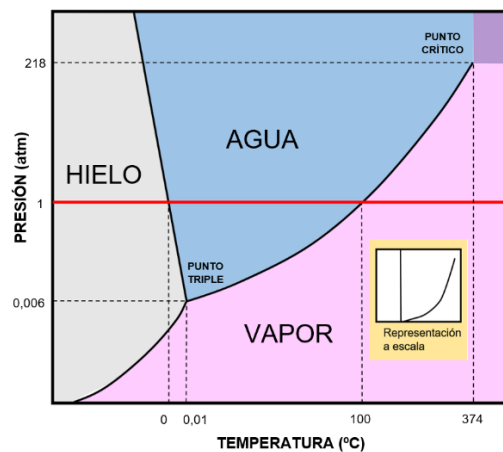
La viscosidad será uno de los parámetros que incidirá en el tipo de régimen de movimiento del fluido: a mayor viscosidad más tendencia al régimen laminar.

1.4. Curva de estado

Es una representación gráfica de la forma o estado de agregación en la que se presentará una sustancia estable en función de su presión y temperatura, considerando normalmente los tres estados más frecuentes en los que se presenta una sustancia en la naturaleza: sólido, líquido y gaseoso.

Las temperaturas en las que se producen los pasos del estado sólido al líquido y del líquido al gaseoso son los puntos de fusión y de ebullición. En el caso del agua, a una presión de una atmósfera, estos puntos son respectivamente de 0°C y 100°C.

El paso del agua líquida a estado vapor usualmente es por un aumento de temperatura (pasar, a presión atmosférica, de una temperatura de por ejemplo 80°C a 120°C) pero también puede darse por un descenso de presión (pasar, por ejemplo, a una temperatura de 60°C, de una presión de 1 atmósfera a una presión de 0,1 atmósferas). Esta forma de pasar a estado gaseoso es la que acontece cuando se produce la **cavitación**.



Curva de estado del agua (Nota: el gráfico no está a escala)

2. CAUDAL Y VELOCIDAD

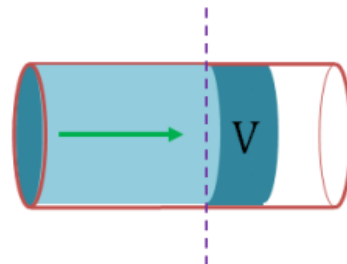
2.3. Caudal

Volumen de fluido que atraviesa una sección de la conducción en la unidad de tiempo.

$$Q = \frac{V}{t}$$

Q: caudal
V: volumen
t: tiempo

Unidades habituales: l/min, m³/h, m³/s



2.4. Velocidad

Espacio o distancia recorrida en la unidad de tiempo.

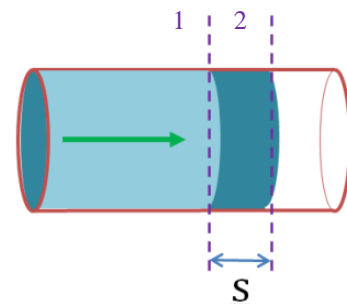
$$v = \frac{s}{t}$$

v: velocidad
s: espacio recorrido entre 1 y 2
t: tiempo en pasar de 1 a 2

Unidades habituales: m/s, km/h

Correspondencia de unidades:

$$1\text{m/s} = 3,6\text{ km/h}$$



En el mundo de la hidráulica la velocidad del fluido (el agua) es uno de los parámetros más determinantes, pues de ella dependerá, y de manera exponencial, la pérdida de carga que se produzca a lo largo de la conducción.

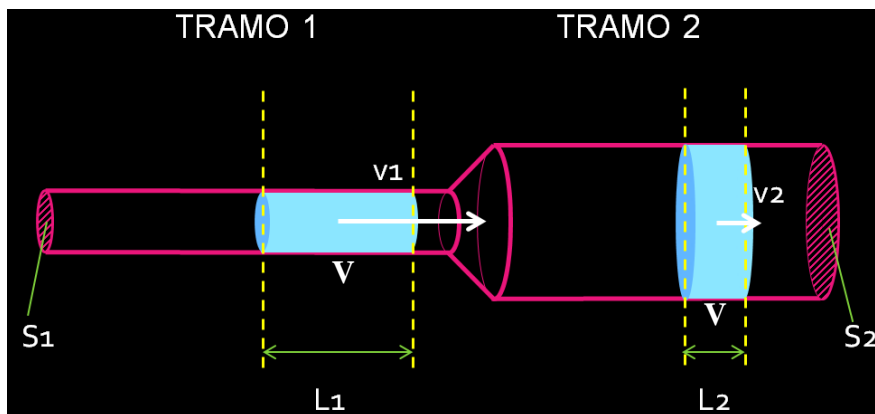
La velocidad, a su vez, dependerá del caudal circulante (directamente proporcional) y de la sección de la conducción (inversamente proporcional).

3. MOVIMIENTO DE FLUIDOS EN CONDUCCIONES FORZADAS

3.1. Ecuación de continuidad

Expresión matemática que relaciona las velocidades y secciones de dos tramos distintos de una misma tubería. En la versión simplificada que vemos se cumple:

- El caudal es constante: no hay aporte ni salida de agua entre los dos tramos considerados
- Tanto la sección de cada tramo como la densidad del fluido se pueden considerar constantes (variación por efecto de la presión despreciable)



Considerando dos tramos de diferente sección de una misma tubería (tramos 1 y 2), y comparando el movimiento de dos volúmenes idénticos por dichos tramos, llamaremos:

- Q , caudal circulante, el mismo a lo largo de toda la conducción
- V , volumen que atraviesa ambas secciones en el tiempo t
- S_1 y S_2 , secciones en 1 y en 2
- v_1 y v_2 , velocidades en 1 y en 2

Al ser la sección 1 más pequeña que la sección 2, el mismo volumen de agua V deberá ser más alargado en el primer caso que en el segundo, y para que pase en el mismo tiempo deberá también circular más deprisa, cumpliéndose:

$$Q = S_1 * v_1 = S_2 * v_2$$

Aplicando esta ecuación a las diferentes secciones de manguera, y comparándolas entre sí, se observa que a igualdad de caudal la velocidad será:

- 7,8 veces mayor en 25mm que en 70mm
- 3,2 veces mayor en 25mm que en 45mm
- 2,4 veces mayor en 45mm que en 70mm

Lo cual tendrá una repercusión decisiva en las pérdidas de carga correspondientes (la pérdida de carga depende del cuadrado de la velocidad).

3.2. Energía del agua en la conducción: ecuación de Bernoulli

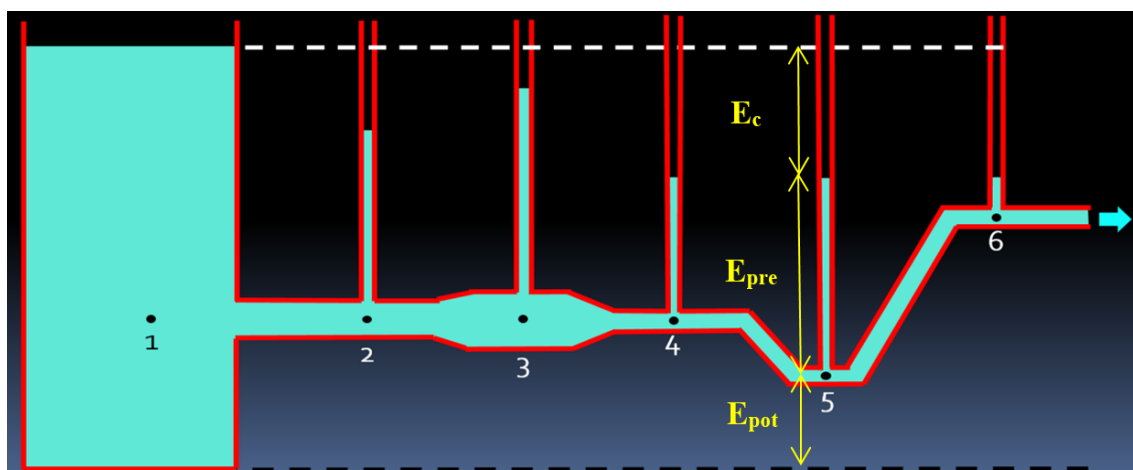
La energía total del agua en la conducción es la suma de la energía de presión, más la energía potencial (altura) más la energía cinética (velocidad):

$$E_{\text{total}} = E_{\text{presión}} + E_{\text{potencial}} + E_{\text{cinética}}$$

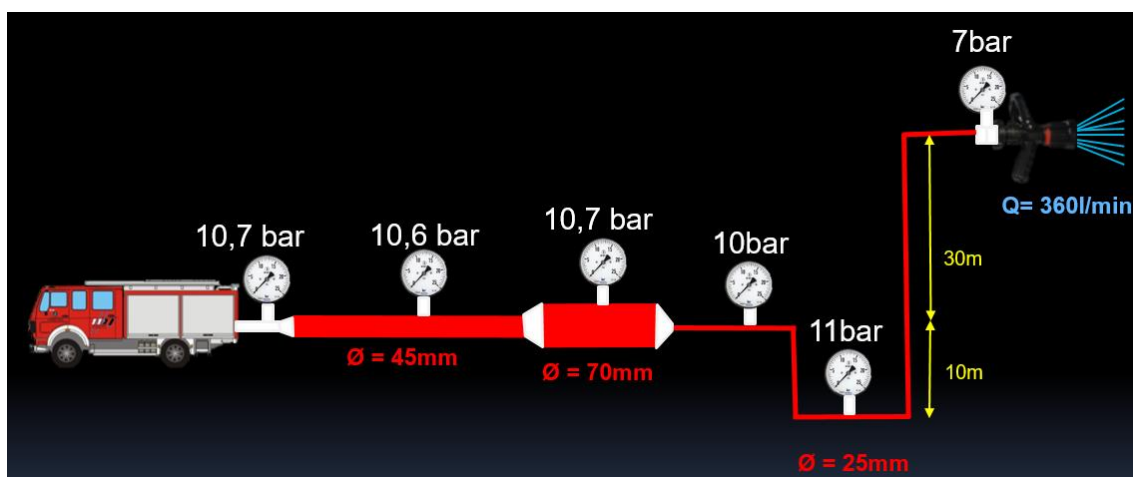
En una conducción sin pérdidas de carga esta suma se mantiene **constante** en toda su longitud, por lo que si alguno de los términos aumenta o disminuye lo hace a expensas de uno de los otros dos (o de ambos).

Estas energías se suelen expresar mediante unidades equivalentes de longitud (metro columna de agua o m.c.a.) o de presión (por ejemplo, en bares, equivaliendo 1bar a 10 m.c.a.).

En la siguiente figura se observa mediante piezómetros (*tubos que permiten determinar la componente de presión hidrostática*) la energía de presión en cada punto, E_{pre} (la altura de cada columna equivale a su presión). La energía potencial, E_{pot} , la marcaría la cota del punto respecto del plano de referencia (en la figura sería la base del depósito), y finalmente la diferencia de cota del nivel de cada piezómetro con el nivel máximo del depósito sería la energía cinética, E_c . Si estas medidas las consideramos en metros, para pasarlas a bares dividiremos por 10.



Esto mismo llevado a un tendido de mangueras, y suponiendo que no existiera la **pérdida de carga**, llevaría a algo como lo representado en la figura siguiente, formado por un tendido por el que circula un caudal de 360l/min y que va cambiando de sección por tramos.



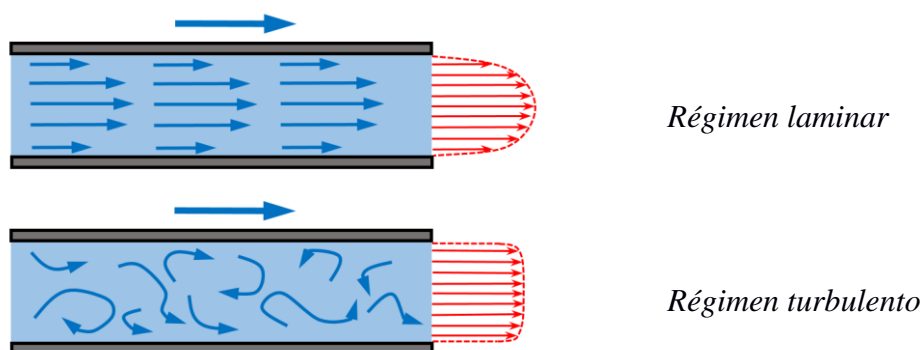
Al pasar de la bomba al tramo de 45mm hay una ligerísima disminución de presión debido a la reducción de sección, lo que supone un aumento de la velocidad y por tanto de la energía cinética. Lo mismo ocurre, pero de manera inversa al pasar de 45mm a 70mm.

El cambio más visible es al pasar de 70mm a 25mm, donde el cambio de sección y por tanto de velocidad es lo suficientemente grande como para advertir un cambio sensible en la energía cinética y por tanto también en la energía de presión. A partir de aquí al mantenerse constante la sección, y por tanto la velocidad y la energía cinética, las variaciones de presión son debidas a los cambios de altura (la presión sube o baja al bajar o subir respectivamente la altura).

En general, salvo que las mangueras transporten un caudal superior al razonable para su sección (es el caso del tramo de 25mm del ejemplo), el término de energía cinética será muy pequeño, por lo que a efectos prácticos aplicados a las instalaciones que montemos los bomberos podremos despreciar esta componente energética a la hora de realizar los cálculos.

4. RÉGIMEN LAMINAR Y TURBULENTO

Según las circunstancias un fluido se puede desplazar dentro de una conducción de forma “ordenada”, con trayectorias idealmente rectas [*régimen o flujo laminar*] o “desordenada”, con turbulencias, trayectorias entrecruzadas y velocidades cambiantes en dirección y módulo (valor) [*régimen o flujo turbulento*].



En el régimen laminar la capa de fluido directamente en contacto con las paredes de la tubería tendría velocidad cero (*capa límite*), y conforme nos alejamos de éstas aumentaría su velocidad, que sería máxima en el centro de la conducción. Un ejemplo de este régimen lo podemos ver en el fluir de la pasta dentífrica a la salida del tubo que la contiene. En el régimen turbulento si bien las velocidades son cambiantes, el comportamiento medio en cuanto a velocidades tiende a ser más similar entre las zonas cercanas a las paredes y las zonas próximas al centro de la conducción. Un ejemplo de este régimen se da en el agua al circular por las mangueras de bomberos.

5. NÚMERO DE REYNOLDS

Número adimensional utilizado en mecánica de fluidos para caracterizar el tipo de movimiento. Físicamente supone el cociente entre los términos relativos a las fuerzas de inercia y las fuerzas de naturaleza viscosa. Cuando las primeras predominen sobre las segundas el régimen tenderá a ser turbulento, en el caso contrario el régimen tenderá a ser laminar.

$$Re = \frac{\rho V \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

Re : número de Reynolds

ρ : densidad

V : velocidad

D : diámetro tubería

μ : viscosidad dinámica

ν : viscosidad cinemática

Con valores del Número de Reynolds del orden de 2000 o inferiores el régimen se considerará laminar, con valores del orden de 4000 o superiores el régimen se considerará turbulento. Por supuesto, cuanto más nos alejemos de esos valores el régimen será “más laminar” (20 es más laminar que 1500) o “más turbulento” (300.000 es más turbulento que 10.000). En el margen entre 2000 y 4000 (según autores pueden ser valores ligeramente distintos) se hallaría el régimen de transición, a caballo entre el régimen laminar y el turbulento.

$$\begin{array}{ll} Re < 2000 & \rightarrow \text{R. Laminar} \\ Re > 4000 & \rightarrow \text{R. Turbulento} \end{array}$$

En el caso de las **instalaciones** que montamos los **bomberos** Re se moverá normalmente en el rango de 40.000 a 600.000, por lo que el **régimen** será **siempre turbulento**.

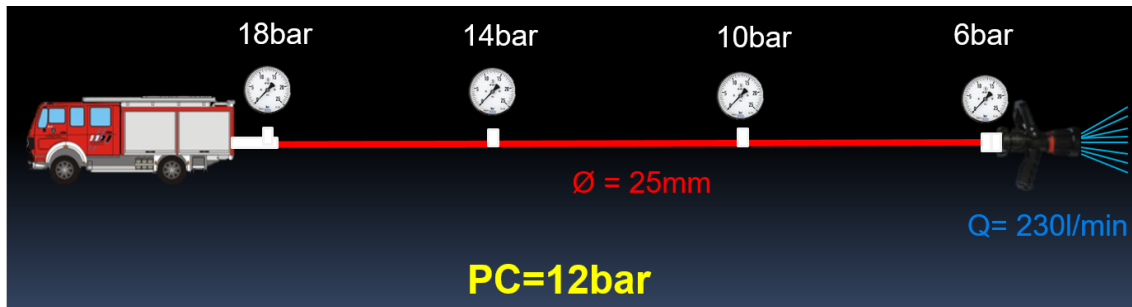
6. PÉRDIDA DE CARGA

En los puntos anteriores hemos supuesto un fluido que se desplaza idealmente sin pérdidas de carga, es decir, que la energía total del fluido no disminuye a lo largo de su avance por la conducción. La realidad sin embargo es que en ese avance sí se da una pérdida de energía o *pérdida de carga*, debida a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la conducción.

La pérdida de carga, que **sólo se da con el fluido en movimiento**, podrá ser de dos tipos:

- **Pérdida de carga lineal.** Es la que se da a lo largo de tramos de sección constante.
- **Pérdida de carga singular (o localizada).** Es la que se da al paso por elementos u obstáculos de la instalación como válvulas, cambios de sección, codos, etc.

Traducido a un tendido lo que observaríamos sería una **disminución de la presión**, conforme se avanza por éste, lo que se podría comprobar intercalando manómetros a lo largo de su recorrido.



6.1. Factores que determinan la pérdida de carga lineal

La pérdida de carga lineal estará determinada por las características del fluido (viscosidad, velocidad, tipo de régimen) y de la conducción (dimensiones, rugosidad).

Resumidamente, dependerá de:

- **La longitud de la conducción** (directamente proporcional)
- **El diámetro de la conducción** (inversamente proporcional a la quinta potencia)
- **La velocidad del fluido** (cuadrado de la velocidad)
- **Viscosidad del fluido**
- **Rugosidad** del material de la conducción

En nuestro caso las variables serán por un lado la longitud y sección del tendido, y por otro el caudal (y con ello la velocidad del agua). Según como sea esta combinación tanto mayor o menor será la pérdida de carga, determinando con ello la instalación a montar y los requerimientos de presión en bomba.

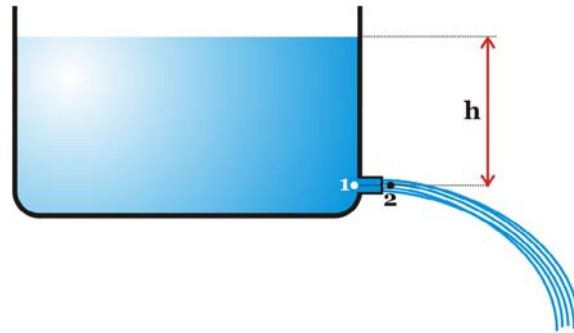
6.2. Pérdida de carga total

Considerando las pérdidas de carga lineal y singular, la pérdida de carga total aumentará al:

- **Aumentar** la longitud del tendido
- **Aumentar** el caudal
- **Aumentar** el número de elementos singulares (reducciones, estrechamientos, codos, etc.)
- **Disminuir** la sección

Ecuación de descarga.

Sea un depósito de agua con un orificio inferior por el que se esta vaciando:



La velocidad con la que sale el líquido es igual:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Donde:

v: velocidad.

g: aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$).

h: altura.

A esta expresión se conoce como la **ecuación de Torricelli**¹⁶ y se puede deducir aplicando Bernoulli entre los puntos 1 y 2, antes y después del orificio. La velocidad en 1 se puede considerar nula, ya que consideramos que h es lo suficientemente grande y la presión en 2 es la atmosférica por lo tanto la presión manométrica, será nula, así:

$$\frac{P_1}{\gamma} + 0 = 0 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \Rightarrow h = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \Rightarrow v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Por lo tanto el caudal que sale por el orificio será:

$$Q = K \cdot S \cdot v$$

Q: Caudal.

S: Sección del orificio.

K: es un factor que tiene en cuenta la astringencia¹⁷ que sufre el fluido en su salida.

v: velocidad de descarga.

Aplicado el valor de v, queda:

$$Q = K \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = K \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{P}{\rho \cdot g}} = (K \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}}) \cdot S \cdot \sqrt{P} \approx k \cdot S \cdot \sqrt{P}$$

Por lo tanto el caudal es proporcional a la sección de salida (S) y a la raíz cuadrada de la presión (P) antes de la salida del orificio. A esta expresión se le conoce como **ecuación de descarga**.

¹⁶ Fue deducida por primera vez por el matemático y físico italiano Evangelista Torricelli (1608-1647).

¹⁷ Se considera que el flujo se estrecha al pasar por el orificio de salida y por tanto no cubre toda la sección.

8. BOMBAS CENTRÍFUGAS

Son las más indicadas en los sistemas de extinción de incendios, que requieren caudales moderados y altas presiones.

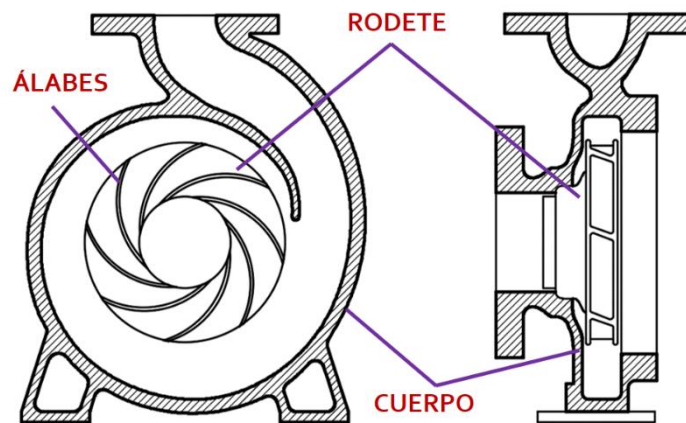
8.1. Componentes principales

Rodete o impulsor

- Es el elemento que gira. Absorbe el agua, cambia su dirección y aumenta su velocidad
- Formada por dos discos paralelos con canales formados por los álabes

Carcasa o cuerpo

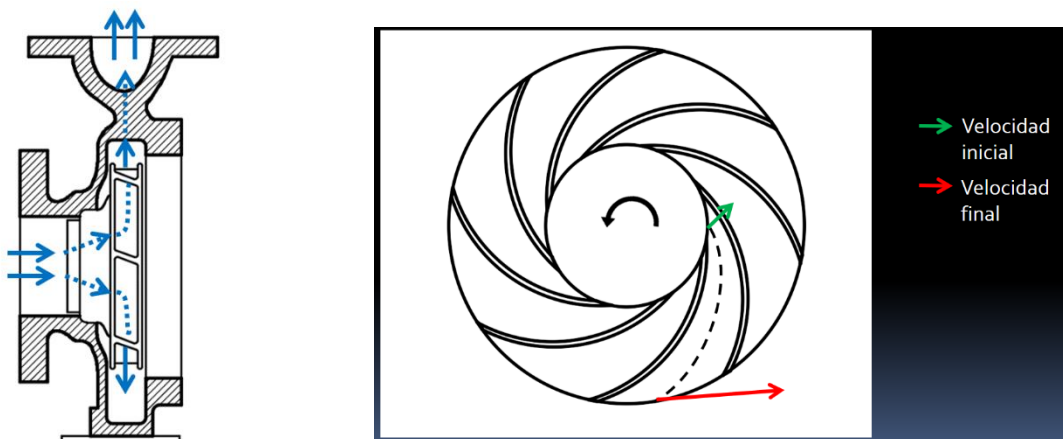
- Es la cámara que contiene el resto de elementos
- Normalmente en forma de *voluta o caracol*
- Puede incluir *difusores fijos* para reconducir el agua a la salida del rodete, frecuentes sobre todo en bombas de muy altas prestaciones



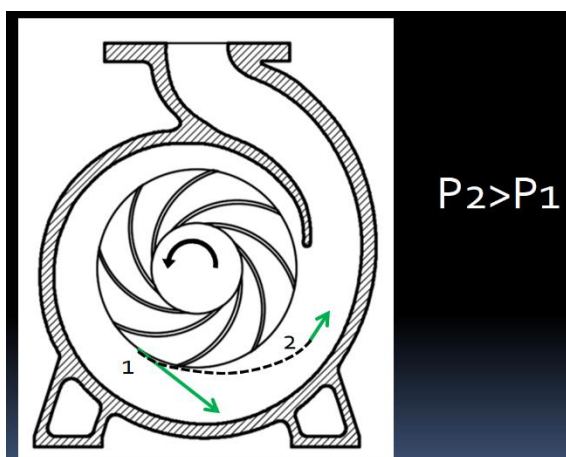
8.2. Principio de funcionamiento de la bomba centrífuga

El agua es absorbida por la aspiración, paralelamente al eje de la bomba, incide sobre el disco posterior del rodete y cambia de dirección (90°).

Como el rodete gira, el agua se ve forzada a girar con él, aumentando su velocidad y por tanto su **energía cinética**, y con ello, su **energía total**.

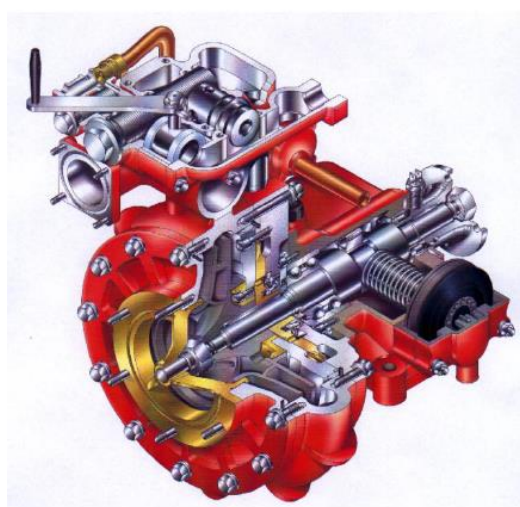


Posteriormente, al salir del rodete y pasar a circular por la voluta, el agua reduce su velocidad, transformándose ese incremento de energía cinética en **energía de presión**.



9. PRESTACIONES DE LA BOMBA. CURVA CARACTERÍSTICA

A la hora de adquirir una bomba los fabricantes dan una serie de información con la que el usuario puede conocer las prestaciones que tendrá la bomba al funcionar. La primera información normalmente es un resumen de caudales y presiones máximas, altura de aspiración, régimen de giro, sistemas de seguridad, etc.



BOMBA GODIVA P2A -3010 PRESTACIONES:

Capacidad de Aspiración (Altura)	Hasta 7,5m
Tiempo de Cebado (EN1028) de 7,5 m	<32 s
Velocidad de Cebado/Aspiración	2000...2200 rpm
Velocidad Máxima Recomendada	3600 rpm
Velocidad Mínima (ralenti)	sobre 900 rpm
Presión Máxima en Baja Presión	17 bar
Presión Máxima en Alta Presión	55 bar
Caudal Máximo en Baja Presión	4200 l/min
Caudal Máximo en Alta Presión	750 l/min
Válvula de Sobrepresión a la entrada	8,5 bar
Válvula Térmica de seguridad	74°C

Esta información nos da una idea aproximada de la capacidad máxima de la bomba, pero no permite saber cuál será la combinación de caudal y presión en cada momento, para ello necesitaremos más información y presentada de otro modo: *la curva característica*.

La curva característica es una representación de las prestaciones de la bomba sobre una gráfica presión-caudal: para cada caudal que suministra la bomba nos indica la presión (energía por unidad de volumen) del agua a la salida de la bomba. Para cada régimen de giro de la bomba habrá una curva característica.

Vemos todo esto con un ejemplo: tenemos una bomba genérica que hacemos girar a, por ejemplo, 2000rpm. A la salida de la bomba existirá un manómetro que nos indicará la presión del agua, así como las válvulas correspondientes para darle salida.

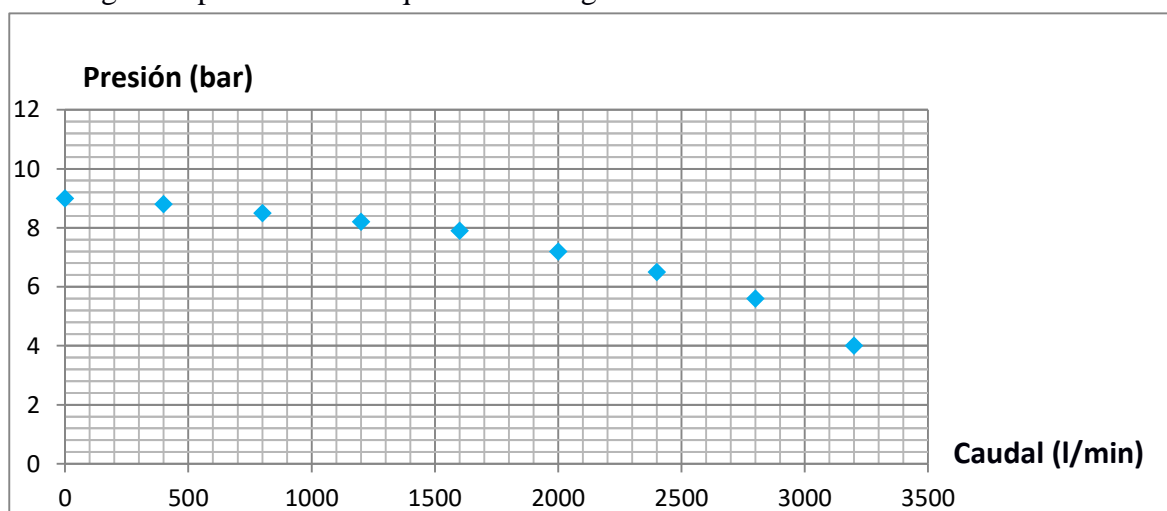
Partiremos de una situación en la que todas las válvulas están cerradas, lo que supone que el caudal circulante será cero. En esa situación hacemos la lectura del manómetro y observamos una lectura de, por ejemplo, 9bar. Si ahora, y sin cambiar el régimen de giro, comenzamos a abrir válvulas, comenzará a circular agua, es decir **comenzará a haber caudal**. Vamos abriendo poco a poco hasta que el caudal sea de, por ejemplo, 400 l/min. Si en esta nueva situación hacemos la lectura de presión ya no habrá 9bar, habrá disminuido ligeramente a, por ejemplo, 8,8bar.

Si seguimos abriendo las válvulas seguirá aumentando el caudal; si en este caso lo llevamos hasta, por ejemplo, 800 l/min al hacer la lectura de presión observaremos que nuevamente habrá vuelto a bajar, hasta, por ejemplo, 8,5bar.

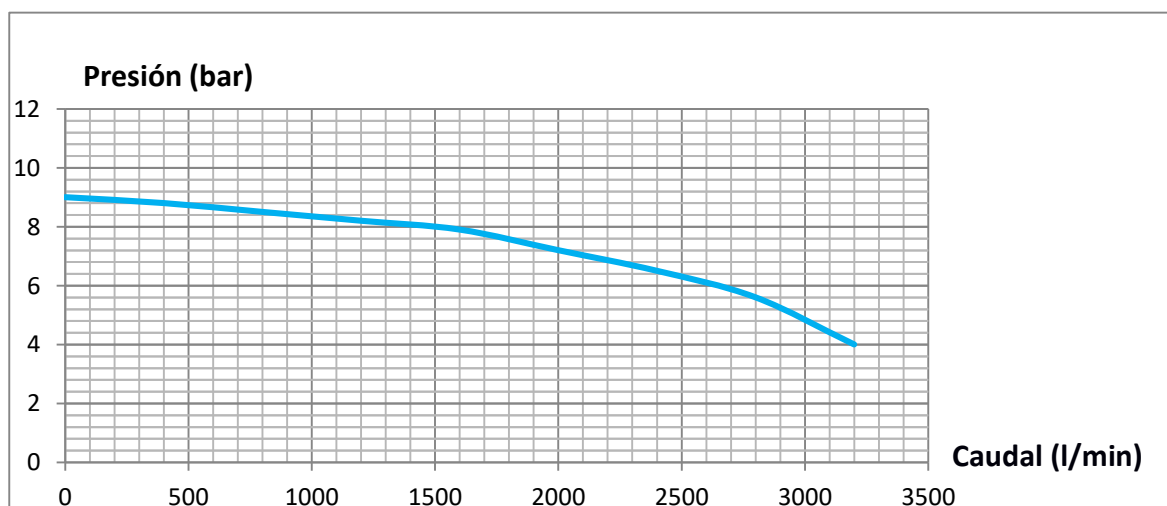
Si hacemos esto sucesivamente, en incrementos de 400 l/min cada vez, y vamos anotando las distintas lecturas de caudal y presión, obtendríamos finalmente una serie como la de la tabla de la derecha.

Caudal (l/min)	Presión (bar)
0	9
400	8,8
800	8,5
1200	8,2
1600	7,9
2000	7,2
2400	6,5
2800	5,6
3200	4,0

Otra bomba con otras dimensiones o diseño habría dado otras presiones para los distintos caudales, pero en todo caso se cumpliría que el aumento de caudal supone también una disminución paulatina de la presión. Si ahora representamos estos valores en una gráfica presión-caudal quedaría del siguiente modo:



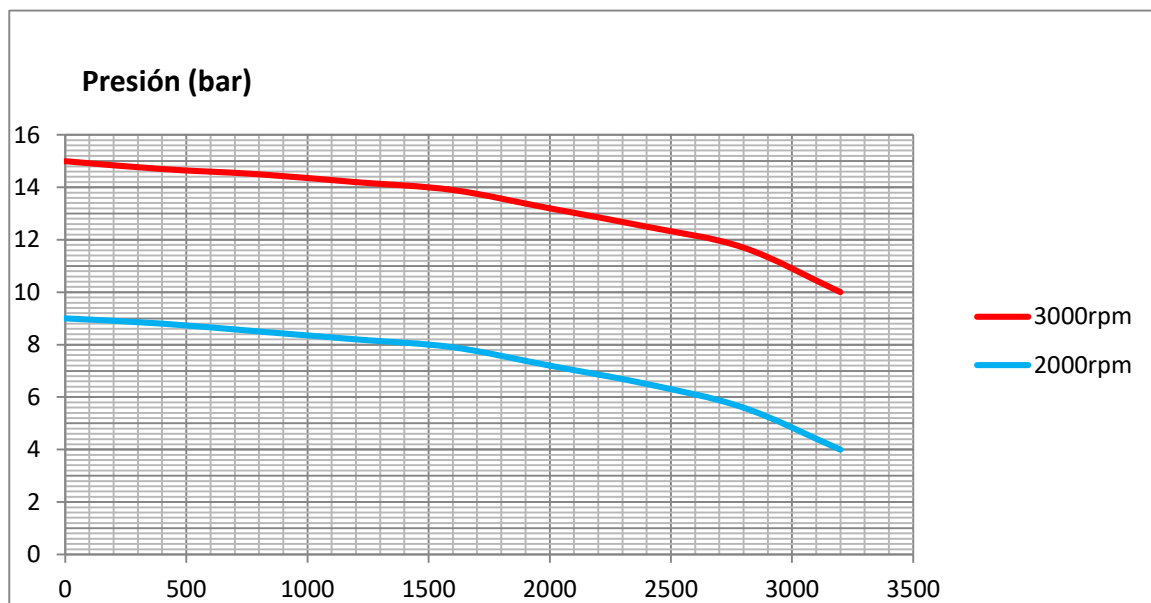
Vemos que la sucesión de puntos describe una curva descendente a medida que aumenta el caudal. Esto mismo pero hecho para todos los valores de caudal nos da una curva continua, como la de la figura, que es **la curva característica de esa bomba a ese régimen de giro**:



Si esto mismo lo repitiéramos a mayor régimen de giro, por ejemplo, a 3000rpm, obtendríamos una nueva serie de datos, como los de la tabla de la derecha, en este caso con mayores presiones a igualdad de caudales respecto al anterior caso.

Caudal (l/min)	Presión (bar)
0	15
400	14,7
800	14,5
1200	14,2
1600	13,9
2000	13,2
2400	12,5
2800	11,7
3200	10

Si ahora representamos en la gráfica estos datos obtendremos una nueva curva, por encima de la anterior. Dibujando las dos curvas en el mismo gráfico quedará:



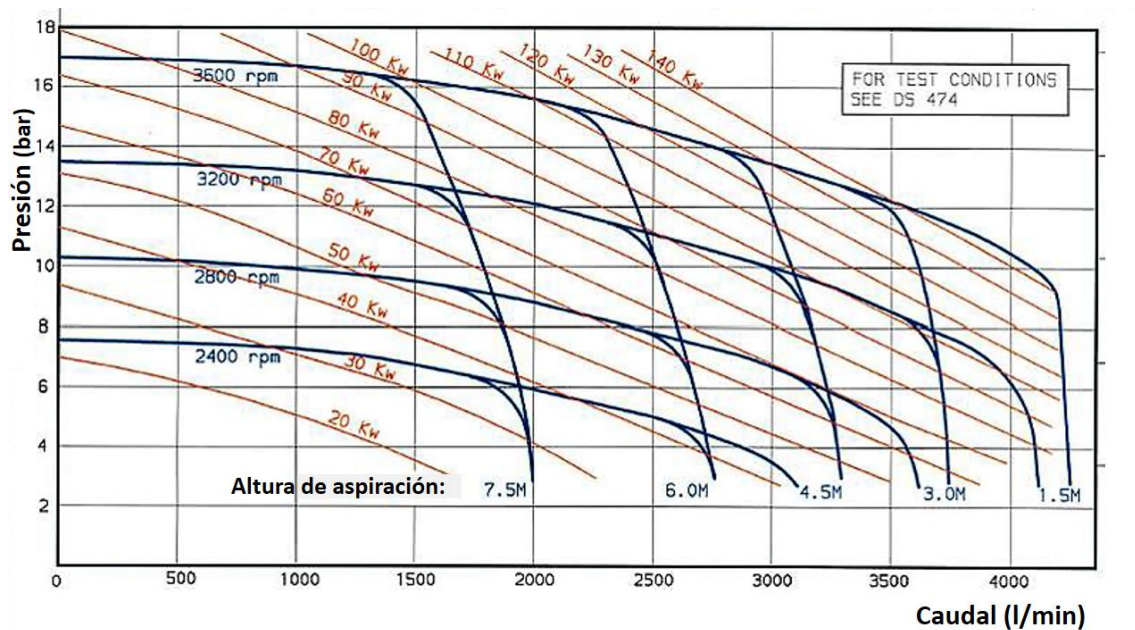
Si trazáramos la curva a 1000rpm quedaría por debajo de la de 2000rpm y así sucesivamente. Lo normal será que el fabricante nos facilite las curvas de regímenes de giro lo suficientemente representativos como para que podamos hacernos una idea del total de posibilidades de la bomba.

Algunas gráficas incluirán, a parte de esta información, las curvas de limitación de funcionamiento en caso de aspirar con la bomba. Estas curvas se representan mediante ramas descendentes de elevada pendiente, cada una para una altura de aspiración específica, y nos informan de que en caso de estar aspirando si se sobrepasa el caudal que marca la rama (es decir si nos ubicamos a la derecha en la gráfica), se producirá cavitación por estar demandando al sistema de aspiración, válvula de pie más mangotes, un caudal superior al que pueden aportar. Obviamente cuanto mayor sea la altura de aspiración, mayor será la limitación de caudal a aspirar.

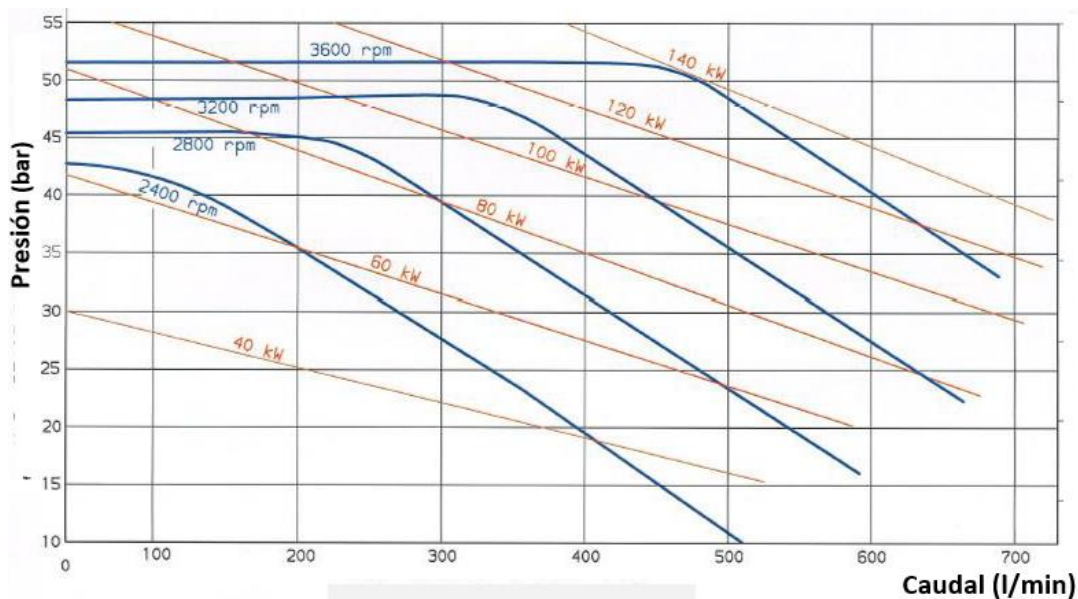
Esta información es particularmente relevante en el caso de bombas forestales, con las que a priori es más probable que usemos la técnica de aspiración.

Además de esta información las gráficas que nos da el fabricante pueden incluir las curvas de potencia, rendimiento, etc., aunque es una información menos relevante dentro del ámbito de bomberos.

A modo de ejemplo, las gráficas siguientes corresponden, respectivamente, a las curvas en baja presión (“presión normal”, conforme a la terminología sobre bombas contra incendios de la Norma UNE-EN 1028) y alta presión de una bomba real presente en nuestro servicio, la GODIVA P2A-3010:



Bomba GODIVA P2A-3010. Curvas características en baja presión (presión normal). Aparecen representadas las curvas correspondientes a los regímenes de giro de 3600, 3200, 2800 y 2400 rpm. También se representan las limitaciones aspirando a 7,5m, 6m, 3m y 1,5m, empleando los correspondientes mangotes y válvula de pie

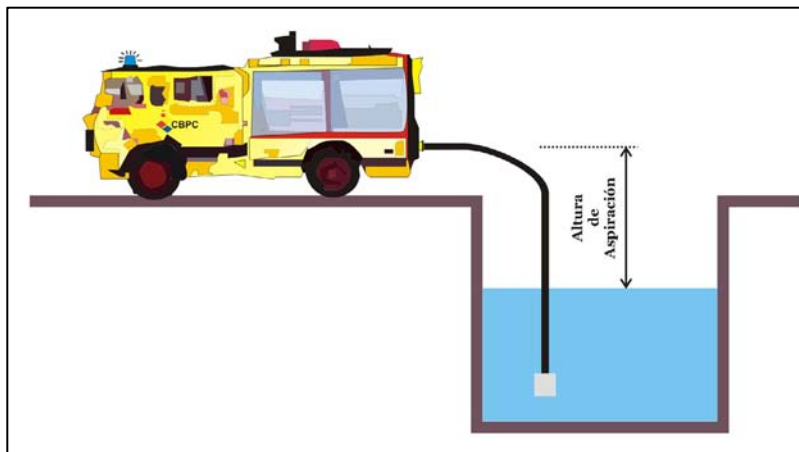
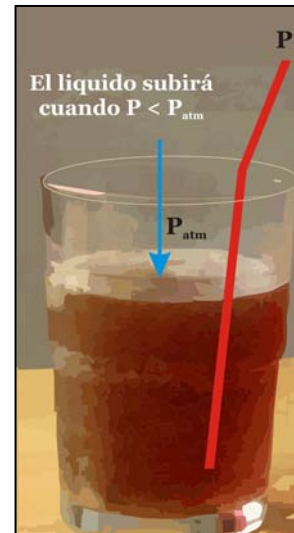


Bomba GODIVA P2A-3010. Curvas características en alta presión. Aparecen representadas las curvas correspondientes a los regímenes de giro de 3600, 3200, 2800 y 2400 rpm

Altura de aspiración.

Cuando una bomba aspira del depósito del vehículo, el agua entra por gravedad en la bomba con una presión manométrica positiva, pero si la alimentación se tiene que realizar desde un pozo o balsa que se encuentran en una cota inferior a la situación de la bomba. Para que se produzca la entrada de agua, la presión en el colector de aspiración debe ser menor que la atmosférica, así el agua subirá por el mangote, como sube un refresco al chupar por una cañita.

Dado que a una atmósfera le corresponde una altura de presión que ronda los 10 m., esta sería la altura teórica máxima que podríamos aspirar, pero en la práctica debido a los factores que señalaremos a continuación, este límite se reduce a una altura comprendida entre 7 y 6 m.



En efecto, la altura de aspiración de una bomba depende de:

- La presión atmosférica ya que la misma disminuye con la altitud respecto al nivel del mar desde donde

estemos aspirando. Se estima una pérdida de unos 0,13 m. por cada 100 m. de altitud.

- El aumento de la temperatura del fluido hace disminuir la altura de aspiración, ya que al aumentar la presión de vapor del mismo, se produce una mayor evaporación de fluido y consecuentemente, se produce un aumento de presión en el colector de aspiración²².
- Las pérdidas de carga en el mangote hacen que al aumentar el caudal o al disminuir su sección, se reduzca la altura de aspiración.

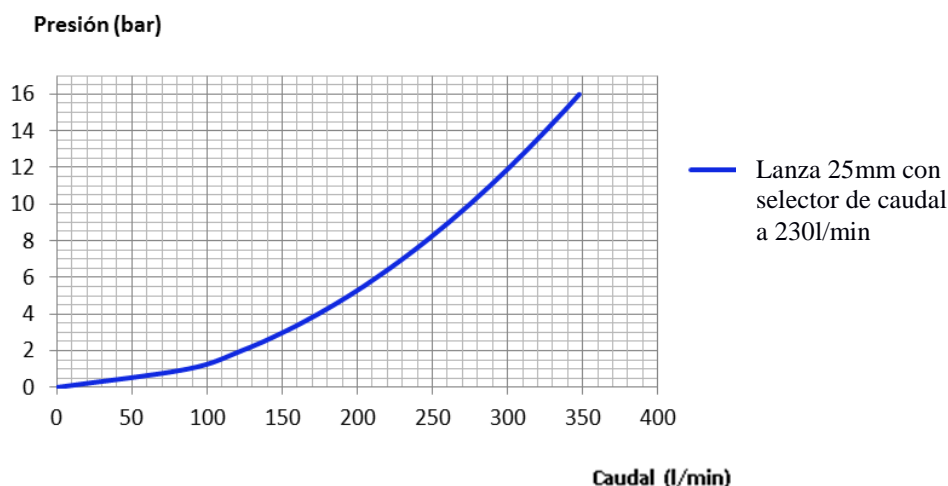
Además en la toma de aspiración de una bomba, se puede producir un fenómeno no deseable, para su correcto funcionamiento, denominado **cavitación**. Esta consiste en la evaporación del fluido circulante por la bomba a temperaturas muy inferiores a la de ebullición del mismo como consecuencia del descenso de la presión en el líquido, ya que si desciende a la presión de vapor a esa temperatura, entrará en ebullición. La cavitación puede generar averías mecánicas en la bomba, hacer que descienda el caudal en la misma y propicie la corrosión de los materiales. Para evitar este fenómeno, hay que dimensionar bien la altura de aspiración.

²² Experimentalmente se comprueba que para una temperatura del agua comprendida entre 15 y 20 °C supone una pérdida de altura de 0,20 m. El agua a 10 °C implica una pérdida de 0,125 m y a 50 °C de 1,25 m.

10. CURVA CARACTERÍSTICA DE LA INSTALACIÓN

Representación gráfica de los requerimientos de la instalación, que se representa en una gráfica presión-caudal. Para cada caudal que circula por la instalación, nos indica la presión (energía por unidad de volumen) necesaria en su **acometida** para conseguir dicho caudal. Habrá una curva para cada instalación en función del tendido (longitud, sección, etc.), la altura a salvar y las circunstancias de la lanza.

En la imagen inferior vemos la instalación más sencilla posible, una lanza conectada directamente a la bomba:

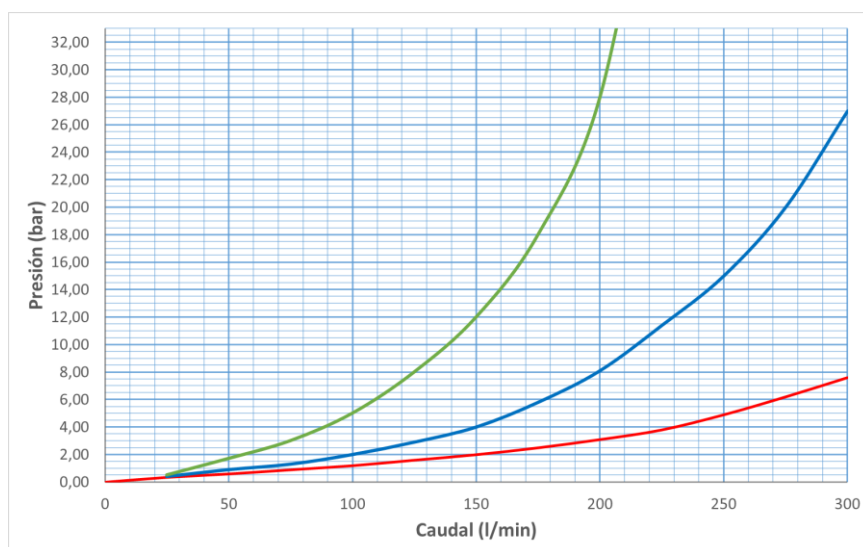


En este ejemplo la lanza tiene el selector de caudal a 230l/min, que sería el caudal que saldría si la presión a la entrada de la lanza fuera la Presión de Referencia (en este modelo de lanza $PR = 7\text{bar}$). Con otras presiones los caudales serían otros, por ejemplo, a 1bar saldrían unos 100l/min, y a 12bar unos 300l/min.

Respecto a la forma de la curva, su pendiente indicará el nivel de exigencia energética de la instalación:

- Curvas con **pendiente muy pronunciada**: instalación con **gran requerimiento energético** (“peores”). Necesitan más presión para obtener el mismo caudal
- Curvas con **pendiente poco pronunciada**: instalación con **poco requerimiento energético** (“mejores”). Necesitan menos presión para obtener el mismo caudal

En el ejemplo siguiente se representan 3 instalaciones diferentes, siendo la curva verde la correspondiente a la instalación con más demanda energética.



En general todas las curvas comienzan con una pendiente suave, hasta alcanzar un rango en que la presión crece cada vez más rápidamente, por lo que la pendiente es cada vez más acusada. Esto se debe a que la **pérdida de carga crece de manera exponencial respecto del caudal que debe circular por ella**.

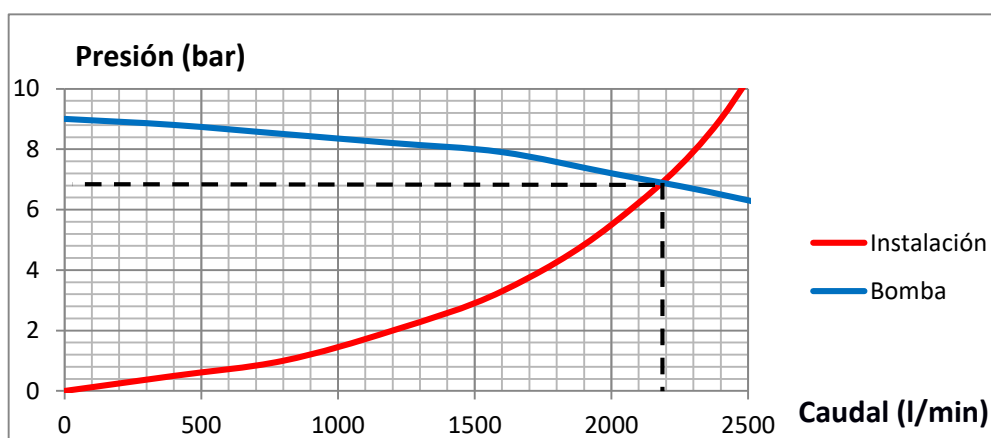
Si estamos trabajando a un caudal que implica estar situados en un punto de pendiente muy acusada valoraremos trabajar con un tendido de mayor sección (o repartir el caudal entre dos tendidos), para disminuir la exigencia energética y someter tanto a bomba como a tendido a un menor esfuerzo.

11. PUNTO DE FUNCIONAMIENTO

Es la combinación de caudal y presión resultantes de la interacción de una instalación (en nuestro caso formada por tendido y lanza) con una bomba funcionando a un régimen concreto y que alimenta a dicha instalación.

El caudal y presión a la salida de la bomba (lo que se aporta) coincidirán con el caudal y presión necesarios a la entrada de la instalación (lo que se demanda).

Este punto se obtiene representando en la misma gráfica las curvas características de bomba y de instalación, siendo el punto de corte de ambas curvas el **punto de funcionamiento**. En el caso representado en la imagen el caudal sería de 2200l/min, y la presión en bomba, que es la misma que a la entrada de la instalación, 6,8bar.

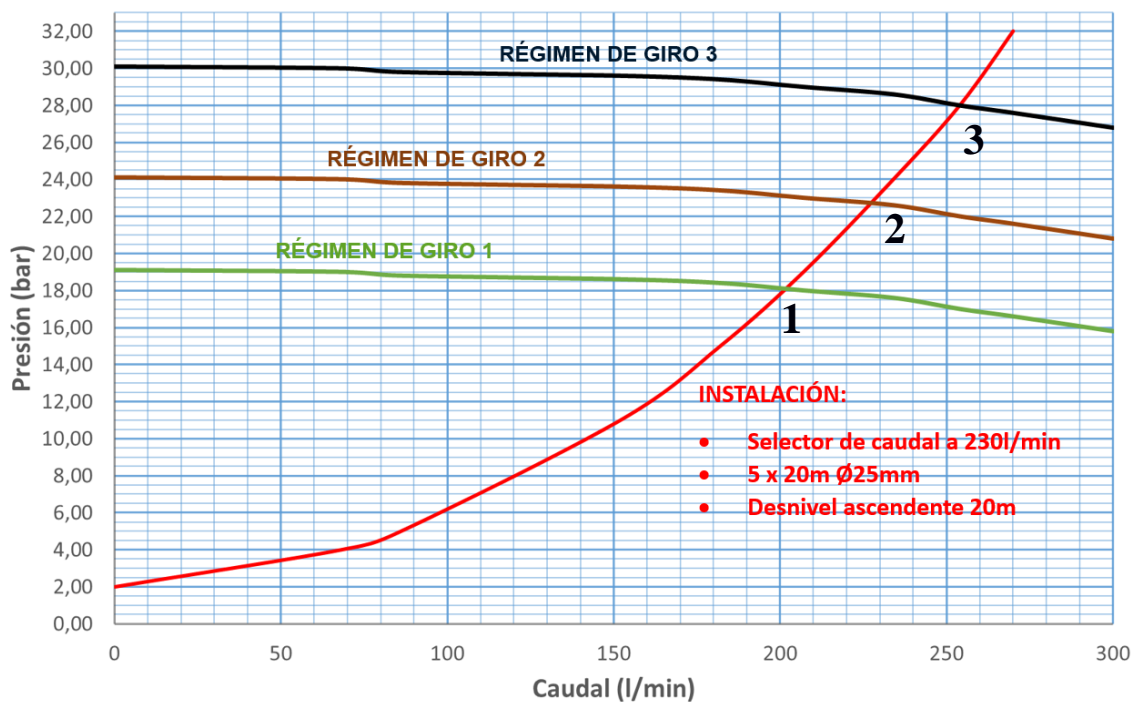


Cuando queremos lanzar un caudal determinado por una instalación de lanza + tendido, necesitamos una **presión a la entrada del tendido** ajustada para vencer la suma de presión en lanza (la presión de referencia, PR, normalmente 6 o 7bar), la altura geométrica a vencer, y las pérdidas de carga del tendido (lineales y singulares). Si conectamos bomba y no sale el caudal esperado es porque para ese régimen de bomba la presión es insuficiente y con ello la capacidad de aportar el caudal demandado: el punto de funcionamiento está por debajo de nuestra demanda. Cuando aceleramos la bomba para solucionarlo lo que hacemos es dar un salto a un régimen de giro más elevado cuya curva característica está por encima de la anterior, y el nuevo punto de funcionamiento resultante será el que buscamos.

Vemos esto con un ejemplo:

Queremos impulsar un caudal de 230l/min. El tendido consiste en 5 tramos de 20m con manguera de 25mm de diámetro, y hay un desnivel positivo (ascendente) a salvar de 20m. Como la presión necesaria es elevada trabajaremos con la bomba en alta presión. La curva característica de esta instalación es la representada en color rojo, arrancando a 2bar, que es la presión mínima para salvar los 20m de desnivel.

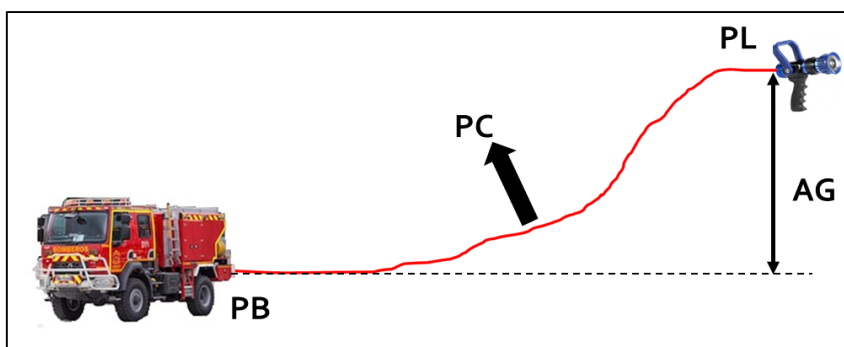
Conectamos la bomba y la ponemos al régimen de giro 1 (curva verde). El punto de funcionamiento será el punto **1**, con una presión a la salida de bomba (o a la entrada de la instalación) de unos 18bar, y 200l/min. Este caudal es inferior al que queremos, por lo que aceleramos la bomba al régimen de giro 2 (curva marrón). En el nuevo punto de funcionamiento, punto **2**, alcanzaremos una presión de 22,4bar a la salida de la bomba (o a la entrada de la instalación) y el caudal buscado de 230l/min. En el caso de haber acelerado al régimen de giro 3 (curva negra) el punto de funcionamiento sería el **3**, alcanzando una presión de unos 28bar a la salida de la bomba (o a la entrada de la instalación) y un caudal de 255l/min, superior al buscado de 230l/min.



12. NECESIDADES DE PRESIÓN. ECUACIÓN DE LÍNEA

Cuando estemos trabajando con un tendido de extinción la presión en bomba será la necesaria para tener en punta de lanza la presión recomendada por el fabricante (presión de referencia, PR) más la necesaria para vencer las pérdidas de carga por rozamiento y las variaciones de cota (éstas pueden ser positivas o negativas).

A estos términos sumaríamos la componente energía cinética, pero como hemos visto tendrá un valor tan pequeño que lo podemos despreciar. Así pues, si sumamos todo lo anterior nos queda:



- **PB** = PRESIÓN EN BOMBA
- **PL** = PRESIÓN EN LANZA (presión de referencia, usualmente 6bar)
- **AG** = ALTURA GEOMETRICA (positiva si la punta de lanza está en una cota superior a la bomba, y viceversa)
- **PC** = PERDIDAS DE CARGA (función de la longitud, sección y caudal)

A esta expresión la llamaremos “Ecuación de Línea”, y es un método simplificado muy sencillo para evaluar la presión que nos deberá marcar la bomba para obtener en lanza la presión de referencia y el caudal buscado, sin necesidad de conocer las curvas características de bomba e instalación. La información que debemos manejar será:

- Presión de referencia de la lanza. Usualmente 6 o 7bar
- Caudal deseado. La lanza deberá tener seleccionado dicho caudal
- Desnivel a salvar. Positivo si es ascendente y negativo si es descendente
- Número de tramos y sección de las mangueras que forman el tendido
- Tabla de pérdidas de carga en función del caudal y el diámetro de la manguera

DIÁMETRO	CAUDAL													
	100	150	230	360	475	550	750	950	1400	1900	2500	3000	3500	3800
	PÉRDIDA DE CARGA													
25	0,5	1,5	3,8	8,2	9,5	12	*	*	*	*	*	*	*	*
45	0,1	0,2	0,3	0,7	1,1	1,2	2,3	3,3	6,6	*	*	*	*	*
70	*	*	*	*	*	*	0,1	0,1	0,2	0,5	0,9	1,3	1,9	2,3

Tabla de pérdida de carga (bar) para tramos de 20m. Los valores son orientativos, teniendo ligeras variaciones en función del modelo específico, estado de la manguera, existencia de bucles, etc.

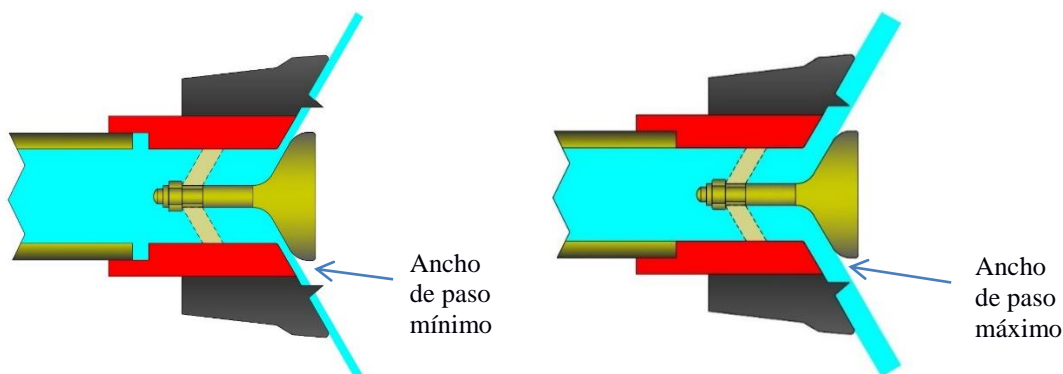
Nota: la ecuación de línea no considera las pérdidas de carga singulares. Si el tendido es muy sinuoso y/o incluye numerosos elementos intermedios (bifurcaciones, reducciones, etc.) deberemos ampliar el resultado del cálculo en 1-2bar, o más, según el caso.

FUNCIONAMIENTO DE LA LANZA

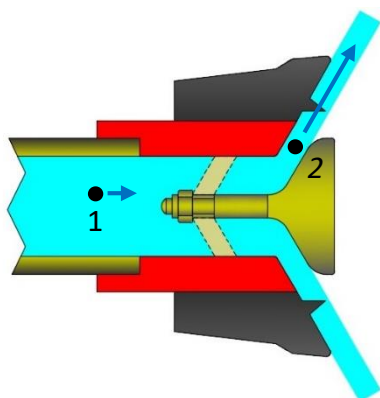
La lanza tiene por objeto proyectar el agua con el alcance, caudal, tipo de chorro y tamaño de gota óptimos. Para conseguir todos estos propósitos el agua va pasando sucesivamente por los diferentes elementos o mecanismos de la lanza construidos a tal efecto. En esta explicación vamos a describir el esquema genérico de una lanza PN16, Tipo 3 (Norma UNE-EN 15182), la más frecuente en los Servicios de Extinción.

EN 15182-2	MIXTAS PN16 -Qmax 1000l/min -PR= 6bar -forma de chorro variable	Tipo 1: Forma de chorro variable a caudal variable (el caudal <i>cambia</i> con el tipo de chorro)	
		Tipo 2: Forma de chorro variable a caudal constante (el caudal <i>no</i> cambia con el tipo de chorro)	
		Tipo 3: Forma de chorro variable a caudal constante seleccionable (el caudal <i>no</i> cambia con el tipo de chorro)	
		Tipo 4	4.1 Forma de chorro variable a presión constante 4.2 Forma de chorro variable y caudal seleccionable a presión constante
EN 15182-3	CHORRO PLENO Y/O DIFUSOR EN ÁNGULO FIJO		
EN 15182-4	ALTA PRESIÓN PN40		

El primer mecanismo será una *válvula de corte*, normalmente de tipo bola, accionada por una palanca situada en la parte superior de la lanza. El siguiente mecanismo será el *selector de caudal*. La forma de actuar del selector es aumentando o disminuyendo la sección de salida del agua, que es en forma de anillo, siendo el caudal de salida proporcional a dicha sección y a la raíz cuadrada de la energía del agua previa al estrechamiento (energía de presión + energía cinética, pudiendo normalmente despreciarse esta última por su bajo valor comparada con la energía de presión). El menor o mayor ancho de ese anillo se consigue aproximando o alejando una corona a un embolo central, con lo que se deja mayor o menor ancho de paso.



Mecanismo selector de caudal (pieza roja). Acercándolo (imagen izq.) o alejándolo (imagen dcha.) del émbolo central se consigue un menor o mayor ancho de paso, y con ello, un menor o mayor caudal

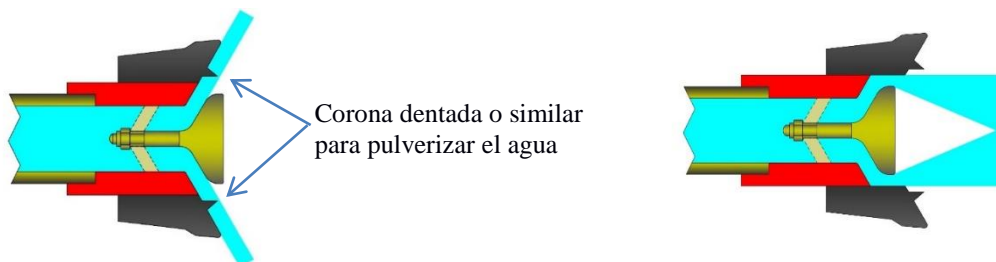


El efecto que supone la disminución de la sección a su paso por el selector de caudal es una transformación de toda la energía de presión previa, normalmente entre 6 o 7bar, en energía de cinética (velocidad). Una parte también se emplea en superar la pérdida de carga singular que supone el estrechamiento.

Punto 1: elevada presión, baja velocidad

Punto 2: baja presión (la atmosférica), alta velocidad

Gracias a este incremento de velocidad la lanza podrá proyectar el agua con un elevado alcance. Una vez pasado el selector de caudal vendrá el *selector de efectos*, con un diseño semejante al selector de caudal, pero que lo que hace es reconducir la descarga de agua, abarcando desde chorro recto o “sólido” a pulverizado ancho o “cortina”, y sin tener, en estas lanzas Tipo 3, incidencia en el caudal de descarga. Normalmente integrado en este mecanismo (o en el émbolo central, según modelo y fabricante) habrá un sistema de dientes o similar, sobre los que incidirá el agua a alta velocidad, produciendo su pulverización.



Mecanismo selector de efectos (pieza negra). Retrasándolo (imagen izq.) o adelantándolo (imagen dcha.) se varía el efecto desde chorro pulverizado ancho o “cortina” a chorro recto o “sólido”

Es importante remarcar que el rendimiento adecuado de la lanza está supeditado a que la presión a la entrada de la lanza sea lo más cercana posible a la *presión de referencia*, (PR), usualmente 6-7bar. El caudal que saldrá será función de esta presión, de la sección que determina el selector de caudal y del propio diseño de la lanza, según la expresión:

$$Q = K \cdot S \cdot \sqrt{PL}$$

Q: caudal

K: constante función del diseño de la lanza

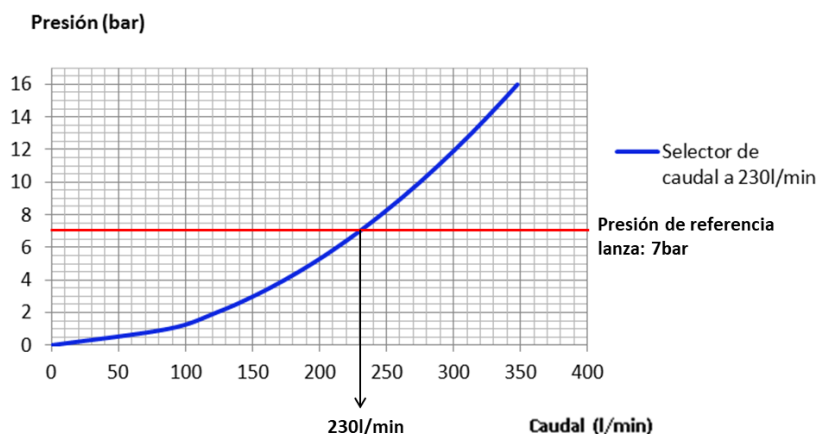
S: sección determinada por el selector de caudal

PL: presión a la entrada de la lanza

Si esta presión (PL) es menor que la presión de referencia (PR) el caudal realmente lanzado será menor al esperado, pero además también será menor la velocidad de salida, lo que supondrá un menor alcance en el caso del chorro sólido y una gota menos fina y por tanto con menor poder extintor en el caso del chorro pulverizado.

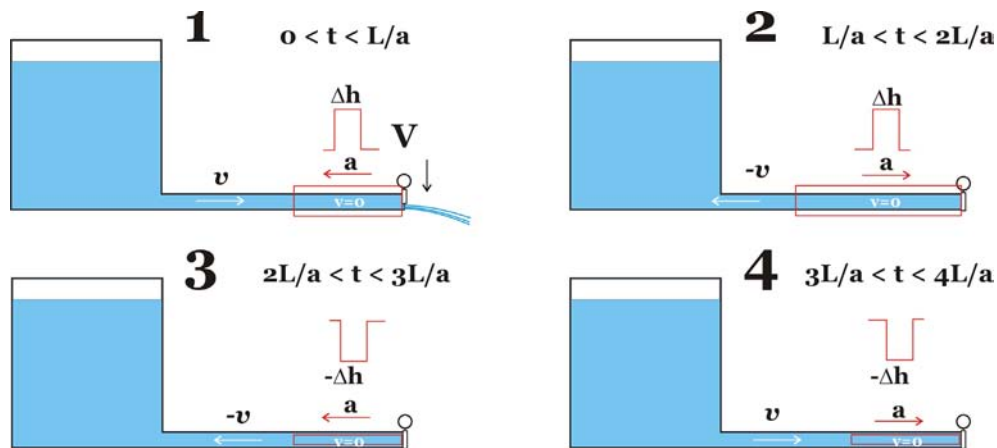
Por el contrario, si tenemos una presión mayor a la presión de referencia saldrá más caudal y a más velocidad, lo que supondrá mayor esfuerzo para el bombero por el empuje de la lanza, y de ser excesiva ya no habría apenas aumento de alcance en el chorro pulverizado, ya que, aunque la velocidad sea mayor, también lo será la oposición que supone el aire para una gota más pequeña.

La siguiente ilustración muestra el caudal de una lanza con selector a 230l/min en función de la presión a la entrada de la lanza. La PR de esta lanza es de 7bar, que será aquella en la que obtengamos los 230l/min seleccionados.



Golpe de ariete.

El fenómeno conocido como **golpe de ariete**, tiene lugar en una tubería por la que circula agua con cierta velocidad y se interrumpe, por ejemplo, mediante el cierre de una válvula. Entonces, aparecen en las paredes de la misma, unas sobrepresiones que pueden llegar a producir la rotura de la conducción. Para explicar el fenómeno, supongamos que tenemos una instalación, de longitud L , que se alimenta por gravedad de un depósito que se encuentra a presión constante. Para simplificar la explicación suponemos que no existen pérdidas por fricción.



Si cerramos la válvula V , el agua que circula con velocidad v , chocará contra la misma. El resultado será un brusco aumento de presión y una detención progresiva del fluido, si esta perturbación se desplaza con una velocidad de a m/s, en un tiempo L/a segundos todo el fluido de la manguera estará en reposo y la conducción sometida a una sobrepresión. Es decir que el fenómeno se caracteriza por una transformación alternativa de la energía cinética que poseía el fluido en energía elástica que almacenará tanto el fluido como las paredes de la conducción.

Al llegar la sobrepresión a las inmediaciones del depósito, existirá una mayor presión en la conducción que en el depósito, por tanto el agua tenderá a entrar en el mismo, con velocidad $-v$. La presión volverá a ser la que tenía inicialmente la conducción, pero como el agua ahora circula de la válvula al depósito, en el instante $2L/a$ segundos, la perturbación llega a la válvula, que como se encuentra cerrada, no se repone el agua que se desplaza y por tanto se genera una depresión en la misma, tal que el agua se frena hasta alcanzar el reposo. Esta depresión se transmite de nuevo por la conducción hasta que transcurridos $3L/a$ segundos, desde el cierre de la válvula, el fluido no posee velocidad, pero está en depresión. Por lo tanto el agua tenderá a circular del depósito a la conducción, adquiriendo de nuevo la velocidad v en dirección hacia la válvula. En el momento que la perturbación, que ahora viaja hacia delante, llega de nuevo a la válvula, se repiten las condiciones iniciales del cierre ocurrido $4L/a$ segundos antes.

El proceso descrito se repite cada $4L/a$ segundos. Los efectos del rozamiento y las elasticidades del fluido y de la conducción, despreciadas en la descripción anterior, llevan a que el fenómeno se amortigüe y el fluido alcance finalmente el estado de reposo.

Se puede demostrar, que la máxima sobrepresión que puede llegar a alcanzarse en un golpe de ariete es:

$$\Delta h = \frac{a \cdot V_o}{g}$$

Δh : sobrepresión, en metros de columna del fluido circulante.

a : velocidad de propagación de la perturbación (m/s).

V_o : velocidad de régimen del fluido.

g : aceleración de la gravedad (9,81 m/s²).

El valor de a depende del material de la conducción, el diámetro y el espesor de la misma. Para dar una idea aproximada en las tuberías de acero es de 1000 m/s, 800 m/s para el fibrocemento y en el caso de conducciones de PVC desciende hasta 200 m/s.

Ejemplo:

Para tener en cuenta el orden de magnitud de esta sobrepresión calculemos, por ejemplo, en una conducción de PVC, por la que circule agua a 100 mca. (10 atm aproximadamente) y con una velocidad de régimen de 1,5 m/s:

$$\Delta h = \frac{a \cdot V_o}{g} = \frac{1,5 \cdot 200}{9,81} = 30,6 \text{ mca} = 3 \text{ atm}$$

Hablamos de un incremento del 33% de la presión nominal, pero si empleamos una conducción de fibrocemento con $a = 800$ m/s, esta sobrepresión sube a 12 atm, duplicándose la presión de régimen.

Esta sobrepresión, es la máxima que se alcanza en el caso de un cierre instantáneo de la válvula de la lanza. Se demuestra, que si no queremos que se produzcan estas sobrepresiones, la solución es cerrar la válvula en un tiempo mayor que $2L/a$, pues de esta forma, ningún punto alcanza la sobrepresión máxima, y la primera onda positiva reflejada regresa antes que se genere la última negativa. En el caso de una instalación de 100 metros y una tubería de PVC, este tiempo es de un segundo.

Alcance vertical y horizontal de un chorro.

Se denomina **alcance vertical** y **horizontal** a la altura y distancia respecto al suelo respectivamente, a la que puede llegar el chorro de agua una vez que abandona la lanza. El alcance depende de varios factores como puede ser, el ángulo que forma la lanza con la horizontal, el rozamiento del fluido con el aire o del viento, por lo que es difícil encontrar un modelo teórico que se aproxime a un valor real. Además de dispersión del chorro hace que durante la trayectoria este deje de comportarse como un cilindro con un diámetro constante, sino que se abre antes de alcanzar la altura máxima, pudiendo algunas gotas de agua llegar más lejos que el grueso del chorro. Los fabricantes de las lanzas dan los datos de los alcances, en función del caudal, por medio de ensayos normalizados³⁴ en forma de tablas o gráficas.

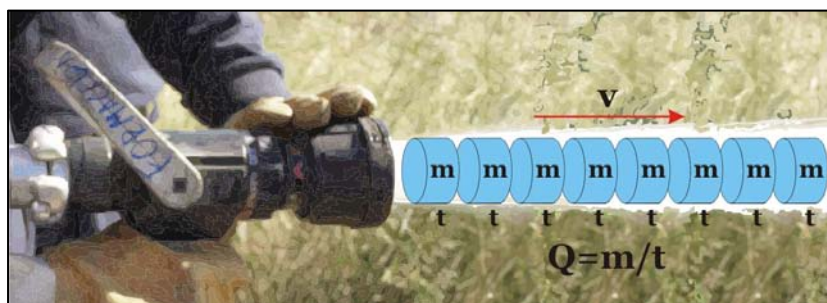
A pesar de esto vamos a realizar una aproximación teórica a este problema. Cuando el agua sale de una lanza lo hace con un caudal (Q_v) a una velocidad (v) determinada, por lo tanto en un tiempo t esta saliendo una masa igual a $m = \rho \cdot Q_v \cdot t$.

³⁴ Descritos en la norma EN 15182:2007 *lanzas de manguera manuales destinadas a los servicios contra incendios*.

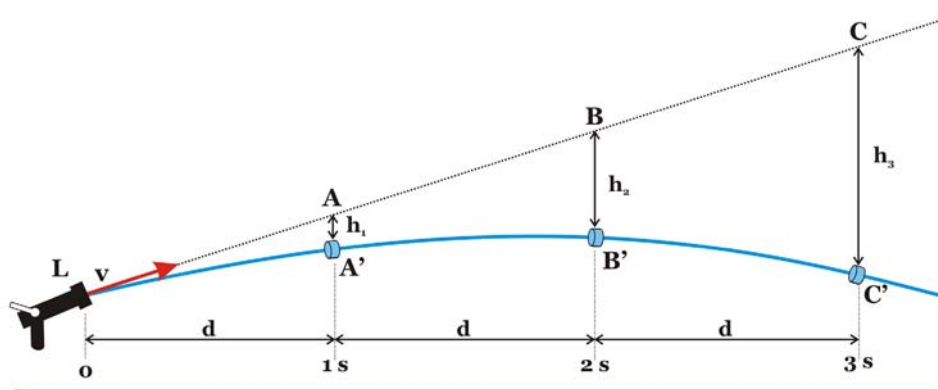
Por ejemplo si esta saliendo un caudal de 250 lpm, en un segundo estará saliendo una masa de agua de:

$$m = \rho \cdot Q_v \cdot t = 1000 \text{ Kg./m}^3 \cdot 4,167 \times 10^{-3} \cdot 1 \text{ s} = 4,167 \text{ Kg.}$$

Es como si cada segundo la lanza estuviera expulsando cilindros de agua de esa masa a la velocidad v :



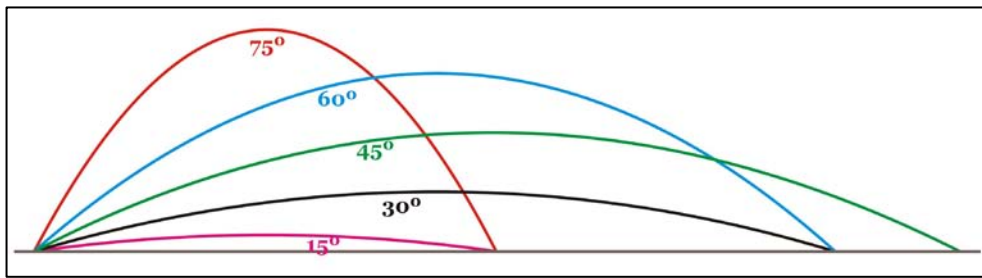
¿Qué trayectoria seguirán estos hipotéticos cilindros de agua una vez que salen de la lanza? Para este análisis debemos suponer que no existe rozamiento con el aire y no se tiene en cuenta la influencia del viento. Supongamos que tenemos la lanza que esta proyectando un cilindro de agua hacia arriba con cierto ángulo respecto a la horizontal.



Si no existiera la fuerza de la gravedad el cilindro seguiría una trayectoria recta LABC, así durante el primer segundo, como lleva una velocidad constante v , habrá recorrido la distancia LA, durante el segundo siguiente AB, BC en el tercer segundo y así sucesivamente. La fuerza de gravedad hace que la masa de agua adquieran una velocidad uniformemente acelerada, por lo tanto a la vez que el cilindro de agua ha recorrido la distancia horizontal d este ha descendido la distancia vertical AA' en el primer segundo, BB' en el segundo CC' en el tercero, etc. El resultado es que el cilindro sigue una trayectoria curva LA'B'C', denomina **parabólica**. El **alcance horizontal** será la distancia recorrida por el agua antes de que llegue al suelo y el alcance vertical será la máxima altura alcanzada.

Se puede demostrar que el alcance vertical y horizontal esta relacionado con el ángulo que forma la velocidad a la salida de la lanza con la horizontal. Si éste es muy horizontal el agua se elevará poco llegará más lejos, pero si por el contrario el ángulo

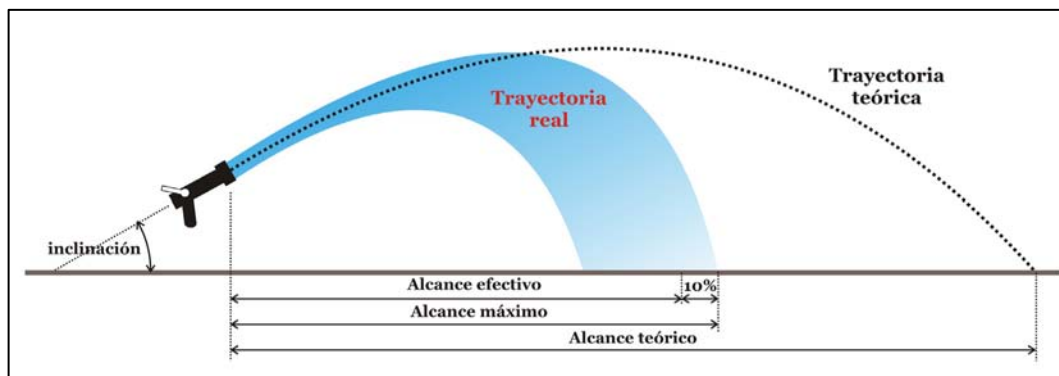
es muy pronunciado, el chorro alcanzará una gran altura pero una pequeña distancia horizontal. En la figura siguiente se muestran las trayectorias de distintos chorros de agua con la misma rapidez de salida (30 m/s), pero distintos ángulos.



Ángulo (α)	h_{\max} (m)	d_{\max} (m)
15°	3,1	45,87
30°	11,50	79,45
45°	22,90	91,74
60°	34,40	79,45
75°	42,80	45,87

Se puede comprobar que los distintos chorros alcanzan distintas alturas respecto al suelo y recorren distintos alcances horizontales. Se observa que si dos ángulos suman 90°, los alcances horizontales son iguales.

Hasta ahora no hemos tenido en cuenta la resistencia del aire y la dispersión del chorro cuando esto ocurre el alcance ya no es el teórico sino que es mucho menor. La norma EN 15182:2007 *lanzas de manguera manuales destinadas a los servicios contra incendios* define un **alcance efectivo** y un **máximo** en función del tipo de lanza, la presión y el caudal. Valores que el fabricante debe garantizar mediante ensayos.



La resistencia del aire hace que el chorro sea frenado durante su trayectoria, esto se traduce en que si tenemos dos lanzas de diámetro distinto, pero que el agua esta saliendo con la misma velocidad, el chorro de la lanza de mayor diámetro llegará más lejos. La explicación de este fenómeno es que la lanza de mayor diámetro estará generando un chorro de mayor caudal, por lo tanto de mayor energía cinética. Pero como la resistencia del aire es prácticamente igual, el chorro con mayor caudal llegará más lejos. Es como si tenemos una bicicleta y un coche circulando a 40 Km./h y tenemos que frenarlos con la misma fuerza, el vehículo con mayor masa nos obligará a disponer de una mayor distancia de frenado.