

Bombas centrífugas



6.- Bombas centrífugas.

Las bombas son las máquinas más usadas y las más útiles de todas las máquinas hidráulicas
Henri Pitot (1695 – 1771)

6.1.- Introducción

La norma UNE EN 1028-1:2006 define **bomba centrífuga contra incendios**, como aquella *maquina hidráulica accionada mecánicamente destinada al suministro de fluidos con objeto de luchar contra los incendios*, es decir es una máquina, por lo tanto transforma energía, en este caso mecánica en hidráulica. Su misión es proporcionar agua a la presión necesaria para que pueda circular por las mangueras, salvar los desniveles que puedan existir entre la bomba y el incendio y llegar a la lanza con la presión suficiente para que el fluido alcance una distancia determinada y así, poder trabajar con seguridad.

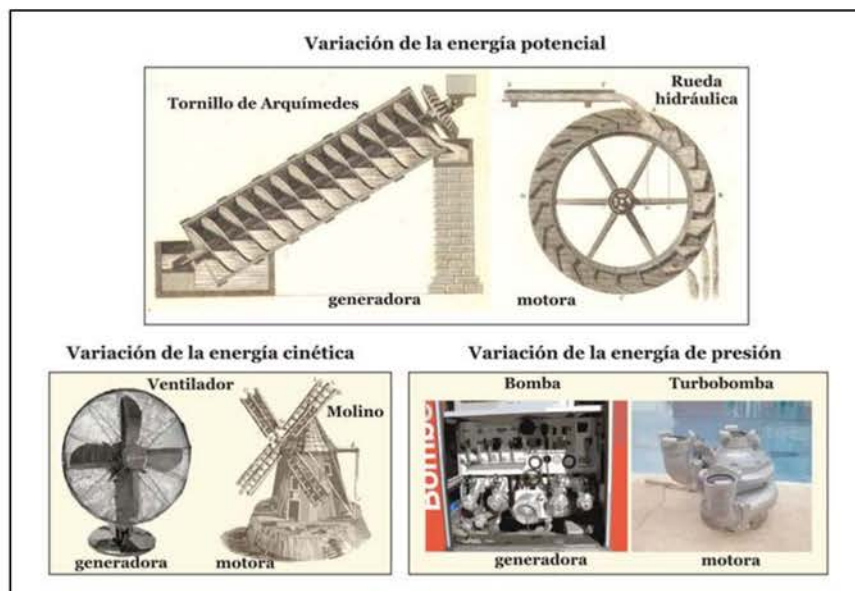
Una bomba es un ejemplo de lo que se entiende por **máquina de fluido**, que es cualquier dispositivo que intercambie energía mecánica con un fluido que la atraviesa. Las máquinas de fluido se clasifican en función de la compresibilidad del fluido en:

Máquinas hidráulicas en las que el intercambio de energía se produce con un fluido incompresible. A este grupo pertenecen las máquinas que trabajan con líquidos, como el agua, pero se pueden incluir las que trabajan con gases a velocidades bajas, como por ejemplo en los ventiladores.

Máquinas térmicas en las que el intercambio de energía se realiza con un con fluidos compresibles, A este grupo pertenecen los motores de combustión interna, las turbinas de vapor, etc. Este tipo de máquinas no son objeto de nuestro tema.

Si el fluido incrementa su energía, la máquina se denomina **generadora**, ejemplos de este tipo son los compresores de aire o las bombas hidráulicas. Por el contrario si la energía del fluido disminuye, la máquina se denomina **motora**, como pueden ser las turbinas hidráulicas, las turbobombas o los motores de explosión.

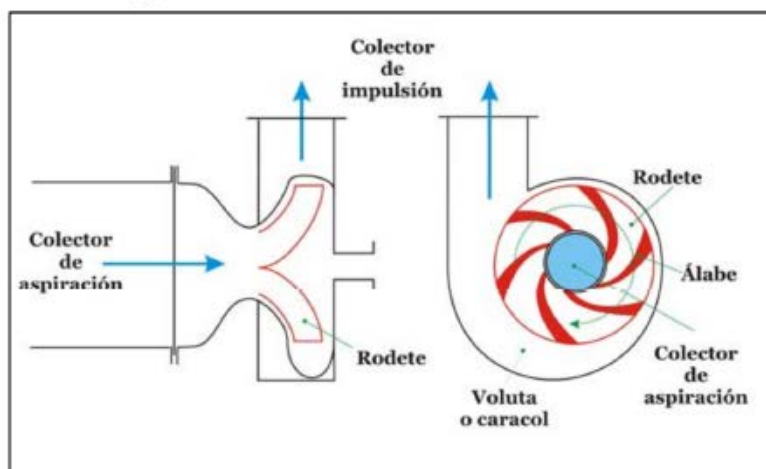
Atendiendo al tipo de energía que se intercambia con el fluido que atraviesa las **máquinas hidráulicas** pueden ser de distintas formas:



Si nos atenemos a las máquinas hidráulicas generadoras (bombas) que intercambian energía de presión, podemos encontrar, según como intercambian la misma dentro de la máquina, a dos tipos de bombas: las de **desplazamiento** y las **turbomáquinas**.

Bombas de desplazamiento: basan su funcionamiento en aplicar una fuerza (o par si son rotativas) de una cámara de trabajo y su posterior vaciado de una manera periódica. El aumento de la energía del fluido se efectúa directamente en forma de energía de presión. Son por ejemplo las **bombas de pistón**, las **bombas peristálticas**, las **bombas de membrana o de diafragma**.

6.2.- Elementos y principio de funcionamiento de una bomba centrífuga.



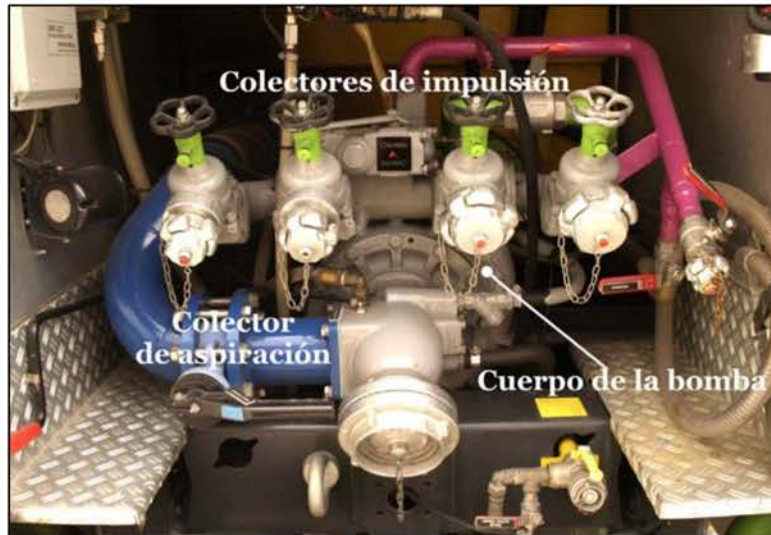
El funcionamiento de una bomba centrífuga es el siguiente, el agua entra axialmente por el centro de un elemento móvil denominado **rodete** o impulsor, el cual está girando accionado por el motor. El rodete dispone de unas canalizaciones denominadas **álabe**s por las que el agua es canalizada desde el centro

hasta su borde, donde es expulsada. Durante este trayecto el fluido es acelerado por la **fuerza centrífuga** generada en el rodete¹⁹. El agua sale del mismo con presión y velocidad. A continuación entra en una canalización²⁰ en forma de espiral que rodea al rodete, es la **voluta** o caracol. El fluido que entra en esta conducción a gran velocidad, es frenado por el progresivo aumento de su sección, tal como establece la ecuación de continuidad y por principio de Bernoulli, incrementando la presión, que tenía a la salida del rodete, hasta un valor concreto en el colector de impulsión.

La bomba, así descrita, corresponde a una bomba centrífuga de un solo rodete. Si a la salida se conecta otro rodete (acoplamiento en serie), haremos que el agua aumente más su presión. Atendiendo a la presión que pueden suministrar las bombas se clasifican en: **Bomba de Presión Normal (FPN)** son aquellas que con uno o varios rodetes, son capaces de dar presiones de funcionamiento hasta 20 bares y **Bomba de Alta Presión (FPH)** es una bomba que da hasta 54,5 bares. Se denomina **Bomba de Presión Combinada** a aquella que agrupa las dos clases de bomba en una sola máquina. Esto se consigue haciendo rodar sobre el mismo eje dos bombas conectadas en serie, que nos dan las dos gamas de presión alta y normal.

En una bomba centrífuga contra incendios podemos distinguir las siguientes partes: **Colectores de aspiración**, desde donde se alimenta la bomba desde un depósito o por aspiración a través de un manguito, **cuerpo de la bomba**, **colectores de impulsión** donde se conectan las mangueras y los **elementos auxiliares**, tales como los manómetros, el cebador, válvulas, racores, etc.

Las bombas destinadas para los servicios de bomberos, pueden ir instaladas o bien en vehículos contra incendios o en grupos motobombas. En el primer caso es accionada por la energía motriz del motor del vehículo y en el caso de las motobombas, la bomba dispone de un motor eléctrico o de explosión para su accionamiento.



BOMBAS CENTRÍFUGAS. COMPONENTES Y SU FUNCIÓN

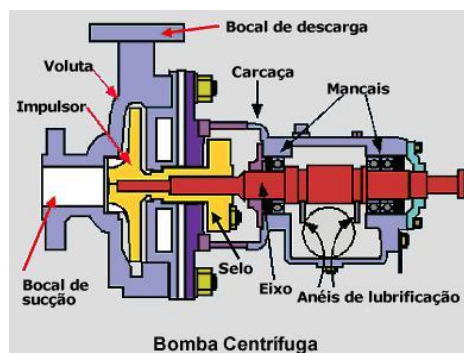
Los materiales con los que se construye una bomba centrífuga son variados, aunque cabe destacar la fundición laminar gris y el eje de acero. También se fabrica en otros materiales como bronce, acero inoxidable, fundición nodular y acero al carbono.

Por lo general las bombas son proyectadas de forma que pueda verificarse todo el complejo rotativo sin necesidad de desmontar el cuerpo de la bomba de la instalación. Es decir, su forma permite desmontar las partes giratorias manteniendo el cuerpo de bomba fijo a las tuberías de aspiración e impulsión, conservando la alineación inicial mediante el acoplamiento con espaciador; también llamado distanciador.

Soltando el espaciador o distanciador, se desmonta el conjunto formado por el soporte, tapa e impulsor, quedando el cuerpo de bomba y el motor siempre fijos a la bancada. Las tuberías de aspiración e impulsión permanecen enbridadas resultando especialmente útil cuando se trata de una instalación fija con varias bombas.

El acabado de las superficies en contacto con el líquido circulando a gran velocidad tiene gran importancia en cuanto a rendimiento hidráulico, mecánico y también en cuanto a la durabilidad, es decir, si el agua circulante encuentra una discontinuidad en la superficie, se produce una zona de presión y de vacío que dan lugar a fenómenos turbillónicos (cavitación) con gran consumo de energía y un alto poder destructivo por erosión. Por estos motivos es necesario recurrir a procedimientos de fundición muy sofisticados que permitan estas calidades de acabados.

Una bomba rotativa centrífuga está compuesta de elementos rotativos y estacionarios.



2. Componentes estacionarios:

a. **Carcasa o cubierta.** Las carcasas son generalmente de dos tipos:

- i. Circulares concéntricas, utilizadas para cargas bajas y capacidades altas. Tiene paletas deflectoras estacionarias que convierten la energía cinética en energía presión. Se utilizan, generalmente, en bombas difusoras.
- ii. En voluta, que proporcionan una carga más alta. La voluta aumenta el área de sección transversal en el punto de descarga, reduciendo la velocidad del líquido y aumentando su presión. Ayuda a equilibrar la presión en el eje de la bomba, por eso trabaja mejor a las capacidades recomendadas por el fabricante. En muchas ocasiones se considera la voluta como un componente más de la bomba centrífuga.

El colector o voluta, es un órgano fijo que está dispuesta en forma de caracol alrededor del rodete, a su salida, de tal manera que la separación entre ella y el rodete es mínima en la parte superior, y va aumentando hasta que las partículas líquidas se encuentran frente a la abertura de impulsión, esto es, tiene una sección creciente hasta la salida. El colector acaba con una salida tangencial que está formada por un cono divergente que ha de tener una longitud determinada respecto a los diámetros. Esta forma de colector favorece la transformación de energía cinética en energía de presión; es por tanto un transformador de energía, ya que frena la velocidad del líquido, transformando parte de la energía dinámica creada en el rodete en energía de presión, que crece a medida que el espacio entre el rodete y la carcasa aumenta, presión que se suma a la alcanzada por el líquido en el rodete.

Su misión, aparte de la transformación de energías, es la de recoger el líquido que abandona el rodete a gran velocidad, cambiar la dirección de su movimiento y encaminarle hacia la brida de impulsión de la bomba.

En algunas bombas existe, a la salida del rodete, una corona directriz de álabes que guía el líquido antes de introducirlo en la voluta

Existen cubiertas de doble voluta (una a 180° de la otra) para neutralizar las fuerzas de reacción que se presentan a capacidad reducida.

Las carcasas pueden ser sólidas o bipartitas. Si se trata de una carcasa sólida, toda ella, incluida la boca de descarga es una pieza única. Si, por el contrario, las partes que componen la carcasa son piezas unidas de forma horizontal o verticalmente estamos hablando de carcasas bipartitas horizontales o verticales (radiales) respectivamente.

b. **Bocas:**

- i. De succión o aspiración, que concluye prácticamente en la brida de aspiración.
- ii. De descarga o impulsión, instalada a la salida de la voluta, por la que el líquido es evacuado a la presión y velocidad creadas en la bomba.

Se encuentran a los lados de la carcasa y son perpendiculares al eje.

c. **Cámara de sellado o llenado.** Es una cámara separada de la carcasa de la bomba que forma una región entre el eje y la carcasa donde se instala el sistema de sellado.

Se llama de seguridad o sellado porque generalmente se sella la carcasa por medio de un sello mecánico. Cuando el sistema de seguridad se realiza mediante empaquetamiento, se llama cámara de llenado. Tiene la función de proteger la bomba contra escapes en el punto donde el eje atraviesa la carcasa de la bomba:

- Cuando la presión de la cámara es menor que la atmosférica, previene los escapes hacia la bomba
- Cuando la presión está por encima de la atmosférica, previene el escape de líquido hacia fuera de la bomba

A veces van provistas con mecanismos para realizar un control de temperatura.

Están compuestos de diferentes elementos:

1. La glándula, que ajusta el empaquetamiento al eje de la bomba. Consiste en un sello o junta de sellado que permite la refrigeración, el drenaje y la vía de respiración de acuerdo con los estándares.
2. Válvula estacionaria de garganta, que conforma una liberación íntima resistiva alrededor del eje; entre el sello o junta y el impulsor.
3. Válvula de regulación de presión, que restringe la liberación alrededor del eje.
4. Dispositivo circulante interno, que sirve para hacer circular el fluido de la cámara de sellado a un refrigerador o depósito de líquido. Se suele conocer como anillo o circuito de bombeo
5. Sello mecánico

6. Conjunto que alberga los mecanismos que mantienen el eje rotor en alineación correcta con las partes estacionarias, frente a la acción de las cargas radiales y transversales. Incluye también un pequeño depósito de aceite para lubricación, un nivel de aceite y una camisa para refrigeración por circulación de agua.

3. Componentes rotativos:

- a. **Impulsor o rodete.** Está formado por un conjunto de álabes que pueden adoptar diversas formas, según la misión a que vaya a ser destinada la bomba, los cuales giran dentro de una carcasa circular. El rodete es accionado por un motor, y va unido solidariamente al eje. Es la parte giratoria principal que proporciona la aceleración centrífuga al fluido.

El tipo de impulsor o rodete interviene en las características de la bomba. Un rodete con una anchura axial más grande que otro con igual diámetro, tendrá mayor capacidad para poder dar un caudal más grande.

Otra diferencia básica entre los diferentes rodetes es su diseño. El rodete consta de una serie de álabes curvados de tal forma que el flujo dentro de la bomba sea lo más suave posible. Cuanto mayor es el número de álabes del rodete, mayor es el control de la dirección de movimiento del líquido y, por tanto, menores son las pérdidas debidas a la turbulencia y circulación entre los álabes.

Los impulsores están contenidos dentro de la carcasa y pueden ser de diferentes tipos según su construcción mecánica:

- Cerrado. Limitan mucho la recirculación del líquido debido a los anillos flotantes, frontal y posterior del rodete. Tienen en general, más rendimiento que los abiertos, pero son más caros y complicados de construcción. Suelen utilizarse para impulsar líquidos limpios. Los álabes están soportados entre dos láminas y se reduce el retroceso del líquido a través del rodete.

Los impulsores cerrados necesitan **anillos de desgaste**, que son un problema de cara al mantenimiento de la bomba. Los anillos de desgaste permiten una articulación, fácil y económica a la hora de la renovación anti-escapes entre la carcasa y el impulsor. Si la liberación o espacio vacío entre las dos piezas se mantiene muy grande, la eficiencia de la bomba disminuirá, causando problemas de temperatura y vibración.

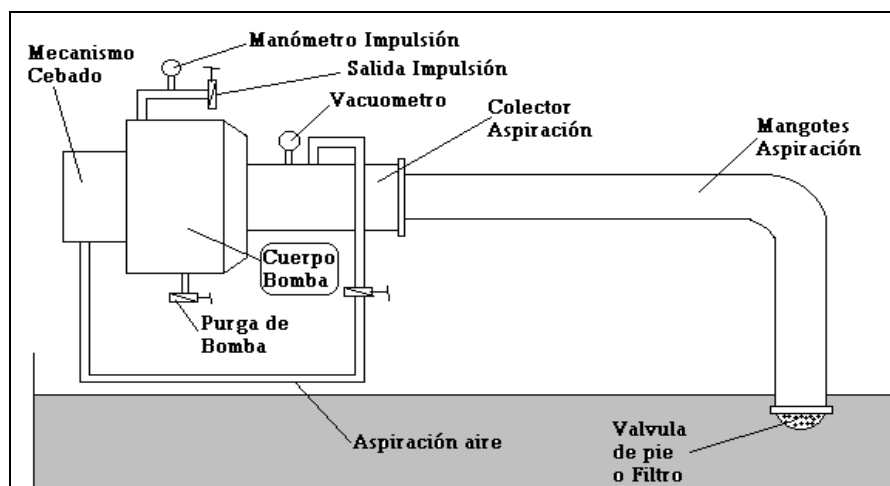
- Abierto, sin ninguna cobertura o pared para encapsular las paletas. Son bastante débiles estructuralmente y tienen una separación muy pequeña con el cuerpo de bomba para evitar una excesiva recirculación de líquido desde la zona de presión a la zona de aspiración. Tienen en general, un rendimiento inferior a los rodetes cerrados, pero son más sencillos de construcción y más económicos de compra. También son más convenientes cuando se han de manipular líquidos con sedimentos o abrasivos. Los álabes están fijados a un eje central.
- Semi-abierto. Comprende una cubierta o una pared trasera al mismo. Se pueden incluir o no álabes de salida; estos estarían localizados en la parte posterior de la cubierta del impulsor. Su función es reducir la presión posterior en el cubo del impulsor y evitar que la materia bombeada se acumule e interfiera con el funcionamiento de la bomba y del estopero.

Los impulsores abiertos y semi-abiertos tienen menos probabilidad de obstrucción, pero necesitan un ajuste manual de la voluta o placa trasera para que el impulsor consiga la fijación adecuada y prevenir la circulación interna.

- b. **Eje.** El propósito básico del eje de una bomba centrífuga es transmitir el giro de partida durante la operación, mientras se apoya en el impulsor y otras partes giratorias. Tiene que hacer este trabajo manteniendo una deflexión mínima entre las partes giratorias y estacionarias. Al eje le acompañan los siguientes componentes:
- Manga del eje. Los ejes generalmente se protegen de la erosión, corrosión y desgaste de las cámaras de sellado, articulaciones de estanqueidad, mecanismos internos y de las vías fluviales, a través de mangas renovables. A menos que se especifique lo contrario, se construye una manga de protección del eje que sea resistente a la corrosión, desgaste y la erosión. Una de las extremidades de la manga se sella con una junta.
 - Juntas para compensar el crecimiento axial del eje y poder transmitir el giro del impulsor. Se clasifican de modo general en dos grupos:
 - Rígidas; se usan en aplicaciones donde no hay absolutamente ninguna posibilidad de espacio para cualquier deslizamiento
 - Flexibles; son más propensas a errores de selección, instalación y mantenimiento. Pueden ser elastoméricas y no elastoméricas.
4. Componentes auxiliares. Las bombas centrífugas suelen incluir los siguientes sistemas para los siguientes servicios:
- Sistemas de descarga de seguridad, refrigeración y asfixiamiento
 - Drenaje de seguridad y respiración
 - Sistemas de lubricación de las mangas y de refrigeración
 - Sistemas de enfriamiento y calentamiento de la cámara de llenado
 - Sistemas de refrigeración del pedestal de la bomba

Los sistemas auxiliares incluyen tuberías, válvulas de aislamiento, válvulas de control, de alivio, medidores de temperatura y termopares, medidores de presión, indicadores de flujo o caudal, orificios, refrigeradores de seguridad, reservorios de fluidos del dique/deflector de seguridad y todas las aberturas y drenajes relacionados.

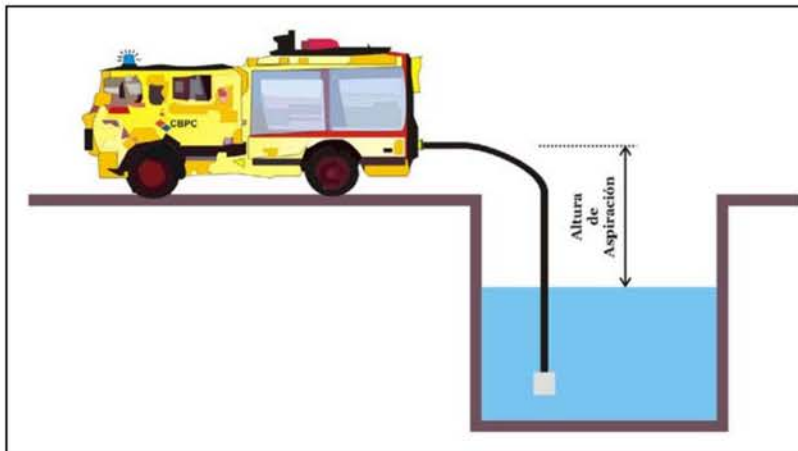
Las bombas utilizadas en vehículos de bomberos disponen normalmente de los elementos que indica la figura:



6.4.- 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 estamos 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.

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.

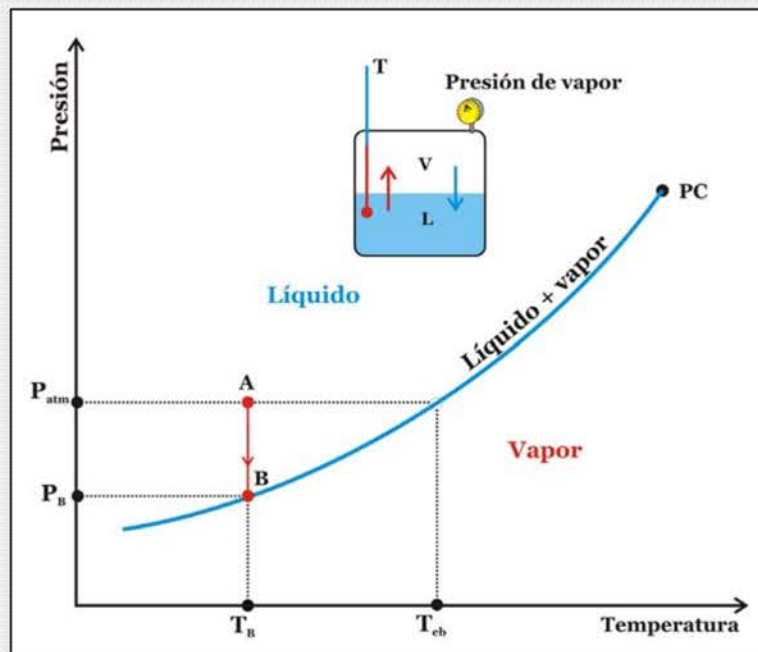
- Las pérdidas de carga²³ en el manguito hacen que al aumentar el caudal o al disminuir su sección, se reduzca la altura de aspiración.

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 aspiración²⁴.

Presión de vapor

Cuando tenemos una sustancia a una temperatura T , dentro de un recipiente parcialmente lleno y cerrado. Algunas moléculas de la fase líquida poseen suficiente energía para escaparse de la superficie del líquido, es decir se evaporan. Al no poder dispersarse las moléculas que forman la fase vapor, algunas de ellas, pueden retornar a la fase líquida. Se origina una situación de equilibrio entre las moléculas que escapan del agua y las que vuelven a la misma. En estas condiciones, la fase vapor ejerce una cierta presión sobre la superficie del líquido. A esta presión se le denomina **presión de vapor** del líquido a la temperatura T .

Si variamos la temperatura el equilibrio se producirá a otra presión. Si representamos en una gráfica la curva presión frente a temperatura, surge la conocida como **Curva de equilibrio de Claius-Clapeyron**. Toda combinación de presión y temperatura que se encuentre sobre la curva coexistirán las dos fases en equilibrio, por encima existirá solo la fase líquida y por debajo solo la de vapor. La curva termina en un punto denominado **Punto crítico (PC)**, que es la temperatura y presión a partir de la cual una sustancia no puede permanecer en equilibrio líquido- vapor, a partir de este punto la sustancia se denomina gas.



6.5.- Mecanismos de cebado.

En el momento del arranque de una bomba, el manguito de aspiración puede estar lleno de aire, una bomba centrífuga no puede aspirar aire, por lo que no es autosuficiente para crear la aspiración necesaria para que el fluido llene el rodete y se pueda empezar a bombear con normalidad. La creación de estas 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:

Cebado manual o autocebado

Es el más elemental y hoy en día solo es utilizado por las **motobombas**²⁵. Consiste en llenar el cuerpo de la bomba con agua por medio de un orificio que existe al efecto, que dispone de una válvula de retención para que no se vacíe por el manguito de aspiración.



²⁵ Según la norma UNE EN 1028-1: 2006 se denominan **motobombas** a aquellas bombas centrífugas portátiles instaladas sobre un bastidores metálicos transportables o sobre un remolque que se complementan con un motor de explosión de accionamiento. Es decir son las bombas que no van instaladas en ningún vehículo. Su funcionamiento es por lo tanto autónomo.

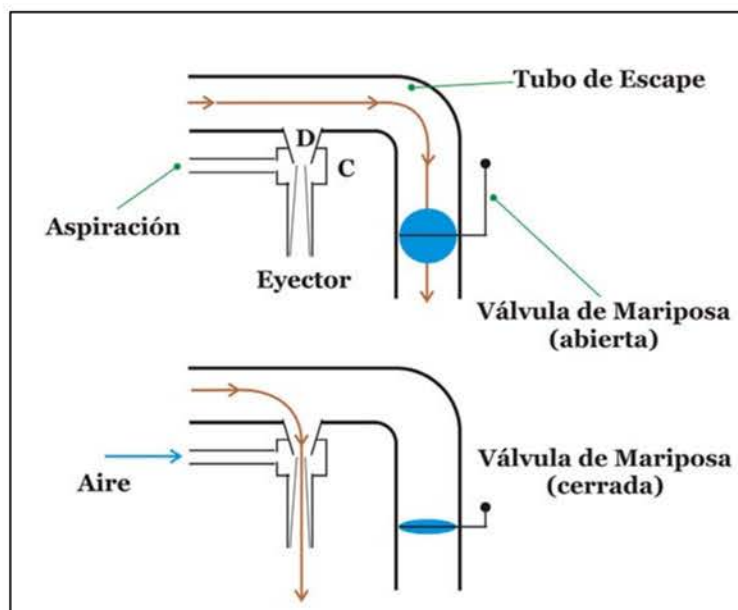
Pistones alternativos

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. Hoy esta prácticamente en desuso.

Por eyección de gases

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

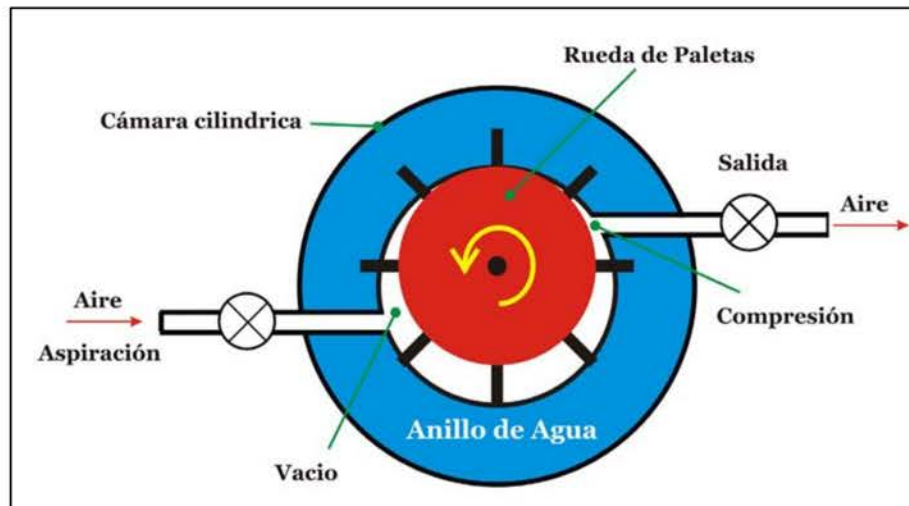
Se basa en el efecto Venturi. El tubo de escape, que se puede cerrar por medio de una válvula de mariposa, presenta una derivación de forma cónica en su extremo (**D**), para que los gases tengan una mayor velocidad en ese punto. Esto trae consigo una menor presión y la cámara **C** se llena con el aire 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 llenarán de agua, cebando a la bomba.

Anillo de agua

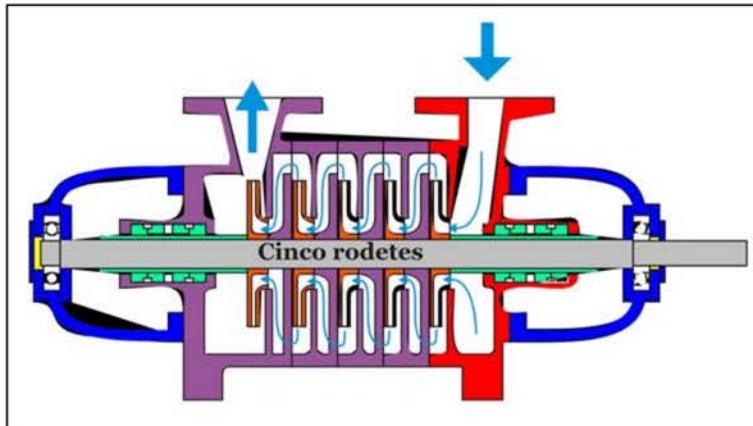
El mecanismo de anillo de agua se compone de una cámara cilíndrica que tiene en su interior una rueda de paletas que gira excéntrica respecto al eje del cilindro. Esta cámara posee dos conductos provistos de sus correspondientes válvulas, uno comunica con el cuerpo de la bomba y por el otro a una salida.



La cámara cilíndrica está llena inicialmente de agua. Cuando la rueda de paletas gira, 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 aspiración, 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.

Apéndice VI. Acoplamiento de bombas.

El acoplamiento de bombas puede llevarse a cabo, bien en **serie**, o en **paralelo**. En el primero de los casos la impulsión de la bomba se conecta a la aspiración de una segunda bomba, por lo que el caudal bombeado será el mismo en ambas máquinas aunque las alturas creadas se suman. Cuando se acoplan bombas en paralelo se aspira el fluido de un punto común, inyectándose después el caudal de impulsión en una tubería general. En este caso se suman los caudales conservándose la altura que dan las bombas.

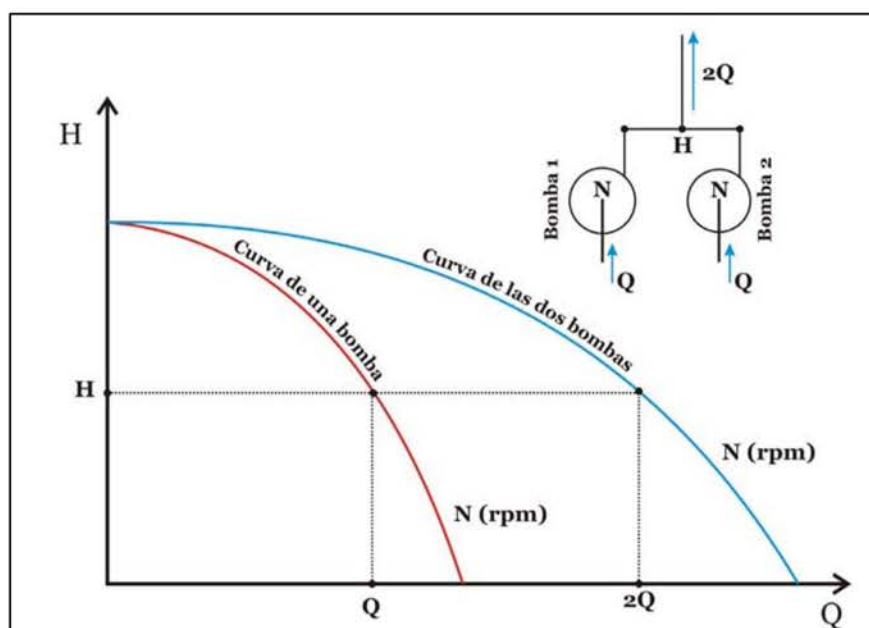


En las instalaciones de extinción utilizadas por los bomberos no se usan los acoplamientos en paralelo de bombas. Cosa que si ocurre con los acoplamientos en serie. Las bombas de presión combinada, instaladas en los vehículos contra incendios, son dos bombas acopladas en

serie que giran en el mismo eje. Cada una de estas bombas a su vez puede estar formada por varios rodetes, de forma que en el mismo cuerpo de la bomba, la salida de un rodete se conecta con la entrada de otro, son las llamadas bombas **multicelulares**.

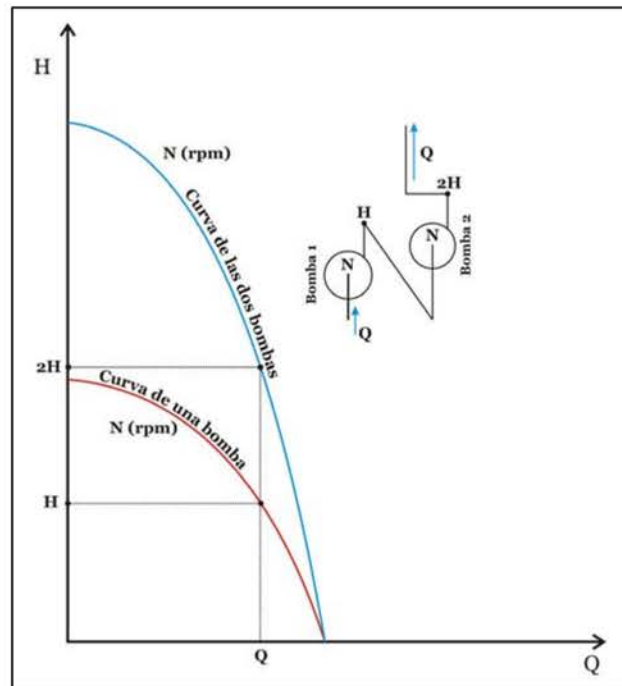
También se pueden, aunque no es una maniobra habitual, de acoplar en serie dos bombas de dos vehículos distintos, conectando una de la salida de 70 mm de un vehículo a la entrada de aspiración de 100 mm de la otra, utilizando una reducción especial (70/100).

Veamos la forma que adquiere la curva altura – caudal de dos **bombas en paralelo**, iguales girando a la misma velocidad.

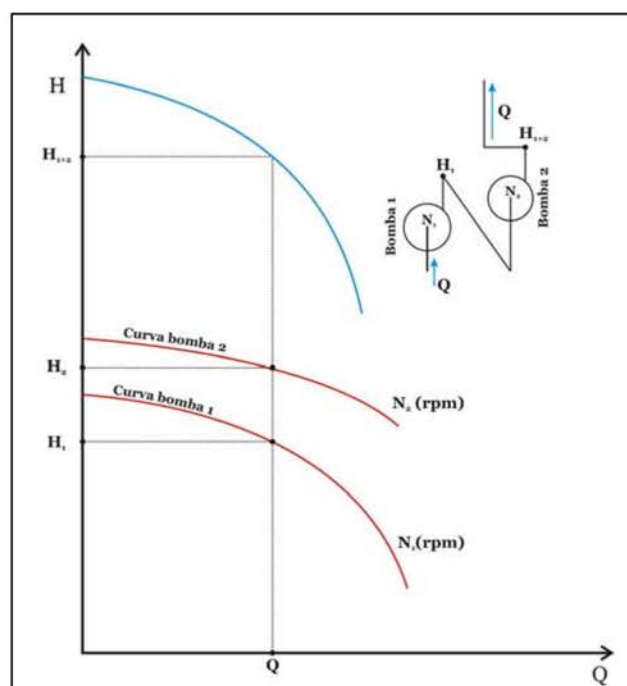


En este tipo de acoplamiento se recomienda que las bombas sean del mismo tipo y girando a igual velocidad.

Para en caso de un **acoplamiento en serie**, si las dos bombas son iguales y girando a la misma velocidad como es el caso de las bombas **multicelulares** la curva resultante queda:



Si conectamos dos autobombas que poseen distintas curvas características, al no girar sobre el mismo eje pueden tener distinta velocidad de giro, en este caso, la curva resultante es:



7.- Instalaciones hidráulicas de extinción.

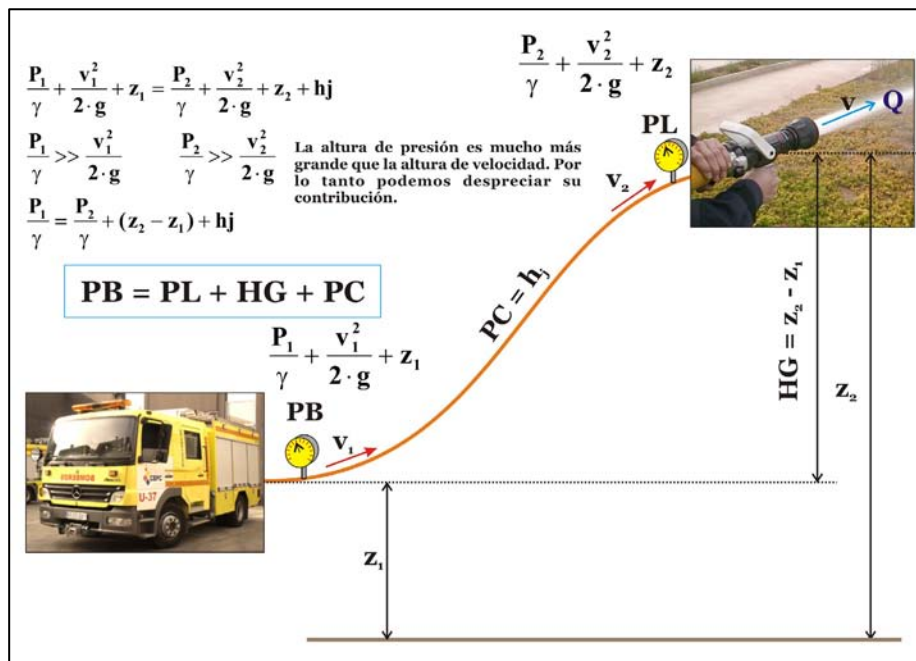
He venido a arrojar un fuego sobre la tierra y ¡cuánto desearía que ya estuviera encendido!

Lucas 12-49

7.1.- Instalación básica.

La **instalación hidráulica de extinción** tiene por objeto llevar un fluido agente extintor (agua o espumante), desde una fuente de suministro hasta el lugar donde se esta produciendo el incendio. Partimos de una **instalación básica**, compuesta por una bomba, una manguera y una lanza. Para poder extinguir el fuego, deberemos conseguir que por la lanza salga un caudal de fluido Q acorde con la carga de fuego, además provisto de rapidez v para poder alcanzar el incendio desde una distancia segura.

Si aplicamos la ecuación de la energía²⁶ entre la salida de la bomba y la entrada de la lanza tenemos:



Resultando la siguiente expresión, conocida como **ecuación de línea**:

$$PB = PL + HG + PC$$

Donde:

PB: Altura de presión a la salida de la bomba. (PB/10 bar)

PL: Altura de presión en punta de lanza. (PL/10 bar)

HG: Altura geométrica. Desnivel existente entre la bomba y la lanza, puede ser positivo si hay que ganar altura o negativo si hay que perder altura. (HG/10 bar)

PC: Pérdidas de carga en mca. (PC/10 bar)

El significado de esta expresión es el siguiente: Para conseguir que el fluido extintor

²⁶ Se tiene en cuenta las pérdidas energéticas existentes en la instalación (h_j). Ver apartado 5.5.- Ecuación general de la energía.

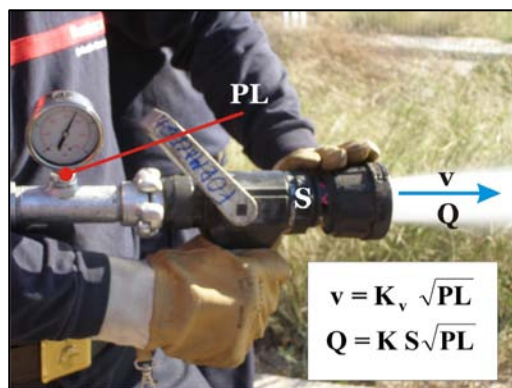
salga con una rapidez (v)²⁷ y con un caudal Q , hay que tener una presión en punta de lanza (**PL**) y una sección de salida S determinada. Para tener esa **PL** será necesario disponer de una presión a la salida de la bomba **PB** suficiente para dar esa presión demandada, pero aumentada²⁸ con la energía necesaria para salvar la altura geométrica **AG** y vencer las pérdidas de carga existentes en la instalación **PC**. Como la presión a la salida de la bomba (**PB**), trabajando con un régimen de giro constante, depende del caudal, deberemos analizar la dependencia de la presión en punta de lanza (**PL**) y de las pérdidas de carga (**PC**) en relación con el caudal. Una vez encontradas estas relaciones estudiaremos como se comporta la instalación ante las variaciones que se producen durante su funcionamiento.

7.2.- Principios de funcionamiento de una lanza.

La lanza es un dispositivo hidráulico situado al final de la manguera, responsable de establecer el caudal Q que circula por la instalación. Al pasar el agua a través de un estrechamiento que posee la lanza se produce una transformación de la energía de presión, que le está suministrado la bomba, en energía cinética (ecuación de descarga²⁹). De esta manera, el agua adquiere una rapidez superior a la que llevaba dentro de la conducción, lo que le permite, alcanzar, o sea *ser lanzada* a una distancia suficiente para que no sea necesario acercarse en exceso al fuego y poderlo extinguir con seguridad. Esta velocidad junto con la sección de salida fija el caudal Q .

Además de proporcionar el alcance y caudal necesario para la extinción, la lanza debe permitir regular el chorro de salida para adquirir diferentes configuraciones, según las necesidades y circunstancias de la extinción. En la posición de **chorro recto** se usa cuando se necesita una gran fuerza de extinción concentrada en un sitio de difícil acceso. En **chorro de pulverización ancha** crea una *cortina de agua* con el fin de proteger a los que están manejando la lanza y por último el **chorro de pulverización estrecha**, que es una posición intermedia entre los dos anteriores, es el ideal para atacar el fuego con seguridad.

En función del diámetro de la manguera en la que van conectados, podemos encontrar lanzas para los tres diámetros de manguera: 25, 45 y 70 mm. El rango de caudales para cada tipo de diámetro es, para el diámetro de 25 mm entre 30 – 200 lpm para 45 mm entre 120 – 500 lpm y para 70 mm. Entre 300 – 1000 lpm.



El caudal que está dando una lanza se deduce a partir de la **ecuación de descarga**.

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

Donde **S** es la sección del orificio de salida. **PL** es la **presión manométrica en punta de lanza** y **K** es una constante que depende del modelo de la lanza³⁰. Según esta expresión el

²⁷ v es la velocidad de salida del agua de la lanza, que es distinta de v_1 (velocidad a la salida del colector de impulsión) y v_2 (velocidad antes de salir por el orificio de la lanza).

²⁸ Disminuida en el caso de desnivel negativo.

²⁹ Ver apartado 5.4.- Ecuación de descarga.

³⁰ En esta **K** se tiene en cuenta las pérdidas de carga que genera la lanza y la relación entre las unidades de **PL** (bar) y **Q** (lpm), utilizadas en las lanzas según la UNE - EN 15182:2007.

caudal que da una lanza se puede modificar variando cada uno de los tres factores.

La norma UNE - EN 15182:2007 *lanzas de manguera manuales destinadas a los servicios contra incendios* define los siguientes tipos de lanzas: chorro pleno, (Tipo 1) Forma de chorro variable a caudal variable, (Tipo 2) Forma de chorro variable a caudal constante, (Tipo 3) Forma de chorro variable a caudal constante, seleccionable y (Tipo 4) presión constante (Subtipo 4.1 forma del chorro variable a presión constante y Subtipo 4.2 forma del chorro variable y caudal seleccionable a presión constante).

Las lanzas de **chorro pleno** son 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, se contemplan en la parte tercera de la norma UNE - EN 15182, pero están en desuso por los bomberos. Las **lanzas multiefectos** (Tipo 1) tienen la posibilidad de chorro variable. Este tipo de lanza presenta el inconveniente de que el caudal que proporciona la lanza varía al variar el chorro, así poco a poco se han ido sustituyendo por el siguiente tipo. Las lanzas de **caudal constante** (Tipo 2) tienen 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** (Tipo 3) y las **lanzas automáticas** (Tipo 4).



Presión necesaria en punta de lanza para suministrar el caudal seleccionado



Caudal (1) - chorro (2) - paso del agua (3)



Chorro recto



Chorro pulverización ancha

Al variar el chorro no varía la presión ni la sección, por lo tanto el caudal permanece constante

Una lanza **selectora de caudal** (Tipo 3) es aquella que está diseñada de forma que si mantenemos la presión en punta de lanza marcada por el fabricante, podemos seleccionar cuatro caudales, con tan solo variar la sección de salida de la lanza³¹. Por lo tanto se modifica el producto (K·S) de la ecuación de descarga. Otra característica es que conserva el mismo caudal al variar el chorro, ya que esta construida de forma

que el orificio de salida que fija el caudal, sea independiente del dispositivo genere el chorro. Este tipo de lanza, al igual que otras, dispone de una **válvula manual**, que en este caso solo sirve para cortar el paso del agua. Así pues, este tipo de lanza, dispone de tres controles independientes, uno destinado a regular el caudal (1), otro el tipo de chorro (2) y un tercero el paso del agua (3).

³¹ El caudal marcado por el fabricante en la lanza para cada posición, depende de presión en punta de lanza (PL) y de la sección (KS) con la que haya calibrado la lanza. Hay que tener en cuenta que la presión PL debe ajustarse para cada selección, ya que si variamos (KS) al pasar de una posición a otra, como veremos más adelante, la presión en punta de lanza se modifica.



Las **lanzas automáticas** (Tipo 4), también denominadas de presión constante, son aquellas que disponen de un mecanismo que mantienen constante la presión dentro de la lanza entre un amplio rango de caudales. La lanza regula automáticamente la sección de salida de la lanza para cada caudal seleccionado, estas lanzas mantienen un alcance fijo, independientemente del caudal, pues la distancia a la que llega el chorro, depende de la presión que es

constante. En este caso la lanza tan solo dispone de dos mandos, el selector de chorro (1) y la válvula manual (2), que es la encargada de la regulación del caudal, para lo cual esta calibrada generalmente entre cuatro a seis posiciones. La ventaja de este tipo de lanzas, es que da el caudal marcado por la posición de la válvula de cierre, cosa que no ocurría con las lanzas selectoras de caudal, en la que además debíamos mantener la presión en punta de lanza dentro del rango especificado por el fabricante.

7.4.- Punto de funcionamiento de la instalación.

Ahora vamos a proceder a un análisis cualitativo de la instalación hidráulica con el fin de explicar porque se producen los fenómenos observados durante las intervenciones. Supongamos que tenemos la instalación hidráulica básica con un desnivel positivo, si queremos que la lanza nos de un caudal Q y un alcance determinado deberá poseer una presión PL, por lo tanto la bomba debe dar:

$$PB = PL + HG + PC$$

La presión en punta de lanza PL en función del caudal y de la sección de salida es:

$$PL = \frac{Q^2}{(K \cdot S)^2}$$

Esto significa que si queremos que la lanza nos dé un caudal Q deberemos saber el valor K·S fijado por el fabricante para saber la presión PL necesaria.

Las pérdidas de carga PC, son iguales a:

$$PC = \frac{8 \cdot f}{\pi^2 \cdot g} \cdot \frac{L}{D^5} \cdot Q^2$$

Si no variamos los elementos de la instalación, se pueden considerar f, L y D constantes, por lo tanto:

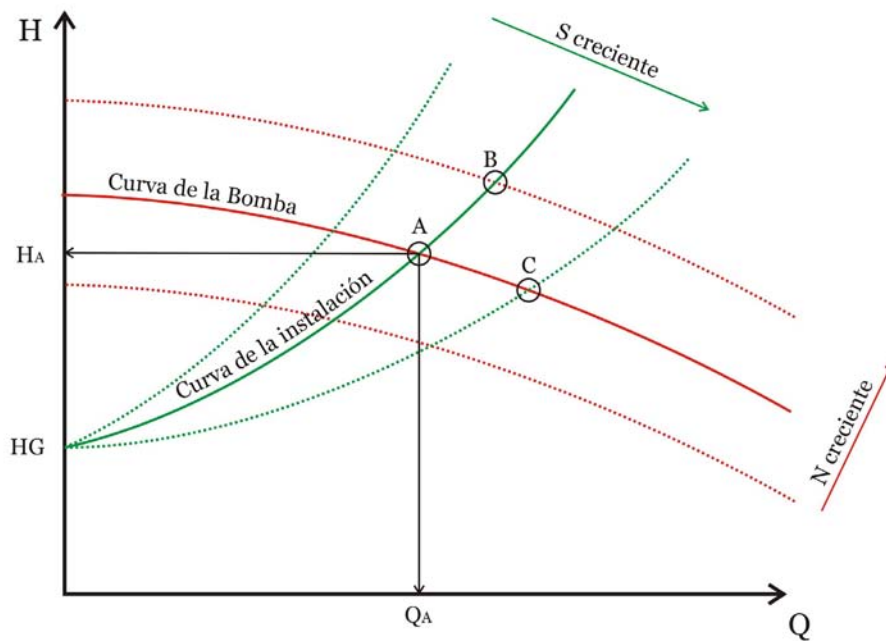
$$PC = K_j \cdot Q^2$$

Donde K_j es una constante que depende de la instalación. Sustituyendo los valores en función del caudal deseado:

$$PB = \frac{Q^2}{(K \cdot S)^2} + HG + K_j \cdot Q^2 = HG + \left(\frac{1}{(K \cdot S)^2} + K_j \right) \cdot Q^2$$

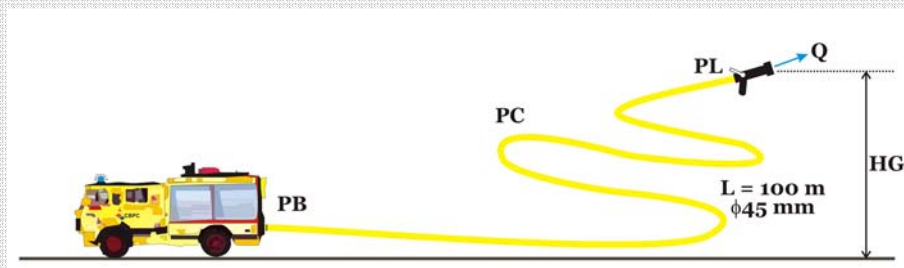
Esta expresión se conoce como **curva resistente** de una instalación, que puede ser representado gráficamente en función del caudal y de la sección S. Los puntos pertenecientes a esta curva, nos dan la presión que debe proporcionar la bomba para trabajar con las condiciones impuestas por la instalación hidráulica, es decir que exista una presión PL en punta de lanza (un alcance) y salga por la misma, un caudal Q. Por otro lado, la curva característica de una bomba, nos da la presión en función del caudal y de su velocidad de giro. La intersección de ambas curvas nos da el denominado **punto de funcionamiento de la instalación**.

Dada la instalación, trabajando con una lanza de sección de salida S, por tanto proporcionando el caudal deseado Q, implicará tener que fijar una determinada presión en punta de lanza, que nos fijará el alcance de la lanza. La intersección de la curva resistente con la curva característica de la bomba determina el punto de funcionamiento A, en dicho punto la bomba trabaja a velocidad N dando una presión H_A y un caudal Q_A. Si queremos variar este caudal, lo podemos hacer de dos maneras.



1. Si queremos que aumente el caudal sin aumentar la sección, desplazaremos el punto de funcionamiento de la bomba al punto B acelerándola. En este caso aumentamos la presión en punta de lanza y por tanto el alcance.
2. Si aumentamos el factor $(K \cdot S)$ de la lanza, la bomba trabajará en el punto C, aumentando el caudal y disminuyendo la presión de trabajo (**PB**). En este caso, la presión en punta de lanza (**PL**) disminuye también, ya que ha aumentado las pérdidas de carga (**PC**). El caudal extra que da la lanza lo obtenemos por aumento de sección. En cuanto a la velocidad de salida del agua ha disminuido.

Ejemplo:



Sea la instalación mostrada en la figura, en donde $HG = 30$ m. La ecuación de línea nos dice que:

$$PB = HG + PC + PL$$

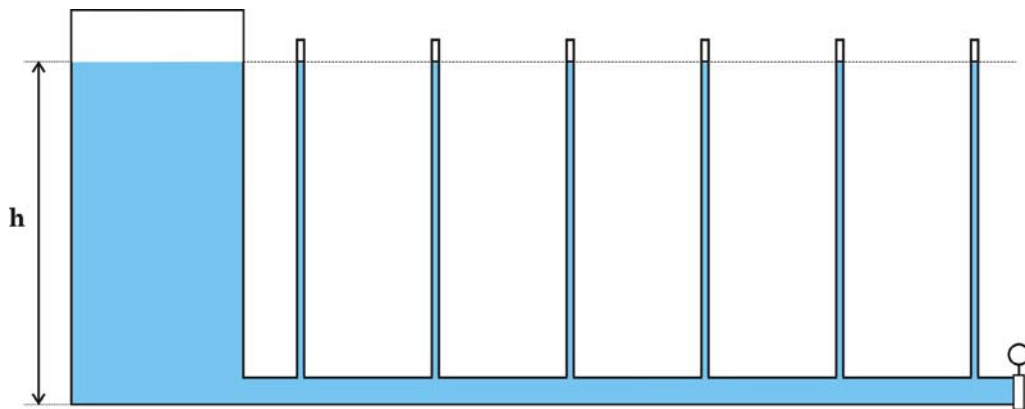
La presión en punta de lanza PL en función del caudal y de la sección de salida es:

$$PL = \frac{Q^2}{(K \cdot S)^2}$$

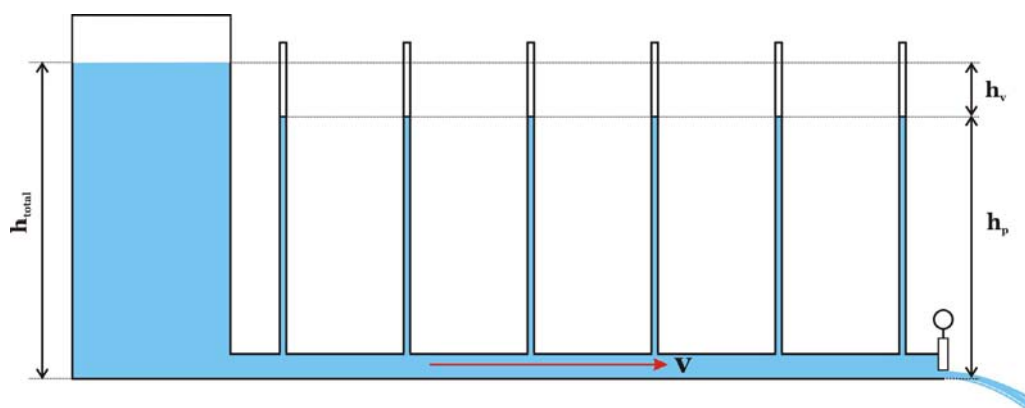
7.3.-Pérdidas de carga.

En la **ecuación de la energía** aplicada a la instalación hidráulica aparecía el término h_f ó **PC**, este factor representaba la energía disipada por los elementos físicos que componen dicha instalación, incluyendo no solo el rozamiento del agua sobre las paredes de las mangueras, sino también con los elementos auxiliares (bifurcaciones, bridas reducciones, etc.) existentes. Denominamos **pérdidas de carga** esta energía disipada.

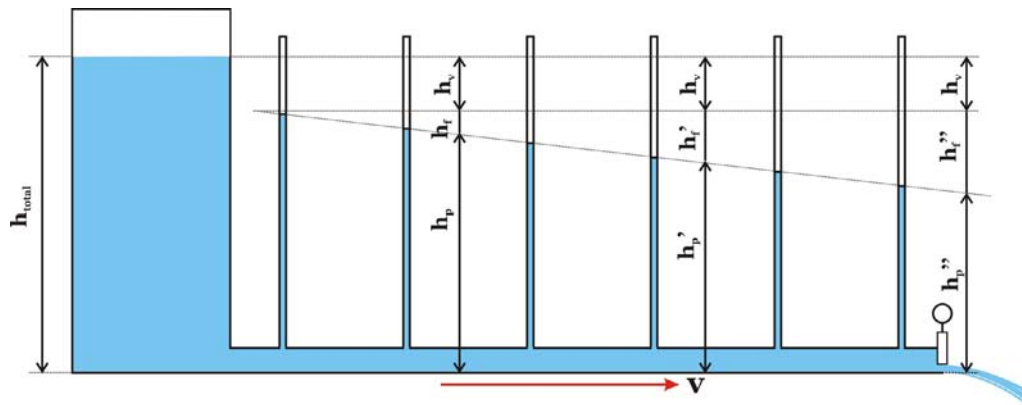
Consideremos un depósito que se descarga por una tubería recta en la que hemos situado una serie de manómetros, si la llave esta cerrada, los manómetros marcarán todos la misma presión, que será la altura de presión existente a la salida del depósito.



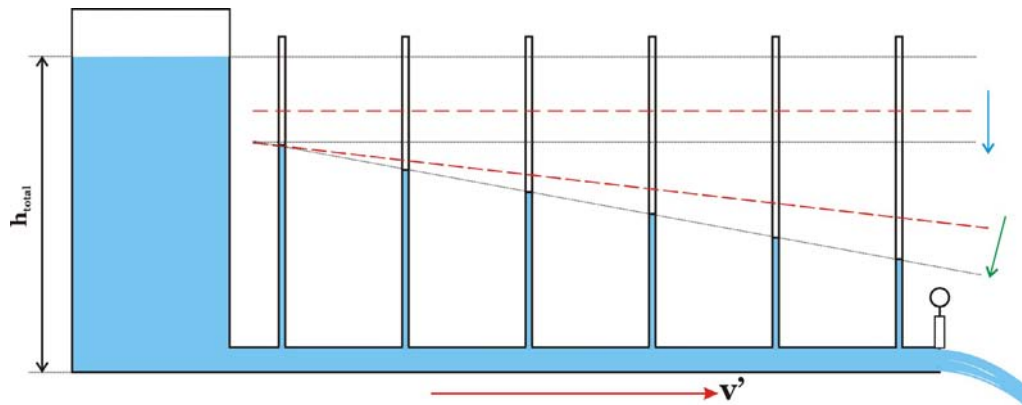
Si abrimos la llave, al agua empieza a circular con un caudal Q y como no varía la sección de la conducción, a lo largo de la misma habrá la misma altura de velocidad, por lo tanto los manómetros marcarán una altura menor ya que parte de la presión se habrá empleado en mover el fluido:



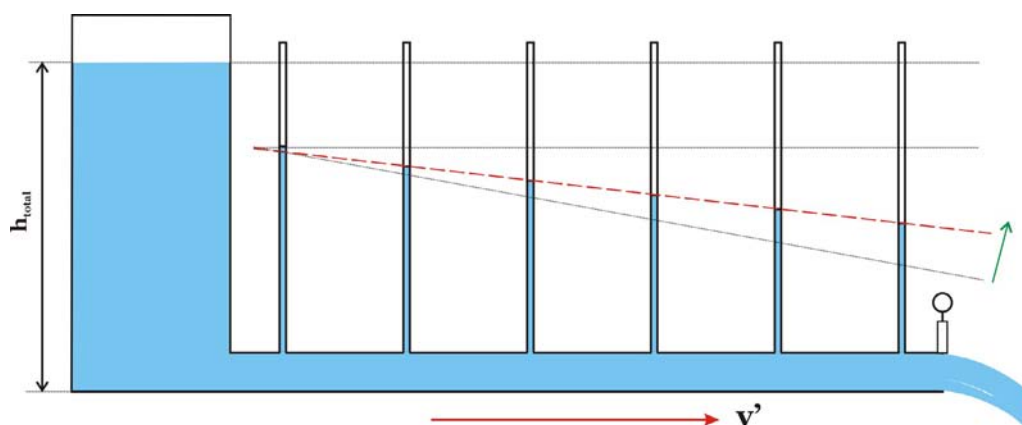
Esto es una situación teórica, ya que en la práctica comprobaríamos que lo que ocurre es que no todos los manómetros han perdido la misma altura sino que los más alejados del depósito han disminuido más:



Esto es debido a las pérdidas de carga y lo primero que se observa es que aumentan con la longitud de la conducción. Si ahora aumentamos la velocidad de circulación del agua por la conducción, se comprueba que el descenso de la altura de los manómetros sería mayor:



Para una misma velocidad si aumentamos el diámetro de la conducción veremos que el descenso es menor.



Si cambiamos el material de la conducción por otro más rugoso veríamos que el descenso es mayor. También se puede demostrar que cuando más viscoso es el fluido la pérdida de carga es mayor.

Resumiendo, las pérdidas de carga son directamente proporcionales a la longitud de la conducción, el caudal y la rugosidad del material, e inversamente proporcional al diámetro. Todas estas consideraciones se pueden resumir en la llamada **ecuación de Darcy-Weisbach**, que dice que:

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

Donde:

- **PC: pérdidas de carga** en mca.
- **f: coeficiente de fricción**, que tiene en cuenta la rugosidad del material y la viscosidad del fluido.
- **L: longitud equivalente de la instalación** en metros, se entiende como la longitud física de la misma incrementada en un valor determinado, en función del número elementos auxiliares instalados. Este incremento esta tabulado.
- **D: diámetro** de la tubería en metros.
- **v: velocidad** de circulación del fluido en m/s
- **g: aceleración** de la gravedad (9,81 m/s²).

Esta expresión se puede poner en función del caudal:

$$PC = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{Q^2}{S^2 \cdot 2 \cdot g} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^4 \cdot 2 \cdot g} = \frac{8 \cdot f}{\pi^2 \cdot g} \cdot \frac{L}{D^5} \cdot Q^2$$

Q: Caudal en metros cúbicos por segundo.

Es decir, directamente proporcionales al cuadrado del caudal, al factor de fricción y a la longitud de una instalación e inversamente proporcionales al diámetro de la conducción a la quinta.

Coeficiente f

El valor del factor **f**, depende del régimen de flujo que posea el fluido. Si el **régimen es laminar**, su valor es:

$$f = 64 / Re$$

Donde **Re** es el número de Reynolds.

En el caso de que estemos ante un **régimen turbulento**, que es lo habitual, el factor **f** no depende exclusivamente de **Re** y por tanto su cálculo es más complejo. Lo más sencillo es el empleo de un gráfico denominado **diagrama de Moody**. Allí se muestran los resultados experimentales de **f**, en función del **número de Reynolds** y lo que se conoce como **rugosidad relativa** de la conducción. Dependiendo del material del que esta hecha la conducción se le asocia una **rugosidad absoluta**, valor dado por el fabricante mediante ensayos. El diámetro de la conducción dividido por este valor es precisamente la rugosidad relativa.

Luego el coeficiente de fricción depende del material de la tubería, de su sección por la rugosidad relativa, la velocidad y la viscosidad por el número de Reynolds.

Este procedimiento de cálculo de las pérdidas de carga puede resultar eficaz en el diseño de conducciones fijas de distribución de agua. Pero resulta poco práctico en el caso del análisis de las instalaciones hidráulicas de extinción, por ello se han ideado varios sistemas sencillos de hallar, de manera aproximada, las pérdidas de carga:

A) El primer sistema de cálculo, se basa en expresar la **ecuación Darcy-Weisbach** de la siguiente forma:

$$PC = \frac{8 \cdot f}{\pi^2 \cdot g} \cdot \frac{L}{D^5} \cdot Q^2 = \frac{K}{10} \cdot \frac{Q^2}{10.000} \cdot \frac{L}{100}$$

Donde PC se mide en bares, Q en litros por minuto y la longitud en metros. K es un factor que depende del diámetro de la manguera:

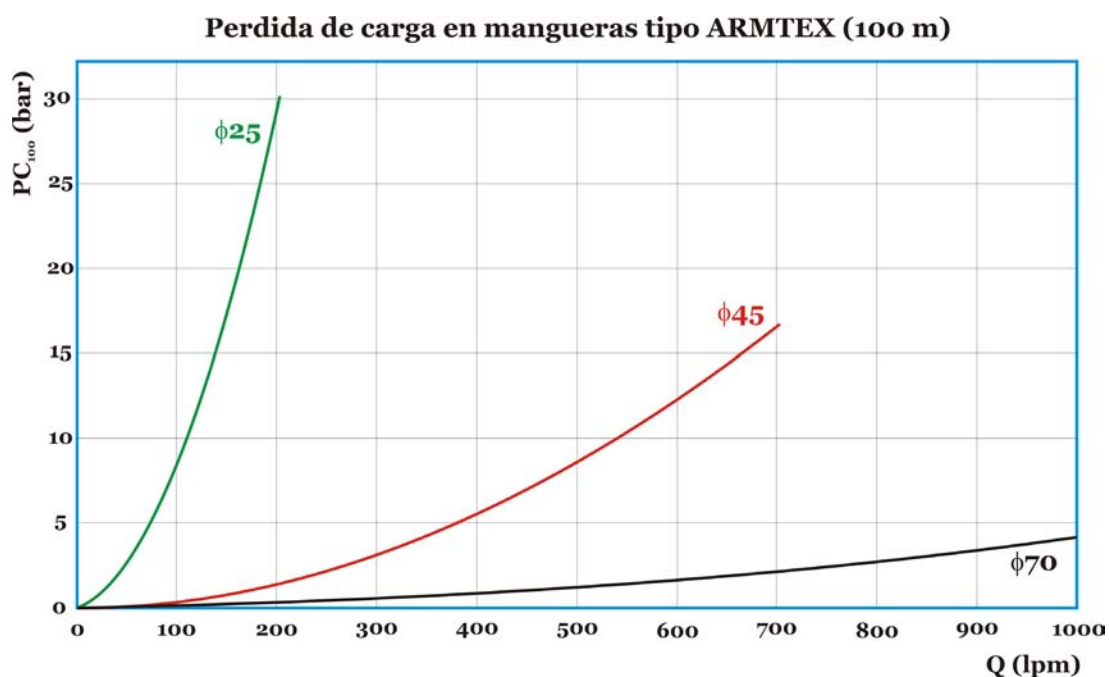
	φ25	φ45	φ70
K	60	3,2	0,35

Ejemplo:

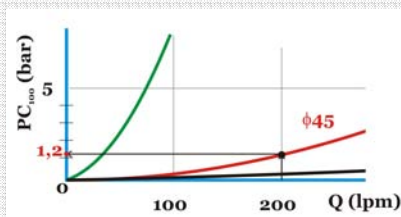
Por 100 metros de manguera de φ45 circula un caudal de 200 lpm, luego las pérdidas de carga serán:

$$PC = \frac{K_{\phi 45}}{10} \cdot \frac{Q^2}{10.000} \cdot \frac{L}{100} = \frac{3,2}{10} \cdot \frac{200^2}{10.000} \cdot \frac{100}{100} = 1,28 \text{ Bar}$$

B) Se pueden emplear, si se disponen, tablas o gráficas confeccionadas por los fabricantes de mangueras que nos indican en función del caudal y del diámetro cual es la pérdida de carga. Estas gráficas se realizan mediante ensayos, midiendo las pérdidas de carga para distintos caudales.



Ejemplo:



Por 100 metros de manguera de $\phi 45$ circula un caudal de 200 lpm, las pérdidas de carga se leerían en la gráfica dando PC = 1,2 bares.

Las pérdidas de carga son independientes de la presión, siempre que las conducciones sean rígidas. En el caso de las mangueras al tener una mayor flexibilidad, se comprueba en estos ensayos que a partir de cierta presión, por encima de los 16 bar, la manguera se dilata aumentando de diámetro y por tanto disminuyendo el valor de la pérdida de carga respecto a una conducción rígida del mismo diámetro por la que circula el mismo caudal.

C) Otra forma es fijar una pérdida de carga media para cada diámetro de manguera, 100 metros de longitud y un caudal determinado de la siguiente forma:

Diámetro	Q (lpm)	PC cada 100 metros	
		bar	mca
$\phi 25$	90	3,6	36
$\phi 45$	250	1,5	15
$\phi 70$	500	0,55	5,5

Si no varía el diámetro, el cálculo de las pérdidas de carga para cualquier longitud de manguera y para un caudal distinto se sigue las siguientes reglas:

1) Las pérdidas de carga para una longitud (L) distinta de 100 m y un mismo diámetro y caudal:

$$PC_L = \frac{PC_{100}}{100} \cdot L$$

2) Si las pérdidas de carga para un diámetro, una longitud dada y un caudal Q_1 son PC_1 para otro Q_2 se cumple:

$$PC_2 = PC_1 \cdot \frac{Q_2^2}{Q_1^2}$$

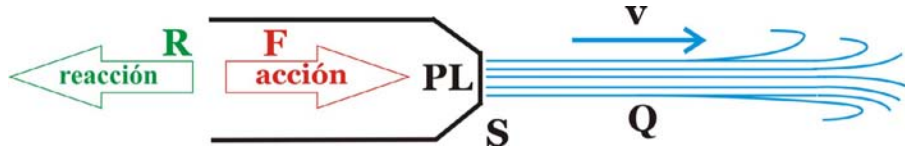
Ejemplo:

Por 100 metros de manguera de $\phi 45$ circula un caudal de 200 lpm, luego las pérdidas de carga serán:

$$PC_{200} = PC_{250} \cdot \frac{Q_2^2}{Q_1^2} = 1,5 \cdot \frac{200^2}{250^2} = 0,96 \text{ Bar}$$

7.5.- Reacción en una lanza.

El agua está saliendo de la lanza con una velocidad v que depende, como hemos visto de la presión en punta de lanza. Para que se produzca esto, debe existir³² una fuerza F que está impulsando al fluido por el orificio de sección S . La **tercera ley de Newton**³³, conocida con el nombre de **principio de acción y reacción** establece que, por cada fuerza que actúa sobre un cuerpo, éste realiza una fuerza igual pero de sentido opuesto sobre el cuerpo que la produjo. Por lo tanto aparecerá en la lanza una fuerza de reacción R de sentido opuesto a F . Esto es lo que se conoce como **reacción de una lanza**.



La variación de la fuerza, según la **segunda ley de Newton** será igual a la masa multiplicada por la aceleración:

$$\Delta F = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{m}{\Delta t} \cdot \Delta v = Q_m \cdot \Delta v$$

Donde Q_m es el caudal másico que es igual a:

$$Q_m = \rho \cdot S \cdot \Delta v$$

Por la ecuación de descarga sabemos que:

$$\frac{PL}{\gamma} = \frac{(\Delta v)^2}{2 \cdot g} \Rightarrow (\Delta v)^2 = \frac{2 \cdot g \cdot PL}{\rho \cdot g} = \frac{2 \cdot PL}{\rho}$$

Por lo tanto:

$$\Delta F = (\rho \cdot S \cdot \Delta v) \cdot \Delta v = \rho \cdot S \cdot (\Delta v)^2 = \rho \cdot S \cdot \frac{2 \cdot PL}{\rho} = 2 \cdot PL \cdot S$$

Luego la reacción R será igual pero de sentido opuesto:

$$R = 2 \cdot PL \cdot S$$

Si PL está en bares, S tiene que estar en cm^2 para que R sea en Kg. Si PL se da en Pascales, S tiene que estar en m^2 , en este caso R da en newton.

Ejemplo:

Una lanza de $\phi 45$ mm tiene una $PL = 5$ bares. Suponiendo que la sección de salida tiene 14 mm (1,4 cm) de diámetro. ¿Cuál es la fuerza de reacción R ?:

$$R = 2 \cdot PL \cdot S = 2 \cdot 5 \text{ bar} \cdot \frac{\pi \cdot 1,4^2}{4} \text{ cm}^2 = 2 \cdot 5 \cdot 1,54 = 15,4 \text{ Kg.}$$

7.6.- 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.

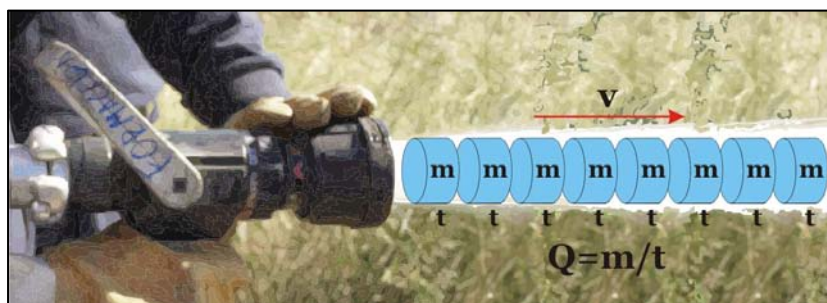
A pesar de esto vamos a realizar una aproximación teórica a este problema. Cuando el agua sale de una lanza lo hace con un caudal (Q_v) a una velocidad (v) determinada, por lo tanto en un tiempo t esta saliendo una masa igual a $m = \rho \cdot Q_v \cdot t$.

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

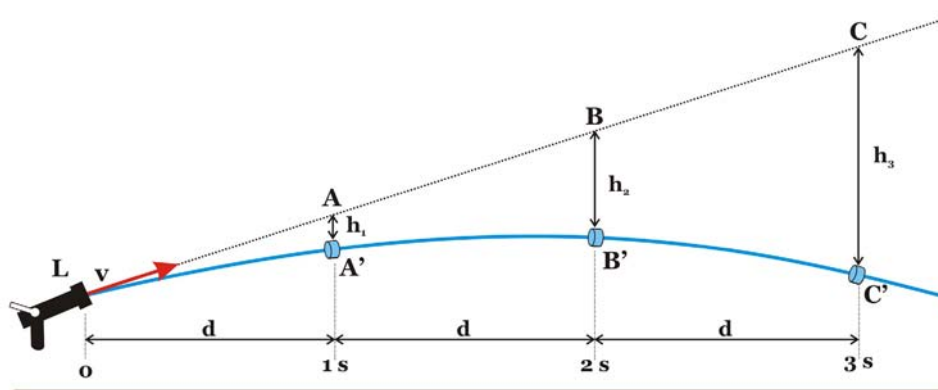
Por ejemplo si esta saliendo un caudal de 250 lpm, en un segundo estará saliendo una masa de agua de:

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

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



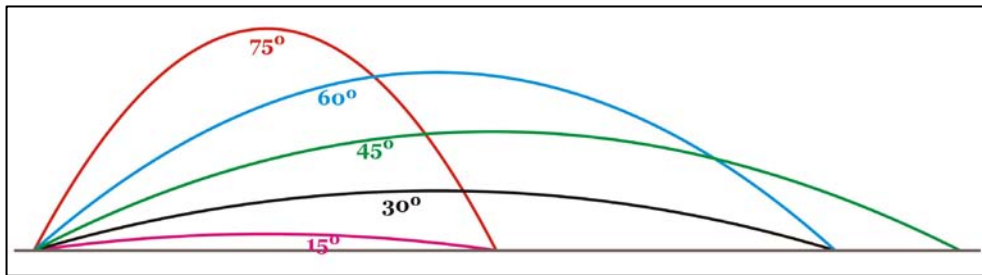
¿Qué trayectoria seguirán estos hipotéticos cilindros de agua una vez que salen de la lanza? Para este análisis debemos suponer que no existe rozamiento con el aire y no se tiene en cuenta la influencia del viento. Supongamos que tenemos la lanza que esta proyectando un cilindro de agua hacia arriba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



Si no existiera la fuerza de la gravedad³⁵ 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

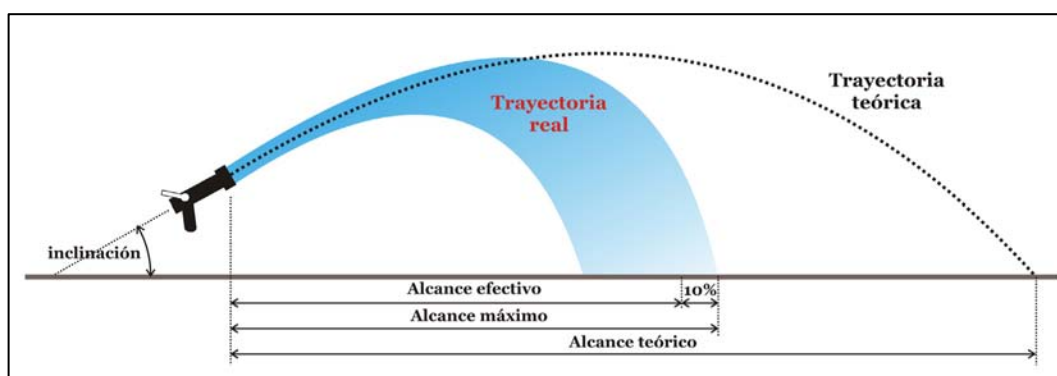
es muy pronunciado, el chorro alcanzará una gran altura pero una pequeña distancia horizontal. En la figura siguiente se muestran las trayectorias de distintos chorros de agua con la misma rapidez de salida (30 m/s), pero distintos ángulos.



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.

4.1. CAVITACIÓN EN BOMBAS CENTRÍFUGAS

Las bombas centrífugas funcionan con normalidad si la presión absoluta a la entrada del rodete no está por debajo de un determinado valor; cuando el líquido a bombear se mueve en una región donde la presión es menor que su presión de vapor, vaporiza en forma de burbujas en su seno, las cuales son arrastradas junto con el líquido hasta una región donde se alcanza una presión más elevada y allí desaparecen; a este fenómeno se le conoce como cavitación, cuyas consecuencias se describen a continuación.

Si a la entrada del rodete la presión es inferior a la presión parcial del vapor P_v , se forman las burbujas de vapor que disminuyen el espacio utilizable para el paso del líquido, se perturba la continuidad del flujo debido al desprendimiento de gases y vapores disueltos, **disminuyendo el caudal, la altura manométrica, el rendimiento de la bomba**, etc., Fig.4.1; en su recorrido dañan los conductos de paso del líquido en el tubo de aspiración y llegan a una zona en el rodete, de presión superior a la presión de vapor, en la que, instantáneamente, toda la fase de vapor pasa a líquido, de forma que el volumen de las burbujas pasa a ser ocupado por el líquido, de forma violenta, que se acompaña de ruidos y vibraciones, lo cual se traduce en un golpeteo sobre los álabes, que se transmite al eje, cojinetes, cierres mecánicos, etc.

Si la bomba funciona en estas condiciones durante cierto tiempo se puede dañar; la intensidad del golpeteo a medida que disminuye la presión absoluta a la entrada del rodete, se aprecia claramente en las curvas características de la bomba, Fig.4.1.

La presión mínima tiene lugar en el punto **M**, cerca de la entrada del rodete Fig.4.2, por lo que la altura del tubo de aspiración **H_a** de la bomba centrífuga viene limitada por la cavitación.

Lo más frecuente es que al final del tubo de aspiración, en la brida de aspiración **E**, exista una depresión y que la presión siga disminuyendo desde **E** hasta el rodete, punto **M** (presión mínima), zona que se encuentra a la entrada al mismo, siendo ΔP_{EM} la pérdida de carga correspondiente entre **E** y **M**.

A partir de **M** el fluido comienza a notar la influencia del rodete que le comunica una energía cinética relativa,

$$\frac{W_1^2}{2g}$$

Aumentando bruscamente su presión, originándose el fenómeno del golpeteo y vibraciones.

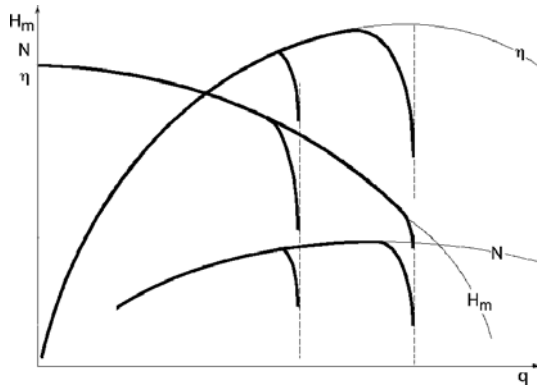


Fig.4.1.- Disminución brusca de las curvas características por el efecto de la cavitación en una bomba centrífuga

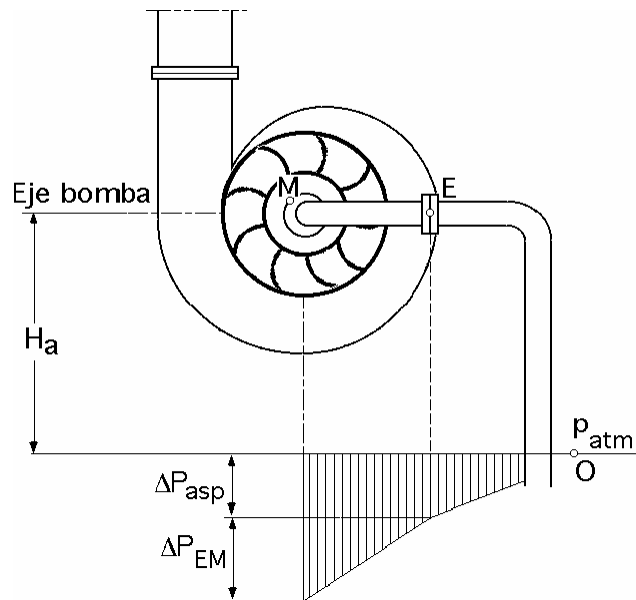


Fig.4.2.- Campo de presiones en la aspiración

La energía o altura específica del líquido entre el final del tubo de aspiración (brida de aspiración E) y entrada en el rodete impulsor, también llamada energía o altura bruta disponible, en condiciones de rendimiento máximo, es:

$$\text{Altura.bruta.disponible} = \frac{P_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} = \frac{P_M}{\gamma} + \frac{c_1^2}{2g} + \Delta P_{EM}$$

$$\frac{P_E - P_M}{\gamma} = \frac{c_1^2 - v_E^2}{2g} + \Delta P_{EM}$$

Para que a la entrada del rodete se presente la cavitación es necesario que la presión $P_M = P_1$, sea igual o menor que la presión parcial de vapor del líquido p_v a la temperatura correspondiente.

Para cada caudal, en el tubo de aspiración existe una presión mínima por encima de la presión de vapor P_v , por debajo de este valor de P_v la bomba cavitará; ésta presión se puede expresar en metros de columna de líquido (altura neta de entrada en la bomba) y se denomina **altura neta de succión positiva NPSH**, *Net Positive Suction Head* que, teóricamente, **para una bomba dada y un caudal dado, es constante**.

ALTURA NETA DE ENTRADA DISPONIBLE, NPSH_d.- Para definir esta altura hay que determinar la energía bruta disponible que tiene el flujo a la entrada de la bomba, que se obtiene aplicando la ecuación de Bernoulli entre la entrada al tubo de aspiración, punto **O** (nivel inferior del líquido), y el final del mismo, punto **E**, en la forma:

$$\frac{P_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} = \frac{P_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} + H_a + \Delta P_{asp}$$

La altura bruta disponible a la entrada de la bomba es:

$$\frac{P_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} = \frac{P_0}{\gamma} - H_a - \Delta P_{asp} = \frac{P_{atm}}{\gamma} - H_a - \Delta P_{asp}$$

En la que se ha supuesto que la variación del nivel del líquido es nulo, por lo que, $v_0 = 0$, siendo en general, $P_0 = P_{atm}$

Como el líquido a bombear tiene una determinada presión de vapor P_v , la energía bruta anterior sólo es utilizable hasta dicha presión P_v , a partir de la cual aparece la cavitación, por lo que se define la **altura neta disponible a la entrada de la bomba NPSH_d** de la forma:

$$NPSH_d = \text{Altura.bruta} - \frac{P_v}{\gamma} = \frac{P_{atm}}{\gamma} - H_a - \Delta P_{asp} - \frac{P_v}{\gamma} = \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} - H_a - K_{asp} * q_1^2$$

Que representa una familia de parábolas, Fig.4.3, al ser, $\Delta P_{asp} = K_{asp} * q_1^2$, y que no es más que la curva característica de la instalación que sólo afecta al tubo de aspiración, siendo independiente del tipo de bomba instalada.

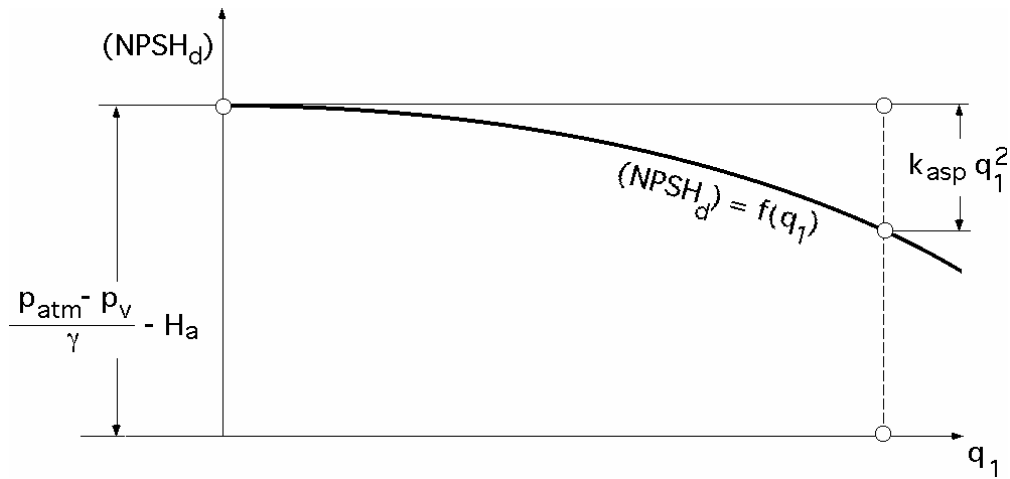


Fig.4.3.- Altura neta de entrada disponible

ALTURA NETA DE ENTRADA REQUERIDA, $NPSH_r$.- La bomba necesita que el líquido disponga en la posición **E**, (brida de aspiración), de un mínimo de energía que le permita hacer el recorrido de **E** a **M** sin que aparezca cavitación; esta presión mínima, **cuyo límite es P_v** , es la que se tiene a la entrada del rodete, en el momento en que éste comienza a comunicar al líquido la presión **P_1** . Si se supone que los puntos **E** y **M** están al mismo nivel y teniendo en cuenta que **P_v** es la presión mínima que se puede tener en el punto 1, **la altura bruta a la entrada de la bomba** es:

$$Altura.bruta.disponible = \frac{P_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{c_1^2}{2g} + \Delta P_{EM} = \frac{P_v}{\gamma} + \frac{c_1^2}{2g} + \Delta P_{EM}$$

La altura neta requerida a la entrada del rodete es, Fig.4.4:

$$NPSH_r = Alturabruta - \frac{P_v}{\gamma} = \frac{P_E - P_v}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} = \frac{P_v}{\gamma} + \frac{c_1^2}{2g} + \Delta P_{EM} - \frac{P_v}{\gamma} = \frac{c_1^2}{2g} + \Delta P_{EM}$$

$$\text{Si } \Delta P_{EM} \rightarrow 0, \text{ resulta que: } NPSH_r = \frac{c_1^2}{2g}$$

Es conveniente que el **$NPSH_r$** sea lo menor posible, ($c_1 \rightarrow 0$) para que la longitud del tubo de aspiración sea mayor, mientras que el **$NPSH_d$** tiene que ser lo mayor posible.

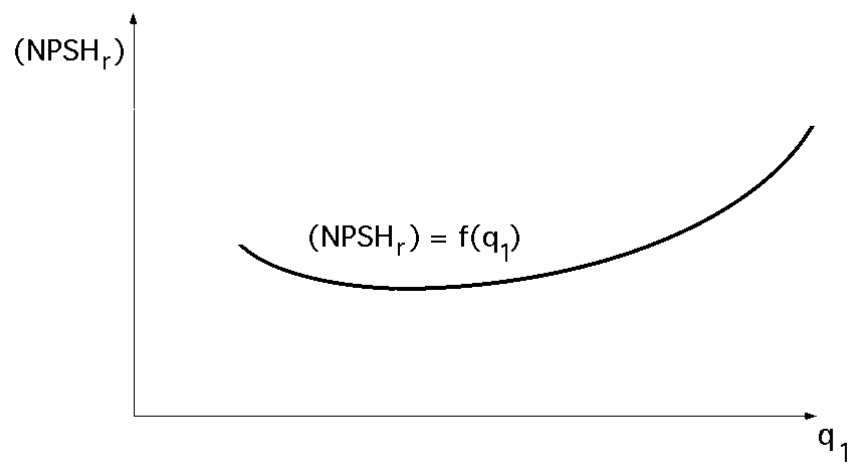


Fig.4.4.- Altura neta de entrada requerida

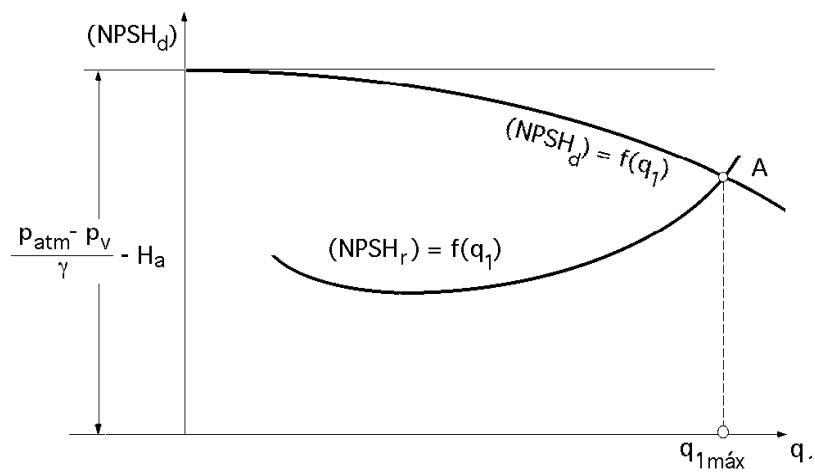


Fig.4.5.- Altura de aspiración máxima

ALTURA DE ASPIRACIÓN H_a . - Si el $NPSH_r$ tiene que ser pequeño, y el $NPSH_d$ grande, su punto de intersección proporciona la altura de aspiración máxima H_a .

Para su determinación se toma el caudal máximo previsto $q_{m\acute{a}x}$ (que es con el que más riesgo de cavitación existe) sobre el eje de caudales del gráfico suministrado por el fabricante de la bomba, Fig.4.6.

De las infinitas curvas $NPSH_d$ que se pueden disponer en una instalación, función de la altura de aspiración H_a , sólo una pasa por el punto **A**, Fig.4.5, verificándose:

$$NPSH_r = NPSH_d = \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} - H_a - \Delta P_{aspm\acute{a}x} \Rightarrow H_a = \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} - \Delta P_{aspm\acute{a}x} - NPSH_r$$

Que es la máxima altura de aspiración teniendo en cuenta la cavitación, siendo aconsejable disminuir dicha altura en 0,5 m para asegurarse de que ésta no se produzca:

$$H_a = \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} - \Delta P_{aspm\acute{a}x} - NPSH_r - 0,5$$

Valor que no superará los 6,5 m pudiendo resultar mucho más pequeña e incluso negativa, por encima del eje de la bomba. Se puede concluir diciendo que mientras se cumpla que:

$$NPSH_d > NPSH_r$$

No existe cavitación.

Esta comenzará a manifestarse cuando sean iguales.

Cuanto más pequeño sea el $NPSH_r$, tanto más estable será la bomba en lo que respecta a la cavitación.

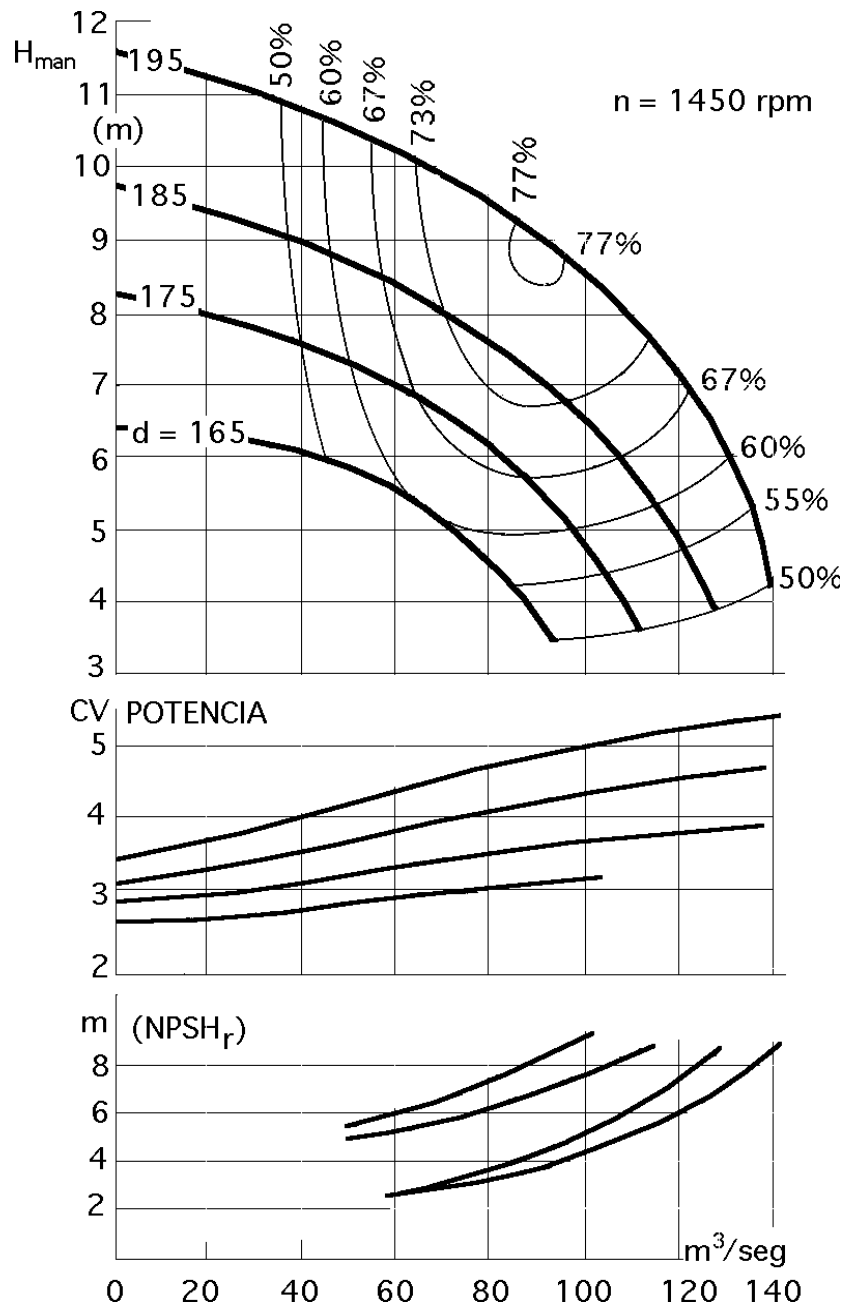


Fig.4.6. - Datos de curvas de colina de rendimientos, potencia y NPSHr de una bomba centrífuga

GOLPE DE ARIETE

Se denomina golpe de ariete al efecto de un aumento de presión que acompaña a los cambios repentinos en la velocidad del agua que pasa por una tubería. Es un fenómeno de inercia producido por un cambio brusco de caudal en una instalación hidráulica que se define como *movimiento variable de fluidos compresibles producido por una rápida interrupción de la corriente en tuberías forzadas*.

- Régimen permanente: líquido incompresible. Podemos aplicar el teorema de Bernoulli entre dos secciones con movimiento uniforme.
- Régimen variable: se producen cambios de presión y velocidad en el tiempo. No podemos aplicar Bernoulli y no podemos suponer el líquido incompresible.

El régimen variable en corrientes forzadas dará lugar a cambios de velocidad relativamente rápidos que harán que la energía cinética se transforme en trabajos elásticos (del conducto y del agua) y en energía vibratoria, ondulatoria y térmica. Este fenómeno es el golpe de ariete.

El régimen variable puede formarse por:

- Presencia de aire en los conductos a presión
- Por maniobras con un obturador

El régimen variable producido por una manipulación rápida en el régimen de gasto depende de:

- La maniobra que lo provoca
- Los coeficientes de elasticidad del agua líquida (compresibilidad)
- El módulo de Young del conducto (tensión de tracción del material)

Cuando la velocidad decrece rápidamente o desaparece, la energía cinética de la columna de agua en movimiento es absorbida instantáneamente por la deformación elástica de la tubería y la capacidad de compresión del agua. Entonces se forma una onda de presión que se desplaza, con velocidades ≤ 1400 m/s, en ambos sentidos de la tubería. Esta velocidad o celeridad depende únicamente de:

- Las características de la conducción
- La elasticidad de la conducción
- El espesor de la conducción
- El diámetro de la conducción

Y nunca depende, en absoluto, del tiempo de maniobra ni de la velocidad y presión que tenga el agua al pasar por el lugar en que se produce la perturbación.

Los aumentos de presión pueden ser originados por el cierre de una válvula (lanzas, bifurcaciones, etc.), el paro de una bomba o la creación repentina de una demanda anormal de agua si se rompe la tubería principal. En algunas ocasiones el funcionamiento de las válvulas automáticas reguladoras de un sistema de rociadores puede producir un reflujo y crear fuertes subidas de presión en el sistema de protección.

El golpe de ariete puede ser positivo (al cierre de la válvula) o negativo (a la apertura).

El golpe de ariete es más de temer en tuberías de baja presión que de alta, ya que en los sistemas de alta presión las variaciones se soportan mejor, teniendo menos importancia en estos casos.

La fuerza del golpe de ariete puede llegar a romper tuberías, válvulas o accesorios. En teoría, si el sistema fuera perfectamente inelástico, esta fuerza podría llegar a ser infinita.

La elasticidad de las mangueras tiende a reducir el impacto del golpe de ariete. Pero el cierre repentino de las lanzas en las mangueras largas puede causar un aumento de presión suficiente para que se rompa la manguera. Las pruebas llevadas a cabo por el Servicio contra Incendios de la ciudad de Nueva York indican que los aumentos de presión al cerrar la lanza pueden ser aproximadamente del doble de la presión del hidrante. Esto sugiere la conveniencia de accionar las válvulas de las lanzas con sumo cuidado.

Cuando se produce el golpe de ariete la tubería se dilata y el fluido se comprime, volviendo ambos, por su elasticidad, a su estado inicial. Este efecto se repite estableciéndose un movimiento de presión oscilatorio cada vez con menos intensidad hasta que se anula; momento en que la energía cinética que llevaba el agua ha sido absorbida por rozamiento por la pared de la conducción; se ha transformado en energías térmica y de deformación.

Las tuberías de descarga de las bombas se ven sometidas a golpe de ariete causado por la separación de la columna de agua, que se puede producir cuando se para de repente una bomba (por corte de corriente, actuación manual, etc.) o cuando la válvula de descarga se cierra de repente mientras la bomba sigue funcionando. La separación de la columna se produce en algún punto después de la bomba, sobre todo en los más elevados, o si la pendiente hacia abajo de la tubería aumenta rápidamente.

Cuando se para el movimiento de avance de la columna, se produce un reflujo que la vuelve a unir. Si una bomba está situada en un lugar más elevado que la salida del sistema, puede resultar eficaz colocar en la tubería una válvula reguladora de vacío. Si existe presión estática (presión del agua sin movimiento por estar a cierta altura con respecto a la toma de presión) al descargar la bomba, es prácticamente imposible eliminar todo el agua cuando se invierte el sentido de marcha de la columna. En este caso se pueden instalar amortiguadores de las oscilaciones de presión o válvulas reguladoras de vacío, que produzcan el by-pass de parte de la columna de agua que vuelve hacia la válvula de retención o reguladora.

Si, después de una parada, se vuelve a poner en marcha rápidamente una bomba contra incendios, puede producirse un aumento de presión excesivo. Por eso, las instalaciones sujetas a funcionamiento intermitente se deben proteger mediante relés retardadores. No bastan las válvulas de seguridad sencillas, porque su funcionamiento es demasiado lento para contrarrestar la velocidad a la que se produce el aumento de presión. En los sistemas de protección contra incendios se suele utilizar una bomba auxiliar para mantener alta la presión del sistema y reducir el golpe de ariete producido al ponerse en marcha la bomba principal.

Los principales factores que contribuyen a la separación de una columna de agua son:

- (1) la rapidez con la que se interrumpa el flujo, bien por el cierre de una válvula o el paro de una bomba;
- (2) la longitud de las tuberías, que determina el tiempo durante el que la presión sigue cayendo, antes de que las ondas vuelvan desde el extremo más alejado de la tubería para contrarrestar la caída de presión inicial;
- (3) la presión operativa normal en los puntos críticos, como en lo alto de una colina;
- (4) la velocidad del agua justo antes de que se produzca el cierre de la válvula o el paro de la bomba. Cuanto mayor sea la velocidad, mayor será la separación de la columna, la velocidad de reflujo y la subida final de presión.

Teoría de la onda elástica

Los conceptos básicos de la teoría de la onda elástica son:

1. El aumento de la presión es proporcional a la disminución de la velocidad del fluido y a la velocidad de la onda de presión.
2. El aumento de la presión es independiente de la longitud y del perfil de la tubería.
3. La velocidad de la onda de presión es la misma que la del sonido a través del agua.

Las ondas de presión que coexisten se propagan a lo largo de la tubería en sentido inverso. Al cruzarse ambas ondas no interfieren su valor como corresponde a dos movimientos ondulatorios y el efecto total será la suma algebraica de cada onda.

Debe estudiarse la posibilidad de que se produzca el golpe de ariete en los sistemas de distribución, sobre todo en los provistos de bombas automáticas, y adoptarse medidas prácticas para evitar que se produzcan subidas o caídas bruscas de presión que sean destructivas. Sin embargo hay que tener en cuenta que, en las condiciones en las que están proyectados los sistemas de distribución para la protección contra incendios (con bombas dotadas de válvulas de retención en el lado de descarga, que funcionan automáticamente), no siempre se puede evitar esta posibilidad.

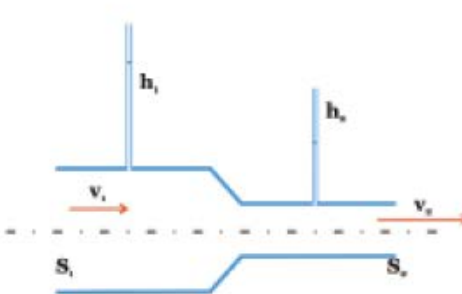
Se trata de un fenómeno que no se puede evitar, pero sí atenuar. Para reducir al mínimo el golpe de ariete, las válvulas y los hidrantes deben estar siempre en perfecto estado y usarse con cuidado para evitar que la presión suba muy bruscamente. Las válvulas accionadas a distancia se deben regular con todo cuidado para evitar que se cierren de repente (nunca en menos de 5 segundos).

Es un fenómeno complejo con graves efectos (daños en los puntos de conexión de instalaciones como racores de unión o de lanza, etc.), puede evitarse si se cierran y abren las llaves de paso lanza de la manguera progresivamente. Algunos camiones tienen dispositivos automáticos de regulación de presión para compensar variaciones bruscas de caudal.

Las principales formas de atenuar el fenómeno son:

- Instalar depósitos de presión (aire/agua) en el extremo de la conducción
- Colocar una válvula de seguridad (sobrepresión o alivio) que se abra al producirse una presión excesiva
- Realizar las aperturas y cierres de las válvulas lentamente
- Utilizar bombas de inercia que mantienen el giro después de una conexión para reducir el efecto

Efecto Venturi



Es una consecuencia del teorema de Bernoulli. Cuando en un conducto se produce un estrechamiento, la ecuación de continuidad hace aumentar su velocidad ($S_1 < S_2$) y por tanto la presión vale:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

Como $v_1 < v_2$ implica que $h_1 > h_2$.