

## Bombas

### 0. – CONCEPTOS REFERIDOS A BOMBAS HIDRÁULICAS

Para comprender realmente la operación de una bomba, es necesario examinar cuidadosamente cada uno de los componentes del sistema en el que esta instalada y operando la bomba. Los principales componentes de un sistema de bombeo son:

- Lado de la succión
- Bomba ( con un motor )
- Lado de la impulsión

La energía entregada a una bomba por el motor es gastada en energía útil para mover el fluido y superar las pérdidas

$Energy_{input} = Energy_{useful} + Losses$		
$Efficiency = Energy_{useful} / Energy_{input}$		
$Losses = Mechanical + Volumetric + Hydraulic$		
↓	↓	↓
bearings coupling rubbing	leakage (slip)	friction entrance/exit vortices separation disc friction

#### Caudal

Parámetro que nos dice cuanto fluido debe ser trasladado.

#### Presión

Parámetro que nos dice cuanta resistencia hidráulica se necesita superar por el elemento de bombeo para mover el fluido.

#### Caudal de Impulsión de una Bomba

Volumen útil suministrado por la bomba en la unidad de tiempo (Q) en (m<sup>3</sup>/h ; m<sup>3</sup>/s; etc).  $Q = v \cdot S$

#### Altura de Impulsión de una Bomba

Es el trabajo mecánico utilizable transmitido al líquido que se impulsa relacionado con el peso del mismo en metros (m). Dicha altura es independiente de la densidad del producto bombeado, es decir que la bomba centrífuga impulsa el producto que bombea a una misma altura H, cualquiera sea la densidad de este. La densidad  $\rho$  determina la presión de la bomba e interviene en la potencia absorbida por la misma.

$H = \frac{P_Q}{\rho \cdot g \cdot Q}$	<p><math>\rho</math> density of pumped medium,  <math>g</math> gravitational constant,  <math>H</math> h. of the pump,  <math>Q</math> capacity.</p>	<p>PQ is the useful output transmitted by the centrifugal pump to the fluid pumped:</p> $P_Q = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$
--	--	--

#### Altura de Impulsión de una Instalación

La altura manométrica de una instalación es el resultado de los siguientes componentes

- ❖  $H_{geo}$  = altura geodésica de impulsión. Diferencia de altura entre los niveles en aspiración e impulsión.
- ❖  $P_a - P_d / (\rho g)$  = diferencia de presiones entre las superficies del liquido de la aspiración e impulsión, en el caso de depósitos cerrados.
- ❖  $\sum H_v$  = suma de todas las pérdidas de carga del sistema
- ❖  $V_s^2 - V_e^2 / 2g$  = Diferencia de altura dinámica entre la salida y la entrada de la bomba

De aquí se obtiene la altura de impulsión de la instalación.

Con depósitos abiertos y desestimando las diferencias de altura dinámica queda:

$H_A = H_{geo} + \frac{P_a - P_d}{\rho \cdot g} + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2g} + \sum H_v$
$H_A \approx H_{geo} + \sum H_v$

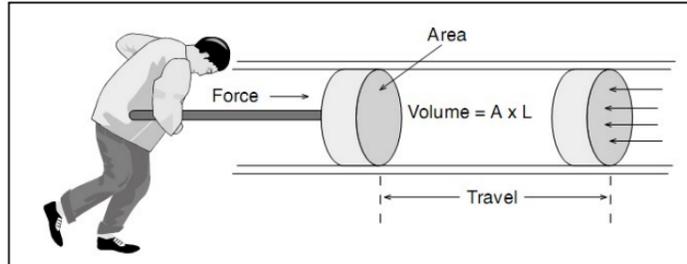
**Numero de Revoluciones:** Mediante el accionamiento con motores trifásicos (motores asincronos con rotor en corto circuito) resultan las siguientes velocidades de servicio:

Los motores a inducción tienen velocidades a plena carga de un 2 a un 6% menos que las de abajo, en promedio un 4% menos.

No. of poles	Full-Load Speeds of Synchronous Motors						
	Hertz (Hz)						
	25	30	40	45	50	60	100
2	1500	1800	2400	2700	3000	3600	....
4	750	900	1200	1350	1500	1800	3000
6	500	600	800	900	1000	1200	2000
8	375	450	600	675	750	900	1500
10	300	360	480	540	600	720	1200
12	250	300	400	450	500	600	1000
14	214.3	257	343	386	428.6	514.2	853.2
16	187.5	225	300	337.5	375	450	750
18	166.6	200	266.6	300	333.3	400	666.4
20	150	180	240	270	300	360	600

$$\text{Synchronous speed} = \frac{120 \times f}{p}$$

Considerando un pistón que se desplaza en un cilindro empujando contra un fluido en una cañería que le ofrece una resistencia "p". Durante un tiempo "t" el pistón podrá recorrer una distancia L y la persona ejercer una fuerza F en el pistón realizando un trabajo para mantener este proceso en movimiento.



Recordando que Trabajo es Fuerza por distancia.

$$W = F \times L$$

Para un movimiento continuo, la fuerza es equilibrada por la presión "p" actuando en la superficie A

$$W = (p \times A) \times L = p \times (A \times L) = p \times V$$

Potencia: El trabajo por unidad de tiempo.

$$\frac{W}{t} = \frac{p \times V}{t}$$

$$\text{Power} = p \times Q$$

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

"Q" es el volumen por unidad de tiempo, el cuál en el lenguaje de las bombas se llama "Flujo", "Capacidad" o "Entrega". Dentro de la bomba, el fluido se mueve contra la presión del pistón, engranaje rotativo, o impulsor, etc.

Potencia Ideal: Potencia hidráulica = FHP = p x Q x Constante midiendo "p" en psi y "Q" flujo en gpm llegamos a:

$$\begin{aligned}
 \text{psi} \times \text{gpm} &= \frac{\text{lbf} \times \text{gal}}{\text{in}^2 \times \text{min}} \times \left(144 \frac{\text{in}^2}{\text{ft}^2}\right) \times \left(\frac{\text{ft}^3}{7.48 \text{ gal}}\right) \times \left(\frac{\text{min}}{60 \text{ sec}}\right) \\
 &= \frac{\text{lbf} \times \text{ft}}{\text{sec}} \times \left(\frac{144}{7.48 \times 60}\right) \times \left(\frac{\text{HP}}{550 \frac{\text{lbf} \times \text{ft}}{\text{sec}}}\right) = \frac{\text{BHP}}{1714}
 \end{aligned}$$

Por lo tanto

$$\text{FHP} = \frac{p \times Q}{1714}$$

Lo que ocurre en la realidad es que aparece la fricción de la cañería, ejercida por las imperfecciones de la pared sobre el líquido y el roce del pistón contra las paredes de la cañería además de algún retroceso de líquido hacia la zona de baja presión a través de resquicios entre el pistón y las paredes hace que  $BHP = FHP + \text{Perdidas}$  lo que nos lleva a introducir el concepto de eficiencia

$$\eta = \frac{FHP}{BHP}$$

$$FHP = BHP \times \eta$$

$$BHP = \frac{p \times Q}{\eta \times 1714}$$

Esta ecuación es usada cuando tratamos con bombas de desplazamiento positivo, pero en el mundo de las bombas centrífugas se acostumbra a expresar presión en pie de altura de líquido (ft) usando el peso específico relativo.

$$H = \frac{p \times 2.31}{SG} \text{ (feet of water)}$$

$$BHP = \frac{\left(\frac{H \times SG}{2.31}\right) \times Q}{\eta \times 1714} = \frac{H \times Q \times SG}{\eta \times 3960}$$

**Curva del Sistema**

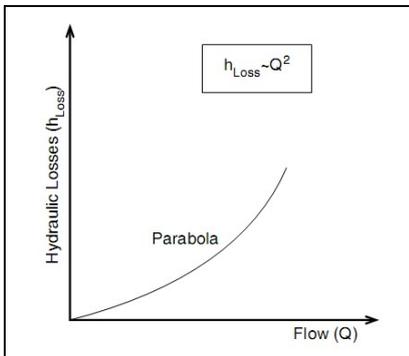
Se ha establecido que el caudal y la presión son los parámetros principales para una aplicación. Otros parámetros, tales como velocidad de la bomba, viscosidad, peso específico, etc., tendrán un efecto sobre la presión o el caudal por modificar la hidráulica del sistema de bombeo en el cual la bomba opera. Un mecanismo de tales cambios puede dirigirse directamente hacia uno de los componentes de pérdidas, llamado pérdidas hidráulicas. Esencialmente, cualquier restricción al paso del fluido requiere de un gradiente de presión para superarlo. Estas restricciones son válvulas, orificios, codos, y fricción de la cañería. De los fundamentos de la hidráulica enunciados por la ecuación de Bernoulli, una caída de presión (pérdidas hidráulicas) son proporcionales a la velocidad (Energía cinética del fluido convertida en altura de cabeza o presión)

$$h_{\text{loss}} = K \frac{V^2}{2g}$$

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

$$h_{\text{loss}} \sim Q^2$$

Para el flujo de fluido que circula por una tubería, la velocidad es igual a: Esto significa que las pérdidas de presión son proporcionales al cuadrado del caudal Q



**Tipos de Fluidos**

Las bombas se usan para mover fluidos. Los fluidos incluyen líquidos, gases disueltos y sólidos. Los gases incluyen aire disuelto y vapores de hidrocarburos. Los sólidos incluyen arena, arcilla y escoria. Los tipos más comunes de fluidos bombeados en las operaciones aguas arriba son agua, crudo, aceite, condensado, aceites lubricantes, glicoles y aminas. Cada fluido tiene diferentes propiedades físicas. Propiedades físicas que se deben tomar en cuenta al dimensionar y seleccionar una bomba son las siguientes:

- ✓ Temperatura de Succión
- ✓ Peso específico
- ✓ Viscosidad
- ✓ Presión de Vapor
- ✓ Contenidos de sólidos (si se provee)
- ✓ Lubricidad (resbaladizo)

**Velocidades para el transporte de Fluidos en Cañerías**

Como indicación general. Se pueden aceptar las siguientes velocidades medias de fluidos en cañerías.

Aire comprimido	7 - 10	m/seg
Gas natural	20 - 40	m/seg
Vapor saturado	20 - 40	m/seg
Vapor sobrecalentado	40 - 100	m/seg
Agua	1 - 3	m/seg
Petróleo	0,3 - 1,5	m/seg

## 1. - INTRODUCCIÓN

### 1.1.- ¿Qué son las Bombas Hidráulicas?

Las bombas suministran energía a un líquido para su transporte contra la acción de la gravedad o alcanzar un recipiente a presión o vencer resistencia por fricción, etc. Dependiendo de determinados parámetros, hay varias formas de suministrar energía al fluido. Algunas de las principales consideraciones a la hora de seleccionar una bomba incluyen: capacidad, presión diferencial requerida, características del fluido, temperatura, presión y características del sistema.

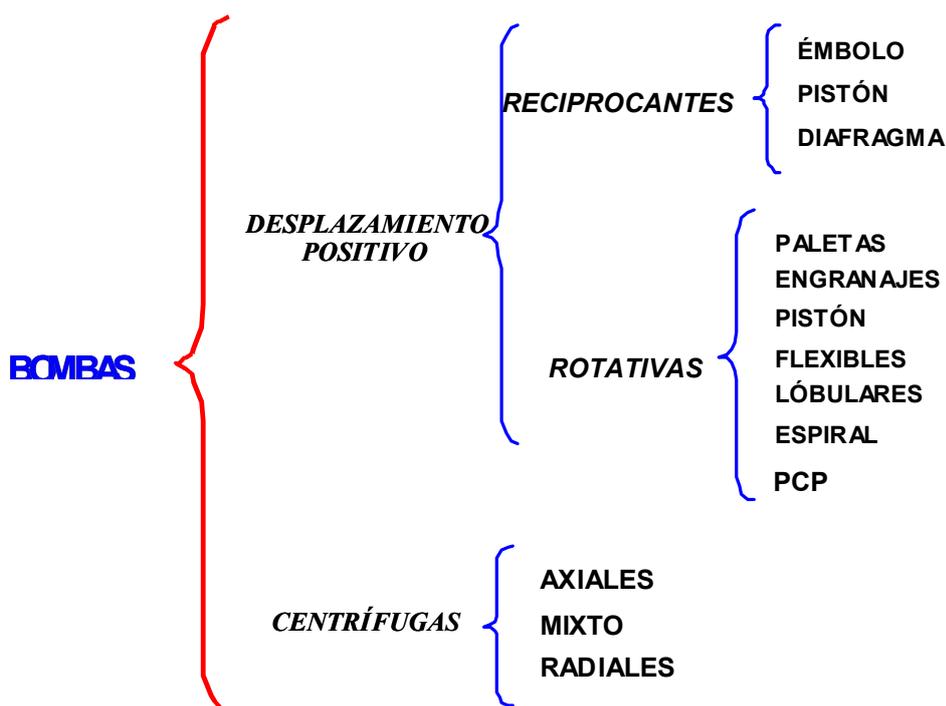
Habitualmente, el tipo de bomba a escoger es principalmente una cuestión económica. Técnicamente, bombas centrífugas y alternativas pueden realizar prácticamente los mismos servicios, sin embargo, en la realidad, hay aplicaciones en las que elevados caudales requeridos hacen una bomba alternativa inviable. Normalmente esas aplicaciones son asignadas a bombas centrífugas, mientras que, como regla general muy simplificada, las bombas alternativas se utilizan más para servicios de menores caudales y altas presiones.

→ Son máquinas que absorben energía mecánica y la restituyen al fluido que la atraviesa en forma de energía hidráulica, en las denominadas de desplazamiento positivo (reciprocantes o rotativas) en forma de presión y en las dinámicas o centrífugas en forma de velocidad.

→ Son empleadas para impulsar toda clase de líquidos (agua, aceites, combustibles, ácidos etc.) y también para desplazar líquidos espesos con sólidos en suspensión.

### 1.2. - Clasificación General

Si bien existen muchos tipos de bombas, cada una diseñada especialmente para un fin específico, pueden clasificarse según el siguiente cuadro por alguna de sus características.

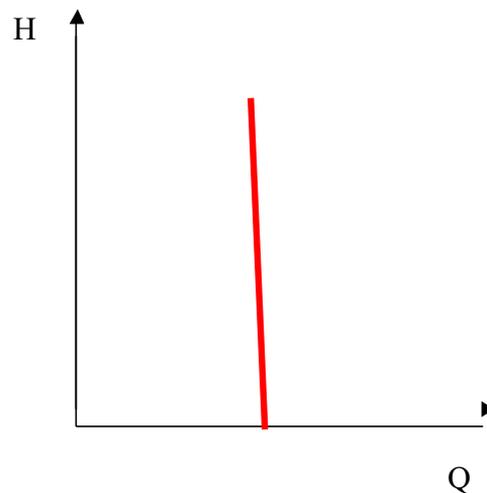
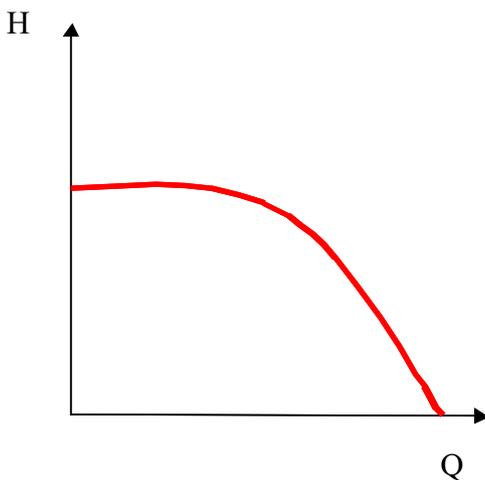


### 1.3. - ¿En qué se diferencian?

En una bomba alternativa (desplazamiento positivo) no se genera una altura. Estas bombas generan un movimiento lineal y un caudal variable en la conexión de descarga. La altura es generada por la resistencia del sistema a fluir. Por ello, estas bombas toman la potencia necesaria hasta que esta es suficiente para superar la resistencia del sistema aguas abajo. Si existen excesivas restricciones al flujo, la bomba puede sobrepresionarse y fallar por el punto de menor resistencia o quemar el motor. Por tanto, requieren la instalación de una válvula de seguridad en la impulsión tan próxima a la bomba como sea posible para evitar dicha sobrepresión.

En una bomba centrífuga, el líquido es dirigido al centro del impulsor (rodete/impeller) que mediante su rotación lo acelera a una alta velocidad y lo descarga fuera de la bomba. Cuando el líquido en el impulsor es forzado fuera del centro del mismo, se produce una reducción de presión en dicho punto que hace que entre más líquido en la bomba. Esto supone un flujo continuo a través de la bomba con una generación de altura producida por el impulsor.

<p><b>4 BOMBA CENTRÍFUGA</b></p> <p><i>Vemos que en la curva Q-H de una bomba centrífuga no nos entrega una presión (altura) constante sino que esta disminuye al aumentar el caudal requerido.</i></p>	<p><b>4 BOMBA DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO</b></p> <p><i>En la curva Q-H de las bombas de desplazamiento positivo vemos que para cualquier presión (altura) el caudal se mantiene casi constante.</i></p>
---	---



Desde el punto de vista del funcionamiento, puede observarse que las de desplazamiento positivo toman un volumen de líquido constante y lo transportan mecánicamente en una carrera (lo empujan), mientras que las centrífugas lo expulsan mediante el impulsor giratorio (le imprimen velocidad).

## 2. - BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

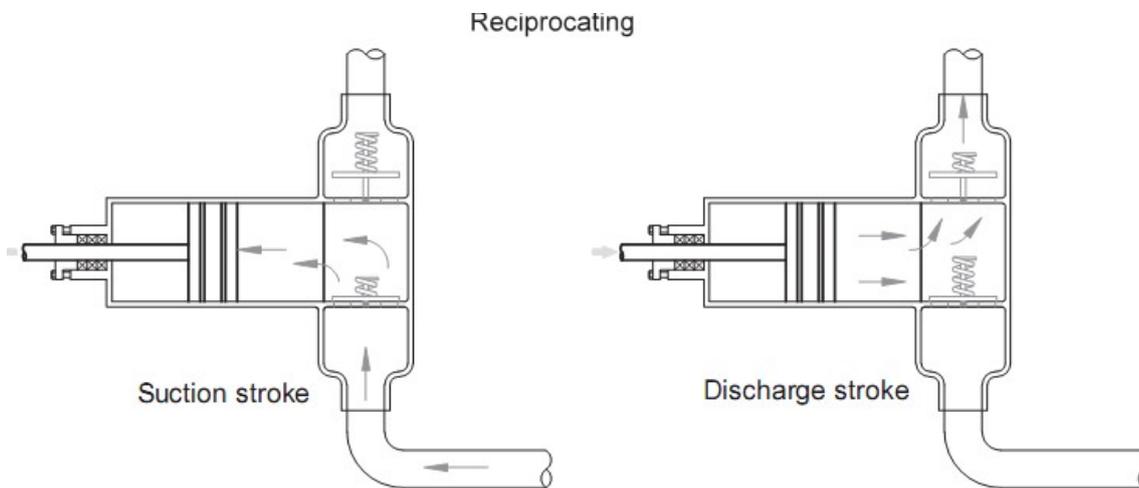
✚ RECIPROCANTES

✚ ROTATIVAS

## 2.1. - Principales características

- Las bombas de desplazamiento positivo son aquellas que entregan una cantidad fija de líquido por cada carrera del pistón o del accesorio móvil, de este modo resulta de gran dificultad variar el volumen entregado.
- La dinámica de las corrientes que fluyen no juega un papel esencial en la transmisión de energía.

## 2.2.- ¿Cómo funcionan?



El principio de funcionamiento de las bombas de desplazamiento positivo consiste en el movimiento de un fluido causado por la disminución del volumen en una cámara. Dentro de esta cámara existe un órgano intercambiador de energía, el cual puede ser alternativo (émbolo/pistón) o rotativo (engranajes, lobulos). Así es que siempre está presente una cámara en donde se aumenta el volumen para que se succione y otra en donde se disminuye para que se expulse el fluido. El intercambio de Energía con el fluido se hace en forma de **PRESIÓN**.

Si las paredes del cuerpo y del elemento móvil son lo suficientemente robustos y el motor lo suficientemente potente, la bomba proporcionará toda la presión que se pide. Teóricamente, la curva Q-H de una bomba de desplazamiento positivo será una paralela al eje de ordenadas, lo que generalmente no se cumple debido a las pérdidas por fricción y rendimientos inferiores al 100%.

## 2.3.- Bombas Reciprocantes

Son unidades que descargan una cantidad definida de líquido durante la carrera o movimiento del pistón o del émbolo.

A través de una biela y manivela se convierte el movimiento rotatorio del motor en uno alternativo. Es necesario para su uso un sistema de válvulas sincronizadas con el movimiento del pistón o del émbolo tal como en un motor alternativo de combustión interna.

El suministro real suele ser menor que el volumen barrido debido a las fugas observadas al paso del pistón y a las fallas de llenado del cilindro.

Se puede definir la eficiencia volumétrica como el cociente entre la descarga real y la correspondiente al desplazamiento del pistón. Para bombas con buen mantenimiento el rendimiento llega a ser del orden del 95%.

### 2.3.1. - Principales características

- 4 Descarga pulsante.
- 4 Maneja líquidos limpios y claros. También algunos bifásicos y aceptan algún sólido en suspensión
- 4 Elevación máxima normal de succión: 6,6 m

### 2.3.2. - De émbolo y pistón

Estas pueden tener 1,2 o más émbolos o pistones (simplex, dúplex o múltiplex).

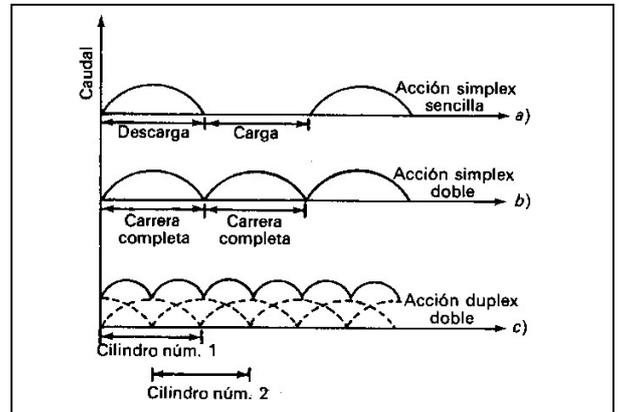
El caudal de suministro de la bomba varía con el tiempo debido a la naturaleza periódica del movimiento del pistón.

Es evidente que al agregar mayor cantidad de émbolos / pistones la descarga sigue siendo pulsante pero con menores saltos debido a la superposición de los efectos.

Cuando el flujo es nulo surge el problema de que el pistón intenta acelerarse repentinamente por lo que se produce un golpe en la detención del mismo. Para evitar las posibles oscilaciones se coloca una cámara de aire en la impulsión para amortiguar el efecto.

En el caso de las dúplex se evitan estas depresiones, porque un cilindro compensa al otro.

A continuación se presenta un gráfico ilustrativo del efecto producido por uno, dos y tres cilindros respectivamente (FIG 1).



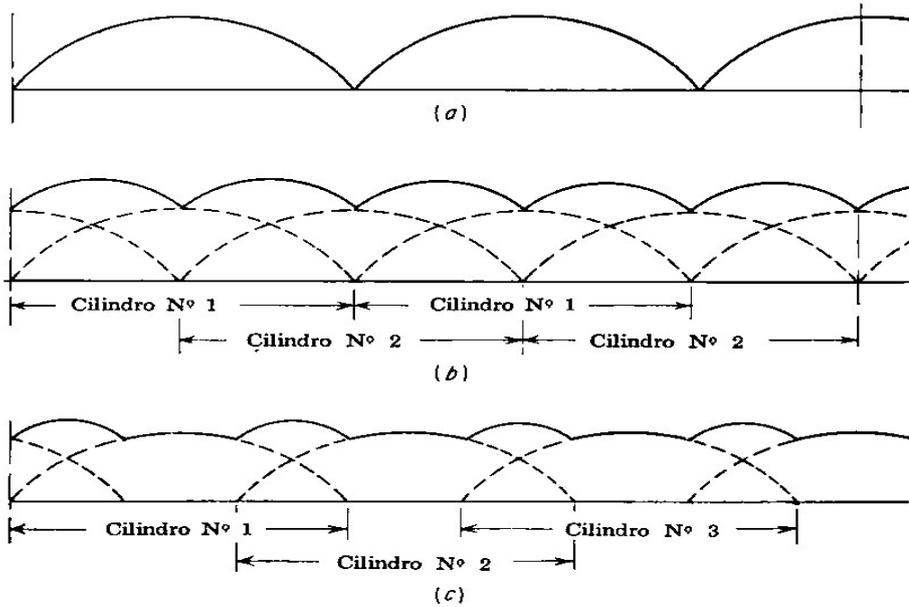


FIGURA 1: Efecto de la combinación de cilindros

En ésta clase de bombas se puede manejar el volumen de la/s cámara mediante la variación del punto de pivote de la biela con el cigüeñal del motor. Esto es, al acercar el punto de pivote al centro del cigüeñal el recorrido del émbolo es menor, por lo que el volumen desalojado en cada carrera es también menor. Cuando por el contrario se aleja el punto pivote del eje, la carrera del émbolo aumenta, desalojando así mayor cantidad de líquido (FIG 2).

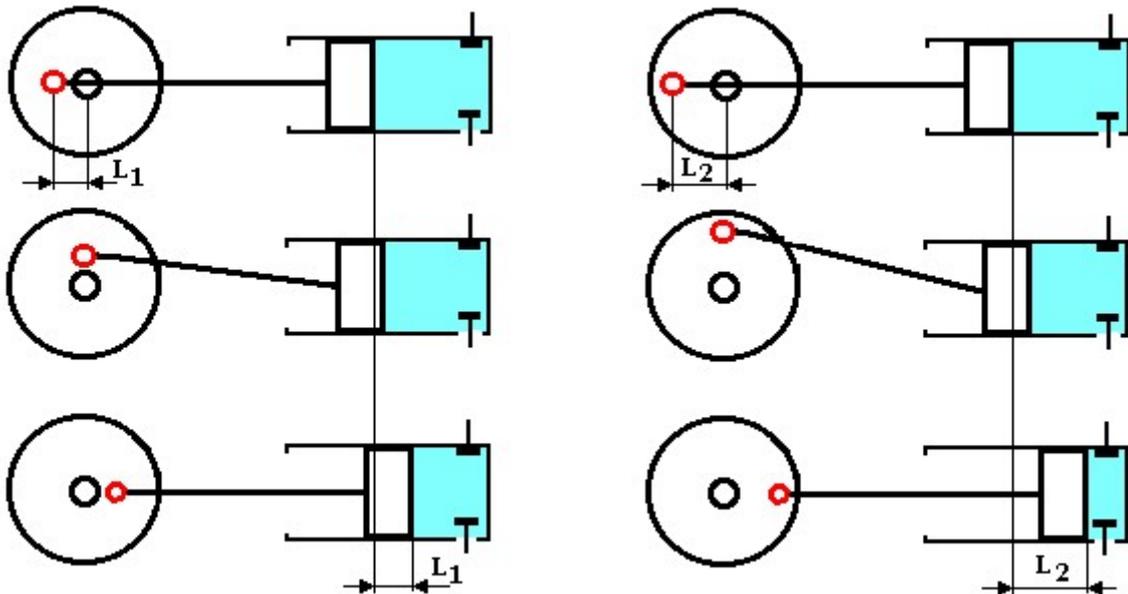


Figura 2: Efecto del punto de pivote

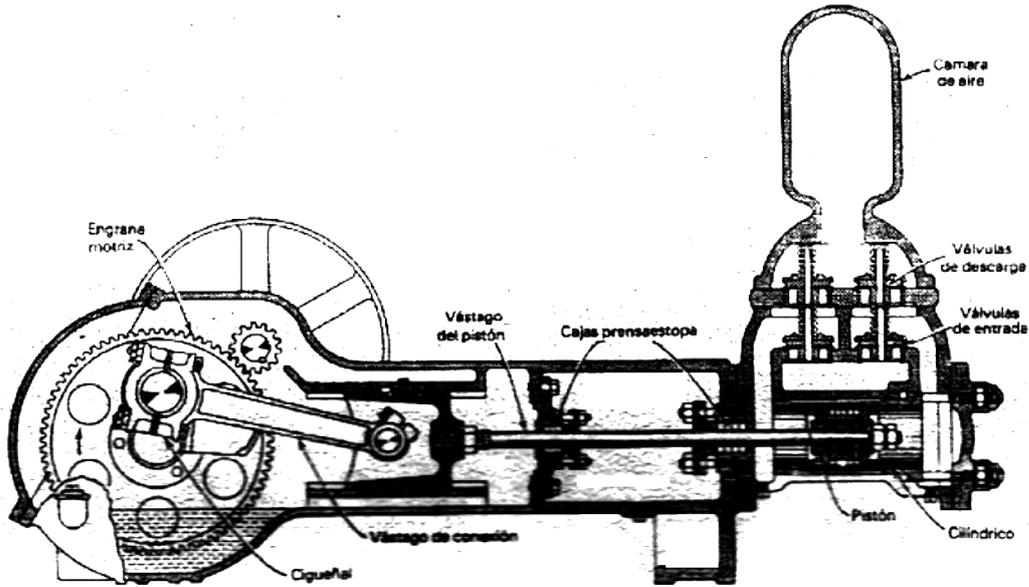


Figura 4: Esquema de bomba de pistón de simple efecto

### 2.3.3. - De diafragma

En este tipo de bombas no existe un pistón o émbolo, sino un diafragma de material elastómero. La parte que maneja el fluido es independiente de la parte que suministra la potencia, evitando así posibles contaminaciones del fluido, lo que lo hace especialmente apto para la industria alimenticia.

El desplazamiento de éste diafragma se puede lograr por medios mecánicos o hidráulicos.

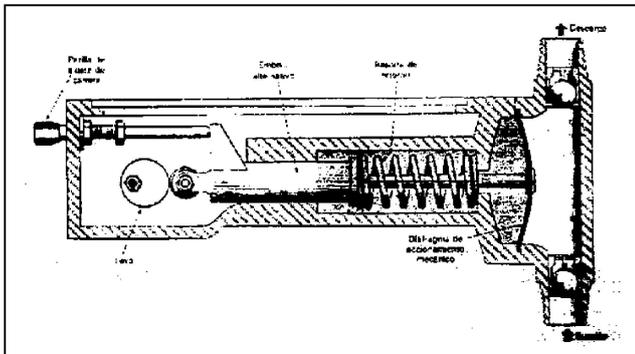


Figura 5 a : Diafragma de transmisión con leva o excéntrico

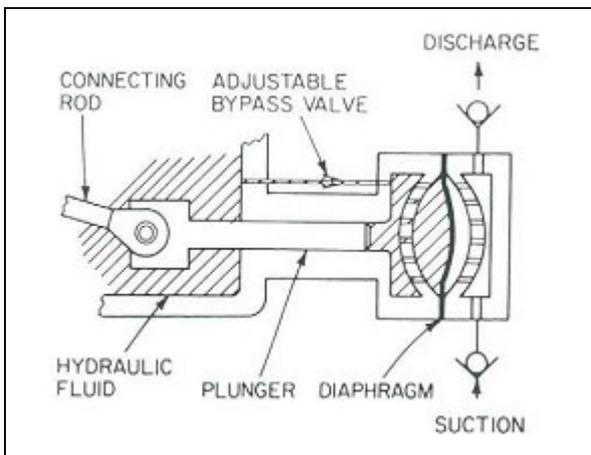


Figura 5 b :Diafragma de transmisión con derivación hidráulica

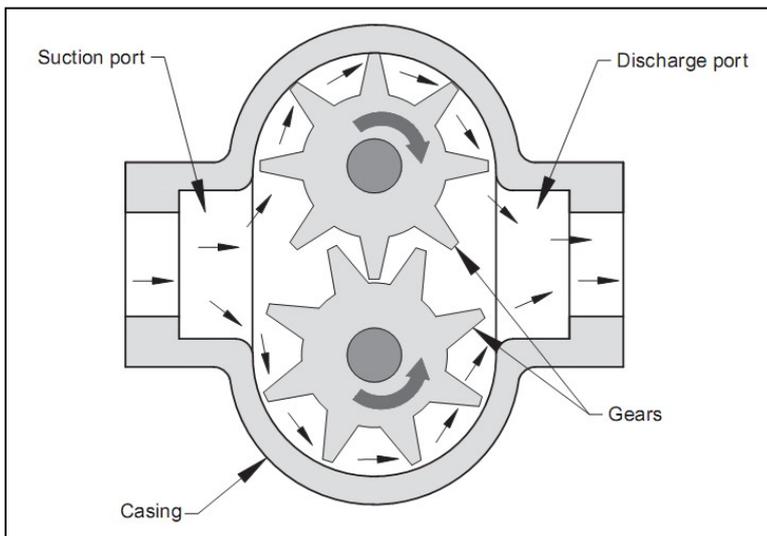
## 2.4. - Bombas Rotatorias

Son unidades que poseen engranajes, pistones, levas, tornillos, etc., que operan de manera tal que al girar crean una presión reducida en la entrada haciendo que la presión externa empuje el líquido dentro de la carcasa de la bomba para que luego con una nueva rotación el mismo es obligado a salir de esta.

### 2.4.1. - Principales características

- 4 Tipo de descarga continuo
- 4 Maneja líquidos viscosos y no abrasivos
- 4 Elevación máxima normal de succión: 6,6 m.

### 2.4.2. - Bomba de Engranajes Externos



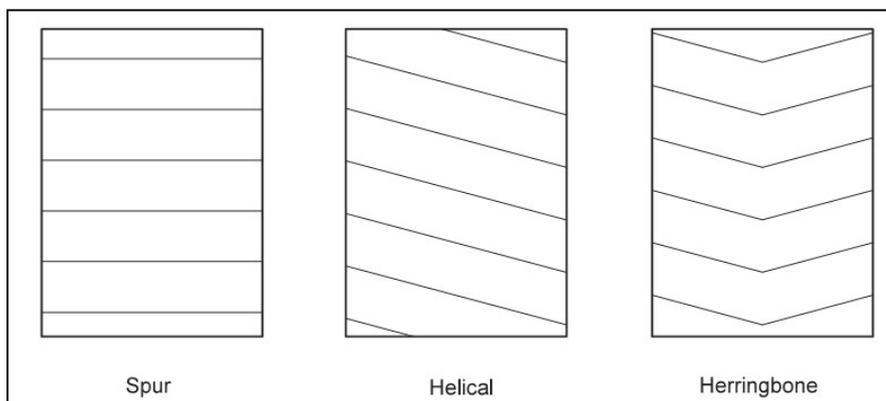
Al girar los engranajes, en el lado de la admisión siempre hay dos dientes (uno de cada engranaje) que se separan, creando un vacío con lo que el líquido penetra en el estator hacia el impulsor, donde el líquido es impulsado por otros dientes.

- Compactas en tamaño
- Pueden producir altas presiones
- Muy útiles para fluidos altamente viscosos
- Fabricados en un

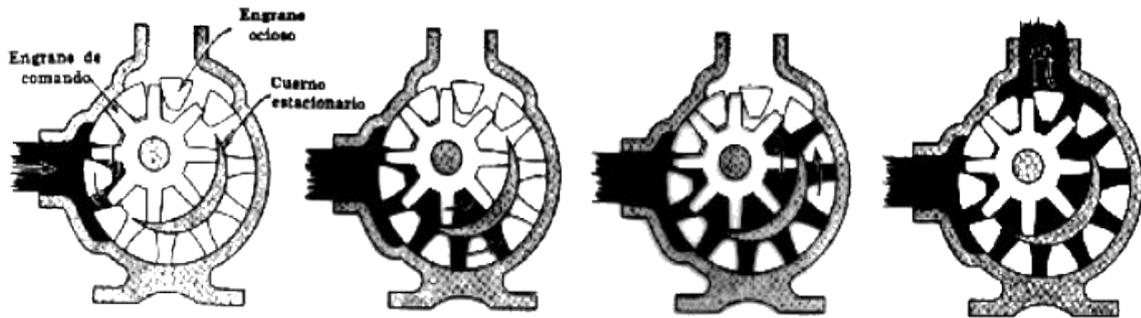
amplio rango de materiales que permiten compatibilidad con los fluidos bombeados.

- Apropriados para el uso con materiales sensibles a esfuerzos de corte.
- Debido a la estrecha tolerancia con los engranajes debe usarse con líquidos limpios.

Formas de los Engranajes



### 2.4.3. - Bomba de Engranajes Internos

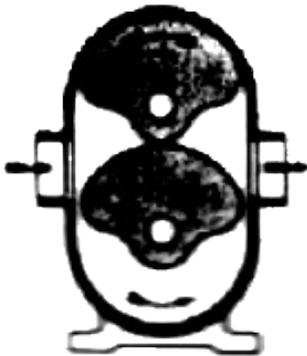


Al girar los engranajes, en el lado de la admisión siempre hay dos dientes que se separan, creando un vacío con lo que el líquido penetra en el estator obligado por la presión que le ejerce el fluido por encima de él hacia el impulsor, donde el líquido es impulsado por otros dientes.

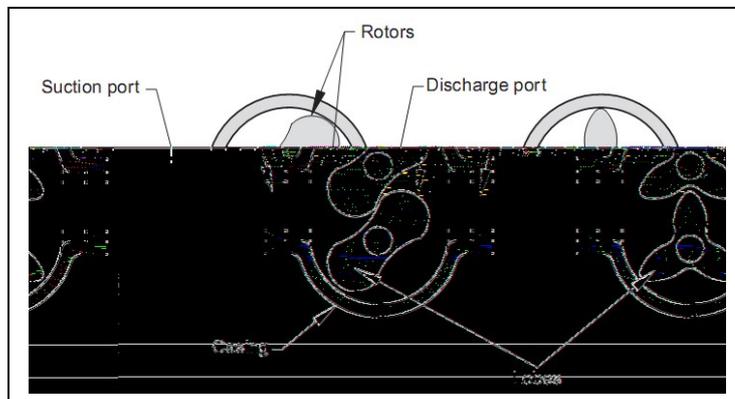


### 2.4.4. - Bomba Lobular

Se tiene lóbulos en lugar de las ruedas dentadas o de los engranajes. La forma de los lóbulos permite transmitir el movimiento de uno a otro

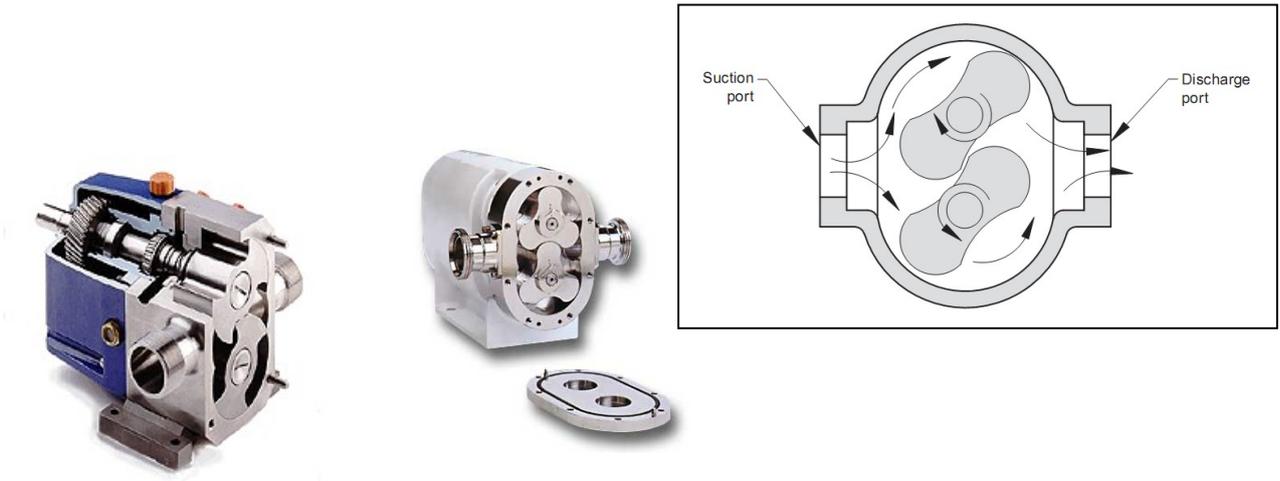


Monolobular

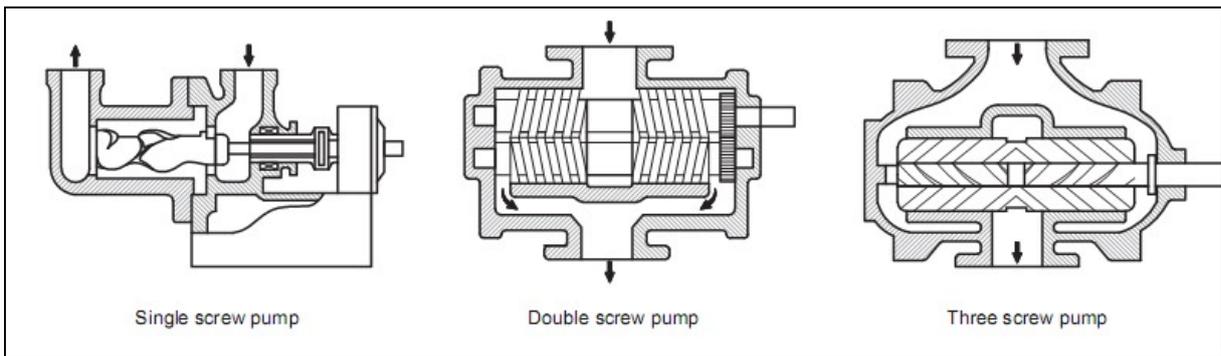


Bilobular

Trilobular

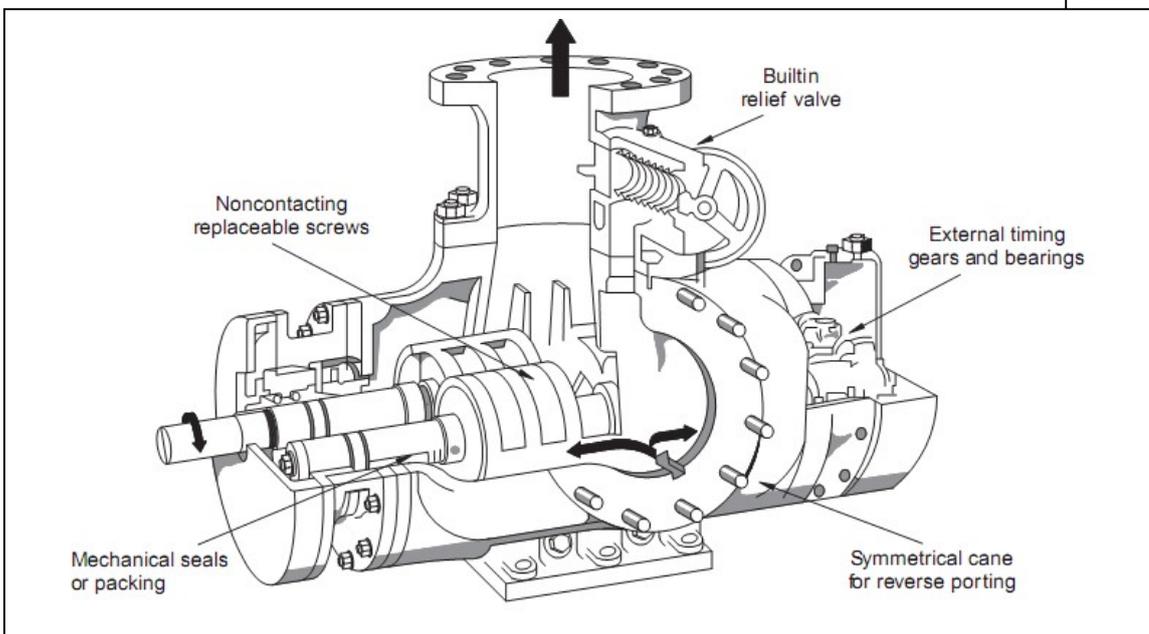
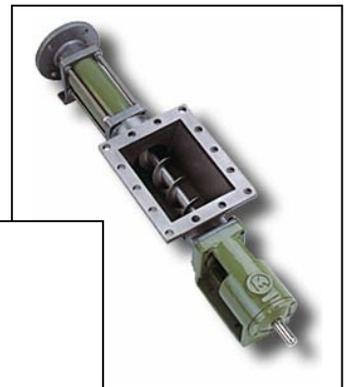


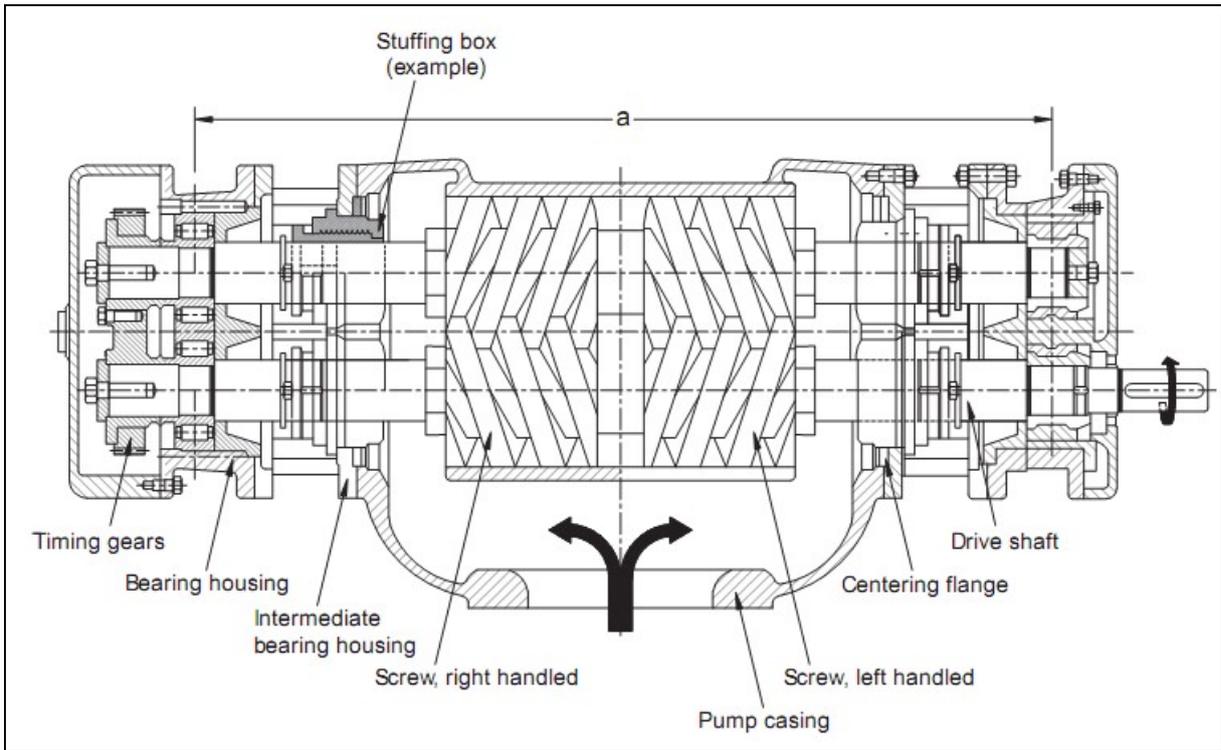
### 2.4.5. - Bomba de Tornillos



1,2 o 3 tornillos dando vuelta a lo largo de sus ejes, con el líquido fluyendo entre los relieves del tornillo y la carcasa.

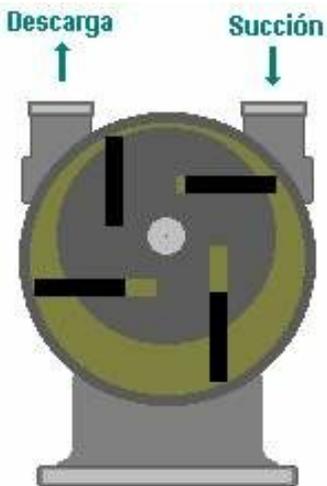
### Un tornillo





**Dos tornillos**

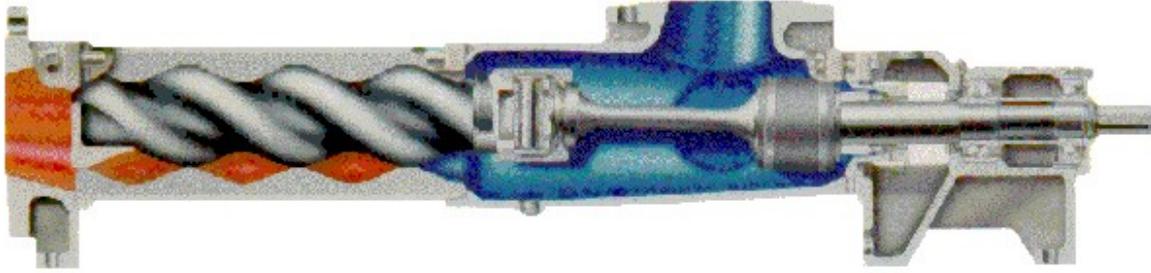
**2.4.6. - Bomba de Paletas Deslizantes**



Este tipo de bombas trabaja de forma muy particular, ya que posee un rotor excéntrico acanalado, donde se alojan paletas deslizantes fabricadas de un material desgastable. Al girar el rotor la fuerza centrífuga “expulsa” a las paletas hacia fuera, topando con la carcasa de la bomba, creando de ésta manera cámaras que en la zona de la brida de succión aumentan su volumen en forma progresiva dando lugar a una depresión por la cual el fluido ingresa a la bomba. A medida que el rotor gira, el volumen de las cámaras aumenta hasta que comienza a decrecer, comprimiendo al fluido para expulsarlo por la brida de descarga.

**2.4.7. - Bomba con Rotor Excéntrico**



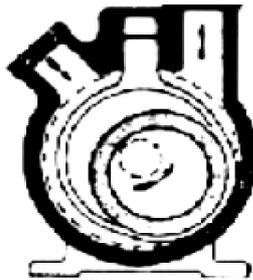


Llamada también de “cavidades progresivas” o PCP (por su sigla en inglés Progressive Cavity Pump). Esta bomba consiste en un rotor que realiza un movimiento compuesto. Este gira alrededor de su eje mientras que este gira con trayectoria circular. El material atrapado en los espacios vacíos se mueve en forma continua hacia la descarga

Pueden bombear fluidos muy viscosos (chocolate, masilla, grasa, etc.).

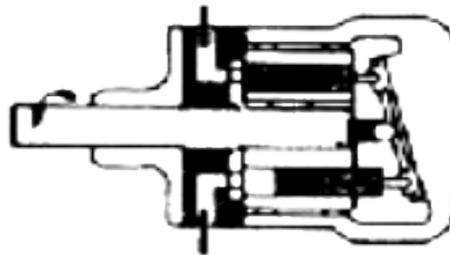
Esta acción de bombeo da un flujo continuo con velocidades bajas, estables y uniformes.

#### 2.4.8. - Bomba de Camisa Flexible



Camisa circular montada sobre el perímetro de la carcasa, donde dentro de ella gira excéntricamente un cilindro.

#### 2.4.9. - Bomba de Émbolos Axiales



#### 2.4.10. – Bomba de rotor flexible

En general todas las bombas rotoestáticas son reversibles, es decir que pueden funcionar como un motor hidráulico. El que algunas no lo sean no es virtud de la hidráulica sino de la mecánica del aparato.

En las transmisiones y controles se usan casi exclusivamente las máquinas de desplazamiento positivo, quedando casi eliminadas de este dominio las turbomáquinas

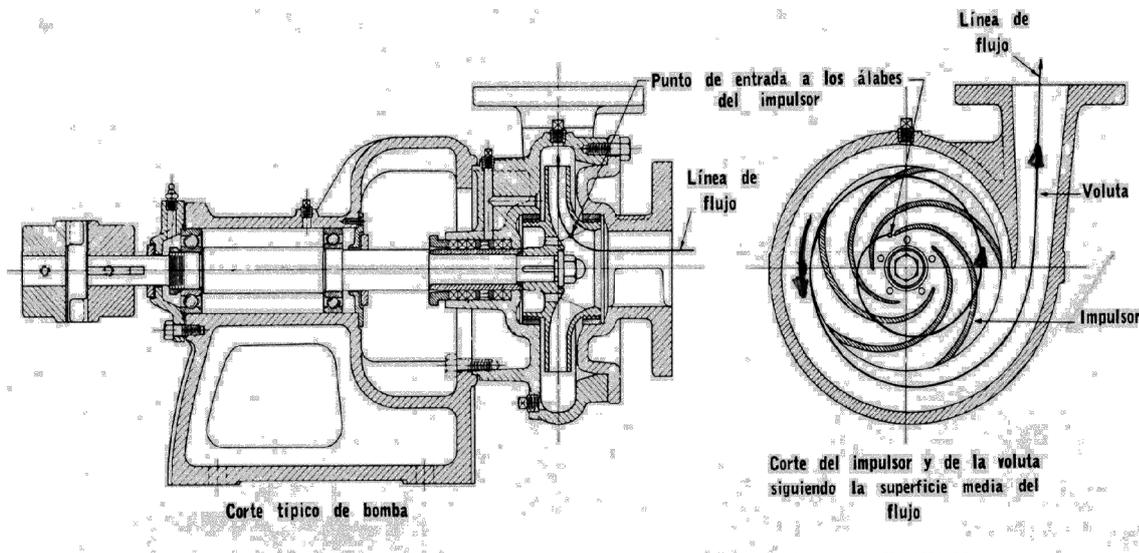
Para ello existen dos razones:

1.- Si, por ejemplo, se emplease una bomba centrífuga para el sistema hidráulico de una retro, al encontrar esta mayor resistencia en el terreno, se reduciría la velocidad de trabajo. Empleando una bomba rotoestática, no.

2.- Si se supera cierta presión una bomba centrífuga podría limitar la operación de la máquina al encontrar resistencia mayor.

### 3.- Bombas Centrífugas

#### 3.1. – Definición:



Una bomba centrífuga es una máquina que consiste de un conjunto de paletas rotatorias encerradas dentro de una caja. Las paletas imparten energía al fluido por la fuerza centrífuga. Entonces una bomba tiene dos partes principales: **un elemento giratorio**, el impulsor y la flecha y **un elemento fijo** la caja o voluta.

#### 3.2. - Características:

Las bombas centrífugas ocupan más del 80% del total de bombas utilizadas en las operaciones de producción. Las bombas centrífugas se compran para cumplir con uno de estos dos niveles de servicio:

- ❖ Bombas de Servicio mediano: Usadas en servicios no críticos, no peligrosos. Se construyen bajo las normas ANSI (American National Standard Institute) B 73.1 (horizontal) y B 73.2 (Vertical en línea)
- ❖ Bombas de Servicio Pesado: Usadas en servicios críticos, peligrosos o de servicio pesado incluyendo químicos, refinación y otros servicios de producción. Construidas bajo normas API ( American Petroleum Institute) Standard API 610 “ Centrifugal Pumps for General Refinery Service”. Las bombas centrífugas utilizadas en servicios contra incendios también pueden considerarse de servicio pesado.

Debido a su versatilidad y características, las bombas centrífugas son las más utilizadas en la industria del refino. Las bombas centrífugas emplean, como ya se ha comentado, la rotación de un impulsor como medio de transferir la energía al fluido. El flujo es uniforme y sin pulsaciones. Dado que estas bombas operan por conversión de velocidad en altura de bombeo, el impulsor de la bomba girando a la misma velocidad desarrolla la misma altura de elevación teórica medida en columna del líquido bombeado con independencia de la densidad del fluido. Sin embargo, la densidad del líquido determina la presión conseguida.

**Ventajas:**

- Ofrece un flujo sostenido a presiones uniformes sin variación de carga.
- Diseño simple
- Bajo costo inicial
- Flexibilidad de aplicaciones
- Gran rango de H-Q
- Marcha suave y silenciosa

**Desventajas:**

- Rendimiento inferior a las alternativas
- No poseen autoaspiración entonces debemos cebarlas.
- Caudal sensible al cambio de presión.

### 3.3. - Clasificación:

Las Bombas Centrífugas se clasifican de varias formas, una de estas clasificaciones es según la dirección del fluido en relación con el eje de rotación:

- **Bombas de flujo radial:** en estas el fluido se desplaza perpendicular al eje.
- **Bombas de flujo axial:** en estas el fluido se desplaza en la dirección del eje.
- **Bombas de flujo mixto:** El fluido se desplaza en ambas direcciones.

Otra clasificación es según el tipo de impulsor que utilice: *(La influencia de los impulsores se da en el costo de la bomba y en su posterior rendimiento.)*

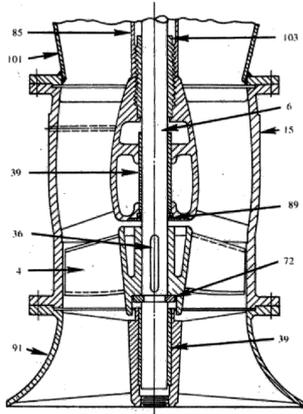
- **Impulsores cerrados**
- **Impulsores abiertos**
- **Impulsores semiabiertos**

También se pueden clasificar en Bombas Centrífugas de **una etapa** o de **múltiples etapas**. Esta clasificación nos indica la forma en que se entrega la energía al fluido, si en una pasada por el rotor o en mas de una, según pase por los distintos rotores. Cuando tenemos mas de una etapa estas funcionan una a continuación de la otra por lo tanto la segunda etapa trabaja a más presión que la primera y así sucesivamente.

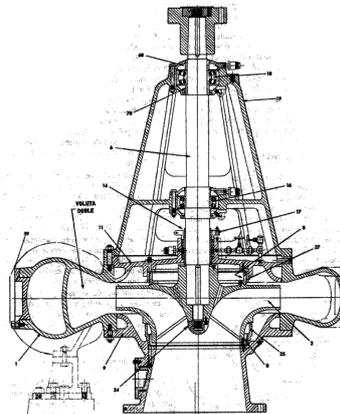


Por ultimo también pueden clasificarse según la disposición del eje o árbol motor en:

- Bombas Centrífugas verticales:
  - De foso lleno
  - De foso vacío



Bomba de foso lleno



Bomba de foso vacío

Bombas Centrífugas horizontales: *(según la ubicación de la brida de aspiración)*

- De succión en el extremo
- De succión lateral
- De succión de fondo
- De succión superior

Las bombas "on line" son las que no cambian la dirección del fluido

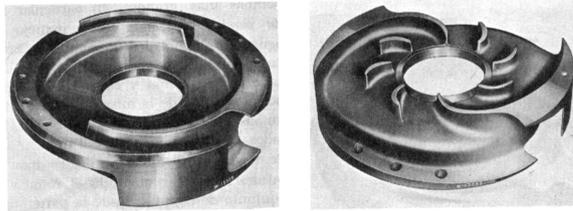
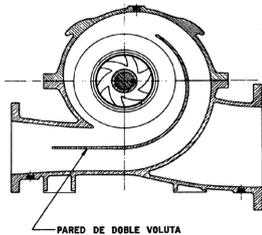
### 3.4 .- Principio de funcionamiento:

El impulsor de las Bombas Centrífugas descarga líquido a una velocidad alta. Una función de la cubierta de la bomba es reducir esta velocidad y convertir la energía cinética en energía de presión, ya sea por medio de una voluta o de un conjunto de paletas o alabes difusores.

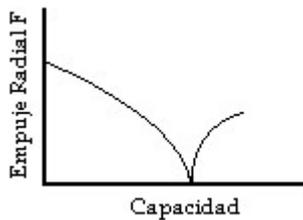
Las Bombas Centrífugas constan de dos partes fundamentales el rotor y la voluta o caja de espiral. Si bien están constituidas de muchas otras piezas las mencionadas anteriormente son las principales y sobre las que basaremos la explicación. Las otras partes constitutivas como anillos de desgaste, rodamientos, estoperos, motor, etc. hacen a la máquina pero no a su comportamiento hidráulico.

### 3.5 .- Voluta:

La cubierta o caja de espiral o voluta de la bomba centrífuga recibe su nombre de la envoltura en forma de caracol que rodea al impulsor. Esta cubierta recoge el líquido descargado por el impulsor y convierte la energía de velocidad en energía potencial. La voluta de las Bombas Centrífugas aumenta en área de su punto inicial hasta que circunda los 360° alrededor del impulsor y luego se ensancha a la abertura final de descarga. La pared que divide la sección inicial y la boquilla de descarga de la cubierta se llama lengüeta o “tajamar”.



### Empuje radial sobre el árbol:



Cuando la bomba no está trabajando a régimen, es decir en las condiciones para las que fue diseñada aparece una fuerza resultante sobre el árbol, esto produce vibraciones que pueden traer aparejadas roturas del árbol. Las opciones ante este problema son:

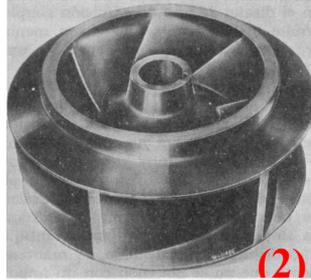
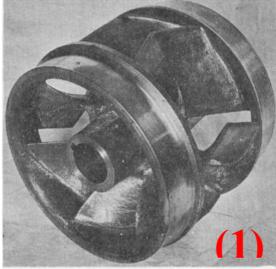
- Árbol y rodamientos más robustos, esto encarece la bomba y la hace bastante más pesada.
- Otra opción es realizar un diseño de doble voluta, una desplazada de la otra 180°, de esta manera disminuye la fuerza resultante sobre el árbol. Además tiene otra ventaja, le da más resistencia mecánica a la voluta lo que permite mayores presiones de trabajo.

### 3.6. - Impulsores:

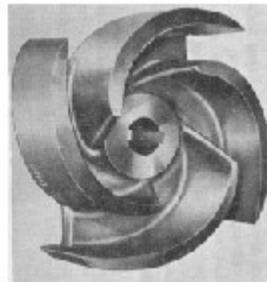
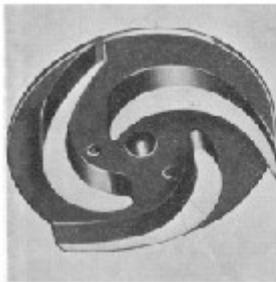
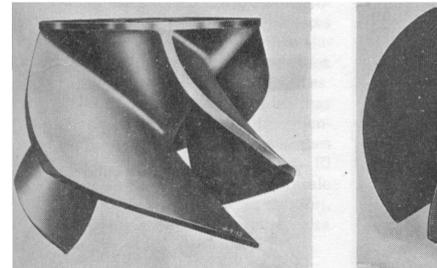
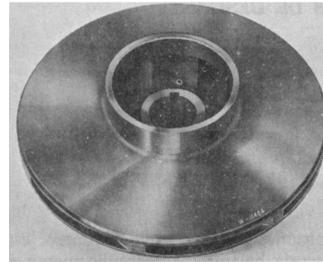
El impulsor es el corazón de las Bombas Centrífugas. Hace girar la masa de líquido con la velocidad periférica de las extremidades de los álabes, determinando así la altura de elevación producida o la presión de trabajo de la bomba. Con base en el diseño de entrada de agua, los impulsores se clasifican en:

- Impulsores de admisión simple
- Impulsores de doble admisión

En un impulsor de admisión simple, el líquido entra al ojo de succión por un solo lado (1). Como un impulsor de doble admisión es de hecho, un par de impulsores de admisión simple arreglado uno contra otro en una sola fundición, el líquido entra simultáneamente por ambos lados (2). En los impulsores de doble admisión, los dos conductos de succión de la cubierta están normalmente conectados a un conducto común de succión y a una sola boquilla de succión. La mayor área de succión de un impulsor de doble admisión, comparada con el diseño de uno de admisión simple,



permite que la bomba opere con menor carga positiva de succión neta para una capacidad dada. En otras palabras el ANP<sub>R</sub> es menor. Debajo se adjuntan otros tipos comunes de impulsores.



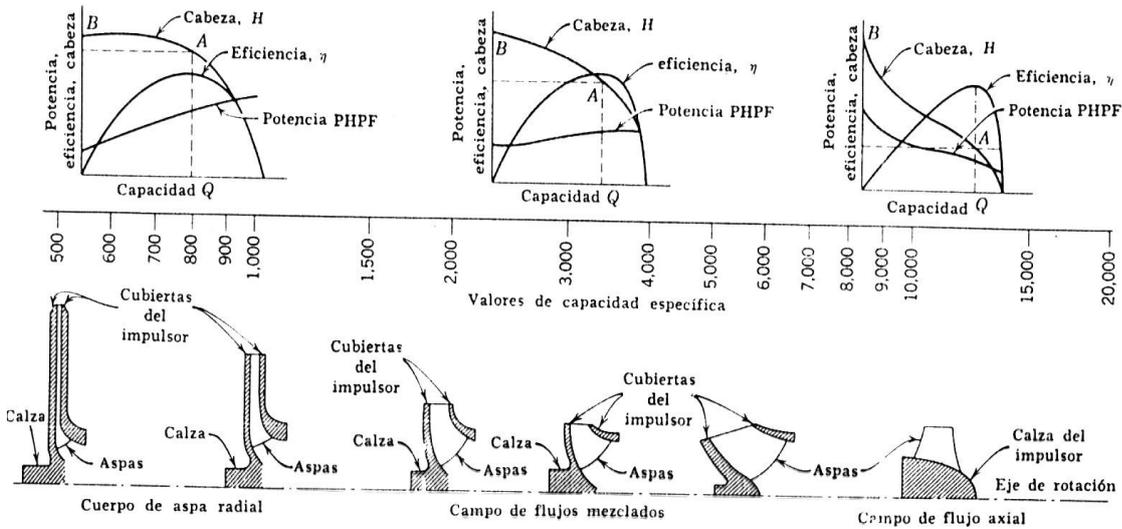
### 3.7 .- Velocidad específica:

Es la relación entre la capacidad, la velocidad de rotación y la altura desarrollada por el impulsor. Puede ser definida como las revoluciones a las que un impulsor geoméricamente similar operaría si las proporciones fueran reducidas como para que descargara un galón por minuto a un pie de altura. Se expresa de la siguiente manera:

$$N_s = \text{RPM} * Q^{1/2} / H^{3/4}$$

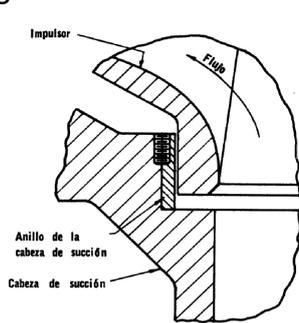
La velocidad específica nos da una idea del diseño hidráulico del impulsor, ya que un numero bajo de  $N_s$  nos dice que la bomba nos entregará poco caudal y mucha altura

de presión. Mientras que si el  $N_s$  es alto la bomba entrega grandes caudales y bajas alturas de presión.

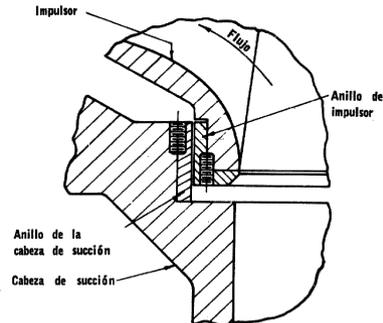


### 3.8.- Anillos de Desgaste:

Son anillos diseñados para proteger a las partes mecánicas del desgaste. Estos anillos se colocan en el rotor y en la voluta. Veremos algunos ejemplos en las siguientes figuras:

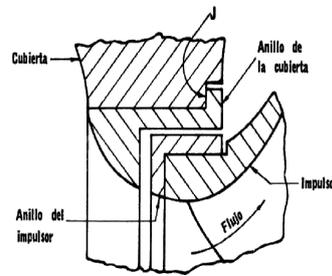
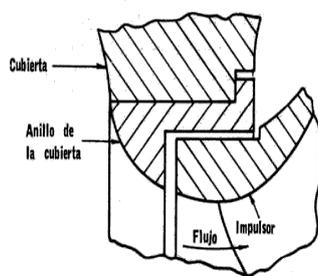


**Anillo simple colocado sobre la cabeza de succión**



**Anillo doble colocado sobre la cabeza de succión y el**

Otros tipos de anillo son los siguientes:

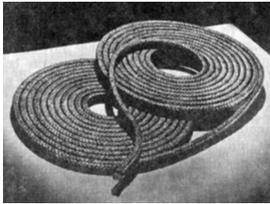


Otra función importante de estos anillos es la de evitar la recirculación del líquido. Para de esta forma evitar la pérdida de rendimiento en la bomba.

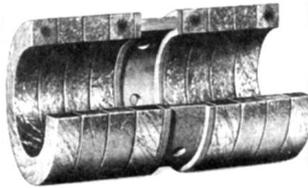
## 4.- Estoperos y Sellos Mecánicos:

Los estoperos y los sellos mecánicos son una de las partes más importantes de una bomba centrífuga y tienen la función principal de proteger a la bomba contra escurrimiento en el punto en que la flecha atraviesa la cubierta de la bomba. Por ejemplo, si la bomba maneja una elevación de succión y si la presión interior del estopero es menor que la atmosférica, la función del estopero es evitar que entre aire a la bomba. Por el contrario, si esta presión interior es mayor que la atmosférica, la función del estopero será evitar el escurrimiento del líquido fuera de la bomba. Los estoperos y los sellos mecánicos cobran mayor importancia si se ha de bombear líquidos calientes o las presiones son grandes, o los líquidos corrosivos, radioactivos, etc.

Generalmente un estopero tiene forma de un hueco cilíndrico que aloja varios anillos de empaquetadura alrededor de la flecha o del manguito de la flecha. La empaquetadura debe ser algo plástica de modo que pueda ajustarse sin dañar la flecha o el manguito. La empaquetadura puede ser en forma de espiral o de



**Empaquetadura de amianto**



**Empaquetadura suave y dura**



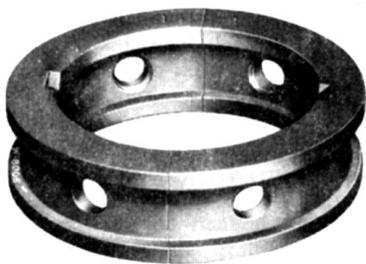
**Empaquetadura de anillo de metal**



**Empaquetadura en forma de espiral**

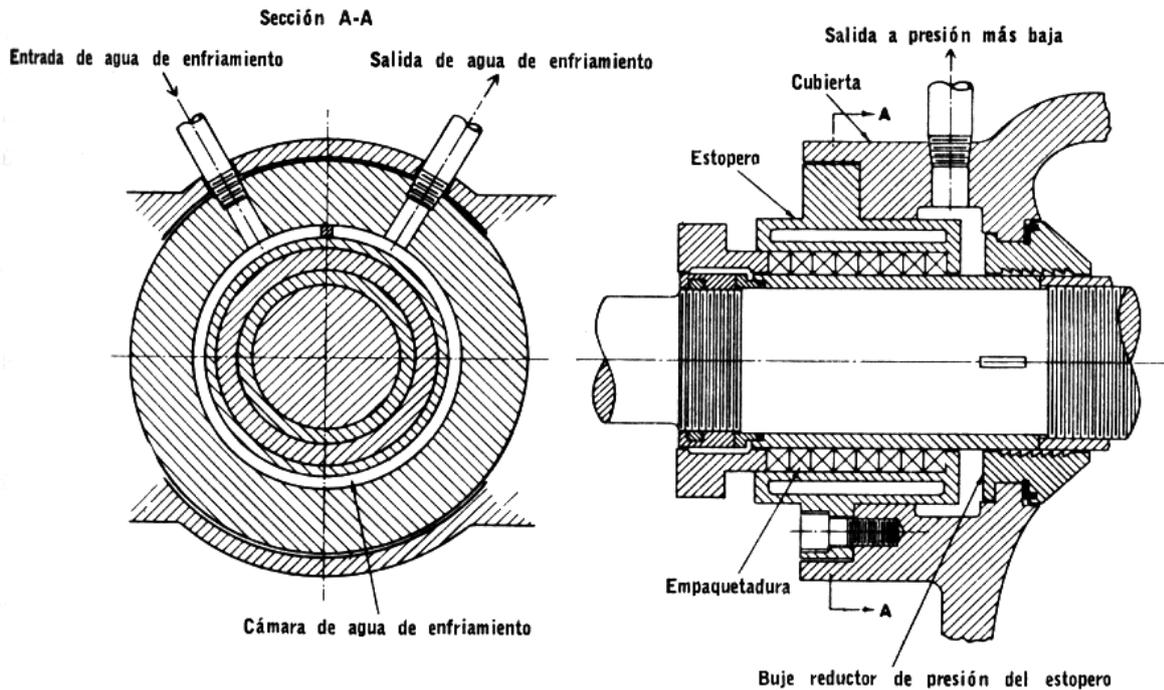
anillos, y son generalmente de asbesto grafitado o metálicas (babbit, aluminio o cobre).

Si se desea sellar el estopero, se usa un anillo farol o jaula de sello que separa los anillos de empaque en secciones aproximadamente iguales. Se introduce a presión agua o algún otro líquido de sello originando flujo del líquido obturador en ambas direcciones axiales. Esta construcción es útil para bombas que manejan líquidos inflamables o químicamente activos y peligrosos. Generalmente, están divididos axialmente para facilitar su ensamble.



**Anillo farol o jaula de sello**

**Estopero enfriado por agua**

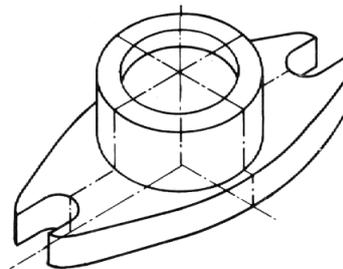


**Estopero enfriado por agua**

La empaquetadura está comprimida para dar el ajuste deseado en la flecha o manguito por medio de un cuello o casquillo de prensaestopas, que puede ajustarse en dirección axial. Los prensaestopas permiten comprimir el material de cierre contra el eje disminuyendo así la posibilidad de fuga (esta presión sin embargo no puede ser excesiva



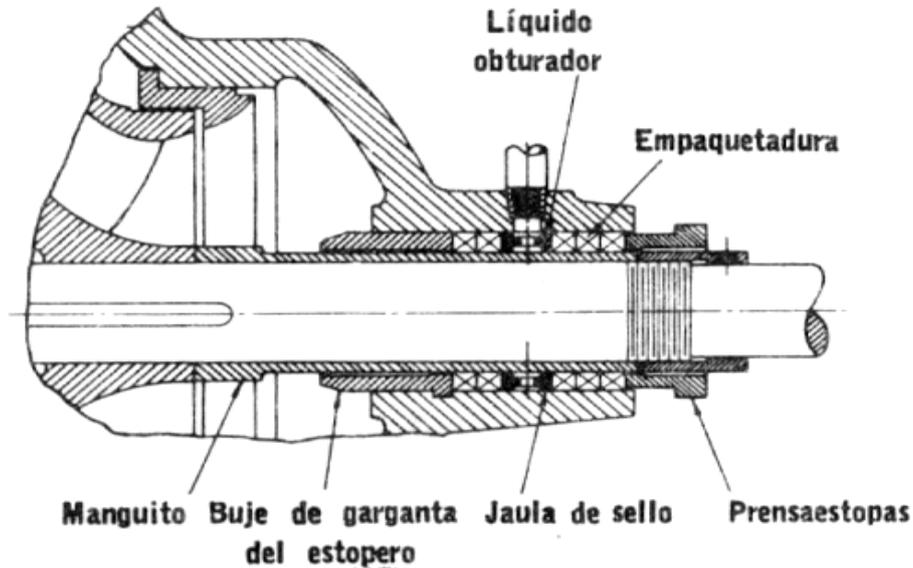
**Prensaestopas dividido**



**Prensaestopas sólido**

para no aumentar las pérdidas mecánicas). Los prensaestopas pueden ser sólidos o divididos (se puede sacar la flecha sin desmantelar la bomba). El fondo o extremo interior de la caja puede estar formado por la propia cubierta de la bomba, un buje de garganta o un anillo de base.

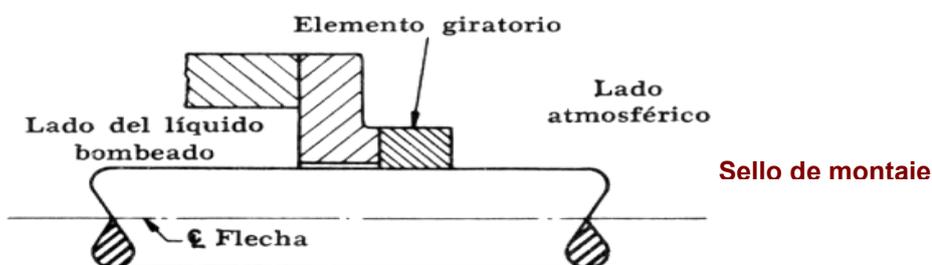
Las altas temperaturas o presiones complican el problema de mantener la empaquetadura de los estoperos. Las bombas en estos servicios más difíciles generalmente están provistas con estoperos enchavetados enfriados con agua (quitando calor al líquido que corre por el estopero y el calor generado por la fricción).



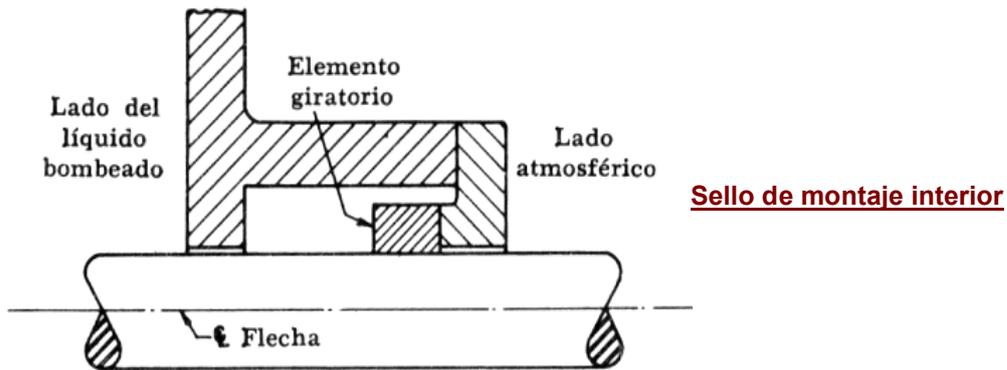
El diseño convencional del estopero y empaquetadura, sin embargo, suelen ser imprácticos para muchas condiciones de servicio. Los sellos mecánicos producen un sello de tipo totalmente diferente con superficies de desgaste distinta a las superficies axiales de la flecha y la empaquetadura. El sello mecánico es un invento nuevo comparado con los estoperos. Sin embargo, ambos son utilizados en la actualidad, y uno u otro demuestra ser mejor de acuerdo a la aplicación (la preferencia suele ser respecto del costo).

El principio de funcionamiento es similar en todos los sellos mecánicos. Las superficies obturadoras están localizadas en un plano perpendicular a la flecha y, generalmente, consisten de dos superficies altamente pulidas que se deslizan una sobre la otra, estando conectadas una a la flecha y la otra a la parte estacionaria de la bomba. Las superficies pulidas o sobrepuestas, que son de diferentes materiales y se mantienen en contacto continuo por un resorte, forman un sello hermético entre los miembros giratorio y estacionario con pérdidas por fricción muy pequeñas.

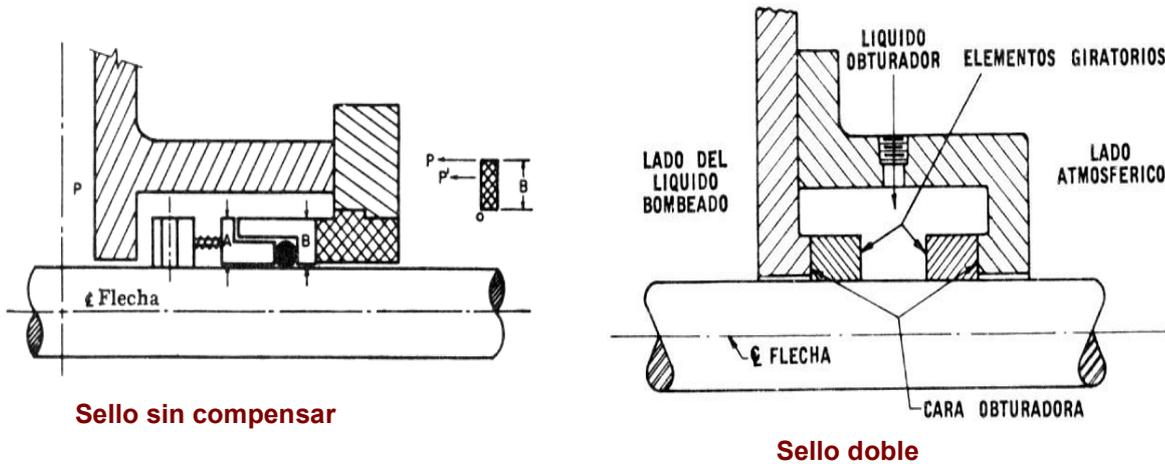
**Sello de montaje interior:** el elemento giratorio está situado dentro de la caja y la presión del líquido bombeado tiende a forzar la cara giratoria contra la estacionaria.



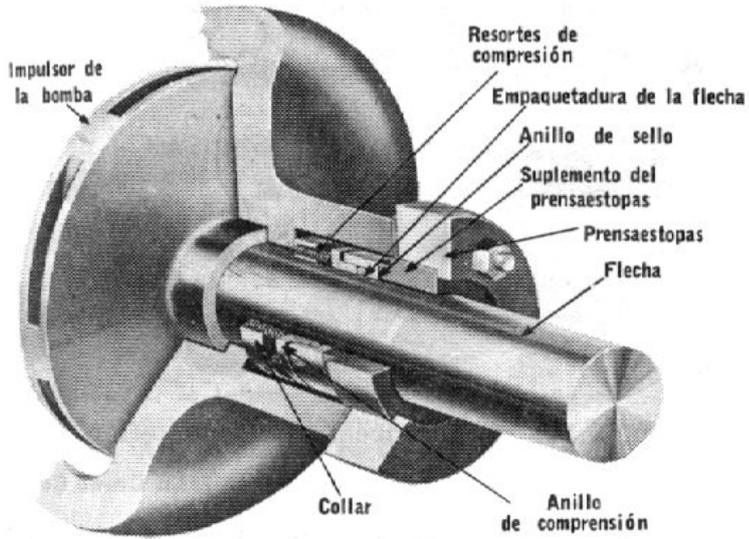
**Sello de montaje exterior,** el elemento giratorio está situado fuera de la caja y la presión del líquido bombeado tiende a separar la cara giratoria de la cara estacionaria.



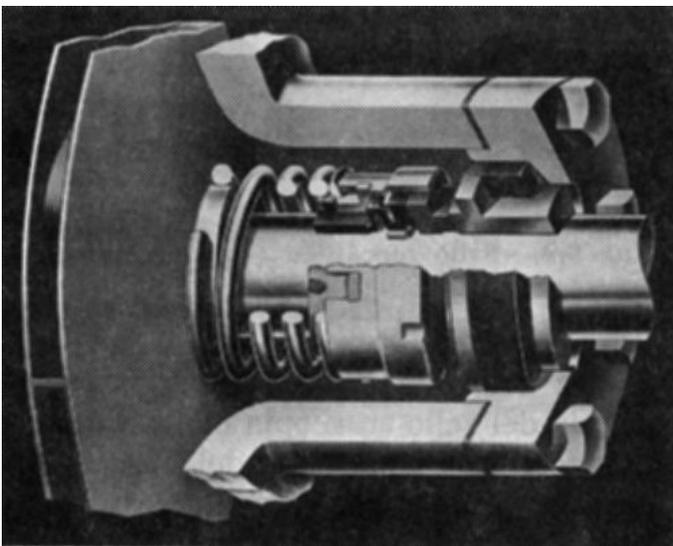
En el sello de montaje interior, toda presión interne actúa para cerrar las caras ( si el líquido manejado es un buen lubricante y las presiones no son excesivas, esta carga no es perjudicial). Este diseño se conoce como **sello sin compensar**. Cuando las presiones son muy grandes, es preferible reducir la carga sobre las caras acopladas, derivando lo que se conoce como **sellos compensados**.



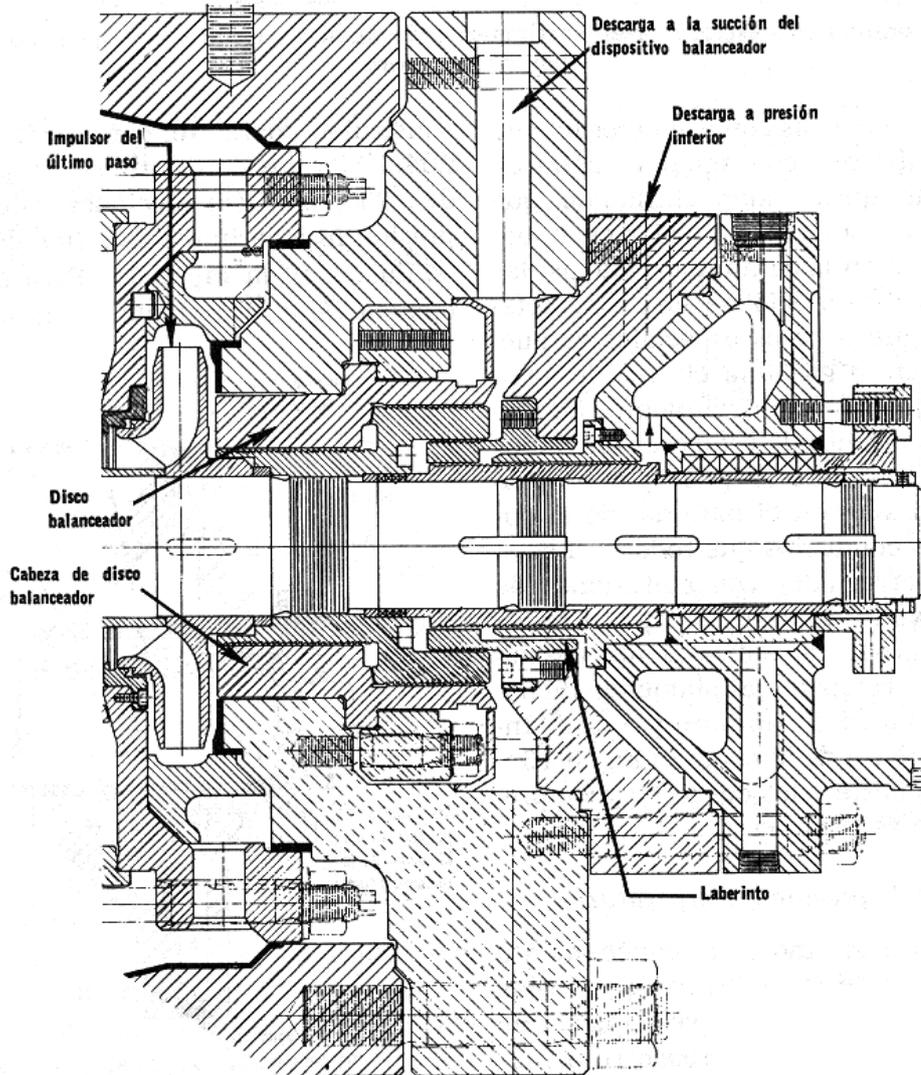
Se pueden montar dos sellos mecánicos dentro de un estopero para formar un conjunto de **sello doble**. Se utiliza para bombas que manejan líquidos tóxicos o altamente inflamables. Se inyecta entre los dos sellos un líquido a presión algo mayor que la de la bomba, evitando que el líquido bombeado se ponga en contacto con las partes del sello o escape a la atmósfera.



**Sello mecánico**



**Sello mecánico tipo fuelle**



**Sello tipo laberinto**

## 5.- Materiales típicos de construcción de bombas

Condiciones de servicio que afectan la selección de materiales:

1. Resistencia a la corrosión
2. Acción electrolítica
3. Abrasividad de los sólidos suspendidos
4. Temperatura de bombeo
5. Carga hidráulica por paso (afecta tanto a la velocidad periférica del impulsor como a las velocidades del líquido)
6. Presión de operación
7. Adaptabilidad del material por las propiedades estructurales particulares
8. Factor de carga y vida esperada

Los materiales de construcción para bombas más ampliamente difundidos son los aceros inoxidables. Entre ellos, los más usuales son los austeníticos, porque resisten mejor la corrosión que los martensíticos o ferríticos.

Los aceros inoxidable se utilizan con muchos productos corrosivos. Sirven para la mayoría de los ácidos minerales a temperaturas y concentraciones moderadas. Las excepciones más notables son los ácidos clorhídricos y fluorhídricos. En general, los aceros inoxidable son más adecuados para atmósferas oxidantes que reductoras. Los ácidos orgánicos y las soluciones de sales entre neutras y alcalinas también se manejan con bombas de acero inoxidable. Para servicios muy severos o críticos se suelen especificar los aceros inoxidable de alto contenido de aleación como el Alloy 20.

El acero al carbono, el hierro fundido y el hierro dúctil fundido también se utilizan en aplicaciones no corrosivas que se encuentran en muchas plantas.

Las aleaciones a base de níquel, por su alto costo relativo, sólo se utilizan cuando no resulta adecuada ninguna aleación a base de hierro. Este grupo de materiales resistentes a la corrosión incluye: níquel puro, cupro-níquel, níquel-cromo, níquel molibdeno, níquel cromo molibdeno.

Las aleaciones a base de cobre como el bronce o el latón, el aluminio y el titanio son los materiales no ferrosos de empleo más frecuente, después de las aleaciones a base de níquel para las bombas. Es utilizado el circonio en algunos casos especiales.

Los revestimientos de caucho natural y sintético tienen amplio uso en condiciones en que hay abrasión, corrosión o ambas. El caucho (hule) natural blando es el que tiene mejor resistencia a la abrasión, pero no se puede emplear a temperaturas tan altas como el caucho semiduro o los sintéticos como el Neopreno o el de butilo.

En muchos casos, el caucho duro y el sintético también tienen más resistencia a los productos químicos.

Cada vez se utilizan más los plásticos en las bombas. En los últimos años han aparecido en el mercado una gran cantidad de nuevos plásticos. Para máxima resistencia a los productos químicos, las resinas fluorcarbono como el politetrafluoretileno (PTFE) y el etileno-propileno fluorados (FEP) tienen numerosas aplicaciones. Cuando se necesitan resistencia química está disponible una serie de plásticos reforzados con fibra de vidrio (FRP); los más comunes son resinas epoxi, poliéster y fenólicas. Los plásticos se emplean cada vez más porque ofrecen la misma resistencia a la corrosión que los metales a un costo más bajo. Sin embargo, no se cree que los plásticos sustituyan por completo a los metales.

Siempre que es posible se evita emplear bombas construidas con cerámica o vidrio por su escasa resistencia física. Sin embargo en muchos servicios muy corrosivos y a altas temperaturas, el vidrio o la cerámica son los más adecuados porque son inertes a los productos químicos. El carbono ó grafito se suelen utilizar para el mismo tipo de servicios y la razón principal para usarlos en lugar de vidrio o cerámica es que estos no son adecuados cuando se manejan ácidos o álcalis fuertes.

- Frecuentemente se usa bronce para **cubiertas** de bombas si el líquido bombeado es ligeramente corrosivo. El acero fundido y el acero forjado, se usan si la presión de descarga o la temperatura de bombeo (o una combinación de

ambos) hacen inapropiado al hierro colado. El acero inoxidable se emplea si el líquido bombeado es corrosivo o excesivamente abrasivo. Las cubiertas de porcelana o vidrio se usan algunas veces para aplicaciones especiales.

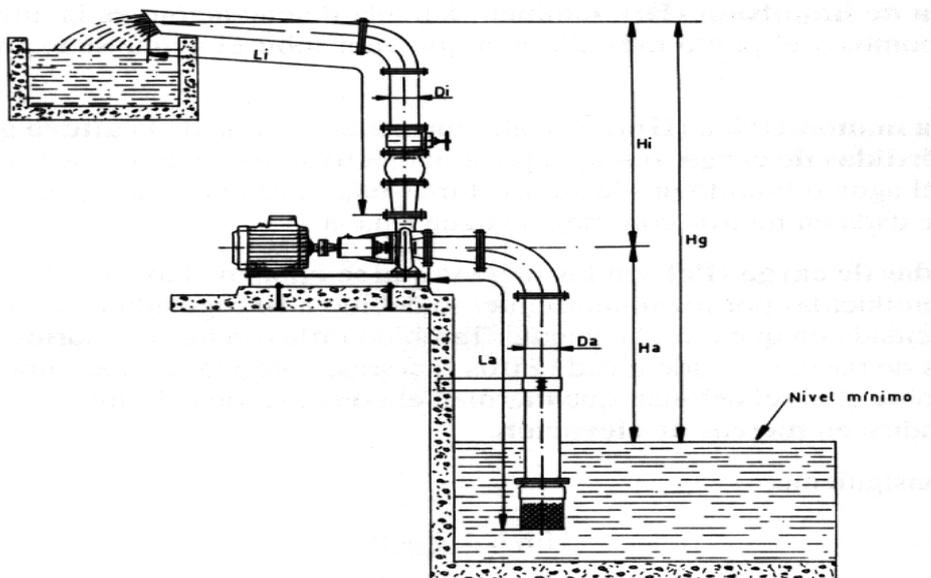
- Para los **impulsores** se prefiere el bronce, por lo general, para manejar líquidos normales (debido a que es más fácil de fundir para secciones de modelos complicados, es fácil de maquinarse, produce superficies más lisas y no se oxida). Sin embargo, no se deben usar los impulsores de bronce con cubiertas de hierro fundido si el líquido que se maneja es un electrolito fuerte. Estos líquidos requieren materiales ferrosos.
- Los materiales más comunes para los **anillos de desgaste** se hacen de bronce, y en algunas ocasiones el hierro colado, acero fundido, acero inoxidable y monel (sea de lo que fuere de lo que está hecho el impulsor) si se requiere dureza u otras propiedades que no se pueden obtener del bronce.
- Las flechas de las bombas están normalmente hechas de acero o acero inoxidable (cuando el líquido es corrosivo, utilizándose también el monel o bronce fosforado), y en caso de que hubieren grandes esfuerzos acero de alta resistencia a la tensión.
- Los **prensaestopas** están hechos en general de bronce, aunque el hierro fundido o el acero pueden emplearse en las bombas equipadas totalmente de hierro.

## 6.- Altura de elevación

El líquido a bombear posee una energía de presión para vencer: la altura estática de aspiración, más la pérdida de carga en la cañería, más la depresión dinámica correspondiente a la velocidad de entrada y pérdidas en el interior de la bomba.

Planteamiento del problema:

- la ubicación de la bomba centrífuga en la instalación puede ser variada
- las características de la cañería de aspiración determinan las pérdidas
- las bombas centrífugas no poseen autoaspiración como las bombas de desplazamiento positivo
- altura de aspiración estática (depende la presión en la cámara de aspiración)



La Altura Neta Positiva de Aspiración (ANPA o NPSH) determina las características que se deben dar en la aspiración de una bomba, siendo la diferencia entre la presión del líquido a bombear referido al eje del impulsor (plano de referencia) y la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo (todo referido a metros).

Puede interpretarse como la altura de equilibrio de presión que nos dice cuántos metros debe tener la altura de presión en la línea de aspiración por encima de la presión de vapor del líquido para que no pueda producirse la vaporización del mismo, asegurándose así el perfecto trabajo de la bomba. Se puede hablar de dos tipos de ANPA:

**ANPA<sub>D</sub> o ANPA disponible:** es una particularidad de la instalación (la parte de aspiración de la instalación) y se define como la energía que tiene un líquido en la toma de aspiración de la bomba (independientemente del tipo de ésta), por encima de la energía del líquido, debido a su presión de vapor. En otras palabras es la diferencia entre la altura total de succión y la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo.

$$ANPA_D = \frac{P_a - P_v}{\gamma} \pm H_a - \frac{v^2}{2.g} - \Delta h$$

donde:

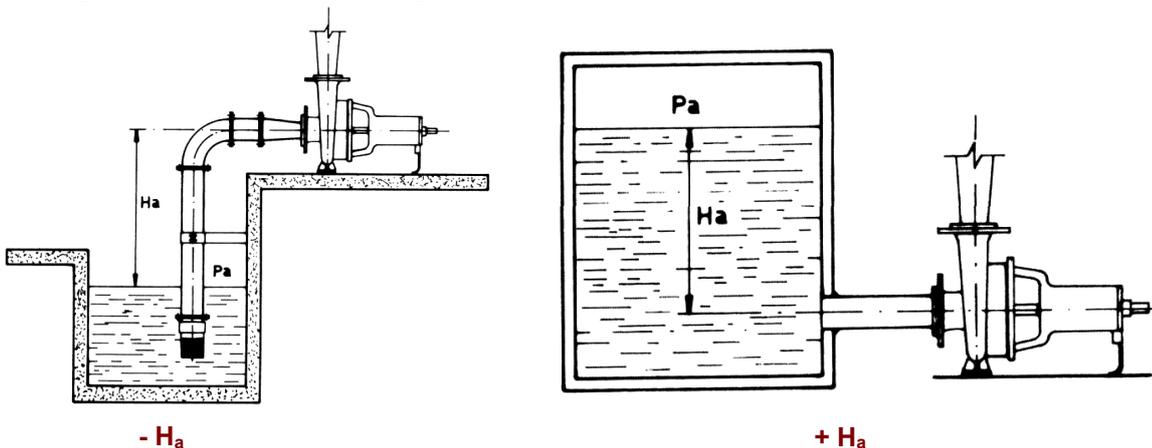
$P_a$  es la presión en el depósito de aspiración (generalmente es la presión atmosférica)

$P_v$  es la tensión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo

$\gamma$  es el peso específico del líquido

$H_a$  es la altura geométrica de aspiración

$(v^2/2.g + \Delta h)$  pérdidas de carga en la aspiración



**ANPA<sub>R</sub> o ANPA requerido:** es una característica de la bomba. Es aquella energía necesaria para llenar la parte de aspiración y vencer las pérdidas por rozamiento y el aumento de la velocidad desde la conexión de aspiración de la bomba hasta el punto en que se añade más energía en el rotor. El ANPA requerido varía según el diseño de la bomba, tamaño de ésta y condiciones de servicio, y **es un dato a facilitar por el fabricante de la bomba, que lo determina mediante ensayos** llevados a cabo

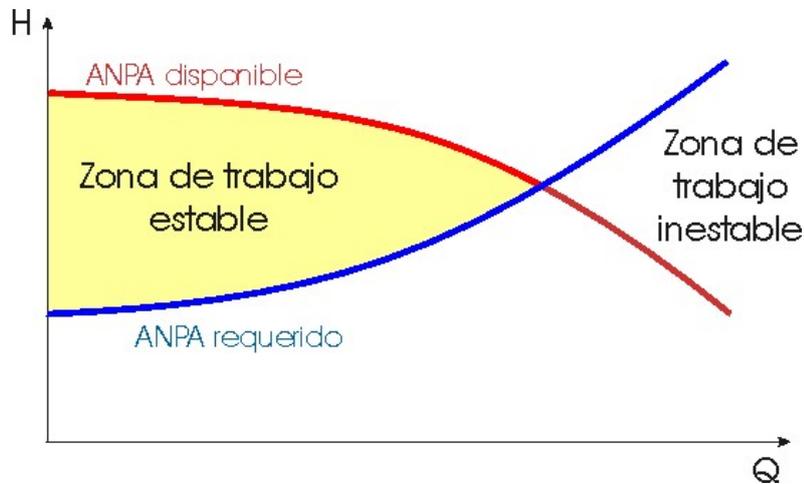
con bombas geoméricamente semejantes que funcionan a velocidad constante y caudal calibrado, pero variando las alturas de aspiración.

Las presiones y velocidades varían dentro de la bomba, el líquido que entra al impulsor de la bomba sufre caída de presión, lo que produce una reducción de la altura total de succión. Esta caída de presión es debida a: la pérdida de energía en la brida de succión, rozamiento entre el tramo “brida de succión” a “ojo del impulsor”, las pérdidas por rozamiento y turbulencia por cambio de dirección del líquido de axial a radial, el espesor de los alabes que actúa como obstrucción y debido a que no coincide ángulo de entrada del líquido con el ángulo de ataque del álabe.

El  $ANPA_D$  y  $ANPA_R$  varían con el caudal:

- **$ANPA_R$** : a mayor caudal, mayor velocidad, mayor pérdida por rozamiento, por lo que produce un aumento de  $ANPA_R$ :  $si\ Q_2 > Q_1 \Rightarrow ANPA_{R2} > ANPA_{R1}$
- **$ANPA_D$** : a mayor caudal, mayor velocidad, mayor pérdida por rozamiento, por lo que produce una disminución del  $ANPA_D$ :  $si\ Q_2 > Q_1 \Rightarrow ANPA_{D2} < ANPA_{D1}$

Para que una bomba centrífuga funcione correctamente (sin que aparezca cavitación, golpe de ariete, golpeteo, etc.) ha de cumplirse la condición de que el ANPA disponible en la instalación sea igual o mayor que el ANPA requerido por la bomba:



$$ANPA\ disponible \geq ANPA\ requerido$$

Como medida preventiva y de seguridad, y para cubrir condiciones transitorias, se recomienda añadir 0,5 metros al valor del ANPA requerido:

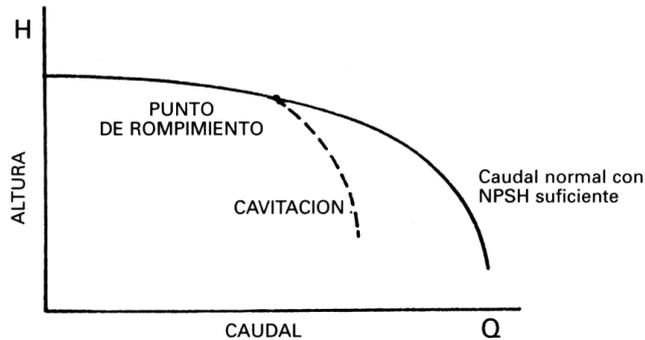
$$ANPA\ disponible \geq ANPA\ requerido + 0,5\ m$$

El conocimiento del ANPA disponible es primordial para elegir acertadamente la bomba centrífuga.

## 6.1 .- Cavitación

Sabemos que el ANPA disponible debe ser igual o mayor que el ANPA requerido para que la bomba tenga un funcionamiento correcto. Si esta condición no se cumple, aparece el riesgo de cavitación.

La cavitación se define como un "fenómeno de vaporización, más o menos brusca del líquido bombeado cuando la presión desciende a la presión de vapor". En otras palabras si  $P_{líq} \leq P_{vap}$  en cualquier punto de la línea de succión el líquido se vaporiza.



*Efecto de la cavitación en la capacidad de la bomba.*

La cavitación afecta las condiciones de servicio de una bomba, produciendo picaduras en los álabes del impulsor, tensiones alternativa de alto valor (que deteriora las superficies internas), empujes axiales anormales, vibración y ruidos. Cuanto mayor es la bomba, mayores son el ruido y la vibración, lo que trae aparejado un desgaste prematuro por fatiga.

Una cavitación fuerte viene generalmente acompañada por ruido excesivo y daños en la bomba; mientras que una cavitación moderada o pequeña puede no producir más que una pequeña reducción de caudal, altura y desgaste prematuro de la bomba. Otro factor primordial de la cavitación es una disminución del rendimiento de la bomba, que se evidencia por un descenso del caudal.

La cavitación tiene su origen en que la bomba opera con una aspiración excesiva, y, entonces, la presión en la tubería de aspiración cae por debajo de un cierto valor crítico de la presión de vapor. La presión disminuye hasta que puede crearse un vacío y el líquido se convierte en vapor, y es arrastrado por la corriente. Las burbujas de vapor o bolsas de vapor llamadas **cavidades** (de ahí el nombre de cavitación) son transportadas por el líquido e implosionan bruscamente cuando alcanzan zonas de presión más altas en su camino a través de la bomba. Es decir, si la presión estática aumenta otra vez por encima de la presión de vapor en otro lugar de la ruta que sigue el flujo. En esta formación y repentina desaparición de burbujas de vapor está fundamentada la cavitación. El ruido (como si hubiera arena) que se oye en el interior de la bomba es causado por la implosión de las burbujas de vapor.

Los casos más susceptibles a la cavitación son:

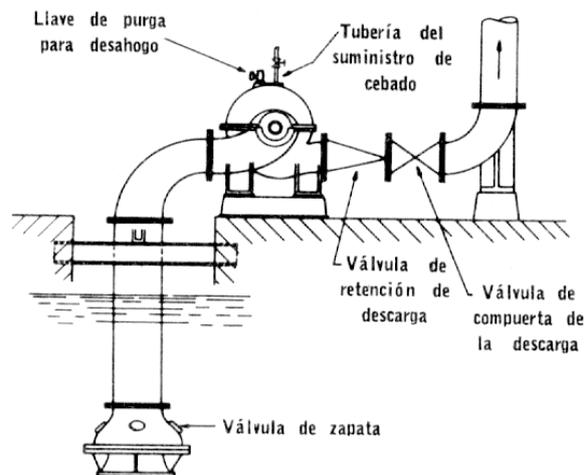
1. Cuando la bomba está instalada a una gran altura sobre el nivel de aspiración.
2. Cuando la bomba aspira de un depósito al vacío.
3. Cuando la línea de succión es muy larga.(elevada pérdida de carga)
4. Cuando el sistema de bombeo está a una altura considerable sobre el nivel del mar(poca presión atmosférica).

La solución para evitar la cavitación es obvia, hay que aumentar el ANPA disponible, y, por tanto, si no existe forma de modificar el sistema, se pueden cambiar las condiciones adoptando cualquiera de las opciones citadas a continuación:

- Aumentar el diámetro de la tubería de aspiración (para reducir la velocidad de aspiración).
- Disminuir la altura geométrica de aspiración.
- Cambiar a una bomba mayor a menor velocidad.
- Rebajar la temperatura del fluido bombeado.
- Emplear válvulas y tuberías de aspiración de bajo coeficiente de fricción.
- Colocar una bomba con un ANPA requerido más bajo.

Como consecuencia, únicamente es posible que las bombas centrífugas trabajen sin estropearse, si en el interior de la bomba no hay formación de vapor (cavitación), es decir, mientras en ningún punto la presión quede por debajo de la presión de vapor correspondiente a la temperatura del líquido.

## 6.2 .- Cebado



Una bomba centrífuga se ceba cuando los conductos de la bomba se llenan con el líquido que se va a bombear. El líquido reemplaza al aire, gas o vapor en los conductos. La expulsión del aire, gas o vapor puede hacerse manual o automáticamente, dependiendo del tipo de equipo y controles usados. Para alguien familiarizado sólo con bombas de desplazamiento positivo de los tipos recíprocos y rotatorios, parecerá raro que una bomba centrífuga no pueda cebarse por sí sola. Las bombas de desplazamiento positivo, si están correctamente selladas, bombearán aire también como líquido y, por ello, expulsarán cualquier cantidad de aire que haya en la línea de succión. Las bombas centrífugas también bombearán aire (contra la opinión general que se tiene), pero debido a la baja densidad del aire, la presión real desarrollada cuando se bombea, es muy pequeña.

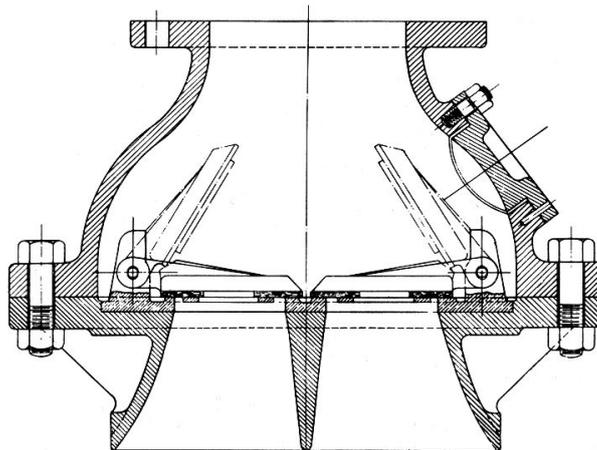
*Ejemplo:* una bomba que desarrolla una carga de 61 m con agua, desarrollaría igualmente, una carga de 61 m con aire; pero una carga de 61 m de aire es

equivalente a un vacío de 7,6 cm aproximadamente, medido en términos de columna de agua. Ese vacío es obvio que es insuficiente para cebado normal.

Cuando se pone en servicio por primera vez una bomba centrífuga, sus conductos están llenos de aire. Si la alimentación de succión está a presión mayor que la atmosférica, este aire se atraparé en la bomba y se comprimirá algo cuando se abra la válvula de succión. A menos que la presión de succión sea suficientemente alta, sin embargo, el aire no se comprimirá lo suficiente para permitir que se llenen con agua los conductos de succión y el ojo del impulsor, y la bomba no estará cebada; por lo tanto, se debe expulsar el aire. Con una carga de succión positiva en la bomba, el cebado se logra escapando el aire atrapado al exterior de la bomba por una válvula provista para ese objeto.

Si la bomba toma succión de un abastecimiento localizado abajo de la misma bomba, el aire de la bomba debe evacuarse, ya sea con algún dispositivo que produzca vacío, o instalando una válvula de zapata en la línea de succión, de modo que la bomba y su tubería de succión puedan llenarse con agua, o teniendo una cámara de cebado en la línea de succión.

**Válvulas de aspiración (retención):** de pie o de zapata, se usaban muy



frecuentemente en antiguas instalaciones de bombas centrífugas. Una válvula de aspiración es una forma de válvula de retención instalada en el fondo o al pie de una línea de succión. Como una válvula ordinaria de retención, permite el flujo sólo en una dirección: hacia la bomba. Cuando se para la bomba y los puertos de la válvula de zapata se cierran, si la válvula asienta perfectamente, el agua no puede drenarse regresando al pozo de succión.

Desafortunadamente, una válvula de pie no siempre asienta bien, y la bomba pierde su cebado en algunas ocasiones. Sin embargo, el caudal de escurrimiento es, por lo general, pequeño, y, es posible restituir la bomba al servicio llenándola y arrancándola inmediatamente. Otra desventaja de las válvulas de aspiración es su gran pérdida por fricción.

## 7.- CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS

Conociendo perfectamente el significado de las distintas curvas características, que ilustran el fenómeno de la operación de bombas centrífugas, ayudará al ingeniero en la elección y uso de la bomba adecuada para su aplicación específica.

Las interrelaciones de Q, H, fuerza y  $\eta$  se denominan características de la bomba y sus curvas representativas se llaman curvas características de la bomba. Las más comunes son:

- Curva de Caudal – Altura (H-Q)
- Curva de Potencia al freno (N-Q) o curva BHP
- Curva de Eficiencia ( $\eta$ -Q)
- Curva de NPSH (Net Positive Suction Head) o ANPA (Altura Neta Positiva de Aspiración)

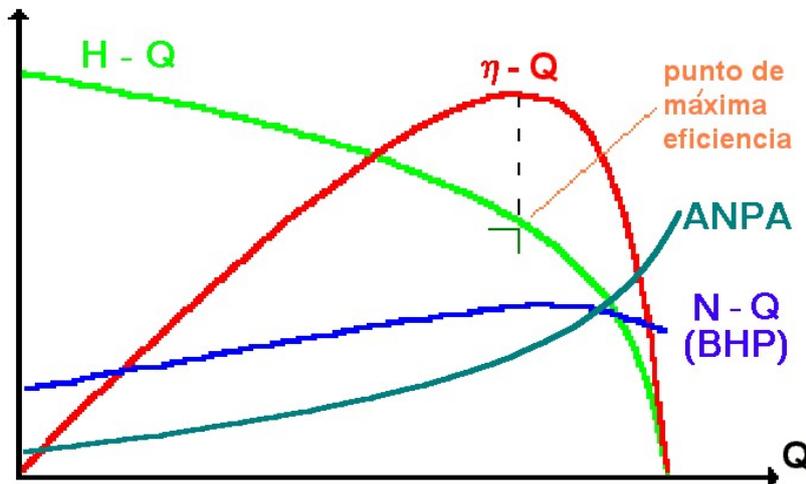
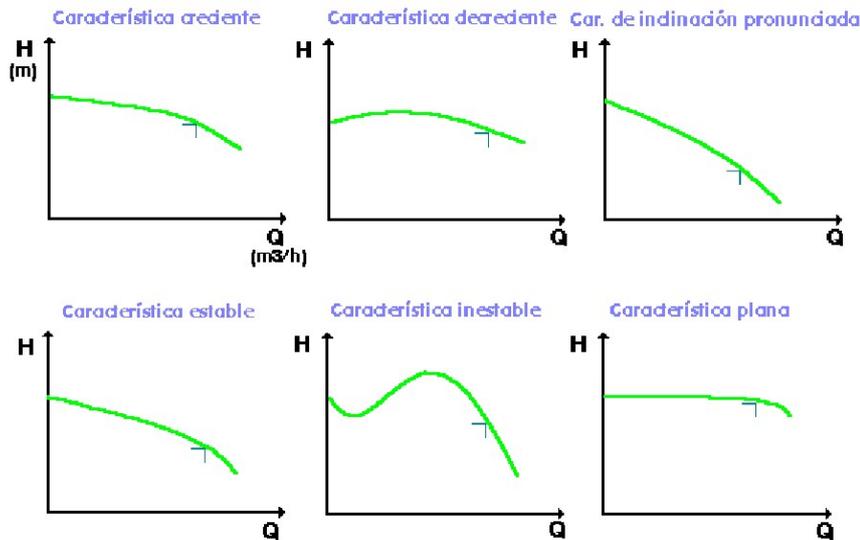


Fig. 1. Curvas características de bombas centrífugas: Curvas de Altura, Eficiencia, NPSH y Potencia al freno.

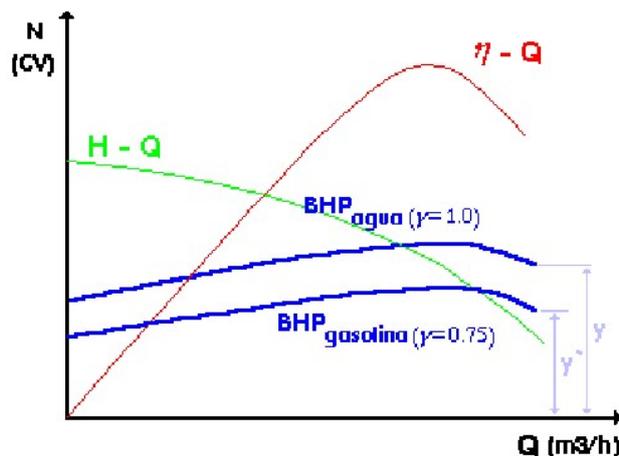
### 7.1.- Curva Q-H

Esta curva muestra la altura que desarrollará la bomba con relación al caudal. Un punto que se debe recordar es que la bomba debe operar dentro de esta curva. Para una velocidad especificada, no puede operar en ningún punto sobre o debajo de la curva, sin algún cambio físico en la bomba.



Las curvas Caudal – Altura para una variedad de bombas centrífugas mostrarían un descenso o caída característica. Esto significa que para un aumento de caudal hay un descenso característico de altura. Muchas veces ésta es una condición deseada, cuando dos o más bombas operarán paralelamente, así que ligeros cambios de altura no producirán grandes alteraciones en el flujo total entre las dos bombas. También es una condición deseable donde hay amplias variaciones en la presión de descarga controlada, para evitar las variaciones de flujo. En ocasiones, como ocurre con las bombas alimentadoras de caldera funcionando solas, es conveniente que el caudal pueda variar ampliamente con sólo una ligera variación en la presión, como en las bombas de características planas.

**7.2 .- Curva de potencia al freno (potencia de accionamiento)**



Los fabricantes de bombas realizan pruebas standard usando agua como el líquido a bombear. Por esto el valor de estas pruebas será para un peso específico de 1,0. Si el sistema fuera diseñado para trabajar con gasolina, de un peso específico de 0,75,

se mostrará entonces una segunda curva de potencia al freno. En la figura de la derecha se muestra una curva de potencia al freno para un peso específico de 1,0 y otra para 0,75. Por lo tanto la relación de las ordenadas de  $y'$  y de  $y$  será de:

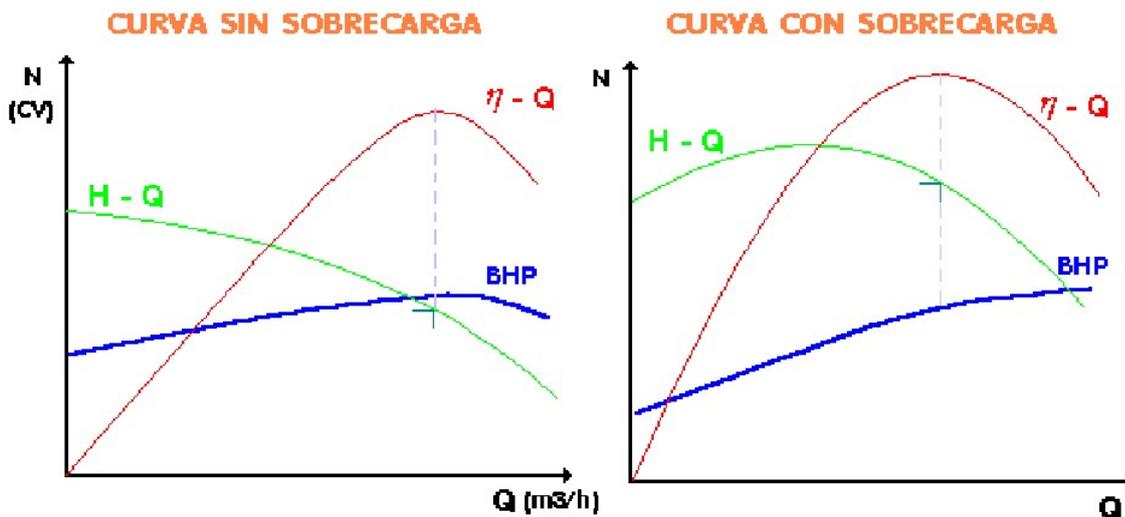
$$\frac{y'}{y} = 0,75$$

Y estaría de acuerdo con la regla que dice:

“La potencia necesaria para accionar la bomba será proporcional al peso específico del líquido a bombear”

$$N' = N \left( \frac{y'}{y} \right)$$

La potencia requerida en la curva BHP con sobrecarga sigue aumentando más allá del punto de máxima eficiencia.



### 7.3 .- Curva de eficiencia

Esta se calcula a partir de los valores de altura, caudal, potencia al freno y potencia en agua. Representa la relación de la potencia requerida para realizar el trabajo con una eficiencia de 100% y la realmente necesaria para realizar el trabajo debido a pérdidas inherentes. Por supuesto que hay un factor de eficiencia que es aplicable a todas las máquinas.

$$\eta_T = \frac{N_u}{N_a}$$

Donde:

$\eta_T$  = Rendimiento total de la bomba

$N_u = Q \cdot H \cdot \gamma / 75$  = Potencia útil (Potencia requerida para realizar el trabajo con una eficiencia del 100%)

$N_a$  = Potencia de accionamiento (Potencia real debido a pérdidas hidráulicas y mecánicas)

$Q$  = Caudal [ $m^3/s$ ];  $H$  = Altura [m];  $\rho$  = Peso específico del líquido [ $kg/m^3$ ]

## 7.4 .- Pérdidas y Rendimiento de una bomba centrífuga

### 7.4.1 .- Rendimiento Hidráulico

$$\eta_H = \frac{H_e}{H_t} \times 100$$

Donde:  $\eta_H$  = Rendimiento Hidráulico en %

$H_e$  = Altura Efectiva de Elevación  $H_t$  = Altura Teórica de Elevación

### 7.4.2 .- Rendimiento Volumétrico

$$\eta_V = \frac{Q \times 100}{Q + (Q_1 + Q_2)}$$

Donde:  $\eta_V$  = Rendimiento Volumétrico

$Q$  = Caudal Efectivo

$Q_1$  = Pérdida de Caudal por Recirculación

$Q_2$  = Pérdida de Caudal por el prensa estopa

### 7.4.3 .- Rendimiento Total

$$\eta_T = \eta_H \cdot \eta_V \cdot \eta_M$$

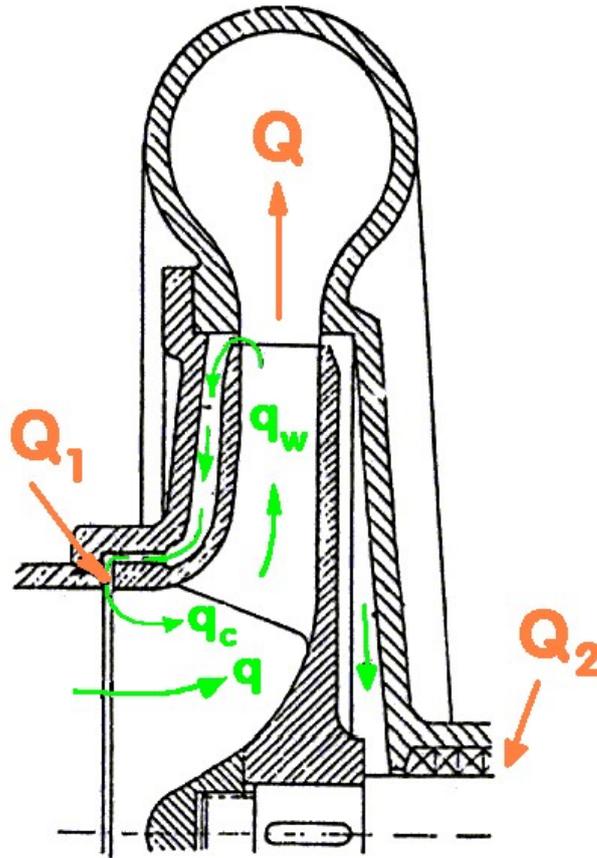
$$\eta_T = \frac{N_u}{N_a}$$

Donde:  $\eta_T$  = Rendimiento Total

$\eta_M$  = Rendimiento Mecánico

$N_u$  = Potencia Útil

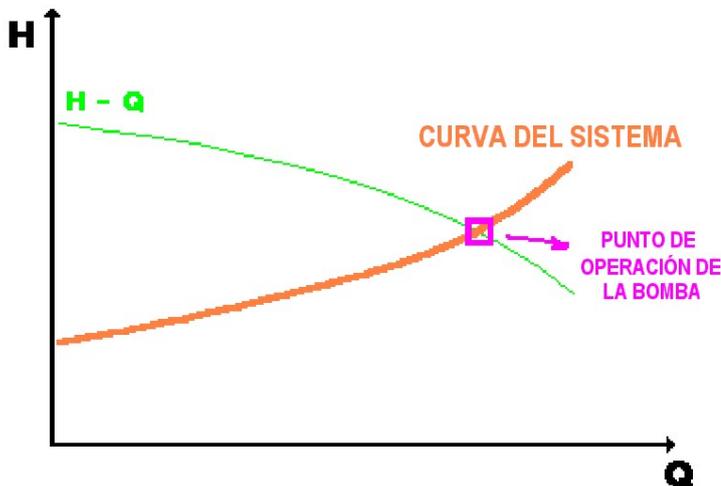
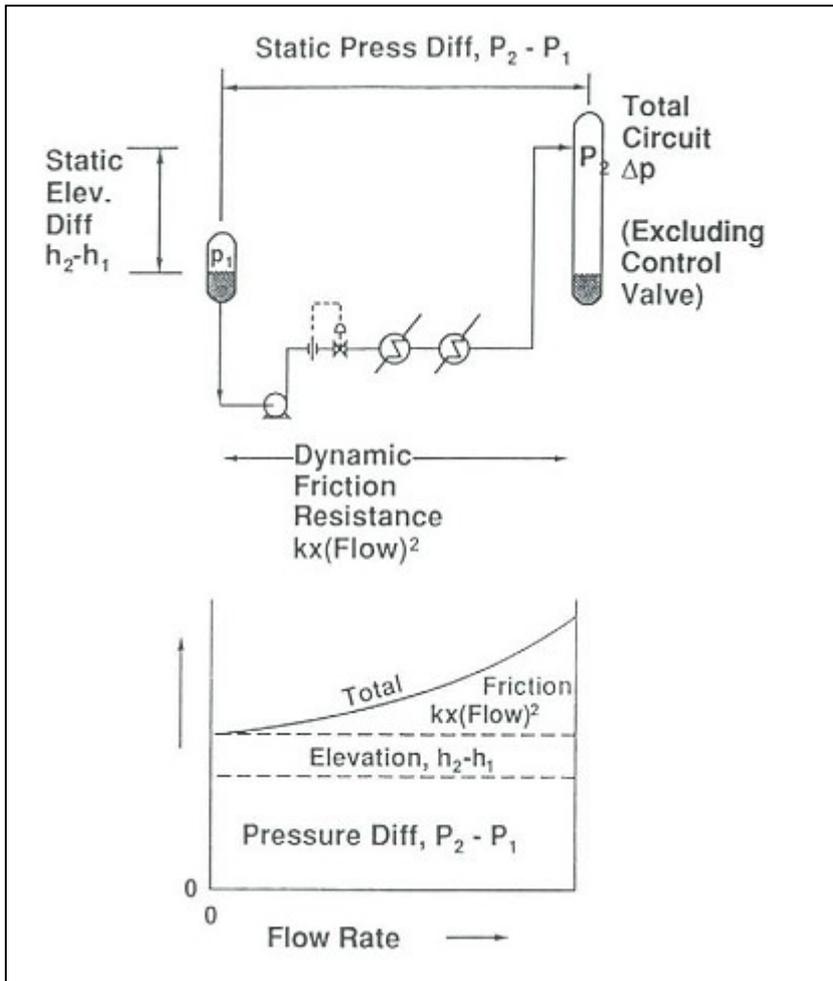
$N_a$  = Potencia de Accionamiento



### 7.5 .- Curva NPSH

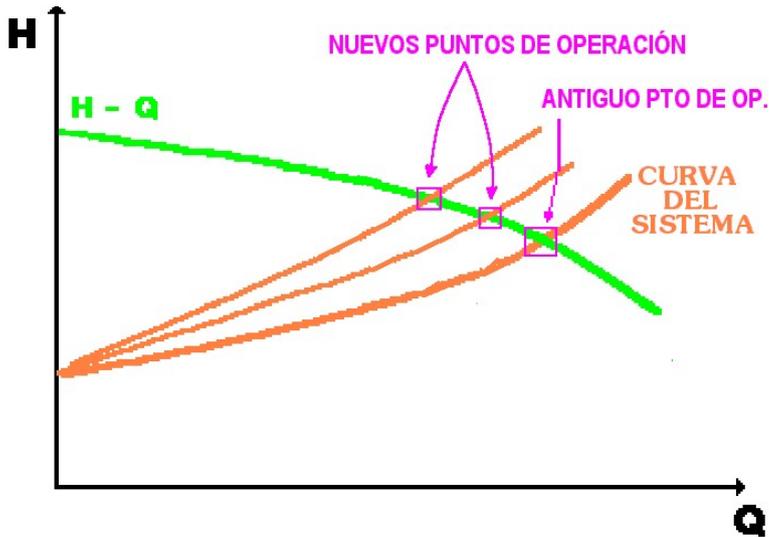
La curva de Altura Neta Positiva de Aspiración, puede estar incluida o no en un juego de curvas generales de rendimiento. En general, en cualquier aplicación si el líquido bombeado es frío y el medidor de la brida de succión señala que existe presión positiva la curva de NPSH no es necesaria.

### 7.6 .- Curva del sistema



Para una instalación determinada y un caudal de circulación, la altura dinámica total del sistema es la energía a suministrar al líquido por unidad de peso, para desplazarlo desde el depósito de succión hasta el de descarga.

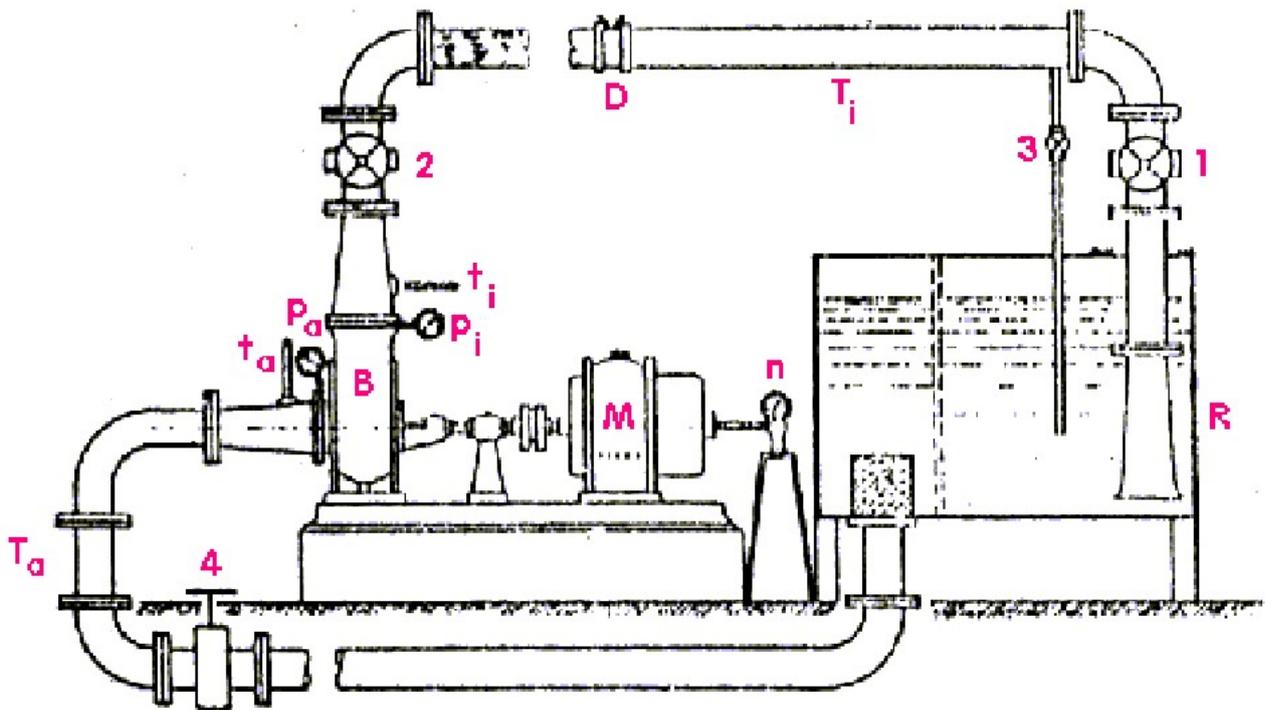
### 7.7 .- Punto de operación de la bomba



Punto de intersección de las curvas H-Q y del sistema. De no producirse algún cambio físico, éste es el único punto en el que la bomba funcionará en este sistema y el flujo obtenido estará dado por la intersección de las curvas. El punto de funcionamiento puede variar con el tiempo o cuando cerramos parcialmente una válvula (para reducir el caudal) debido al aumento de fricciones que hacen que la curva del sistema se desplace hacia arriba y a la izquierda.

### 7.8.- Curvas características

Todas estas curvas se pueden determinar en un banco de pruebas como el que se muestra en la siguiente figura:



Donde:

B = Bomba

M = Motor

$T_i$  = Tubería de Impulsión

$T_a$  = Tubería de Aspiración

D = Diafragma (al igual que el Tubo de Venturi, se mide la diferencia de niveles en un manómetro diferencial y con esto se determina el caudal Q)

N = medidor de revoluciones

$p_a$  y  $p_i$  = Manómetros para medir el aumento de la  $P_{est}$

$t_a$  y  $t_i$  = Termómetros

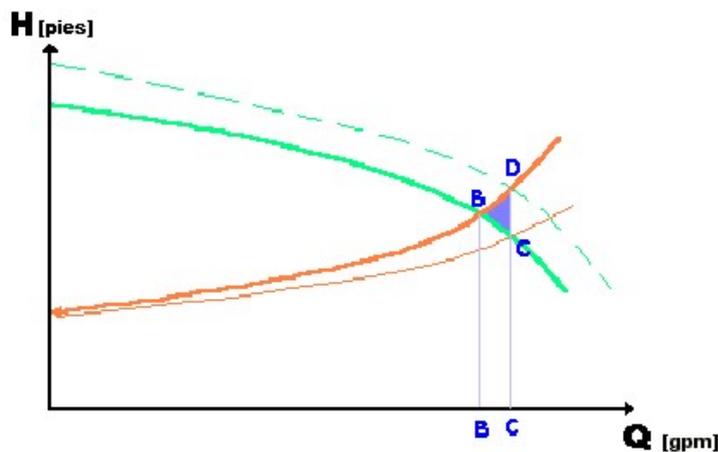
1 y 2 = Válvulas de Estrangulación (para la **regulación amplia** de Q)

3 = Válvula de Estrangulación (para la **regulación fina** de Q)

4 = Válvula de Estrangulación (para la regulación de la altura de aspiración)

### ¿Puede ser aumentado el caudal?

¿Qué ocurre si deseamos obtener el caudal representado en el punto C de la Figura 2?



Con la válvula de descarga completamente abierta vemos que podemos obtener el caudal correspondiente al punto B. ¿Qué se puede hacer con respecto a esto?. Podemos ver en la curva de prueba de altura – caudal que a velocidad media es capaz de obtener el caudal C, lo que realiza sólo en contraposición de la resistencia de altura C. Extendiendo la curva del sistema de altura al caudal C, vemos que los requisitos de altura aumentan hasta el punto D. Existe entonces una deficiencia en la altura producida por la bomba, comparada con la altura requerida por el sistema.

Fig. 2. Cambios en las curvas H-Q

da con la requerida por el sistema de (Altura D – Altura C) en pies. En realidad, sin un cambio en el sistema, la bomba a una velocidad media no funcionará en ningún punto del área sombreada BCD.

Algunas posibles soluciones:

De acuerdo a la instalación, el ingeniero tendrá varias vías de acción para obtener el funcionamiento con caudal C.

El más simple (si fuera posible) es reducir la altura del sistema de manera que pase por el punto C. Esto puede obtenerse abriendo completamente las válvulas intermedias en un sistema donde habían sido parcialmente cerradas. En viejos sistemas, gran parte de la pérdida de altura podría atribuirse a la **constricción** de las cañerías por depósitos de lodo. La limpieza o reposición de las cañerías aliviaría esta condición.

Otra solución no siempre posible por lo costosa, es reducir la altura del sistema reemplazando cañerías angostas de flujo veloz con caños de mayor diámetro.

- ***La velocidad puede cambiarse***

Es posible aumentar la velocidad de la bomba para que desarrolle una nueva curva de altura, la que pasaría por el punto D, como ilustra la curva de líneas quebradas en la figura 2. Los motores impulsados por electricidad son generalmente invariables, pero esta sería una solución para turbinas a vapor que permiten un amplio margen de variación para la velocidad sin ninguna modificación o con cambios muy simples.

Si sólo se cambia la velocidad del motor (conductor), sin ningún otro cambio en la bomba o el sistema, la bomba requerirá más caballos de fuerza. Esto puede determinarse a partir de la curva de la bomba o ser calculado, ya que para condiciones de cambio de velocidad solamente, la fuerza varía de acuerdo al cubo de la velocidad para cambios moderados de velocidad.

- ***El impulsor puede cambiarse***

Si los métodos anteriormente analizados fallaran o no fueran factibles, a menudo es posible cambiar el o los impulsores por otros de diámetro mayor. Esto también demandará más HP.

Si anteriormente existía un exceso de fuerza, esta energía disponible aún podría ser adecuada para mayores impulsores. Hay quien soluciona el problema sobrecargando el motor. Esto es únicamente una excelente solución para los vendedores de motores. El motor eléctrico sólo puede contestar este abuso despidiendo un fuerte olor a quemado (fusibles sobredimensionados o interruptores atascados). Las turbinas a vapor son más sensatas, igual que un burro, rehusan trabajar más allá de su capacidad normal o mayor a una sobrecarga razonable.

De cualquier manera, los cambios necesarios para solucionar un problema de incremento de caudal o altura no son tan radicales como para que no se puedan solucionar de alguna de las maneras sugeridas y sin necesidad de comprar una nueva bomba.

***El caudal se determina fácilmente***

Determinar la capacidad de flujo de una bomba es muy sencillo si se tiene la curva de prueba de la bomba (a una velocidad dada).

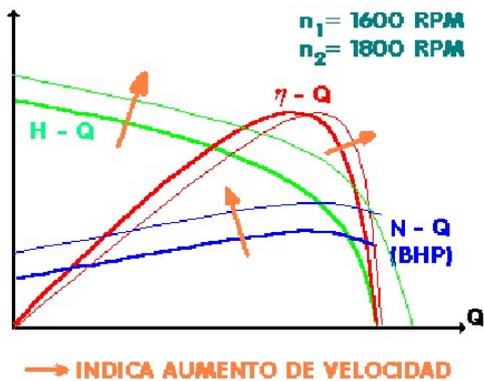
El total de la altura dinámica de la bomba en cualquiera de sus puntos operativos será la diferencia en la lectura de los manómetros instalados en la brida de succión y en la brida de descarga. Para mayor exactitud las lecturas de los manómetros deben ser corregidas al centro de la bomba y la diferencia en velocidad de altura de descarga y succión, sumados. Excepto en las bombas de baja altura, estas correcciones son mínimas.

El caudal puede ser leído directamente buscando el punto donde el valor de la altura cae en la curva de prueba de caudal – altura. En la figura 2, si la altura corresponde al punto B, entonces el caudal se lee directamente debajo.

**Efectos del cambio de velocidad**

¿Qué ocurre si la bomba no funciona a la misma velocidad que su curva de prueba? La curva puede haber sido realizada para velocidades de 1150, 1750 ó 3500 rpm y la bomba realmente funciona a 1200, 1715 ó 3600 r.p.m. También puede ocurrir que la bomba fuera comprada para 1750 r.p.m. y luego se decide aumentar la velocidad del motor a 2200 r.p.m. ¿Qué ocurre con la nueva curva de rendimiento?

Si tomamos a  $n_1$  como la velocidad a la que funcionó la bomba originariamente y  $n_2$  es la nueva velocidad, entonces para cualquier caudal seleccionado para la nueva curva:



Cambios en las curvas para un aumento de velocidad (diámetro del impulsor constante)

$$Q_2 = Q_1 \times \left( \frac{n_2}{n_1} \right)$$

$$H_2 = H_1 \times \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2$$

$$N_2 = N_1 \times \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^3$$

$$\eta_2 \approx \eta_1$$

Lo que antecede será cierto si se trata de pequeños cambios de velocidad, y los resultados sólo aproximados. Si se trata de cambios radicales, sería necesario realizar modificaciones. Por ejemplo, dadas las velocidades considerablemente

incrementadas en las bombas hidráulicas, uno puede desilusionarse calculando anticipadamente un rendimiento a 3500 rpm en un test a 1750 rpm.

### Efectos del cambio de impulsor

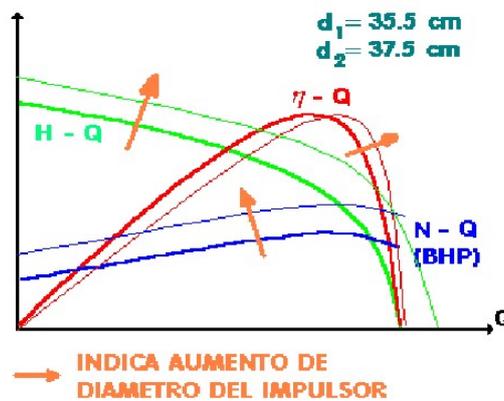
Al igual que el caso anterior, los cambios se pueden calcular, siempre que la diferencia no sea excesiva (se puede reducir hasta un 20% de su valor máximo sin efectos adversos). Tomamos a  $d_1$  como el diámetro del impulsor con el que funcionó la bomba originariamente y  $d_2$  es el nuevo diámetro.

$$Q_2 = Q_1 \times \left( \frac{d_2}{d_1} \right)$$

$$H_2 = H_1 \times \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^2$$

$$N_2 = N_1 \times \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^3$$

$$\eta_2 \approx \eta_1$$



### Efectos de la viscosidad del líquido

Se deberá realizar correcciones en las curvas de altura, caudal, eficiencia y potencia al freno de acuerdo a la viscosidad del líquido como se muestra en las líneas quebradas de la siguiente figura. A menudo para evitar que accidentalmente o a propósito se lo fuerce a proporcionar máxima capacidad, el motor puede ser de un tamaño tal como para que no haya sobrecarga. En la siguiente figura vemos que el moto necesitaría una potencia en la medida de  $y$  para no estar sobrecargado si trabaja con agua y de  $y'$  si se usara con otro líquido viscoso para el que se traza la curva. Similarmente, como vimos en la tercer figura, la máxima potencia para agua sería  $y$ , pero para nafta, con un peso específico de 0,75 se reduciría a  $y'$ , donde  $y' = 0,75 y$ .

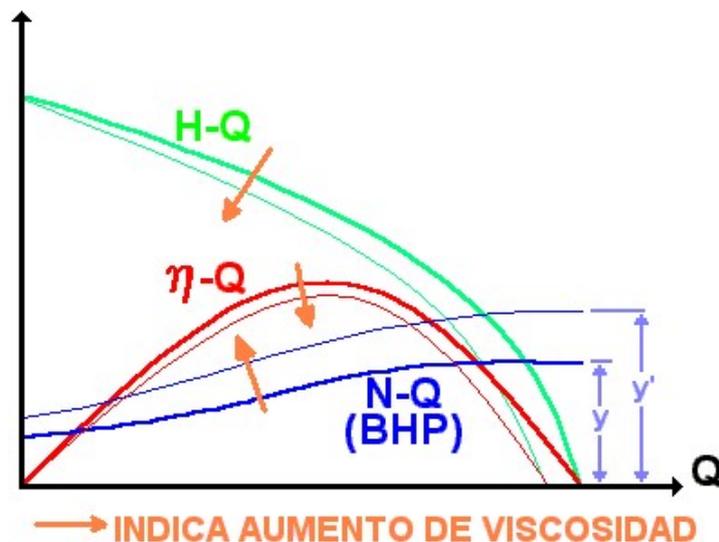


Fig.3. Para líquidos viscosos habrá que modificar las curvas de performance como las mostradas en el gráfico. Las necesidades de potencia pueden tornarse críticas ya que un motor que funciona holgadamente con agua, puede resultar sobrecargado por un líquido más viscoso.

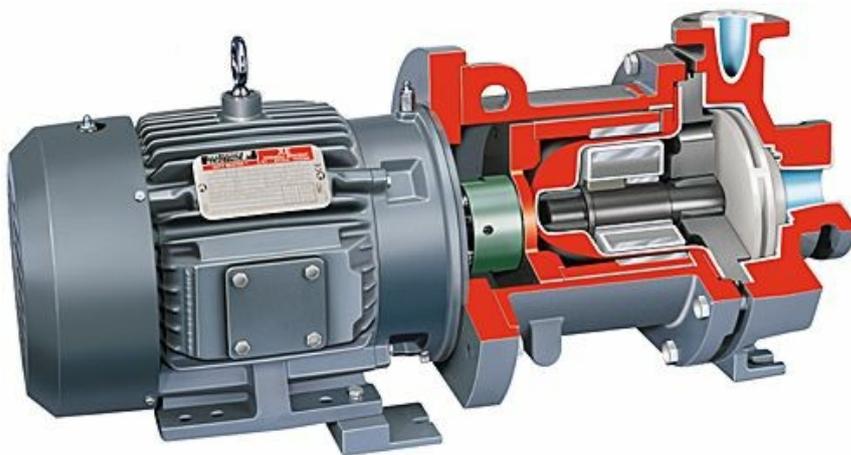
Todas las bombas centrífugas empeoran su funcionamiento con el aumento de la viscosidad, entonces debemos calcular  $Q$ ,  $H$  y  $\eta$  equivalentes en agua, ya que todas las curvas vienen dadas para el agua ( $\rho_{\text{agua}} = 32 \text{ SSU}$ ).

Se extraen de las tablas los factores de corrección de altura  $C_H$ , de caudal  $C_Q$  y de eficiencia  $C_\eta$  (ó  $C_E$ ), y luego se procede de la siguiente manera:

Sabiendo como se calcula BHP:  $\text{BHP} = \frac{H \cdot Q \cdot \gamma}{k \cdot \eta}$ , donde  $k$  es un factor de conversión, luego:

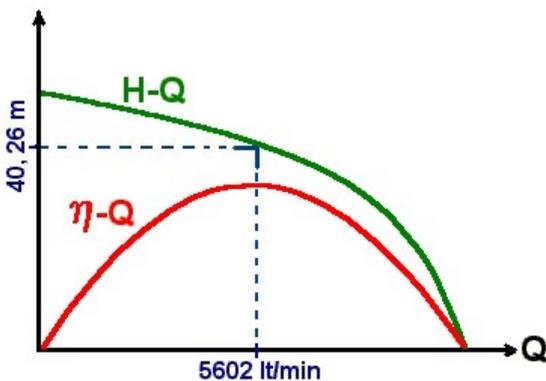
$$\left. \begin{aligned} H_{H_2O} &= \frac{H_\mu}{C_H} \\ Q_{H_2O} &= \frac{Q_\mu}{C_Q} \\ \eta_{H_2O} &= \frac{\eta_\mu}{C_\eta} \end{aligned} \right\} \text{BHP}_\mu = \frac{H_\mu \cdot Q_\mu \cdot \gamma_\mu}{k \cdot \eta_\mu}$$

### BOMBA DE ACOUPLE MAGNÉTICO:



La bomba de acople magnético carece de contacto entre el motor que mueve al rodete por lo que forma una cámara estanca que es óptima para manejar fluidos contaminantes o peligrosos para el ambiente y/o las personas, como también sirve para manejar fluidos caros que de contaminarse son muy difíciles de limpiar.

## 8.- Número Específico de Revoluciones



Las bombas se analizan y comparan básicamente en sus “condiciones de diseño”, es decir, en la condición de carga y capacidad a la velocidad clasificada a la que se obtiene la máxima eficiencia. Por ejemplo, para una bomba determinada sus condiciones de diseño a  $n = 1760$  rpm son:  $H = 40,265$  m y  $Q = 5602$  lt/min ya que para este punto se obtiene la máxima eficiencia.

### 8.1.- Modelos de bombas

Un modelo de bomba tiene las características de diseño de una unidad de tamaño natural (prototipo) a menor escala, por lo que resulta más económico para realizar ensayos.

El factor de escala es:

$$f = \frac{L_m}{L_p} = \frac{n_m}{n_p} = \sqrt{\frac{Q_m}{Q_p}}$$

Siendo  $L$ ,  $n$  y  $Q$  las longitudes, velocidades y caudales del modelo y del prototipo. Esto se deberá cumplir para la misma carga de diseño. Deberán tener los grados de lisura proporcionales y pérdidas mecánicas proporcionales (en cojinetes y estoperos). Esto es muy difícil de lograr, pero convendrá que sean aproximadamente proporcionales.

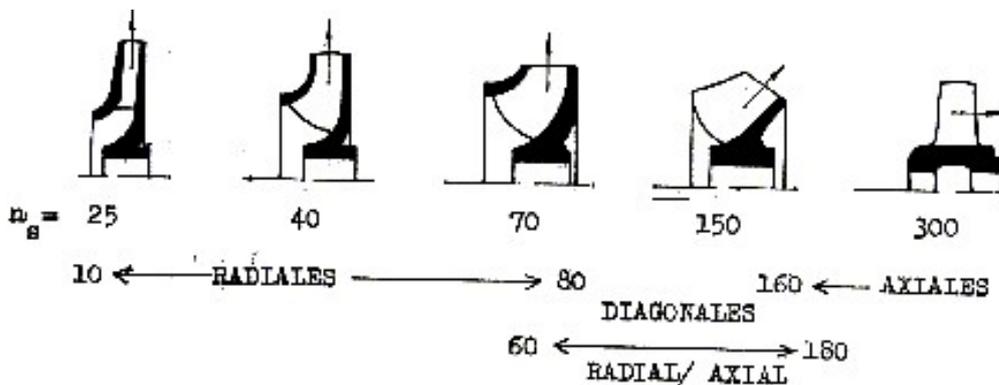
Sir Isaac Newton estableció la teoría de la similitud dinámica, en 1687, introduciendo así el respaldo matemático de las investigaciones con modelos. Éste expresa: “Dos bombas geoméricamente similares tendrán características de funcionamiento similares”.

Para comparar las distintas máquinas centrífugas surge un término que relaciona los 3 factores principales. Este término es la **velocidad específica**, que es “un número adimensional, numéricamente igual a la velocidad giratoria a la que un modelo exacto teórico de una máquina centrífuga tendría que operar con objeto de descargar una unidad de capacidad contra una unidad de carga total”.

Expresión matemática: 
$$n_s = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

Velocidad específica tipo ( $n_s$  tipo): Es aquella que da la eficiencia máxima de una bomba en particular.

Debido a que las características físicas y el contorno general de los perfiles de los impulsores están íntimamente relacionados con sus  $n_s$  tipo, el valor de ésta última describirá inmediatamente la forma aproximada del impulsor en cuestión.



**Explicación matemática del  $n_s$  (visto en Mecánica de los fluidos):**

**LEYES DE SEMEJANZA:**

- **SEMEJANZA GEOMÉTRICA** (formas proporcionales)
- **SEMEJANZA CINEMÁTICA** (triángulos de velocidades semejantes)
- **SEMEJANZA DINÁMICA** (en dos puntos homólogos existe igual  $N^o$  de Reynolds)

$$Q = c_m \cdot A = c_m \cdot \pi \cdot D \cdot b$$

Donde:  $c_m = f(n, D)$   
 $b = f(D)$

$$\Rightarrow Q = f(n, D^3) \Rightarrow \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1 \cdot D_1^3}{n_2 \cdot D_2^3} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Por Euler: 
$$H = \frac{c_{u2} \cdot u_2}{g} \quad (\text{para entrada radial})$$

Donde: 
$$\left. \begin{array}{l} c_{u2} = f(n, D) \\ u_2 = f(n, D) \end{array} \right\} \Rightarrow H = f(n^2, D^2) \Rightarrow \frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2 \cdot D_1^2}{n_2^2 \cdot D_2^2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$N = \frac{H \cdot Q \cdot \gamma}{75 \cdot \eta} \therefore N = f(Q, H)$$

Donde: 
$$\left. \begin{array}{l} Q = f(n, D^3) \\ H = f(n^2, D^2) \end{array} \right\} \Rightarrow N = f(n^3, D^5) \Rightarrow \frac{N_1}{N_2} = \frac{n_1^3 \cdot D_1^5}{n_2^3 \cdot D_2^5}$$

De las ecuaciones 1 y 2 obtenemos: 
$$\frac{\sqrt{Q_1}}{\sqrt{Q_2}} = \frac{H_1^{3/4}}{H_2^{3/4}} \cdot \frac{n_2}{n_1}$$

Haciendo  $Q_s = 1 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $H_s = 1 \text{ m}$   $\square$   $n_s = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$  (Número específico de vueltas, que es constante para una serie de bombas semejantes)

### **PROBLEMAS FRECUENTES EN BOMBAS CENTRIFUGAS.**

En un significado amplio, "comportamiento hidráulico insatisfactorio" puede definirse como anomalías en la operación de la bomba causadas por, o relativas al flujo del líquido. Esto incluye menor salida, eficiencia reducida, periódicas fluctuaciones en la salida, comportamiento inestable y cavitación.

Menor salida es menor altura a un determinado caudal y esto es respectivamente menor caudal para una altura dada. Tal reducción en la salida puede no ser acompañada por una reducción en el consumo de potencia. En este caso, una reducción en la salida implica una reducción en la eficiencia. Eficiencia reducida, en muchos casos, es el resultado de una reducción en la salida mientras que los requerimientos de potencia se mantienen sin cambios. En ciertas instancias, desde luego, un cambio en la forma del impulsor (debido a pobres procedimientos de fundición, abrasión, corrosión o fractura) pueden introducir anomalías en el flujo el cuál incrementará el consumo de potencia sin ninguna reducción en la salida.

Comportamiento inestable cubre un amplio espectro de fenómenos incluyendo excesivas oscilaciones de las lecturas de presión, operación ruidosa y excesiva vibración.

La cavitación está íntimamente ligada a los problemas que surgen cuando una bomba opera a bajas presiones de succión y/o a altas velocidades. Recientemente, con la extensión del uso de las bombas para nuevos propósitos, la cavitación se ha convertido en un factor de máxima importancia.

Una bomba centrífuga consiste de un impulsor y una carcasa o voluta. Cuando el impulsor es puesto en rotación, este "arroja" el líquido desde este espacio interior hacia la carcasa, simultáneamente incrementando la energía contenida en el líquido.

Esto tiene un doble efecto. El primero, es el incremento de energía sobre el líquido actuante ayudándolo a superar las resistencias en la línea de descarga. Esto permite al líquido fluir hacia su

destino. Segundo, esto remueve el líquido originalmente localizado en el interior de los pasajes del impulsor, creando un vacío interno en el ingreso del impulsor.

La siguiente secuencia de eventos depende de una variedad de factores. Primero, cuando brida de succión de la bomba se conecta por una línea hermética a una fuente de líquido, la presión existente en esta fuente forzaría nuevo líquido en el impulsor, resultando en un flujo continuo a través de la bomba. Este caso, desde ya, implica las siguientes condiciones:

1. El líquido está relleno el impulsor al mismo ritmo al cuál es expulsado de la bomba.
2. La diferencia entre la presión existente en la succión y la presión reducida en el ojo del impulsor puede superar la altura de elevación y la resistencia en la cañería de succión.
3. La presión dentro del impulsor no debe caer por debajo de la presión de vapor del líquido.
4. Un flujo continuo de líquido a través de la bomba implica que la altura total desarrollada por el impulsor puede superar la resistencia total del sistema.

El proceso de bombeo puede ser redefinido como "una adición de energía sobre el líquido actuante a expensas de la energía suministrada a la bomba por su motor". La proporción y efectividad de esta conversión de energía depende de la velocidad de operación de la bomba, de las dimensiones físicas de las partes activas que manejan el fluido y de las formas geométricas de esas partes.

Cualquier desviación en la velocidad de operación y/o en la medida y forma de estas vías de agua afectará el desempeño de la bomba. En lo que concierne la factor de forma, esta incluye la geometría completa también como la textura de las partes mojadas por el fluido. Con la excepción de las superficies externas tapadas del impulsor, las superficies rugosas siempre resultan en una reducción de la salida y del desempeño de la bomba.

Frecuentemente, una bomba demuestra un comportamiento hidráulico insatisfactorio debido a que no se seleccionó para los trabajos que debía desarrollar. Cuando esa elección es relativa a la característica altura-capacidad, la fuente es fácil de detectar. Desde luego, cuando la fuente del problema se debe a una inapropiada característica de succión de la bomba, el problema se convierte en más complicado y difícil de resolver.-

Una razón es que las características de succión incluyen un amplio espectro de fenómenos. Otra razón para la dificultad es que muchos hechos relativos a la succión son nuevos y no conocidos ampliamente. En adicción, nuevos descubrimientos han hecho obsoletas las nociones sobre cavitación.

Los requerimientos de NPSH de una bomba centrífuga dada son generalmente determinadas por ensayos a temperatura y velocidad constantes. Esto es algunas veces acompañado por variaciones en el NPSH disponible a caudales de ensayo para observar como cambia el comportamiento a diferentes caudales con las variaciones del NPSH<sub>d</sub>. Por conveniencia estos ensayos son usualmente realizados mientras se bombea agua.-

En la práctica, esos datos de los ensayos no son del todo suficientes. A veces, una bomba debe operar bajo condiciones completamente diferentes a las que fue ensayada. Esto puede incluir diferencias en la velocidad de operación, temperatura y cantidades de aire o gas disuelto en el líquido. Además, el líquido bombeado puede tener propiedades completamente diferentes que la del líquido con el cuál el ensayo de NPSH fue realizado.

Otro espectro de problemas puede aparecer cuándo la bomba no opera bajo condiciones de succión constantes pero bajo condiciones que varían con el tiempo. Esas variaciones pueden estar directamente encadenadas a fluctuaciones de presión en el tanque de succión tanto como fluctuaciones en el nivel del líquido. Estas a veces pueden ser fluctuaciones en la velocidad de operación, temperatura del líquido bombeado o en el caudal.

## CAVITACION

Mucho se ha publicado acerca de las causas y efectos de la cavitación. Desde luego, hay una definición primaria que podría ayudar a distinguir o clarificar la distinción entre cavitación y líquido hirviendo: ebullición local en el seno de un líquido el cuál se comporta o está en un estado de no ebullición.

Esto puede ser mejor ilustrado con el clásico ejemplo de la tetera. Cuando calentamos agua, ruidos y roturas se escuchan mucho antes de que el agua alcance un estado de ebullición.

La razón de esos ruidos es debido a que el agua que esta en inmediato contacto con el fondo caliente de la tetera comienza a hervir mientras que el resto del agua está aún bien por debajo de su temperatura de ebullición. Las burbujas de vapor generadas en el fondo de la tetera, siendo más livianas que el líquido, tienden a subir a través de agua que no esta en ebullición. En el momento en que ellas alcanzan una zona más fría colapsan vigorosamente y crean el ruido de rotura característico.

Cuando la temperatura del agua alcance los 100 °C las burbujas de vapor comienzan a formarse en todo el seno del líquido. Cualquier condensación del vapor generado comienza a producirse sólo exteriormente a la masa del líquido después de que el vapor ha alcanzado el aire más frío. En este momento, el fenómeno es simplemente definido como ebullición.

Generalmente, la cavitación ocurre por incrementos locales de la temperatura o por caídas locales de la presión. Para cada líquido existe una relación fija entre la temperatura a la cuál el fluido comienza a ebullicir y la presión que actúa sobre el líquido.

En un líquido estacionario, la presión en cualquier plano horizontal es constante en todas direcciones. Pero, cuando un líquido está fluyendo a través de una bomba centrífuga, puede haber una gran diferencia en las velocidades locales del fluido. Esto, en cambio, puede causar significativas diferencias de presión en el líquido.

Otra razón para la diferencia de presiones en el flujo líquido es porque los álabes del impulsor realizan un trabajo sobre el líquido. Esto puede ser fácilmente probado, puesto que para transmitir la potencia, debe existir una diferencia de presión entre las caras frontales y traseras de los álabes.

Diferencias en la presión significan que en ciertas zonas de la bomba existan presiones menores que en otras zonas. Bajo ciertas circunstancias, las presiones en ciertas zonas de la bomba pueden caer o convertirse en menores que la presión de vapor del líquido, dando lugar a la cavitación.

La cavitación en bombas centrífugas se manifiesta en sí misma en al menos uno de los siguientes fenómenos: ruido excesivo y vibración, reducción del flujo de salida o destrucción de las partes mojadas.

El efecto de la cavitación en las bombas centrífugas se manifiesta en dos modos. Primero, las burbujas de vapor creadas dentro de los pasajes del impulsor obstruyen el flujo de líquido bombeado, reduciendo su entrega. A veces, esto causa una completa caída de la altura y de la eficiencia. Segundo, las burbujas que colapsan cuando alcanzan una zona de alta presión, pueden ejercer enormes tensiones locales sobre las superficies sobre la que colapsan causando daño sobre ellas. La cavitación puede arruinar una bomba en cuestión de horas.

Externamente, la cavitación se pone de manifiesto por medio de ruidos y vibraciones tan bien como por una reducción del caudal que entrega la bomba.

#### CHECK LIST DE PROBLEMAS Y POSIBLES CAUSAS PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS

PROBLEMA	POSIBLE CAUSA
1. Falla en la entrega de líquido	a) Dirección de rotación equivocada b) La bomba no está funcionando c) La línea de succión no está llena de líquido d) Bolsones de vapor o aire en la línea de succión e) La entrada de la línea de succión no está sumergida lo suficiente f) El ANPA disponible ( $NPSH_A$ ) no es suficiente g) La bomba no alcanzó su velocidad de régimen h) La altura total requerida es mayor que la altura que la bomba es capaz de entregar

<p>2. La bomba no entrega el caudal de régimen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Dirección de rotación equivocada</li> <li>b) La línea de succión no está llena de líquido</li> <li>c) Ingreso de aire en la línea de succión o en la estopada</li> <li>d) Bolsones de vapor o aire en la línea de succión</li> <li>e) La entrada de la línea de succión no esta sumergida lo suficiente</li> <li>f) El ANPA disponible (<math>NPSH_A</math>) no es suficiente</li> <li>g) La bomba no alcanzó su velocidad de régimen</li> <li>h) La altura total requerida es mayor que la altura que la bomba fue diseñada</li> <li>i) Válvula de pie demasiado pequeña</li> <li>j) Válvula de pie obstruida con basuras</li> <li>k) La viscosidad del líquido es demasiado elevada para la que la bomba fue diseñada</li> <li>l) Defectos mecánicos ...             <ul style="list-style-type: none"> <li>1) Anillos de desgaste dañados</li> <li>2) Impulsor dañado</li> <li>3) Perdidas internas como resultado de defectos en empaquetaduras</li> </ul> </li> <li>m) Válvula de descarga no totalmente abierta</li> </ul>
<p>3. La bomba no desarrolla la presión de descarga de régimen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Dirección de rotación equivocada</li> <li>b) Ingreso de aire en la línea de succión o en la estopada</li> <li>c) Gas o vapor en el líquido</li> <li>d) La bomba no alcanzó su velocidad de régimen</li> <li>e) La altura total requerida es mayor que la altura que la bomba fue diseñada</li> <li>f) La viscosidad del líquido es demasiado elevada para la que la bomba fue diseñada</li> <li>g) Defectos mecánicos ...             <ul style="list-style-type: none"> <li>1. Anillos de desgaste dañados</li> <li>2. Impulsor dañado</li> <li>3. Perdidas internas como resultado de defectos en empaquetaduras</li> </ul> </li> </ul>
<p>4. La bomba pierde líquido después del arranque</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) La línea de succión no está llena de líquido</li> <li>b) Ingreso de aire en la línea de succión o en la estopada</li> <li>c) Bolsones de vapor o aire en la línea de succión</li> <li>d) La entrada de la línea de succión no es suficiente</li> <li>e) El ANPA disponible (<math>NPSH_A</math>) no es suficiente</li> <li>f) Gas o vapor en el líquido</li> <li>g) La cañería del sello líquido al anillo linterna está taponado</li> <li>h) El anillo linterna no ubicado adecuadamente en la caja de empaquetaduras</li> </ul>
<p>5. La bomba sobrecarga al motor</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Velocidad demasiado alta</li> <li>b) Altura total menor que la altura de régimen</li> <li>c) Densidad y viscosidad del líquido, uno o ambos, diferentes de aquella para la cuál la bomba fue ensayada</li> <li>h) Defectos mecánicos: ...             <ul style="list-style-type: none"> <li>1. Desalineamiento</li> <li>2. Eje doblado</li> <li>3. Empaquetaduras demasiado ajustadas</li> <li>4. Elementos rodantes agarrotados o agarrados</li> </ul> </li> </ul>

<p>6. Vibraciones</p>	<p>a) Deficiente succión                      1. Gas o vapor en el líquido                      2. El ANPA disponible (NPSH<sub>A</sub>) no es suficiente                      3. La entrada de la línea de succión no está sumergida lo suficiente                      4. Bolsones de vapor o aire en la línea de succión                      b) Desalineamiento                      c) Picaduras o pérdida de rodamientos                      d) Rotor fuera de balance                      1. Impulsor taponado                      2. Impulsor dañado                      e) Eje doblado                      f) Inapropiada localización de la válvula de control sobre la línea de descarga                      g) Fundación no rígida</p>
<p>7. Cajas de estopadas sobrecalentadas</p>	<p>a) Empaquetaduras demasiado ajustadas                      b) Empaquetaduras no lubricadas                      c) Equivocado grado de empaquetaduras                      d) Insuficiente agua de enfriamiento en las camisas                      e) Cajas impropriadamente empaquetadas</p>
<p>8. Rodamientos sobrecalentados</p>	<p>a) Nivel de aceite demasiado bajo                      b) Aceite de graduación impropia o pobre                      c) Suciedad en los rodamientos                      d) Suciedad en el aceite                      e) Humedad en el aceite                      f) Enfriador de aceite taponado o incrustado                      g) Falla en el sistema de lubricación                      h) Insuficiente agua circulación de agua de enfriamiento                      i) Rodamientos demasiado ajustados                      j) Sellos de aceite demasiado ajustados al eje                      k) Desalineación</p>
<p>9. Rodamientos se desgastan rápidamente</p>	<p>a) Desalineación                      b) Eje doblado                      c) Vibración                      d) Excesivo empuje resultante de fallas mecánicas en el interior de la bomba                      e) Falta de lubricación                      f) Rodamientos impropriadamente instalados                      g) Suciedad en los rodamientos                      h) Humedad en el aceite                      i) Excesivo enfriamiento de los rodamientos</p>

## Puesta en marcha de una bomba centrífuga

Para poner en marcha una bomba centrífuga hay que tener presente las siguientes consideraciones:

a) Comprobar todos los purgadores, bridas, líneas, etc., asegurándose de que no se ha olvidado ninguna junta ciega.

b) Si la bomba está recién instalada, comprobar que puede girar sin dificultad rodándola a mano. Comprobar que el sentido de rotación del

motor es el correcto.

- c) Comprobar la lubricación de los cojinetes y demás partes móviles.
- d) Comprobar los cierres líquidos.
- e) Cerrar la válvula de impulsión, abrir la de aspiración plenamente y llenar de líquido la carcasa. Púrguese el aire o vapor por el purgador situado en la parte más alta de la carcasa. Si el líquido que vamos a bombear es caliente déjesele fluir hasta que caliente la carcasa.
- f) Si la bomba está accionada por una turbina, hay que purgar la línea de vapor a través de la misma con el fin de calentarla y eliminar condensados. Asegurarse que la válvula de vapor de escape está abierta. Comprobar asimismo la lubricación.
- g) Poner en marcha la bomba hasta alcanzar la presión normal y abrir entonces la válvula de impulsión lentamente y asegurarse que la presión se mantiene en su valor. Hay que tener en cuenta que si se abre demasiado rápidamente la válvula de impulsión, se puede originar una pulsación repentina con la pérdida de la succión.

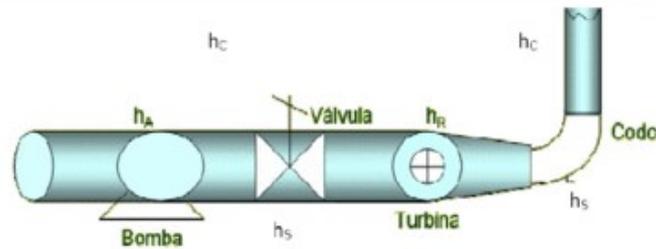
## **Parada de una bomba centrífuga**

- a) Cerrar la válvula de impulsión; esto reduce la carga del motor y evita el retroceso si la válvula de retención no funcionase.
- b) Parar el motor o turbina.
- c) Dejar la bomba llena de líquido a menos que el producto tenga un alto punto de congelación o viscosidad. En este caso vaciar la bomba cerrando previamente la válvula de aspiración. Abrir la purga de presión de la bomba. Volver a cerrar esta purga. Si la bomba se deja preparada para entrar en servicio, dejar la aspiración abierta.
- d) Si existen líneas que lo permiten, mantener calientes las bombas de reserva.
- e) Si se va a hacer en la bomba alguna reparación, cerrar todas las válvulas de bloqueo y vaciar la bomba.

## **Comprobaciones de una bomba centrífuga en funcionamiento**

- a) Comprobar la presión de descarga
- b) Comprobar la empaquetadura. Si tiene anillo empaquetador, comprobar que no está sobrecalentada o comprobar la presión si tiene engrase de anillo. Si el cierre es mecánico no se precisa ajuste.
- c) Comprobar el nivel de aceite lubricante en la envoltura del cojinete.
- d) Comprobar manualmente si existe una excesiva vibración y ruidos.

# Ecuación de Bernoulli



$$\frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + h_A - h_R - h_T = \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \frac{P_2}{\gamma}$$

- $h_A$ : Energía añadida al fluido por una bomba u otro dispositivo
- $h_R$ : Energía consumida del fluido mediante un dispositivo mecánico, por ejemplo una turbina
- $h_T$ : Pérdidas de energía por parte del fluido por efectos de fricción (rugosidad en las cañerías) o por presencia de válvulas, conectores, etc. (accesorios en general).

$$h_T = \sum \text{pérdidas por fricción en tuberías} + \sum \text{pérdidas en accesorios} \quad 7$$