

# Capacitación para técnicos aspirantes a operadores de una refinería de petróleo

MODULO 3  
BOMBAS HIDRÁULICAS

# Índice

|  |           |
|--|-----------|
| 1 .- INTRODUCCIÓN.....   | 1         |
| <u>1.1 .- ¿Qué son las Bombas Hidráulicas? .....</u>               | <u>4.</u> |
| <u>1.2 .- Clasificación General.....</u>                           | <u>4</u>  |
| <u>1.3 .- ¿En qué se diferencian?.....</u>                         | <u>4</u>  |
| 2 .- BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO.....                        | 2         |
| <u>2.1 .- Principales características.....</u>                     | <u>2</u>  |
| <u>2.2 .- ¿Cómo funcionan?.....</u>                                | <u>2</u>  |
| <u>2.3 .- Bombas Reciprocantes.....</u>                            | <u>2</u>  |
| 2.3.1 .- Principales características.....                          | 3         |
| 2.3.2 .- De émbolo y pistón.....                                   | 3         |
| 2.3.3 .- De diafragma.....   | 4         |
| <u>2.4 .- Bombas Rotatorias.....</u>                               | <u>5</u>  |
| 2.4.1 .- Principales características.....                          | 5         |
| 2.4.2 .- Bomba de Engranajes Externos.....                         | 5         |
| 2.4.3 .- Bomba de Engranajes Internos.....                         | 6         |
| 2.4.4 .- Bomba Lobular.....  | 6         |
| 2.4.5 .- Bomba de Tornillos.....                                   | 7         |
| 2.4.6 .- Bomba de Paletas<br>Deslizantes.....                      | 7         |
| 2.4.7 .- Bomba con Rotor Excéntrico.....                           | 7         |
| 2.4.8 .- Bomba de Camisa Flexible.....                             | 8         |
| 2.4.9 .- Bomba de Émbolos Axiales.....                             | 9         |
| <u>3 .- BOMBAS CENTRÍFUGAS.....</u>                                | <u>10</u> |
| 3.1 .-Definición.....  | 10        |
| 3.2 .-Características.....   | 10        |
| 3.3 .- Clasificación.....  | 10        |
| 3.4 .- Principio de funcionamiento.....                            | 11        |
| 3.5 .- Voluta.....   | 12        |
| 3.6 .- Impulsores.....   | 12        |
| 3.7 .- Velocidad específica.....                                   | 13        |
| 3.8 .- Anillos de Desgaste.....                                    | 14        |
| <u>4 .- ESTOPEROS Y SELLOS MECÁNICOS.....</u>                      | <u>15</u> |
| <u>5 .- MATERIALES TÍPICOS DE CONSTRUCCIÓN DE BOMBAS.....</u>      | <u>19</u> |
| <u>6 .- ALTURA DE ELEVACIÓN.....</u>                               | <u>20</u> |
| 6.1 .- Cavitación.....   | 22        |
| 6.2 .- Cebado.....   | 24        |
| <u>7 .- CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS.....</u>              | <u>26</u> |
| 7.1 .- Curva Q-H.....  | 26        |
| 7.2 .- Curva de potencia al freno (potencia de accionamiento)..... | 27        |
| 7.3 .- Curva de eficiencia.....                                    | 27        |
| 7.4 .- Pérdidas y Rendimiento de una bomba centrífuga.....         | 28        |

|   |                  |
|---|------------------|
| 7.5. - Curva MPS.....                                     |                  |
| 28  |                  |
| 7.6. - Curva del sistema.....                             | 28               |
| 7.7. - Punto de operación de la bomba.....                | 29               |
| 7.8. - Curvas características.....                        | 29               |
| <b><u>8. - NÚMERO ESPECÍFICO DE REVOLUCIONES.....</u></b> | <b><u>35</u></b> |
| 8.1. - Modelos de bombas.....                             | 35               |

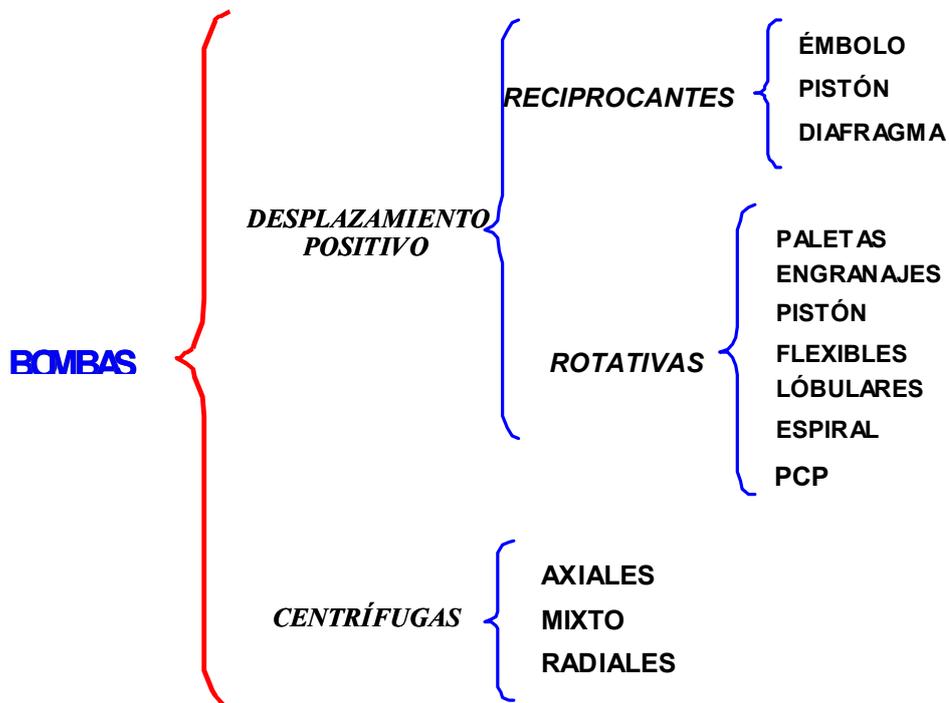
## 1. - INTRODUCCIÓN

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

- Son máquinas que absorben energía mecánica y la restituyen al fluido que la atraviesa en forma de energía hidráulica, en las reciprocantes en forma de presión y en las 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.

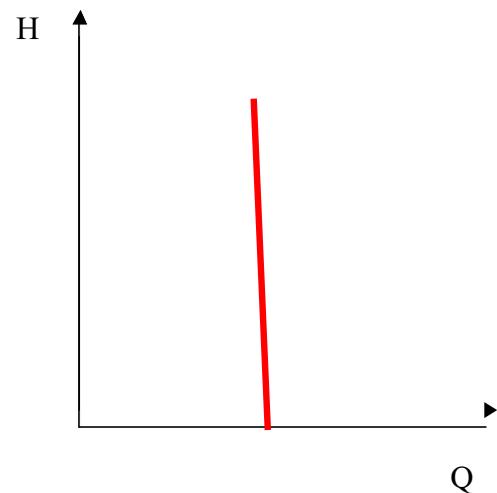
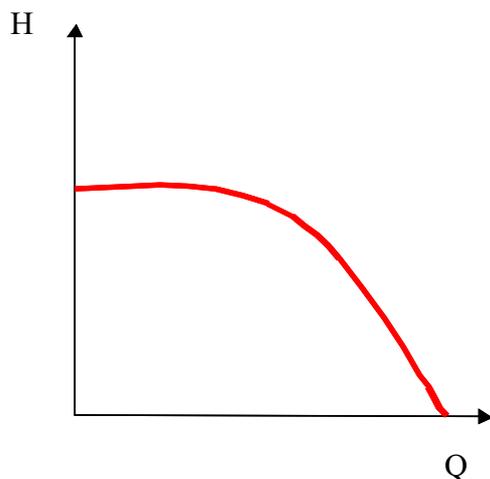
### 1.2. - Clasificación General

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?

|   |   |
|---|---|
| <p style="text-align: center;"><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 style="text-align: center;"><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 y lo transportan mecánicamente (lo empujan), mientras que las centrífugas lo expulsan mediante el impulsor (le impulsan velocidad).

## 2. - BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

### 4RECIPROCANTES

### 4ROTATIVAS

### 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). 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.

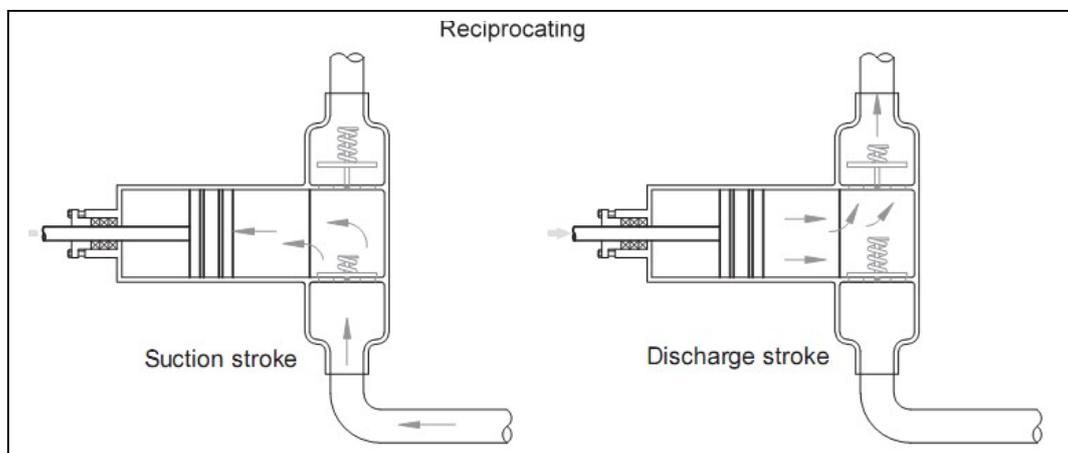
A través de una biela y manivela se convierte el movimiento rotatorio del motor en uno alternativo. Es necesario para su uso un sistema de válvulas sincronizadas con el movimiento del pistón o del émbolo tal como en un motor alternativo de combustión interna.

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.
- 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.

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

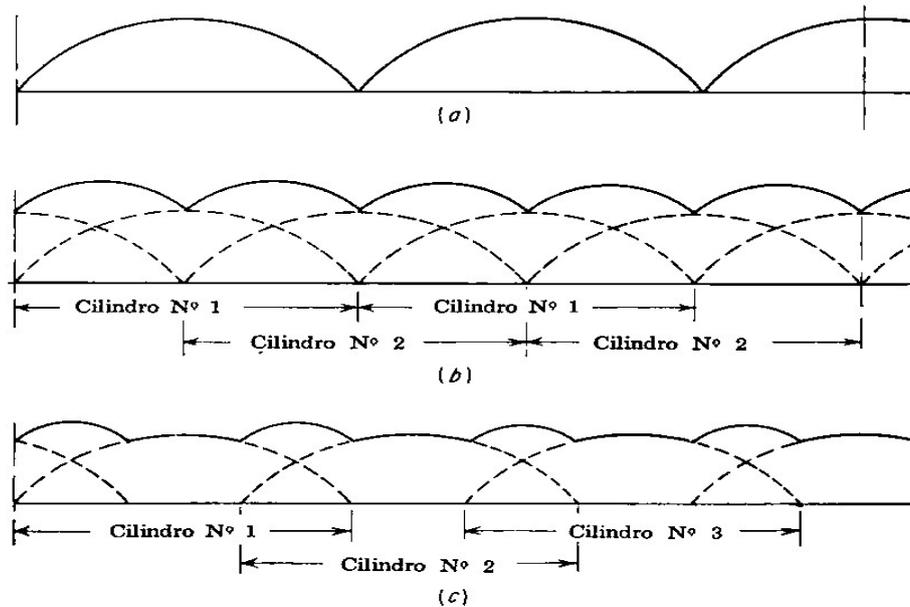


FIGURA 1: Efecto de la combinación de cilindros

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.

En ésta clase de bombas se puede manejar el volumen de la/s cámara mediante la variación del punto de pivote del 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).

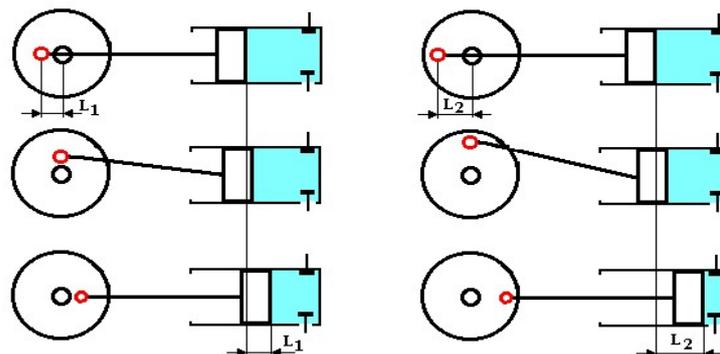


Figura 2: Efecto del

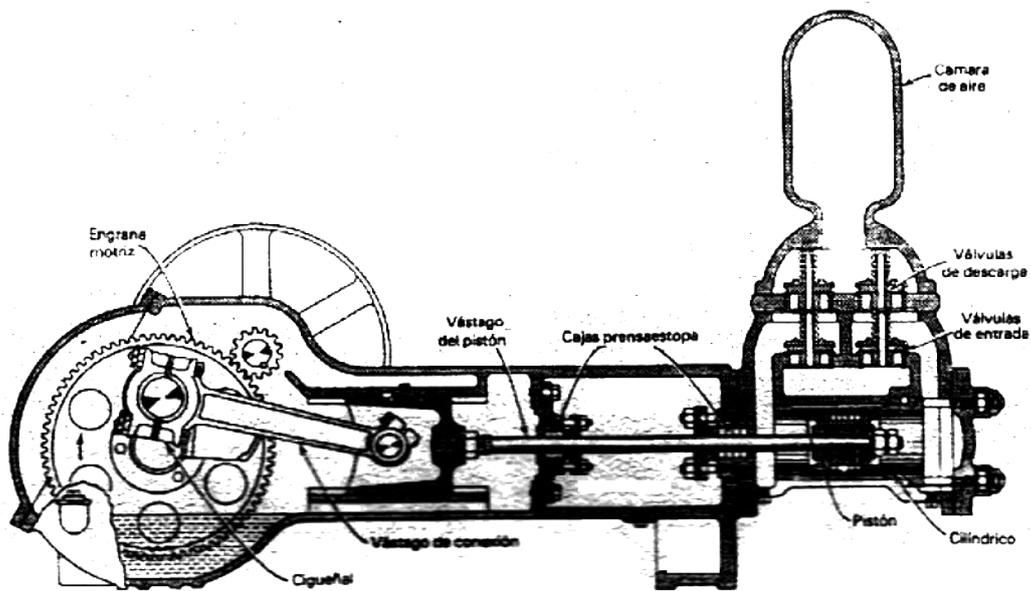
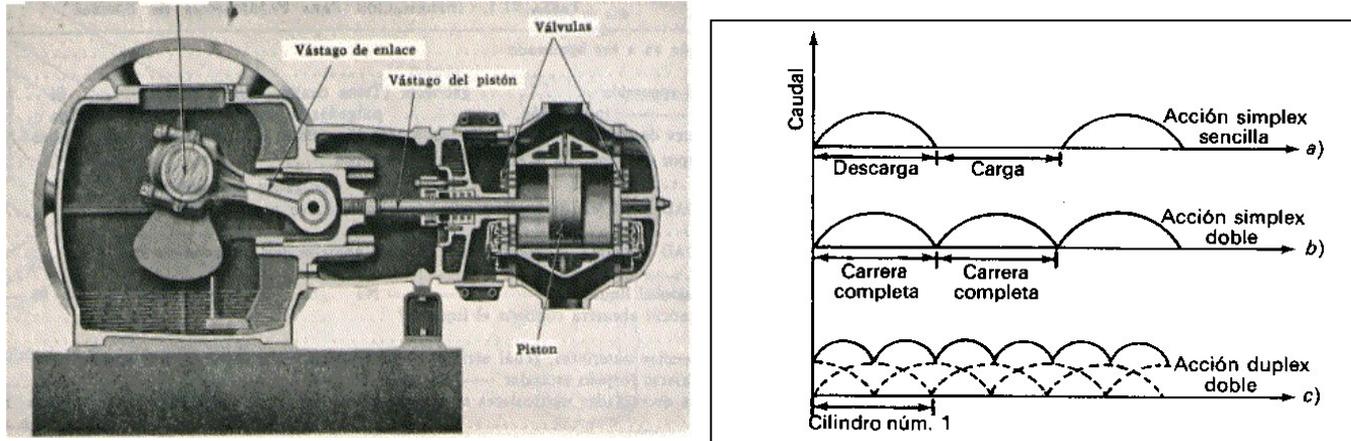


Figura 4: Esquema de bomba de pistón de simple efecto

### 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.

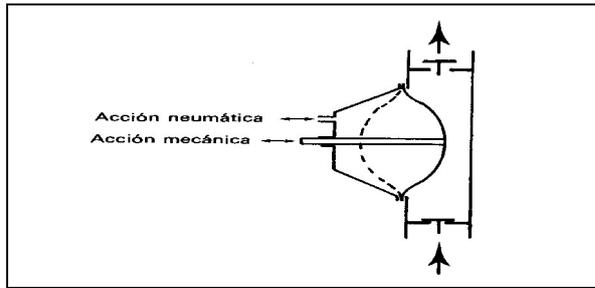


Figura 5 a : Diafragma de transmisión con leva o excéntrico

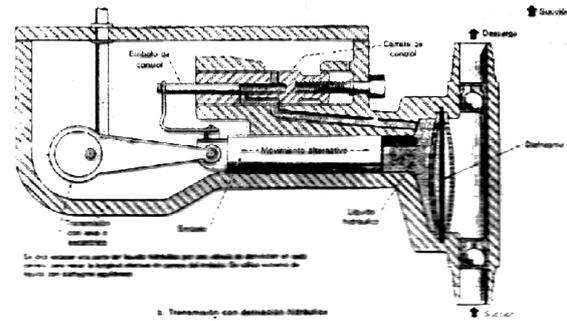


Figura 5 b :Diafragma de transmisión con derivación hidráulica

## 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

Mejorar esta figura

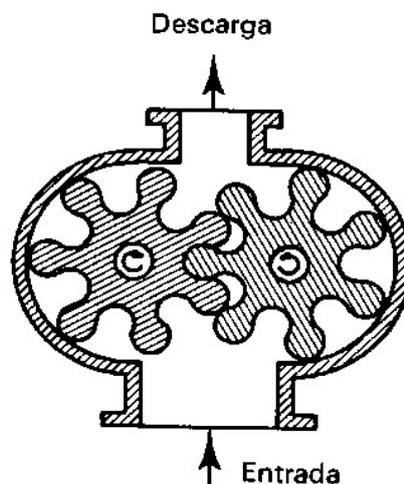
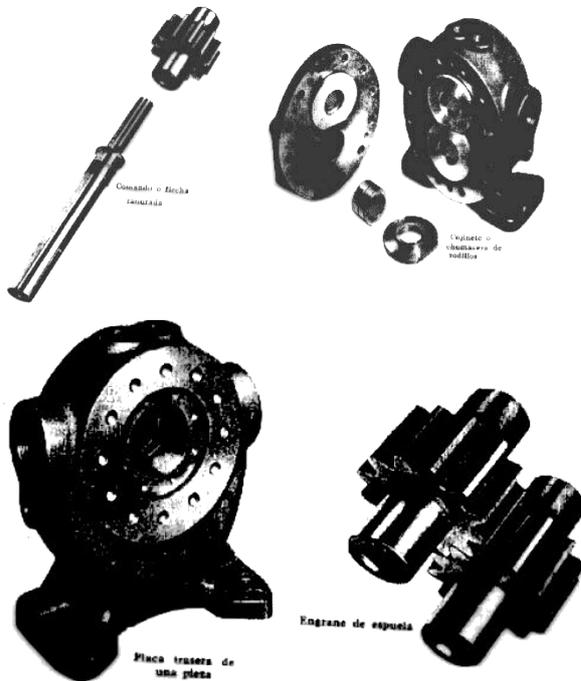
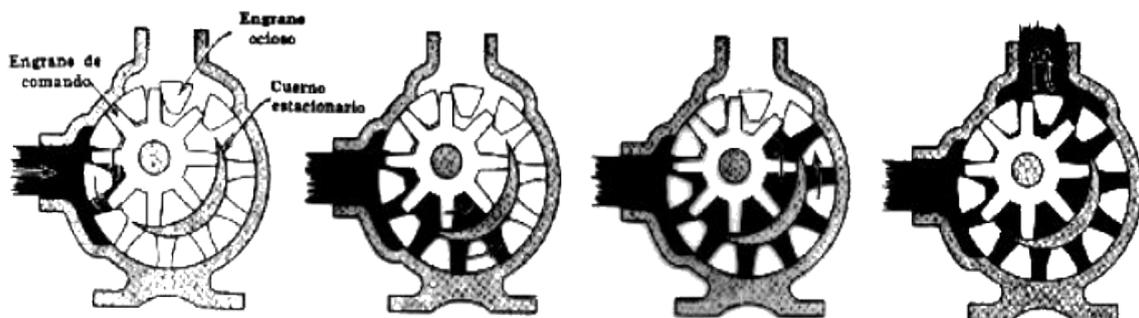


Figura 6: Bomba engranajes Externos

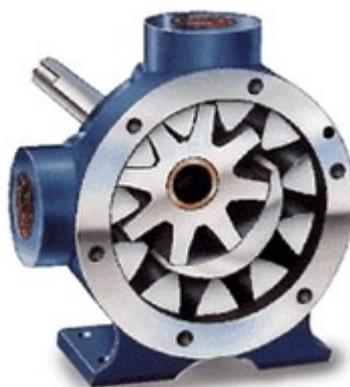
Al girar los engranajes, en el lado de la admisión siempre hay dos dientes (uno de cada engranaje) que se separan, creando un vacío con lo que el líquido penetra en el estator hacia el impulsor, donde el líquido es impulsado por otros dientes



### 2.4.3. - Bomba de Engranajes Internos

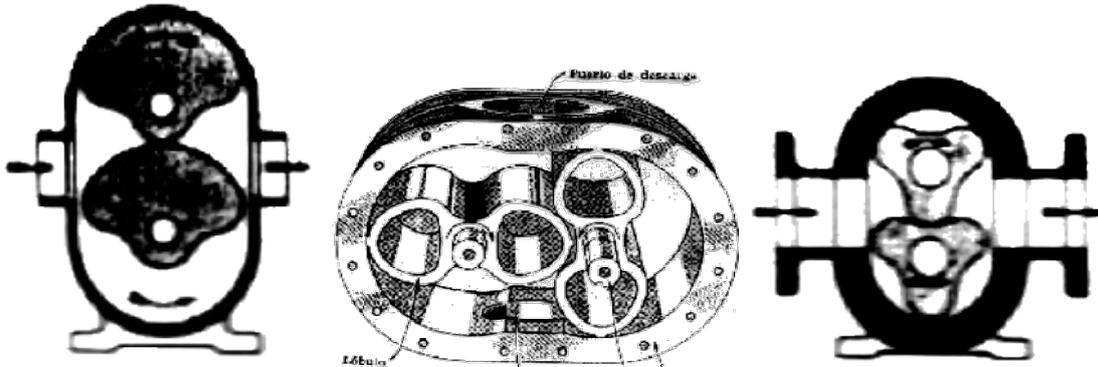


Al girar los engranajes, en el lado de la admisión siempre hay dos dientes que se separan, creando un vacío con lo que el líquido penetra en el estator obligado por la presión que le ejerce el fluido por encima de él hacia el impulsor, donde el líquido es impulsado por otros dientes.



#### 2.4.4. - Bomba Lobular

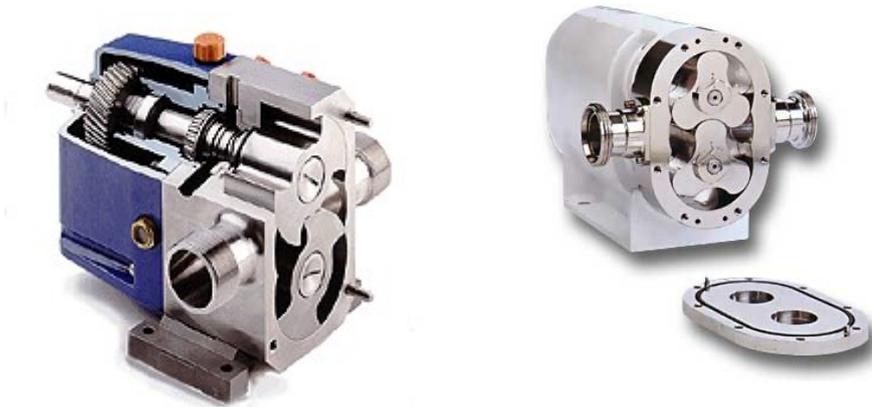
Se tiene lóbulos en lugar de las ruedas dentadas o de los engranajes. La forma de los lóbulos permite transmitir el movimiento de uno a otro



Monolobular

Bilobular

Trilobular

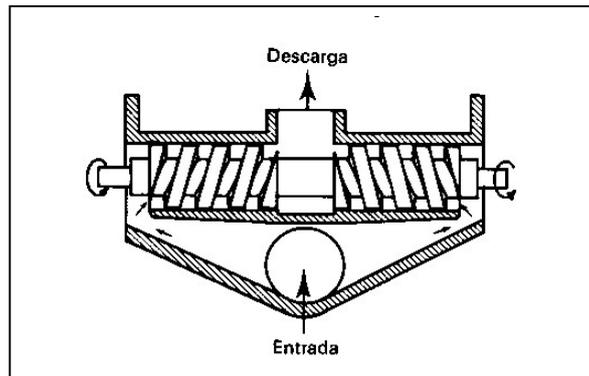


#### 2.4.5. - Bomba de Tornillos

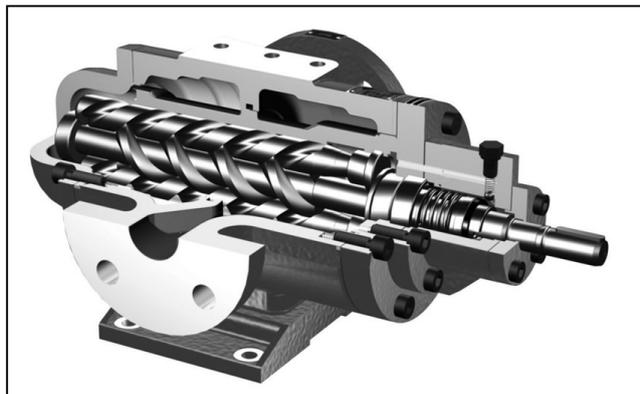
1,2 o 3 tornillos dando vuelta a lo largo de sus ejes, con el líquido fluyendo entre los relieves del tornillo y la carcaza.



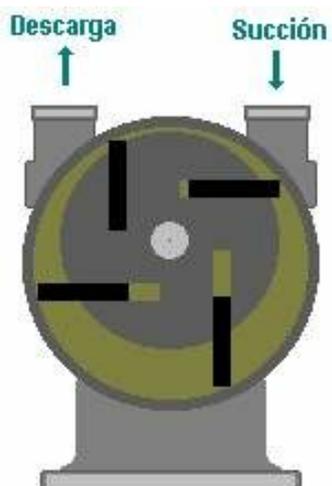
### Un tornillo



### Dos Tornillos

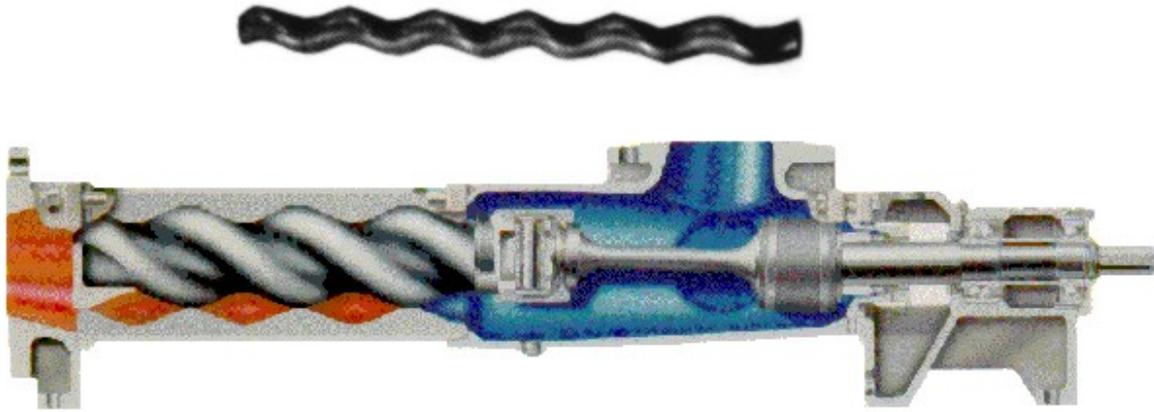


### 2.4.6. - Bomba de Paletas Deslizantes



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

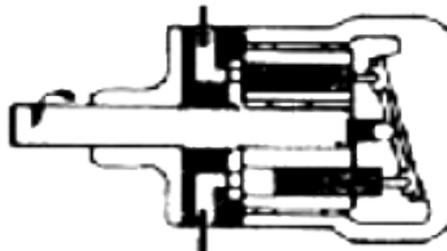
Pueden bombear fluidos muy viscosos (chocolate, masilla, grasa, etc.). Esta acción de bombeo da un flujo continuo con velocidades bajas, estables y uniformes.

#### 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

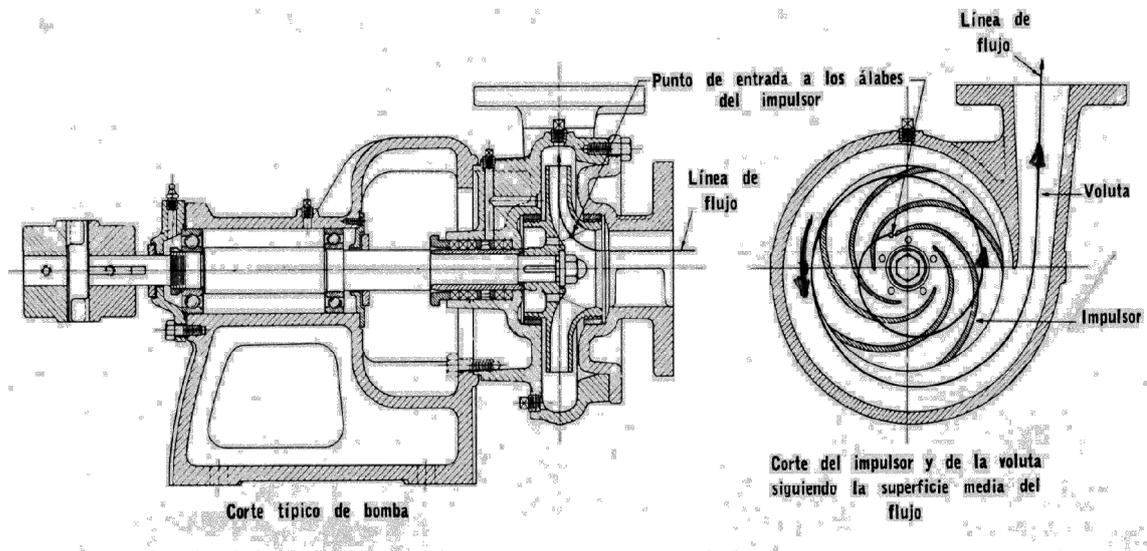
Para ello existen dos razones:

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:

##### **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:**

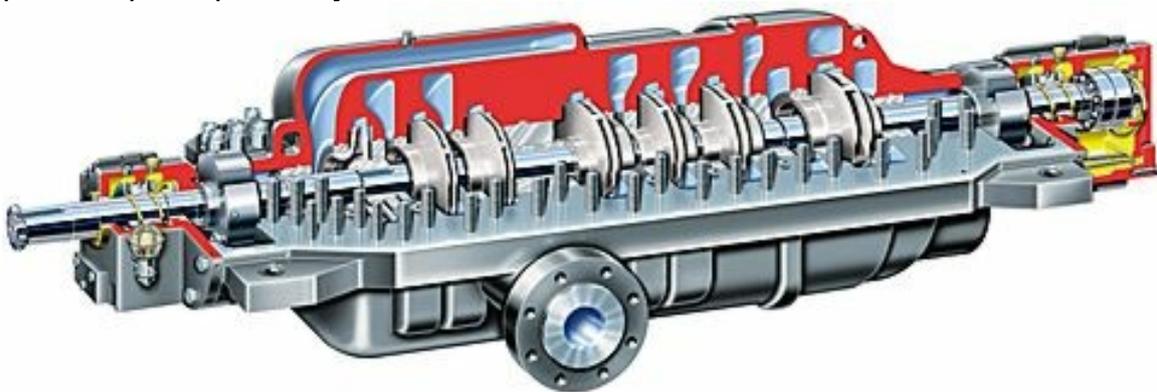
Las Bombas Centrifugas se clasifican de varias formas, una de estas clasificaciones es según la dirección del fluido en relación con el eje de rotación:

- **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 Centrifugas 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.

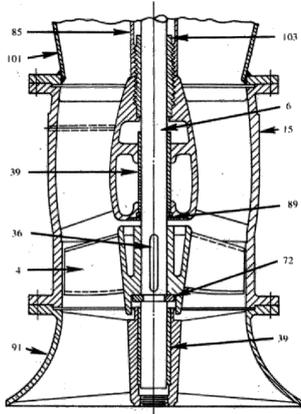


Bomba de 6 pasos

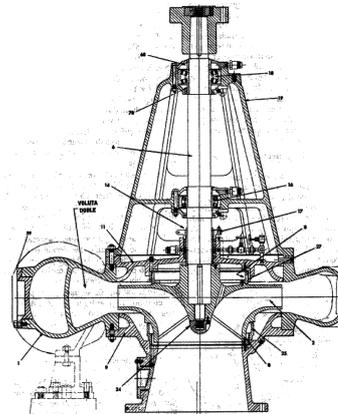
Por ultimo también pueden clasificarse según la disposición del eje o árbol motor en:

- Bombas Centrifugas verticales:

- De foso lleno
- De foso vacío



Bomba de foso lleno



Bomba de foso vacío

Bombas Centrifugas 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:

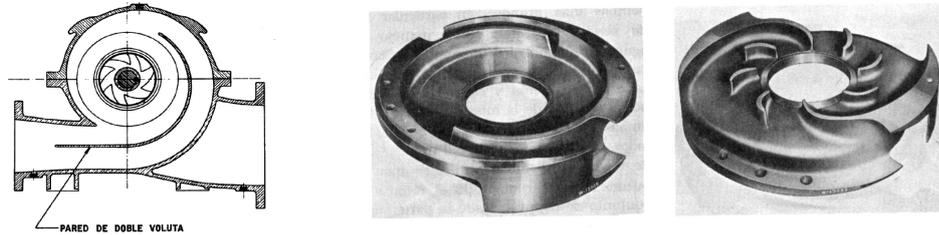
El impulsor de las Bombas Centrifugas descarga líquido a una velocidad alta. Una función de la cubierta de la bomba es reducir esta velocidad y convertir la energía cinética en energía de presión, ya sea por medio de una voluta o de un conjunto de paletas o alabes difusores.

Las Bombas Centrifugas 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.

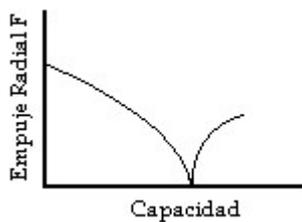
### 3.5 .- Voluta:

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 Centrifugas 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.

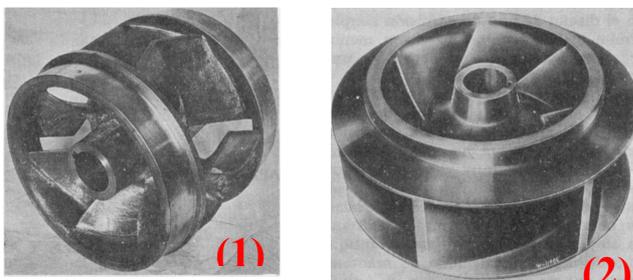
### 3.6. - Impulsores:

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

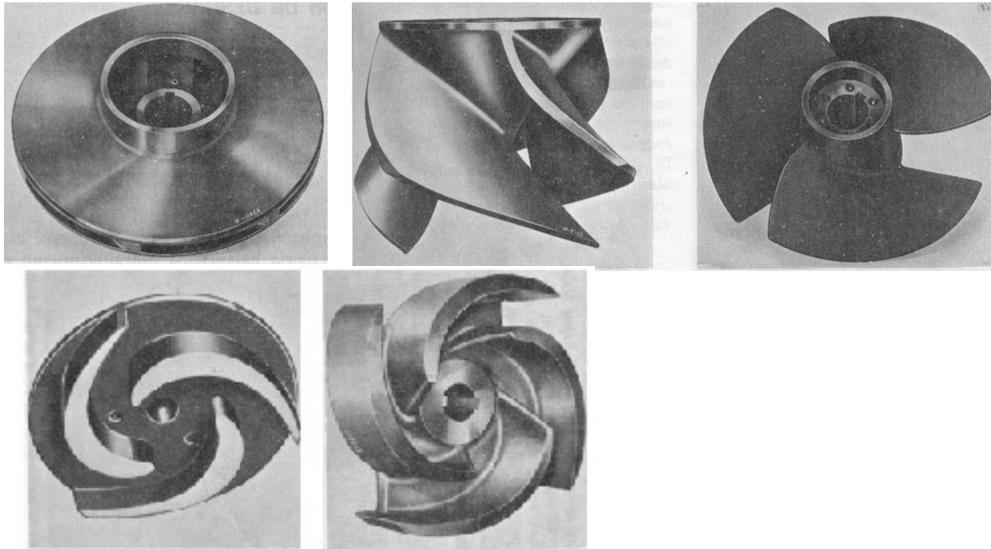
En un impulsor de admisión simple, el líquido entra al ojo de succión por un solo lado (1). Como un impulsor de doble admisión es de hecho, un par de impulsores de admisión simple arreglado uno contra otro en una sola fundición, el líquido entra simultáneamente por ambos lados (2). En los impulsores 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  $ANPA_R$  es menor.

Debajo se adjuntan otros tipos comunes de impulsores.

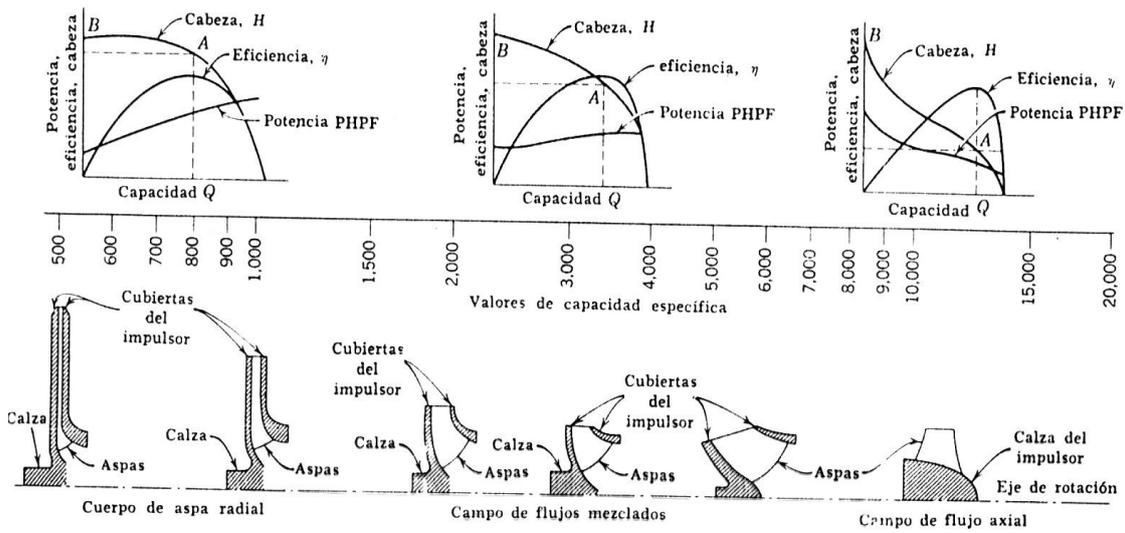


### 3.7 .- Velocidad específica:

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:

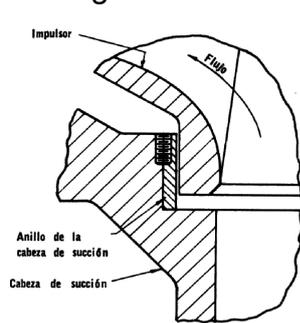
$$N_s = \text{RPM} * Q^{1/2} / H^{3/4}$$

La velocidad específica nos da una idea del diseño hidráulico del impulsor, ya que un número 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.

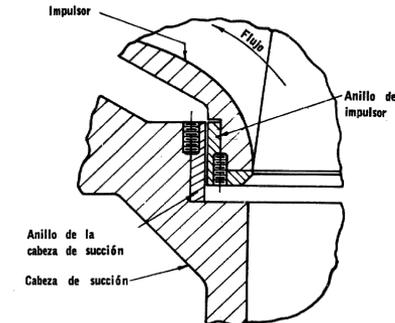


### 3.8.- Anillos de Desgaste:

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:

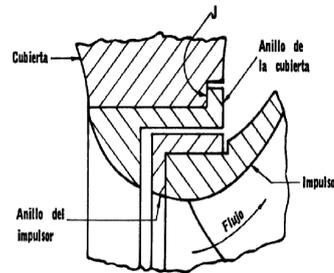
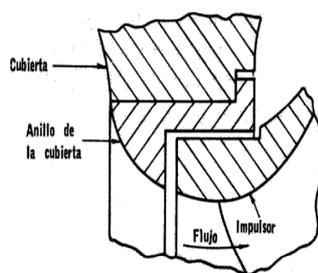


**Anillo simple colocado sobre la cabeza de succión**



**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.

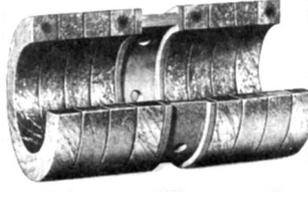
### 4.- Estoperos y Sellos Mecánicos:

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



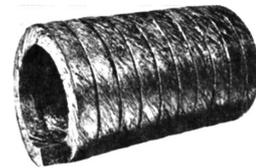
**Empaquetadura de amianto**



**Empaquetadura suave y dura**



**Empaquetadura de anillo de metal**



**Empaquetadura en forma de espiral**

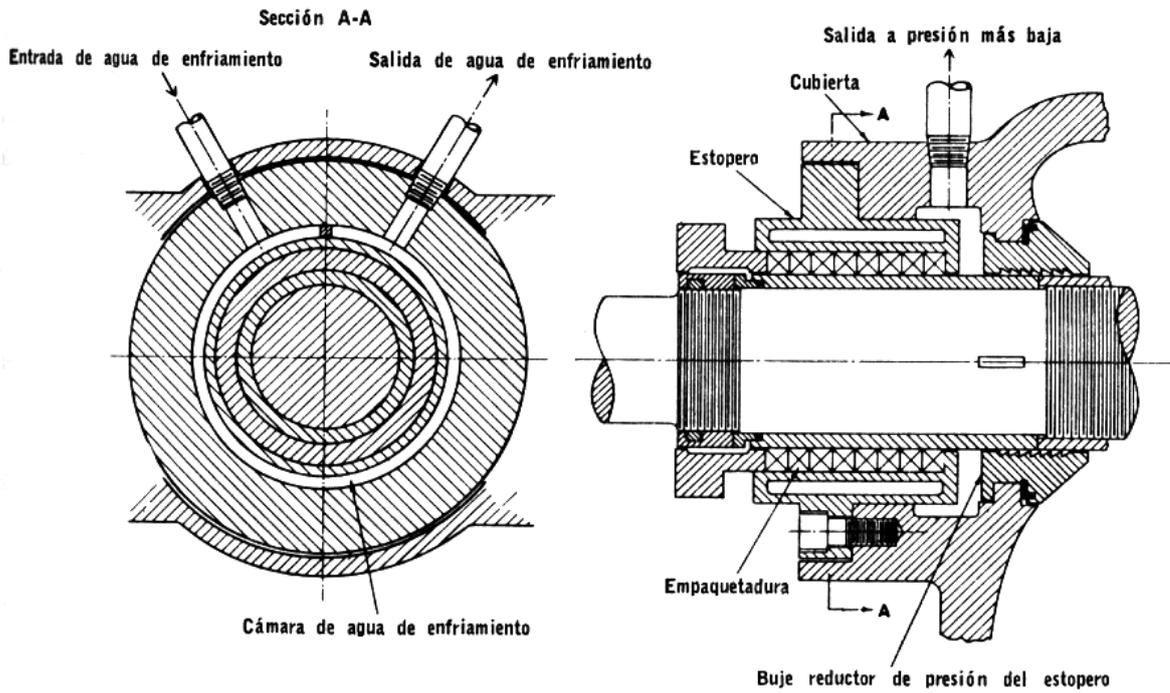
anillos, y son generalmente de asbesto grafitado o metálicas (babbit, aluminio o cobre).

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**

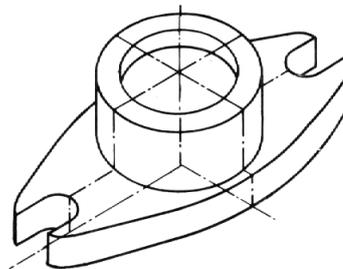


**Estopero enfriado por agua**

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



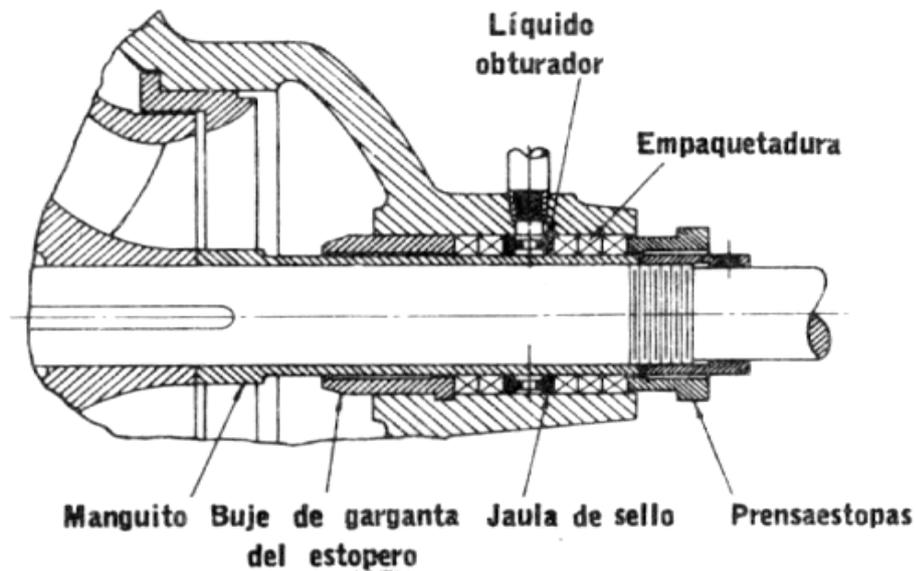
**Prensaestopas dividido**



**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.

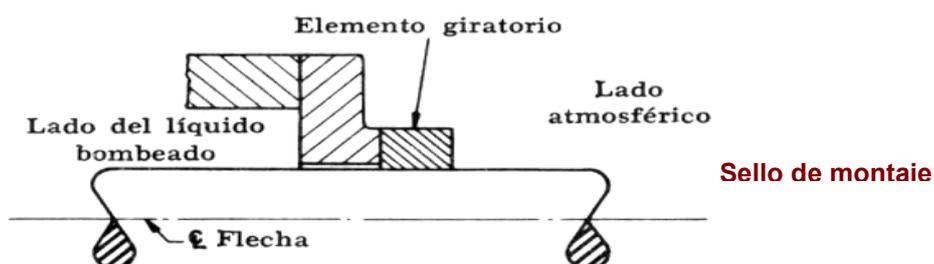
Las altas temperaturas o presiones complican el problema de mantener la empaquetadura de los estoperos. Las bombas en estos servicios más difíciles generalmente están provistas con estoperos enchavetados enfriados con agua (quitando calor al líquido que corre por el estopero y el calor generado por la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



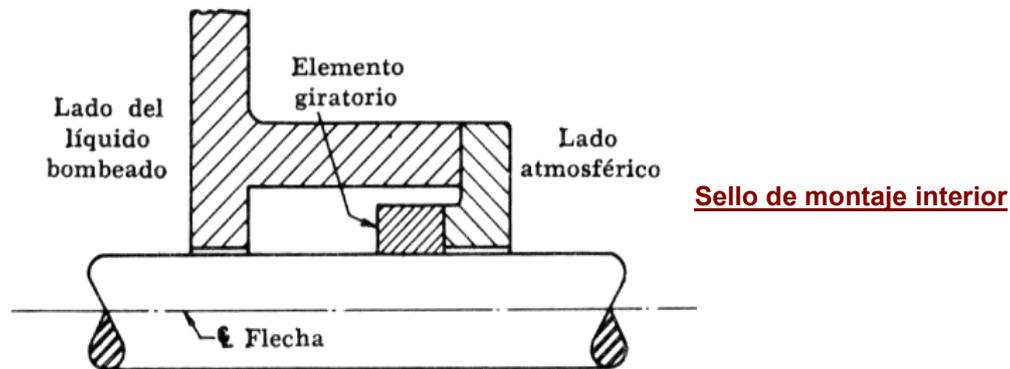
El diseño convencional del estopero y empaquetadura, sin embargo, suelen ser imprácticos para muchas condiciones de servicio. Los sellos mecánicos producen un sello de tipo totalmente diferente con superficies de desgaste distinta a las superficies axiales de la flecha y la empaquetadura. El sello mecánico 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.

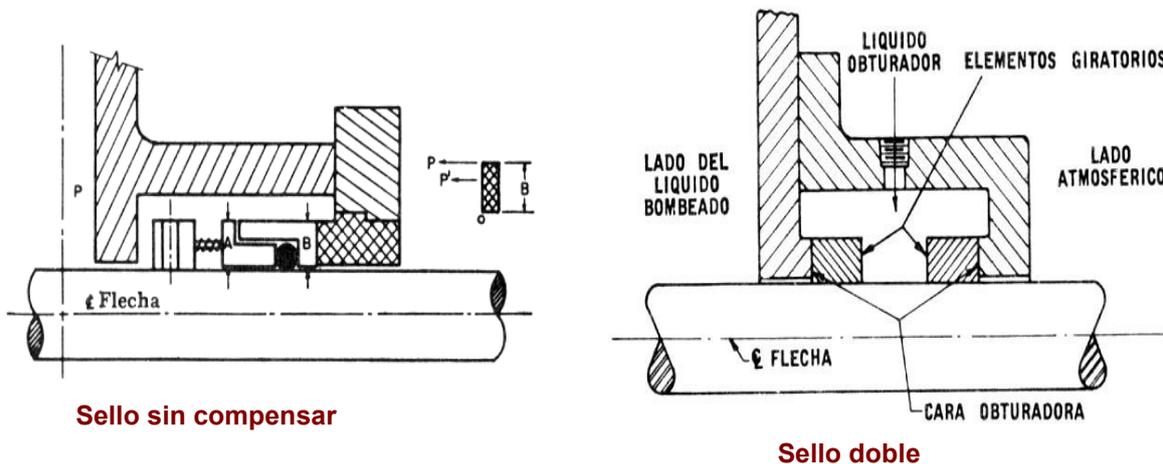
**Sello de montaje interior:** el elemento giratorio está situado dentro de la caja y la presión del líquido bombeado tiende a forzar la cara giratoria contra la estacionaria.



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.

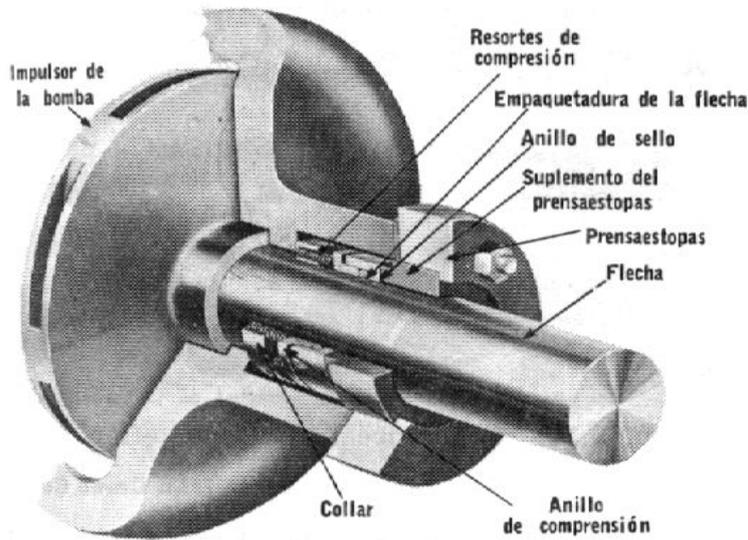


En el sello de montaje interior, toda presión interna actúa para cerrar las caras (si el líquido manejado es un buen lubricante y las presiones no son excesivas, esta carga no es perjudicial). Este diseño se conoce como **sello sin compensar**. Cuando las presiones son muy grandes, es preferible reducir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

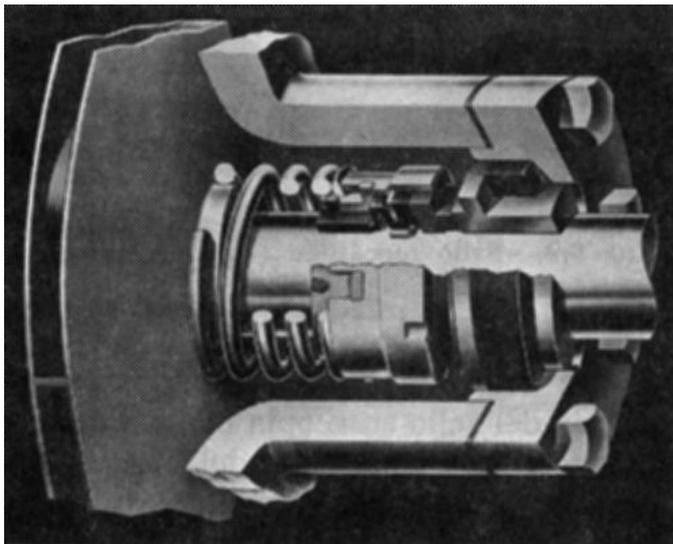


Se pueden montar dos sellos mecánicos dentro de un estopero para formar un conjunto de **sello doble**. Se utiliza para bombas que manejan líquidos tóxicos o

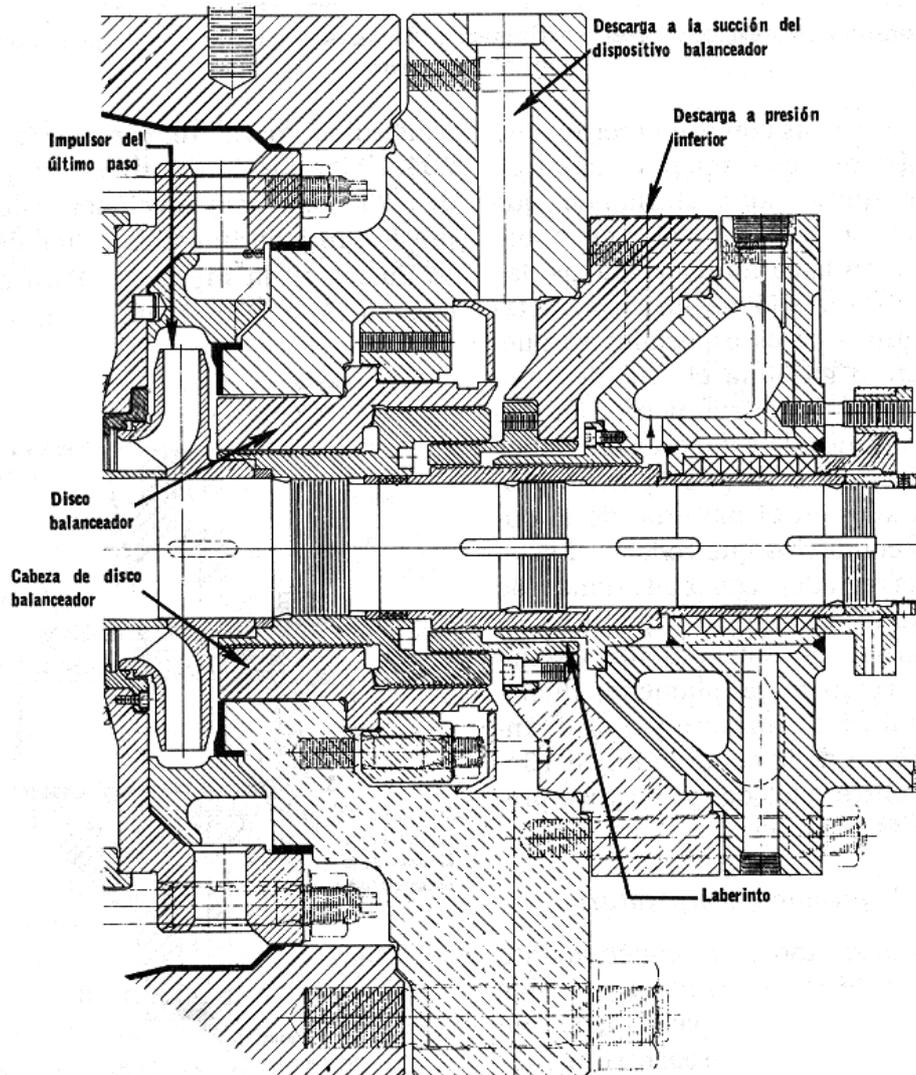
altamente inflamables. Se inyecta entre los dos sellos un líquido a presión algo mayor que la de la bomba, evitando que el líquido bombeado se ponga en contacto con las partes del sello o escape a la atmósfera.



**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 electrofítica
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 fluorocarbono 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.

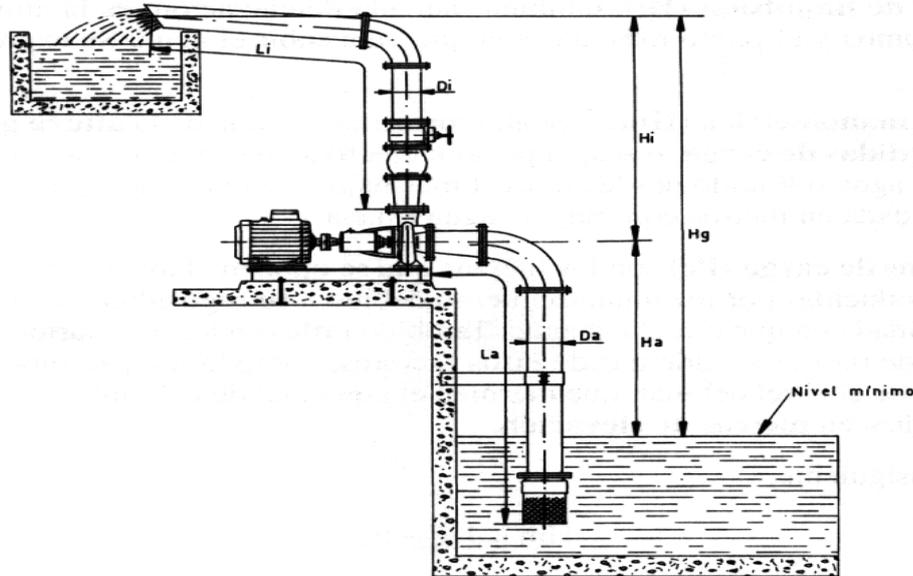
- Frecuentemente se usa bronce para **cubiertas** de bombas si el líquido bombeado es ligeramente corrosivo. El acero fundido y el acero forjado, se usan si la presión de descarga o la temperatura de bombeo (o una combinación de ambos) hacen inapropiado al hierro colado. El acero inoxidable se emplea 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 maquinar, 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:

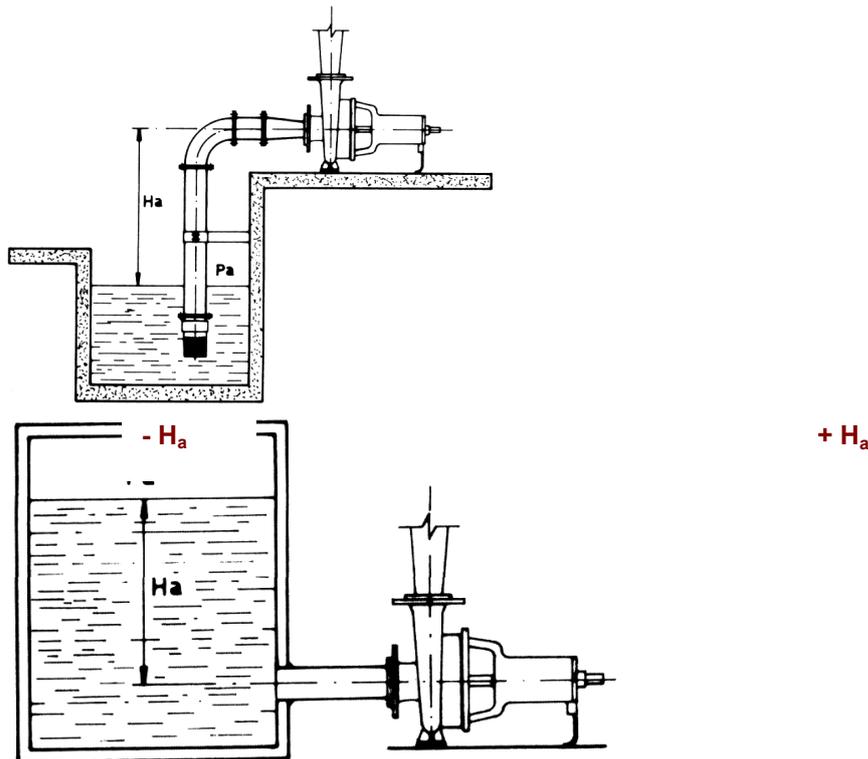
$P_a$  es la presión en el depósito de aspiración (generalmente es la presión atmosférica)

$P_v$  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



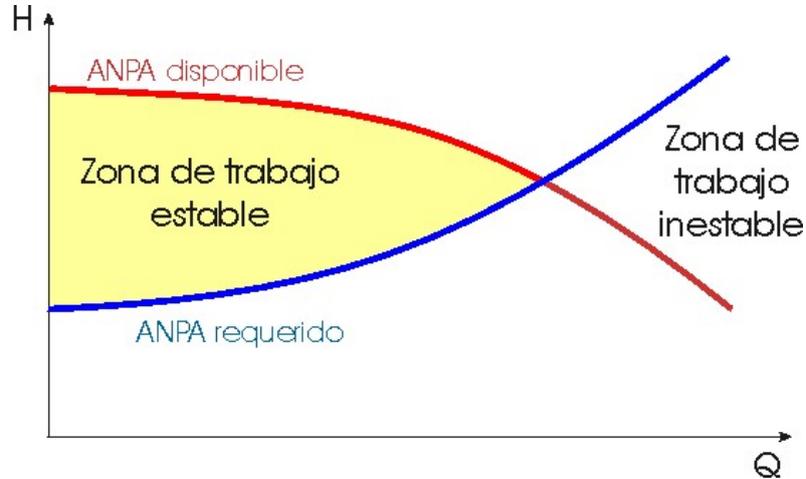
**$ANPA_R$  o  $ANPA$  requerido:** es una característica de la bomba. Es aquella energía necesaria para llenar la parte de aspiración y vencer las pérdidas por rozamiento y el aumento de la velocidad desde la conexión de aspiración de la bomba hasta el punto en que se añade más energía en el rotor. 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:



$$\text{ANPA disponible} \geq \text{ANPA requerido}$$

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

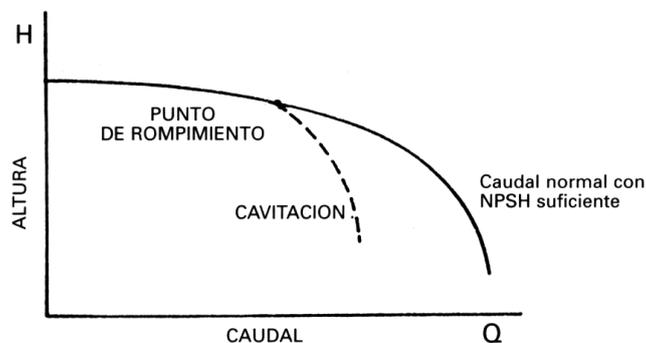
$$\text{ANPA disponible} \geq \text{ANPA requerido} + 0,5 \text{ m}$$

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).

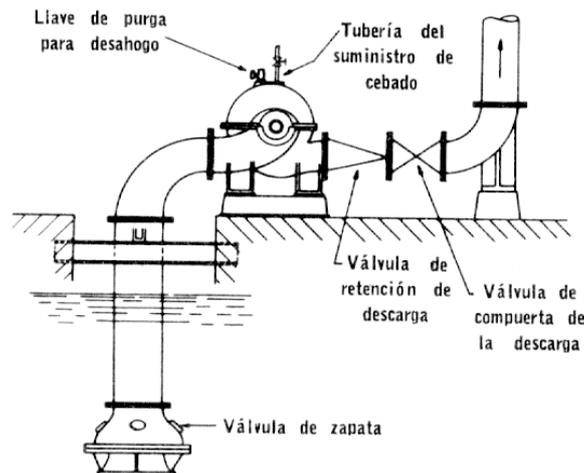
La solución para evitar la cavitación es obvia, hay que aumentar el ANPA disponible, y, por tanto, si no existe forma de modificar el sistema, se pueden cambiar las condiciones adoptando cualquiera de las opciones citadas a continuación:

- 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



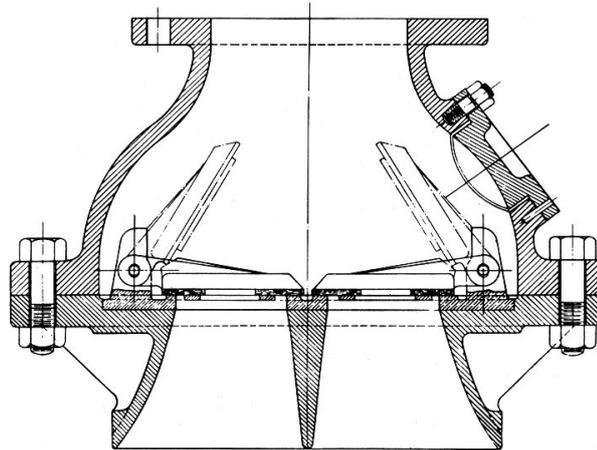
Una bomba centrífuga se ceba cuando los conductos de la bomba se llenan con el líquido que se va a bombear. El líquido reemplaza al aire, gas o vapor en los conductos. La expulsión del aire, gas o vapor puede hacerse manual o automáticamente, dependiendo del tipo de equipo y controles usados. Para alguien familiarizado sólo con bombas de desplazamiento positivo de los tipos recíprocantes 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 atraparará 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)

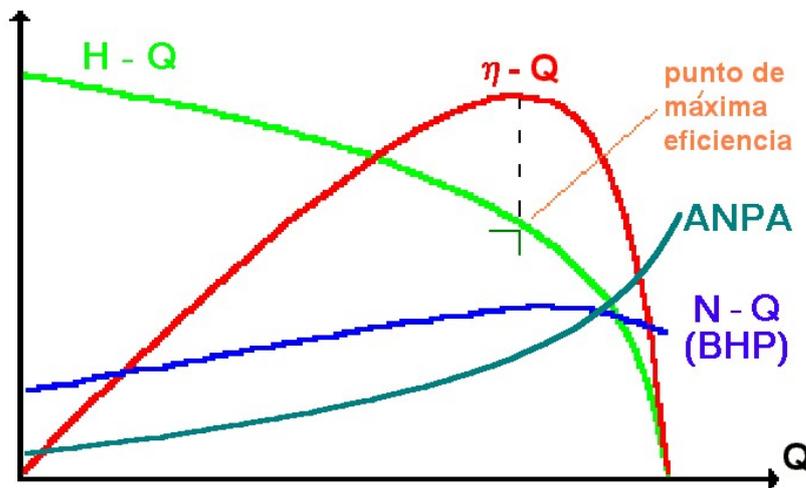
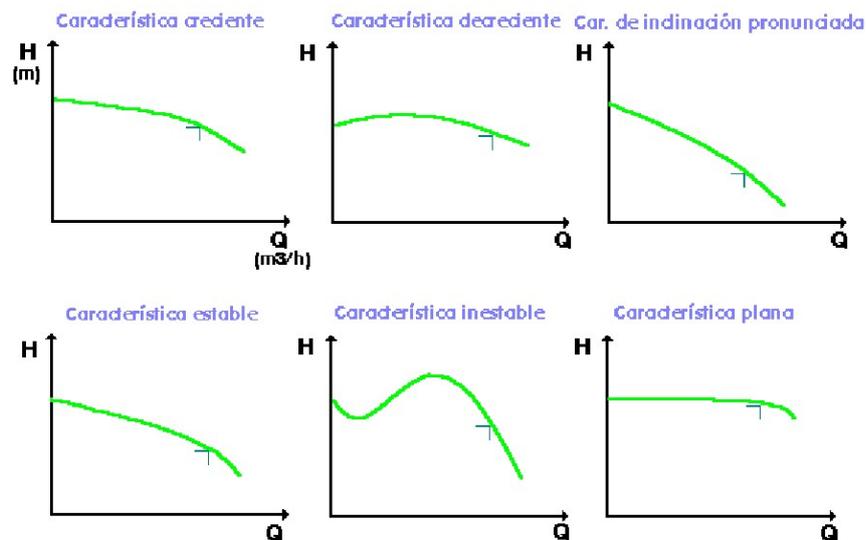


Fig. 1. Curvas características de bombas centrífugas: Curvas de Altura, Eficiencia, NPSH y Potencia al freno.

### 7.1.- Curva Q-H

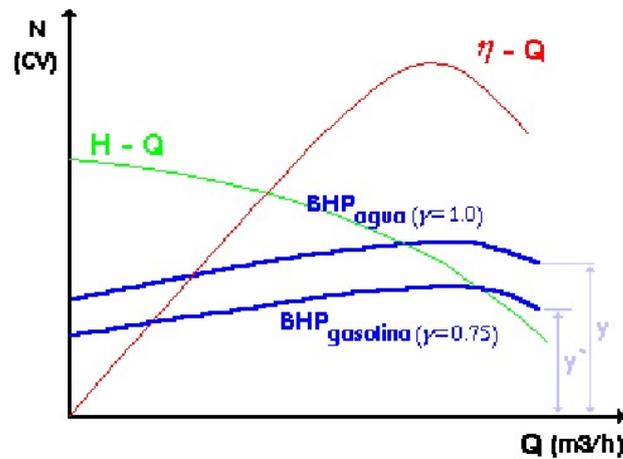
Esta curva muestra la altura que desarrollará la bomba con relación al caudal. Un punto que se debe recordar es que la bomba debe operar dentro de esta curva. Para una velocidad especificada, no puede operar en ningún punto sobre o debajo de la curva, sin algún cambio físico en la bomba.



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:

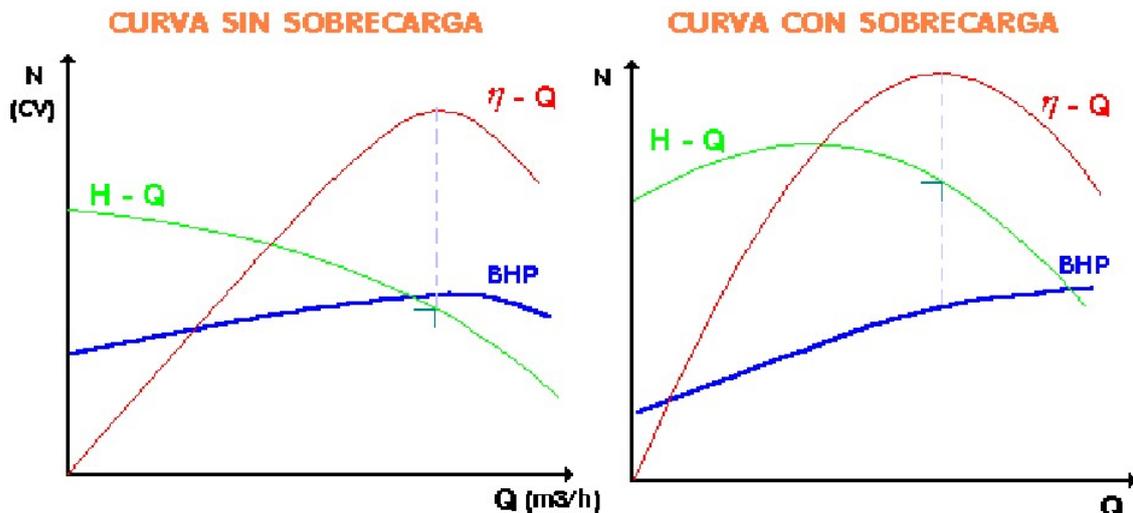
$$\frac{y'}{y} = 0,75$$

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

$N_u = Q.H.\rho / 75$  = 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

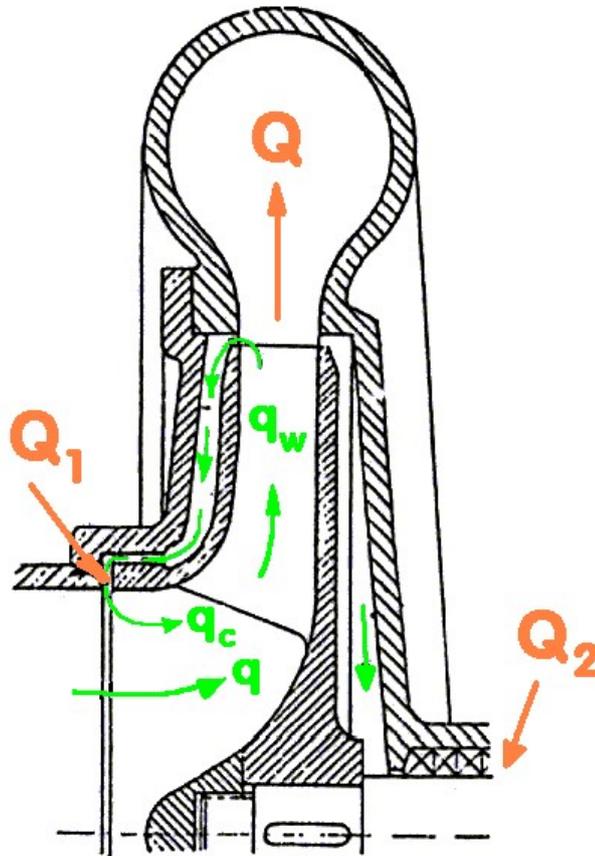
$Q$  = Caudal Efectivo  
 $Q_1$  = Pérdida de Caudal por Recirculación  
 $Q_2$  = Pérdida de Caudal por el prensa estopa

### 7.4.3 .- Rendimiento Total

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

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

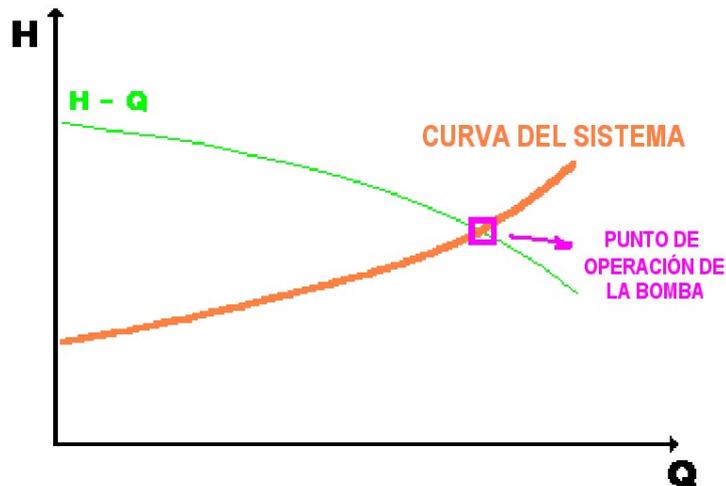
Donde:  $\eta_T$  = Rendimiento Total  
 $\eta_M$  = Rendimiento Mecánico  
 $N_u$  = Potencia Útil  
 $N_a$  = Potencia de Accionamiento



### 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.

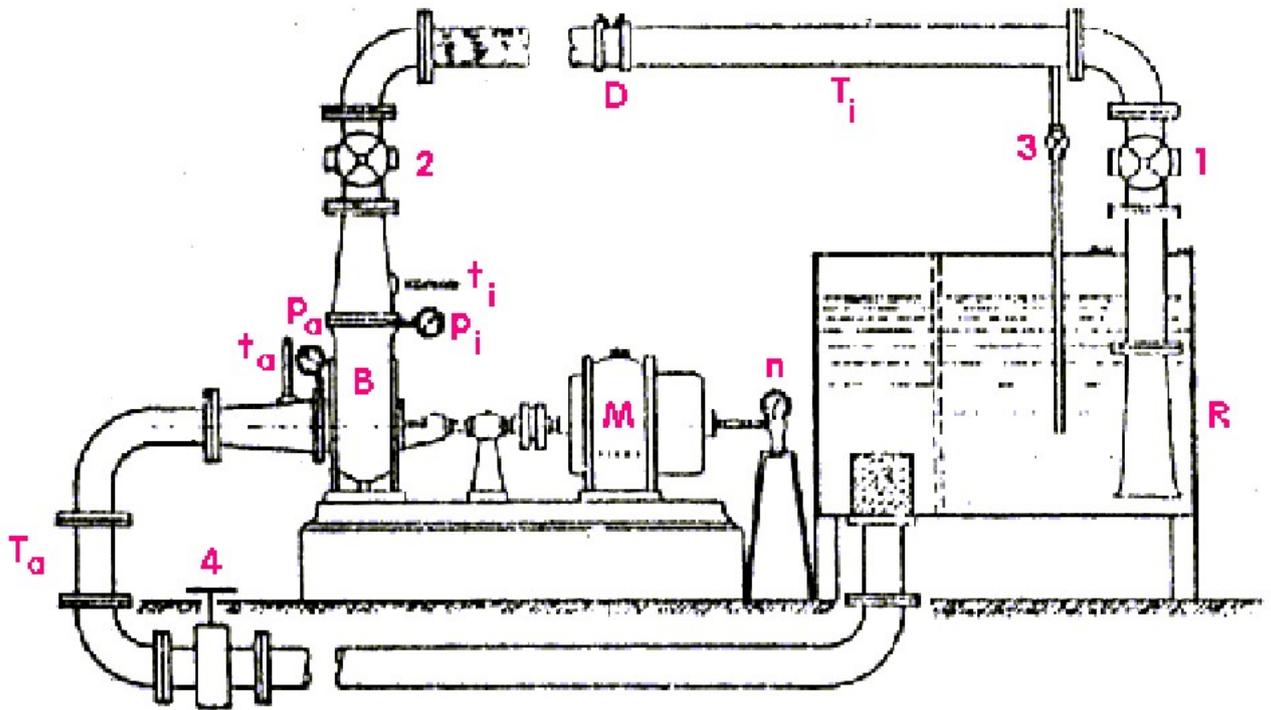
### 7.7 .- Punto de operación de la bomba



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

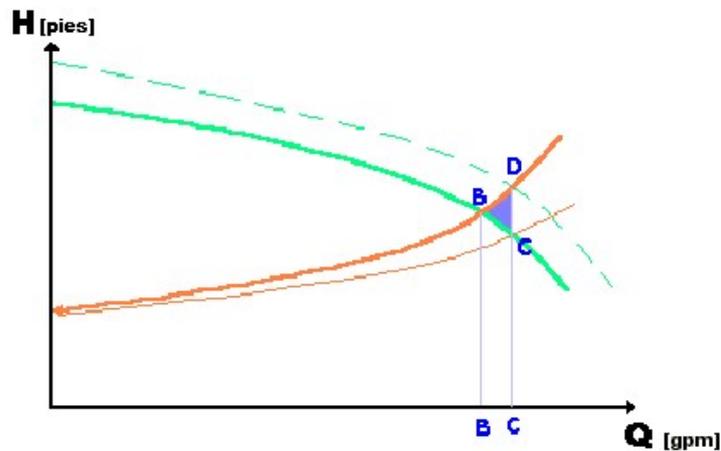
1 y 2 = Válvulas de Estrangulación (para la **regulación amplia** de Q)

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, compara- Fig. 2. Cambios en las curvas H-Q y del sistema 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).

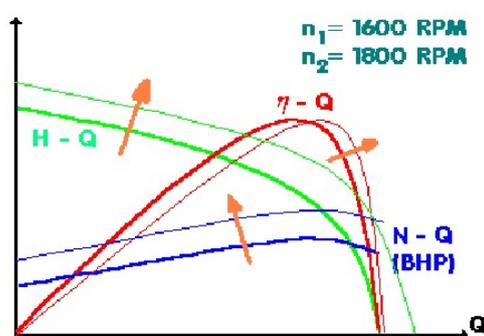
El total de la altura dinámica de la bomba en cualquiera de sus puntos operativos será la diferencia en la lectura de los manómetros instalados en la brida de succión y en la brida de descarga. Para mayor exactitud las lecturas de los manómetros deben ser corregidas al centro de la bomba y la diferencia 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:



→ INDICA AUMENTO DE VELOCIDAD

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

$$Q_2 = Q_1 \times \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \quad H_2 = H_1 \times \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \quad N_2 = N_1 \times \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^3$$

$$\eta_2 \approx \eta_1$$

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.

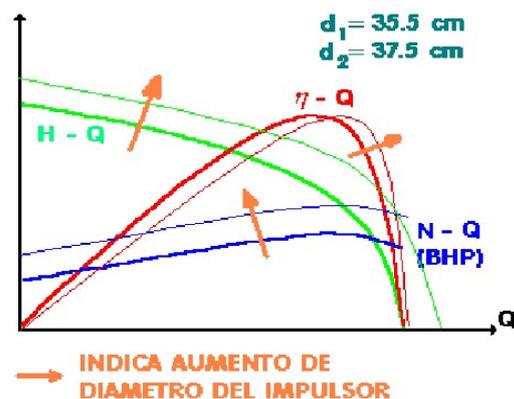
### Efectos del cambio de impulsor

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  $y' = 0,75 y$ .

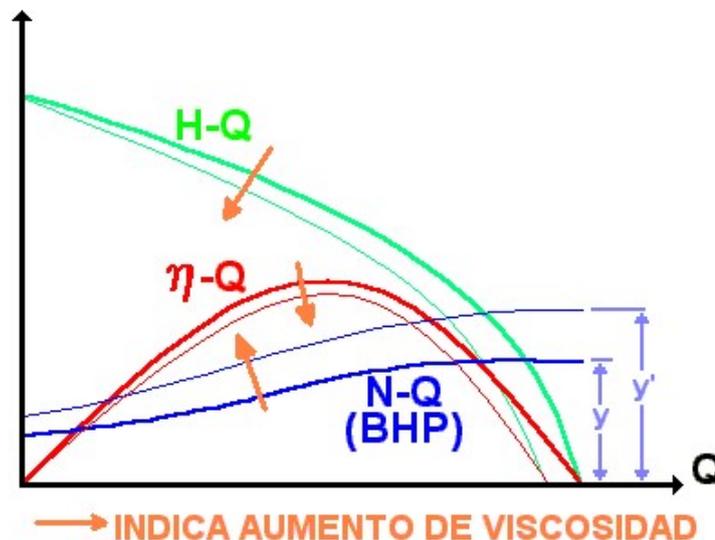


Fig.3. Para líquidos viscosos habrá que modificar las curvas de performance como las mostradas en el gráfico. Las necesidades de potencia pueden tornarse críticas ya que un motor que funciona holgadamente con agua, puede resultar sobrecargado por un líquido más viscoso.

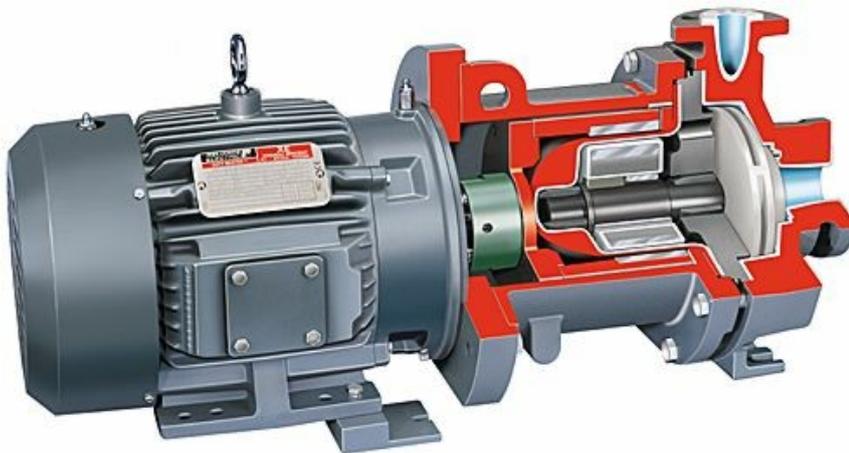
Todas las bombas centrífugas empeoran su funcionamiento con el aumento de la viscosidad, entonces debemos calcular  $Q$ ,  $H$  y  $\eta$  equivalentes en agua, ya que todas las curvas vienen dadas para el agua ( $\rho_{\text{agua}} = 32 \text{ SSU}$ ).

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:

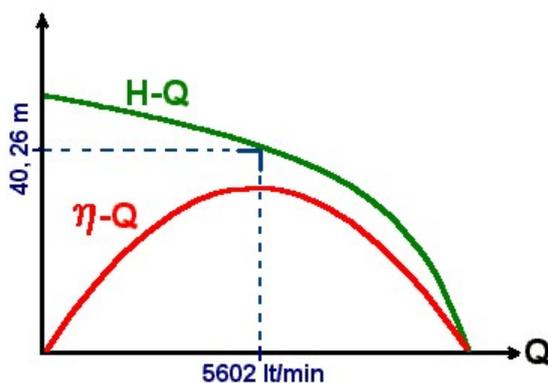
$$\left. \begin{aligned} H_{H_2O} &= \frac{H_\mu}{C_H} \\ Q_{H_2O} &= \frac{Q_\mu}{C_Q} \\ \eta_{H_2O} &= \frac{\eta_\mu}{C_\eta} \end{aligned} \right\} \text{BHP}_\mu = \frac{H_\mu \cdot Q_\mu \cdot \gamma_\mu}{k \cdot \eta_\mu}$$

### 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.

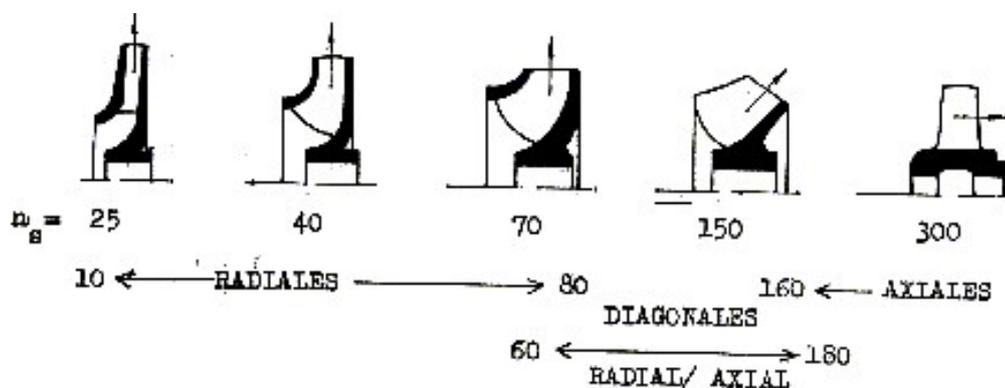
Sir Isaac Newton estableció la teoría de la similitud dinámica, en 1687, introduciendo así el respaldo matemático de las investigaciones con modelos. Éste expresa: “Dos bombas geoméricamente similares tendrán características de funcionamiento similares”.

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:  $c_m = f(n, D)$

$$\left. \begin{array}{l} c_m = f(n, D) \\ b = f(D) \end{array} \right\} \Rightarrow Q = f(n, D^3) \Rightarrow \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1 \cdot D_1^3}{n_2 \cdot D_2^3} \quad (\text{Ecuación 1})$$

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

Donde:  $c_{u2} = f(n, D)$

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

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

Donde:  $Q = f(n, D^3)$

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

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

## Puesta en marcha de una bomba centrífuga

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

- Comprobar todos los purgadores, bridas, líneas, etc., asegurándose de que no se ha olvidado ninguna junta ciega.
- 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.
- Comprobar la lubricación de los cojinetes y demás partes móviles.
- Comprobar los cierres líquidos.
- 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.
- 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.
- 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

- Cerrar la válvula de impulsión; esto reduce la carga del motor y evita el retroceso si la válvula de retención no funcionase.
- Parar el motor o turbina.
- 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.
- Si existen líneas que lo permiten, mantener calientes las bombas de reserva.
- 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

- 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.