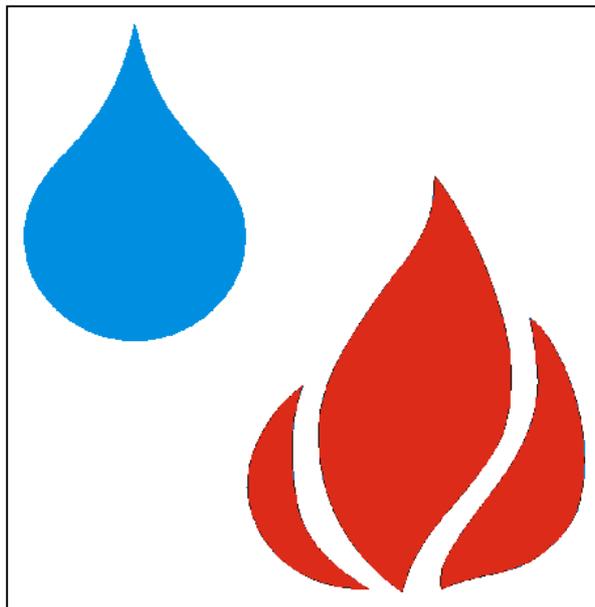


# Hidráulica



por

**Juan Miguel Suay Belenguer**  
Ingeniero Superior Industrial  
Técnico de Emergencias del  
Consortio Provincial de Bomberos de Alicante

© 2002. **Juan Miguel Suay Belenguer.**  
C/ El de Pagan, 44, bungalow 37.  
San Juan de Alicante (Alicante)  
España – Spain.  
[jm\\_suay@inves.es](mailto:jm_suay@inves.es)

# Hidráulica

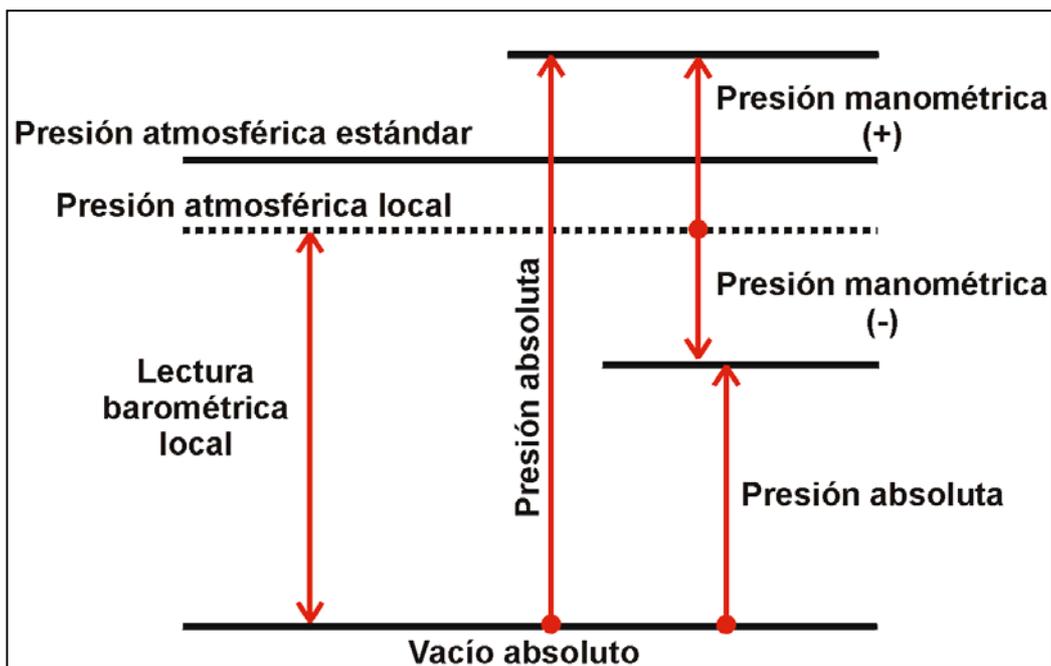
## Conceptos Elementales de Mecánica de Fluidos

### Presión Absoluta y Manométrica

La presión se define como la fuerza por unidad de superficie

$$P = \frac{F}{S}$$

La presión se puede medir respecto a cualquier base de referencia arbitraria, siendo las más usadas el **cero absoluto** y la **presión atmosférica local**. Cuando una presión se expresa como una diferencia entre su valor real y el vacío absoluto hablamos de **presión absoluta**. Si la diferencia es respecto a la presión atmosférica local entonces se conoce por **presión manométrica**.



Los **manómetros** son los instrumentos encargados de medir las presiones manométricas. Pueden medir las presiones efectivas (sobre la atmósfera), o depresiones con respecto a la atmósfera o diferencias de presión entre dos puntos de toma.

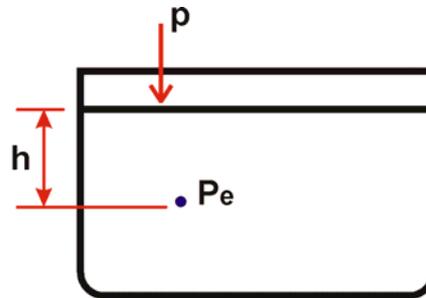
La presión atmosférica se mide con otro instrumento llamado **barómetro**.

La **presión atmosférica estándar** es la presión media a nivel del mar y tiene las siguientes unidades:

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mm de Hg} = 101,325 \text{ kPa} = 10,34 \text{ m.c.a} = 14,7 \text{ psi}$$

En Hidráulica, al menos que se especifique lo contrario, siempre se habla de presiones manométricas

## Presión Estática y Dinámica

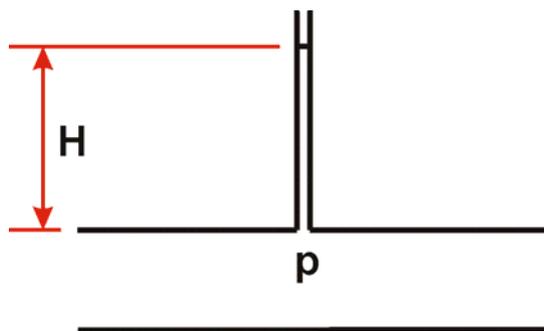


La **presión estática absoluta** de un fluido a profundidad h será:

$$P_e = p + \rho g h$$

p: Presión sobre la superficie.  
 $\rho$ : Densidad del fluido ( $\text{Kg/m}^3$ ).  
g: aceleración de la gravedad ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).  
h: profundidad.

Si p es la presión atmosférica  $\rho g h$  será la **presión relativa** o **manométrica**, que se conoce también por nombre de **altura de presión**, ya que si en una tubería con agua en reposo a presión P, colocamos un tubo, tal como muestra la figura:



El agua subirá por el tubo, venciendo la presión atmosférica, hasta una altura H, que será igual al peso de la columna de agua.

$$P = \gamma H$$

$\gamma$ : Peso específico del agua<sup>1</sup>

<sup>1</sup> El **peso específico** de una sustancia es igual a la densidad por la aceleración de la gravedad ( $\rho g$ ) y se mide en **newton / m<sup>3</sup>**

**H:** altura en metros

Se define la **presión dinámica** de un fluido:

$$P_d = \frac{\rho v^2}{2}$$

$\rho$ : Densidad del fluido ( $\text{Kg/m}^3$ ).

$v$ : velocidad del fluido ( $\text{m/s}$ ).

Esta presión es la energía debida a la velocidad del fluido en su movimiento<sup>2</sup>.

Podemos asimilar esta circunstancia a la velocidad que adquiriría esta masa de fluido si cayera libremente desde su estado de reposo una distancia igual a la altura de presión.

Esta relación se representa por la conocida como **Ecuación de Torricelli**:

$$v = \sqrt{2gh}$$

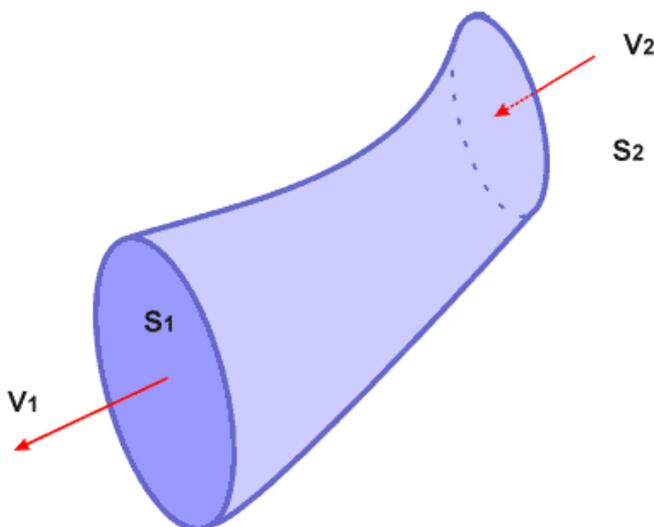
$v$ : velocidad

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

$h$ : altura.

## Ecuación de Continuidad

Consideremos un fluido, que atraviesa dos superficies  $S_1$  y  $S_2$ , las cuales, son perpendiculares a las direcciones de las *líneas de corriente*<sup>3</sup> del fluido. Como entre ambas superficies no existe ninguna fuente ni sumidero de fluido, la masa que atraviesa las superficies tiene que ser igual, por tanto:



$$M_1 = M_2$$

El caudal másico de fluido que atraviesa una superficie, es igual:

$$M = \rho S v$$

$\rho$ : Densidad del fluido ( $\text{Kg/m}^3$ ).

<sup>2</sup> La **presión dinámica** no se manifiesta ejerciendo una fuerza sobre una superficie, como ocurre con la **presión estática**, sino que es la energía consumida en mantener el fluido en movimiento

<sup>3</sup> Se define como la línea que en cada uno de sus puntos es tangente al vector velocidad de una partícula de fluido en un momento dado

S: Área (m<sup>2</sup>).

v: velocidad del fluido (m/s).

Si consideramos que la densidad del fluido no varía entre las dos superficies, tenemos:

$$M_1 = \rho S_1 v_1 = M_2 = \rho S_2 v_2$$

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

$\rho S v = \text{constante}$     **Ecuación de Continuidad**

Definiremos el **caudal** que circula por un tubo de corriente de sección S al producto:

$$Q = Sv$$

### Teorema de Bernoulli

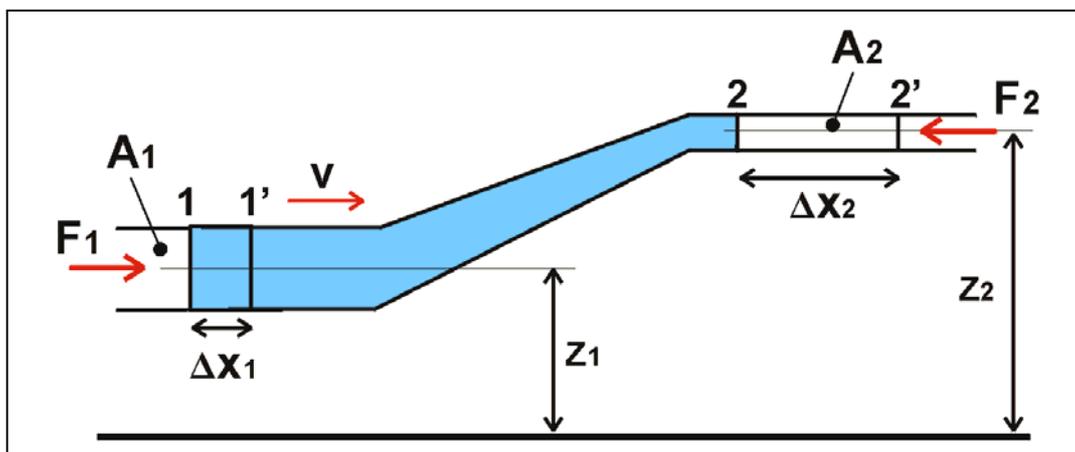
El teorema o ecuación de **Bernoulli** es una relación fundamental para entender el funcionamiento de la circulación del agua en tuberías o mangueras.

Para deducir el mismo aplicaremos el principio trabajo y energía, tal como vimos en el apartado de conocimientos generales.

*"El trabajo aplicado a un sistema por fuerzas externas al mismo se emplea en variar la energía total del mismo"*

Consideremos un fluido que circula por una tubería de sección variable la cual varía su altura respecto a un plano de referencia desde la altura  $z_1$  a  $z_2$ , tal como se representa en la figura. Considere el flujo incompresible y que circula sin rozamiento. Inicialmente el fluido se encuentra entre los puntos 1 y 2, al cabo de un cierto tiempo  $\Delta t$ , el fluido se habrá movido y estará comprendido entre los puntos 1' y 2'.

La variación debida al movimiento es como si el volumen de fluido comprendido entre 1 y 1' que se encontraba a una cota  $z_1$  y poseía una velocidad  $v_1$ , se ha elevado a la altura  $z_2$  y ahora posee una velocidad  $v_2$ .



Sea  $\Delta m = \rho \Delta V$  masa de la porción de fluido comprendida entre 1 - 1' y 2 - 2'.

La variación de **energía potencial** que ha experimentado  $\Delta m$ , es igual a:

$$\Delta E_p = \Delta m g z_2 - \Delta m g z_1 = \rho \Delta V g (z_2 - z_1)$$

Y la variación de la **energía cinética**:

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \Delta m v_2^2 - \frac{1}{2} \Delta m v_1^2 = \frac{1}{2} \rho \Delta V (v_2^2 - v_1^2)$$

Para que se produzca el movimiento del fluido situado en el volumen 1 - 1', el fluido situado a la izquierda del mismo ejerce una fuerza  $F_1$ , hacia la derecha de valor:

$$F_1 = P_1 A_1$$

Donde:

$P_1$  : es la presión estática en 1

$A_1$  : es la sección del tubo en 1

Al mismo tiempo el fluido que precede al comprendido entre 2 - 2' ejerce una fuerza  $F_2$  hacia la izquierda de valor:

$$F_2 = P_2 A_2$$

Donde:

$P_2$  : es la presión estática en 2

$A_2$  : es la sección del tubo en 2.

Estas fuerzas realizan un trabajo:

$$W_1 = F_1 \Delta x_1 = P_1 A_1 \Delta x_1 = P_1 \Delta V$$

$$W_2 = F_2 \Delta x_2 = P_2 A_2 \Delta x_2 = P_2 \Delta V$$

El trabajo total:

$$W_t = W_1 - W_2 = P_1 \Delta V - P_2 \Delta V = (P_1 - P_2) \Delta V$$

Este trabajo se utiliza en aumentar la energía cinética y potencial de  $\Delta m$ :

$$W_t = \Delta E_p + \Delta E_c$$

$$(P_1 - P_2) \Delta V = \rho \Delta V g (z_2 - z_1) + \frac{1}{2} \rho \Delta V (v_2^2 - v_1^2)$$

Dividiendo por  $\Delta V$  y agrupando los subíndices:

$$P_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

O expresándolo en términos de altura de presión:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$\gamma = \rho g$$

Este resultado lo posemos escribir como:

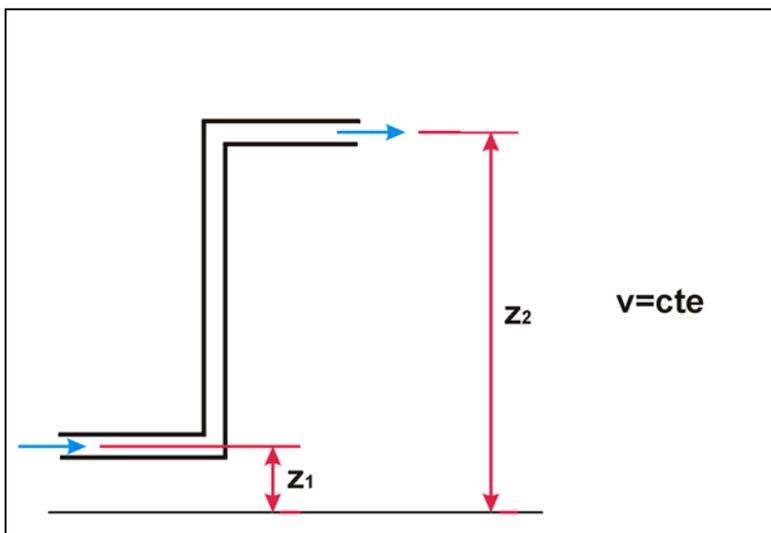
$$\frac{P}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g} = \text{cont.}$$

Esta expresión establece que en un tubo de corriente:

*"La suma de la altura de presión estática más la altura geométrica más la presión dinámica permanece constante a lo largo de un tubo de corriente"<sup>4</sup>*

Veamos unos ejemplos de la aplicación del **Teorema de Bernoulli**

Consideremos en primer lugar el ejemplo de un sifón:



Como la velocidad del fluido permanece constante  $v_1 = v_2$ :

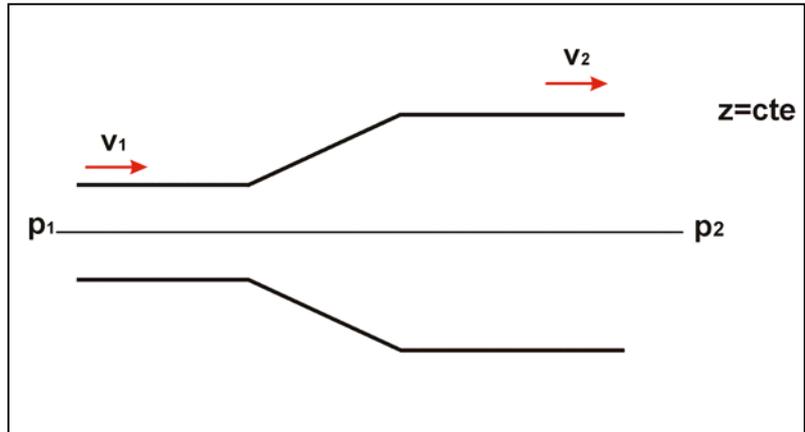
$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + z_2$$

En la figura el fluido esta circulando por un tubo horizontal ( $z_1 = z_2$ ) pasando de una sección menor a una mayor. La ecuación queda:

<sup>4</sup> El tubo de corriente es una superficie formada por líneas de corriente que pasan por los puntos de una línea cerrada

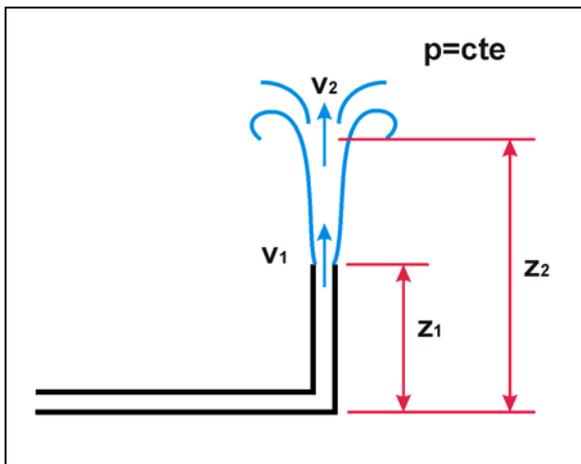
$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

Cuando pasa del tubo estrecho al ancho la velocidad en virtud de la ecuación de continuidad disminuye ( $v_2 < v_1$ ) por lo tanto para que se cumpla la relación anterior la presión debe aumentar ( $P_2 > P_1$ ).



Esto es una importante consecuencia del teorema de **Bernoulli**:

*"Si se desprecian los efectos del cambio de altura la presión de un fluido esta en relación inversa con su velocidad"*

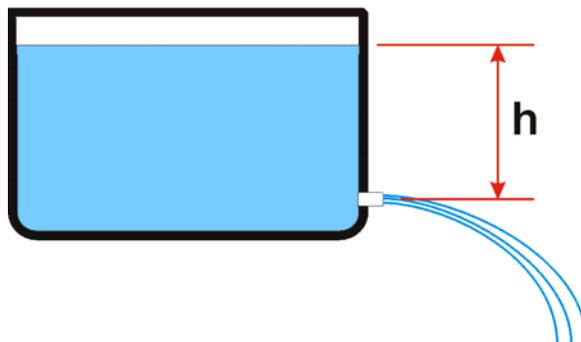


En el caso de un surtidor en donde la presión permanece constante toda la energía de velocidad se gasta en adquirir energía cinética:

$$z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

### Ecuación de descarga

Sea un deposito con un orificio inferior por el que se esta vaciando:



La velocidad con la que sale el líquido es igual, según la **ecuación de Torricelli**:

$$v = \sqrt{2gh}$$

v: velocidad.

g: aceleración de la gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>).

h: altura.

Luego su caudal será:

$$Q = K Sv$$

Q: Caudal.

S: Sección del orificio.

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

v: velocidad de descarga.

Aplicado el valor de v:

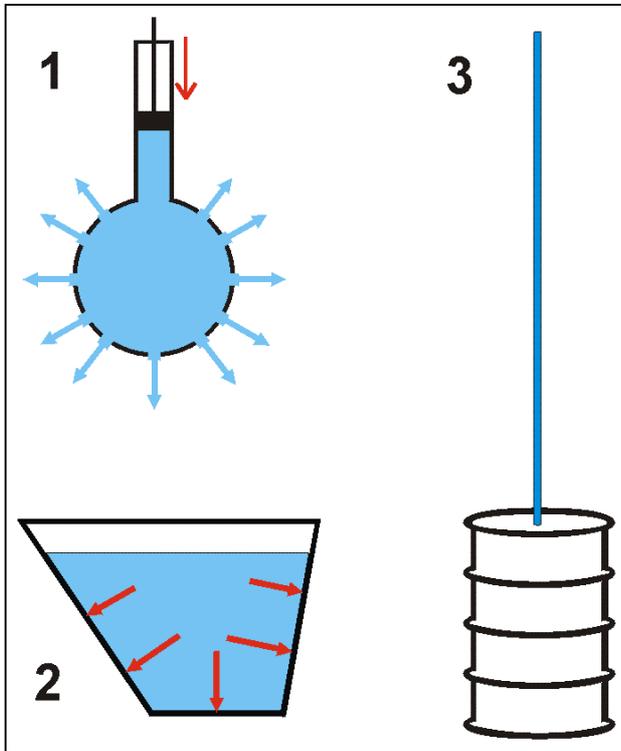
$$Q = KS\sqrt{2gh}$$



## Principio de Pascal

Este principio fue enunciado por **Blas Pascal** (1623-1662) y dice:

*"La presión aplicada a un líquido encerrado dentro de un recipiente se transmite por igual a todos los puntos del fluido y a las propias paredes del mismo"*

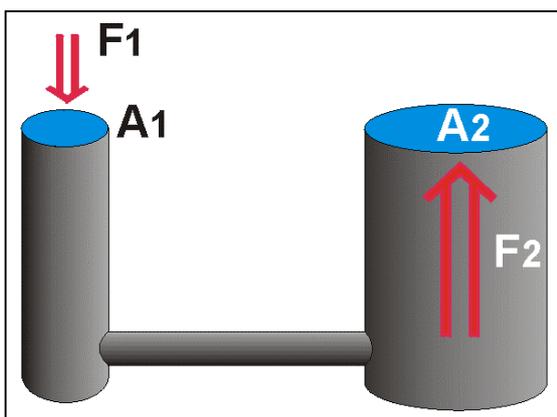


Esto significa que si por ejemplo tenemos el aparato que se muestra en la figura (1), si accionamos el pistón, el agua saldrá por los distintos agujeros del recipiente, en dirección perpendicular a la superficie y con la misma velocidad, si los orificios son de la misma sección.

Una conclusión del **principio de Pascal** es que la presión estática o hidrostática actúa en todas las direcciones, por eso la presión que realiza un líquido sobre un recipiente no depende de la cantidad de líquido, sino de la altura de este, siendo la dirección de la presión hidrostática perpendicular a la superficie que esta en contacto con el fluido (figura 2). **Pascal** realizó un experimento que demostraba esta afirmación, cogió un barril repleto de agua y colocó encima del mismo un tubo de gran longitud, pero de sección muy pequeña. Lo llenó con tan solo un litro

de agua y explotó el barril debido a la gran presión que había transmitido a su interior (figura 3).

Una aplicación del principio de **Pascal** es la denominada **prensa hidráulica**.



Cuando se aplica una fuerza  $F_1$ , al émbolo más pequeño, la presión en el líquido aumenta el  $F_1/A_1$ , la cual se transmite en todas direcciones, al llegar al émbolo más grande, transmite al mismo una fuerza  $F_2$  que será igual al incremento de presión por el área  $A_2$ , por lo que:

$$F_2 = \frac{F_1}{A_1} \times A_2 = \frac{A_2}{A_1} \times F_1$$

Si  $A_2$ , es mucho mayor que  $A_1$ , puede utilizarse una fuerza pequeña  $F_1$ , para ejercer otra mucho más mayor  $F_2$ , que permita levantar un peso considerable situado sobre el émbolo grande.

Este mecanismo, usando aceite como fluido, es el utilizado en las pinzas de corte de los equipos de excarcelación.

## Ecuación de la Pérdida de Carga en una Conducción

El **teorema de Bernoulli** era aplicable en el caso de fluidos que circulaban por tubos de corriente sin rozamiento.

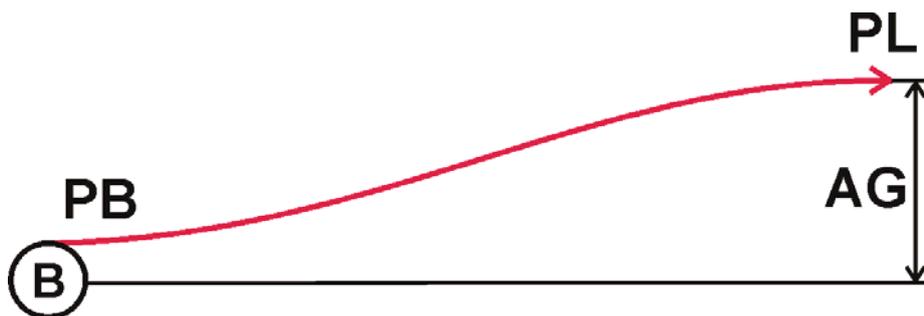
Pero la realidad es otra, la existencia de este rozamiento hacen que aparezcan las llamadas **perdidas de carga**, que se manifiestan en una pérdida de presión en la conducción.

La ecuación de **Bernoulli** quedará:

$$\frac{p_1}{\gamma} + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_{\rightarrow f}$$

$$h_{\rightarrow f} = \text{pérdida de carga}$$

Sea la instalación, formada por una bomba que impulsa agua a través de una manguera, cuya punta de lanza esta a distinto nivel:



Aplicando **Bernoulli**, se cumple la siguiente relación:

$$PL = PB - AG - PC$$

**PL:** Presión en punta de lanza.

**PB:** Presión a la salida de la bomba.

**AG:** Altura geométrica.

**PC:** Pérdidas de carga.

En las pérdidas de carga existentes en una instalación, aparte del rozamiento, también se tiene en cuenta las llamadas **pérdidas menores**, que son las debidas a los elementos auxiliares (bifurcaciones, reducciones, etc.) existentes en la manguera o tubería.

Muchas han sido las formulas que se han empleado en el cálculo de las pérdidas de carga, la más acertada es la llamada expresión de **Darcy-Weisbach**.

$$h_f = f \frac{L v^2}{D 2g}$$

f: coeficiente de fricción.  
 L: longitud de la instalación  
 D: diámetro de la manguera o tubería.  
 v: velocidad de circulación del fluido  
 g: aceleración de la gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>).

En función del caudal la fórmula queda:

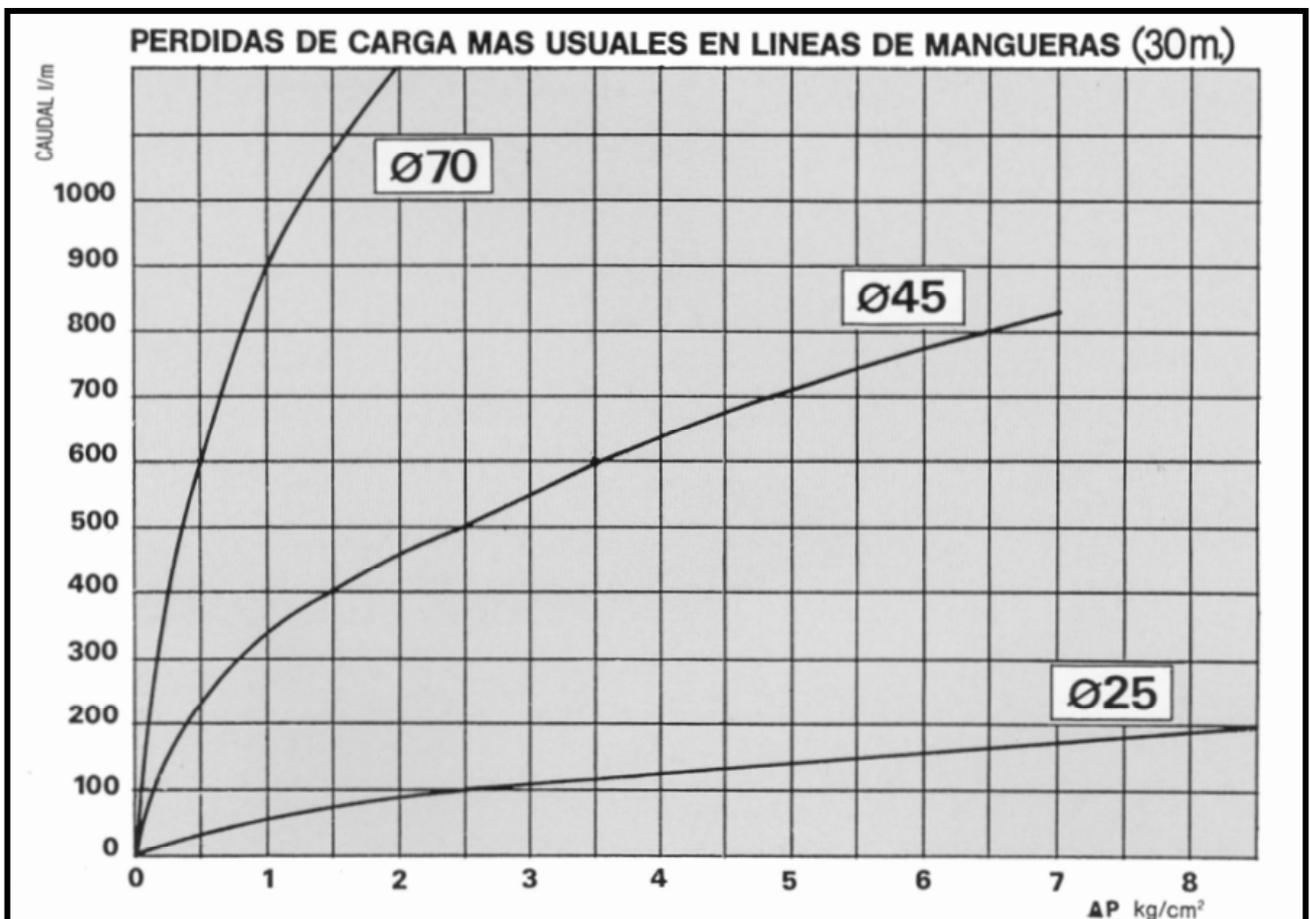
$$h_f = \frac{8fLQ^2}{\pi^2 g D^5}$$

Q: Caudal en metros cúbicos por segundo.

El cálculo de f, que es un factor adimensional, se realiza por medio de unas tablas que dependen de la rugosidad interna de la manguera o la tubería y la velocidad de circulación.

Para incluir las **perdidas menores** se considera que la longitud de la instalación incrementada en un valor determinado en función del número elementos existentes en la instalación.

De todas formas, existen unas tablas confeccionadas por los fabricantes de mangueras y tuberías que nos indican en función del caudal y el diámetro cual es la pérdida de carga.



## Equipos de Bombeo

Una **bomba hidráulica** es una máquina que convierte la energía mecánica en energía hidráulica que se manifiesta con un incremento de la velocidad y presión del fluido que circula por su interior.

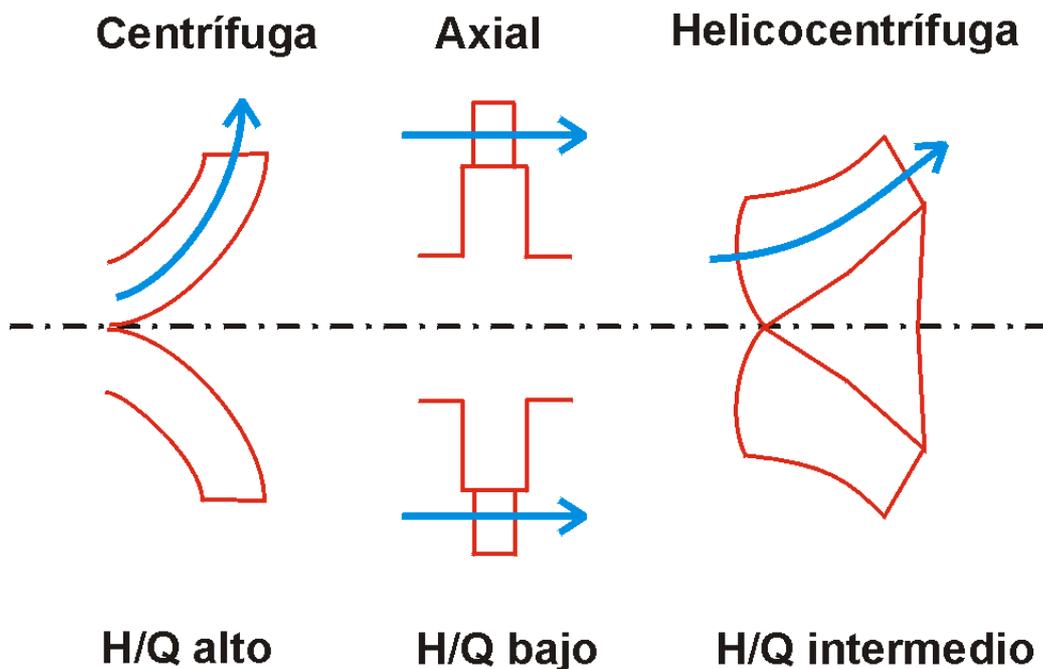
Existen dos grandes tipos de **bombas**:

**Turbomáquinas:** basan su funcionamiento en el aumento del momento cinético<sup>5</sup> del fluido, que se transforma en energía de presión.

Este tipo de bomba es la usada por los bomberos.

**Bombas de desplazamiento:** basan su funcionamiento en el llenado de una cámara de trabajo y su posterior vaciado de una manera periódica. (Bombas peristálticas).

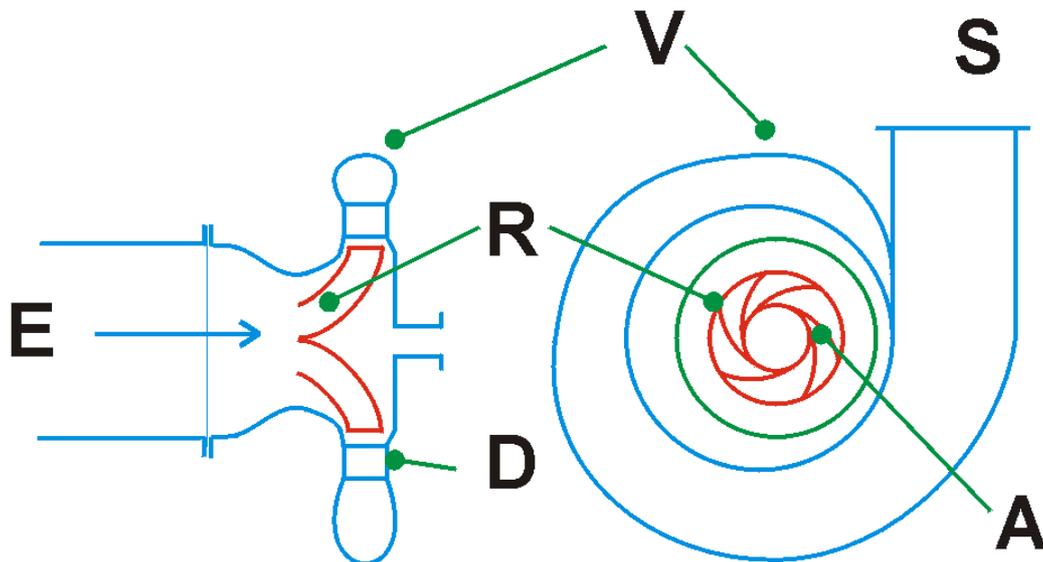
A la vez las **turbomáquinas** las podemos clasificar, según la trayectoria que realiza el fluido en su interior, en:



La presión o altura que da una bomba, esta en relación inversa al caudal que circula por la misma, así para bombas que dan un caudal alto proporcionan una presión baja y viceversa. Esto es lo que expresa la relación **H/Q**. Las **bombas centrífugas** son las más indicadas para el transvase de caudales moderados y alturas notables, por eso tienen una relación **H/Q** alta y son la base de los sistemas de distribución de agua y las que se instalan en los vehículos contra incendios.

<sup>5</sup> El momento angular o cinético, es un concepto de física que pone en manifiesto la cualidad que poseen los cuerpos en rotación a conservar su velocidad que giro. Una variación del momento cinético implica una variación en su velocidad

## Partes de una Bomba Centrífuga



Una entrada E, unida al mangote de aspiración.

El rodete móvil R que gira, impulsado por un motor, éste está compuesto por unos elementos denominados álabes (A) que canalizan el fluido y le hacen variar su momento cinético.

El difusor D, tiene como misión disminuir la velocidad de salida del rodete, y por tanto transformarla en energía de presión.

Una voluta V que canaliza los filetes fluidos salientes del difusor hacia la salida S.

La **Bomba**, así descrita corresponde a una bomba centrífuga monocelular, es decir con un solo rodete, si a la salida se conecta otro rodete haremos que el fluido aumente más su presión.

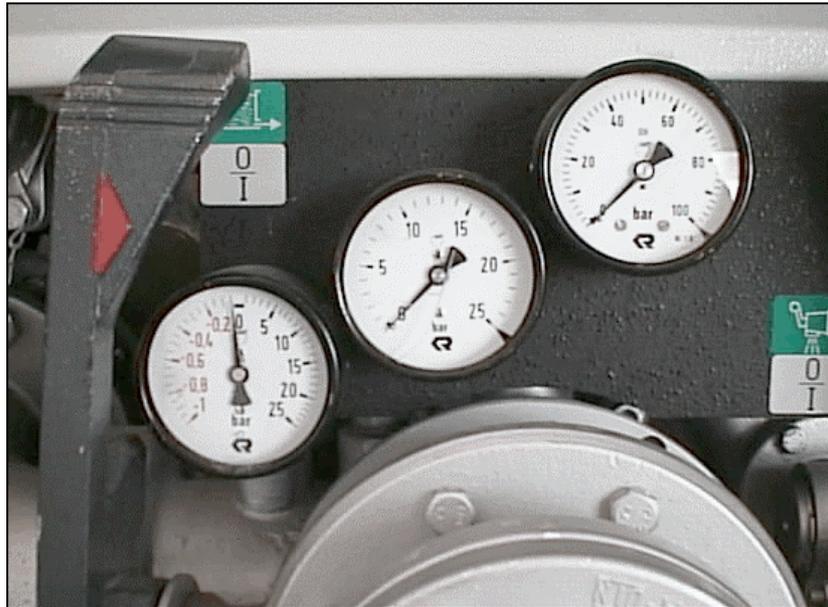
Los vehículos de Bomberos, disponen de dos gamas de presión Alta y Baja, esto se consigue por medio de bombas centrífugas multicelulares.

## Curvas Características de una Bomba Centrífuga

Al pasar el agua por el interior de una bomba centrífuga experimenta un aumento de presión, que varía según el caudal que circula. Esta diferencia de presión se denomina **altura de impulsión** y se expresa en metros de columna de agua (m.c.a.)<sup>6</sup>.

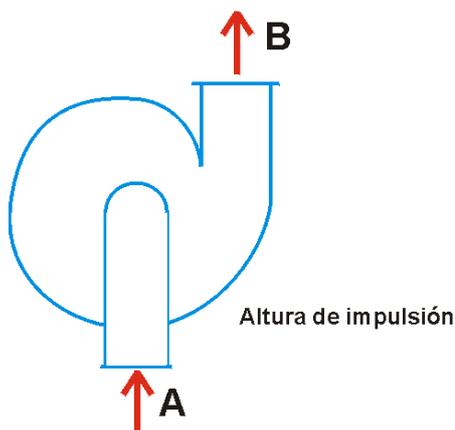
<sup>6</sup> 1 m.c.a = 0,1 kg/cm<sup>2</sup> = 0,1 bar = 100 HPa = 0,1 atm

La **altura de aspiración manométrica** es la presión efectiva negativa o depresión que se produce en el manguote de aspiración de la bomba, más adelante se verá, que es fundamental que no supere un determinado valor para evitar la **cavitación**.



**Manómetros que miden la altura de aspiración y las alturas de impulsión en baja y alta, en la bomba de un vehículo.**

La altura de impulsión se puede medir fácilmente, ya que a la entrada y salida de la bomba no varía de velocidad y no existe diferencia de cota entre la entrada y la salida, se puede aplicar la ecuación de **Bernoulli**, entre los puntos A y B:



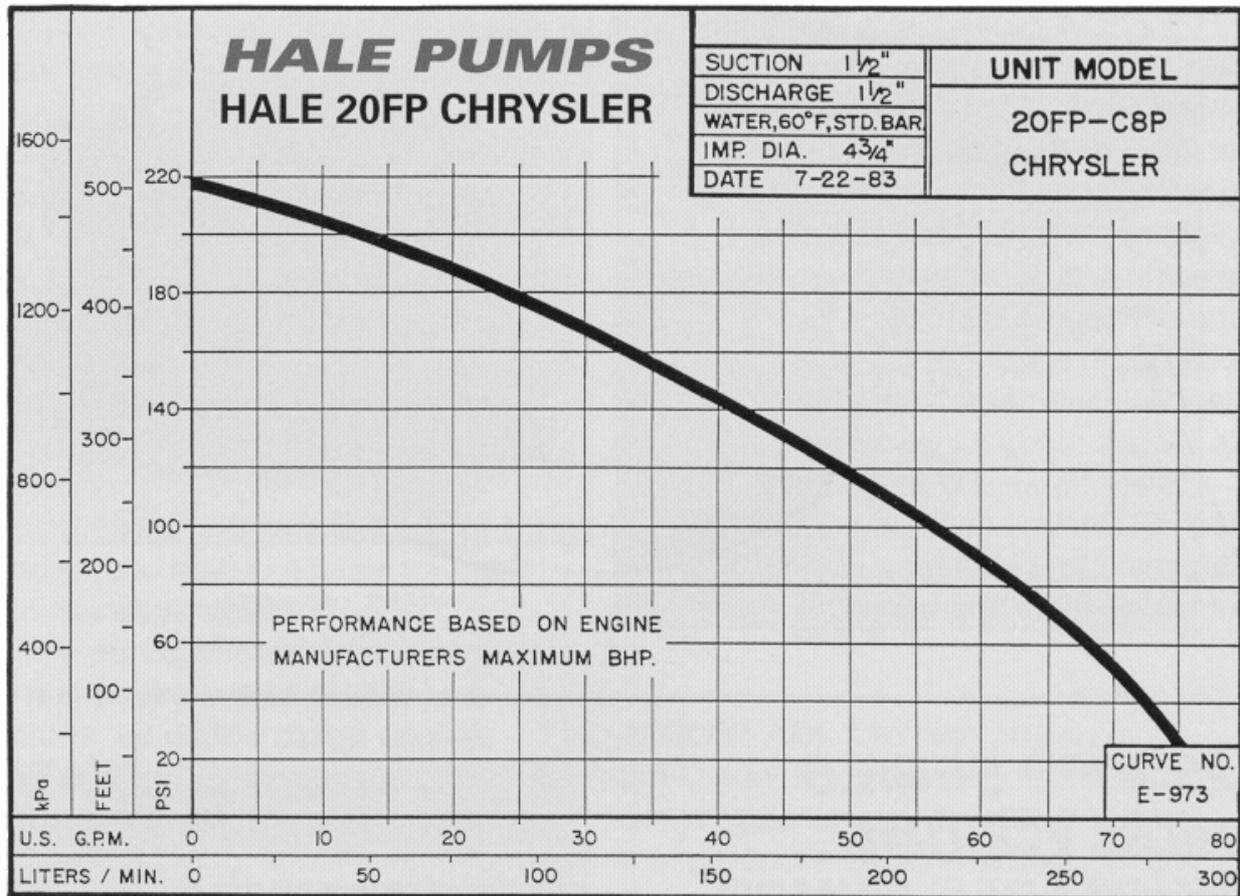
$$H = \left( \frac{P_b}{\gamma} + z_b + \frac{v_b^2}{2g} \right) - \left( \frac{P_a}{\gamma} + z_a + \frac{v_a^2}{2g} \right)$$

$$z_a = z_b \quad v_a = v_b$$

$$H = \left( \frac{P_b}{\gamma} \right) - \left( \frac{P_a}{\gamma} \right)$$

Si se realizan mediciones en un banco de pruebas con ayuda de dos manómetros a la salida y a la entrada de la bomba, para los distintos caudales, que altura de impulsión tenemos, los valores obtenidos, se representan en un gráfico. Esta curva denominada **relación altura - caudal**, nos mostrará la capacidad de la bomba para generar energía hidráulica y también nos permitirá elegir que tipo de bomba es adecuada en nuestra instalación.

## Curva Altura-Caudal



Con los valores de presión y caudal de una bomba obtenidos en un banco de ensayo se puede ajustar a una fórmula, la cual posteriormente podremos representar gráficamente.

Así por ejemplo si tomamos los datos dados por el fabricante de la motobomba **HOMELITE FP250**, para una altura de aspiración inferior a 1,5 metros, se pueden ajustar a la expresión:

$$H(Q) = 60,63 - 1,143 \times 10^{-3} \times Q^2$$

Q: caudal en litros por minuto.

H en metros de columna de agua.

Esta expresión con posteridad se puede representar gráficamente.

Se define **potencia hidráulica** transmitida por la bomba al fluido a:

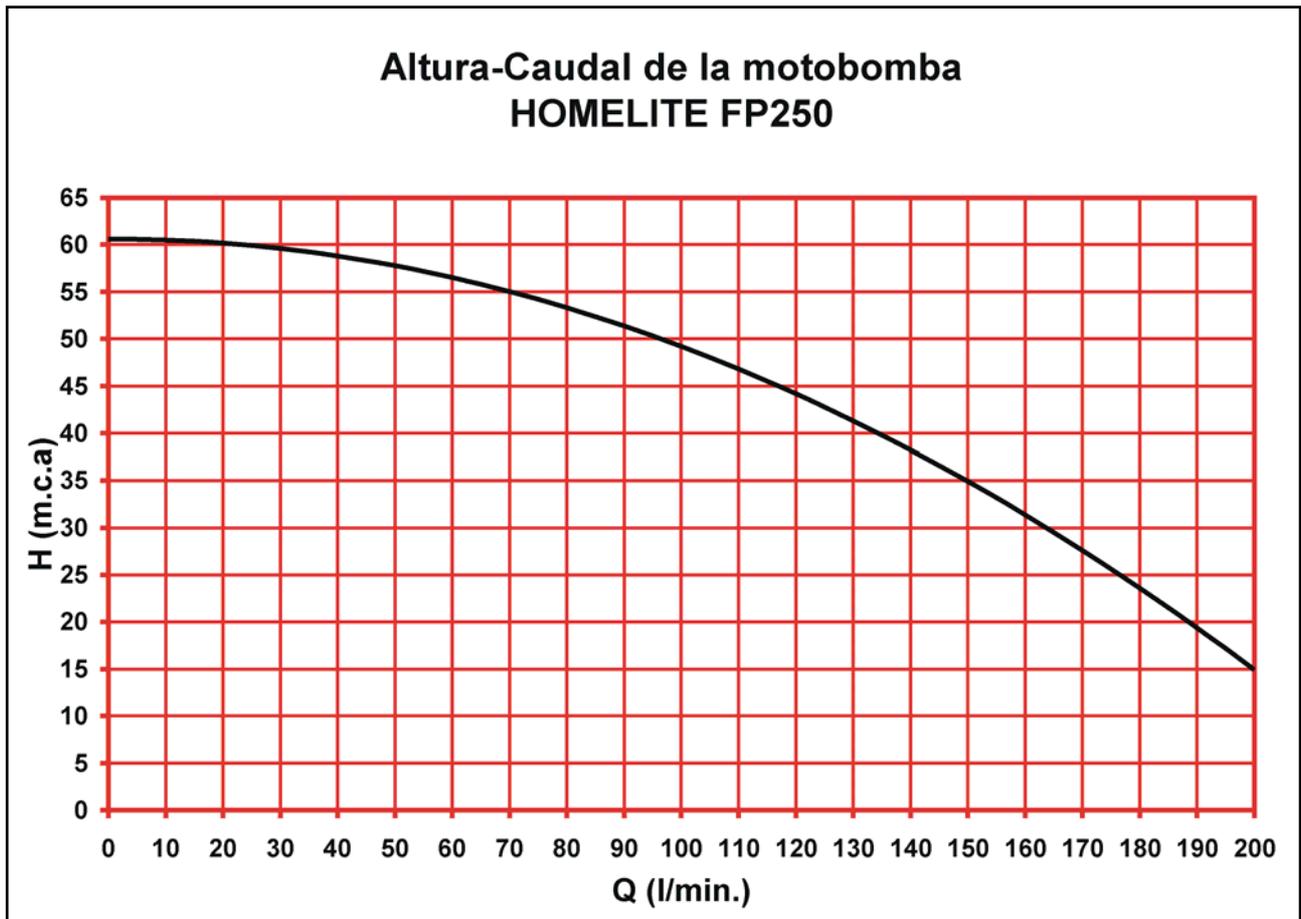
$$P_h = \gamma Q H$$

$P_h$  Potencia en vatios

$\gamma$ : Peso específico del agua

Q: caudal en  $m^3/s$

H: en metros



La potencia hidráulica no es la potencia mecánica que es necesaria para mover el rodete. En otras palabras no nos indica la potencia mecánica necesaria para obtener la correspondiente potencia hidráulica. La existencia de rozamientos y pérdidas en el interior de la bomba es la razón de esta circunstancia.

Se define **rendimiento** de la bomba a la expresión:

$$\eta = \frac{P_b}{P_m}$$

$P_b$  : potencia hidráulica de la bomba.

$P_m$  es la potencia mecánica.

El fabricante proporciona una gráfica que expresa el rendimiento en función del caudal, así que la **potencia mecánica** que hay que suministrar a una bomba se puede calcular por la expresión:

$$P_m = \frac{\gamma \times Q \times H}{\eta}$$

De esta forma es posible representar la curva de la potencia mecánica en función del caudal.

Las curvas de rendimiento y potencia, son útiles en instalaciones fijas de extinción y en los sistemas de distribución de agua, por lo tanto no me entretengo más en ellas por estar fuera de los objetivos de este tema.

Las bombas no siempre trabajan con una velocidad constante, de hecho tanto las motobombas como las bombas de los vehículos poseen un acelerador con el que nos permite variar su velocidad de giro. ¿Qué efecto sobre el caudal y la altura tienen esta variación de velocidad de giro?.

La respuesta se encuentra en las siguientes relaciones llamadas de semejanza:

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{N}{N'} \quad \frac{H}{H'} = \left(\frac{N}{N'}\right)^2 \quad \frac{P}{P'} = \left(\frac{N}{N'}\right)^3$$
$$\frac{H}{H'} = \left(\frac{Q}{Q'}\right)^2$$

Esto quiere decir que si tenemos una bomba que gira a N revoluciones por minuto y que esta dando un caudal Q a una altura H con una potencia P. Si ahora la bomba gira a una velocidad N' el nuevo caudal, altura y potencia será:

$$Q' = \frac{N'}{N} \times Q \quad H' = \left(\frac{N'}{N}\right)^2 \times H \quad P' = \left(\frac{N'}{N}\right)^3 \times P$$

Esto significa que si aumentamos la velocidad de giro de la bomba, el caudal aumenta linealmente, pero la altura lo hace al cuadrado y la potencia necesaria al cubo. Esto se traduce en un desplazamiento vertical de la curva altura - caudal. Se consigue un efecto contrario si disminuimos la velocidad de giro.

Veamos un ejemplo de este hecho en el caso de la motobomba **HOMELITE FP250**

Según el manual su velocidad de trabajo es de N = 3600 r.p.m.

Vamos a calcular las curvas para N' = 4000 r.p.m. y para N' = 3000 r.p.m.

Si la expresión de la curva altura caudal es:

$$H = C - D \times Q^2$$

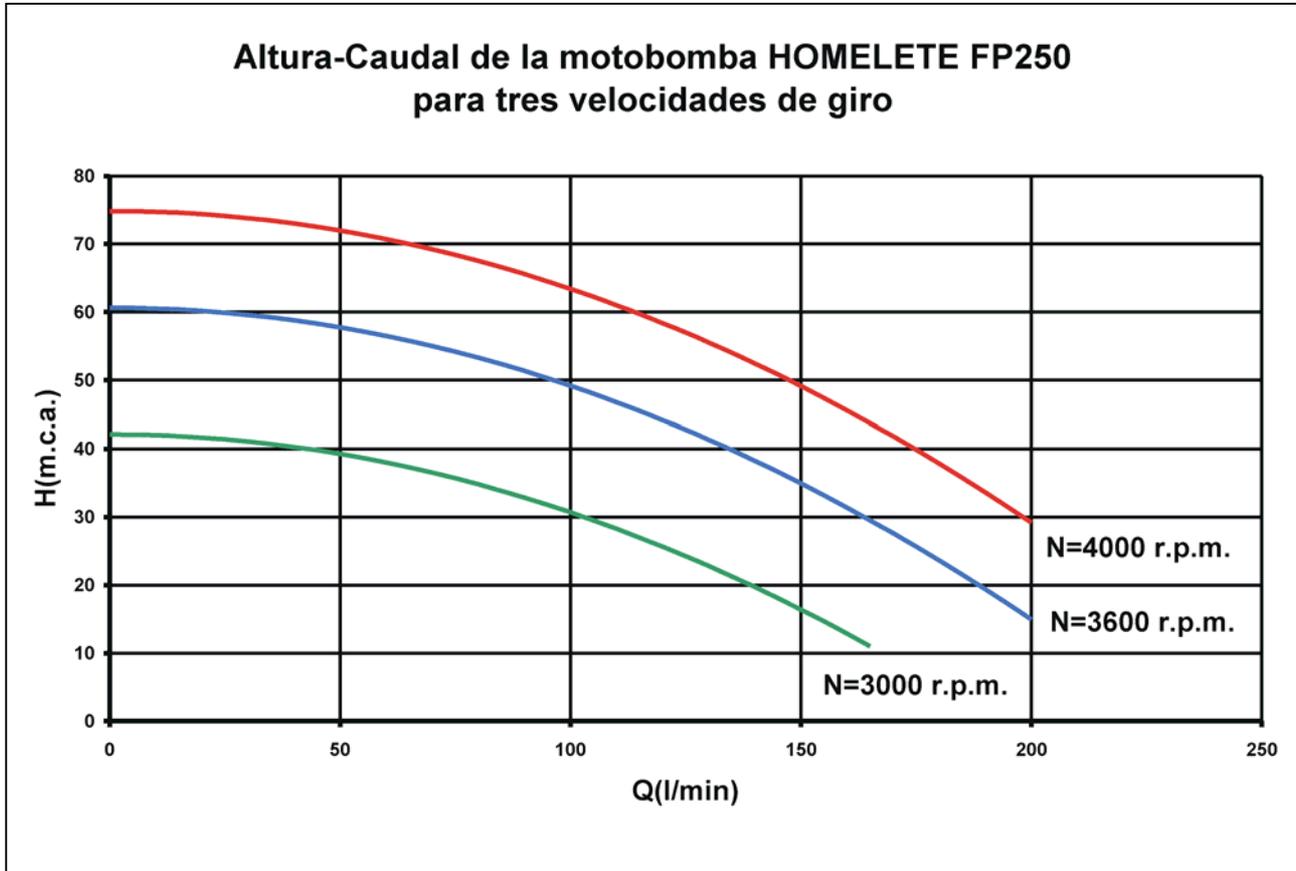
La nueva curva será:

$$H' = \left(\frac{N'}{N}\right)^2 \times H = C \times \left(\frac{N'}{N}\right)^2 - D \times \left(\frac{N'}{N}\right)^2 \times Q^2$$
$$= C \times \left(\frac{N'}{N}\right)^2 - D \times Q'^2$$

Para  $N=4000$  y  $N=3600$   $H' = 74,85 - 1,143 \times 10^{-3} \times Q^2$

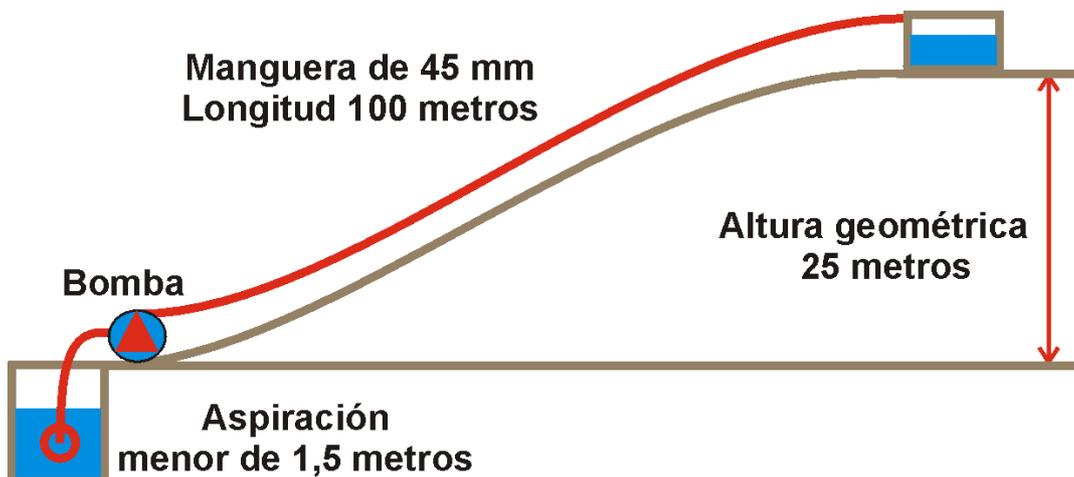
Para  $N=3000$  y  $N=3600$   $H' = 42,10 - 1,143 \times 10^{-3} \times Q^2$

Que podemos ver en la gráfica siguiente:



### Punto de Funcionamiento de una instalación

Sea la siguiente instalación:



Se define la **altura total** de una bomba, como la altura que debe proporcionar la misma, en una instalación, para elevar un determinado caudal de agua a través de una manguera, desde un nivel inferior a otro superior.

Esta altura total será igual a:

$$AT = AG + PC$$

Donde:

AG: es la altura geométrica o desnivel.

PC: es la pérdida de carga del tramo de manguera.

La altura total de la bomba se puede representar en una gráfica en función del caudal, para ello, hay que encontrar una expresión que me relacione las pérdidas de carga con el caudal.

A partir de la gráfica de pérdidas de carga de las mangueras y para el diámetro y longitud considerados en el ejemplo ( $\Phi = 45 \text{ mm}$  y  $L = 100 \text{ m}$ ), para distintos caudales hallamos:

Caudal (l/min.)	PC (kg/cm <sup>2</sup> )	PC (m.c.a.)
100	0,5	5
200	1,23	12,30
300	2,83	28,30
400	5,67	56,70
500	8,33	83,3
700	16,67	166,70
1000	33,36	333,6

Estos valores se pueden ajustar a una expresión del tipo:

$$PC = bQ^a$$

En nuestro caso, se calcula y obtenemos  $b = 0,000722$   $a = 1,87$

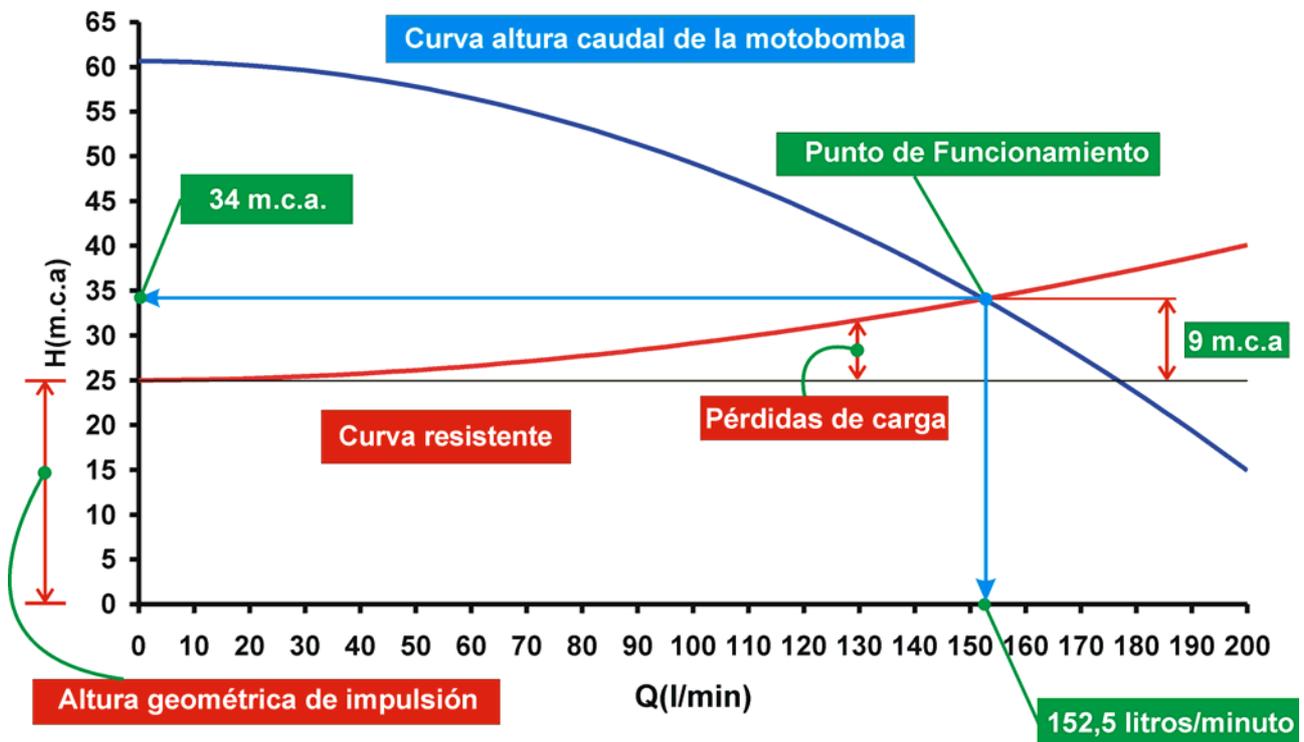
La altura total quedará:

$$AT = 25 + 0,000722 \times Q^{1,87}$$

Se llama **punto de funcionamiento** de una instalación, a la intersección de la curva de altura total y la altura de impulsión en función del caudal.

En nuestro caso la bomba estará proporcionando una altura de 34 m.c.a. y un caudal de 152,5 l/min, con una pérdida de carga en la instalación de 9 m.c.a.

## Punto de Funcionamiento de la instalación



Ahora se podría calcular el nuevo punto de funcionamiento para una nueva velocidad de giro, que es la operación que se realiza cuando queremos aumentar el caudal o la altura geométrica de la instalación.

Siempre que aceleremos el motor aumentamos la altura y el caudal que da la bomba, pero hay que tener en cuenta que alejarse de la velocidad de régimen implica una disminución de rendimiento, ya que un aumento lineal del caudal lleva consigo que la potencia aumente al cubo.

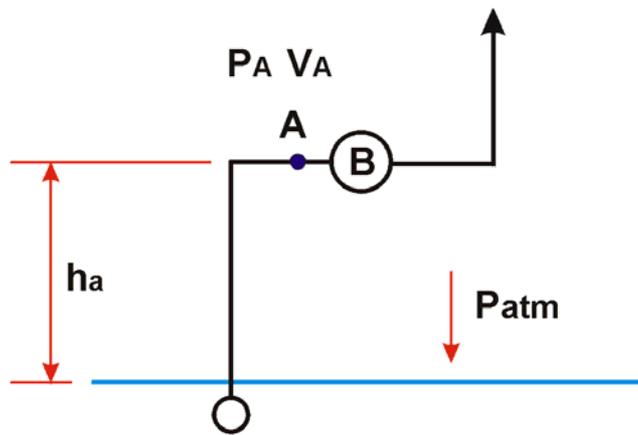
### Altura de Aspiración de las Bombas

En la toma de en una bomba, se puede producir un fenómeno no deseable, para su correcto funcionamiento, denominado **cavitación**.

La **cavitación** consiste en la evaporación del fluido circulante por la bomba a temperaturas muy inferiores a la de ebullición del mismo a condiciones normales, como consecuencia del descenso de la presión en el líquido, 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 corrosión de los materiales.

Para evitar este fenómeno, hay que dimensionar bien la altura del mangote de aspiración.



Sea una bomba B, que posee un mangote de aspiración de altura  $h_a$ . En el punto A a la entrada de la bomba aplicamos la **ecuación de Bernoulli**:

$$h_a + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A}{2g} + h_{f \rightarrow A} = \frac{P_{atm}}{\gamma}$$

$h_a$  Altura del punto A

$\frac{P_A}{\gamma}$  Presión estática en A

$\frac{V_A}{2g}$  Presión dinámica en A

$h_{f \rightarrow A}$  Pérdida de carga en el mangote ( $KQ^2$ )

$\frac{P_{atm}}{\gamma}$  Presión atmosférica en la superficie del fluido (1 atm  $\approx$  10 m.c.a.)

### Presión atmosférica en función de la altitud sobre el nivel del mar

Altitud (m)	Presión atmosférica (m.c.a.)
0	10,33
500	9,71
1.000	9,11
1.500	8,56
2.000	8,04
2.500	7,56

La presión en A:

$$\frac{P_A}{\gamma} = \frac{P_{atm}}{\gamma} - (h_A + KQ^2 + \frac{v_A^2}{2g})$$

Para que en A no se produzca la **cavitación**:

$$\frac{P_A}{\gamma} > h_v$$

$h_v$  es la presión de vapor del fluido a la temperatura T.

### Presión de Vapor del Agua

Temperatura (°C)	Presión de Vapor (m.c.a.)
0	0,062
5	0,089
10	0,125
15	0,174
20	0,238
25	0,323
30	0,432
35	0,573
40	0,752

Como  $v_a$  esta en función del caudal, podemos agrupar al término:

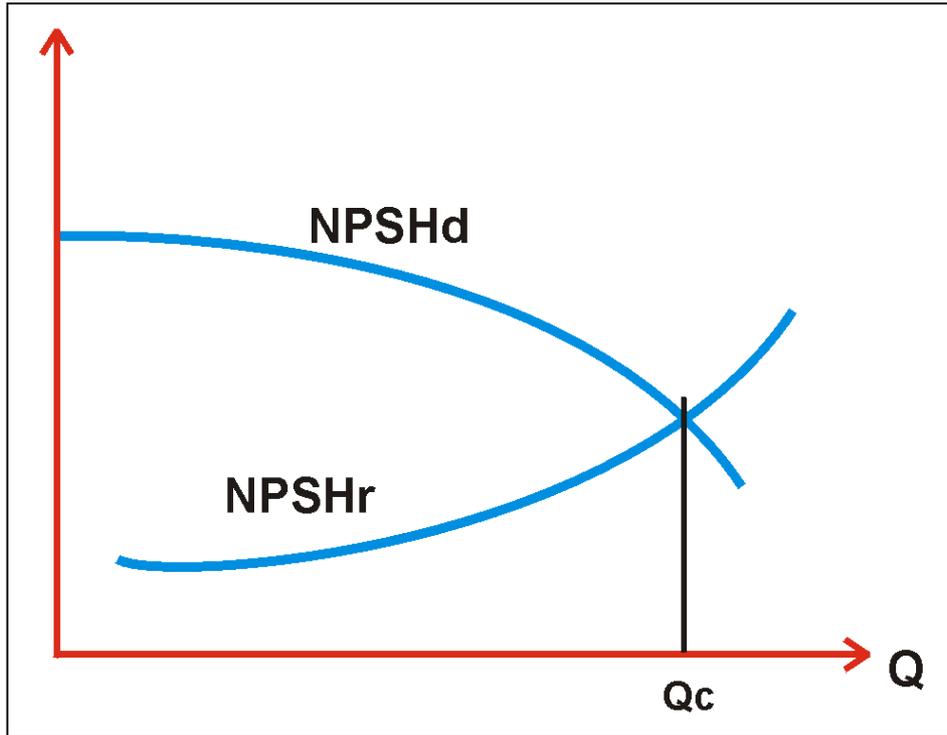
$$NPSH_d(Q) = \frac{P_{atm}}{\gamma} - h_A - h_v - KQ^2$$

Este término se denomina **altura neta positiva disponible (NPSH<sub>d</sub>)**, que depende tan solo de la instalación y del caudal.

El fabricante, nos dará para un tipo determinado de bomba, en función del caudal, una **altura neta positiva requerida (NPSH<sub>r</sub>)** para que no cavite la bomba, ya que el fabricante sabe en que punto del interior de la bomba se alcanza la presión menor.

La condición para que no se produzca la cavitación será:

$$NPSH_d > NPSH_r$$



Si colocamos en una gráfica ambas alturas en función del caudal, observamos que como **NPSH<sub>d</sub>** es decreciente con el caudal al contrario que **NPSH<sub>r</sub>** que es creciente, se llega a un punto en el que se igualan los valores ( $Q_c$ ).

Por lo tanto la bomba debe trabajar por debajo de este punto de funcionamiento.

Si variamos la altura de aspiración varía **NPSH<sub>d</sub>**, decreciendo conforme aumenta el valor de la altura de aspiración. La máxima altura de aspiración con el caudal  $Q$ , vendrá dado por la expresión:

$$h_A < \frac{P_{atm}}{\gamma} - h_v - KQ^2 - NPSH_r(Q)$$



## Cebado de la Bombas

En el momento del arranque de una bomba, el manguete de aspiración puede estar lleno de aire, una bomba centrífuga no puede aspirar aire con efectividad, por lo que, no es autosuficiente para crear la aspiración necesaria, para que la columna de líquido llene el rodete y pueda trasegar el agua y entrar en su funcionamiento normal.

La creación de unas condiciones de carga previas al arranque en la bomba es el denominado **proceso de cebado**, que se logra gracias a unos mecanismos que disponen las bombas.

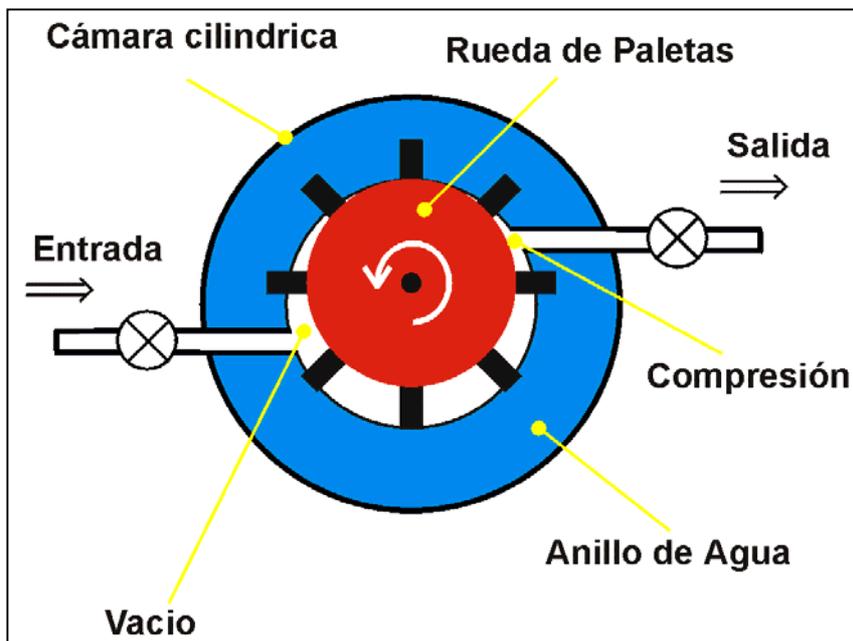
Describiremos los más habituales:

### Pistones alternativos

Este sistema consta de un pistón provisto de una lumbrera que se comunica con la aspiración de la bomba, por medio de una válvula.

Este embolo accionado manualmente o por el motor absorbe el aire que pudiera existir en el interior del conducto de aspiración.

### Anillo de agua



El mecanismo de anillo de agua se compone de una cámara cilíndrica que tiene en su interior una rueda de paletas que gira excéntrica respecto al eje del cilindro. Esta cámara posee dos conductos provistos de sus correspondientes válvulas, uno comunica con el cuerpo de la bomba y por el otro a una salida.

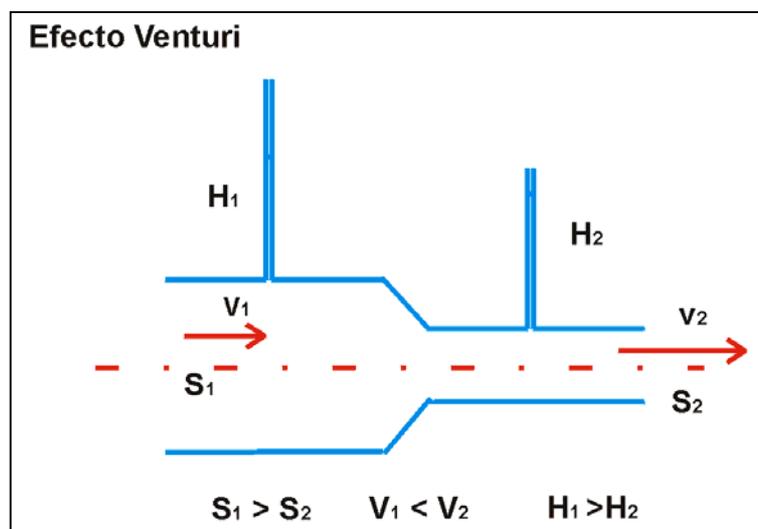
El anillo de agua esta lleno inicialmente, con la rueda de paletas girando, por efecto de la fuerza centrífuga, se forma alrededor de la rueda un anillo de agua de un determinado espesor.

Entre las paletas de la rueda se forman unas cámaras de capacidad variable a medida que ésta va girando. Al pasar, por delante del conducto que comunica la cámara cilíndrica con la espiración, las cámaras se hacen más grandes y por lo tanto se crea un vacío que es llenado con el aire que absorbe de la aspiración. Posteriormente al pasar por el conducto de expulsión del aire, la cámara disminuye de tamaño obligado a salir el aire.

Con este sistema se produce vacío en la aspiración y se llena de agua el cuerpo de la bomba.

### Sistema Venturi

Se basa en el **efecto Venturi**, que es una consecuencia del teorema de **Bernoulli**.



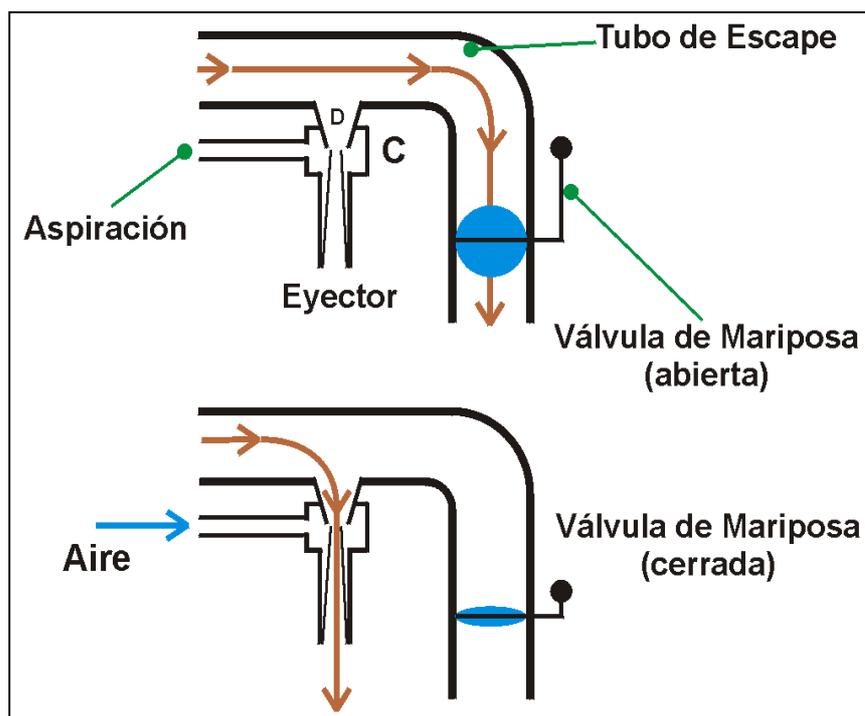
Cuando en un conducto se produce un estrechamiento, la ecuación de continuidad nos dice que aumenta su velocidad y por tanto la presión disminuirá.

Tal como se ve en la figura velocidad aumenta al pasar de la sección  $S_1$  a la  $S_2$ , a costa de una pérdida de presión ( $H_1 > H_2$ ).

Este sistema de cebado se emplea principalmente en motobombas, ya que necesita de los gases de escape del motor, para su funcionamiento.

El tubo de escape, que se puede cerrar por medio de una válvula de mariposa, presenta una derivación de forma cónica en su extremo (D), para que los gases tengan una mayor velocidad en ese punto. Esto trae consigo una menor presión y la cámara C se llena con el aire de los conductos de aspiración.

El aire saldrá mezclado con los gases de escape y se producirá un vacío en los tubos de aspiración que se llegarán de agua, cebando a la bomba.



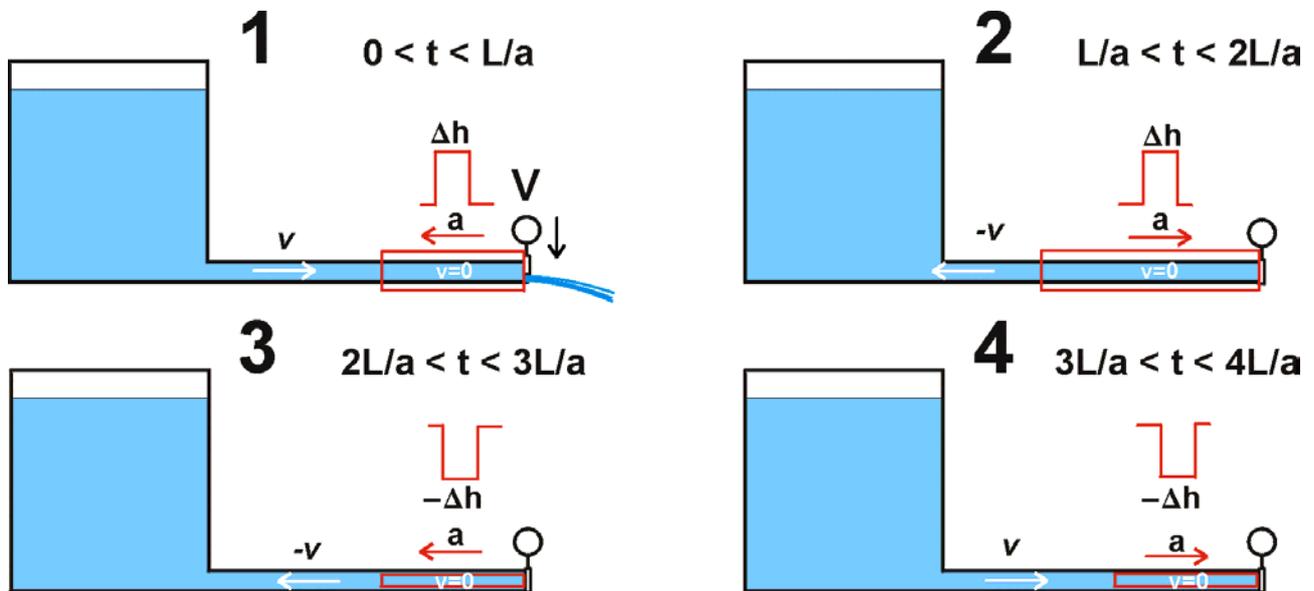
## Golpe de ariete

El fenómeno conocido como **golpe de ariete**, tiene lugar en una tubería o una manguera por la que circula agua con cierta velocidad y se interrumpe, por ejemplo, mediante una llave o la válvula de cierre de una lanza. 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.



Ciclo de la onda de presión en una tubería después de un brusco cierre de la válvula

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 esta 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 la elasticidad 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:

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

$\Delta h$ : 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 ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

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.

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:

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

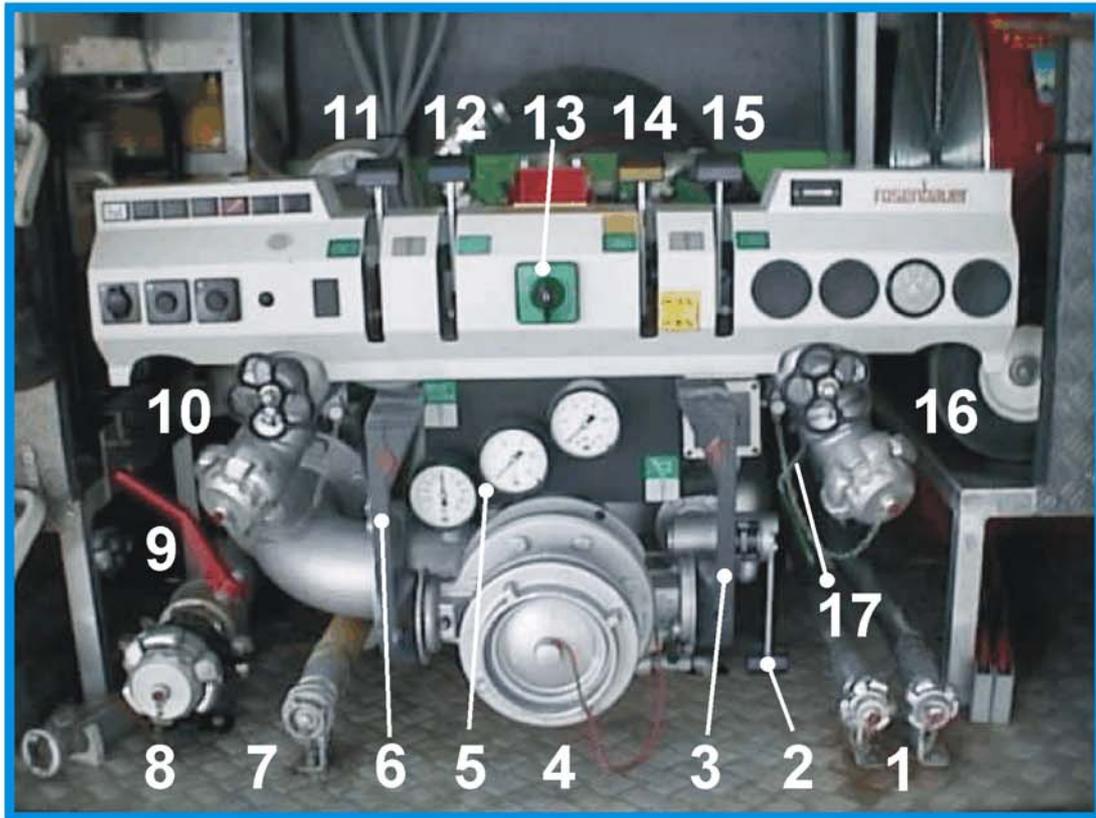
Hablamos de un incremento del 33% de la presión nominal, pero si empleamos una conducción de fibrocemento con  $a = 800 \text{ m/s}$ , esta sobrepresión sube a 12 atm, duplicándose la presión de régimen.

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.

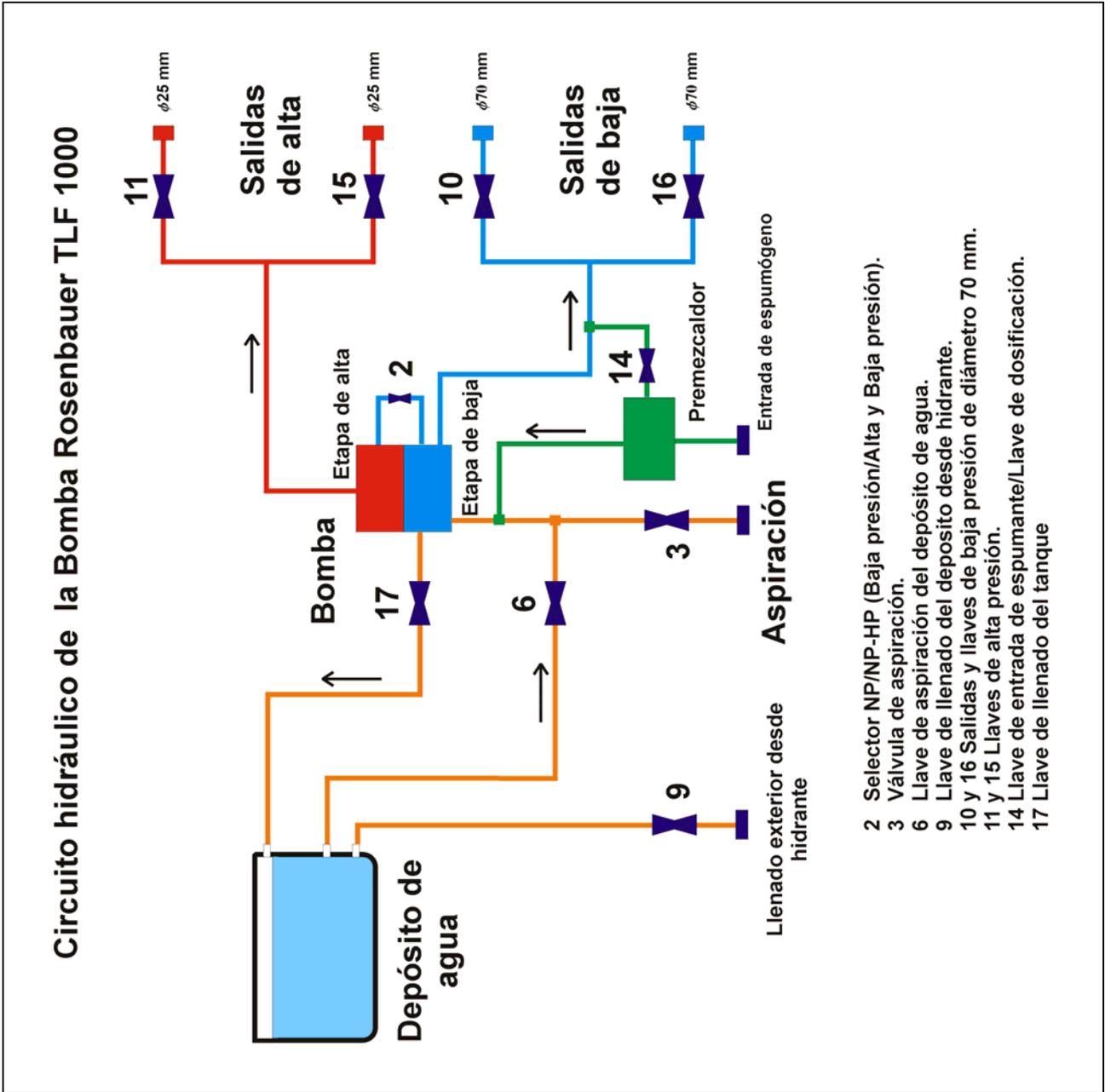
En las instalaciones de mangueras habituales, siempre que cerremos una válvula de una lanza, los tiempos de cierre estarán muy por encima de este límite, pues en el caso de una instalación de 100 metros y una tubería de PVC, que en el caso de las mangueras sería menor la velocidad, este tiempo es de un segundo.

A pesar de todo, siempre tenemos que tener en cuenta el golpe de ariete para evitar sobrepresiones a la salida de la bomba, y para un mejor funcionamiento de la instalación. Teniendo en cuenta lo fácil que resulta evitarlo con tan solo cerrar la lanza con un cierre lento (mayor que un segundo).

# Bomba Rosenbauer TLF 1000 instalada en una Autobomba Urbana Ligera



- 1 Salidas de alta presión de diámetro 25 mm.
- 2 Selector NP/NP-HP (Baja presión/Alta y Baja presión).
- 3 Válvula de aspiración.
- 4 Aspiración.
- 5 Monovacúmetro y manómetros de alta y baja presión.
- 6 Llave de aspiración del depósito de agua.
- 7 Aspiración exterior de espumógeno.
- 8 Boca de llenado del depósito desde hidrante.
- 9 Llave de llenado del depósito desde hidrante.
- 10 y 16 Salidas y llaves de baja presión de diámetro 70 mm.
- 11 y 15 Llaves de alta presión.
- 12 Cebador.
- 13 Acelerador.
- 14 Llave de entrada de espumante/Llave de dosificación.
- 17 Llave de llenado del tanque



# Motobomba HOMELITE FP250



- 1 Motor de explosión de cuatro tiempos.
- 2 Cuerpo de la Bomba.
- 3 Cebador por sistema Venturi.
- 4 Depósito de combustible.
- 5 Aspiración.
- 6 Impulsión.
- 7 Manómetro.

## Equipamiento auxiliar de una motobomba



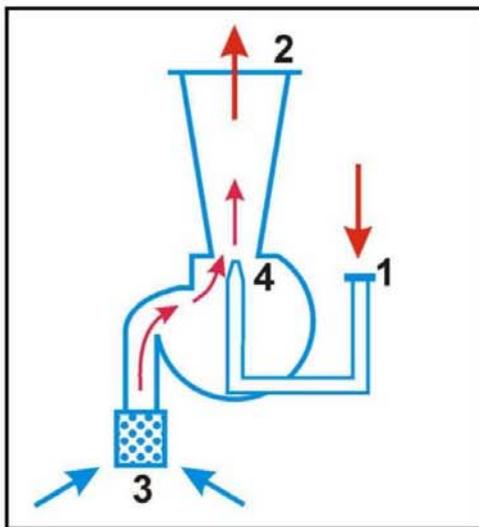
- 1 Lanza reguladora de caudal.
- 2 Bifurcación de 70 a 45 mm.
- 3 Manguera de 45 mm.
- 4 Mangote de aspiración.
- 5 Manguera de 70 mm.
- 6 Reducción de 70 a 45 mm.

# Hidroejetor



El Hidroejetor, es una máquina hidráulica, con la cual podemos aspirar agua o otro líquido, utilizando el agua que impulsamos con ayuda de una bomba.

El líquido aspirado y el impulsor se mezclan a la salida.

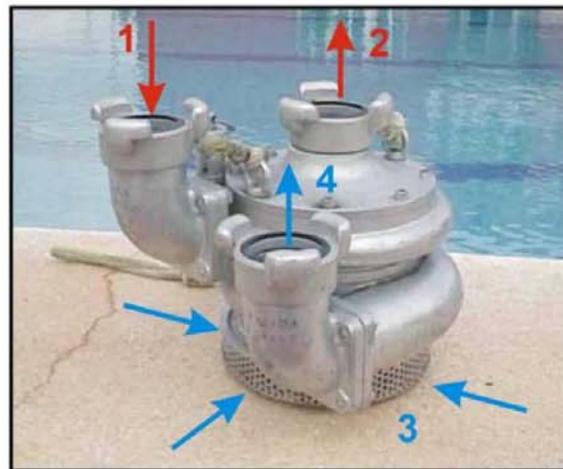
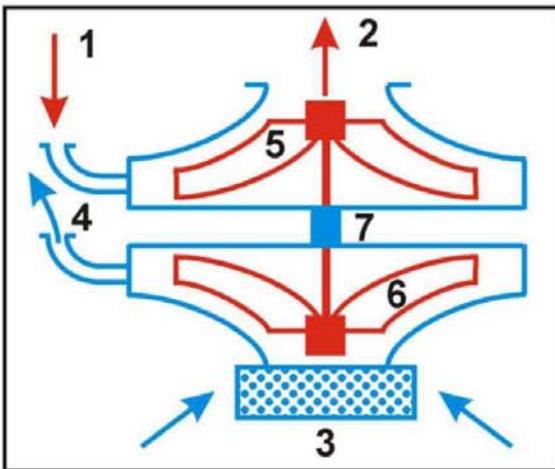


El agua a presión, procedente de la bomba del vehículo entra por (1), transformando su energía de presión en velocidad en el estrechamiento (4), esto hace que disminuya la presión, en virtud del Efecto Venturi, y aspira el líquido que entra por la entrada (3).

La mezcla de agua aspirada y motriz sale por la salida (2).



# Turbobomba



Una Turbobomba es una bomba centrífuga que utiliza como fuerza motriz el agua impulsada por otra bomba.

Esta formada por una turbina (5) que gira en el mismo eje que el rodete de una bomba (6). Éstos giran dentro de dos carcasas independientes, unidas por medio de un cojinete con prensaestopas para aislar líquido impulsor del trasegado.

En la entrada (1), se conecta una manguera, por donde entra el agua impulsada por la bomba de un vehículo contraincendios. Hace rodar la turbina (5) y sale hacia el depósito del vehículo por la salida (2).

El rodete (6) funciona como una bomba convencional aspirando el líquido a trasegar por la abertura (3), provista de un filtro, e impulsándolo por la salida (4).

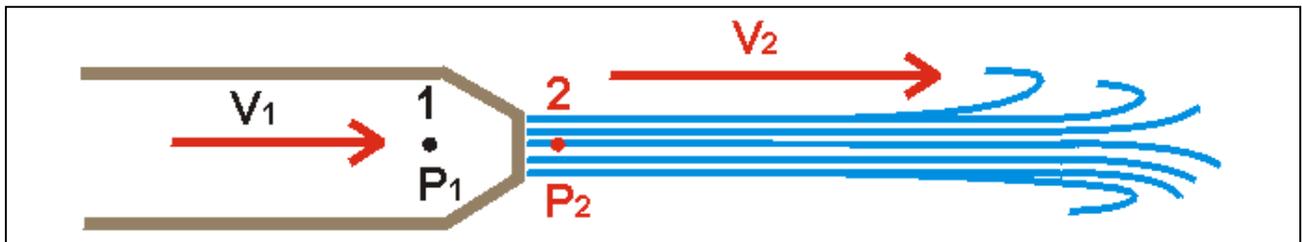
Para su correcto funcionamiento, la Turbobomba debe estar sumergida prácticamente dentro del agua.

## Lanzas



La lanza es un aparato hidráulico que situamos al final de una instalación con objeto de transformar la energía de presión, que nos esta proporcionado la bomba, en velocidad con el fin de "lanzar" el agua tan lejos como sea posible con el fin de atacar el fuego<sup>7</sup>.

Si al final de una manguera colocamos un pequeño estrechamiento:



Aplicando **Bernoulli** entre los puntos 1 y 2 tenemos:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

Como la presión en  $P_2$  es la atmosférica la presión manométrica, será nula:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_2^2}{2g}$$

<sup>7</sup> A esta característica de la lanza es lo que se conoce como **alcance**

Expresión que nos da la velocidad de salida del agua en función de la presión y de la velocidad de circulación.

Para ver el orden de magnitud de esta velocidad de salida, supongamos que por la manguera circula agua con una velocidad <sup>8</sup> de **2 m/s** a una presión de **7 bares**. Esto se traduce en una velocidad a la salida de **37 m/s**, en efecto:

$$\frac{P_1}{\gamma} = 70 \text{ m.c.a.}$$

$$\frac{v_1^2}{2g} = \frac{(2 \text{ m/s})^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,204 \text{ m.c.a.}$$

$$v_2 = \sqrt{\left(\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g}\right) \times 2g} = \sqrt{70,204 \text{ m.c.a.} \times 2 \times 9,81 \text{ m/s}^2} = 37,11 \text{ m/s}$$

El caudal que sale por el estrechamiento es igual a:

$$Q = K S \sqrt{P}$$

Donde:

**S**: es la sección del orificio de salida

**P**: es la presión manométrica en punta de lanza.

**K**: es una constante que tiene en cuenta la forma del orificio de la lanza.

Según esta expresión, conocida como **ecuación de descarga**, para una presión fija en punta de lanza, el caudal varía si modificamos la sección **S** o la constante **K**.

Los diseños actuales de lanzas para bomberos permiten variar la forma del orificio de salida, generando los denominados **efectos**<sup>9</sup>.



<sup>8</sup> Esto representa, aproximadamente, la velocidad con la que circula el agua por una manguera de 45 mm de diámetro, por la que circula un caudal de unos 200 litros/min.

<sup>9</sup> También conocido como chorro, niebla, cortina de protección, etc.

Hay cuatro tipos básicos de lanzas: de chorro, de caudal constante, selectoras de caudal y las lanzas automáticas.



Lanzas de chorro

Las **lanzas de chorro** es el diseño más simple de lanza que existe, al no poseer obstáculos en el recorrido del agua le confiere a la misma el máximo alcance, en función del orificio de salida. Los primeros modelos no poseían los efectos de niebla o cortina de protección. Con posterioridad han aparecido las **lanzas multifectos** con un diseño más moderno, con la posibilidad de cierre, chorro, pulverización y niebla. Este tipo de lanza presenta el inconveniente de que el caudal que proporciona la lanza varía al variar el efecto.

Las **lanzas de caudal constante** tiene la peculiaridad de permanecer constante su caudal a una presión fija al variar el efecto.

Las lanzas de caudal constante han evolucionado con la aparición de dos modelos: las **selectoras de caudal** y las **lanzas automáticas**.

Una **lanza selectora de caudal** es aquella que esta diseñada para que una vez fijada una presión en punta de lanza, podamos seleccionar, generalmente cuatro caudales con tan solo variar la sección de salida de la lanza.

### Lanza Selectoras de Caudal de 25 mm



(1) Orificio de Salida. (3) Variador de efecto. (4) Pieza Seta. (5) dientes giratorios



La lanza selectora de caudal conserva el mismo caudal al variar el efecto ya que en su diseño es independiente el orificio de salida (1) del dispositivo que genera el efecto (3). Este tipo de lanza, al igual que los de otro tipo, dispone de una válvula de cierre (6), para cortar el paso del agua. La selección del caudal se realiza fijando la sección del orificio de salida que se encuentra entre dos piezas, una móvil con forma cilíndrica (2) y otra fija con una cabeza en forma de seta (4). Cuando giramos el anillo de selección manual del caudal, la apertura (1) se abre o cierra ya que se desplaza el cilindro (2) coaxialmente con la pieza (4). Así de acuerdo con la ecuación de descarga de la lanza, fijada una presión de trabajo, un aumento de la sección lleva consigo el aumento del caudal.

Para generar un efecto, un giro del selector hace que la pieza (3) se desplace haciendo que los dientes giratorios (5) se interpongan con el chorro de agua, generado el efecto deseado, como esto ocurre después del orificio de salida (1), el caudal permanece constante.

Las **lanzas automáticas**, también denominadas de presión constante, son aquellas que disponen de un mecanismo por el que mantienen constante la presión en punta de lanza dentro de un amplio rango de caudales. La lanza regula automáticamente los aumentos o descensos del caudal manteniendo la presión y el alcance constante. Hay que tener en cuenta en esta lanza que como el alcance varía poco con un descenso de caudal en la instalación el punta de lanza puede tener una sensación falsa de seguridad de que la cantidad de agua es la adecuada para apagar el fuego y puede no saber cuanta agua esta fluyendo.

## Premezcladores de espuma

La **espuma** es una masa de burbujas estable, obtenida al introducir aire en una mezcla de un líquido denominado **espumógeno** y agua (**solución espumante**). Al extenderla sobre una superficie incendiada de un combustible, ésta forma una capa resistente y continua que aísla del aire e impide el desprendimiento de vapores combustibles.



**Espuma de baja expansión**

Los **premezcladores** o **proporcionadores de espuma** son los aparatos destinados a realizar en la proporción justa, la mezcla de espumógeno y agua (espumante) que con posterioridad se transformará en espuma en una lanza especial (**generador de espuma**), que se coloca al final de la instalación.



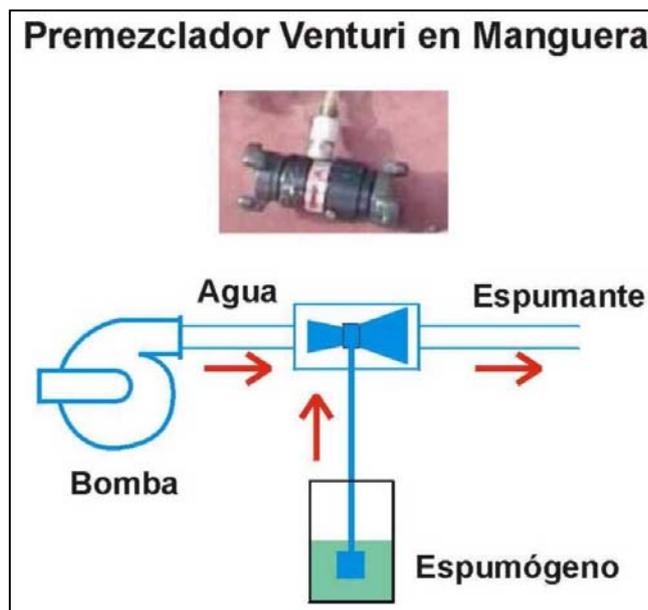
**Generador de espuma de media expansión**

Los premezcladores pueden realizar la mezcla en la aspiración de la bomba o a la salida de la misma.

Los premezcladores instalados en las bombas de los vehículos son del tipo **venturi** y su funcionamiento es el siguiente:

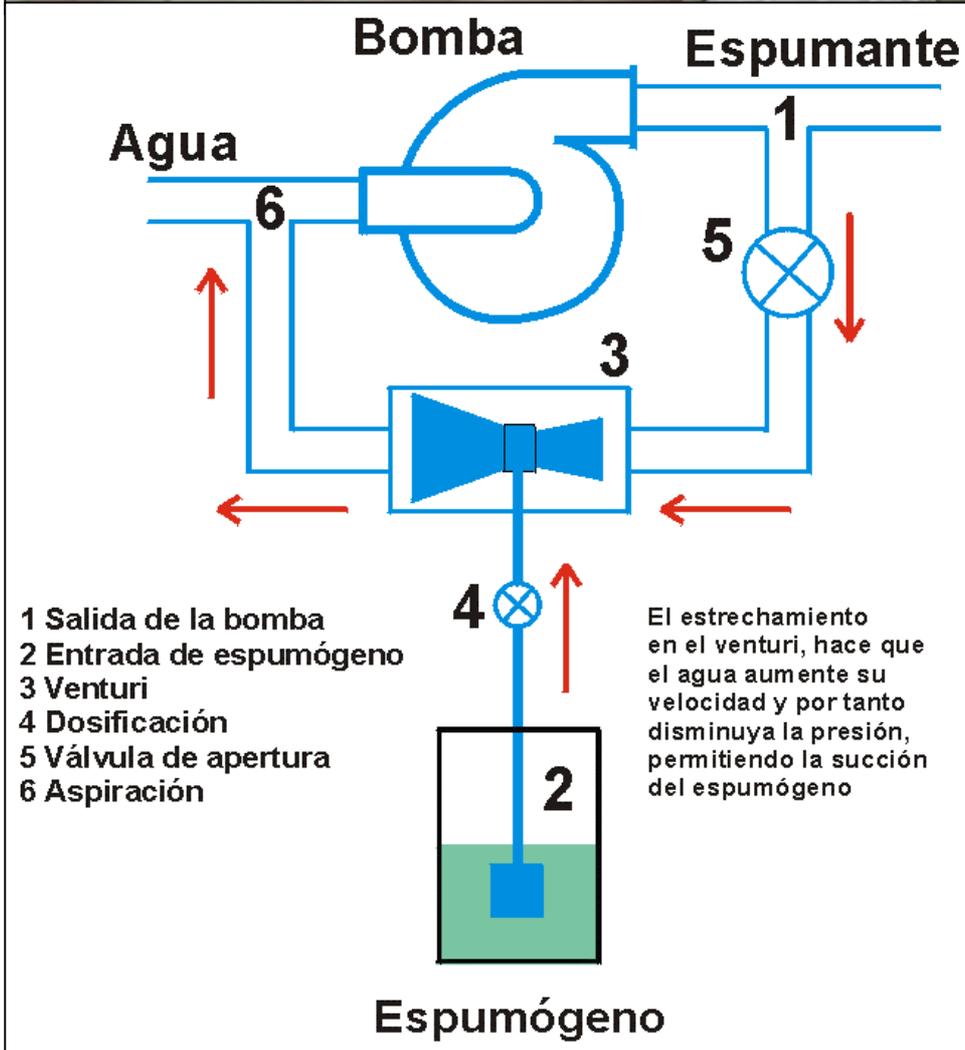
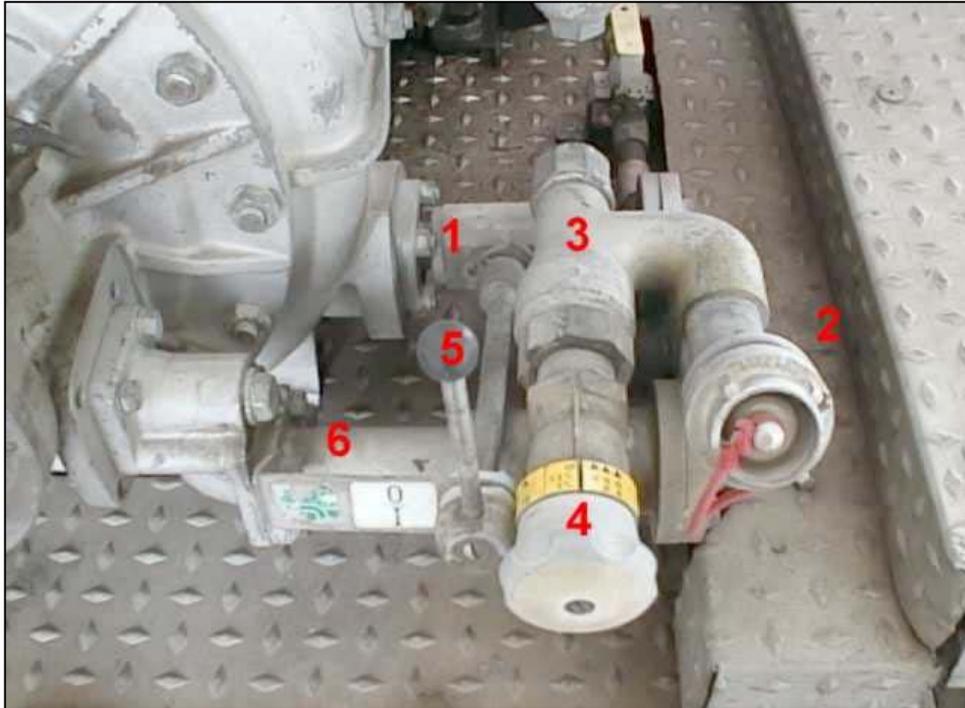
Entre la salida y la impulsión de la bomba se crea un circuito que se usa para succionar espumógeno por medio de un dispositivo que actúa por efecto venturi. Este se diseña para que fijando un caudal nos dé espumante en una proporción determinada.

También se puede colocar el dispositivo venturi intercalado en la instalación de manguera o en punta de lanza, junto con un depósito para espumógeno.

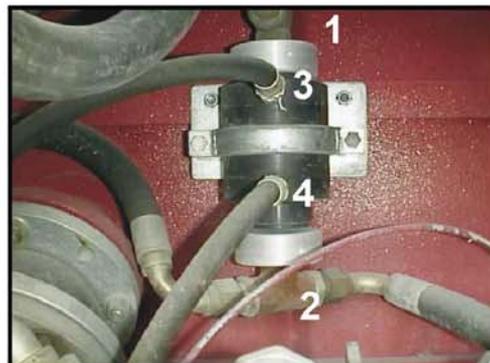
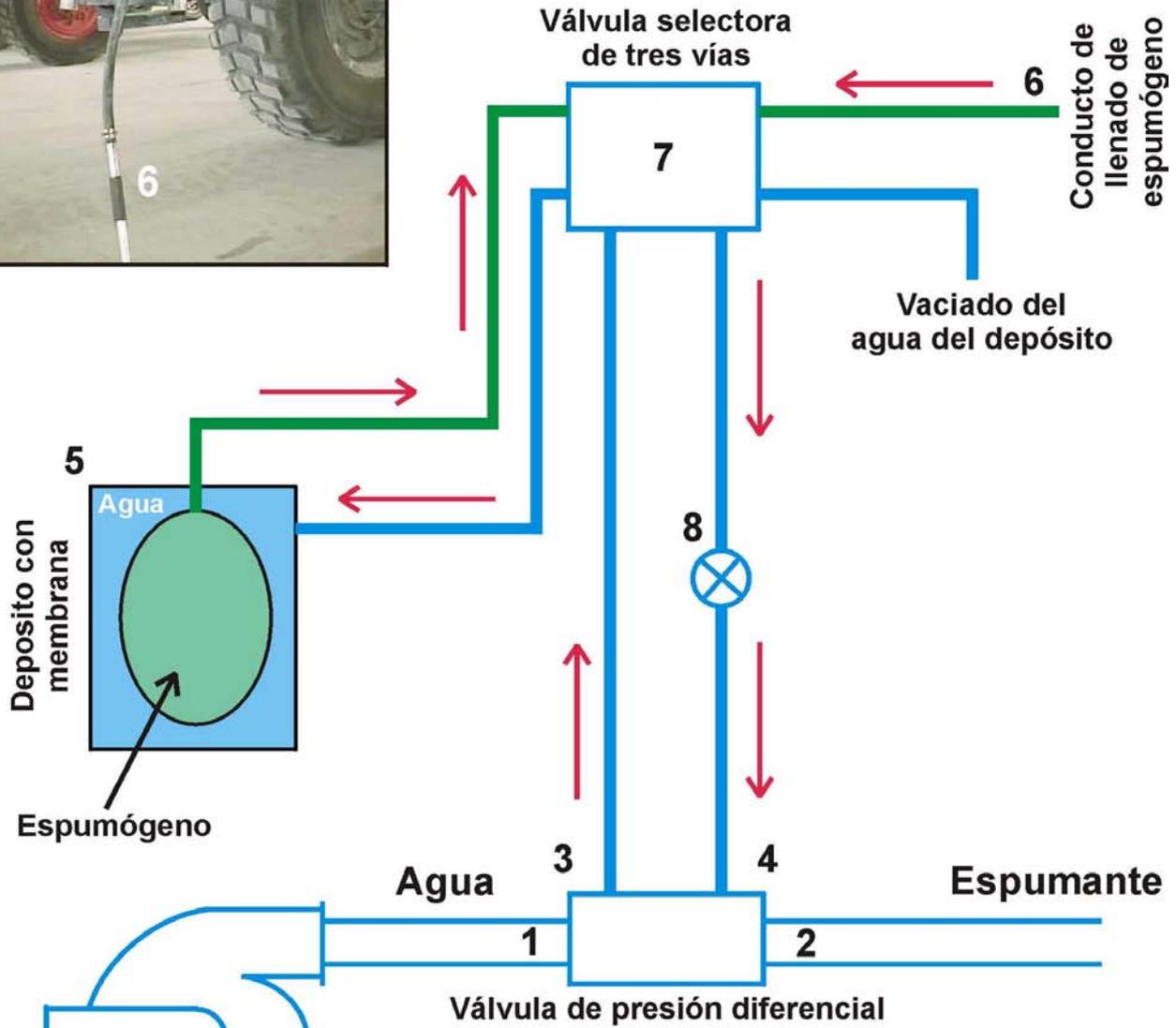


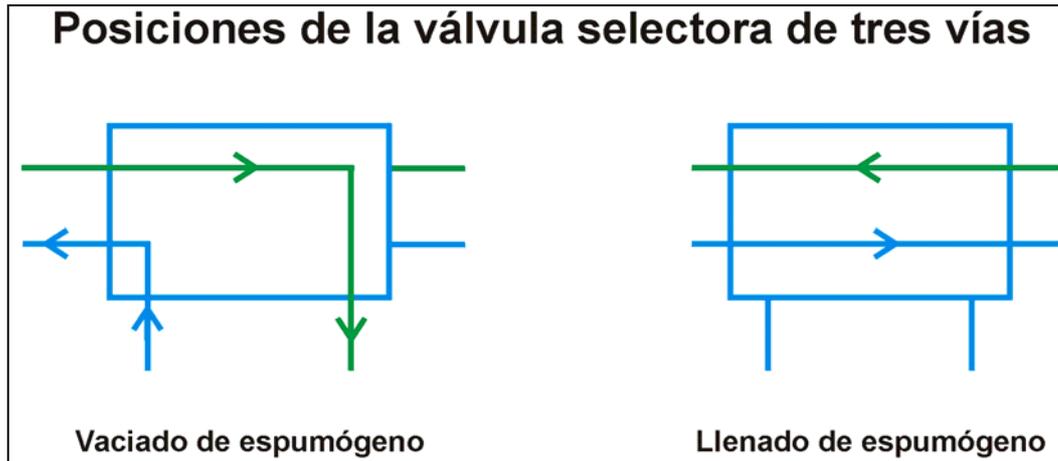
**Premezclador y depósito en punta de lanza**

## Premezclador Venturi en Bomba de Vehículo



# Premezclador por Deposito de Membrana





### Premezclador por Deposito de Membrana

Consta de un depósito en cuyo interior hay una bolsa o membrana que contiene el espumógeno.

A la salida de la bomba se encuentra instalada una válvula de presión diferencial que toma agua que conduce al deposito de membrana a través de una válvula de tres vías que se encuentra en la posición de vaciado según la figura.

La presión que ejerce el agua al entrar en el depósito sobre la bolsa hace que el espumógeno salga, y se mezcle con la corriente de agua en la válvula de presión diferencial, con la proporción seleccionada por medio de una válvula (8).

Cuando se vacía la bolsa, se selecciona la posición de llenado de espumógeno en la válvula de tres vías. Por medio de una pequeña bomba accionada por medio de motor eléctrico o manualmente hacemos entrar espumógeno en la bolsa. El agua sale por un conducto al efecto.

Este tipo de premezclador no tiene partes móviles y puede ser portátil o fijo en un vehículo.

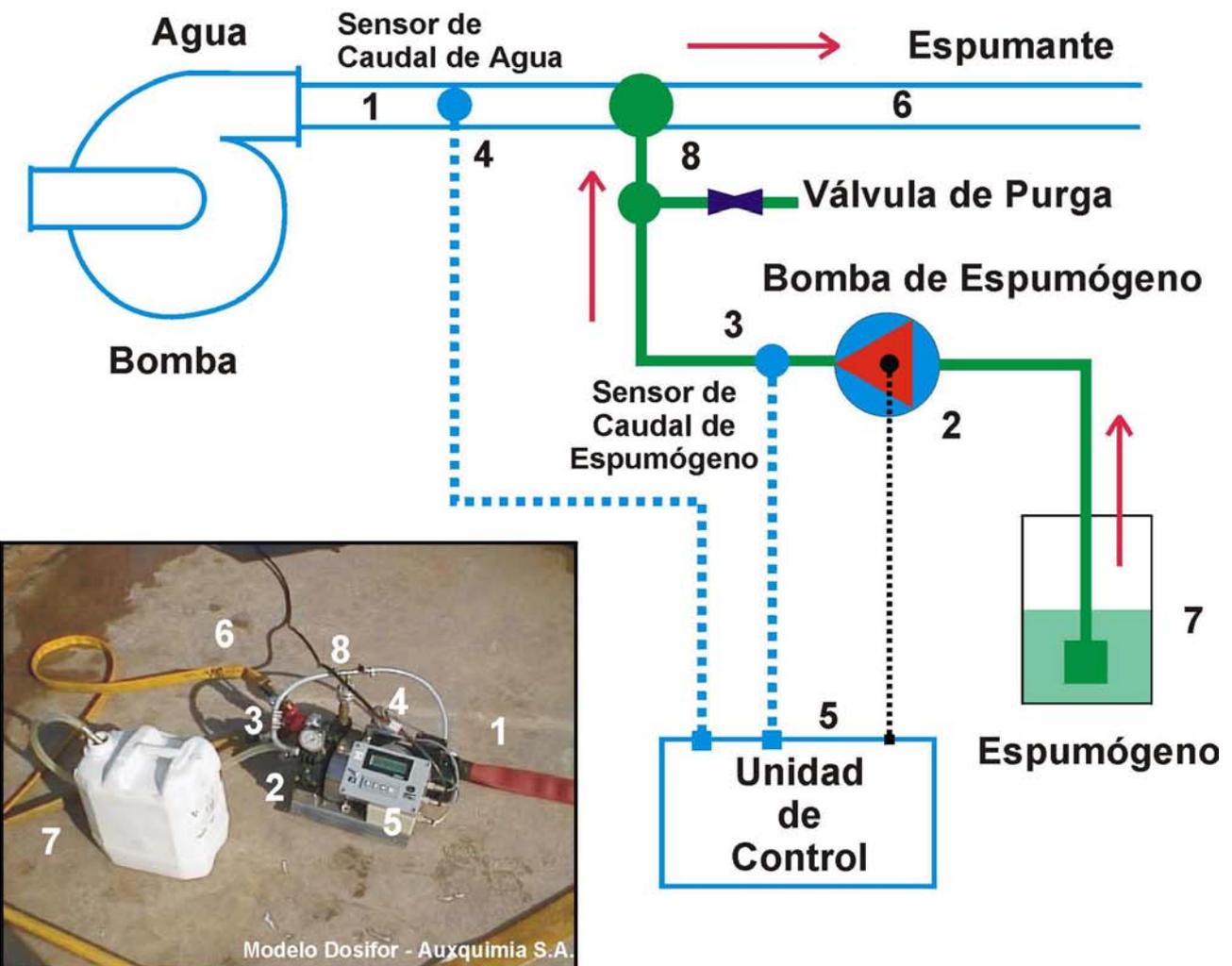
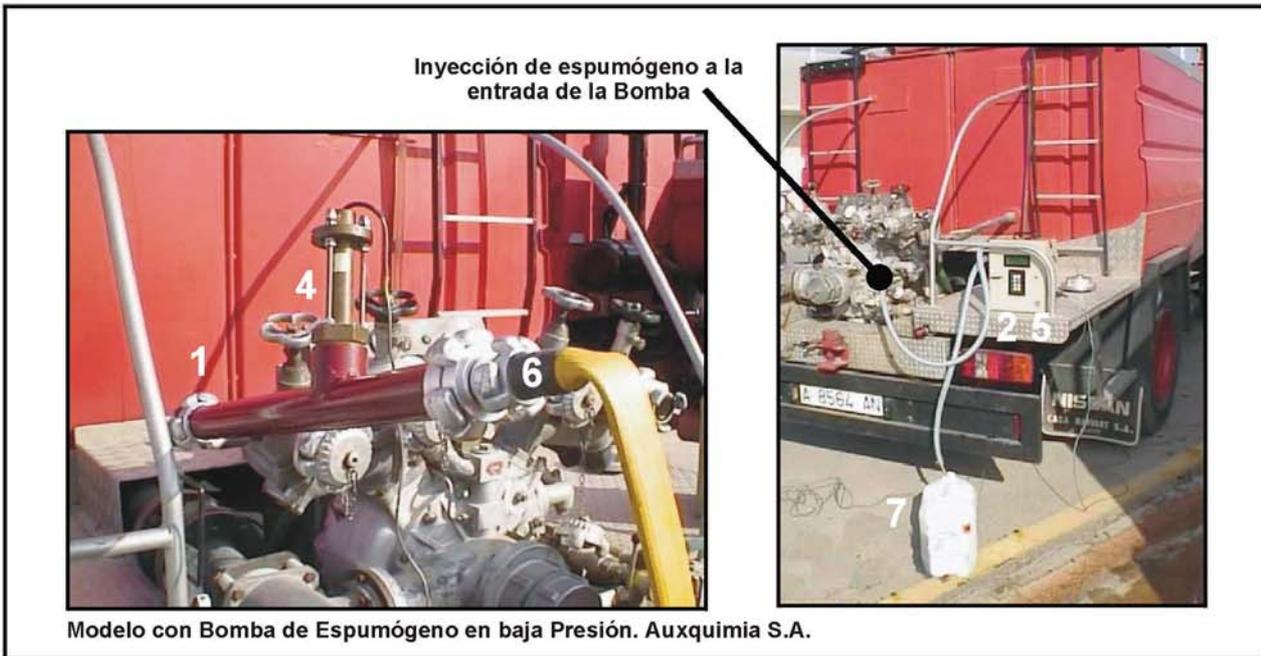
### Premezclador por Inyección Directa

Emplea un sistema electrónico de control mediante un pequeño microprocesador.

Se mide mediante un sensor el caudal de agua que trasiega la bomba y el microprocesador calcula el caudal de espumógeno necesario para conseguir la proporción deseada. Así si tenemos un caudal de 100 litros/min. y estamos trabajando con un espumógeno al 0,3% necesitaremos adicionar al agua un caudal de 0,3 litros/min de espumógeno.

El procesador regula la velocidad de una bomba que trasiegue el caudal de espumógeno calculado, el cual es inyectado a la salida o entrada de la bomba, dependiendo de la presión de trabajo de la bomba de espumógeno.

# Premezclador por Inyección Directa



## Generadores de Espuma



Lanza convencional con expensor de espuma de baja



Lanza de espuma de media

Para la generación de la espuma a partir de la mezcla espumante es necesario adicionar el aire. Esto se consigue mediante los llamados **generadores de espuma**.

Un generador de espuma puede ser un dispositivo que se coloca en una lanza convencional o una lanza exclusiva para espuma.

Se diseña de tal forma que se genera una depresión a la entrada de una cámara de expansión por medio de un estrechamiento (principio de venturi), unas aberturas colocadas radialmente en la cámara de expansión.

En esta cámara se forman las burbujas que se expanden y combinan formando la espuma.

