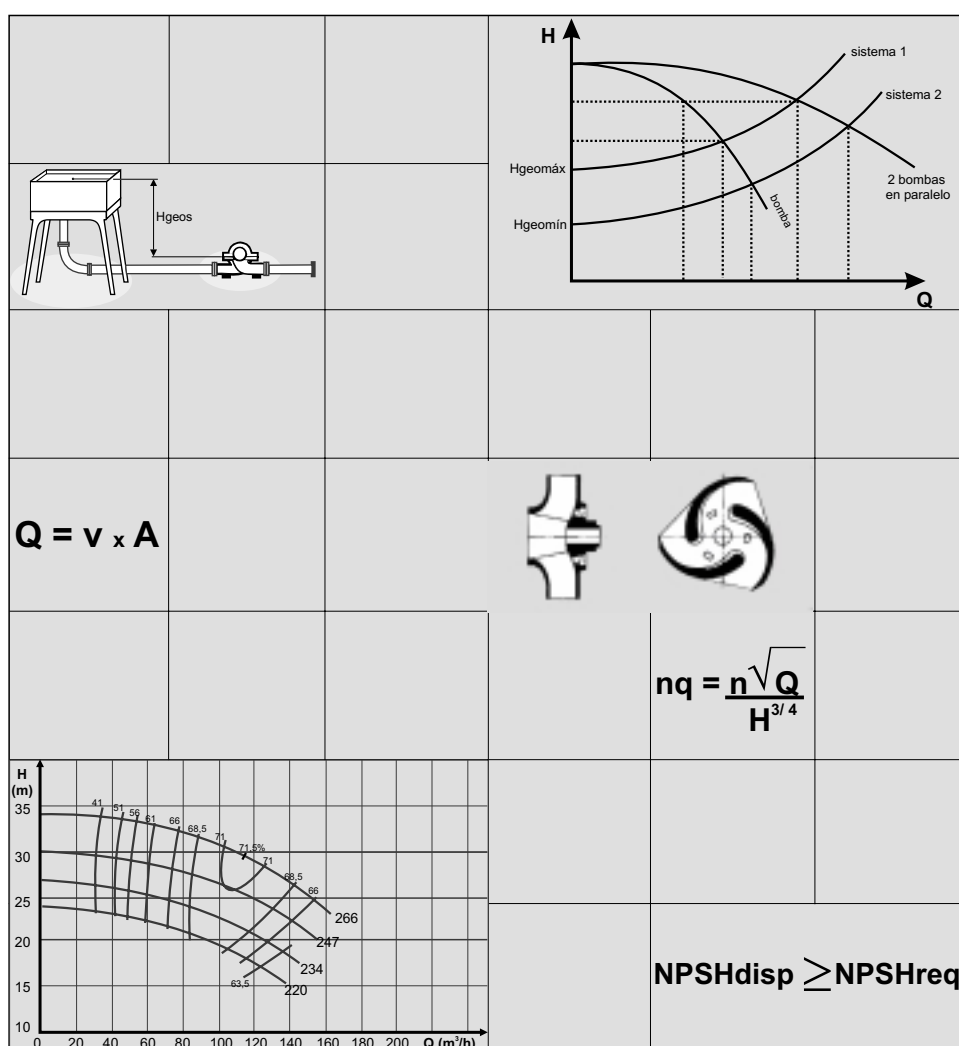


# MANUAL DE ENTRENAMIENTO

## SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE BOMBAS CENTRÍFUGAS



# **MANUAL DE ENTRENAMIENTO**

## **PRESENTACIÓN**

Con el objeto de capacitar tanto a nuestro personal interno, como a nuestros Clientes en general y a nuestra Red Nacional de Distribuidores Autorizados, **KSB Compañía Sudamericana de Bombas S.A.**, ha implementado un curso de entrenamiento técnico orientado a los profesionales que trabajan en el área de bombas centrífugas y sistemas de bombeo.

Con este enfoque **KSB** mantiene un moderno Centro de Entrenamiento de Productos, con instalaciones y equipamientos apropiados, donde son impartidos cursos de capacitación teóricos y prácticos, por especialistas de cada área. Con este objetivo, fue elaborado el presente **Manual de Entrenamiento**, que sirve de base para los cursos de entrenamiento general.

Este trabajo fue desarrollado por un equipo de profesionales de **KSB** con sólida experiencia en este campo, cuyo objetivo es presentar de manera concisa y de forma clara y simple, los conceptos, informaciones y datos esenciales en la diaria tarea que realizan los profesionales que trabajan con bombas centrífugas y sistema de bombeo, entregando una base sólida para el desenvolvimiento y perfeccionamiento en esta área.

El objetivo de este Manual no es profundizar en algunos temas específicos, para los cuales el lector deberá, en caso de ser necesario, consultar literatura técnica especializada.

Para una mayor facilidad en el uso, el Manual ha sido ordenado y dividido convenientemente en módulos, que abordan los principales tópicos relacionados con el tema.

Apreciaremos mucho recibir sus comentarios, observaciones y sugerencias orientadas a mejorar este Manual, las que analizaremos con el fin de incorporarlas en una próxima revisión y edición.

**KSB Compañía Sudamericana de Bombas S.A.**  
Diciembre 2002 (1ª. Edición)



# **MÓDULO 1**

## ***Principios Básicos de Hidráulica***



# ÍNDICE

|            |                                                                                             |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1</b>   | <b><i>Introducción</i></b>                                                                  | 07 |
| <b>1.1</b> | <b><i>Símbolos y Definiciones</i></b>                                                       | 08 |
| <b>1.2</b> | <b><i>Fluido</i></b>                                                                        | 10 |
| 1.2.1      | Fluido Ideal                                                                                | 10 |
| 1.2.2      | Fluido Incompresible                                                                        | 10 |
| 1.2.3      | Líquido Perfecto                                                                            | 10 |
| <b>1.3</b> | <b><i>Peso específico, masa específica, densidad</i></b>                                    | 11 |
| 1.3.1      | Peso específico                                                                             | 11 |
| 1.3.2      | Densidad específica                                                                         | 11 |
| 1.3.3      | Relación entre peso específico y densidad específica                                        | 11 |
| 1.3.4      | Densidad relativa                                                                           | 12 |
| <b>1.4</b> | <b><i>Viscosidad</i></b>                                                                    | 12 |
| 1.4.1      | Ley de Newton                                                                               | 13 |
| 1.4.2      | Viscosidad dinámica o absoluta                                                              | 13 |
| 1.4.3      | Viscosidad cinemática                                                                       | 13 |
| 1.4.4      | Otras escalas de viscosidad                                                                 | 14 |
| <b>1.5</b> | <b><i>Presión</i></b>                                                                       | 17 |
| 1.5.1      | Ley de Pascal                                                                               | 17 |
| 1.5.2      | Teorema de Stevin                                                                           | 17 |
| 1.5.3      | Carga de presión/Altura de columna de líquido                                               | 18 |
| 1.5.4      | Influencia del peso específico, en la relación entre presión y altura de columna de líquido | 18 |
| 1.5.5      | Escalas de presión                                                                          | 19 |
| 1.5.6      | Presión absoluta                                                                            | 19 |
| 1.5.7      | Presión atmosférica                                                                         | 19 |
| 1.5.8      | Presión manométrica                                                                         | 19 |
| 1.5.9      | Relación entre presiones                                                                    | 20 |
| 1.5.10     | Escalas de referencia para medidas de presiones                                             | 20 |
| 1.5.11     | Presión de vapor                                                                            | 20 |
| <b>1.6</b> | <b><i>Tipos de Régimen de Flujos</i></b>                                                    | 22 |
| 1.6.1      | Régimen permanente                                                                          | 22 |
| 1.6.2      | Régimen laminar                                                                             | 22 |
| 1.6.3      | Régimen turbulento                                                                          | 22 |
| 1.6.4      | Experimentos de Reynolds                                                                    | 22 |
| 1.6.5      | Límites del número de Reynolds para tuberías                                                | 23 |
| <b>1.7</b> | <b><i>Caudal y velocidad</i></b>                                                            | 24 |
| 1.7.1      | Caudal volumétrico                                                                          | 24 |
| 1.7.2      | Caudal másico                                                                               | 24 |
| 1.7.3      | Caudal en peso                                                                              | 24 |
| 1.7.4      | Relación entre caudales                                                                     | 25 |
| 1.7.5      | Velocidad                                                                                   | 25 |
| <b>1.8</b> | <b><i>Ecuación de continuidad</i></b>                                                       | 26 |
| <b>1.9</b> | <b><i>Energía</i></b>                                                                       | 27 |
| 1.9.1      | Principio de conservación de la energía                                                     | 27 |
| 1.9.2      | Energía potencial, de altura o geométrica                                                   | 27 |
| 1.9.3      | Energía de presión                                                                          | 27 |
| 1.9.4      | Energía cinética o de velocidad                                                             | 27 |

## ÍNDICE

|             |                                                                                 |           |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.10</b> | <b><i>Teorema de Bernouilli</i></b>                                             | <b>28</b> |
| 1.10.1      | Adaptación del teorema de Bernouilli para líquidos reales                       | 29        |
| <b>1.11</b> | <b><i>Pérdidas de carga en tuberías</i></b>                                     | <b>30</b> |
| 1.11.1      | Introducción                                                                    | 30        |
| 1.11.2      | Tipos de pérdidas de carga                                                      | 30        |
| 1.11.3      | Distribuida                                                                     | 30        |
| 1.11.4      | Localizada                                                                      | 30        |
| 1.11.5      | Total                                                                           | 30        |
| 1.11.6      | Fórmulas para el cálculo de pérdida de carga distribuida                        | 31        |
| 1.11.7      | Fórmula de Flamant                                                              | 31        |
| 1.11.8      | Fórmula de Fair-Whipple-Hsiao                                                   | 31        |
| 1.11.9      | Fórmula de Hazen-Williams                                                       | 32        |
| 1.11.10     | Fórmula de Darcy-Weisback                                                       | 35        |
| 1.11.11     | Determinación del coeficiente de fricción utilizando el diagrama de Moody-Rouse | 36        |
| 1.11.12     | Ejemplo de determinación del coeficiente de fricción por Moody                  | 37        |
| 1.11.13     | Limitaciones en el uso de las fórmulas presentadas                              | 38        |
| 1.11.14     | Fórmulas de pérdida de carga localizada                                         | 38        |
| 1.11.15     | Fórmula general                                                                 | 38        |
| 1.11.16     | Método del largo equivalente                                                    | 43        |
| 1.11.17     | Largos equivalentes para pérdidas localizadas                                   | 44        |
| 1.11.18     | Largos equivalentes para pérdidas localizadas                                   | 45        |
| 1.11.19     | Tablas de lectura directa                                                       | 46        |

## **PRINCIPIOS BÁSICOS DE HIDRÁULICA**

### **1 INTRODUCCIÓN**

En este módulo, abordaremos las definiciones básicas de las propiedades de los fluidos y los conceptos fundamentales de la Mecánica de fluidos.

Estos temas serán abordados en forma objetiva y concisa, sin desarrollos teóricos, buscando facilitar el estudio del comportamiento de los fluidos ya que su comprensión es fundamental para el mejor entendimiento de los siguientes módulos.

## 1.1 - Símbolos y Definiciones

| Definiciones                                    | Unidad              | Símbolo                        |
|-------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------|
| Altura estática                                 | m                   | H <sub>est</sub>               |
| Altura geométrica                               | m                   | H <sub>geom</sub>              |
| Altura geométrica de succión positiva           | m                   | H <sub>geos (+)</sub>          |
| Altura geométrica de succión negativa           | m                   | H <sub>geos (-)</sub>          |
| Altura manométrica diferencial                  | m                   | $\Delta H$                     |
| Altura manométrica total                        | m                   | H                              |
| Altura manométrica en el caudal óptimo          | m                   | H <sub>ópt</sub>               |
| Altura manométrica en el caudal cero (shut-off) | m                   | H <sub>0</sub>                 |
| Altura de succión negativa                      | m                   | H <sub>s (-)</sub>             |
| Altura de succión positiva                      | m                   | H <sub>s (+)</sub>             |
| Área                                            | m <sup>2</sup>      | A                              |
| Coeficiente de fricción                         | -                   | $\lambda$ (lambda)             |
| Coeficiente de pérdida de carga                 | -                   | $\xi$ (Pshi)                   |
| Coeficiente de Thoma                            | -                   | $\sigma$ (sigma)               |
| Aceleración de gravedad                         | m/s <sup>2</sup>    | g                              |
| Densidad Relativa                               | -                   | d                              |
| Diámetro nominal                                | mm                  | DN                             |
| Diámetro de rodete                              | mm                  | D                              |
| Distancia entre centros                         | m                   | Z <sub>sd</sub>                |
| Factor de corrección para la altura manométrica | -                   | f <sub>H</sub>                 |
| Factor de corrección para el rendimiento        | -                   | f <sub><math>\eta</math></sub> |
| Factor de corrección para el caudal             | -                   | f <sub>Q</sub>                 |
| Fuerza                                          | kgf                 | F                              |
| Masa                                            | kg                  | m                              |
| Masa específica                                 | kg/dm <sup>3</sup>  | $\delta$ (Rho)                 |
| Momento de inercia                              | kg/m <sup>2</sup>   | J                              |
| Net Positive Suction Head                       | m                   | NPSH                           |
| NPSH disponible                                 | m                   | NPSH <sub>disp</sub>           |
| NPSH requerido                                  | m                   | NPSH <sub>req</sub>            |
| Número de Reynolds                              | -                   | Re                             |
| Pérdida de carga                                | m                   | H <sub>p</sub>                 |
| Peso                                            | kgf                 | G                              |
| Peso específico                                 | kgf/dm <sup>3</sup> | $\gamma$ (Gamma)               |
| Potencia consumida                              | CV                  | P                              |
| Presión absoluta                                | kgf/cm <sup>2</sup> | P <sub>abs</sub>               |
| Presión atmosférica                             | kgf/cm <sup>2</sup> | P <sub>atm</sub>               |
| Presión en la descarga de la bomba              | kgf/cm <sup>2</sup> | P <sub>d</sub>                 |
| Presión en la succión de la bomba               | kgf/cm <sup>2</sup> | P <sub>s</sub>                 |
| Presión manométrica                             | kgf/cm <sup>2</sup> | P <sub>man</sub>               |
| Presión en el depósito de descarga              | kgf/cm <sup>2</sup> | P <sub>rd</sub>                |
| Presión en el depósito de succión               | kgf/cm <sup>2</sup> | P <sub>rs</sub>                |
| Presión de vapor                                | kgf/cm <sup>2</sup> | P <sub>v</sub>                 |
| Rendimiento                                     | -                   | $\eta$ (eta)                   |

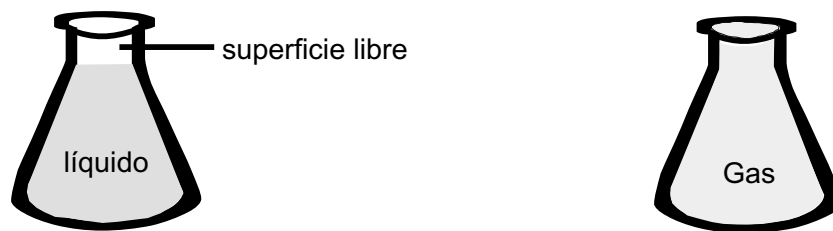
| Definición                                     | Unidad                | Símbolo          |
|------------------------------------------------|-----------------------|------------------|
| Velocidad                                      | rpm                   | n                |
| Temperatura del líquido bombeado               | $^{\circ}\text{C}$    | t                |
| Caudal                                         | $\text{m}^3/\text{h}$ | Q                |
| Caudal en el punto de mejor rendimiento        | $\text{m}^3/\text{h}$ | Q <sub>ópt</sub> |
| Diferencial de caudal                          | $\text{m}^3/\text{h}$ | $\Delta Q$       |
| Caudal máximo                                  | $\text{m}^3/\text{h}$ | Q <sub>máx</sub> |
| Caudal mínimo                                  | $\text{m}^3/\text{h}$ | Q <sub>mín</sub> |
| Velocidad específica                           | rpm                   | n <sub>q</sub>   |
| Velocidad específica de la succión             | rpm                   | S                |
| Velocidad del fluido                           | m/s                   | v                |
| Velocidad del fluido en la descarga            | m/s                   | vd               |
| Velocidad del fluido en la succión             | m/s                   | vs               |
| Velocidad del fluido en el depósito de desc.   | m/s                   | vr <sub>d</sub>  |
| Velocidad del fluido en el depósito de succión | m/s                   | vr <sub>s</sub>  |
| Viscosidad cinemática                          | $\text{m}^2/\text{s}$ | $\mu$ (Mhu)      |
| Viscosidad dinámica                            | Pa.s                  | $\nu$ (Nhu)      |
| Volumen                                        | $\text{m}^3$          | V                |

## 1.2 FLUIDO

Un fluido es cualquier sustancia no sólida, capaz de escurrir y asumir la forma del recipiente que lo contiene.

Los fluidos pueden ser divididos en líquidos y gases.

De una manera práctica, podemos distinguir a los líquidos, de los gases de la siguiente forma: los líquidos, cuando son vertidos en un recipiente, toman la forma de este presentando una superficie libre, mientras que los gases, llenan totalmente el recipiente, sin presentar una superficie libre definida.



En este manual estudiaremos mas profundamente las características de los líquidos.

### 1.2.1 FLUIDO IDEAL

Un fluido ideal es aquel en el que la viscosidad es nula, es decir, entre sus moléculas no se producen fuerzas de roce tangenciales.

### 1.2.2 FLUIDO INCOMPRESIBLE

Es aquel en el que su volumen no varía en función de la presión. En la práctica la mayoría de los líquidos tienen un comportamiento próximo a éste tipo, pudiendo por lo tanto, ser considerados como fluidos incompresibles.

### 1.2.3 LÍQUIDO PERFECTO

En nuestros estudios consideraremos a los líquidos, en general, como perfectos, es decir, un fluido ideal, incompresible, perfectamente móvil, continuo y de propiedades homogéneas.

Otros aspectos e influencias como la viscosidad, por ejemplo, se estudiarán en forma independiente.

## 1.3 PESO ESPECÍFICO , DENSIDAD ESPECÍFICA Y DENSIDAD RELATIVA

### 1.3.1 PESO ESPECÍFICO

El peso específico de una sustancia es el peso de la misma por la unidad de volumen que ella ocupa.

$$\gamma = \frac{G}{V}$$

$\gamma \rightarrow$  ( gamma ) = peso específico  
 $G \rightarrow$  peso de la sustancia  
 $V \rightarrow$  volumen ocupado por la sustancia

Las unidades más utilizadas son :  $\text{kgf/m}^3$ ,  $\text{kgf/dm}^3$ ,  $\text{N/m}^3$  (SI),  $\text{lbf/ft}^3$ .

### 1.3.2 DENSIDAD ESPECÍFICA

La densidad específica de una sustancia es la masa de esa sustancia por la unidad de volumen que ella ocupa.

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

$\rho \rightarrow$  ( rho ) = densidad específica  
 $m \rightarrow$  masa de la sustancia  
 $V \rightarrow$  volumen ocupado por la sustancia

Las unidades más utilizadas son:  $\text{kg/m}^3$  (SI),  $\text{kg/dm}^3$ ,  $\text{lb/ft}^3$ .

### 1.3.3 RELACIÓN ENTRE EL PESO ESPECÍFICO Y LA DENSIDAD ESPECÍFICA

Como el peso de una sustancia es el producto de su masa por la constante de aceleración de gravedad, resulta la siguiente relación entre el peso específico y la densidad específica.

$$\gamma = \rho \cdot g$$

$\gamma \rightarrow$  ( gamma ) = peso específico  
 $\rho \rightarrow$  ( rho ) = densidad específica  
 $g \rightarrow$  aceleración de gravedad =  $9,81 \text{ m/s}^2$

### 1.3.4 DENSIDAD RELATIVA

La densidad relativa de una sustancia es la razón entre el peso específico o densidad específica de esa sustancia y el peso específico o densidad específica de una sustancia padrón de referencia. Para sustancias en estado líquido o sólido, la sustancia de referencia padrón es el agua. Para sustancias en el estado gaseoso la sustancia de referencia es el aire. Consideraremos agua a temperatura de 15 °C (59 °F), al nivel del mar\*, como sustancia de referencia.

\* temperatura utilizada como padrón por el API (Instituto de Petróleo Americano).

$$d = \frac{\gamma_{\text{Fluido}}}{\gamma_{\text{fluido normal}}}$$

$$d = \frac{\rho_{\text{fluido}}}{\rho_{\text{fluido normal}}}$$

Obs.: La densidad relativa es un índice adimensional.

En algunas áreas de la industria, se puede encontrar la densidad relativa expresada en grados, como los grados API (Industria Petroquímica), los grados BAUMÉ (Industria Química) y los grados BRIX (Industria de Azúcar y Alcohol).

Estos grados se pueden convertir en valores de densidad, a través de tablas.

**IMPORTANTE:** En algunas publicaciones, el término densidad relativa se puede encontrar con el nombre de masa específica o gravedad específica.

## 1.4 VISCOSIDAD

Es la propiedad física de un fluido que expresa la resistencia a los esfuerzos de corte internos, es decir, a cualquier fuerza que tienda a producir el escurrimiento entre sus capas.

La viscosidad tiene una influencia importante en el fenómeno de escurrimiento, sobre todo en las pérdidas de presión de los fluidos. La magnitud del efecto, depende principalmente de la temperatura y de la naturaleza del fluido. Así, cuando se indica cualquier valor para la viscosidad de un fluido, siempre se debe informar la temperatura, así como la unidad en que se expresa.

Notar que en los líquidos, la viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura.

### 1.4.1 LEY DE NEWTON

Newton descubrió que en muchos fluidos, la tensión de corte era proporcional al gradiente de velocidad, llegando a la siguiente fórmula:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

$\tau$  → Tensión de corte

$\mu$  → coeficiente de proporcionalidad

$\frac{dv}{dy}$  → gradiente de velocidad

Los fluidos que obedecen esta ley, son los fluidos llamados Newtonianos y los que no obedecen son los llamados No Newtonianos.

La mayoría de los fluidos que son de nuestro interés, como el agua, varios aceites, etc; se comportan cumpliendo esta ley.

### 1.4.2 VISCOSIDAD DINÁMICA O ABSOLUTA ( $\mu$ )

La viscosidad dinámica o absoluta expresa la medida de las fuerzas de roce internas del fluido y es exactamente el coeficiente de proporcionalidad entre la tensión de corte y el gradiente de velocidad de la Ley de Newton.

El símbolo normalmente utilizado para indicarla es la letra " $\mu$ " (mhu).

Las unidades más usadas son el centiPoise (cP), o Poise ( $98,1\text{P} = 1 \text{ kgf.s/m}^2$ ); y el Pascal segundo ( $1 \text{ Pa.s} = 1 \text{ N.s/m}^2$ ) (SI).

### 1.4.3 VISCOSIDAD CINEMÁTICA ( $\nu$ )

Es definida como el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad específica, es decir :

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

$\nu$  → viscosidad cinemática

$\mu$  → viscosidad dinámica

$\rho$  → densidad específica

El símbolo normalmente utilizado para indicarla es la letra "  $\nu$  " (nHu).

Las unidades mas usadas son el centiStoke (cSt), Stoke (1St = 1cm<sup>2</sup>/s); o el m<sup>2</sup>/s (SI)

#### 1.4.4 OTRAS ESCALAS DE VISCOSIDAD

En la práctica, además de las unidades usuales ya vistas, la viscosidad se puede especificar conforme a escalas arbitrarias, de uno de los varios instrumentos usados para la medición de la viscosidad (los viscosímetros).

Algunas de esas escalas, tales como el Saybolt y la Redwood, están basadas en el tiempo, en segundos, requerido para que una cierta cantidad de líquido pase a través de un orificio de un tubo estandarizado y de esa manera representan una medida de la viscosidad cinemática.

Los viscosímetros de "cuerpo rotatorio" expresan la viscosidad absoluta, mientras que el Engler tiene la escala en grados e indica el cociente entre el tiempo de escurrimiento de un volumen de líquido dado y el tiempo de escurrimiento del mismo volumen de agua.

Las escalas mas usadas son:

**Alemania** - Engler (expresada en grados °E);

**Inglaterra** - Redwood 1 y Redwood Admiralty (expresada en segundos);

**Estados Unidos** - Second Saybolt Universal "SSU" y Second Saybolt Furol "SSF" (expresada en segundos);

**Francia** - Barbey (expresada en cm<sup>3</sup>/h).

La viscosidad cinemática  $\nu$  de un fluido, en **cSt**, puede ser obtenida a través de la su viscosidad absoluta  $\mu$  en **cP**, y de su densidad relativa **d**, a la temperatura en cuestión, mediante la relación:

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

$\nu$  → viscosidad cinemática (cSt);

$\mu$  → viscosidad dinámica (cP);

**d** → densidad relativa.

Además de las escalas descritas anteriormente, la Sociedad de Ingenieros Automotrices (TERMINA), de los Estados Unidos, tiene su propia escala para lubricantes utilizados en máquinas y engranajes cuya relación con la viscosidad, expresada en el centiStokes, es como sigue:

| Líquido                    |          | Viscosidad                    |                                 | °F                | °C                   |
|----------------------------|----------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------|----------------------|
|                            |          | SSU                           | Centistokes                     |                   |                      |
| ACEITES<br>PARA MÁQUINAS   | SAE 10   | 165 a 240<br>90 a 120         | 35,4 a 51,9<br>18,2 a 25,3      | 100<br>130        | 37,8<br>54,4         |
|                            | SAE 20   | 240 a 400<br>120 a 185        | 51,9 a 86,6<br>25,3 a 39,9      | 100<br>130        | 37,8<br>54,4         |
|                            | SAE 30   | 400 a 580<br>185 a 255        | 86,6 a 125,5<br>39,9 a 55,1     | 100<br>130        | 37,8<br>54,4         |
|                            | SAE 40   | 580 a 950<br>255 a<br>80      | 125,5 a 205,6<br>55,1 a<br>15,6 | 100<br>130<br>210 | 37,8<br>54,4<br>98,9 |
|                            | SAE 50   | 950 a 1600<br>80 a 105        | 205,6 a 352<br>15,6 a 21,6      | 100<br>210        | 37,8<br>98,9         |
|                            | SAE 60   | 1600 a 2300<br>105 a 125      | 352 a 507<br>15,6 a 21,6        | 100<br>210        | 37,8<br>98,9         |
|                            | SAE 70   | 2300 a 3100<br>125 a 150      | 507 a 682<br>26,2 a 31,8        | 100<br>210        | 37,8<br>98,9         |
|                            | SAE 10 W | 5000 a 10000                  | 1100 a 2200                     | 0                 | -17,8                |
|                            | SAE 20 W | 10000 a 40000                 | 2200 a 8800                     | 0                 | -17,8                |
| ACEITES PARA<br>ENGRANAJES | SAE 80   | 100.000 máx                   | 22.000 máx                      | 0                 | -17,8                |
|                            | SAE 90   | 800 a 1500<br>150 a 200       | 173,2 a 324,7<br>64,5 a 108,2   | 100<br>130        | 37,8<br>54,4         |
|                            | SAE 140  | 950 a 2300<br>300 a 500       | 205,6 a 507<br>25,1 a 42,9      | 130<br>210        | 54,4<br>98,9         |
|                            | SAE 250  | Acima de 2300<br>Acima de 200 | Acima de 507<br>Acima de 42,9   | 130<br>210        | 54,4<br>98,9         |

## 1.5 PRESIÓN

Es la fuerza ejercida por unidad de área.

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

P → presión

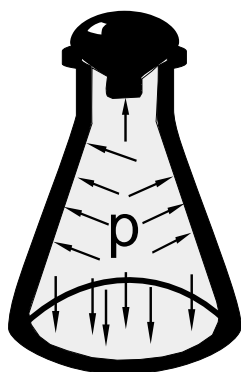
F → fuerza

A → área

Las unidades mas usadas son: kgf/cm<sup>2</sup>; kgf/m<sup>2</sup>; bar (1bar = 1,02 kgf/cm<sup>2</sup>; psi (1 psi = 0,0689 kgf/cm<sup>2</sup>); Pascal (1 Pa (SI) = 1,02 x 10<sup>-5</sup> kgf/cm<sup>2</sup>); atmosfera (1 atm = 1,033 kgf/cm<sup>2</sup>); mmHg (1mmHg = 0,00136 kgf/cm<sup>2</sup>).

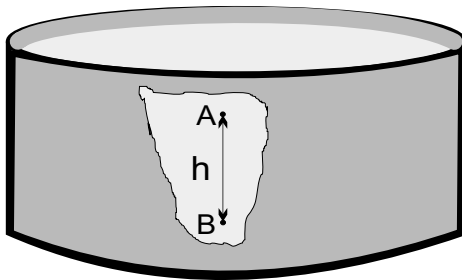
### 1.5.1 LEY DE PASCAL

"La presión aplicada por un fluido contenido en un recipiente cerrado es igual en todas las direcciones del fluido y es perpendicular a las paredes del recipiente"



### 1.5.2 TEOREMA DE STEVIN

"La diferencia de presión entre dos puntos de un fluido en equilibrio es igual al producto del peso específico del fluido por la diferencia de alturas entre los dos puntos", o sea:



$$p_B - p_A = \gamma \cdot h$$

$p_A$  → Presión en el punto A

$p_B$  → presión en el punto B

$h$  → diferencia de cota entre los puntos A y B

$\gamma$  → peso específico del fluido

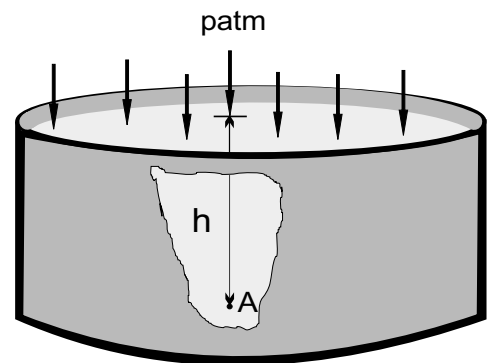
$$p_A = p_{atm} + \gamma \cdot h$$

$p_A$  → presión en el punto A

$p_{atm}$  → presión atmosférica local

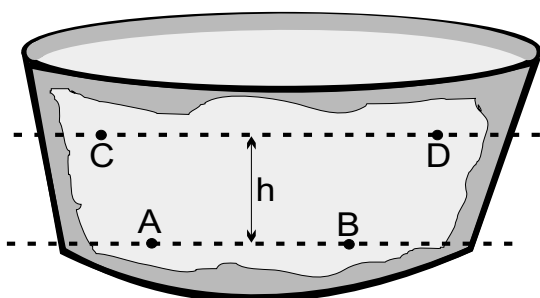
$h$  → diferencia de cota entre los puntos A y el nivel del fluido en el estanque

$\gamma$  → peso específico del fluido



### Importante:

- 1) para determinar la diferencia de presión entre dos puntos, no importa la distancia entre ellos, sino la diferencia de cota entre ellos;
- 2) la presión de dos puntos en un mismo nivel, es decir, en la misma cota, es la misma;
- 3) la presión no depende de la forma, del volumen o del área de la base del depósito.



$$p_A = p_B$$

$$p_C = p_D$$

$$p_A - p_C = p_B - p_D = \gamma \cdot h$$

### 1.5.3 CARGA DE PRESIÓN / ALTURA DE COLUMNA DE LÍQUIDO

$$h = \frac{p}{\gamma} \cdot 10$$

$h \rightarrow$  carga de presión o altura de columna de líquido (m);

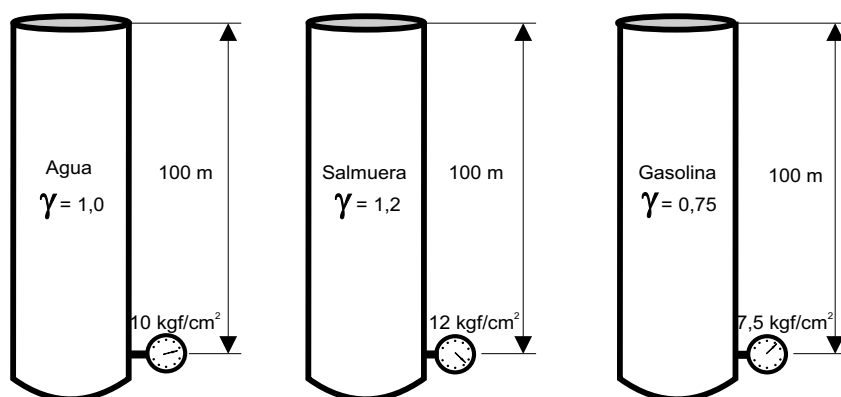
$p \rightarrow$  presión ( kgf/cm<sup>2</sup> )

$\gamma \rightarrow$  peso específico( kgf/dm<sup>3</sup> )

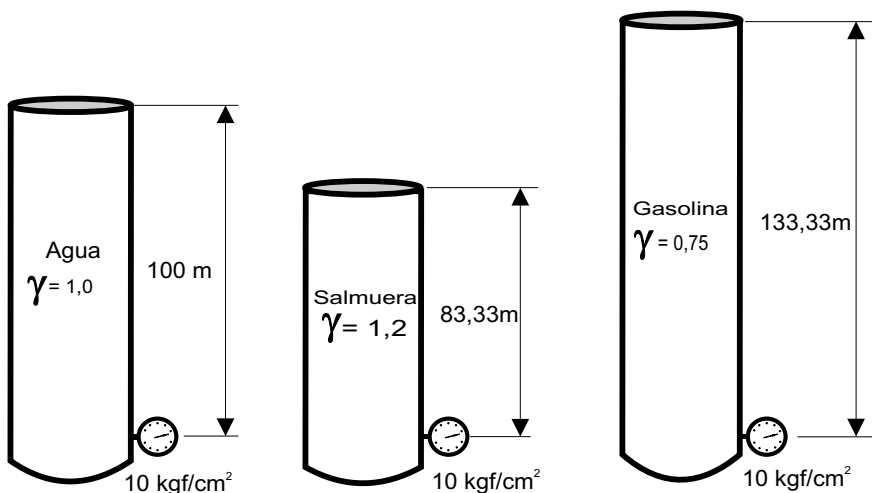
**IMPORTANTE:** Se multiplica la expresión por 10, para obtener la carga de presión o altura de columna líquida en los metros.

### 1.5.4 INFLUENCIA DEL PESO ESPECÍFICO EN LA RELACIÓN ENTRE LA PRESIÓN Y ALTURA DE COLUMNA DE LÍQUIDO:

a) para una misma altura de columna líquido, líquidos de pesos específicos diferentes tienen presiones diferentes.



b) para una misma presión, actuando en líquidos con pesos específicos diferentes, las columnas de líquido son diferentes.



### 1.5.5 ESCALAS DE PRESIÓN

#### 1.5.6 PRESIÓN ABSOLUTA ( $P_{abs}$ )

Es la presión medida en relación al vacío total o cero absoluto. Todos los valores que expresan presión absoluta son positivos.

#### 1.5.7 PRESIÓN ATMOSFÉRICA ( $P_{atm}$ )

Es la presión ejercida por el peso de la atmósfera.

La presión atmosférica es normalmente medida por un instrumento llamado barómetro, que es el origen de la llamada presión barométrica.

La presión atmosférica varía con la altura y depende de las condiciones meteorológicas, siendo que al nivel del mar, en condiciones estandarizadas, la presión atmosférica tiene un valor de

$$P_{atm} = 1,033 \text{ kgf/cm}^2 = 760 \text{ mmHg} = 1,033 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 2,1116 \times 10^3 \text{ lb/pie}^2 = 29,92 \text{ pulgadas de Hg.}$$

Para la simplificación de algunos problemas, se ha establecido la **Atmósfera Técnica**, cuya presión corresponde a 10 m de columna de líquido, o corresponde a **1 kgf/cm<sup>2</sup>**.

#### 1.5.8 PRESIÓN MANOMÉTRICA ( $P_{man}$ )

Es la presión medida, tomándose como referencia a la presión atmosférica.

Esta presión es normalmente medida a través de un instrumento llamado manómetro, lo que da origen a la presión manométrica, siendo también llamada como presión efectiva o presión relativa.

Cuando la presión es menor que la atmosférica, tenemos una presión manométrica negativa, también llamada como vacío (denominación incorrecta) o depresión.

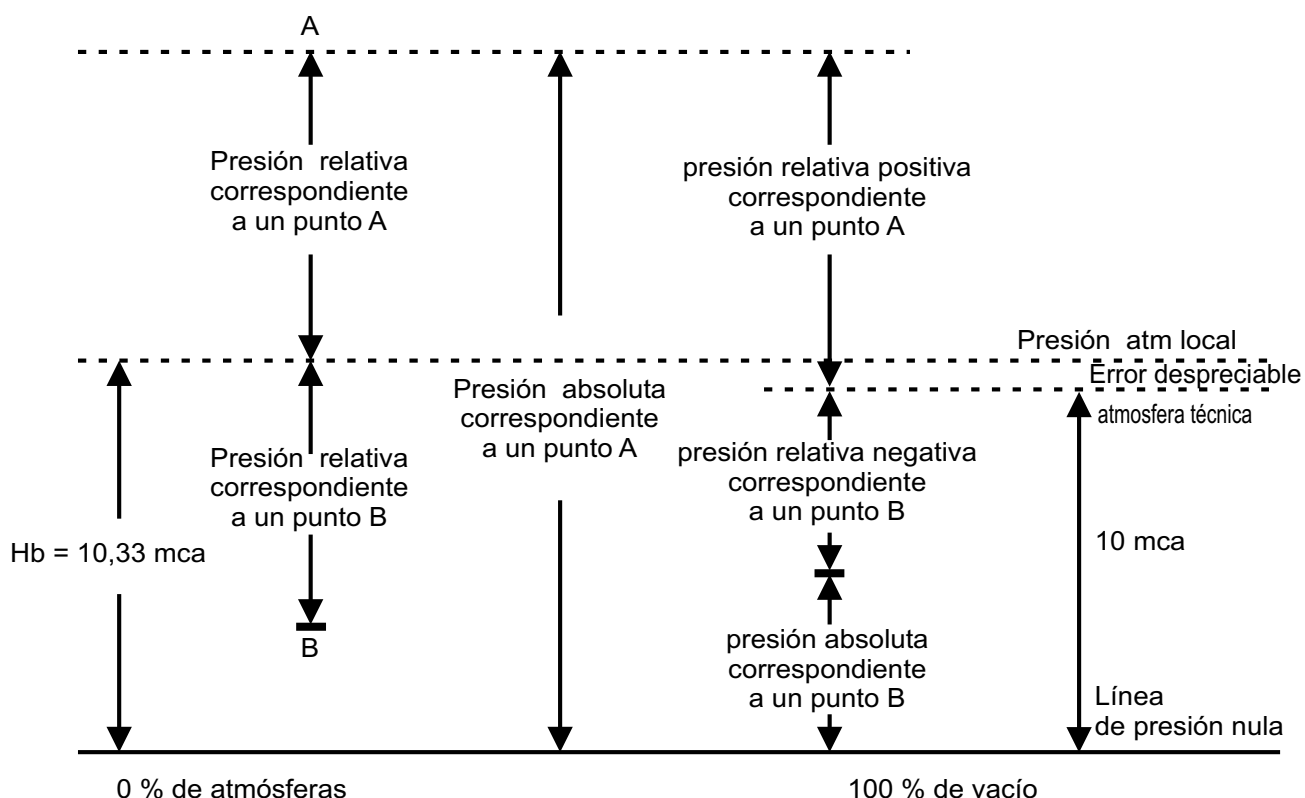
El manómetro, registra valores de presión manométrica positiva; el vacuómetro registra valores de presión manométrica negativa y el manovacúmetro registra valores de presión manométrica positiva y negativa. Estos instrumentos, siempre registran cero cuando están abiertos a la atmósfera, así, tienen como referencia (cero de la escala) la presión atmosférica del lugar dónde se está realizando la medición, sea cual sea.

## 1.5.9 RELACIÓN ENTRE PRESIONES

De acuerdo a las definiciones presentadas, resulta la siguiente relación:

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{man}$$

## 1.5.10 ESCALAS DE REFERENCIA PARA MEDIDAS DE PRESIÓN

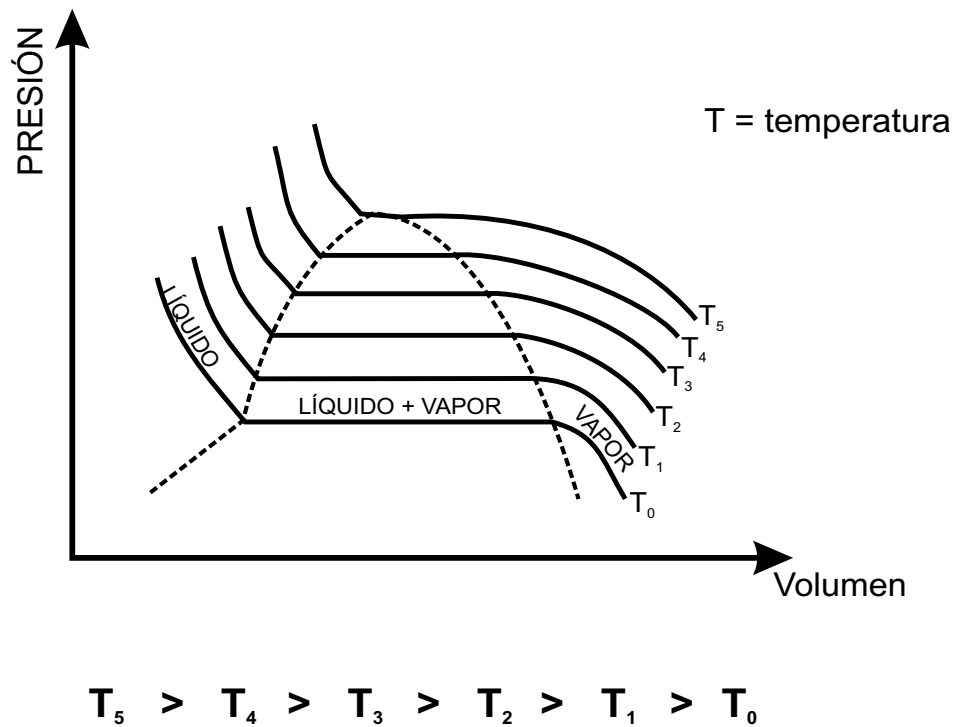


## 1.5.11 PRESIÓN DE VAPOR

La presión de vapor de un fluido a una cierta temperatura es aquella en la qué coexisten las fases líquida y vapor.

A esa misma temperatura, cuando tenemos una presión mayor que la presión de vapor, habrá sólo fase líquida y cuando tenemos una presión menor que la presión de vapor, habrá sólo fase vapor.

El gráfico siguiente, llamado isotérmico, ilustra el fenómeno antes descrito:



Notar que a medida que aumenta la temperatura, la presión de vapor aumenta, así en caso que la temperatura se eleve hasta un punto en que la presión de vapor iguale, por ejemplo, a la presión atmosférica, el líquido se evaporizará, dando origen al fenómeno de la ebullición. La presión de vapor tiene una importancia fundamental en el estudio de las bombas, principalmente en los cálculos de NPSH, como veremos más adelante.

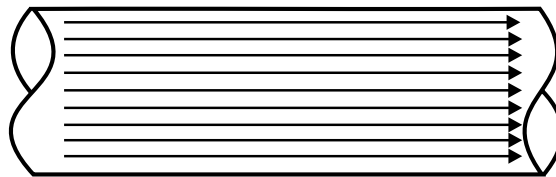
## **1.6 TIPOS DE RÉGIMEN DE FLUJOS**

### **1.6.1 RÉGIMEN PERMANENTE**

Se dice que un flujo está en el régimen permanente, cuando las condiciones del fluido, como la temperatura, el peso específico, la velocidad, la presión, etc., no varían respecto al tiempo.

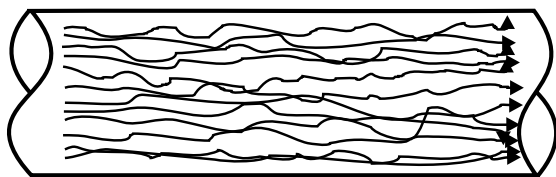
### **1.6.2 RÉGIMEN LAMINAR**

Es aquel en el que las líneas de corriente son paralelas entre si y las velocidades en cada punto son constante en módulo y dirección.



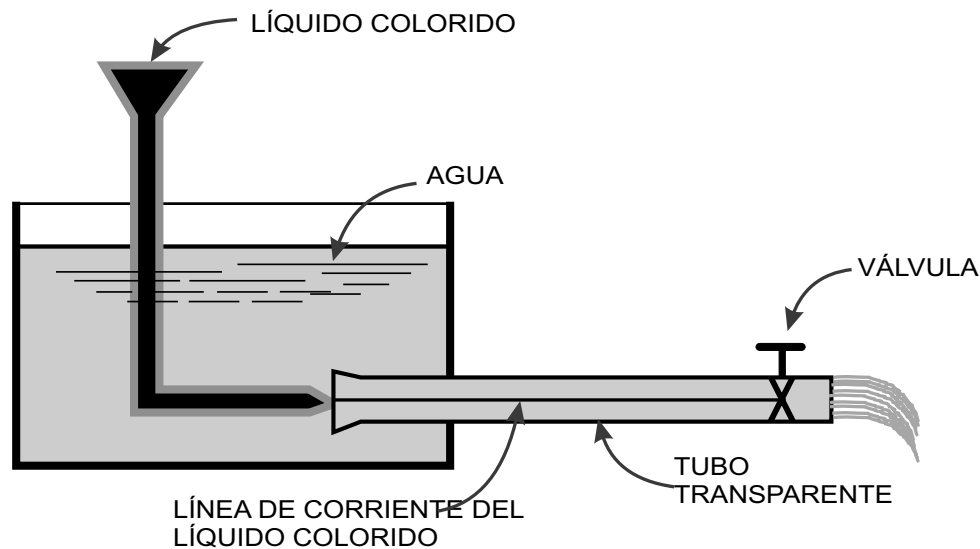
### **1.6.3 RÉGIMEN TURBULENTO**

Es aquel en el que las partículas presentan una variación de movimiento, con diferentes velocidades, en módulo y dirección, entre un punto y otro así como para este mismo punto de un momento a otro.



### **1.6.4 EXPERIMENTOS DE REYNOLDS**

Osborne Reynolds, en 1833, realizó una serie de experimentos con el fin de poder observar los tipos de flujos. Dejando escurrir agua con colorante por un tubo transparente, pudo observar las líneas de corriente de ese líquido. El movimiento del agua representaba un régimen laminar. Luego aumentó el flujo de agua, abriendo la válvula de paso, notando que las líneas de corriente se comenzaban a alterar pudiendo llegar a difundirse en la masa de líquido, en ese caso el flujo estaba en régimen turbulento.



Estos regímenes fueron identificados mediante un número adimensional.

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

Re → número de Reynolds

v → velocidad del flujo del líquido

D → diámetro interno de la tubería

ν → viscosidad cinemática del fluido

### 1.6.5 LÍMITES DEL NÚMERO DE REYNOLDS PARA TUBERÍAS

|                       |                   |
|-----------------------|-------------------|
| $Re \leq 2000$        | Flujo laminar     |
| $2000 < Re \leq 4000$ | Flujo transitorio |
| $Re > 4000$           | Flujo turbulento  |

Notar que el número de Reynolds es un número adimensional, independiente del sistema de unidades adoptado. Notar que las unidades utilizadas deben ser coherentes entre sí.

En general y en forma práctica, el flujo se presenta en régimen turbulento, con excepción a los flujos con velocidades muy bajas o fluidos de viscosidad alta.

## 1.7 CAUDAL Y VELOCIDAD

### 1.7.1 CAUDAL VOLUMÉTRICO

El caudal volumétrico está definido como el volumen de fluido que pasa por una determinada sección por unidad de tiempo.

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

$Q \rightarrow$  caudal volumétrico

$V \rightarrow$  volumen

$t \rightarrow$  tiempo

Las unidades más utilizadas son: m<sup>3</sup>/h; l/s; m<sup>3</sup>/s; GPM (galones por minuto).

### 1.7.2 CAUDAL MÁSIKO

El caudal másico es la masa de fluido que pasa por una determinada sección, por unidad de tiempo.

$$Q_m = \frac{m}{t}$$

$Q_m \rightarrow$  caudal másico

$m \rightarrow$  masa

$t \rightarrow$  tiempo

Las unidades más utilizadas son: kg/h; kg/s; t/h; lb/h.

### 1.7.3 CAUDAL EN PESO

El caudal en peso es el peso de un fluido que pasa por determinada sección, por unidad de tiempo.

$$Q_p = \frac{G}{t}$$

$Q_p \rightarrow$  caudal en peso

$G \rightarrow$  peso

$t \rightarrow$  tiempo

Las unidades más utilizadas son: kgf/h; kgf/s; tf/h; lbf/h.

#### 1.7.4 RELACIÓN ENTRE CAUDALES

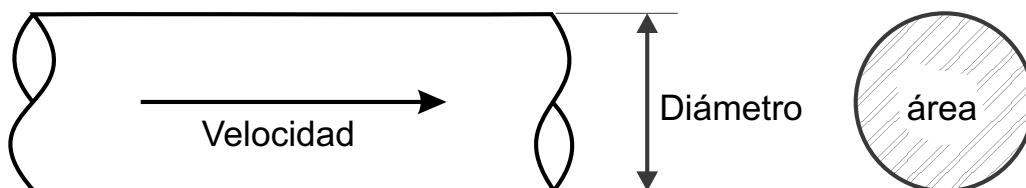
Como existe una relación entre volumen, masa y peso, podemos decir:

$$Q = \frac{Q_m}{\rho} = \frac{Q_p}{\gamma}$$

En nuestros estudios, utilizaremos principalmente el caudal volumétrico, al que designaremos simplemente como caudal (Q).

#### 1.7.5 VELOCIDAD

Existe una importante relación entre caudal, velocidad y el área de la sección transversal de una tubería:



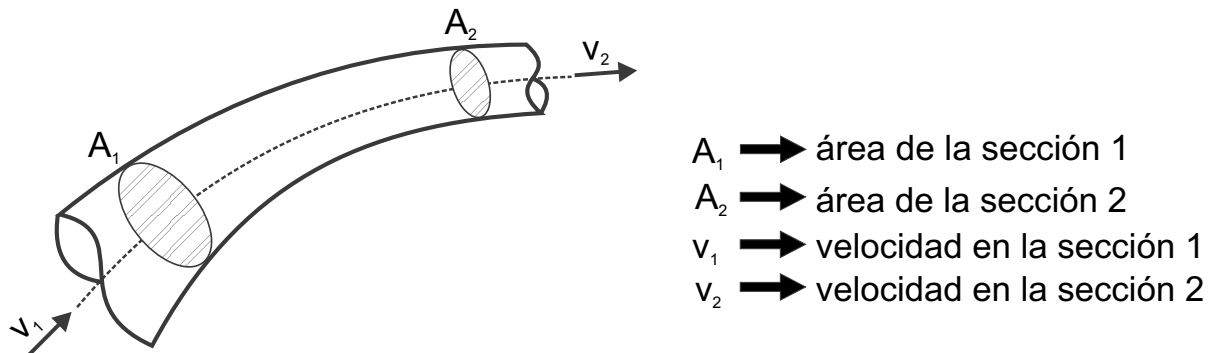
$$Q = v \cdot A \rightarrow v = \frac{Q}{A}$$

- Q → caudal volumétrico
- v → velocidad del flujo
- A → área de la tubería
- D → diámetro interno de la tubería
- R → radio interno de la tubería
- $\pi$  → pi = 3,14...

$$\text{área de la tubería} \rightarrow A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \pi R^2$$

## 1.8 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

Consideremos el siguiente tramo de tubería:



Si tenemos un flujo en régimen permanente a través del conducto indicado, la masa de flujo que entra en la sección 1 es igual a la masa que sale en la sección 2, es decir:

$$Qm_1 = Qm_2$$

Como  $Qm = Q \cdot \rho$ , si tenemos un fluido incompresible, el caudal volumétrico que entra en la sección 1 también será igual al caudal que sale en la sección 2, es decir:

$$Q_1 = Q_2$$

Con la relación entre caudal y velocidad,  $Q = v \cdot A$ , podemos escribir:

$$Q_1 = v_1 \cdot A_1 = Q_2 = v_2 \cdot A_2$$

Esa ecuación es válida para cualquier sección de escurrimiento, resultando así una expresión general que es la **Ecuación de Continuidad** para fluidos incompresibles.

$$Q = v \cdot A = \text{constante}$$

De la ecuación anterior se puede observar que para un determinado caudal fluyendo a través de un conducto, una reducción del área implica un aumento de velocidad y viceversa.

## 1.9 ENERGÍA

### 1.9.1 PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

La energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma, en otros términos la energía total es constante.

Veremos que la energía se puede presentar de diversas formas, de las cuales destacaremos las de mayor interés para nuestros estudios.

### 1.9.2 ENERGÍA POTENCIAL, DE ALTURA O GEOMÉTRICA ( $H_{geo}$ )

La energía potencial de cualquier punto de un fluido por unidad de peso, está definida como la cota de este punto en relación a un cierto plano de referencia.

### 1.9.3 ENERGÍA DE PRESIÓN ( $H_{pr}$ )

La energía de presión en un punto de un cierto fluido, por unidad de peso está definida como:

$$H_{pr} = \frac{p}{\gamma}$$

$H_{pr}$  → energía de presión

$p$  → presión en el punto

$\gamma$  → peso específico del fluido

### 1.9.4 ENERGÍA CINÉTICA O DE VELOCIDAD ( $H_v$ )

La energía cinética o de velocidad de un punto en un determinado fluido por unidad de peso está definida como:

$$H_v = \frac{v^2}{2g}$$

$H_v$  → energía de velocidad

$v$  → velocidad del flujo del fluido

$g$  → aceleración de gravedad

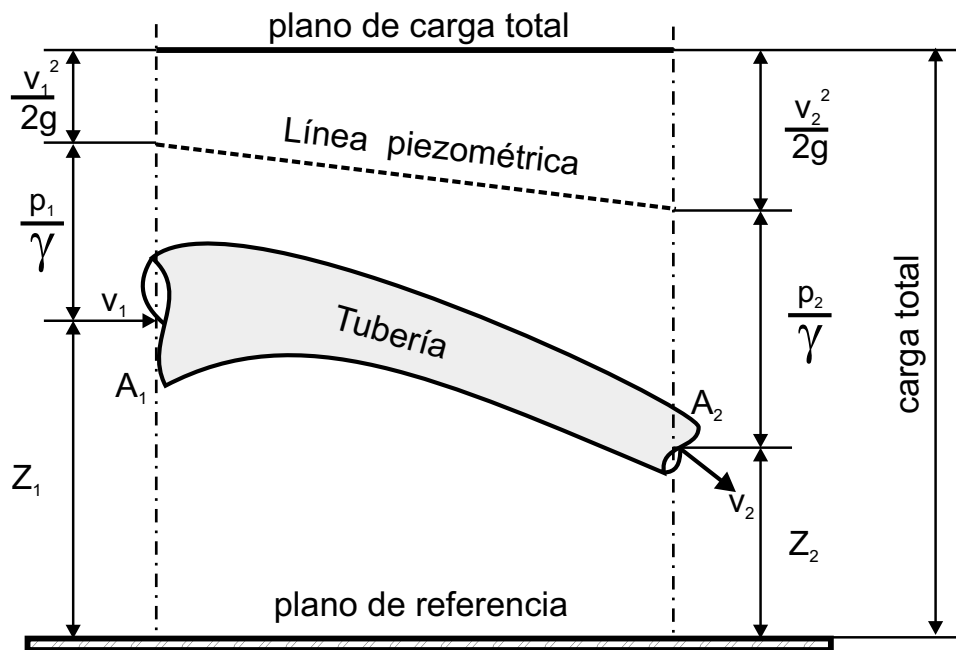
## 1.10 TEOREMA DE BERNOUILLI

El teorema de Bernouilli es uno de los más importantes de la hidráulica y representa un caso particular del Principio de Conservación de la Energía.

Considerándose como hipótesis un flujo en régimen permanente de un líquido perfecto, sin recibir o entregar energía y sin intercambiar calor, la energía total, o carga dinámica, que es la suma de la energía de presión, energía potencial y energía cinética, en cualquier punto del fluido es constante, es decir:

$$H_{\text{geo}} + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = \text{constante}$$

Considerando la figura de abajo:



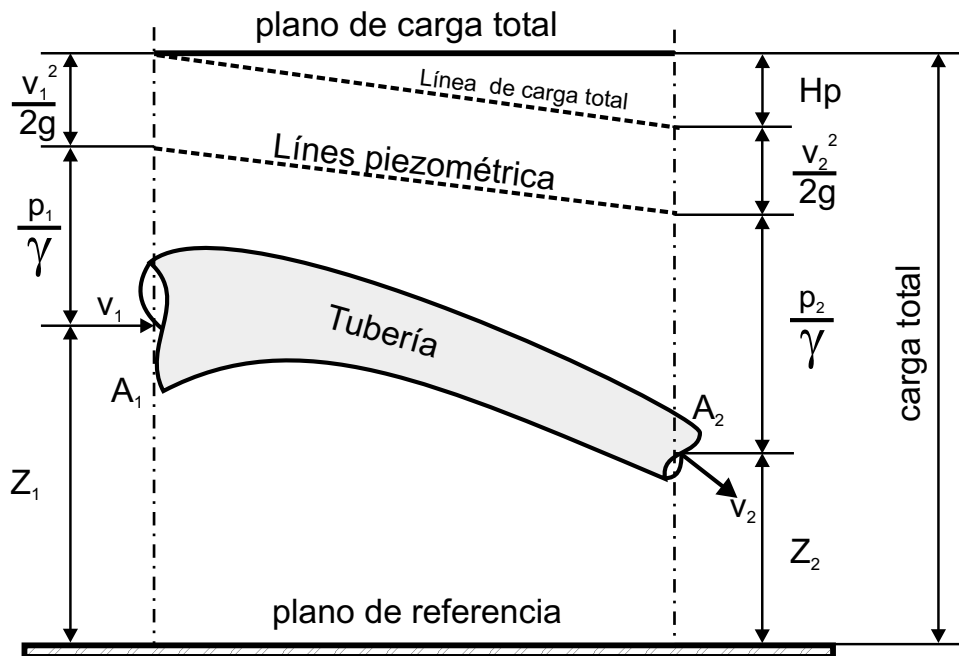
La línea piezométrica es determinada por la suma de los términos  $( Z + \frac{p}{\gamma} )$  para cada sección.

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

### 1.10.1 ADAPTACIÓN DEL TEOREMA DE BERNOUILLI PARA LÍQUIDOS REALES

En el punto anterior, consideramos la hipótesis de un líquido perfecto, no teniendo en cuenta el efecto de las pérdidas de energía producto del roce del líquido en la tubería, la viscosidad, etc.

Al considerar líquidos reales, se hace necesario la adaptación del Teorema de Bernouilli, introduciéndole una expresión representativa de estas pérdidas, como se muestra abajo:



$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + H_p$$

El término  $H_p$  es la energía pérdida por el líquido, por unidad de peso, en el trayecto entre el punto 1 y el punto 2.

## 1.11 PERDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS

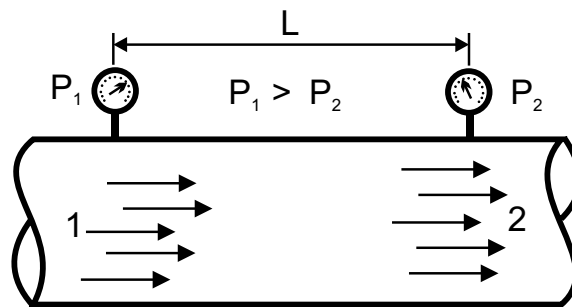
### 1.11.1 INTRODUCCIÓN

La pérdida de carga de un fluido en una tubería, ocurre debido al roce entre las partículas del mismo con las paredes de la tubería así como al roce entre estas partículas. En otras palabras, es una pérdida de energía o de presión entre dos puntos de una tubería.

### 1.11.2 TIPOS DE PERDIDA DE CARGA

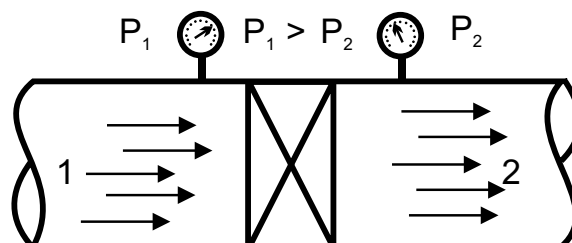
#### 1.11.3 DISTRIBUIDA

Son aquellas que ocurren en tramos rectos de una tubería.



#### 1.11.4 LOCALIZADA

Son pérdidas de presión ocasionadas por las piezas y singularidades a lo largo de la tubería, tales como curvas, válvulas, desviaciones, reducciones, expansiones, etc.,



#### 1.11.5 TOTAL

Es la suma de las pérdidas de cargas distribuidas en todos los tramos rectos de la tubería y las pérdidas de carga localizadas en todas las curvas, válvulas, uniones, etc.

### 1.11.6 FÓRMULAS PARA EL CALCULO DE LAS PERDIDAS DE CARGA DISTRIBUIDAS

Las pérdidas de carga distribuidas y localizadas en el flujo de los conductos, pueden ser determinadas a través de las medidas de presión. Por otro lado, estas pérdidas se pueden calcular a través de fórmulas experimentales o empíricas, toda vez que se conocen las dimensiones de la tubería, las características del líquido, las conexiones, etc.

### 1.11.7 FÓRMULA DE FLAMANT (1892)

La fórmula de Flamant es utilizada para tuberías de paredes lisas, con diámetros entre 10 mm hasta 1000 mm y para el transporte de agua.

$$J = \frac{H_p}{L} = \frac{4b}{D} \sqrt{\frac{v^7}{D}}$$

- J** → pérdida de carga distribuida en relación al largo de la tubería (m/m)  
**H<sub>p</sub>** → pérdida de carga distribuida (m)  
**L** → largo del tramo recto de la tubería (m)  
**D** → diámetro interno de la tubería (m)  
**v** → velocidad media del flujo (m/s)  
**b** → coeficiente de Flamant (adimensional)

Coeficientes de Flamant

| MATERIAL               | b        |
|------------------------|----------|
| Fierro fundido o acero | 0,00023  |
| Concreto               | 0,000185 |
| Plomo                  | 0,000140 |
| Plástico (PVC)         | 0,000135 |

### 1.11.8 FÓRMULA DE FAIR - WHIPPLE - HSIAO (1930)

Las fórmulas de Fair - Whipple - Hsiao son usadas para tuberías de pequeños diámetros, es decir, hasta 100 mm, transportando agua.

Tubo de fierro galvanizado

$$J = \frac{H_p}{L} = 0,002021 \cdot \frac{Q^{1,88}}{D^{4,88}}$$

Tubo de cobre o latón

$$J = \frac{H_p}{L} = 0,0086 \cdot \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}}$$

- J ➡ pérdida de carga distribuida en relación al largo de la tubería (m/m)
- H<sub>p</sub> ➡ pérdida de carga distribuida (m)
- L ➡ largo del tramo recto de tubería (m)
- Q ➡ caudal(l/s)
- D ➡ diámetro interior de la tubería (m)

### 1.11.9 FÓRMULA DE HAZEN - WILLIAMS

La fórmula de Hazen - Willians es muy utilizada en el mundo industrial, siendo válida para diámetros de tubería por sobre 50 mm y manejo de agua.

$$J = \frac{H_p}{L} = 10,643 \cdot Q^{1,85} \cdot C^{-1,85} \cdot D^{-4,87}$$

- J ➡ pérdida de carga distribuida en relación al largo de la tubería (m/m)
- H<sub>p</sub> ➡ pérdida de carga distribuida (m)
- L ➡ largo del tramo recto de tubería (m)
- Q ➡ caudal (m<sup>3</sup>/s)
- D ➡ diámetro interior de la tubería (m)
- C ➡ coeficiente de Hazen - Willians (adimensional)

Los valores del coeficiente “C” dependen del material y del estado de las paredes de la tubería:

| MATERIAL                                           | C   |
|----------------------------------------------------|-----|
| Acero corrugado (lámina ondulada)                  | 060 |
| Acero con uniones ("Look-Bar") nuevas              | 130 |
| Acero galvanizado nuevo y usado                    | 125 |
| Acero remachado nuevo                              | 110 |
| Acero remachado usado                              | 085 |
| Acero soldado nuevo                                | 120 |
| Acero soldado usado                                | 090 |
| Acero soldado con revestimiento esp. nuevo y usado | 130 |
| Plomo                                              | 130 |
| Cemento                                            | 140 |
| Cobre                                              | 130 |
| Concreto bien acabado                              | 130 |
| Concreto común                                     | 120 |
| Fierro fundido nuevo                               | 130 |
| Fierro fundido usado                               | 090 |
| Fierro fundido revestido con cemento               | 130 |
| Tubería de cerámica vidriada (tubería de desagüe)  | 110 |
| Latón                                              | 130 |
| Madera                                             | 120 |
| Conductos de ladrillo                              | 100 |
| Vidrio                                             | 140 |
| Plástico                                           | 140 |

| TIPO DE TUBERÍA                             | EDAD/AÑOS     | DIÁMETRO (mm)                     | C                |
|---------------------------------------------|---------------|-----------------------------------|------------------|
| FIERRO FUNDIDO                              | NUEVO         | Hasta - 100                       | 118              |
|                                             |               | 100 - 200                         | 120              |
|                                             |               | 200 - 400                         | 125              |
|                                             |               | 400 - 600                         | 130              |
|                                             | 10 AÑOS       | Hasta - 100                       | 107              |
|                                             |               | 100 - 200                         | 110              |
|                                             |               | 200 - 400                         | 113              |
|                                             |               | 400 - 600                         | 115              |
|                                             | 20 AÑOS       | Hasta - 100                       | 89               |
|                                             |               | 100 - 200                         | 93               |
|                                             |               | 200 - 400                         | 95               |
|                                             |               | 400 - 600                         | 100              |
|                                             | 30 AÑOS       | Hasta - 100                       | 65               |
|                                             |               | 100 - 200                         | 75               |
|                                             |               | 200 - 400                         | 80               |
|                                             |               | 400 - 600                         | 85               |
| FIERRO FUNDIDO ASBESTO CEMENTO              | NUEVO O USADO | Hasta - 100                       | 120              |
|                                             |               | 100 - 200                         | 130              |
|                                             |               | 200 - 400                         | 135              |
|                                             |               | 400 - 600                         | 140              |
| ACERO REVESTIDO INTERNAMENTE                | NUEVO O USADO | 500 - 1000                        | 135              |
|                                             |               | > 1000                            | 140              |
| PVC                                         | NUEVO O USADO | Hasta 50                          | 125              |
|                                             |               | 50 - 100                          | 135              |
|                                             |               | 100 - 300                         | 140              |
| TUBO DE CONCRETO ARM. PROTENDIDO CENTRIFUG. | NUEVO O USADO | Hasta 600                         | = fe. f. as. ce. |
|                                             |               | > 600                             | = ace. revest.   |
| ACERO S/ REVESTIMIENTO SOLDADO              | NUEVO         | = Fierro fundido nuevo            |                  |
|                                             | USADO         | Fierro fundido usado              |                  |
| ACERO S/ REVESTIMIENTO REMACHADO            | NUEVO         | = Fierro fundido con 10 años      |                  |
|                                             | USADO         | mín. = Fierro fundido con 20 años |                  |

### 1.11.10 FÓRMULA DE DARCY - WEISBACK

La fórmula de Darcy - Weisback es utilizada para diámetros de tuberías sobre 50 mm y es válida para fluidos incompresibles.

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

- $H_p$  → pérdida de carga distribuida (m)  
 $L$  → largo del tramo recto de tubería (m)  
 $D$  → diámetro interno de la tubería (m)  
 $v$  → velocidad media del flujo (m/s)  
 $f$  → coeficiente de roce (adimensional)  
 $g$  → aceleración de gravedad ( $m/s^2$ )

Coeficiente de roce  $f$ :

Es un coeficiente adimensional, y es función del Número de Reynolds y de la rugosidad relativa. La rugosidad relativa está definida como el  $k/D$ .

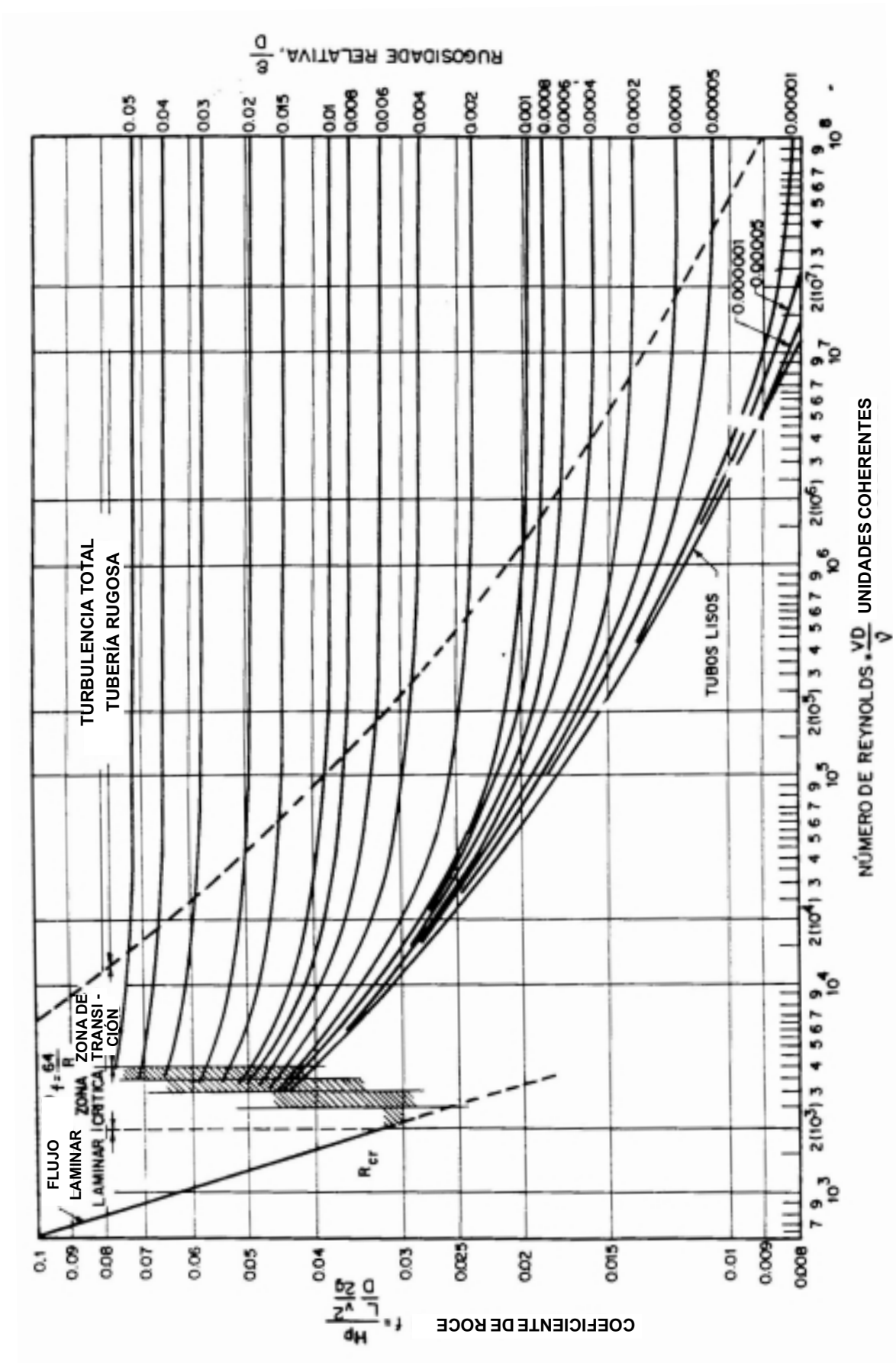
Donde:  $k$  = rugosidad de la pared de la tubería (m)

$D$  = diámetro de la tubería (m).

Rugosidades de las paredes de las tuberías

| MATERIAL                    | k (m) - TUBOS NUEVOS | k (m) - TUBOS USADOS |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| Acero galvanizado           | 0,00015 - 0,00020    | 0,0046               |
| Acero remachado             | 0,0010 - 0,0030      | 0,0060               |
| Acero remachado             | 0,0004               | 0,0005 - 0,0012      |
| Acero soldado               | 0,00004 - 0,00006    | 0,0024               |
| Chumbo                      | lisos                | lisos                |
| Cimento amianto             | 0,000013             | -----                |
| Cobre o latón               | lisos                | lisos                |
| Concreto bien acabado       | 0,0003 - 0,0010      | -----                |
| Concreto común              | 0,0010 - 0,0020      | -----                |
| Fierro forjado              | 0,00004 - 0,00006    | 0,0024               |
| Fierro fundido              | 0,00025 - 0,00050    | 0,0030 - 0,0050      |
| Madera                      | 0,0002 - 0,0010      | -----                |
| Tubería de desagüe cerámica | 0,0006               | 0,0030               |
| Vidrio                      | lisos                | lisos                |
| Plástico                    | lisos                | lisos                |

### 1.11.11 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN, UTILIZANDO EL DIAGRAMA DE MOODY-ROUSE



### 1.11.12 EJEMPLO DE LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN "f" SEGÚN MOODY:

Determinar f para agua que fluye a 20°C, en una tubería de hierro fundido nuevo, de 200 mm de diámetro, con un caudal de 0,0616 m³/s.

Datos: t = 20°C;

Material = hierro fundido

D = 200 mm

Q = 0,0616 m³/s.

U = 0,000001 m²/s

**1º Se determina la velocidad media del flujo: v (m/s)**

$$Q = v \cdot A \rightarrow Q = v \cdot \frac{\pi D^2}{4} \rightarrow v = \frac{4 \cdot 0,0616}{\pi \cdot 0,2^2} \rightarrow v = 1,961 \text{ m/s}$$

**2º Se determina el número de Reynolds: Re**

$$Re = \frac{v \cdot D}{U} \rightarrow Re = \frac{1,961 \cdot 0,2}{0,000001} \rightarrow Re = 3,92 \cdot 10^5$$

Re = 392200 → flujo turbulento

**3º Se determina la rugosidad relativa: k/D**

Para Hierro fundido nuevo, k = 0,00025 m (de la Tabla en la página 39)

$$\frac{k}{D} = \frac{0,00025}{0,2} \rightarrow \frac{k}{D} = 0,00125$$

**4º En el diagrama de Moody, con Re = 3,92 · 10<sup>5</sup> y k/D = 0,00125:**

$$f = 0,021$$

### 1.11.13 LIMITACIONES RESPECTO DEL USO DE LAS FÓRMULAS PRESENTADAS

**La fórmula de Flamant** sólo se utiliza para el manejo de agua, teniendo tuberías de paredes lisas, tipo PVC, o conductos hidráulicamente lisos y para números de Reynolds inferiores a  $10^5$ .

**La fórmula de Fair - Whipple - Hsiao** es usada para el manejo de agua en tuberías fabricadas de cualquier material, pero para diámetros pequeños, como máximo hasta 100 mm.

**La fórmula de Hazen - Willians** es teóricamente correcta y precisa. Se usa para el manejo de agua, y se aplica satisfactoriamente en cualquier tipo de tubería y material. Sus límites de aplicación son los más amplios, siendo para diámetros de entre 50 a 3500 mm. El rango de aplicación respecto del número de Reynolds en tuberías lisas es hasta  $Re = 10^5$ , ya que para valores mayores a éste no se recomienda su uso.

**La fórmula de Darcy - Weisback** es una de las más utilizadas en la industria, porque se puede usar para cualquier tipo de líquido (fluidos incompresibles) y para tuberías de cualquier diámetro y material.

### 1.11.14 FÓRMULAS DE PÉRDIDA DE CARGA LOCALIZADA

### 1.11.15 FÓRMULA GENERAL

En general, todas las pérdidas de carga pueden expresarse bajo la fórmula:

$$H_p = K \cdot \frac{v^2}{2g}$$

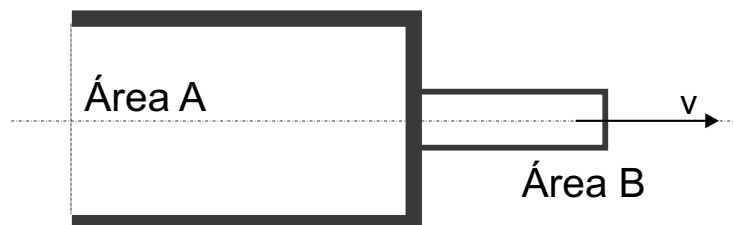
- $H_p$  → pérdida de carga localizada (m)
- $K$  → coeficiente obtenido experimentalmente
- $v$  → velocidad media del líquido en la entrada de la singularidad (m/s)
- $g$  → aceleración de gravedad ( $m/s^2$ )

*Valores de K, obtenidos experimentalmente*

| PIEZAS QUE PRODUCEN PÉRDIDA        | K    |
|------------------------------------|------|
| Ampliación gradual                 | 0,30 |
| Entrada                            | 2,75 |
| Compuerta abierta                  | 2,50 |
| Medidor de caudal                  | 2,50 |
| Codo de 90°                        | 0,90 |
| Codo de 45°                        | 0,75 |
| Cribo                              | 0,40 |
| Curva de 90°                       | 0,40 |
| Curva de 45°                       | 0,20 |
| Curva de 22,5°                     | 0,10 |
| Entrada normal en un canal         | 0,50 |
| Entrada extendida                  | 1,00 |
| Pequeña derivación                 | 0,03 |
| Empalme                            | 0,40 |
| Medidor tipo Venturi               | 2,50 |
| Reducción gradual                  | 0,15 |
| Válvula de globo en ángulo abierta | 5,00 |
| Válvula de corte abierta           | 0,20 |
| Válvula de globo abierta           | 10,0 |
| Tee, con pasada directa            | 0,60 |
| Tee, con pasada lateral            | 1,30 |
| Tee, con salida lateral            | 1,30 |
| Tee, con salida bilateral          | 1,80 |
| Válvula de pié                     | 1,75 |
| Válvula de retención               | 2,50 |
| Velocidad                          | 1,00 |

Valores de  $K$ , obtenidos experimentalmente

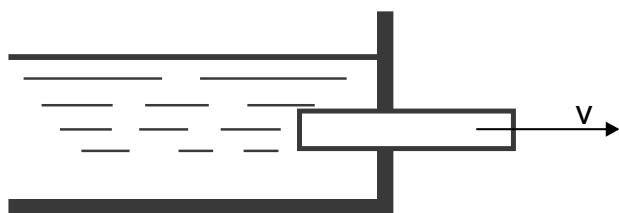
### REDUCCIÓN BRUSCA



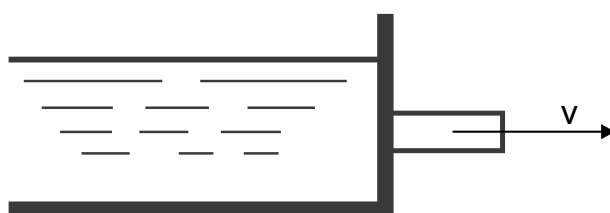
$$H_p = K \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$K = 4/9 (1 - A/B)$$

### ENTRADA DE UNA TUBERÍA



Entrada extendida  
 $k = 1,0$



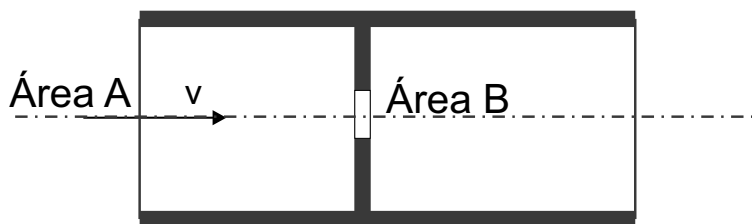
Normal  
 $K = 0,5$



Forma de sinusoidal  
 $k = 0,05$



Reducción  
 $k = 0,10$

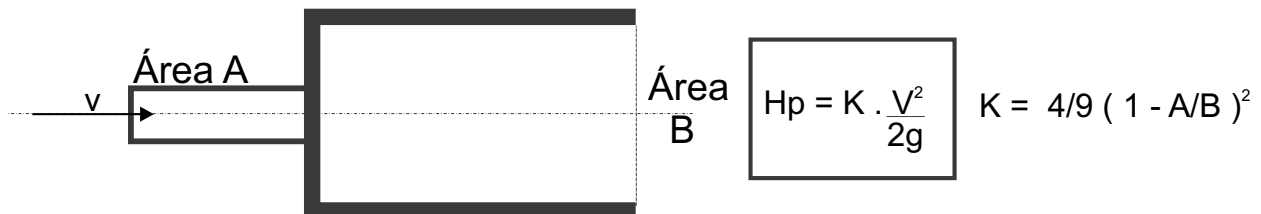


### DIAFRAGMA DE PARED (PLACA ORIFICIO)

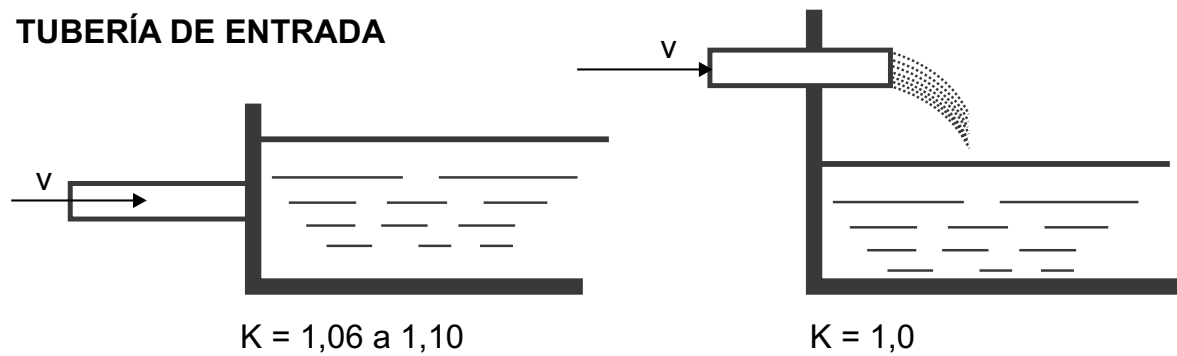
| A/B | 0,1   | 0,2   | 0,3   | 0,4   | 0,5   | 0,6   | 0,7   | 0,8   | 0,9   |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| K   | 225,9 | 47,77 | 17,51 | 7,801 | 3,753 | 1,796 | 0,791 | 0,290 | 0,068 |

Valores de  $K$ , obtenidos experimentalmente

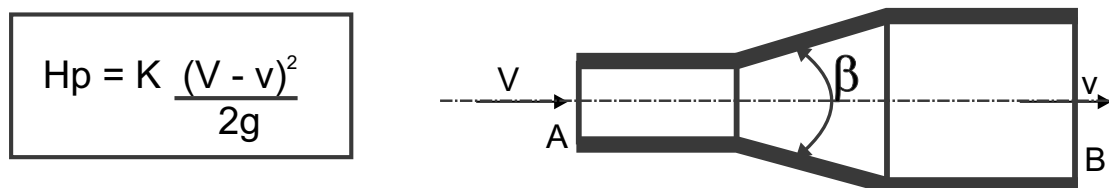
### AMPLIACIÓN BRUSCA DE SECCIÓN



### TUBERÍA DE ENTRADA

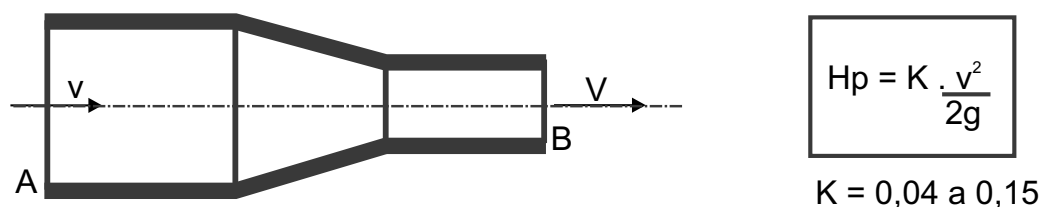


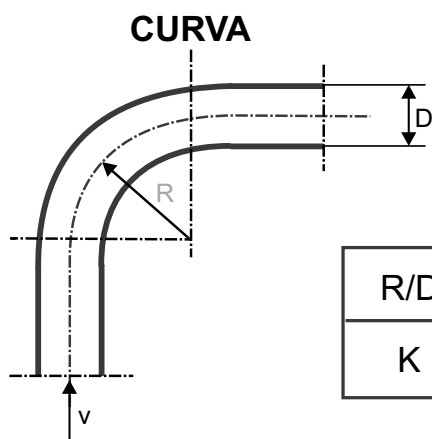
### AMPLIACIÓN GRADUAL DE SECCIÓN



| $\beta$ | 5°   | 10°  | 20°  | 40°  | 60°  | 70°  | 80°  | 120° |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| K       | 0,13 | 0,17 | 0,42 | 0,90 | 1,10 | 1,20 | 1,08 | 1,05 |

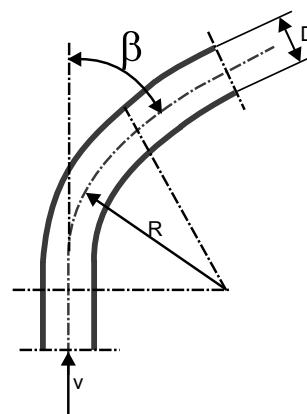
### REDUCCIÓN GRADUAL



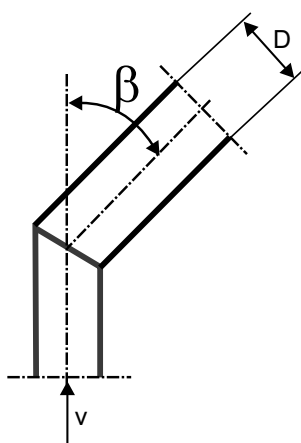


| R/D | 1    | 1,5  | 2    | 4    | 6    | 8    |
|-----|------|------|------|------|------|------|
| K   | 0,13 | 0,17 | 0,42 | 0,90 | 1,10 | 1,20 |

$$k = \frac{\beta^0}{90^0} \left[ 0,131 + 1,847 \left( \frac{D}{2R} \right)^{3,5} \right]$$

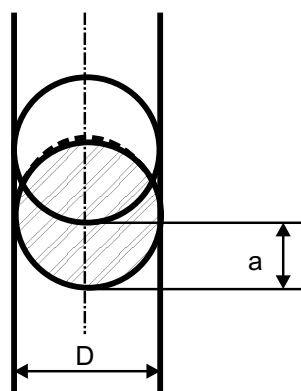


**CODO**



$$k = 0,9457 \sin^2 \frac{\beta}{2} + 2,05 \sin^4 \frac{\beta}{2}$$

**VÁLVULA DE CORTE**



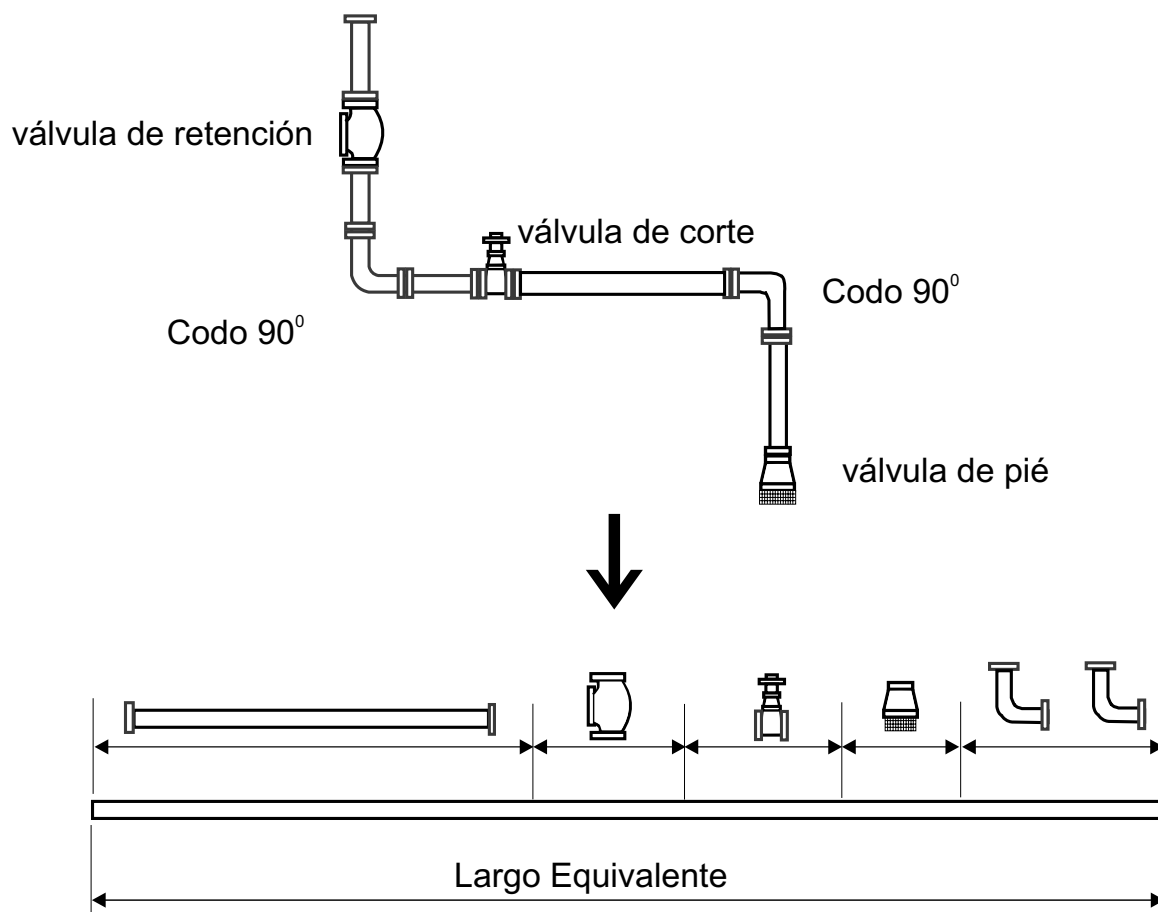
| $\frac{a}{D}$ | $\frac{7}{8}$ | $\frac{3}{4}$ | $\frac{5}{8}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{3}{8}$ | $\frac{1}{4}$ | $\frac{1}{8}$ |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\frac{a}{A}$ | 0,948         | 0,856         | 0,740         | 0,609         | 0,466         | 0,315         | 0,159         |
| k             | 0,07          | 0,26          | 0,81          | 2,06          | 5,52          | 17,0          | 97,8          |

a = Área de abertura de la pasada  
A = área de la tubería

### 1.11.16 MÉTODO DEL LARGO EQUIVALENTE

Una tubería que posee a lo largo de su extensión diversas singularidades, equivale, bajo el punto de vista de pérdida de carga, a una tubería rectilínea de largo mayor, sin las singularidades.

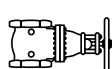
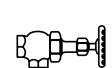
El método consiste en aumentar el largo equivalente de la tubería, para efectos de cálculo, de forma tal que estas mayores longitudes corresponden a la misma pérdida de carga que causarían por si mismas las singularidades existentes.



Utilizando la fórmula de Darcy - Weisback, tenemos que:

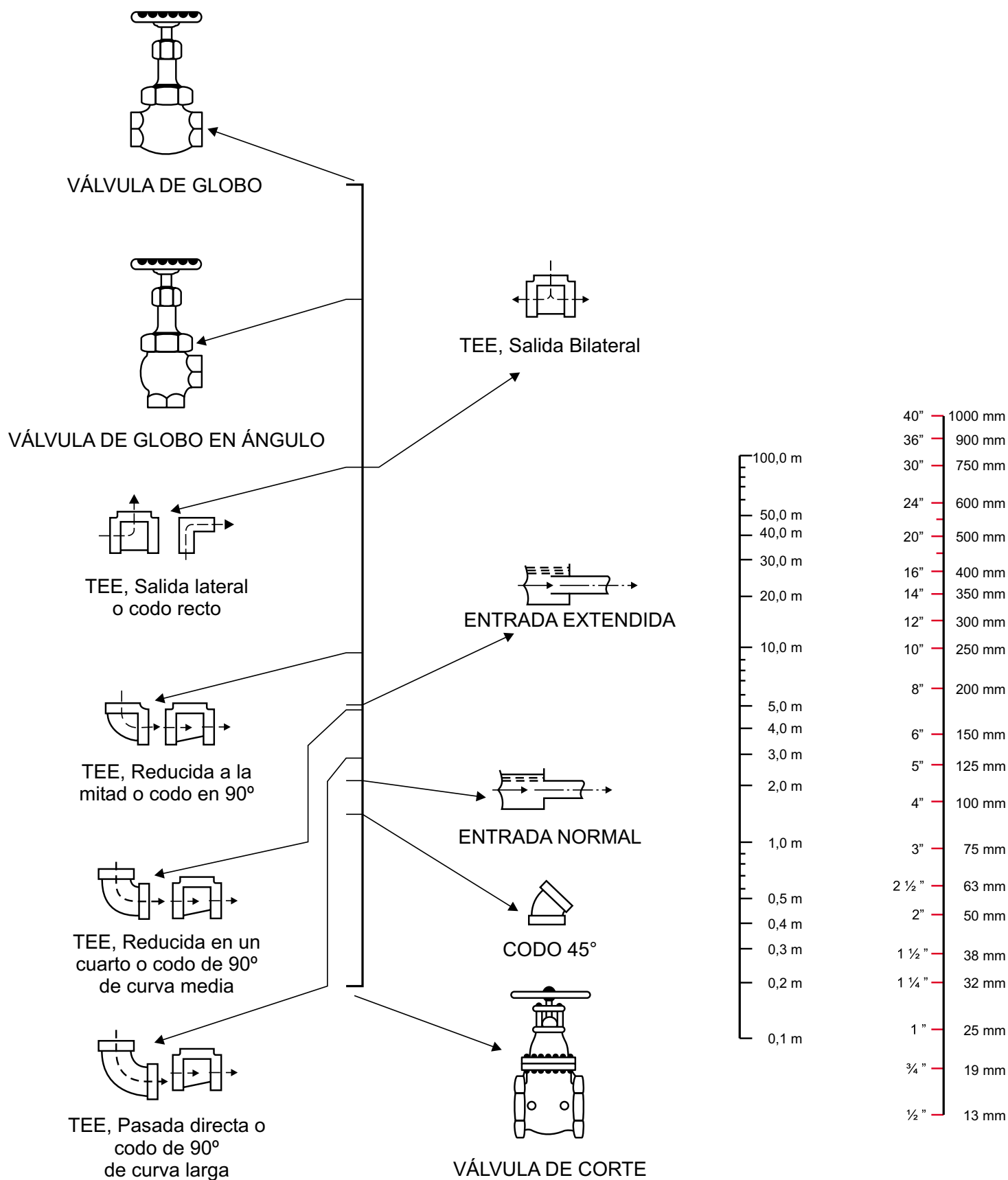
$$H_p = f \cdot \frac{L_{eq}}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Largos equivalentes para pérdidas de carga localizadas. (Expresado en metros de tubería recta)\*

| DIAMETRO<br>D |      | CODO 90°<br>CURVA LARGA                                                            |                                                                                    | CODO 90°<br>CURVA MÉDIA                                                            |                                                                                    | CODO 90°<br>CURVA CORTA                                                            |                                                                                    | CODO 45°                                                                           |                                                                                    | CURVA 90°<br>R / D - 1 1/2                                                          |                                                                                      | CURVA 90°<br>R / D - 1                                                               |                                                                                      | CURVA 45°                                                                            |                                                                                      | ENTRADA<br>NORMAL                                                                    |                                                                                      | ENTRADA<br>EXTENDIDA                                                                 |                                                                                      | VÁLVULA DE CORTE<br>ABIERTA                                                          |  | VÁLVULA DE<br>GLOBO ABIERTA |  | VÁLVULA DE GLOBO<br>EN ÁNGULO ABIERTA |  | TEE CON<br>PASAJE<br>DIRECTO |  | TEE CON<br>SALIDA<br>LATERAL |  | TEE CON<br>SALIDA<br>BILATERAL |  | VÁLVULA DE<br>PIE Y FILTRO |  | SALIDA<br>CANALIZACIÓN |  | VÁLVULA DE<br>RETENCIÓN<br>TIPO BOLA |  | VÁLVULA DE<br>RETENCIÓN<br>TIPO CHAPALETA |  |
|---------------|------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------|--|---------------------------------------|--|------------------------------|--|------------------------------|--|--------------------------------|--|----------------------------|--|------------------------|--|--------------------------------------|--|-------------------------------------------|--|
| mm            | pulg |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                             |  |                                       |  |                              |  |                              |  |                                |  |                            |  |                        |  |                                      |  |                                           |  |
| 13            | ½    | 0,3                                                                                | 0,4                                                                                | 0,5                                                                                | 0,2                                                                                | 0,2                                                                                | 0,3                                                                                | 0,2                                                                                | 0,2                                                                                | 0,2                                                                                 | 0,1                                                                                  | 4,9                                                                                  | 2,6                                                                                  | 0,3                                                                                  | 1,0                                                                                  | 1,0                                                                                  | 3,6                                                                                  | 0,4                                                                                  | 1,1                                                                                  | 1,6                                                                                  |  |                             |  |                                       |  |                              |  |                              |  |                                |  |                            |  |                        |  |                                      |  |                                           |  |
| 19            | ¾    | 0,4                                                                                | 0,6                                                                                | 0,7                                                                                | 0,3                                                                                | 0,3                                                                                | 0,4                                                                                | 0,2                                                                                | 0,3                                                                                | 0,5                                                                                 | 0,1                                                                                  | 6,7                                                                                  | 3,6                                                                                  | 0,4                                                                                  | 1,4                                                                                  | 1,4                                                                                  | 5,6                                                                                  | 0,5                                                                                  | 1,6                                                                                  | 2,4                                                                                  |  |                             |  |                                       |  |                              |  |                              |  |                                |  |                            |  |                        |  |                                      |  |                                           |  |
| 25            | 1    | 0,5                                                                                | 0,7                                                                                | 0,8                                                                                | 0,4                                                                                | 0,3                                                                                | 0,5                                                                                | 0,2                                                                                | 0,3                                                                                | 0,7                                                                                 | 0,2                                                                                  | 8,2                                                                                  | 4,6                                                                                  | 0,5                                                                                  | 1,7                                                                                  | 1,7                                                                                  | 7,3                                                                                  | 0,7                                                                                  | 2,1                                                                                  | 3,2                                                                                  |  |                             |  |                                       |  |                              |  |                              |  |                                |  |                            |  |                        |  |                                      |  |                                           |  |
| 32            | 1¼   | 0,7                                                                                | 0,9                                                                                | 1,1                                                                                | 0,5                                                                                | 0,4                                                                                | 0,6                                                                                | 0,3                                                                                | 0,4                                                                                | 0,9                                                                                 | 0,2                                                                                  | 11,3                                                                                 | 5,6                                                                                  | 0,7                                                                                  | 2,3                                                                                  | 2,3                                                                                  | 10,0                                                                                 | 0,9                                                                                  | 2,7                                                                                  | 4,0                                                                                  |  |                             |  |                                       |  |                              |  |                              |  |                                |  |                            |  |                        |  |                                      |  |                                           |  |
| 38            | 1½   | 0,9                                                                                | 1,1                                                                                | 1,3                                                                                | 0,6                                                                                | 0,5                                                                                | 0,7                                                                                | 0,3                                                                                | 0,5                                                                                | 1,0                                                                                 | 0,3                                                                                  | 13,4                                                                                 | 6,7                                                                                  | 0,9                                                                                  | 2,8                                                                                  | 2,8                                                                                  | 11,6                                                                                 | 1,0                                                                                  | 3,2                                                                                  | 4,8                                                                                  |  |                             |  |                                       |  |                              |  |                              |  |                                |  |                            |  |                        |  |                                      |  |                                           |  |
| 50            | 2    | 1,1                                                                                | 1,4                                                                                | 1,7                                                                                | 0,8                                                                                | 0,6                                                                                | 0,9                                                                                | 0,4                                                                                | 0,7                                                                                | 1,5                                                                                 | 0,4                                                                                  | 17,4                                                                                 | 8,5                                                                                  | 1,1                                                                                  | 3,5                                                                                  | 3,5                                                                                  | 14,0                                                                                 | 1,5                                                                                  | 4,2                                                                                  | 6,4                                                                                  |  |                             |  |                                       |  |                              |  |                              |  |                                |  |                            |  |                        |  |                                      |  |                                           |  |
| 63            | 2½   | 1,3                                                                                | 1,7                                                                                | 2,0                                                                                | 0,9                                                                                | 0,8                                                                                | 1,0                                                                                | 0,5                                                                                | 0,9                                                                                | 1,9                                                                                 | 0,4                                                                                  | 21,0                                                                                 | 10,0                                                                                 | 1,3                                                                                  | 4,3                                                                                  | 4,3                                                                                  | 17,0                                                                                 | 1,9                                                                                  | 5,2                                                                                  | 8,1                                                                                  |  |                             |  |                                       |  |                              |  |                              |  |                                |  |                            |  |                        |  |                                      |  |                                           |  |
| 75            | 3    | 1,6                                                                                | 2,1                                                                                | 2,5                                                                                | 1,2                                                                                | 1,0                                                                                | 1,3                                                                                | 0,6                                                                                | 1,1                                                                                | 2,2                                                                                 | 0,5                                                                                  | 26,0                                                                                 | 13,0                                                                                 | 1,6                                                                                  | 5,2                                                                                  | 5,2                                                                                  | 20,0                                                                                 | 2,2                                                                                  | 6,3                                                                                  | 9,7                                                                                  |  |                             |  |                                       |  |                              |  |                              |  |                                |  |                            |  |                        |  |                                      |  |                                           |  |
| 100           | 4    | 2,1                                                                                | 2,8                                                                                | 3,4                                                                                | 1,3                                                                                | 1,3                                                                                | 1,6                                                                                | 0,7                                                                                | 1,6                                                                                | 3,2                                                                                 | 0,7                                                                                  | 34,0                                                                                 | 17,0                                                                                 | 2,1                                                                                  | 6,7                                                                                  | 6,7                                                                                  | 23,0                                                                                 | 3,2                                                                                  | 6,4                                                                                  | 12,9                                                                                 |  |                             |  |                                       |  |                              |  |                              |  |                                |  |                            |  |                        |  |                                      |  |                                           |  |
| 125           | 5    | 2,7                                                                                | 3,7                                                                                | 4,2                                                                                | 1,9                                                                                | 1,6                                                                                | 2,1                                                                                | 0,9                                                                                | 2,0                                                                                | 4,0                                                                                 | 0,9                                                                                  | 43,0                                                                                 | 21,0                                                                                 | 2,7                                                                                  | 8,4                                                                                  | 8,4                                                                                  | 30,0                                                                                 | 4,0                                                                                  | 10,4                                                                                 | 16,1                                                                                 |  |                             |  |                                       |  |                              |  |                              |  |                                |  |                            |  |                        |  |                                      |  |                                           |  |
| 150           | 6    | 3,4                                                                                | 4,3                                                                                | 4,9                                                                                | 2,3                                                                                | 1,9                                                                                | 2,5                                                                                | 1,1                                                                                | 2,5                                                                                | 5,0                                                                                 | 1,1                                                                                  | 51,0                                                                                 | 26,0                                                                                 | 3,4                                                                                  | 10,0                                                                                 | 10,0                                                                                 | 39,0                                                                                 | 5,0                                                                                  | 12,5                                                                                 | 19,3                                                                                 |  |                             |  |                                       |  |                              |  |                              |  |                                |  |                            |  |                        |  |                                      |  |                                           |  |
| 200           | 8    | 4,3                                                                                | 5,5                                                                                | 6,4                                                                                | 3,0                                                                                | 2,4                                                                                | 3,3                                                                                | 1,5                                                                                | 3,5                                                                                | 6,0                                                                                 | 1,4                                                                                  | 67,0                                                                                 | 34,0                                                                                 | 4,3                                                                                  | 13,0                                                                                 | 13,0                                                                                 | 52,0                                                                                 | 6,0                                                                                  | 16,0                                                                                 | 25,0                                                                                 |  |                             |  |                                       |  |                              |  |                              |  |                                |  |                            |  |                        |  |                                      |  |                                           |  |
| 250           | 10   | 5,5                                                                                | 6,7                                                                                | 7,9                                                                                | 3,8                                                                                | 3,0                                                                                | 4,1                                                                                | 1,8                                                                                | 4,5                                                                                | 7,5                                                                                 | 1,7                                                                                  | 85,0                                                                                 | 43,0                                                                                 | 5,5                                                                                  | 16,0                                                                                 | 16,0                                                                                 | 65,0                                                                                 | 7,5                                                                                  | 20,0                                                                                 | 32,0                                                                                 |  |                             |  |                                       |  |                              |  |                              |  |                                |  |                            |  |                        |  |                                      |  |                                           |  |
| 300           | 12   | 6,1                                                                                | 7,9                                                                                | 9,5                                                                                | 4,6                                                                                | 3,6                                                                                | 4,8                                                                                | 2,2                                                                                | 5,5                                                                                | 9,0                                                                                 | 2,1                                                                                  | 102,0                                                                                | 51,0                                                                                 | 6,1                                                                                  | 19,0                                                                                 | 19,0                                                                                 | 78,0                                                                                 | 9,0                                                                                  | 24,0                                                                                 | 38,0                                                                                 |  |                             |  |                                       |  |                              |  |                              |  |                                |  |                            |  |                        |  |                                      |  |                                           |  |
| 350           | 14   | 7,3                                                                                | 9,5                                                                                | 10,5                                                                               | 5,3                                                                                | 4,4                                                                                | 5,4                                                                                | 2,5                                                                                | 6,2                                                                                | 11,0                                                                                | 2,4                                                                                  | 120,0                                                                                | 60,0                                                                                 | 7,3                                                                                  | 22,0                                                                                 | 22,0                                                                                 | 90,0                                                                                 | 11,0                                                                                 | 28,0                                                                                 | 45,0                                                                                 |  |                             |  |                                       |  |                              |  |                              |  |                                |  |                            |  |                        |  |                                      |  |                                           |  |

Los valores indicados para válvulas de globo, también se aplican a grifos, válvulas de duchas y válvulas de descarga.

## 1.11.18 LARGO EQUIVALENTE PARA PÉRDIDAS DE CARGA LOCALIZADAS



### **1.11.19 TABLAS DE LECTURA DIRECTA**

Basadas en las formulas antes presentadas así como en datos experimentales, han sido elaboradas una serie de tablas de lectura directa, las que muestran las pérdidas de carga de los principales componentes de un sistema de bombeo, en función del caudal y el diámetro nominal de la tubería.

Tenemos como ejemplo, la TABLA DE PÉRDIDAS DE CARGA de KSB Bombas Hidráulicas S.A.

## **MÓDULO 2**

### ***Sistemas de Bombeo***



## ÍNDICE

|             |                                                                                     |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>2</b>    | <b><i>Introducción</i></b>                                                          | 51 |
| <b>2.1</b>  | <b><i>Altura estática y Altura dinámica</i></b>                                     | 52 |
| 2.1.1       | Altura estática                                                                     | 52 |
| 2.1.2       | Altura geométrica                                                                   | 52 |
| 2.1.3       | Carga de presión                                                                    | 52 |
| <b>2.2</b>  | <b><i>Altura dinámica</i></b>                                                       | 52 |
| 2.2.1       | Pérdida de carga total (Hp)                                                         | 52 |
| 2.2.2       | Carga de velocidad                                                                  | 52 |
| <b>2.3</b>  | <b><i>Altura total del sistema</i></b>                                              | 54 |
| <b>2.4</b>  | <b><i>Altura de succión</i></b>                                                     | 54 |
| 2.4.1       | Altura geométrica de succión                                                        | 54 |
| 2.4.2       | Carga de presión en la succión                                                      | 54 |
| 2.4.3       | Pérdidas de carga en la succión                                                     | 54 |
| 2.4.4       | Carga de velocidad en la succión                                                    | 54 |
| <b>2.5</b>  | <b><i>Esquemas típicos de succión</i></b>                                           | 55 |
| <b>2.6</b>  | <b><i>Succión positiva</i></b>                                                      | 56 |
| <b>2.7</b>  | <b><i>Succión negativa</i></b>                                                      | 56 |
| <b>2.8</b>  | <b><i>Altura de descarga ( Hd )</i></b>                                             | 57 |
| 2.8.1       | Altura geométrica de descarga ( Hgeod )                                             | 57 |
| 2.8.2       | Carga de presión en la descarga                                                     | 57 |
| 2.8.3       | Pérdidas de carga en la descarga ( Hps )                                            | 57 |
| 2.8.4       | Carga de velocidad en la descarga                                                   | 57 |
| <b>2.9</b>  | <b><i>Esquemas típicos de descarga</i></b>                                          | 57 |
| <b>2.10</b> | <b><i>Altura manométrica total</i></b>                                              | 59 |
| <b>2.11</b> | <b><i>Cálculo de la Altura manométrica del sistema en la etapa de diseño</i></b>    | 59 |
| <b>2.12</b> | <b><i>Cálculo de la altura manométrica del sistema en la etapa de operación</i></b> | 60 |
| <b>2.13</b> | <b><i>Curva característica del sistema</i></b>                                      | 60 |
| 2.13.1      | Gráfico de la curva del sistema                                                     | 61 |
| <b>2.14</b> | <b><i>Asociación de sistemas</i></b>                                                | 62 |
| 2.14.1      | Conexión en serie                                                                   | 62 |
| 2.14.2      | Esquema de una conexión en serie                                                    | 63 |
| 2.14.3      | Conexión en paralelo                                                                | 64 |
| 2.14.4      | Esquema de una conexión en paralelo                                                 | 64 |
| 2.14.5      | Conexión mixta                                                                      | 65 |
| <b>2.15</b> | <b><i>Variación de los niveles en los depósitos</i></b>                             | 66 |
| <b>2.16</b> | <b><i>Bombeo simultáneo hacia 2 o mas depósitos distintos</i></b>                   | 67 |
| <b>2.17</b> | <b><i>Abastecimiento por gravedad</i></b>                                           | 69 |



## **SISTEMAS DE BOMBEO**

### **2 INTRODUCCIÓN**

En este módulo estudiaremos los parámetros fundamentales de un sistema de bombeo, analizando los conceptos, las fórmulas para el cálculo y otros elementos.

El entendimiento adecuado de este tema es fundamental para la comprensión y solución de problemas prácticos, con los que nos enfrentamos frecuentemente en nuestro trabajo, permitiéndonos así dimensionar, seleccionar y operar correctamente los equipos, tema que será estudiado en capítulos posteriores.



## 2.1 ALTURA ESTÁTICA Y ALTURA DINÁMICA

### 2.1.1 ALTURA ESTÁTICA

La altura estática de un sistema de bombeo está compuesta por los siguientes términos:

#### 2.1.2 ALTURA GEOMÉTRICA (H<sub>geo</sub>)

Es la diferencia de cota entre el nivel del líquido en la succión y en la descarga. Si la tubería de descarga está sobre el nivel del líquido en el depósito de descarga, entonces H<sub>geo</sub> se debe referir a la línea de centro de la tubería de descarga y no al nivel del líquido.

#### 2.1.3 CARGA DE PRESIÓN

Es la diferencia de presión existente entre los depósitos de descarga y succión. Esta expresión es aplicable en depósitos cerrados.

Para sistemas abiertos, esta expresión puede ser considerada como nula.

Esta carga se puede representar a través de la fórmula:

$$\left( \frac{P_{rd} - P_{rs}}{\gamma} \right)$$

## 2.2 ALTURA DINÁMICA

La altura dinámica de un sistema de bombeo está compuesta por las expresiones:

### 2.2.1 PÉRDIDA DE CARGA TOTAL (H<sub>p</sub>)

Es la suma de todas las pérdidas de carga que se producen en el sistema, tales como las pérdidas de carga en la tubería, válvulas, accesorios, etc.

Note que la pérdida de carga total considera tanto la succión como la descarga de la instalación.

### 2.2.2 CARGA DE VELOCIDAD

Es la diferencia entre la carga de velocidad del fluido en el depósito de succión y en el depósito de descarga. En la práctica, esta expresión puede ser despreciada.

Esta altura se puede representar a través de la fórmula:

$$\left( \frac{v_{rd}^2 - v_{rs}^2}{2g} \right)$$

## 2.3 ALTURA TOTAL DEL SISTEMA

La altura total del sistema, más adecuadamente llamada como Altura Manométrica Total del Sistema, está compuesta por la Altura Estática más la Altura Dinámica, es decir:

$$H = H_{\text{geo}} + \frac{P_{\text{rd}} - P_{\text{rs}}}{\gamma} + H_p + \frac{v_{\text{rd}}^2 - v_{\text{rs}}^2}{2g}$$

Si despreciamos la carga de velocidad, tenemos:

$$H = H_{\text{geo}} + \frac{P_{\text{rd}} - P_{\text{rs}}}{\gamma} + H_p$$

Para sistemas abiertos, tenemos:

$$H = H_{\text{geo}} + H_p$$

## 2.4 ALTURA DE SUCCIÓN (H<sub>s</sub>)

La altura de succión está compuesta por las siguientes expresiones:

### 2.4.1 ALTURA GEOMÉTRICA DE SUCCIÓN (H<sub>geo s</sub>)

Es la diferencia de cota entre el nivel del depósito de succión y la línea central del rodete de la bomba.

### 2.4.2 CARGA DE PRESIÓN EN LA SUCCIÓN (P<sub>rs</sub>/γ)

Es la altura de presión existente en el depósito de succión. Este término es nulo para depósitos abiertos.

### 2.4.3 PÉRDIDAS DE CARGA EN LA SUCCIÓN (H<sub>ps</sub>)

Es la suma de todas las pérdidas de carga entre los depósitos de succión y el flange de succión de la bomba.

### 2.4.4 CARGA DE VELOCIDAD EN LA SUCCIÓN (v<sub>rs</sub><sup>2</sup>/2g)

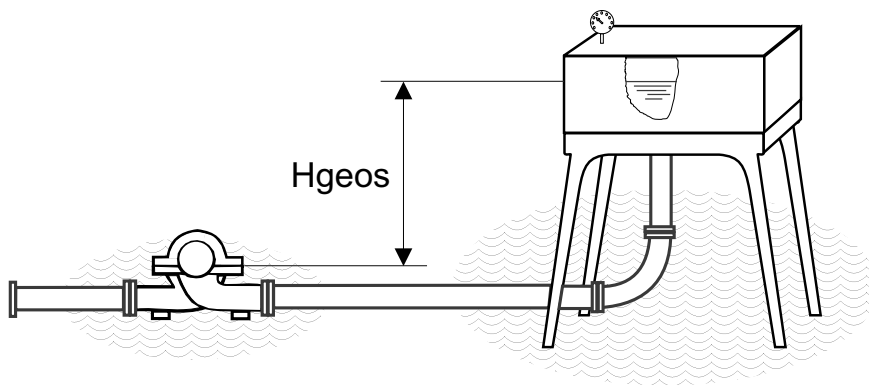
Es la altura de velocidad en el depósito de succión.

Así, la Altura de Succión puede ser expresar por:

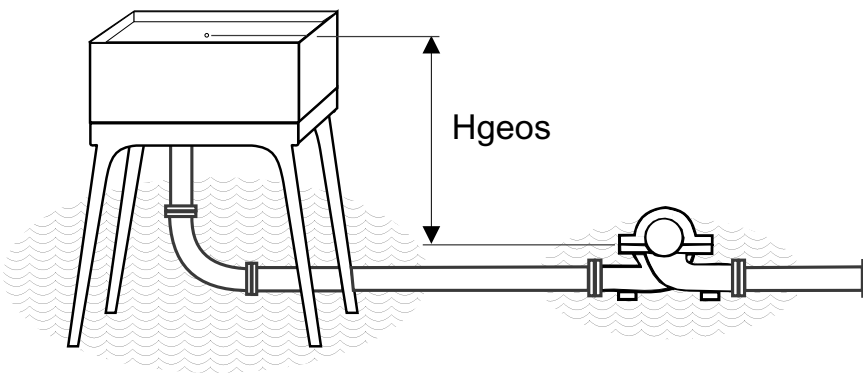
$$H = H_{geos} + \frac{P_{rs}}{\gamma} - H_{ps} + \frac{vrs^2}{2g}$$

**IMPORTANTE:** Notar que en la expresión anterior, el término  $H_{geos}$  puede ser positivo o negativo, dependiendo del tipo de instalación.

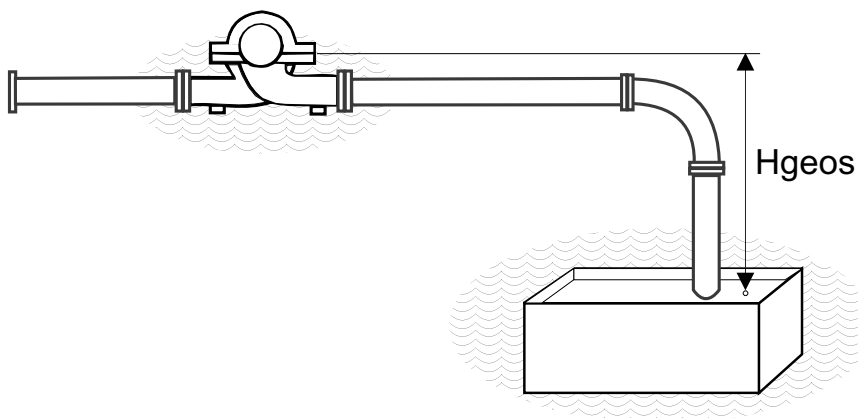
## 2.5 ESQUEMAS TÍPICOS DE SUCCIÓN



$$H_s = H_{geos} + \frac{P_{rs}}{\gamma} - H_p$$



$$H_s = H_{geos} - H_p$$

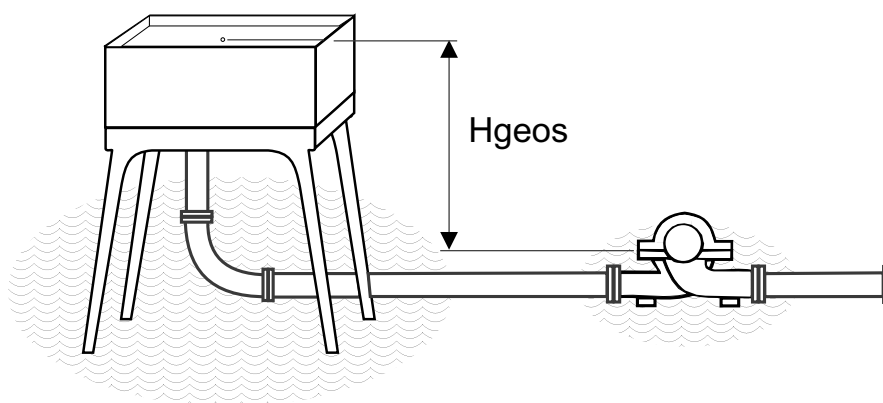


$$H_s = -H_{geos} - H_p$$

En los ejemplos anteriores, la velocidad del fluido en el depósito de succión se considera como despreciable, por lo que se desprecia la carga de presión correspondiente.

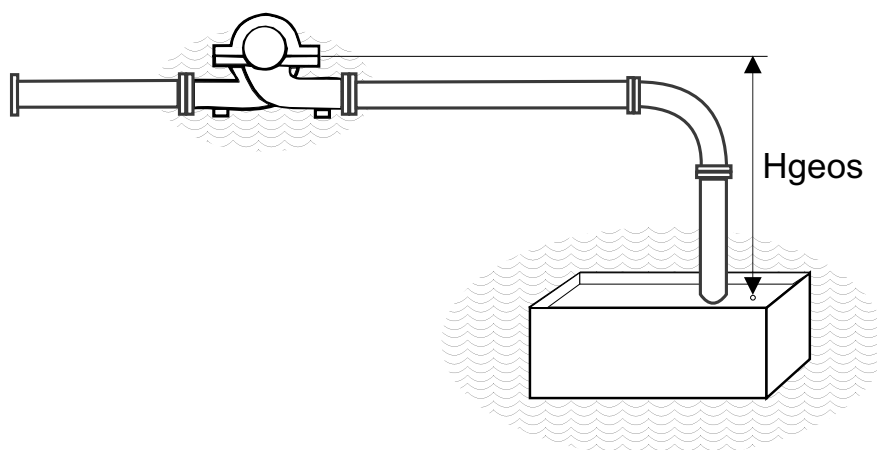
## 2.6 SUCCIÓN POSITIVA

Decimos que la succión de una bomba es positiva, cuando el nivel del líquido en el depósito de la succión está por encima de la línea de centro del rodete de bomba. En este caso, el término  $H_{geos}$  es positivo.



## 2.7 SUCCIÓN NEGATIVA

Decimos que la succión de una bomba es negativa, cuando el nivel del líquido en el depósito de succión está por debajo de la línea de centro del rodete de la bomba. En este caso, el término  $H_{geos}$  es negativo.



OBS: En este caso, estamos tomando como referencia, la línea de centro de la bomba, en caso que se tome como referencia el nivel del líquido en el depósito, se alteran los signos de  $H_{geos}$ .

## 2.8 ALTURA DE DESCARGA (Hd)

La altura de descarga está compuesta por lo siguientes términos:

### 2.8.1 ALTURA GEOMÉTRICA DE DESCARGA (Hgeod)

Es la diferencia de cota entre el nivel del depósito de descarga y la línea de centro del rodete de la bomba.

### 2.8.2 CARGA DE PRESIÓN EN LA DESCARGA ( $P_{rd}/\gamma$ )

Es la carga de presión existente en el depósito de descarga. Esta es nula para depósitos abiertos.

### 2.8.3 PÉRDIDAS DE CARGA EN LA DESCARGA (Hpd)

Es la suma de todas las pérdidas de carga entre el flange de descarga de la bomba y el depósito de descarga.

### 2.8.4 CARGA DE VELOCIDAD EN LA DESCARGA ( $v_{rd}^2/2g$ )

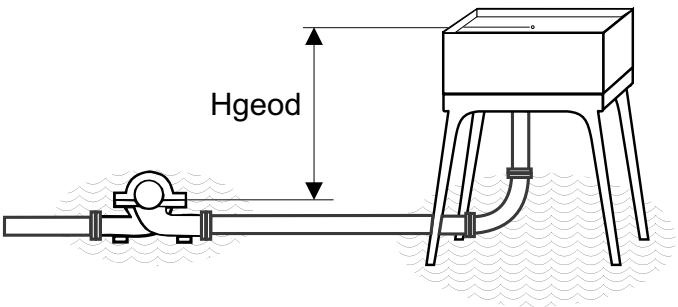
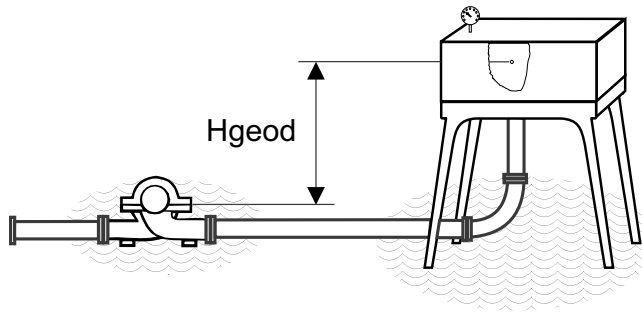
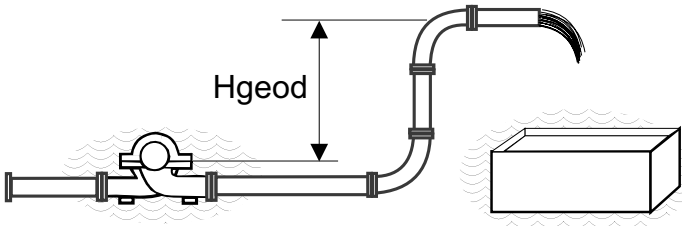
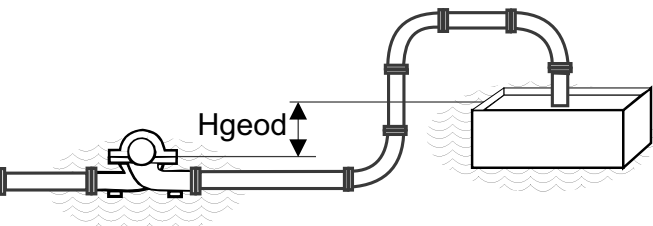
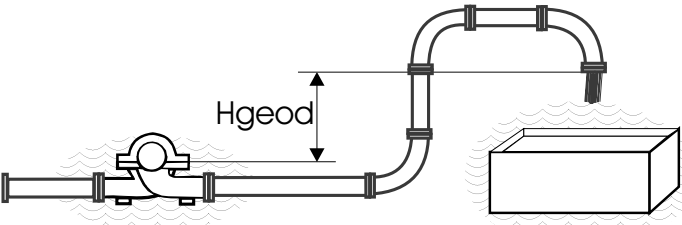
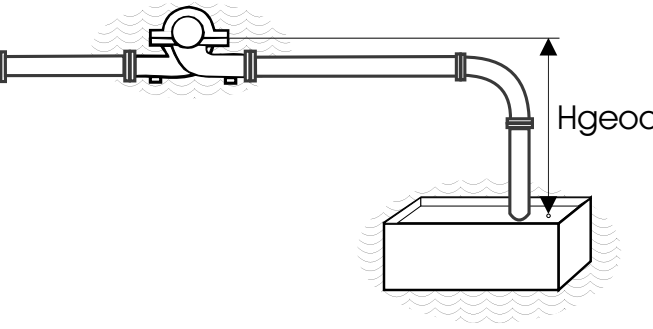
Es la carga de velocidad del fluido en el depósito de la descarga.

Así, la Altura de descarga se puede expresar por:

$$H = H_{geod} + \frac{P_{rd}}{\gamma} + H_{pd} + \frac{v_{rd}^2}{2g}$$

## 2.9 ESQUEMAS TÍPICOS DE DESCARGA

En las figuras siguientes, veremos los principales esquemas de descarga a depósitos:

|                                                                                                            |                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  $H_d = H_{geod} + H_p$   |  $H_d = H_{geod} + \frac{Pr_d}{\gamma} + H_p$ |
|  $H_d = H_{geod} + H_p$  |  $H_d = H_{geod} + H_p$                      |
|  $H_d = H_{geod} + H_p$ |  $H_d = - H_{geod} + H_p$                   |

En los ejemplos anteriores, la velocidad del fluido en el depósito de succión se considera despreciable, por lo que se elimina el término correspondiente a la carga de presión.

## 2.10 ALTURA MANOMÉTRICA TOTAL

La altura Manométrica Total es la energía por unidad de peso que el sistema requiere para transportar el fluido desde el depósito de succión al de descarga, para un cierto caudal.

En los sistemas que nosotros estudiaremos, esa energía es entregada por una bomba, siendo la Altura Manométrica Total, un parámetro fundamental para el dimensionamiento de la misma.

Es importante notar que en un sistema de bombeo, el parámetro a fijar es el Caudal(Q), ya que la Altura Manométrica Total (H) es consecuencia de la instalación.

## 2.11 CÁLCULO DE LA ALTURA MANOMÉTRICA DEL SISTEMA EN LA ETAPA DE DISEÑO

Como ya vimos anteriormente, la Altura Manométrica Total de un sistema puede ser calculada por:

$$H = H_{geo} + \frac{Prd - Prs}{\gamma} \cdot 10 + H_p + \frac{vrd^2 - vrs^2}{2g}$$

$H_{geo}$   $\Rightarrow$  altura geométrica (m)

$Prd$   $\Rightarrow$  presión en el depósito de descarga ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$Prs$   $\Rightarrow$  presión en el depósito de succión ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$\gamma$   $\Rightarrow$  peso específico del fluido ( $\text{kgf/dm}^3$ )

$H_p$   $\Rightarrow$  pérdida de carga total (m)

$vrd^2$   $\Rightarrow$  velocidad en el depósito de descarga (m/s)

$vrs^2$   $\Rightarrow$  velocidad en el depósito de succión (m/s)

$g$   $\Rightarrow$  aceleración de gravedad ( $\text{m/s}^2$ )

10  $\Rightarrow$  factor de conversión de unidades

O mediante la expresión:

$$H = H_d - H_s$$

## 2.12 CÁLCULO DE LA ALTURA MANOMÉTRICA DEL SISTEMA EN LA ETAPA DE OPERACIÓN

Las fórmulas aquí presentadas, son utilizadas para determinar la Altura Manométrica Total del sistema en etapa de diseño, es decir, realizando los cálculos para determinar las pérdidas de carga, etc.

Sin embargo, cuando se tiene un sistema instalado y en funcionamiento, algunas expresiones pueden ser obtenidas directamente de la propia instalación. En este caso, aunque las fórmulas presentadas siguen siendo válidas, la Altura Manométrica Total correspondiente para un cierto caudal se puede obtener de la siguiente forma:

$$H = \frac{P_d - P_s}{\gamma} \cdot 10 + \frac{v_d^2 - v_s^2}{2g} + Z_{sd}$$

- $P_d$   $\Rightarrow$  presión obtenida del manómetro de descarga ( $\text{kgf/cm}^2$ )
- $P_s$   $\Rightarrow$  presión obtenida del manómetro de succión ( $\text{kgf/cm}^2$ )
- $\gamma$   $\Rightarrow$  peso específico del fluido ( $\text{kgf/dm}^3$ )
- $v_d^2$   $\Rightarrow$  velocidad del fluido en la descarga de la bomba ( $\text{m/s}$ )
- $v_s^2$   $\Rightarrow$  velocidad del fluido en la succión de la bomba ( $\text{m/s}$ )
- $g$   $\Rightarrow$  aceleración de gravedad ( $\text{m/s}^2$ )
- $Z_{sd}$   $\Rightarrow$  diferencia de cota entre las líneas de centro de los manómetros ubicados en la succión y descarga de la bomba (m)
- 10  $\Rightarrow$  factor de conversión

## 2.13 CURVA CARACTERÍSTICA DEL SISTEMA

Los sistemas de bombeo están normalmente compuestos por diversos elementos, tales como bombas, válvulas, tuberías y accesorios, los que son necesarios para transferir el fluido desde un punto hacia otro.

Ya fue estudiado en puntos anteriores, cómo calcular la Altura Manométrica Total del sistema para un cierto caudal deseado. Los parámetros Caudal (Q) y Altura Manométrica Total (H) son fundamentales para el dimensionamiento de la bomba adecuada para un sistema específico.

Sin embargo, muchas veces, es necesario conocer además del punto de operación del sistema (Q y H), la Curva característica del mismo, es decir, la Altura Manométrica Total correspondiente a cada caudal, dentro de un cierto rango de operación del sistema.

Esta curva es de gran importancia sobre todo en sistemas que incluyen varias bombas operando, variaciones de nivel en los depósitos, caudales variables, etc.

### 2.13.1 GRÁFICO DE LA CURVA DEL SISTEMA

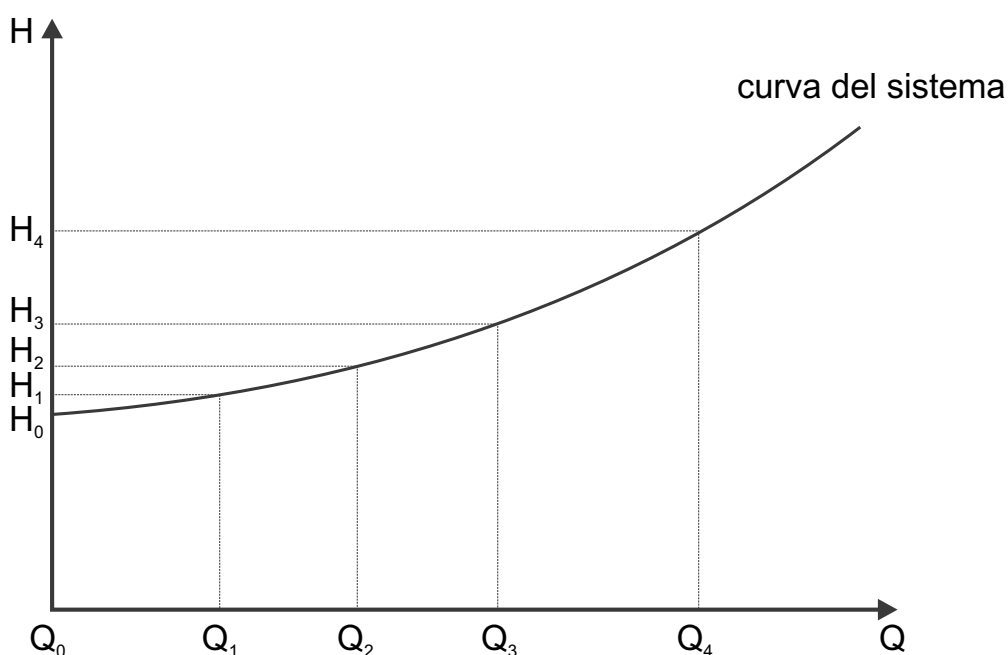
La curva característica del sistema se obtiene graficando la Altura Manométrica Total en función del caudal del sistema, según las siguientes indicaciones:

**1o Paso:** Considerar una de las fórmulas para la obtención de la Altura Manométrica Total;

**2o Paso:** Fijar algunos caudales dentro del rango de operación del sistema. Se sugiere fijar del orden de cinco puntos, entre ellos el de caudal cero ( $Q = 0$ ) y el caudal del diseño ( $Q = Q_{proj}$ );

**3o Paso:** Determinar la Altura Manométrica Total que corresponde a cada caudal fijado;

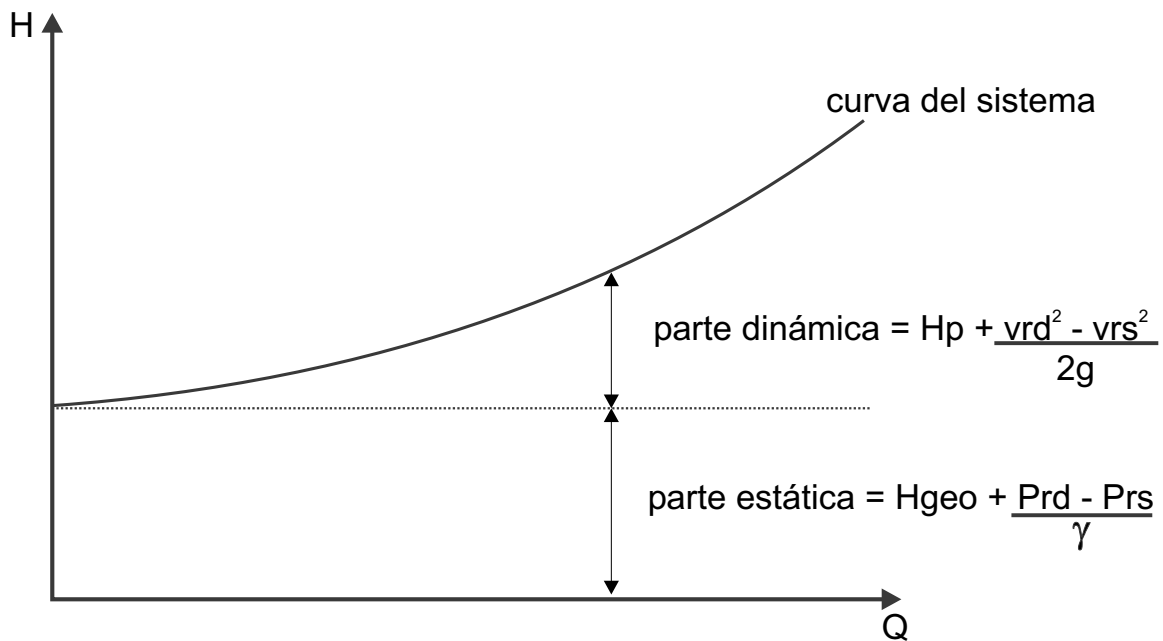
**4o Paso:** Dibujar los puntos obtenidos en un gráfico  $Q$  v/s  $H$ , (el caudal en el eje de las abscisas y altura manométrica en el eje de las ordenadas), según el gráfico siguiente:



La curva característica de un sistema del bombeo presenta dos partes diferentes, es decir, una componente estática y otra dinámica.

La **componente estática** corresponde la altura estática y es independiente del caudal del sistema, es decir, de la carga de presión en los depósitos de la descarga y succión así como de la altura geométrica.

La **componente dinámica** corresponde a la altura dinámica, es decir, con un caudal en movimiento, generando carga de velocidad en los depósitos de descarga y succión y las pérdidas de carga, que aumentan en forma cuadrática con el caudal del sistema.



## 2.14 ASOCIACIÓN DE SISTEMAS

Los sistemas de bombeo muchas veces están compuestos por varias tuberías conectadas entre sí, cada una con sus accesorios respectivos (curvas, válvulas, reducciones, etc).

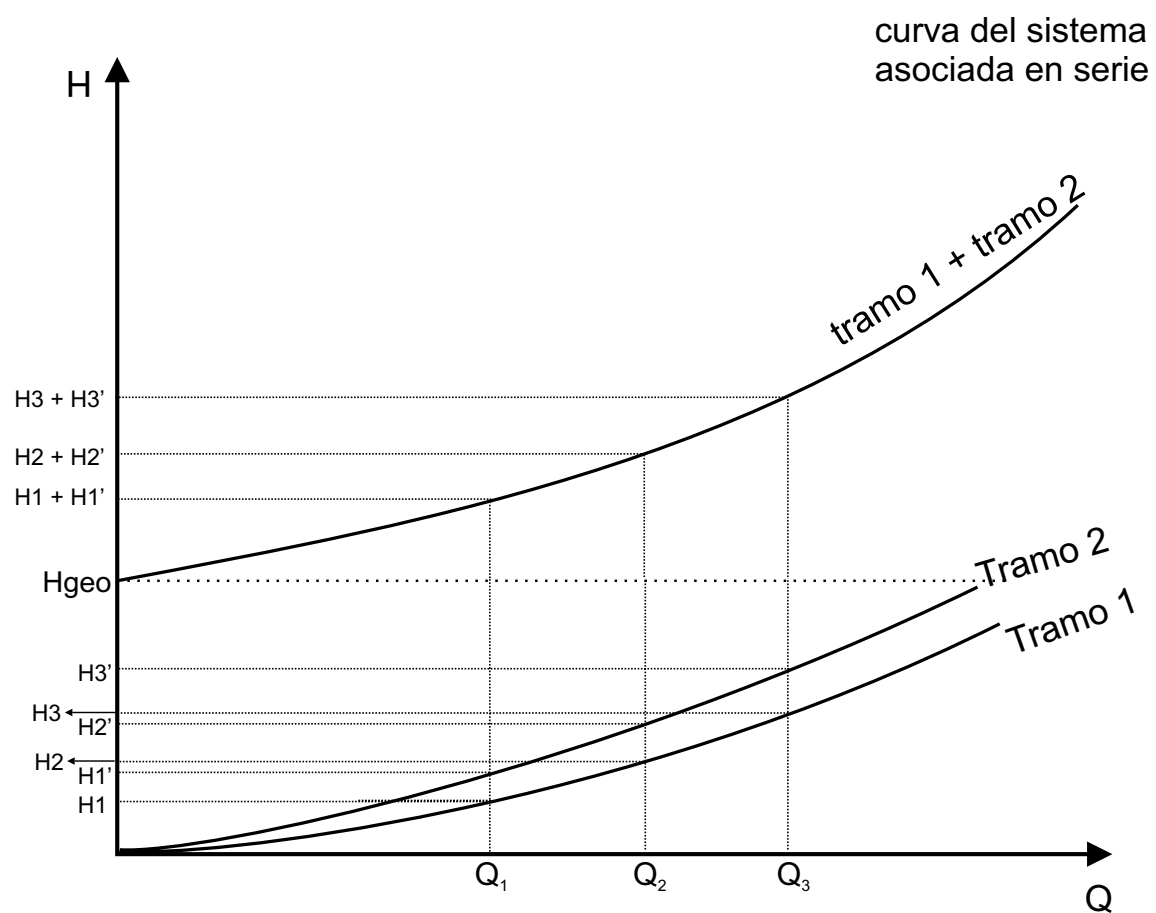
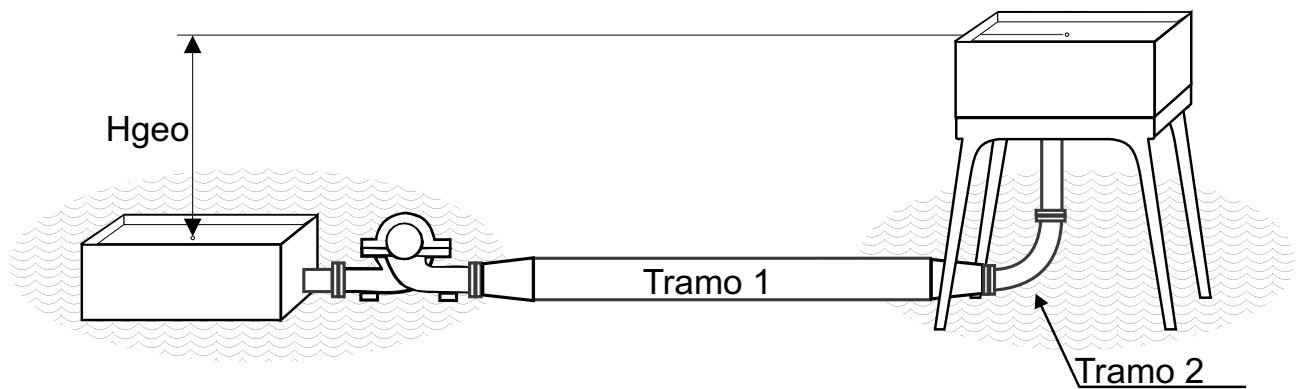
Para obtener la curva del sistema en estos casos, inicialmente se debe proceder al levantamiento de la curva de sistema para cada tubería independientemente, como si las demás no existieran, utilizando las expresiones estudiadas anteriormente.

En seguida, las curvas obtenidas deben componerse conforme con el tipo de conexión existente, en serie o en paralelo.

### 2.14.1 CONEXIÓN EN SERIE

En la conexión en serie, para cada caudal, el valor del Altura Manométrica Total (H), será la suma de las alturas manométricas correspondientes de cada sistema.

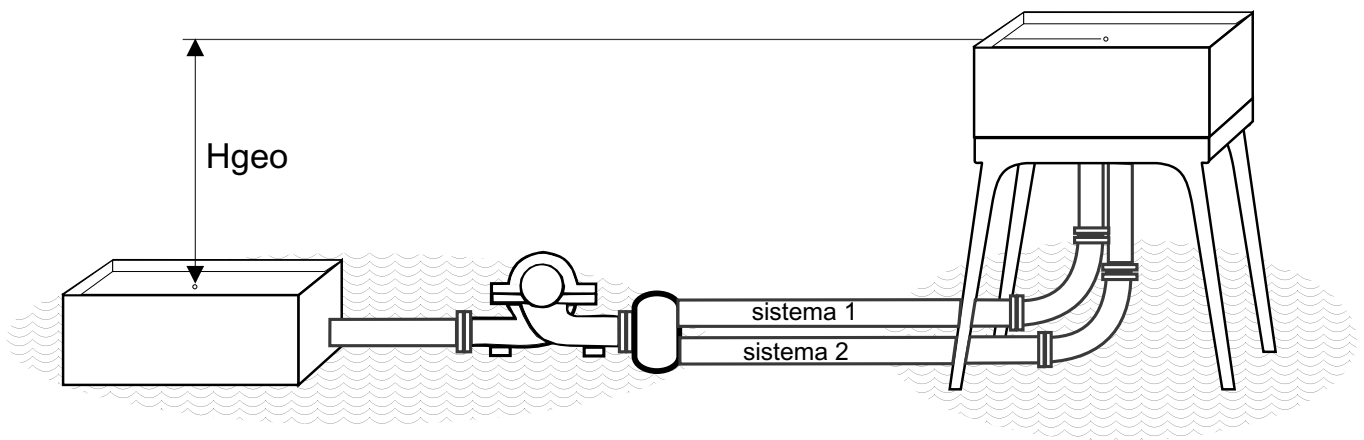
## 2.14.2 ESQUEMA DE UNA CONEXIÓN EN SERIE



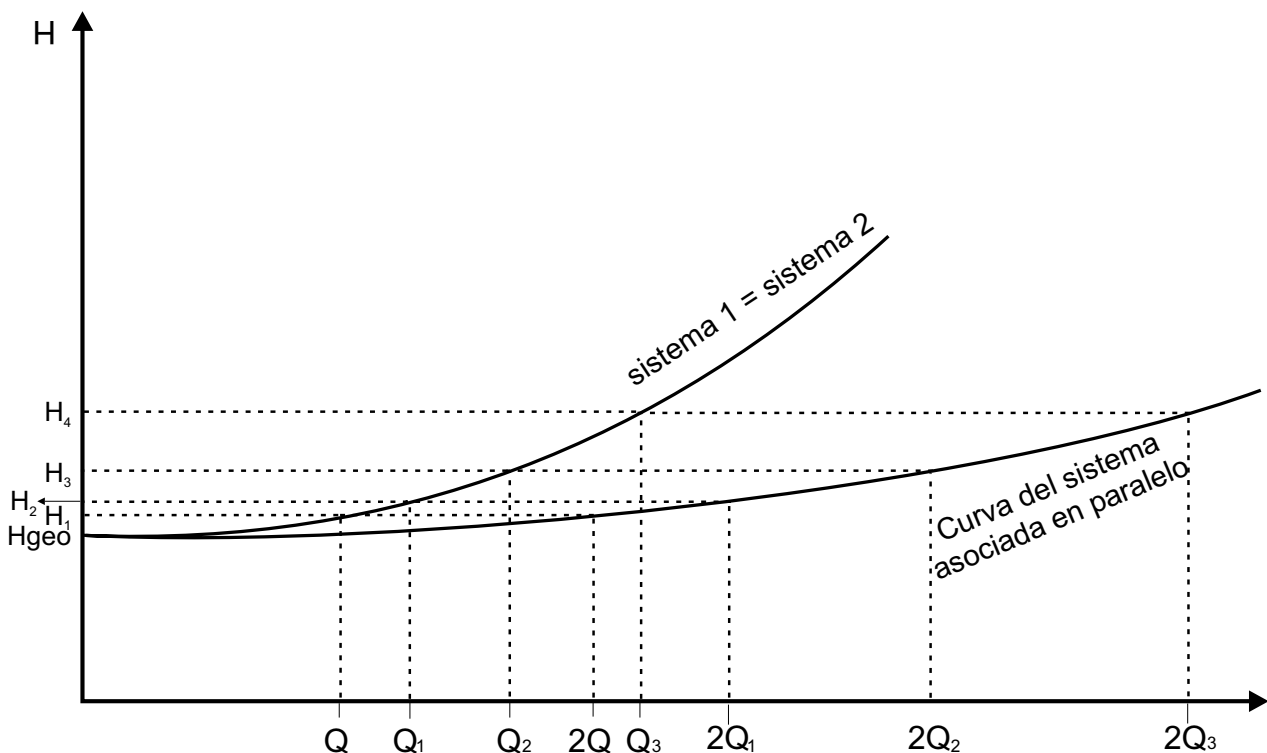
### 2.14.3 CONEXIÓN EN PARALELO

En la conexión en paralelo, para cada Altura Manométrica Total, el valor del caudal total del sistema será la suma del caudal correspondiente para cada tubería. Así, inicialmente, se procede al levantamiento de la curva de cada sistema individualmente, como si no existieran los otros, en seguida, para cada Altura Manométrica, se suman los caudales correspondientes de cada sistema, obteniéndose la curva del sistema resultante.

### 2.14.4 ESQUEMA DE UNA OPERACIÓN EN PARALELO



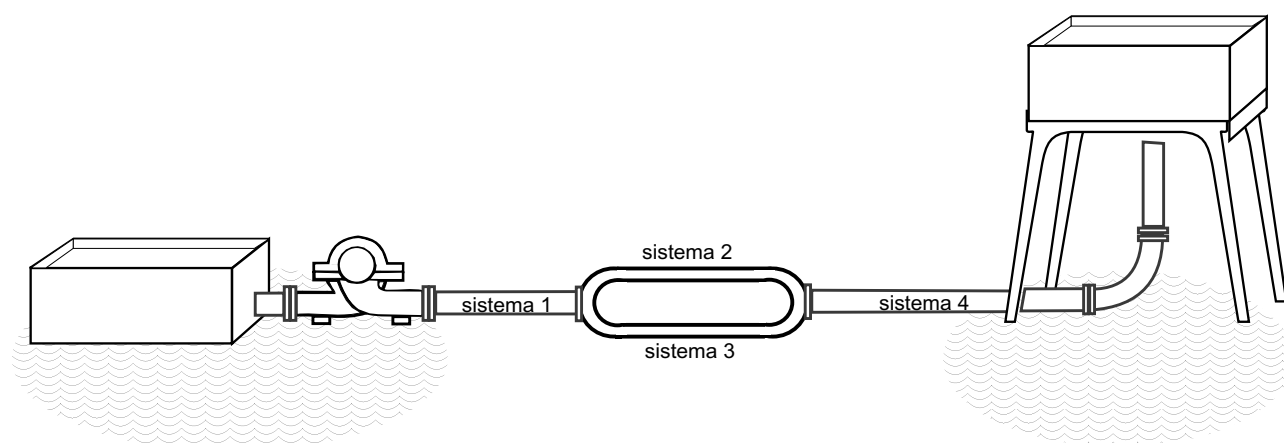
El sistema 1 es idéntico al sistema 2



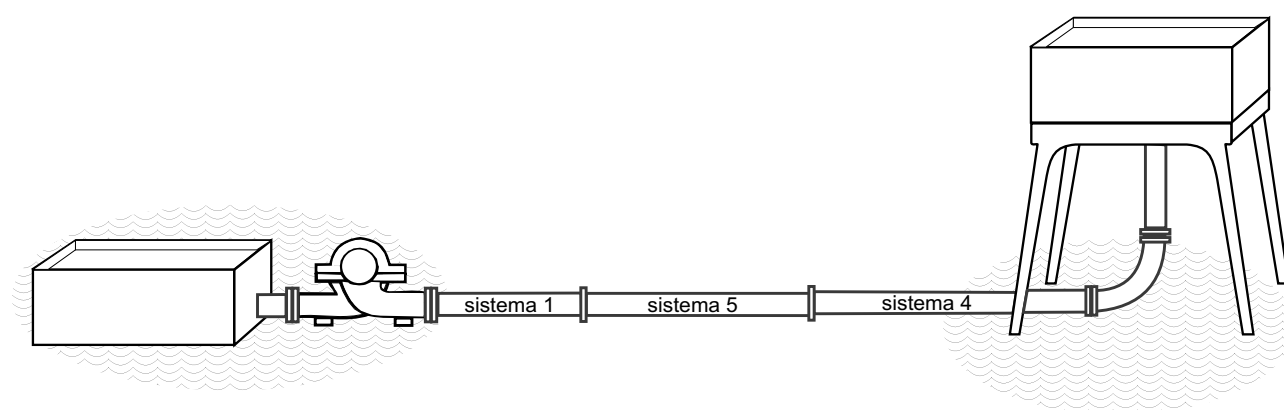
### 2.14.5 OPERACIÓN MIXTA

En la conexión mixta, el procedimiento es una combinación de las asociaciones anteriormente descritas, como sigue:

Supongamos un sistema formado por los tramos de tuberías indicados abajo:



Inicialmente, se efectúa la asociación de los sistemas 2 y 3 en paralelo, obteniéndose la curva característica de esta asociación, que nosotros llamaremos sistema 5.

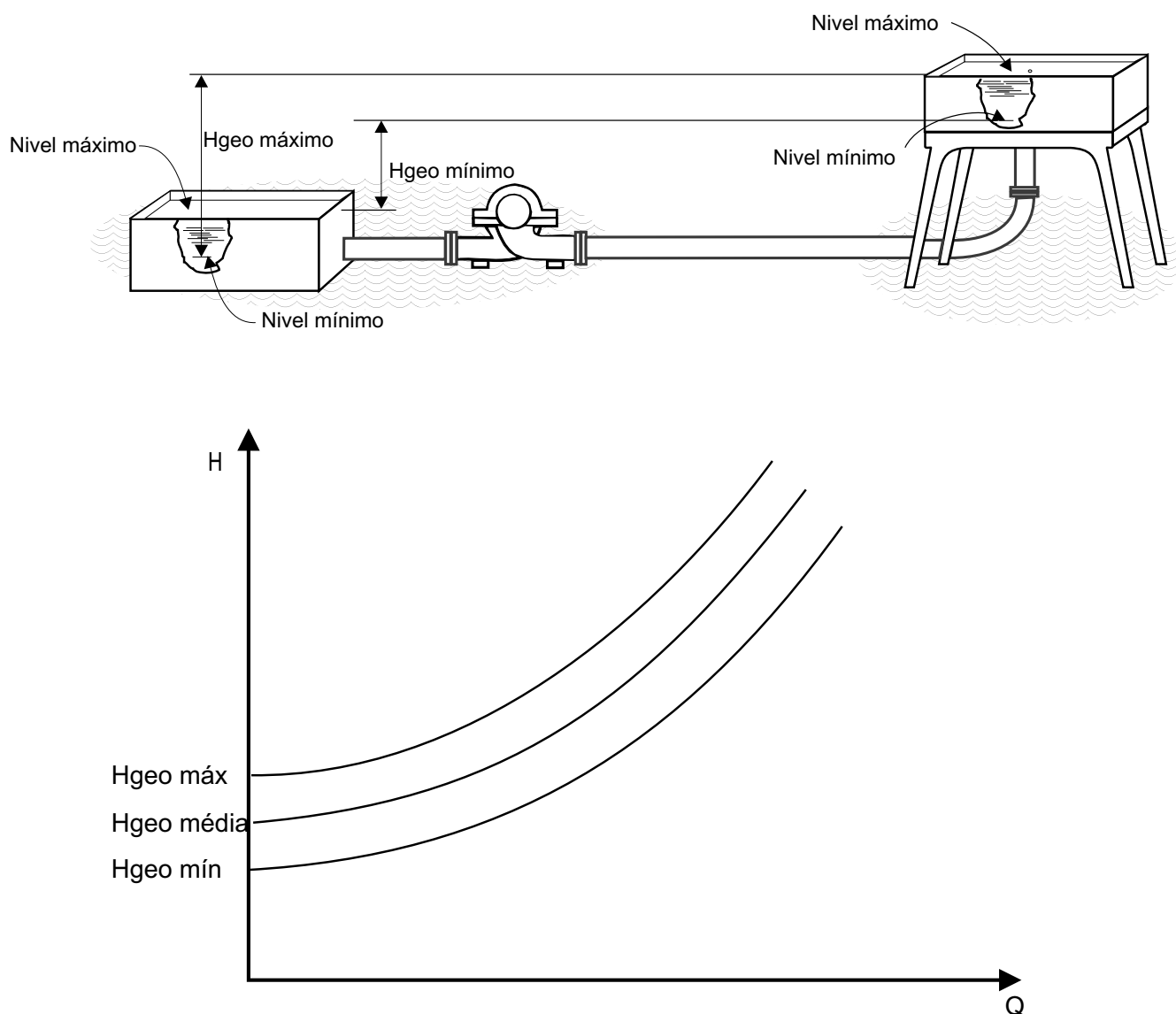


En seguida, basta con efectuar la asociación de los sistemas 1 + 5 + 4 en serie, con el procedimiento ya descrito, obteniéndose así la curva del sistema resultante.

## 2.15 VARIACIÓN DE LOS NIVELES EN LOS DEPÓSITOS

Muchas veces los niveles en los depósitos (succión y descarga) pueden sufrir grandes variaciones, (demanda variable, nivel de los ríos, etc). Con esto, las alturas estáticas variarán, produciendo consecuentemente varias curvas de sistemas.

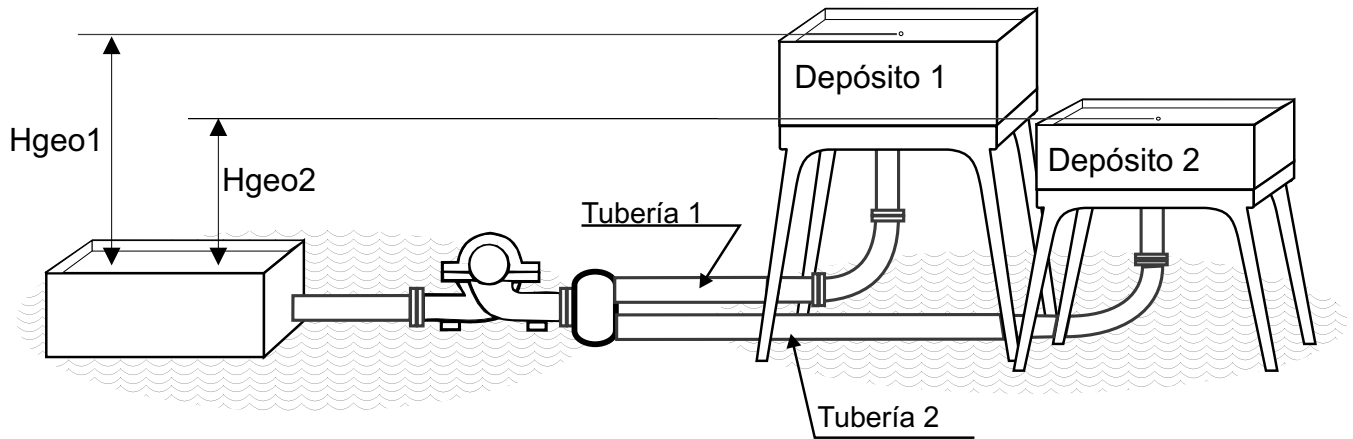
Para facilitar el dimensionamiento, se determina el rango de variación correspondientes a los valores límites, es decir, las curvas del sistema para las alturas estáticas totales máximas y mínimas.



Para efectos de proyectar y seleccionar las bombas, normalmente se considera la curva del sistema que corresponde al nivel medio o al nivel más frecuente. Es importante el conocimiento de las curvas para el nivel máximo y mínimo, principalmente cuando ocurren grandes variaciones de niveles en los depósitos. Es importante conocer la frecuencia y el tiempo que duran estas situaciones límites, para poder dimensionar el equipo más adecuado, desde el punto de vista económico para el sistema.

## 2.16 BOMBEO SIMULTÁNEOS HACIA DOS O MÁS DEPÓSITOS DIFERENTES

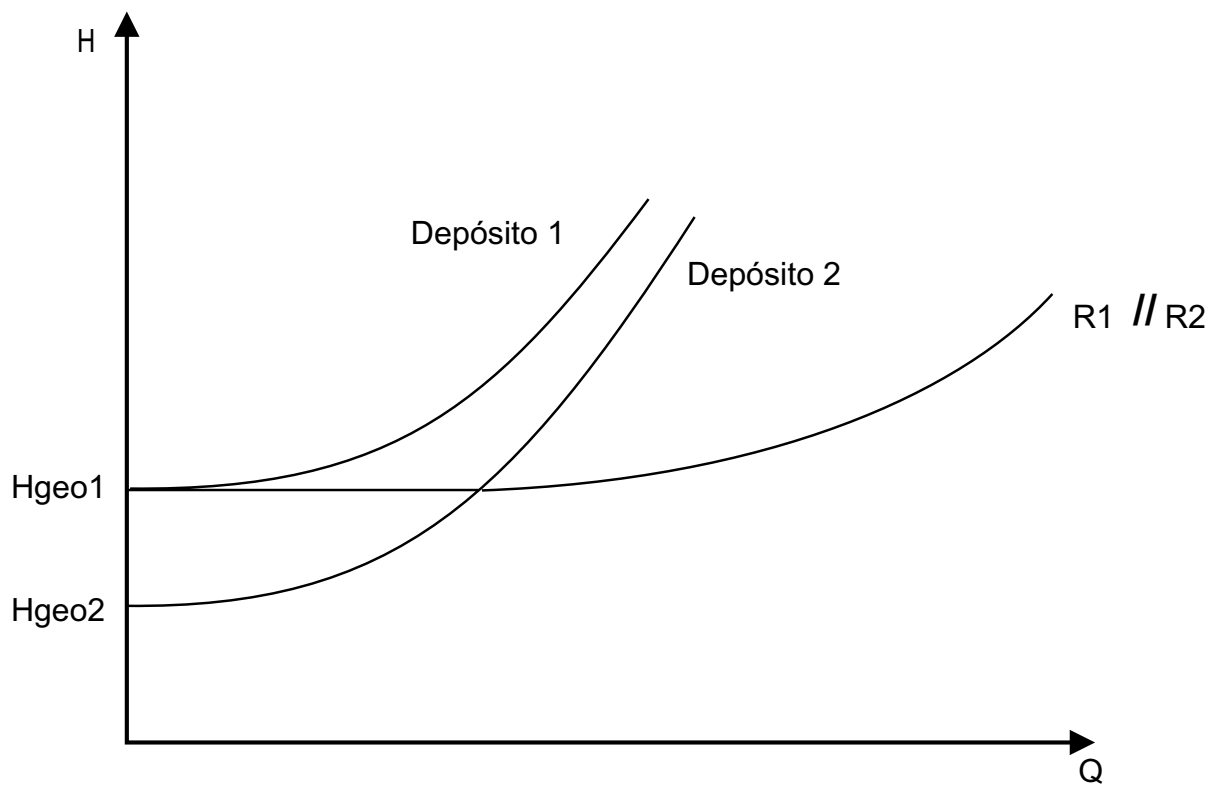
En ocasiones existe la necesidad de bombear hacia varios depósitos diferentes en forma simultánea o de a uno a la vez, etc. Puede ocurrir también que estos depósitos estén ubicados en niveles diferentes, como se muestra en la figura siguiente:



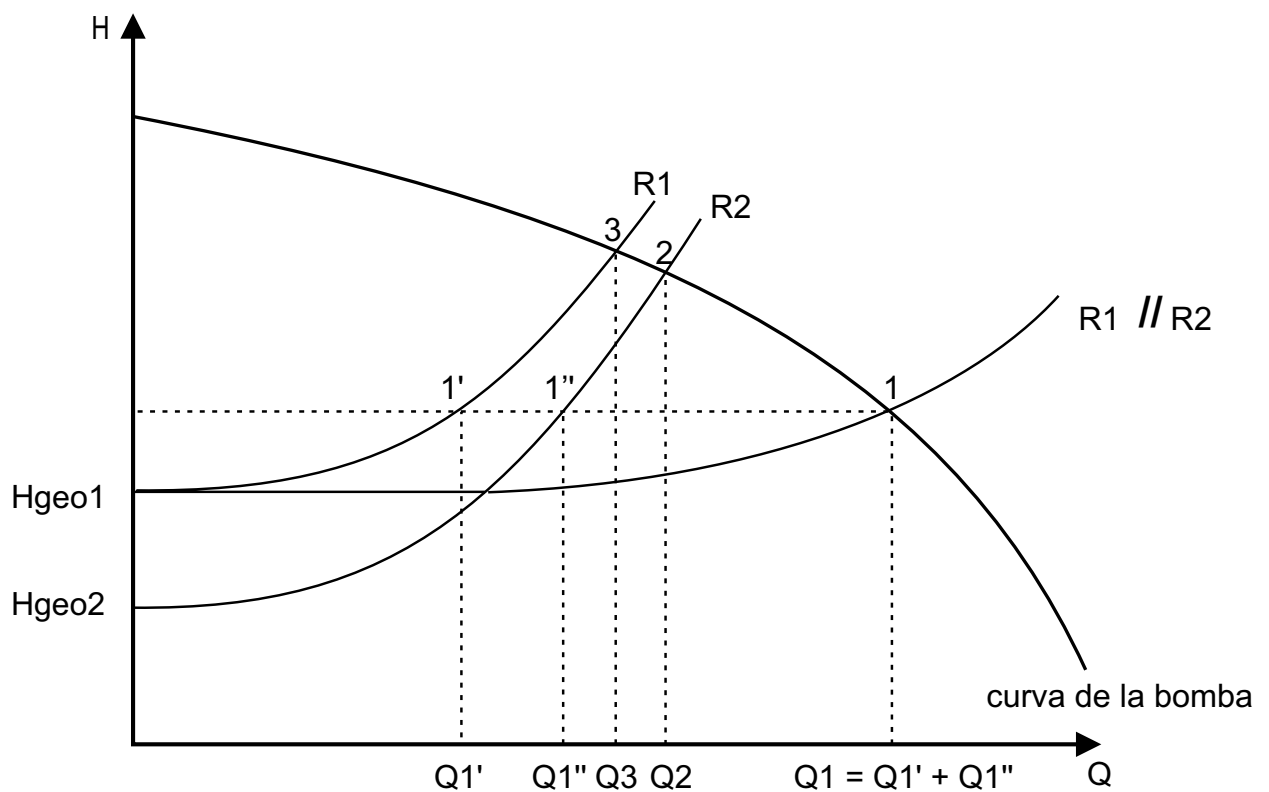
En este sistema, el equipo puede bombear el fluido hacia los depósitos 1 y 2, simultáneamente; pudiendo bombear hacia el depósito 1, o hacia el depósito 2, en forma independiente.

Para resolver este sistema, se debe proceder de la siguiente manera;

- Supondremos que el bombeo sólo se realiza hacia el **depósito 1**.  
Se grafica la curva correspondiente al depósito 1, a través de la tubería 1.
- Supondremos ahora que sólo el **depósito 2** será abastecido, graficando así la curva del sistema a través de la tubería 2.
- Supondremos ahora que los **depósitos 1 y 2** son abastecidos simultáneamente, a través de las tuberías 1 y 2. De acuerdo a la figura, notamos que las tuberías 1 y 2 están conectadas en paralelo.  
Grafiquemos entonces el resultado de la conexión en paralelo de las tuberías 1 y 2, obteniendo así la solución gráfica de este sistema.



Para tener una idea de la importancia de las curvas del sistema en estos casos, analizaremos las curvas del sistema conjuntamente con la curva de la bomba, asunto que estudiaremos más adelante.

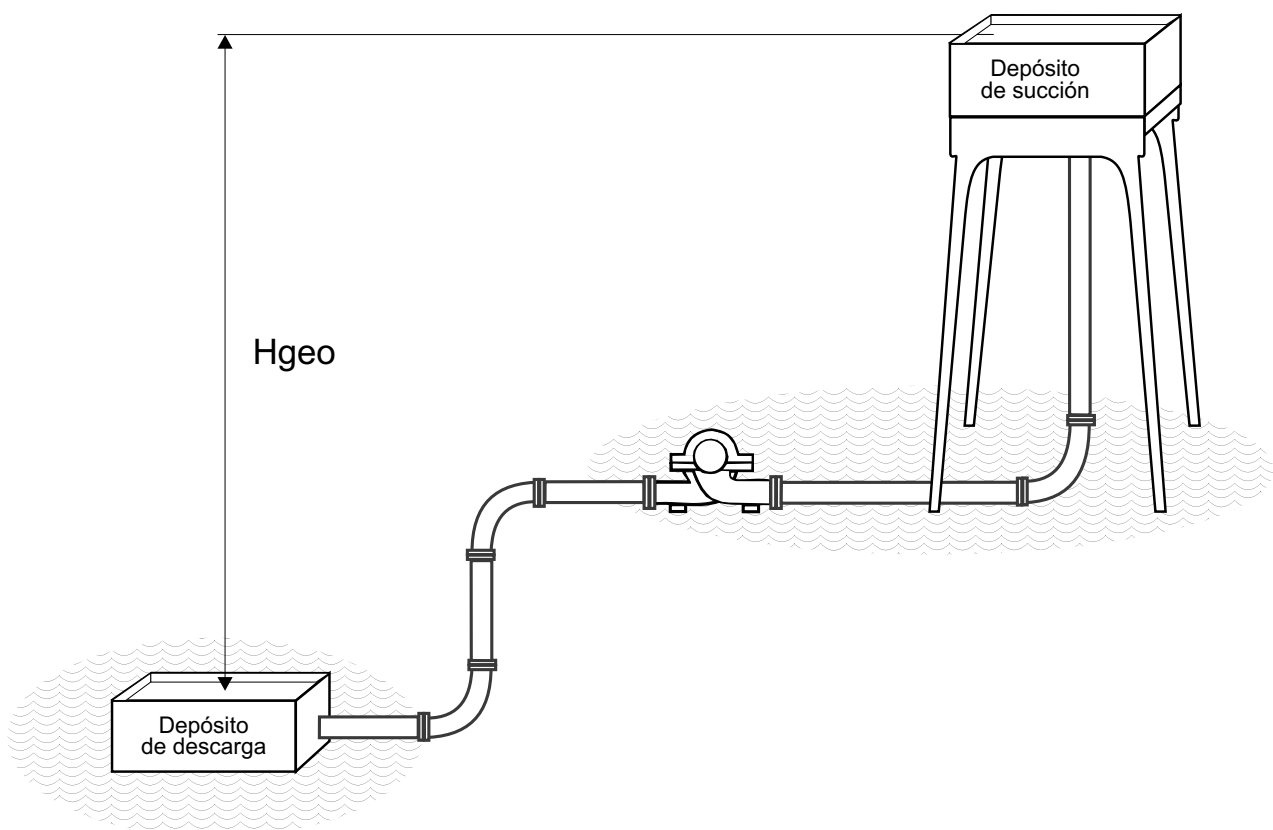


En el gráfico anterior, tenemos tres puntos de operación para las bombas:

- **PUNTO 1** - Punto de trabajo producto de la operación de la bomba en el sistema, cuando alimenta simultáneamente a los depósitos 1 y 2, siendo los puntos 1' y 1'' los correspondientes a los caudales que aporta cada depósito, en este caso:
- **PUNTO 1'** - Genera a  $Q_1'$ , que es el caudal que contribuye el depósito 1, cuando el equipo alimenta a los dos depósitos en forma simultánea.
- **PUNTO 1''** - Genera a  $Q_1''$ , que es el caudal que contribuye el depósito 2 cuando el equipo alimenta a los dos depósitos en forma simultánea.
- **PUNTO 2** - Punto de trabajo producto de la operación hacia el depósito 2, estando interrumpida la alimentación hacia el depósito 1, operación aislada, generando el caudal  $Q_2$
- **PUNTO 3** - Punto de trabajo producto de la operación hacia el depósito 1, estando interrumpida la alimentación hacia el depósito 2, operación aislada, generando el caudal  $Q_3$

## 2.17 ABASTECIMIENTO POR GRAVEDAD

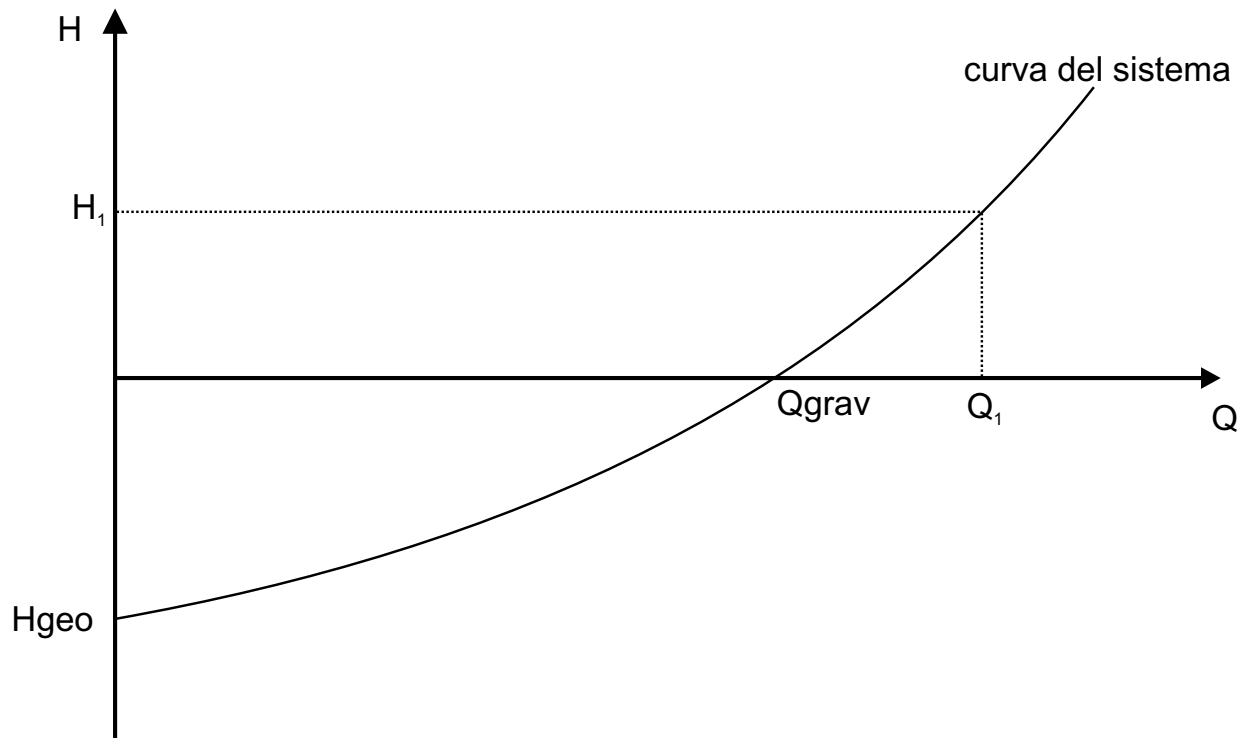
Existen sistemas donde el depósito de succión está ubicado en una cuota superior al depósito de descarga. En estos casos, la energía potencial del fluido, representada por su altura estática, hace que el líquido fluya hacia el depósito de descarga, gracias a la acción de la gravedad, sin necesidad de utilizar una bomba.



A lo largo del tramo entre los depósitos ocurren pérdidas de carga, que como sabemos, varían con el cuadrado del caudal. Así, cuando estas pérdidas se igualan a la altura estática, se tiene el caudal máximo del sistema, obtenido sólo por la gravedad ( $Q_{\text{grav}}$ ).

Si deseáramos aumentar el caudal por sobre este límite, por ejemplo, un caudal  $Q_1$ , será necesario introducir una bomba en el sistema, para que esa bomba genere una altura manométrica  $H_1$ , correspondiente a las pérdidas producidas por el caudal  $Q_1$ .

La curva siguiente ilustra esta situación.



## **MÓDULO 3**

### ***Hidráulica de Bombas Centrífugas***



## ÍNDICE

|             |                                                                                |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>3</b>    | <b>Introducción</b>                                                            | 75 |
| <b>3.1</b>  | <b>Curvas características de las bombas</b>                                    | 77 |
| 3.1.1       | Obtención de la curva característica de una bomba                              | 77 |
| <b>3.2</b>  | <b>Tipos de curvas características de las bombas</b>                           | 79 |
| 3.2.1       | Curva tipo estable o tipo “rising                                              | 79 |
| 3.2.2       | Curva tipo inestable o tipo “drooping”                                         | 80 |
| 3.2.3       | Curva tipo inclinado acentuado o tipo “steep”                                  | 80 |
| 3.2.4       | Curva tipo plana o tipo “flat”                                                 | 80 |
| 3.2.5       | Curva tipo inestable                                                           | 81 |
| <b>3.3</b>  | <b>Curva de potencia consumida por una bomba</b>                               | 81 |
| 3.3.1       | Tipos de curvas de potencia consumida                                          | 81 |
| 3.3.2       | Curva de potencia consumida de una bomba de flujo mixto o semi-axila           | 82 |
| 3.3.3       | Curva de potencia consumida de una bomba de flujo radial                       | 82 |
| 3.3.4       | Curva de potencia consumida de una bomba de flujo axial                        | 82 |
| <b>3.4</b>  | <b>Cálculo de la potencia consumida por una bomba</b>                          | 83 |
| 3.4.1       | Potencia hidráulica                                                            | 83 |
| 3.4.2       | Potencia consumida por la bomba                                                | 83 |
| <b>3.5</b>  | <b>Rendimiento</b>                                                             | 83 |
| 3.5.1       | Curvas de rendimiento                                                          | 84 |
| 3.5.2       | Curvas de iso-rendimiento                                                      | 84 |
| 3.5.3       | Ejemplo de curvas de iso-rendimiento                                           | 85 |
| <b>3.6</b>  | <b>Curva de NPSH ( Net Positive Suction Head )</b>                             | 86 |
| <b>3.7</b>  | <b>Consideraciones finales</b>                                                 | 86 |
| 3.7.1       | Ejemplo de una curva característica completa                                   | 87 |
| <b>3.8</b>  | <b>Punto de operación</b>                                                      | 88 |
| 3.8.1       | Factores que modifican el punto de operación                                   | 88 |
| 3.8.2       | Cambio del punto de operación actuando sobre el sistema                        | 89 |
| 3.8.3       | Cambio del punto de operación actuando en la bomba                             | 90 |
| <b>3.9</b>  | <b>Efecto del cambio de la velocidad de rotación en las curvas caracter.</b>   | 90 |
| <b>3.10</b> | <b>Efecto por la variación del diámetro del rodete en las curvas caracter.</b> | 92 |
| 3.10.1      | Cálculo del diámetro del rodete                                                | 93 |
| <b>3.11</b> | <b>Formas de reducir el diámetro del rodete</b>                                | 95 |
| <b>3.12</b> | <b>Velocidad específica o rotación específica</b>                              | 97 |
| 3.12.1      | Aplicaciones de la velocidad específica                                        | 97 |
| <b>3.13</b> | <b>Tipos de rodetes para diferentes velocidades específicas</b>                | 98 |



## **HIDRÁULICA DE BOMBAS CENTRÍFUGAS**

### **3 INTRODUCCIÓN**

En este módulo, abordaremos temas de gran importancia para el correcto dimensionamiento de bombas centrífugas, es decir, estudiaremos las curvas características de las bombas.

Definiremos la altura manométrica, potencia consumida, caudal, entre otros conceptos, veremos como el fabricante obtiene la curva de una bomba; los diversos tipos de curva, etc. Por consiguiente, la perfecta comprensión de este módulo es de extrema importancia para el personal involucrado con las bombas centrífugas.



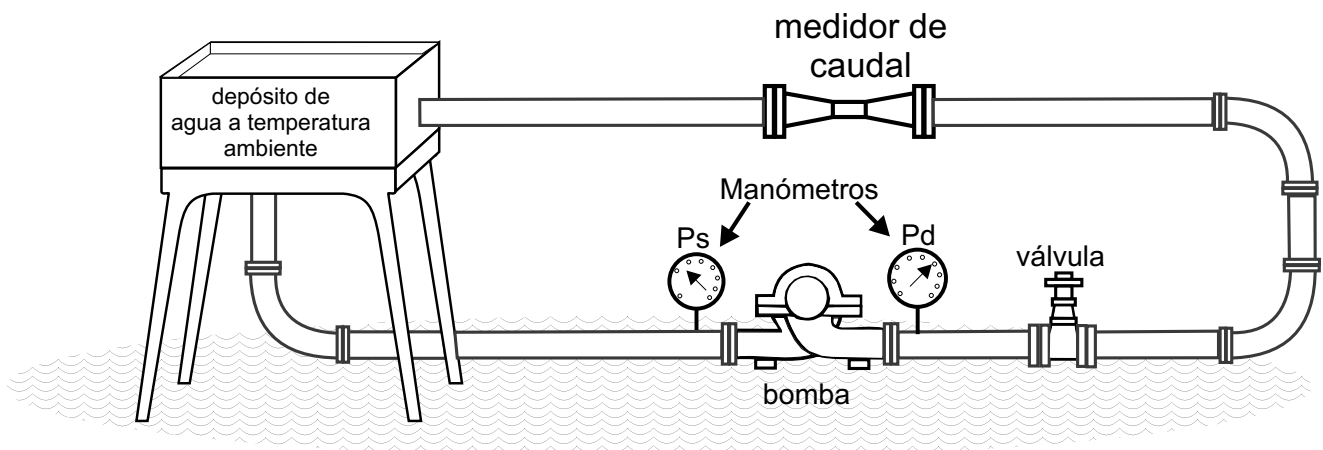
### 3.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS

Las curvas características de las bombas son representaciones gráficas que muestran el funcionamiento de la bomba, obtenidas a través de las experiencias del fabricante, los que construyen las bombas para vencer diversas alturas manométricas con diversos caudales, verificando también la potencia absorbida y la eficiencia de la bomba.

#### 3.1.1 OBTENCIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE UNA BOMBA

Los ensayos de las curvas características de las bombas son realizados por el fabricante del equipo, en bancos de prueba equipados para tal servicio.

De una manera simplificada, las curvas son graficadas de la siguiente forme, conforme al siguiente esquema.



Siendo considerado que:

- **Ps** es la presión de succión en el flange de succión de la bomba;
- **Pd** es la presión de descarga en el flange de descarga de la bomba;
- La bomba en cuestión tiene un diámetro de rodete conocido;
- Existe una válvula ubicada poco después de flange de descarga de la bomba, con el propósito de controlar el caudal;
- Existe un medidor de caudal, sea el que fuera, para obtener los valores de caudal en cada instante.

1º - Se pone la bomba en funcionamiento, con la válvula de la descarga totalmente cerrada ( $Q = 0$ ); obteniéndose la presión entregada por la misma, que será igual a la presión descarga menos la presión de la succión. Con esa presión diferencial, se obtiene la altura manométrica entregada por la bomba, a través de la fórmula:

$$H = \frac{P_d - P_s}{\gamma}$$

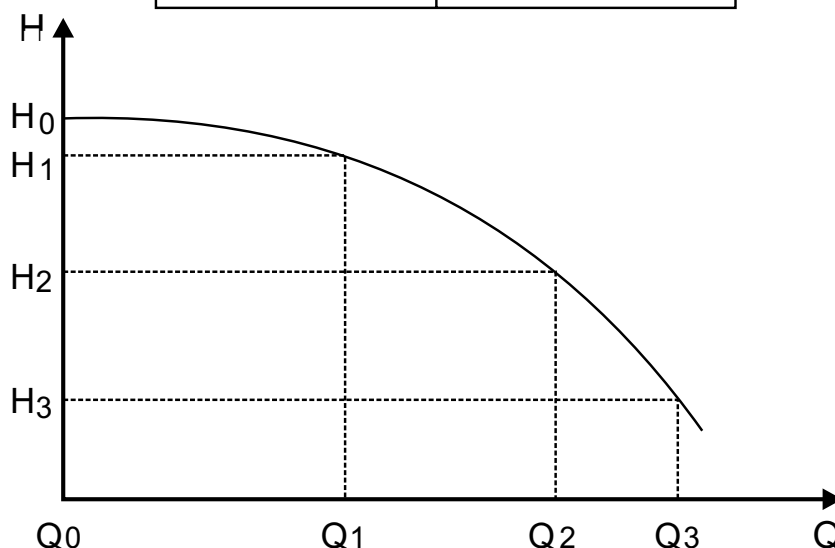
Esa altura es normalmente conocido como la altura de "**shut-off**", en otros términos, altura desarrollada por la bomba correspondiente a caudal cero, que llamaremos  $H_0$ .

2º - Se abre parcialmente la válvula, obteniéndose así un nuevo caudal, determinado por el medidor de caudal, que nosotros llamaremos  $Q_1$  y se procede de manera análoga a la anterior, para determinar la nueva altura desarrollada por la bomba en una nueva condición que llamaremos  $H_1$ .

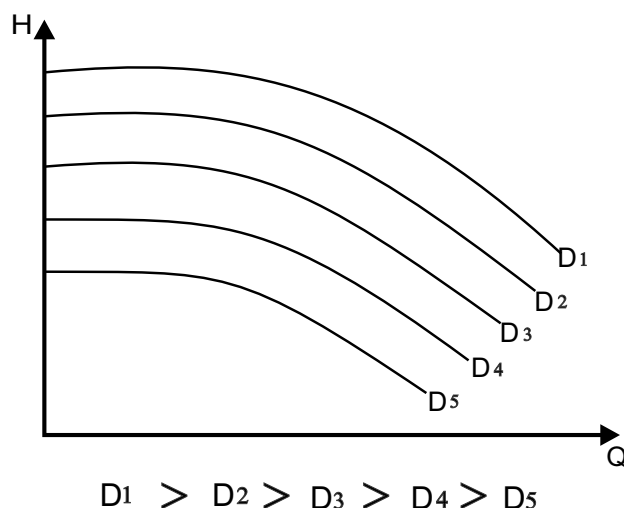
3º - Se abre un poco más la válvula, obteniéndose así un caudal  $Q_3$  y una altura  $H_3$ , de la misma forma anteriormente descrita.

4º - Realizamos el proceso algunas veces, obteniendo otros puntos de caudal y altura, con los que graficaremos la curva, dónde en el eje de las abscisas o eje horizontal pondremos los valores de los caudales y en el eje de las ordenadas o eje vertical los valores de las alturas manométricas.

| Caudal (Q) | altura (H) |
|------------|------------|
| $Q_0$      | $H_0$      |
| $Q_1$      | $H_1$      |
| $Q_2$      | $H_2$      |
| $Q_3$      | $H_3$      |



Normalmente, los fabricantes alteran los diámetros de los rodets para un mismo equipo, obteniéndose así que la curva característica de la bomba es una familia de curvas de diámetros de rodets, como la siguiente.

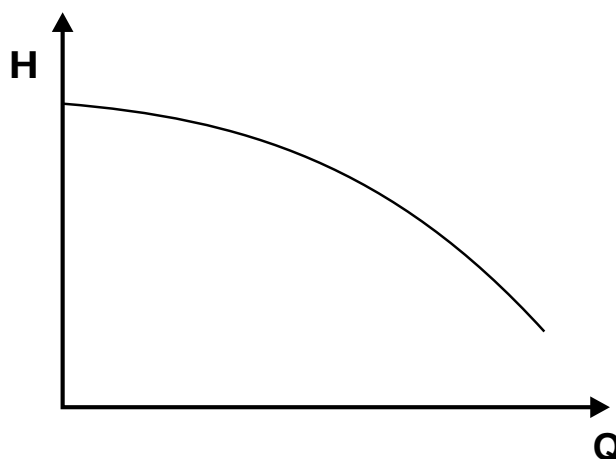


### 3.2 TIPOS DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS

Dependiendo del tipo de bomba, del diámetro de los rodets, de la cantidad de álabes de los rodets, del ángulo de inclinación de estos álabes, las curvas características de las bombas, también llamadas como curvas características del rodete, se pueden presentar de varias formas, como muestran las ilustraciones siguientes.

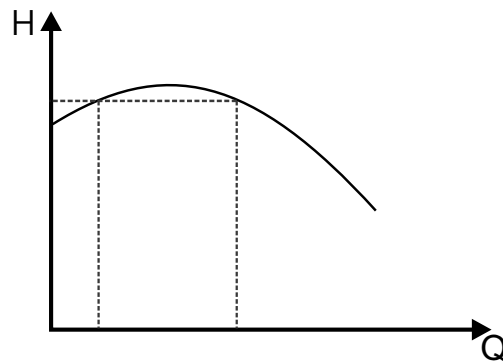
#### 3.2.1 CURVA TIPO ESTABLE O TIPO RISING

En este tipo de curva, la altura aumenta continuamente como la disminución del caudal. La altura correspondiente al caudal cero es aproximadamente entre un 10 a 20% mayor que la altura en el punto de mayor eficiencia.



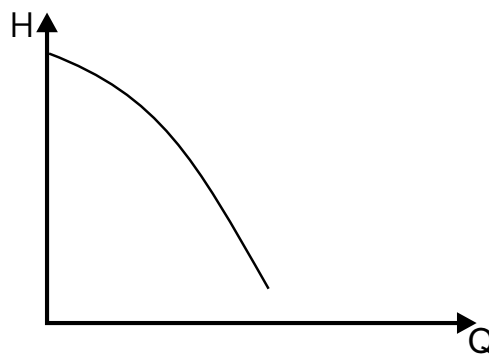
### 3.2.2 CURVA TIPO INESTABLE O TIPO DROOPING

En esta curva, la altura producida a caudal cero es menor que otras correspondientes a algunos caudales. En este tipo de curva, se observa que para las alturas superiores al “shut-off”, tenemos dos caudales diferentes, para una misma altura.



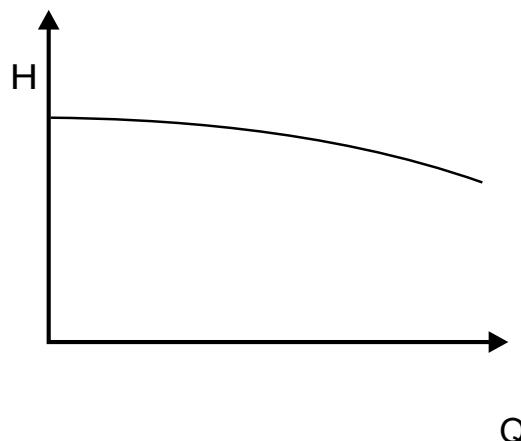
### 3.2.3 CURVA TIPO INCLINADO ACENTUADO O TIPO STEEP

Es una curva del tipo estable, en que existe una gran diferencia entre la altura entregada a caudal cero (shut-off) y la entregada para el caudal de diseño, es decir, aproximadamente entre 40 y 50%.



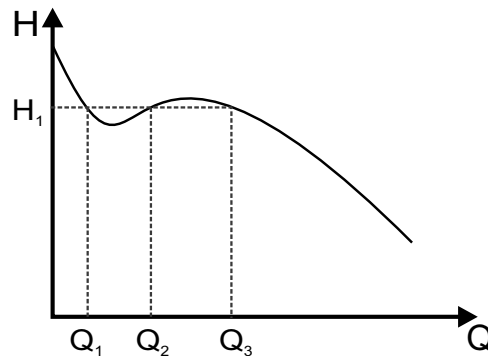
### 3.2.4 CURVA TIPO PLANA O TIPO FLAT

En esta curva, la altura varía muy poco con el caudal, desde el shut-off hasta el punto de diseño.



### 3.2.5 CURVA TIPO INESTABLE

Es la curva en la que para una misma altura, se tienen dos o más caudales en un cierto tramo de inestabilidad. Es idéntica a la curva drooping.



## 3.3 CURVA DE POTENCIA CONSUMIDA POR LA BOMBA

En función de las características eléctricas del motor que acciona la bomba, se determina la potencia que está siendo consumida por ella, es decir, junto con el levantamiento de los datos para graficar la curva de caudal versus altura ( $Q$  v/s  $H$ ), como vimos previamente, en el panel de comando del motor que acciona la bomba que está siendo testada, se instalan instrumentos de medición eléctrica, como por ejemplo, el wattmetro, amperímetro, voltímetro, etc, que entregan los datos para graficar la curva de potencia consumida versus el caudal ( $P$  v/s  $Q$ ).

Esas curvas son dibujadas en un gráfico dónde en el eje de las abscisas o eje horizontal, tenemos los valores del caudal ( $Q$ ) y en el eje de las ordenadas o eje vertical los valores de la potencia consumida ( $P$ ).

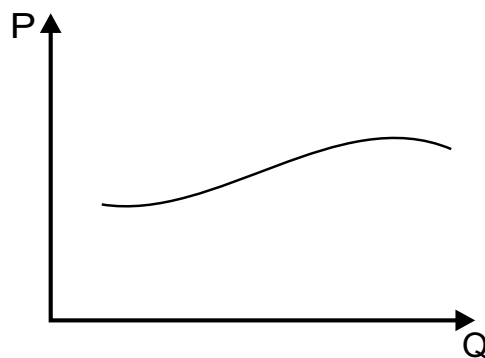
### 3.3.1 TIPOS DE CURVAS DE POTENCIA CONSUMIDA

Las curvas de potencia versus el caudal también poseen características específicas de acuerdo con la forma en que se presentan.

Las bombas centrífugas se subdividen de acuerdo a sus tres tipos de flujos: radial, axial y mixto. Para cada tipo de flujo, se verifica la existencia de curvas de potencias consumidas diferentes de acuerdo a lo siguiente:

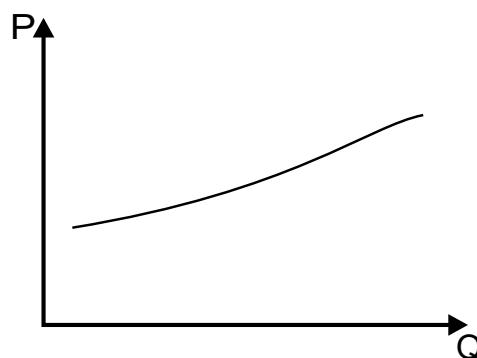
### 3.3.2 CURVA DE POTENCIA CONSUMIDA POR UNA BOMBA DE FLUJO MIXTO O SEMI-AXIAL

En este tipo de curva, la potencia consumida aumenta hasta cierto punto manteniéndose constante para ciertos valores siguientes de caudal para disminuir en seguida. Esta curva tiene la ventaja de no sobrecargar excesivamente el motor en ningún punto de trabajo, entendiendo que este tipo de curva no se obtiene en todas las bombas. Estas curvas también son llamadas de “no over loading” (no sobrecarga).



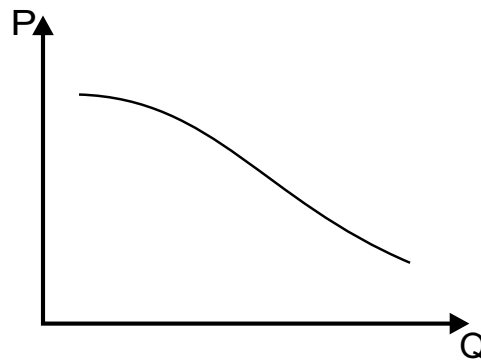
### 3.3.3 CURVA DE POTENCIA CONSUMIDA POR UNA BOMBA DE FLUJO RADIAL

En este tipo de curva, la potencia aumenta continuamente con el caudal. El motor debe ser dimensionado para que la potencia cubra todos los puntos de funcionamiento. En sistemas con alturas variables, es necesario verificar las alturas mínimas que pueden ocurrir, para evitar un peligro de sobrecarga. Estas curvas también son llamadas de “over loading”.



### 3.3.4 CURVA DE POTENCIA CONSUMIDA POR UNA BOMBA DE FLUJO AXIAL

En este tipo de curva, la potencia consumida aumenta hasta cierto valor, manteniéndose constante para los valores siguientes de caudal y disminuyendo en seguida.



### 3.4 CÁLCULO DE LA POTENCIA CONSUMIDA POR UNA BOMBA

#### 3.4.1 POTENCIA HIDRÁULICA

El trabajo útil realizado por una bomba centrífuga es naturalmente el producto del peso del líquido movido por la altura desarrollada. Si consideramos este trabajo por unidad de tiempo, tendremos la potencia hidráulica, que se expresa por la fórmula:

$$P_h = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{270}$$

$P_h \rightarrow$  potencia hidráulica, en CV

$\gamma \rightarrow$  peso específico del fluido, en  $\text{kgf/dm}^3$

$Q \rightarrow$  caudal, en  $\text{m}^3/\text{h}$

$H \rightarrow$  altura manométrica, en m

270  $\rightarrow$  factor de conversión

#### 3.4.2 POTENCIA CONSUMIDA POR LA BOMBA

Para calcular la potencia consumida por la bomba, basta con utilizar el valor del rendimiento de la bomba, porque la potencia hidráulica no es igual a la potencia consumida, ya que existen pérdidas debidas al roce en el propio motor, en la bomba, etc.

### 3.5 RENDIMIENTO

Se conoce como rendimiento a la relación entre la potencia hidráulica y la potencia consumida por la bomba.

$$\eta = \frac{\text{Potencia hidráulica}}{\text{Potencia consumida}}$$

Entonces:

$$\eta = \frac{P_h}{P} \rightarrow \eta = \frac{\gamma \cdot H \cdot Q}{P} \rightarrow P = \frac{\gamma \cdot H \cdot Q}{\eta}$$

Análogamente al desarrollo realizado para la potencia hidráulica, podemos escribir la siguiente fórmula:

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{270 \cdot \eta}$$

$P \rightarrow$  potencia consumida por la bomba, en CV

$\gamma \rightarrow$  peso específico del fluido, en  $\text{kgf/dm}^3$

$Q \rightarrow$  caudal, en  $\text{m}^3/\text{h}$

$H \rightarrow$  altura manométrica, en m

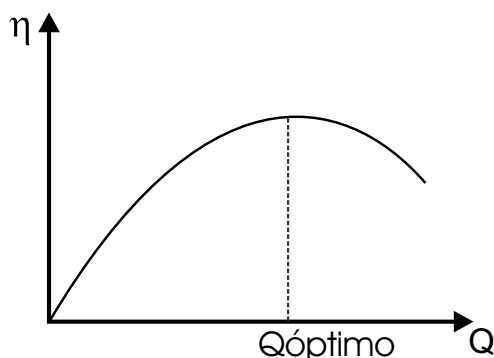
$\eta \rightarrow$  rendimiento, leído de la curva de la bomba

270  $\rightarrow$  factor de conversión

### 3.5.1 CURVAS DE RENDIMIENTO

Como vimos, el rendimiento se obtiene de la división de la potencia hidráulica por la potencia consumida.

La representación gráfica del rendimiento es la siguiente:



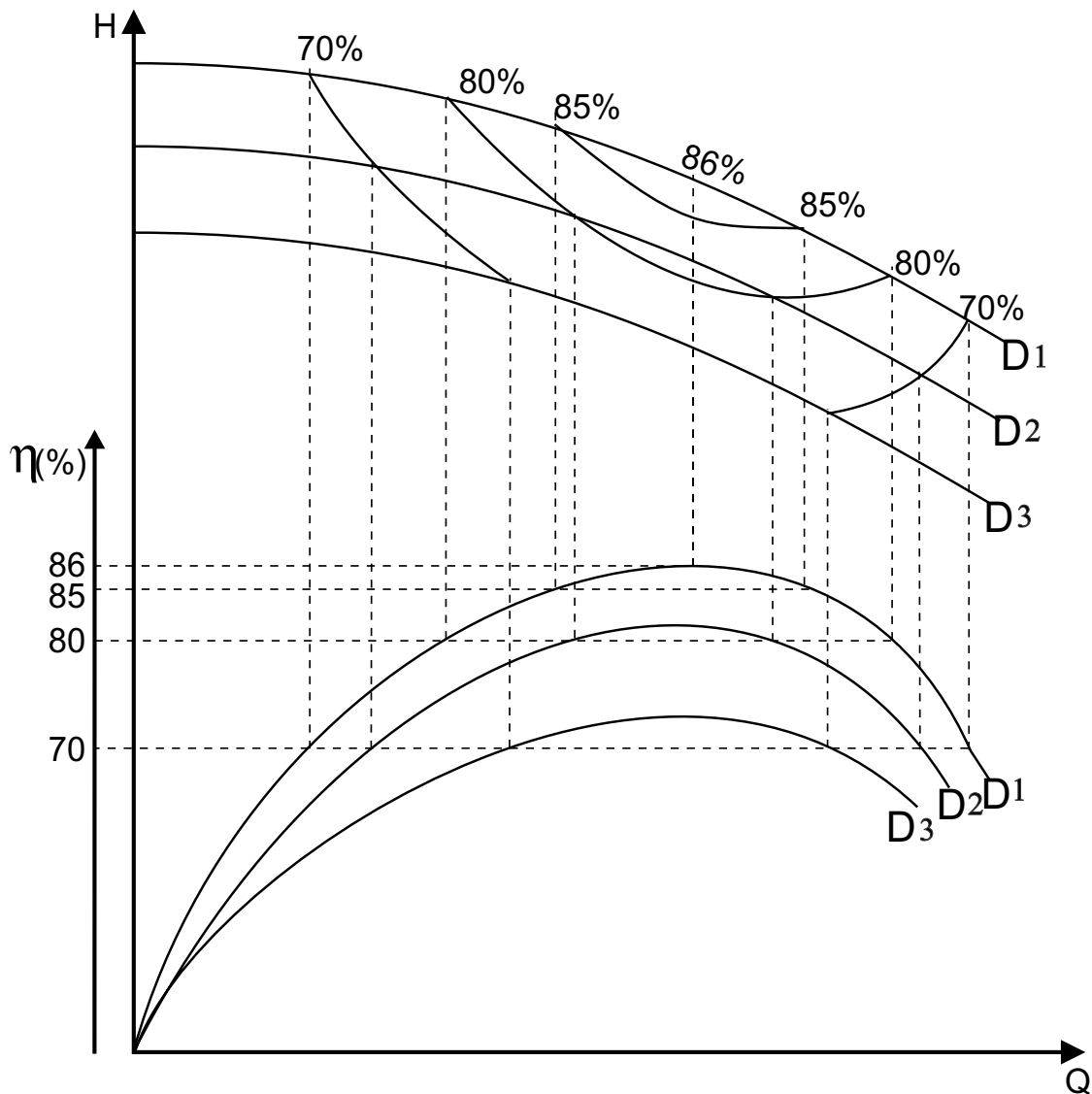
Donde Qóptimo es el punto de mejor eficiencia de la bomba, para el rodete considerado.

### 3.5.2 CURVAS DE ISO-RENDIMIENTO

Toda bomba presenta limitación en los rodets, es decir, la familia de rodets en una curva característica va desde un diámetro máximo a un diámetro mínimo. El diámetro máximo es consecuencia del espacio físico existente dentro de la bomba y el diámetro mínimo es limitado hidráulicamente, es decir, si utilizamos diámetros menores de los indicados en las curvas de las bombas, tendríamos problemas de operación en la bomba, tales como bajos valores de caudal, bajas alturas manométrica, bajos rendimientos, etc.

Las curvas de rendimiento de las bombas, que se encuentran en los catálogos técnicos de los fabricantes, se presentan en algunos casos graficadas individualmente, es decir, el rendimiento obtenido para cada diámetro de rodete en función del caudal. En otros casos, que son los más comunes, se grafican sobre las curvas de los diámetros de los rodetes. Esta nueva presentación se basa en graficar sobre la curva de Q x H de cada rodete, el valor de rendimiento común para todos los demás; posteriormente se unen los puntos de ese igual rendimiento, formando así las curvas de rendimiento de las bombas. Esas curvas son también llamadas como curvas de iso-rendimiento, representadas como sigue:

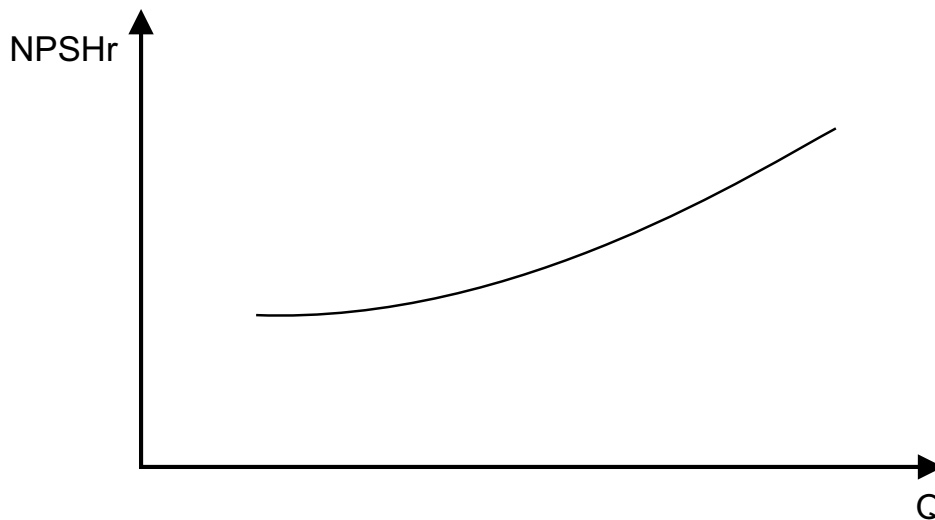
### 3.5.3 EJEMPLO DE CURVAS DE ISO-RENDIMIENTO



### 3.6 CURVA DE NPSH (NET POSITIVE SUCTION HEAD)

Actualmente, toda curva característica de una bomba, incluye la curva de NPSH requerido en función de caudal. Esta curva representa la energía mínima necesaria que el líquido debe tener, en unidades absolutas, en el flange de succión de la bomba, para garantizar su perfecto funcionamiento.

Su representación gráfica es la siguiente.



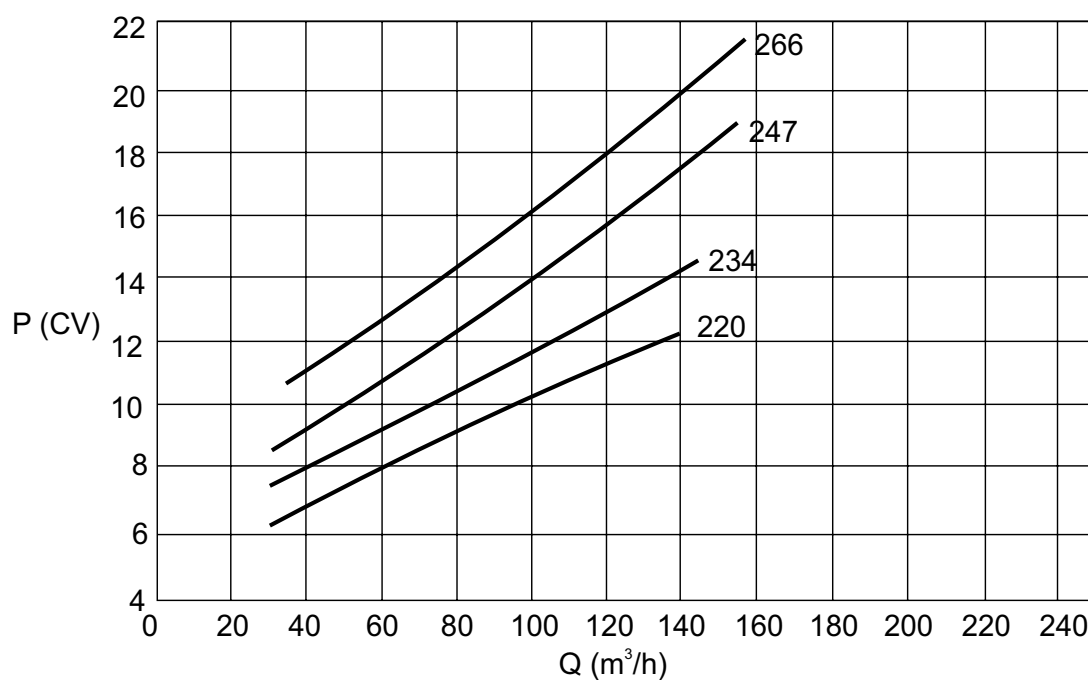
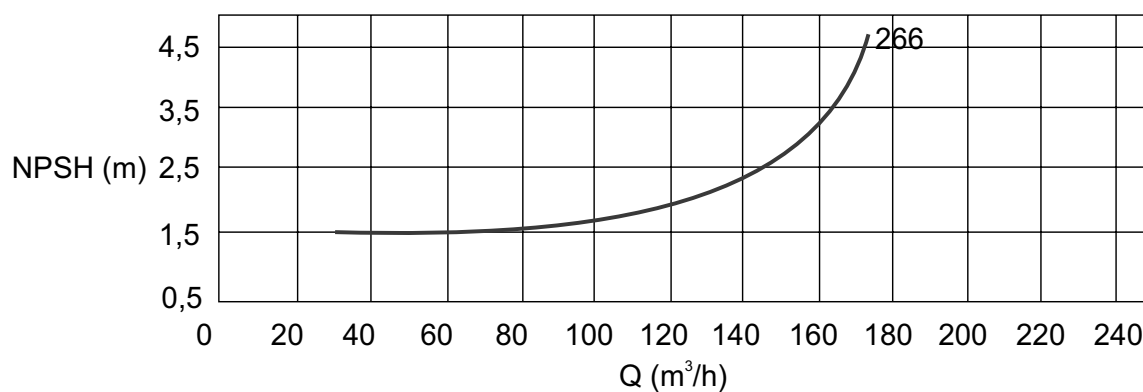
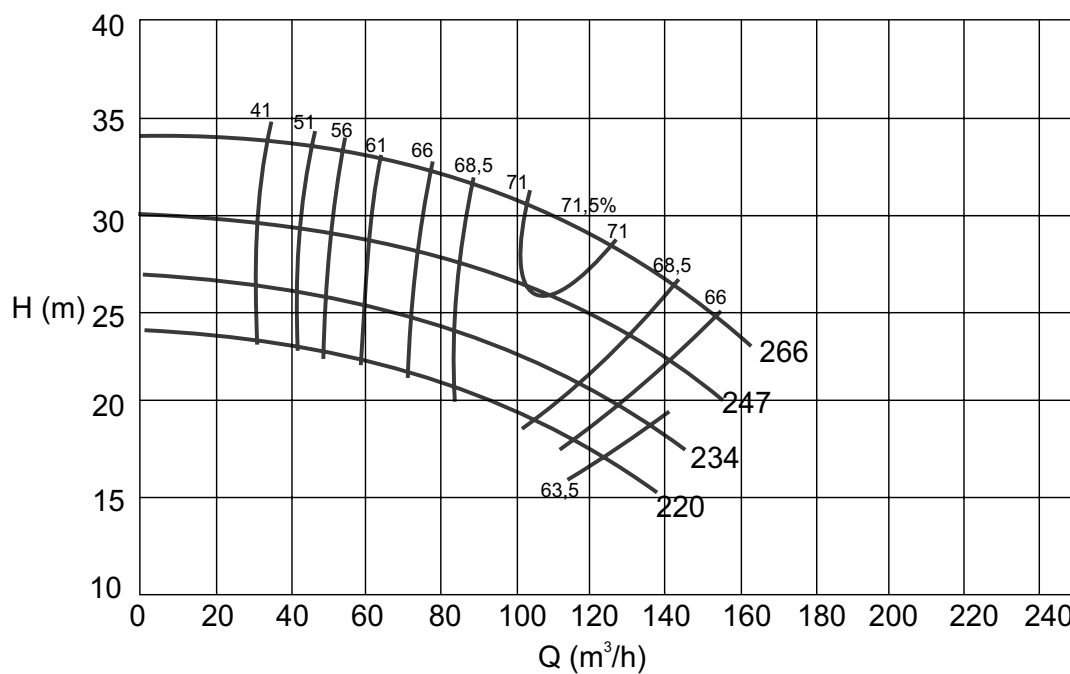
**OBS:** Este tema será estudiado más detalladamente en el próximo módulo.

### 3.7 CONSIDERACIONES FINALES

- Las curvas características presentadas por los fabricantes, son obtenidas en bancos de pruebas, bombeando agua limpia a temperatura ambiente.
- La curva (Q v/s H), representa la energía entregada expresada en altura de columna de líquido.
- La curva de (Q v/s NPSHr), representa la energía requerida en el flange de succión de la bomba.
- La curva de (Q v/s  $\eta$ ), y la curva de (Q v/s P), representan los rendimientos y potencias consumidas por la bomba, cuando trabaja con agua.
- Para el bombeo de fluidos con viscosidades diferente a la del agua, es necesario realizar una corrección a estas curvas para esta nueva condición de trabajo. Este tema se abordará con más detalles en un próximo módulo.

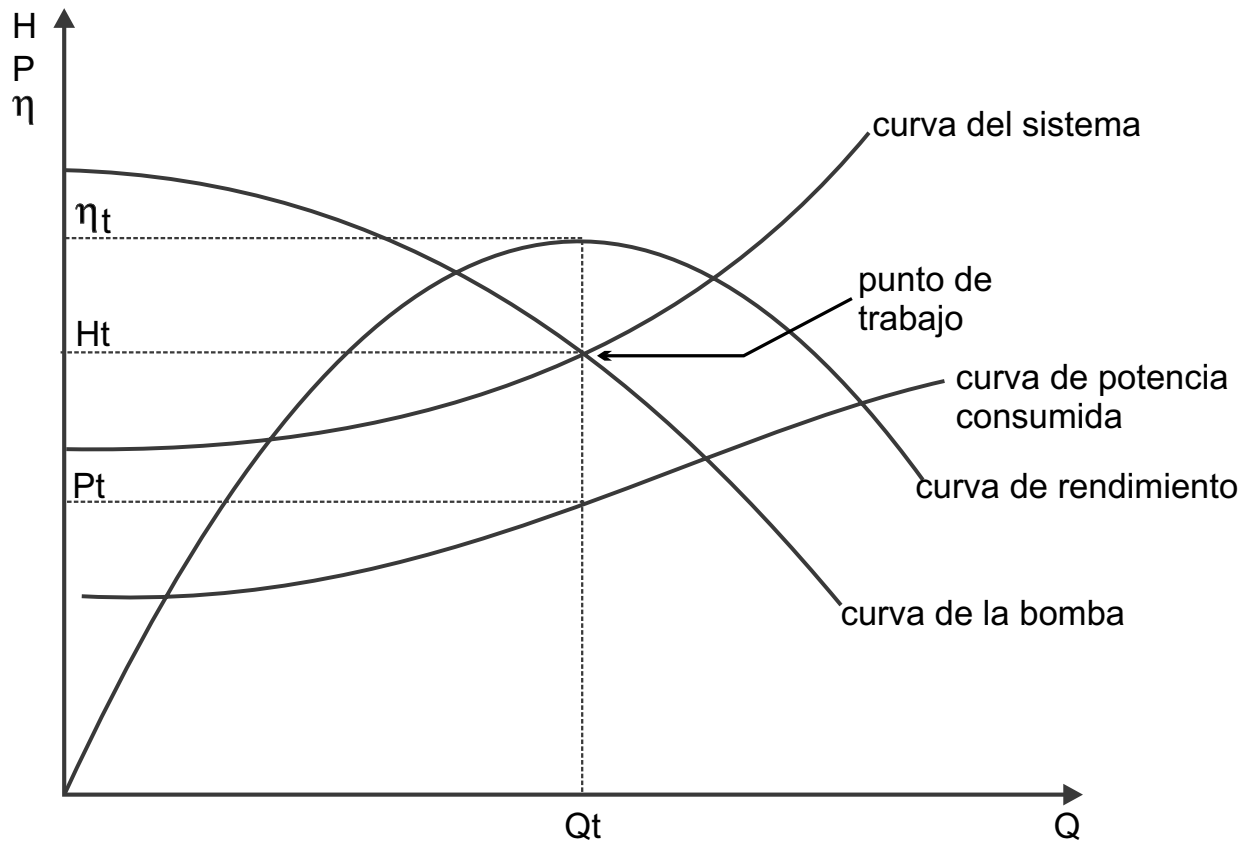
### 3.7.1 EJEMPLO DE UNA CURVA CARACTERÍSTICA COMPLETA

KSB Meganorm 80 - 250 - IV polos (1750 rpm)



### 3.8 PUNTO DE OPERACIÓN

Si dibujamos la curva del sistema en el mismo gráfico donde está la curva característica de la bombas, obtendremos el punto de operación normal, de la intersección de estas curvas.



La curva muestra que esta bomba tiene como punto normal de operación un:

- Caudal ( $Q_t$ )
- Altura ( $H_t$ )
- Potencia consumida ( $P_t$ )
- Rendimiento en el punto de trabajo ( $\eta_t$ )

#### 3.8.1 FACTORES QUE MODIFICAN EL PUNTO DE OPERACIÓN

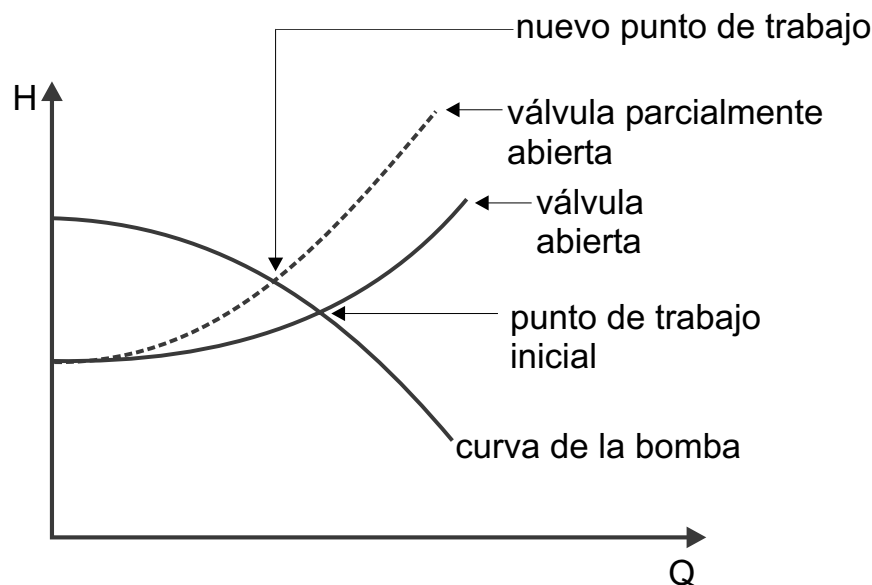
Existen diversas maneras de modificar el punto de operación y mover el punto de encuentro de las curvas de la bomba y del sistema.

Estas consisten en modificar la curva del sistema, la curva de la bomba o ambas.

### 3.8.2 CAMBIO DEL PUNTO DE OPERACIÓN ACTUANDO SOBRE EL SISTEMA

Alterar la curva del sistema consiste básicamente en alterar el sistema para el cual fue levantada la curva y esto se puede realizar de innumerables maneras.

El cambio más usual de la curva del sistema es realizado a través del cierre parcial de la válvula de la descarga, con esto aumenta la pérdida de carga, haciendo que la curva del sistema se mueva hacia la izquierda. De esta forma obtendremos, para una bomba con una curva estable, una disminución del caudal.



Es importante resaltar que el mismo efecto sería obtenido con el cierre parcial de la válvula de succión; sin embargo este procedimiento no es utilizado por la influencia indeseable en la condición de succión, conforme veremos en el próximo módulo.

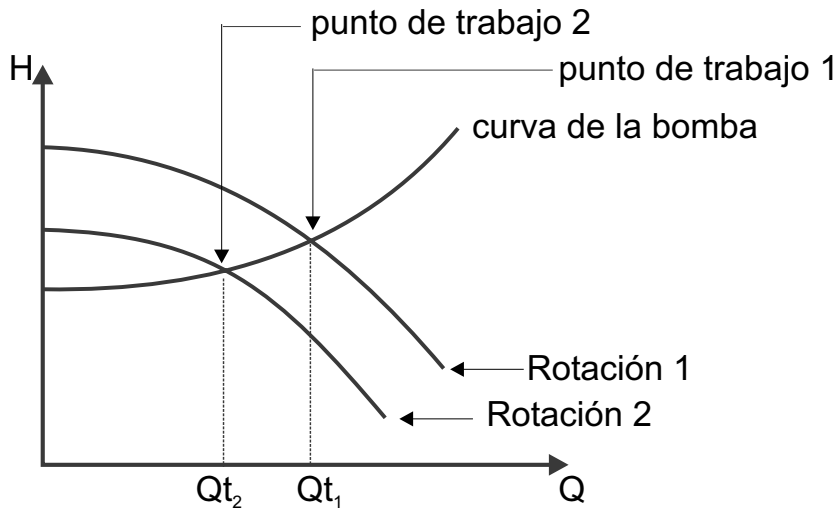
Existen otras formas para alterar substancialmente el sistema, las que no son propiamente una variación en el punto de trabajo en el sistema anterior sino un punto de trabajo en un sistema nuevo. Estas alteraciones serían, por ejemplo:

- variación en las presiones de los depósitos;
- cambio en el diámetro de las tuberías;
- agregar o quitar accesorios en la línea;
- modificación del "lay-out" de las tuberías;
- cambios en las cotas de los líquidos;
- etc.

### 3.8.3 CAMBIO DEL PUNTO DE OPERACIÓN ACTUANDO EN LA BOMBA

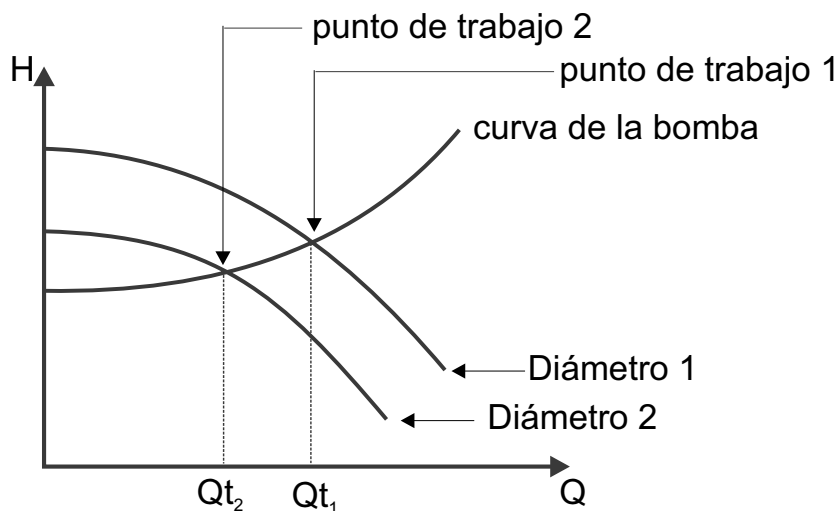
Las maneras más usadas para modificar la curva característica de una bomba son, el variar la velocidad de rotación de la bomba o modificar el diámetro del rodete de la bomba.

- variación de la velocidad de rotación de la bomba



**rotación 1 > rotación 2**

- variación del diámetro del rodete de la bomba



**diámetro 1 > diámetro 2**

### 3.9 EFECTO DEL CAMBIO DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN EN LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

Existe una proporcionalidad entre los valores de caudal (Q), altura (H) y potencia (P) con la velocidad de rotación. Siendo así, siempre que cambiemos la velocidad de rotación de una bomba habrá, en consecuencia, alteración en las curvas características, siendo la corrección para la nueva velocidad de rotación hecha a partir de las siguientes relaciones:

1 - El caudal es proporcional a la velocidad de rotación.

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{n}{n_1}$$

Q = Caudal para la velocidad de rotación conocida  
 $Q_1$  = Caudal en la nueva velocidad de rotación  
 n = Velocidad de rotación conocida  
 $n_1$  = Nueva Velocidad de rotación

2 - La altura manométrica varía con el cuadrado de la velocidad de rotación.

$$\frac{H}{H_1} = \left( \frac{n}{n_1} \right)^2$$

H = Altura para la velocidad de rotación conocida  
 $H_1$  = Altura en la nueva velocidad de rotación  
 n = Velocidad de rotación conocida  
 $n_1$  = Nueva Velocidad de rotación

3 - La potencia absorbida varía con el cubo de la velocidad de rotación.

$$\frac{P}{P_1} = \left( \frac{n}{n_1} \right)^3$$

P = Potencia en la velocidad de rotación conocida  
 $P_1$  = Potencia en la nueva velocidad de rotación  
 n = Velocidad de rotación conocida  
 $n_1$  = Nueva Velocidad de rotación

Es decir:

$$\frac{n}{n_1} = \frac{Q}{Q_1} = \sqrt{\frac{H}{H_1}} = \sqrt[3]{\frac{P}{P_1}}$$

Siempre que cambiemos la velocidad de rotación, se debe hacer la corrección de las curvas características a través de las relaciones presentadas previamente para la obtención del nuevo punto de trabajo. Las relaciones vistas previamente también son llamadas de **leyes de semejanza**, **leyes de similitud** o **leyes de afinidad**.

### 3.10 EFECTO POR LA VARIACIÓN DEL DIÁMETRO DEL RODETE EN LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

Si reducimos el diámetro de un rodete radial de una bomba, manteniendo la misma velocidad de rotación, la curva característica de la bomba se altera aproximadamente conforme con las siguientes ecuaciones:

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{D}{D_1}$$

Q = Caudal para un diámetro conocido  
 Q<sub>1</sub> = Caudal para un nuevo diámetro  
 D = Diámetro conocido  
 D<sub>1</sub> = Diámetro nuevo

$$\frac{H}{H_1} = \left( \frac{D}{D_1} \right)^2$$

H = Altura para un diámetro conocido  
 H<sub>1</sub> = Altura para un nuevo diámetro  
 D = Diámetro conocido  
 D<sub>1</sub> = Diámetro nuevo

$$\frac{P}{P_1} = \left( \frac{D}{D_1} \right)^3$$

P = Potencia para un diámetro conocido  
 P<sub>1</sub> = Potencia para un nuevo diámetro  
 D = Diámetro conocido  
 D<sub>1</sub> = Diámetro nuevo

Es decir:

$$\frac{D}{D_1} = \frac{Q}{Q_1} = \sqrt{\frac{H}{H_1}} = \sqrt[3]{\frac{P}{P_1}}$$

El procedimiento para obtener las curvas características para un nuevo diámetro, en función de las curvas características proporcionadas por el fabricante para el diámetro original, es análogo al procedimiento visto anteriormente para la variación de la velocidad de rotación. En general, la reducción máxima permitida es aproximadamente de un 20% del diámetro original. Esta reducción es aproximada, porque existen rodetes que pueden reducirse en un porcentaje mayor, mientras que otros permiten una reducción sólo en un pequeño margen, con el fin de no provocar efectos adversos. En la realidad, estas reducciones sólo son permitidas en bombas centrífugas radiales; en las bombas centrífugas de flujo mixto y, principalmente en los axiales, la disminución del diámetro del rodete puede alterar el diseño inicial substancialmente, debido a las variaciones en los ángulos y los diseños de los álabes.

### 3.10.1 CÁLCULO DEL DIÁMETRO DEL RODETE

Una manera de calcular el diámetro del rodete, cuando el punto de operación está fuera de un diámetro conocido en la curva característica de la bomba, es el siguiente:

1 - Desde el origen del plano Cartesiano se traza una línea recta hasta el punto de operación deseado. En el caso que el plano Cartesiano no presente un origen, es decir, altura manométrica cero ( $H = 0$ ), basta con prolongarlo hasta encontrar el origen, usando la misma escala utilizada en el plano.

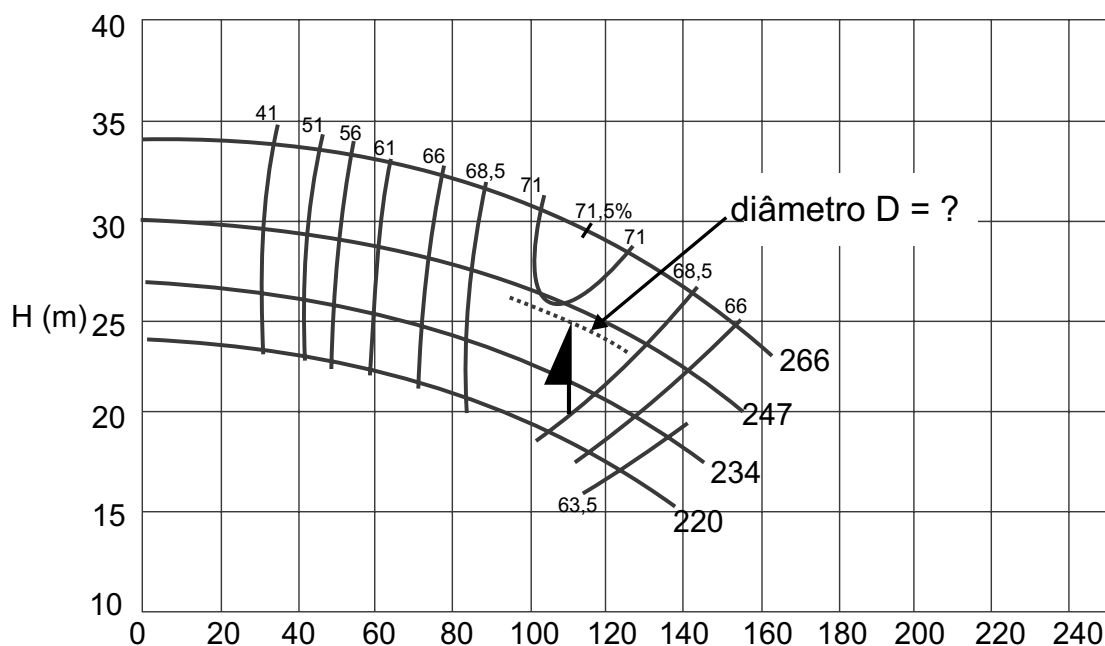
2 - La línea recta trazada debe cortar a la curva conocida más próxima al punto de operación deseado, encontrando un nuevo flujo  $Q_1$  y una nueva altura  $H_1$ .

3 - A través de las siguientes fórmulas, se encontrará el valor del diámetro deseado.

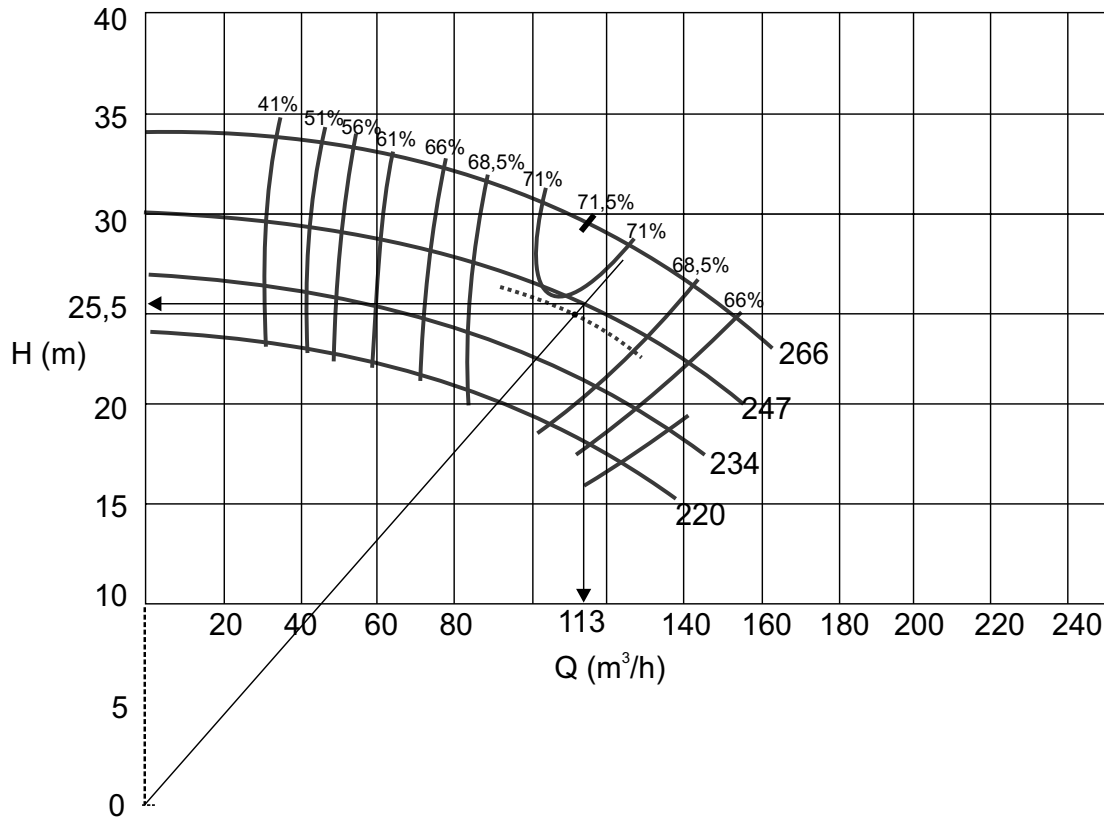
$$D = D_1 \frac{Q}{Q_1} \quad \text{O} \quad D = D_1 \sqrt{\frac{H}{H_1}}$$

4 - Es interesante utilizar las dos fórmulas para el cálculo. En caso de que los diámetros encontrados sean diferentes, optar por el mayor valor.

Por ejemplo, para un caudal de  $110 \text{ m}^3/\text{h}$  y una altura manométrica de  $25 \text{ m}$ , el punto de operación está fuera de un diámetro conocido.



Como este plano cartesiano no muestra el origen, encontramos el origen del plano utilizando la misma escala; se traza la recta de este origen encontrada hasta el punto de operación, conforme se muestra abajo, encontrandose  $Q_1 = 113 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $H_1 = 25,5 \text{ m}$ .



Utilizando las fórmulas presentadas, se calcula el diámetro del rodete:

$$D = D_1 \frac{Q}{Q_1} \rightarrow D = 247 \frac{110}{113} \rightarrow \boxed{D = 243 \text{ mm}}$$

O

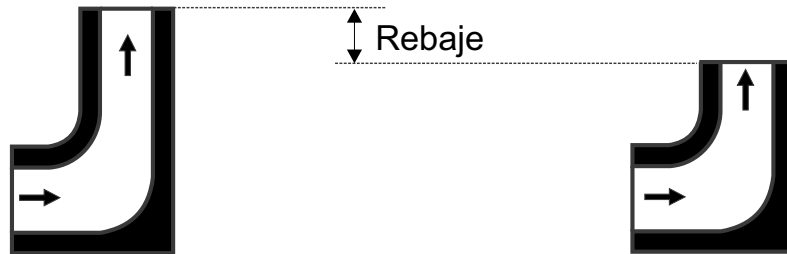
$$D = D_1 \sqrt{\frac{H}{H_1}} \rightarrow D = 247 \sqrt{\frac{25}{25,5}} \rightarrow \boxed{D = 244,5 \text{ mm}}$$

Por motivo de seguridad, se utiliza el diámetro mayor, es decir,  $D = 244,5 \text{ mm}$ .

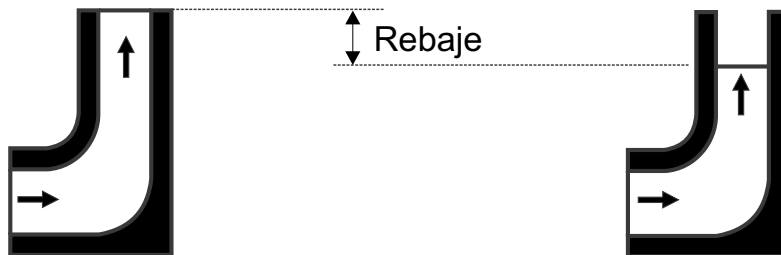
### 3.11 FORMAS DE REDUCIR EL DIÁMETRO DEL RODETE

Existen varias formas para realizar la reducción del diámetro del rodete, por ejemplo:

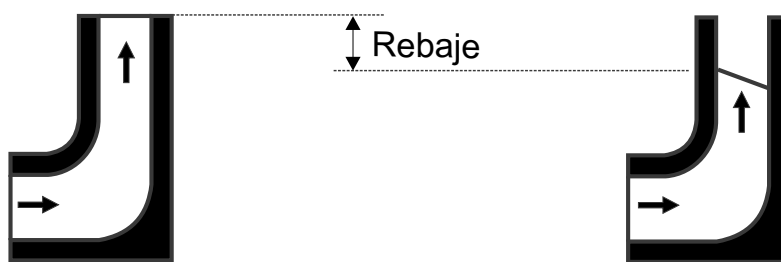
- Rebaje total de las paredes y álabes



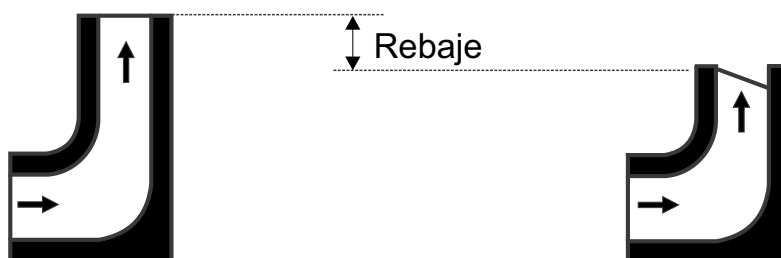
- Rebaje solamente de los álabes



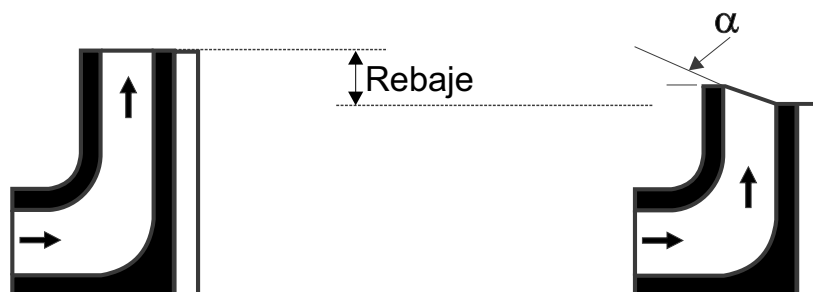
- Rebaje de los álabes en ángulo, manteniendo las paredes con el diámetro máximo



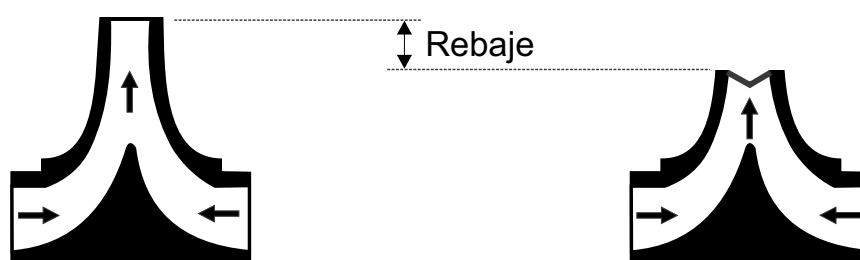
- Rebaje de las paredes paralelamente y el rebaje de los álabes en ángulo



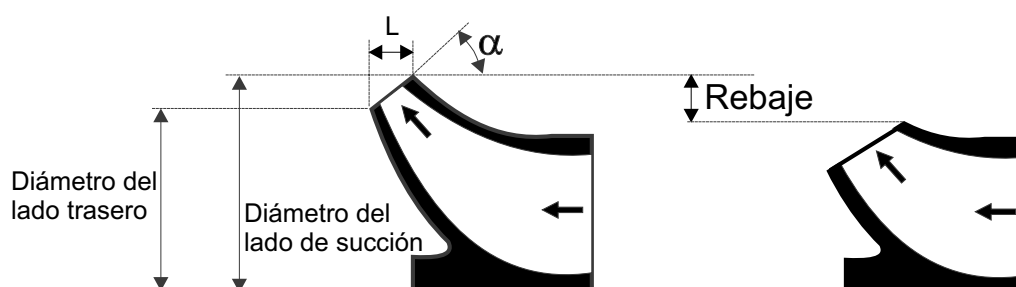
- Rebaje de las paredes en ángulo, rebajando también la pared y el álabe trasero del rodete



- Rebaje del rodete de doble flujo



- Rebaje del rodete semi-axial



### 3.12 VELOCIDAD ESPECÍFICA O ROTACIÓN ESPECÍFICA

Es un hecho conocido que bombas geoméricamente semejantes poseen características de desempeño semejantes.

Para propiciar una base de comparación entre los varios tipos de bombas centrífugas, se ha desarrollado una fórmula que relaciona los tres factores característicos principales de desempeño de una bomba, estos son: el caudal, la altura manométrica y la rotación.

Ese valor se denomina como velocidad específica o rotación específica.

La velocidad específica es un índice numérico adimensional, expresado matemáticamente a través de la siguiente fórmula:

|                                   |               |                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $nq = \frac{n \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$ | $\rightarrow$ | <p><math>nq \rightarrow</math> Velocidad específica</p> <p><math>n \rightarrow</math> Rotación (RPM)</p> <p><math>Q \rightarrow</math> Caudal (m<sup>3</sup>/s)</p> <p><math>H \rightarrow</math> Altura manométrica (m)</p> |
|-----------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### Consideraciones importantes

- en bombas con rodetes de doble succión, se debe dividir el caudal (Q) por dos;
- en bombas multietapa, dividir la altura manométrica total (H), por el número de etapas;
- siempre que nos refiramos a la velocidad específica, estamos refiriéndonos al punto de mejor eficiencia de la bomba.

#### 3.12.1 APLICACIONES DE LA VELOCIDAD ESPECÍFICA

La velocidad específica es usada ampliamente por los fabricantes y usuarios de bombas, en función de la importancia práctica de sus tres aplicaciones básicas:

- la primera permite determinar el tipo del rodete y la eficiencia máxima de acuerdo con las condiciones operacionales;
- la segunda permite, en función de los resultados existentes para las bombas similares, determinar:

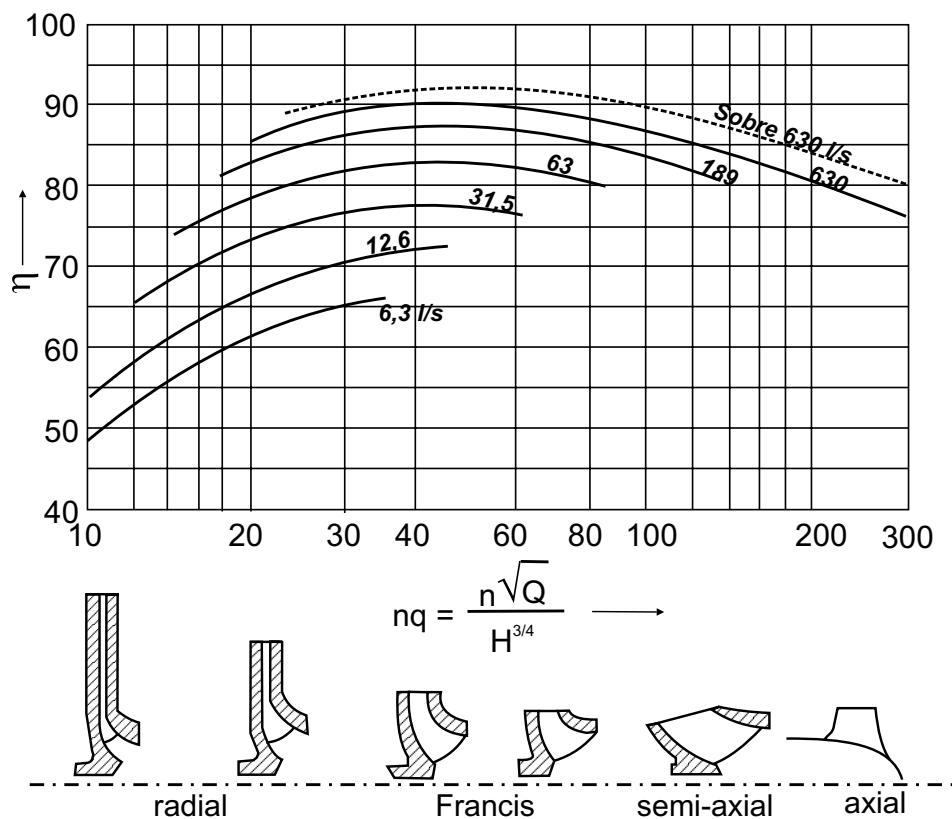
La geometría básica del rodete, conocidas las características de operación deseadas (Q y H), y la rotación (n); el desempeño aproximado de la bomba, conocido las características geométricas del rodete.

- la tercera permite determinar la rotación máxima con la que una bomba puede operar en condiciones satisfactorias, en función del tipo de bomba y de las características del sistema.

Nosotros estudiaremos sólo la primera aplicación, debido a que es de mayor interés para los usuarios de bombas centrífugas:

De acuerdo con lo mencionado, el conocimiento de las condiciones operacionales (Q, H, n), permiten el cálculo de la velocidad específica y, en función de esto, determinar el tipo de rodete y la eficiencia máxima esperada. Eso es posible a través del uso de la figura que se muestra a continuación, en la que se presentan los valores medios de eficiencia obtenidos para un gran número de bombas comerciales en función de la velocidad específica y del caudal.

### 3.13 TIPOS DE RODETES PARA DIFERENTES VELOCIDADES ESPECÍFICAS



Tipos de rodetes para diferentes velocidades específicas

## **MÓDULO 4**

### ***Cavitación / NPSH***



## ÍNDICE

|             |                                                                                      |     |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>4</b>    | <b><i>Introducción</i></b>                                                           | 103 |
| <b>4.1</b>  | <b><i>Cavitación/NPSH</i></b>                                                        | 105 |
| 4.1.1       | Presión de vapor                                                                     | 105 |
| 4.1.2       | El fenómeno de la cavitación                                                         | 106 |
| 4.1.3       | Consecuencias de la cavitación                                                       | 107 |
| 4.1.4       | Ejemplo de un rodete “cavitado”                                                      | 108 |
| 4.1.5       | Cavitación, erosión, corrosión                                                       | 109 |
| <b>4.2</b>  | <b><i>NPSH ( Net Positive Suction Head )</i></b>                                     | 109 |
| 4.2.1       | NPSH disponible                                                                      | 109 |
| 4.2.2       | NPSH requerido                                                                       | 110 |
| <b>4.3</b>  | <b><i>Líneas de referencia para mediciones hidráulicas</i></b>                       | 111 |
| <b>4.4</b>  | <b><i>Representación gráfica del NPSH requerido</i></b>                              | 113 |
| <b>4.5</b>  | <b><i>Factores que modifican el NPSH disponible</i></b>                              | 114 |
| <b>4.6</b>  | <b><i>Factores que modifican el NPSH requerido</i></b>                               | 114 |
| 4.6.1       | Presentación gráfica de la reducción del NPSH <sub>r</sub> de un rodete con inductor | 115 |
| <b>4.7</b>  | <b><i>Cálculo de NPSH requerido para bombas ETA</i></b>                              | 116 |
| <b>4.8</b>  | <b><i>Coefficiente de cavitación/Número de Thoma</i></b>                             | 116 |
| <b>4.9</b>  | <b><i>Velocidad específica de succión</i></b>                                        | 117 |
| <b>4.10</b> | <b><i>NPSH para otros líquidos</i></b>                                               | 117 |
| 4.10.1      | Reducción del NPSH para bombas operando con hidrocarburos y agua a alta temperatura  | 118 |
| <b>4.11</b> | <b><i>Recirculación hidráulica</i></b>                                               | 119 |
| 4.11.1      | Sistema de recirculación continuo                                                    | 120 |
| 4.11.2      | Válvula de flujo mínimo                                                              | 120 |
| <b>4.12</b> | <b><i>Materiales resistentes a la cavitación</i></b>                                 | 121 |



## **CAVITACIÓN / NPSH**

### **4 INTRODUCCIÓN**

En este módulo, estudiaremos uno de los fenómenos más importantes asociados a las bombas, estos son: el concepto de cavitación y el NPSH ( Net Positive Suction Head ).

Para la perfecta comprensión del mismo, se hace necesario la revisión de algunos conceptos ya estudiados previamente.



## 4.1 CAVITACIÓN / NPSH

Una definición simple de cavitación y NPSH, sería: una intensa formación de burbujas de vapor en la zona de baja presión de la bomba y posterior colapso de estas burbujas en la región de alta presión y NPSH es la presión mínima en términos absolutos, en metros de columna de agua, sobre la presión de vapor del fluido con el fin evitar la formación de dichas burbujas de vapor.

Nosotros veremos estos dos conceptos detalladamente:

### 4.1.1 PRESIÓN DE VAPOR

La presión de vapor de un líquido a una temperatura dada es aquella en la que el líquido coexiste en su fase líquida y vapor.

A una misma temperatura, cuando tenemos una presión mayor que la presión de vapor, habrá sólo fase líquida y cuando tenemos una presión menor que la presión de vapor, habrá sólo fase de vapor.

La presión de vapor de un líquido crece con el aumento de la temperatura, así, en caso que la temperatura sea elevada hasta un punto en que la presión de vapor iguale, por ejemplo, la presión atmosférica, se producirá la evaporación del líquido, ocurriendo el fenómeno de la ebullición.

La siguiente tabla muestra la presión de vapor en la función de la temperatura, para agua.

| Temperatura °C | Presión de vapor |                     | Peso específico ( kgf/dm <sup>3</sup> ) |
|----------------|------------------|---------------------|-----------------------------------------|
|                | mm Hg            | kgf/cm <sup>2</sup> |                                         |
| 15             | 12,7             | 0,0174              | 0,999                                   |
| 20             | 17,4             | 0,0238              | 0,998                                   |
| 25             | 23,6             | 0,0322              | 0,997                                   |
| 30             | 31,5             | 0,0429              | 0,996                                   |
| 35             | 41,8             | 0,0572              | 0,994                                   |
| 40             | 54,9             | 0,0750              | 0,992                                   |
| 45             | 71,4             | 0,0974              | 0,990                                   |
| 50             | 92,0             | 0,1255              | 0,988                                   |
| 55             | 117,5            | 0,1602              | 0,986                                   |
| 60             | 148,8            | 0,2028              | 0,983                                   |
| 65             | 186,9            | 0,2547              | 0,981                                   |
| 70             | 233,1            | 0,3175              | 0,978                                   |
| 75             | 288,5            | 0,3929              | 0,975                                   |
| 80             | 354,6            | 0,4828              | 0,972                                   |
| 85             | 433,0            | 0,5894              | 0,969                                   |
| 90             | 525,4            | 0,7149              | 0,965                                   |
| 95             | 633,7            | 0,8620              | 0,962                                   |
| 100            | 760,0            | 1,0333              | 0,958                                   |
| 105            | 906,0            | 1,2320              | 0,955                                   |
| 110            | 1075,0           | 1,4609              | 0,951                                   |
| 115            | 1269,0           | 1,7260              | 0,947                                   |
| 120            | 1491,0           | 2,0270              | 0,943                                   |

#### **4.1.2 EL FENÓMENO DE LA CAVITACIÓN**

En el desplazamiento de pistones, en los "Venturis", en el desplazamiento de superficies formadas por álabes, como es el caso de las bombas centrífugas, ocurren inevitablemente efectos inesperados en el líquido, es decir, presiones reducidas debido a la propia naturaleza del flujo o por el movimiento impreso por las piezas movibles hacia el fluido.

Si la presión absoluta baja hasta alcanzar la presión de vapor o tensión de vapor del líquido a la temperatura en que éste se encuentra, se inicia un proceso de vaporización del mismo. Inicialmente, en las áreas más diversas, se forman pequeñas bolsas, burbujas o cavidades (de ahí el nombre de cavitación) dentro de las cuales el líquido se vaporiza. Luego, es conducido por el flujo líquido, producido por el órgano propulsor, y con gran velocidad llega a las regiones de alta presión, donde se procesa o se colapsa con la condensación del vapor para luego retornar al estado líquido.

Las burbujas que contienen vapor de líquido parecen ser originadas en pequeñas cavidades de las paredes del material o en torno de pequeñas impurezas contenidas en el líquido, en general próximas a las superficies, llamadas como núcleos de vaporización o de cavitación cuya naturaleza constituye objeto de investigaciones interesantes e importantes.

Por consiguiente, cuando la presión reinante del líquido se torna mayor que la presión interna de la burbuja de vapor, las dimensiones del mismo se reducen bruscamente, ocurriendo así un colapso y provocando el desplazamiento del líquido circundante para su interior, generando así una presión de inercia considerable. Las partículas formadas por la condensación chocan muy rápidamente unas con otras así como cuando se encuentran con alguna superficie que se interpongan con su desplazamiento.

Las superficies metálicas dónde chocan las diminutas partículas resultantes de la condensación son sometidas a una acción de fuerzas complejas, originadas de la energía liberada por esas partículas, que producen golpes separando los elementos del material con menor cohesión y formando pequeños orificios que, con la prolongación del fenómeno, dan a la superficie un aspecto esponjoso, corroído. Es la erosión por cavitación. El desgaste puede tomar proporciones tales que pedazos de materiales pueden desgarrarse de las piezas. Cada burbuja de vapor así formada, tiene un ciclo entre el crecimiento y el colapso del orden de unas pocas milésimo de segundo produciendo altísimas presiones que afectan en forma concentrada la zona afectada. Para tener una idea de ese proceso, algunos investigadores mencionan que este ciclo se repite en una frecuencia que puede alcanzar el orden de 25.000 burbujas por segundo y que la presión probablemente transmitida a las superficies metálicas adyacente al centro del colapso de las burbujas puede alcanzar un valor de 1000 atm.

Otro aspecto que merece la atención es que, teniendo en cuenta el carácter cíclico del fenómeno, las acciones mecánicas repetidas en la misma región metálica ocasionan un aumento local de la temperatura de hasta 800 °C.

#### **4.1.3 CONSECUENCIAS DE LA CAVITACIÓN**

Los efectos de la cavitación dependen del tiempo de duración, intensidad de la cavitación, propiedad del líquido y resistencia del material a la erosión por la cavitación, en otros términos, la cavitación causa ruido, vibración, alteración de las curvas características y daño o "PITTING" del material.

El ruido y la vibración son provocadas principalmente por la inestabilidad generada por el colapso de las burbujas.

La alteración en las curvas características, y la consecuente alteración en el desempeño de la bomba se debe a la diferencia de volumen específico entre el líquido y el vapor, así como la turbulencia generada por el fenómeno. Esta alteración en las curvas es más drástica en el caso de bombas centrífugas, porque en este caso, teniendo en cuenta que el canal de pasada del líquido se restringe, la presencia de burbujas influye considerablemente en el desempeño del equipo.

El daño de material en una bomba centrífuga normalmente ocurre en el rodete, también puede ocurrir en las carcasas o difusores. Normalmente, los puntos atacados en el rodete están ubicados en la parte frontal del álabe, en caso que el punto de trabajo esté a la izquierda del caudal correspondiente al punto mejor rendimiento o en la parte trasera, en caso de que se sitúe a la derecha.

La cavitación podrá ocurrir en mayor o menor intensidad. Cuando ocurre cavitación de pequeña intensidad, sus efectos serán muchas veces imperceptibles, es decir, no se notarán las alteraciones en las características de operación de la bomba, ni ruido o vibraciones. Con el aumento de esta intensidad, estos efectos empezarán a ser perceptibles a través del ruido característico (el ruido se parece al chisporroteo de la leña en una chimenea; un martilleo con una frecuencia elevada; un mezclador de concreto a alta velocidad o como si bombearan piedras o arena). Se debe observar que la erosión por cavitación no se produce en el lugar dónde las burbujas se forman, sino en el lugar dónde se produce la implosión.

En la construcción de máquinas hidráulicas, hay una tendencia a escoger altas velocidades de rotaciones con el propósito de reducir las dimensiones del equipo y por consiguiente, su costo; sin embargo en tales condiciones, se aumenta el riesgo de cavitación.

#### 4.1.4 EJEMPLO DE UN RODETE “CAVITADO”



#### **4.1.5 CAVITACIÓN, EROSIÓN Y CORROSIÓN**

Es común que exista una cierta confusión entre estos procesos de deterioro de los componentes de una bomba. Es interesante analizar los componentes dañados para posterior identificación de las causas y soluciones del problema, tomando en cuenta que los cuidados a ser tomados cuando una bomba está en régimen de cavitación son diferentes de los cuidados cuando una bomba este sufriendo por ejemplo, corrosión por abrasión. El daño del material debido a cavitación no tiene que ver con los desgaste producidos por erosión o corrosión. Como sabemos, la erosión es producto de la acción de las partículas sólidas en suspensión las que se desplazan con gran velocidad. Por otro lado, la corrosión en bombas ocurre normalmente por la incompatibilidad del material con el líquido, lo que produce una reacción química destructiva, o por el uso de materiales muy apartados en la tabla de potencial, los que en presencia de un líquido que actúa como electrolito, propician una reacción galvánica. No obstante, nada impide que estos fenómenos coexistan en un determinado sistema, acelerando el proceso de deterioro del material.

#### **4.2 NPSH ( NET POSITIVE SUCTION HEAD)**

Uno de los conceptos más polémicos asociado con bombas es el NPSH. La comprensión de este concepto es esencial para la correcta selección de una bomba.

Con el fin de caracterizar las condiciones para una buena "aspiración", se introdujo en la terminología de instalaciones de bombeo el término NPSH. Este concepto representa la disponibilidad de energía con que el líquido entra en el flange de succión de la bomba.

El término NPSH es un término que se encuentra en publicaciones de lengua inglesa. En publicaciones de varios idiomas, se mantiene la designación del NPSH, aunque algunos autores usan el término APLS" Altura Positiva Líquida de Succión" o" Altura de Succión Absoluta".

Para efectos de estudio y definición, el NPSH puede ser dividido en el NPSH requerido y el NPSH disponible

##### **4.2.1 NPSH DISPONIBLE**

Es una característica de la instalación en que la bomba opera, y de la presión disponible del líquido en el lado de succión de la bomba.

El NPSH disponible puede ser calculado a través de dos fórmulas:

#### **- NPSH disponible en la etapa de diseño**

$$\text{NPSH disp} = \frac{\text{Prs} + \text{Patm} - \text{pv}}{\gamma} \cdot 10 \pm \text{Hgeos} - \text{Hp}$$

- Prs → Presión en el depósito de succión (kgf/cm<sup>2</sup>)
- Patm → Presión atmosférica local (kgf/cm<sup>2</sup>)
- pv → Presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo (kgf/cm<sup>2</sup>)
- Hgeos → Altura geométrica de succión (positiva o negativa) (m)
- Hp → Pérdidas de carga en la succión (m)
- γ → Peso específico del fluido a la temperatura de bombeo (kgf/dm<sup>3</sup>)
- 10 → Factor de conversión de unidades

#### **- NPSH disponible en la etapa de operación**

$$\text{NPSH disp} = \frac{\text{Ps} + \text{Patm} - \text{pv}}{\gamma} \cdot 10 + \frac{\text{vs}^2}{2g} + \text{Zs}$$

- Ps → Presión en el flange de succión (kgf/cm<sup>2</sup>)
- Patm → Presión atmosférica local (kgf/cm<sup>2</sup>)
- pv → Presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo (kgf/cm<sup>2</sup>)
- vs → Velocidad del flujo en el flange de succión (m/s)
- γ → Peso específico del fluido a la temperatura de bombeo (kgf/dm<sup>3</sup>)
- Zs → Distancia entre las líneas de centro de la bomba y del manómetro (m)
- g → Aceleración de gravedad (m/s<sup>2</sup>)
- 10 → Factor de conversión de unidades

### **4.2.2 NPSH REQUERIDO**

La mayoría de las curvas características de las bombas incluyen la curva de NPSH requerido en función del caudal. Esta curva es una característica propia de la bomba y en rigor puede ser obtenida solamente en forma experimental en los bancos de prueba de los fabricantes. La expresión NPSH representa la energía como altura absoluta de líquido en la succión de la bomba por encima de presión de vapor de este líquido, a la temperatura de

de bombeo, referida a la línea de centro de la bomba. Por consiguiente, el fin práctico del NPSH es el de poner limitaciones a las condiciones de succión de la bomba, de modo de mantener la presión en la entrada del rodete por sobre la presión de vapor del líquido bombeado. La presión más baja ocurre en la entrada del rodete, por consiguiente, si mantenemos la presión en la entrada del rodete por sobre la presión de vapor, no tendremos vaporización en la entrada de la bomba y evitaremos así el fenómeno de la cavitación. El fabricante define, de esta manera, las limitaciones de succión de una bomba mediante la curva de NPSH requerido.

Para la definición del NPSH requerido por una bomba se utiliza como criterio la caída en un 3% de la altura manométrica para un determinado caudal. Este criterio es adoptado por el Hydraulic Institute Standards y el American Petroleum Institute (API 610).

Toda vez que la energía disponible iguale o exceda los valores de NPSH requerido, no habrá vaporización del líquido, lo que evitará la cavitación y las respectivas consecuencias; de esta manera, la bomba debe seleccionarse observando la siguiente relación:

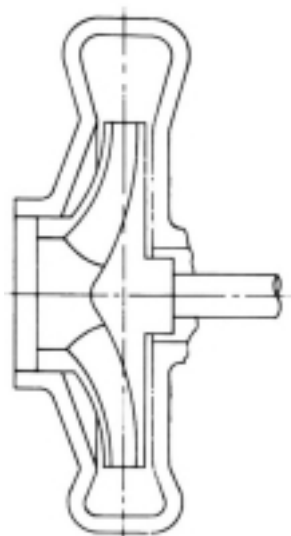
$$\text{NPSH}_{\text{disponible}} \geq \text{NPSH}_{\text{requerido}}$$

En la práctica se utiliza como margen mínimo entre el  $\text{NPSH}_{\text{req}}$  y el  $\text{NPSH}_{\text{disp}}$ , un rango de entre el 10 a 15%, siempre que este no sea menor a 0,5 m, valor mínimo recomendado.

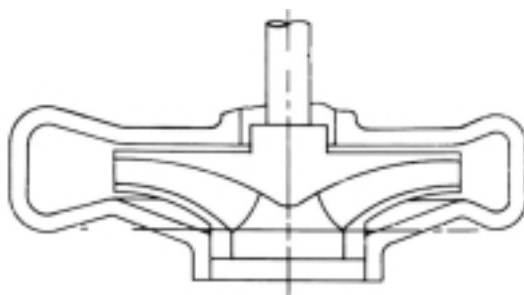
Así, en la práctica los valores de NPSH requerido informados por el fabricante, son basados en el siguiente criterio:

- **en la caída de presión, desde el flange de succión hasta el álabe del rodete:** Como el diámetro nominal del flange de succión es normalmente desconocido en la fase de estudio, esta caída de presión incluye a la carga de velocidad en el flange de succión de la bomba. La caída de presión entre el flange hasta el rodete no es sólo producto de pérdidas de carga por roce, sino en su mayoría por la transformación de la presión en energía cinética.
- **en la línea de centro de la bomba:** Tal práctica facilita el estudio en la fase de anteproyecto y de comparación entre diversos tipos de bombas, porque existen bombas con flanges de succión en varias posiciones, por ejemplo: lateral, axial, etc.

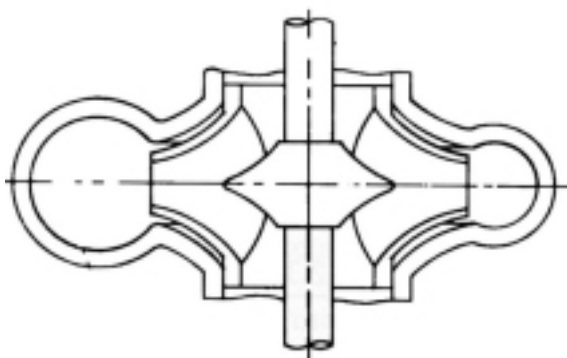
### 4.3 LÍNEAS DE REFERENCIA PARA MEDICIONES HIDRÁULICAS



**para bomba horizontales:**  
línea de centro del eje de la bomba

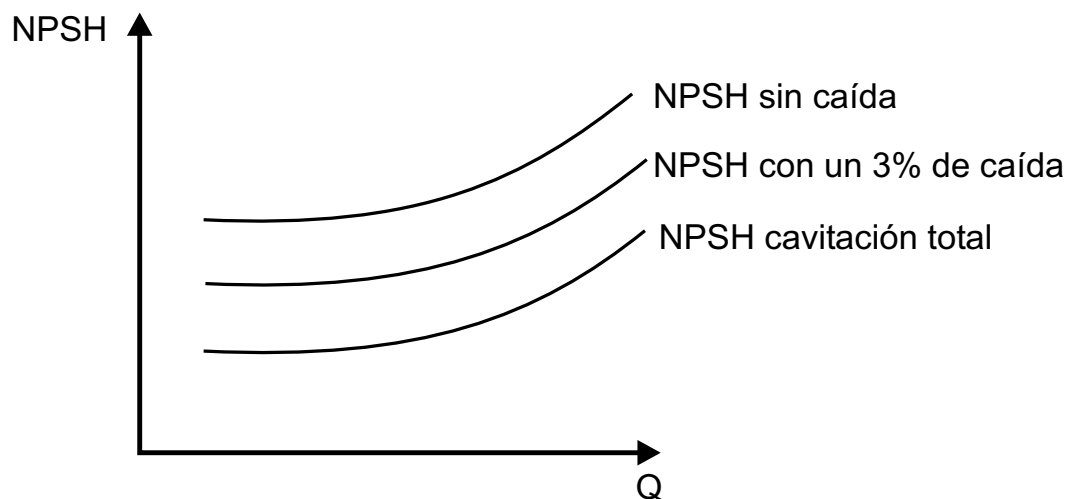
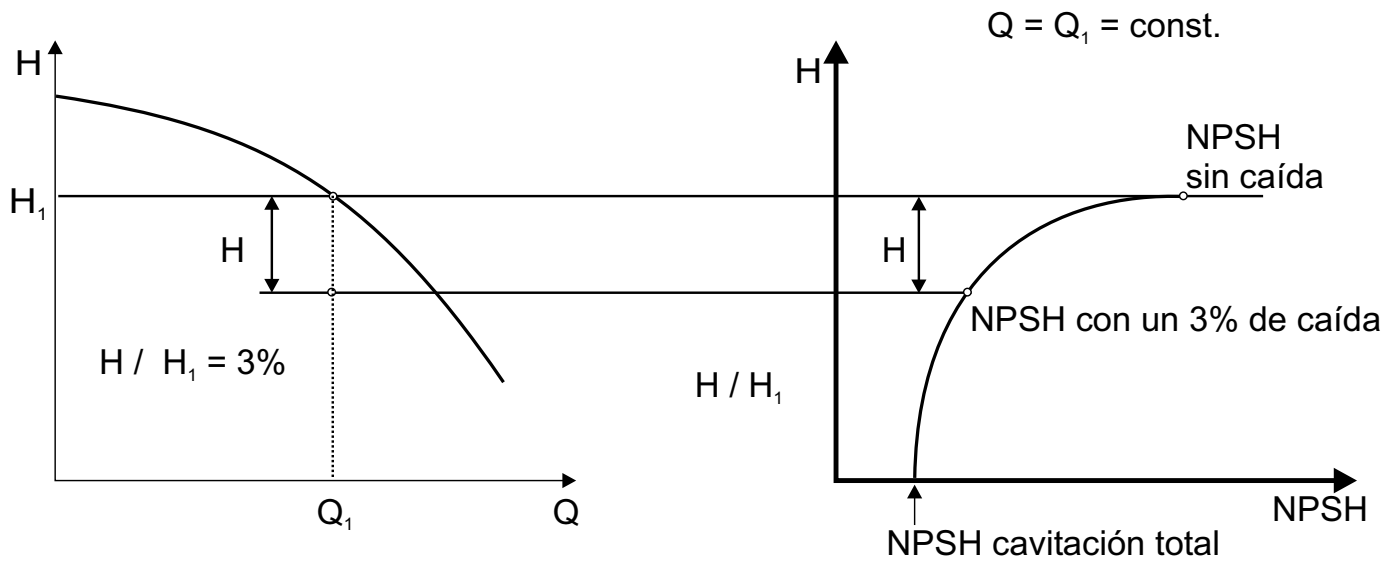


**para bomba verticales de succión simple  
una o varias etapas:**  
inicio del álabe de la entrada del rodete  
de la primera etapa



**para bombas verticales de doble succión:**  
centro de descarga del rodete

#### 4.4 PRESENTACIÓN GRÁFICA DEL NPSH REQUERIDO



## **4.5 FACTORES QUE MODIFICAN EL NPSH DISPONIBLE**

Como vimos previamente, mientras mayor es el valor del NPSH disponible en una instalación, menor es el peligro que la bomba entre en régimen de cavitación. Según lo anterior, para obtener valores elevados de NPSH disponible, debemos considerar los siguientes criterios:

- reducir la altura geométrica de succión negativa o aumentar la altura geométrica de succión positiva.
- minimizar las pérdidas de carga en la succión, pues éstas influyen en el cálculo del NPSH disponible. Se recomienda utilizar tuberías cortas; diámetros de tuberías que impliquen bajas velocidades del líquido en la succión; minimizar las pérdidas localizadas, como por ejemplo, el filtro de succión, válvulas, curvas, etc.,
- verificar el valor de la presión atmosférica local, pues variando la altitud, variará la presión atmosférica y por consiguiente, el valor del NPSH disponible. Para bombas instaladas sobre el nivel del mar, debemos considerar una disminución de la presión atmosférica de aproximadamente 0,1 bar para cada 900 m de altitud.
- la temperatura de bombeo tiene influencia sobre la viscosidad, presión de vapor, peso específico, etc, por consiguiente, variando la temperatura de bombeo, habrá una variación del NPSH disponible.
- eventualmente, una misma instalación puede trabajar con más de un tipo líquido. Es necesario verificar el caso crítico, NPSH disponible mínimo, analizando los valores de la presión de vapor, peso específico y viscosidad de los productos.
  - cambiar el caudal de operación, implica alterar la pérdida de carga en la succión, consecuentemente el valor del NPSH disponible.
- variando la presión en el depósito de la succión, se altera el valor del NPSH disponible.

## **4.6 FACTORES QUE MODIFICAN EL NPSH REQUERIDO**

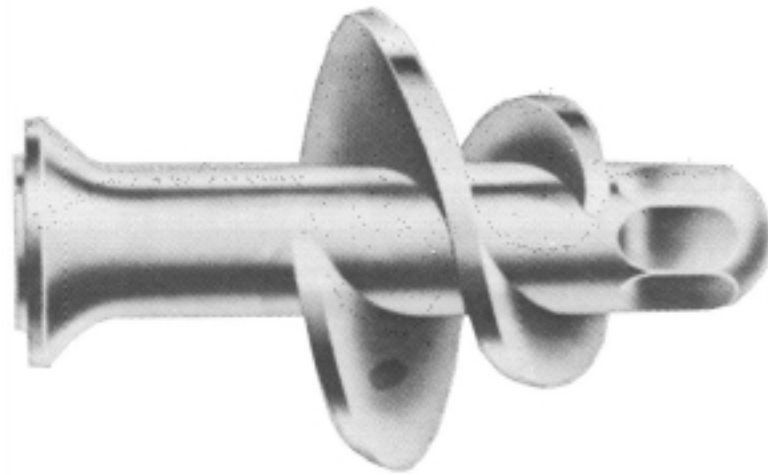
Si por un lado, se busca aumentar el valor de NPSH disponible en una instalación, por otro, se busca disminuir el valor de NPSH requerido. Naturalmente, éste es el objetivo de los fabricantes, pero es interesante para el usuario tener alguna noción del asunto.

El valor del NPSH requerido se disminuye a través de las siguientes maneras:

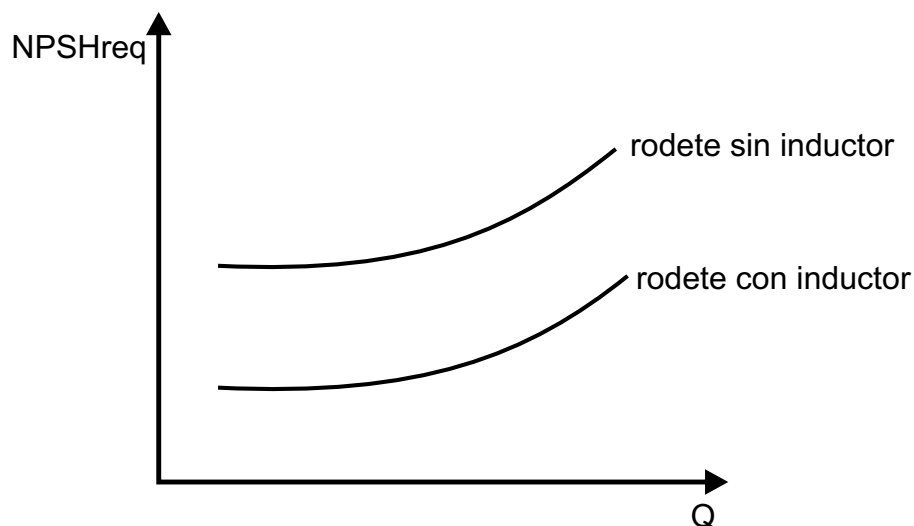
- reduciendo la pérdida de carga en la entrada de la bomba, a través del diseño en forma hidrodinámica y cuidando el grado de acabado del maquinado.

- reducción de las velocidades absolutas y relativas en la entrada del rodete, aumentando así el área de entrada del rodete, solución no tan simple de ser obtenida, pues existen otros cuidados que deben ser considerados.
- variando la rotación, pues el NPSH requerido varía con el cuadrado de la rotación.
- uso de un inductor. El inductor no es más que un rodete normalmente axial o de flujo mixto ubicado al frente del rodete convencional de una bomba. El objetivo principal del inductor es funcionar como rodete auxiliar del principal, reduciendo el NPSH requerido por la bomba.

Ejemplo de inductor



#### 4.6.1 PRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA REDUCCIÓN DEL NPSH<sub>r</sub> DE UN RODETE CON INDUCTOR



## 4.7 CÁLCULO DEL NPSH REQUERIDO PARA BOMBAS ETA

En el caso de las bombas KSB modelo ETA, las curvas características indican el valor de  $H_s$  (altura de succión), con el que podemos calcular el NPSH requerido a través de la fórmula siguiente:

NPSHreq → NPSH requerido (m)

$$\text{NPSHreq} = 10 - H_s + \frac{v_s^2}{2g}$$

$H_s$  → altura de succión (obtenida de la curva característica) (m)

$v_s$  → velocidad en el flange de succión (m/s)

$g$  → aceleración de gravedad ( $\text{m/s}^2$ )

## 4.8 COEFICIENTE DE CAVITACIÓN /NÚMERO DE THOMA

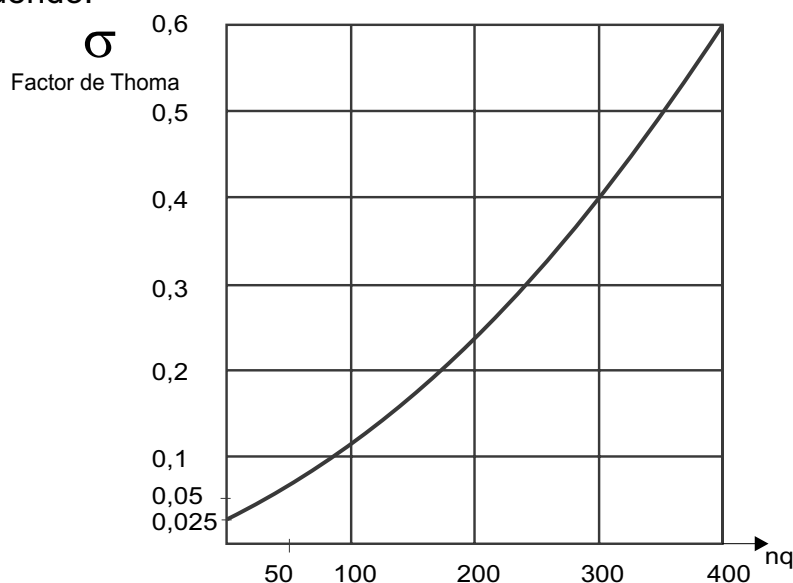
Un método teórico para la validación del NPSH requerido puede ser obtenido a través del número de Thoma (  $\sigma$  ), también conocido como coeficiente o factor de cavitación.

$$\sigma = \frac{\text{NPSHreq}}{H}$$

El número de Thoma es obtenido a través de gráficos en función de la velocidad específica (  $n_q$  ), que puede ser obtenida según fue analizado en el módulo 3.

$$n_q = \frac{n \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

Este método no es utilizado en la práctica, pues sólo se obtiene un valor de referencia para el NPSH requerido. Solamente el fabricante de la bomba podrá entregar indicaciones precisas del NPSH requerido.



## 4.9 VELOCIDAD ESPECÍFICA DE SUCCIÓN

Anteriormente vimos que el coeficiente de cavitación o número de Thoma ( $\sigma$ ) depende de la velocidad específica de la bomba.

Se estableció la dependencia entre estos dos valores a través de un parámetro denominado velocidad específica de succión, representado por la letra S.

$$S = 365 \frac{n \sqrt{Q}}{\text{NPSH}_{\text{req}}^{3/4}}$$

S → velocidad específica de succión

n → rotación (rpm)

Q → caudal (m<sup>3</sup>/h)

El criterio más utilizado para evaluar las condiciones de succión es a través de la velocidad específica de succión. Se acepta el hecho que en la práctica la altura manométrica no tiene influencia en la limitación de las condiciones de succión.

Desde el punto de vista del NPSH requerido, mejor es la bomba mientras mayor sea el valor de la velocidad específica de succión.

## 4.10 NPSH PARA OTROS LÍQUIDOS

La experiencia de los ensayos ha revelado que las bombas que funcionan con agua caliente o con hidrocarburos líquidos no viscosos operan satisfactoriamente y con seguridad utilizando un valor de NPSH requerido inferior al que normalmente exigiría si operase con agua fría. Este hecho permite que, para la mayor parte de los casos, se pueda utilizar la curva de NPSH requerido, entregada por el fabricante, para agua fría.

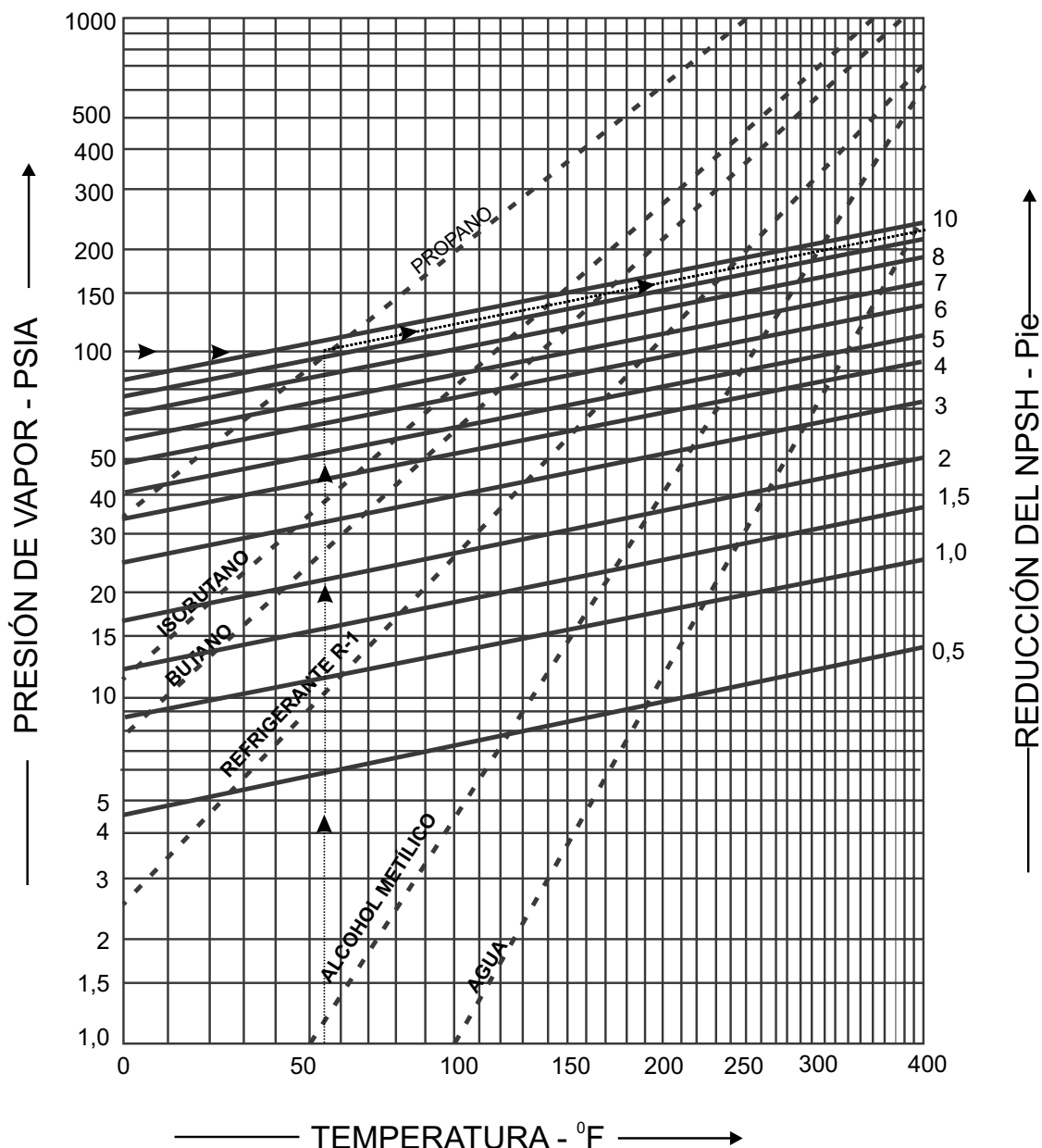
En caso que sea necesario, se puede hacer una reducción del NPSH requerido, a través de un gráfico, como veremos a continuación.

OBS.: El uso de este gráfico está sujeto a las siguientes limitaciones:

- no se puede usar si hay presencia de aire o gases no condensables o si la presión absoluta en la entrada de la bomba es tan baja que permite la liberación de soluciones no condensables;
- la máxima reducción admisible es de 50% respecto del NPSH requerido para agua;
- no se puede usar en instalaciones que tengan tendencia a cambios transientes de temperatura o presión en el sistema de succión;

- en el caso de mezcla de hidrocarburos, la presión de vapor debe ser determinada para el producto en cuestión y a la temperatura real de operación;
- no aplicar el gráfico para otros líquidos diferentes a agua e hidrocarburos.

#### 4.10.1 REDUCCIÓN DEL NPSH PARA BOMBAS OPERANDO CON HIDROCARBUROS Y AGUA A ALTA TEMPERATURA



**Ejemplo:** Una bomba necesita de un NPSH de 16 ft, operando con agua fría. Si la misma bomba opera con propano a temperatura de 55 °F el que tiene una presión de vapor de 100 psia, determinar cual es nuevo valor de NPSH requerido.

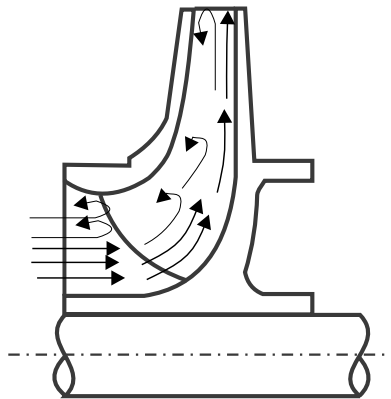
**Solución:** Para propano con  $t = 55\text{ }^{\circ}\text{F}$ , se sube verticalmente hasta  $p_v = 100\text{ psia}$ . De este punto siga a largo de la línea inclinada para hacia el lado derecho del gráfico, obteniendo la reducción de NPSH = 9,5 pies.

Como el valor obtenido es mayor que la mitad del NPSHreq enl agua fría, el valor que debe reducirse es 50% de NPSHreq para el agua fría, en otros términos, NPSHreq = 8 pies.

Entonces, el NPSHreq reducido será =  $16 - 8 = 8$  pies.

#### 4.11 RECIRCULACIÓN HIDRÁULICA

Las bombas de tamaño medio y grande que poseen rodetes de gran diámetro y que operan con caudales reducidos, pueden estar sujetas a problemas de recirculación hidráulica.



En este esquema se muestra un rodete con recirculación de líquido para una bomba operando con caudales bajos.

Cuando la bomba opera en esta condición, parte del fluido que entra en el rodete, retorna hacia la succión. Las consecuencias son:

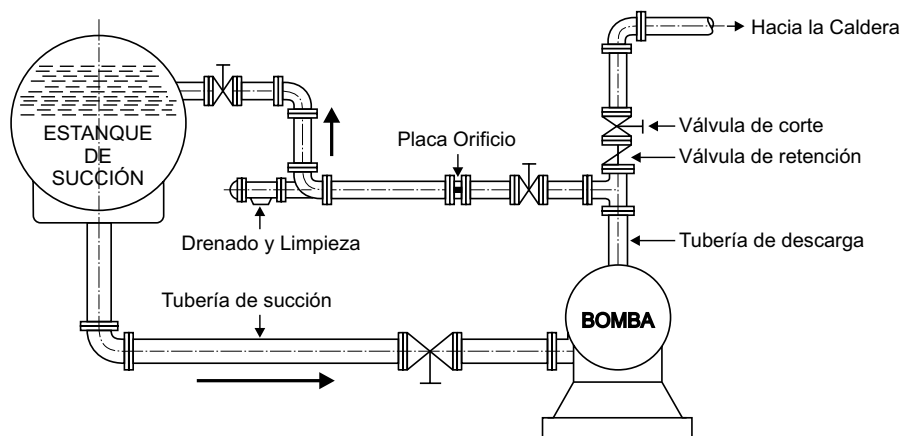
- **disminución del rendimiento:** se observa que cuanto menor es la descarga, menor será el rendimiento, aunque el aumento sobre la descarga normal ocasione el mismo problema.
- **aumento del empuje radial:** el empuje radial, resultante de la desigualdad de distribución de presiones en la carcasa, ocurre siempre y el valor máximo se tiene para la condición de **shut off** (válvula totalmente cerrada), con el líquido recirculando en la bomba.
- **aumento del empuje axial:** los dispositivos para el equilibrio del empuje axial producen grandes pérdidas de eficiencia, con la bomba operando a caudales bajos.
- **recirculación** provoca vibraciones, ruidos y daños al rodete.
- **elevación de la temperatura de la bomba:** la refrigeración en una bomba operando con caudales bajos no es suficiente, pudiendo ocurrir un sobre calentamiento reduciendo la vida de empaquetaduras, sellos mecánicos, rodamientos, ejes y dispositivos de equilibrio axial.

Para impedir que ocurran estos inconvenientes, se debe controlar el caudal mínimo en la descarga, recurriendo al uso de un sistema de control de flujo mínimo, por ejemplo:

#### 4.11.1 SISTEMA DE RECIRCULACIÓN CONTINUO

Consiste en un by-pass que contiene una placa orificio, que permite el retorno de parte del líquido hacia el depósito de donde el agua es bombeada. La placa orificio es dimensionada de modo que el orificio de pasada hacia la descarga de recirculación impida un sobre calentamiento de la bomba.

El inconveniente de esta solución es que obliga a sobredimensionar la bomba y el motor, pues ocurre una recirculación por el by-pass, incluso en las condiciones normales, cuando la demanda producto de la operación es suficiente para mantener la bomba con una temperatura aceptable.



#### 4.11.2 VÁLVULA DE FLUJO MÍNIMO

Durante el operación con caudal reducido, la válvula de flujo mínimo abre un by-pass, protegiendo de esta manera a la bomba. Durante el funcionamiento normal, siempre que el caudal sea mayor que el mínimo, la línea de by-pass permanece cerrada.

Existen válvulas en el mercado capaces de realizar automáticamente y en un sólo conjunto, la medición del caudal en la descarga, la retención del contra flujo (trabaja como una válvula de retención), la reducción de la presión en el sistema del recirculación y el control de la recirculación.



## 4.12 MATERIALES RESISTENTES A LA CAVITACIÓN

Hemos visto previamente que el colapso de las burbujas de vapor ocurren en regiones de presiones bastante elevadas, causando un desprendimiento de material en la superficie (pitting), dónde ocurren las implosiones.

Los efectos de la cavitación dependen del tiempo de duración, intensidad de la cavitación, propiedades del líquido y resistencia del material a la erosión debido a la cavitación.

La selección del material a ser empleado en la fabricación de una bomba, es de gran importancia. Algunos materiales en orden creciente respecto de su capacidad de resistencia a la erosión por cavitación son: fierro fundido, aluminio, bronce, acero fundido, acero laminado, bronce fosfórico, bronce manganeso, acero Siemens-Martin, acero al níquel, acero al cromo (12 Cr), aceros inoxidable especiales (18 Cr-8Ni). En rigor, no hay ningún material conocido que no sea afectado por la cavitación.

La resistencia de los materiales a la corrosión por cavitación es determinada en ensayos de laboratorio, cuando muestras de prueba, pesadas inicialmente, son puestas en un difusor donde se mide la presión y la velocidad del agua. Luego de cierto tiempo, se somete a cavitación, finalmente se mide la pérdida de material dada por la diferencia de peso de la muestra de prueba. Esta pérdida define la resistencia al desgaste por cavitación.

Ensayando diversos materiales y fijando el valor 1,0 como pérdida de material para el fierro fundido, se han obtenido los siguientes valores, en orden creciente de resistencia al desgaste por cavitación.

|                         |      |
|-------------------------|------|
| Fierro Fundido          | 1,0  |
| Bronce                  | 0,5  |
| Acero al cromo          | 0,2  |
| Liga de Bronce-Aluminio | 0,1  |
| Acero al Cromo-Níquel   | 0,05 |

Cuando una parte de la bomba se encuentra muy dañada por la presencia de cavitación, se pueden rellenar las partes gastadas mediante una apropiada soldadura eléctrica del material, esmerilando en seguida o, como algunos sugieren, aplicando una o más capas de resinas.



## **MÓDULO 5**

### ***Asociación de Bombas***



## ÍNDICE

|            |                                                                               |     |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>5</b>   | <b><i>Introducción</i></b>                                                    | 127 |
| <b>5.1</b> | <b><i>Asociación en paralelo</i></b>                                          | 129 |
| 5.1.1      | Asociación de dos bombas iguales en paralelo                                  | 129 |
| 5.1.2      | Asociación de bombas iguales con curva estable                                | 130 |
| 5.1.3      | Asociación de bombas con curvas diferentes y estables                         | 132 |
| 5.1.4      | Asociación de bombas iguales con variación de la altura geométrica/estática   | 133 |
| 5.1.5      | Asociación de bombas iguales con curvas inestables                            | 134 |
| <b>5.2</b> | <b><i>Selección del número de bombas</i></b>                                  | 136 |
| <b>5.3</b> | <b><i>Precauciones a considerar en asociaciones de bombas en paralelo</i></b> | 137 |
| 5.3.1      | Caudal excesivo                                                               | 137 |
| 5.3.2      | Caudal mínimo                                                                 | 138 |
| <b>5.4</b> | <b><i>Asociación de bombas en serie</i></b>                                   | 139 |
| <b>5.5</b> | <b><i>Bombas de varias etapas</i></b>                                         | 142 |
| <b>5.6</b> | <b><i>Conclusiones</i></b>                                                    | 142 |



## ASOCIACIÓN DE BOMBAS

### 5 INTRODUCCIÓN

Las razones que nos llevan a utilizar una asociación de bombas son varias y de diversa naturaleza, como por ejemplo:

No existe una bomba centrífuga que pueda entregar por si sola el caudal requerido; hay variación de caudal a través del tiempo (aumento de población, por ejemplo, en algunos períodos del año), en este caso es interesante instalar una o más bombas y con el transcurso del tiempo instalar más bombas; no existe una bomba capaz de entregar la altura manométrica requerida por el diseño; hay casos en que ocurren variaciones en el consumo (suministro de agua) o en el caudal del afluente ( sistema de aguas servidas) dentro del mismo período (día). Las razones para la asociación de bombas son, por consiguiente de naturaleza técnico-comercial, y varían desde la imposibilidad de encontrar una sola bomba capaz de entregar el caudal o la altura manométrica del diseño, hasta la disminución de los costos de instalación.



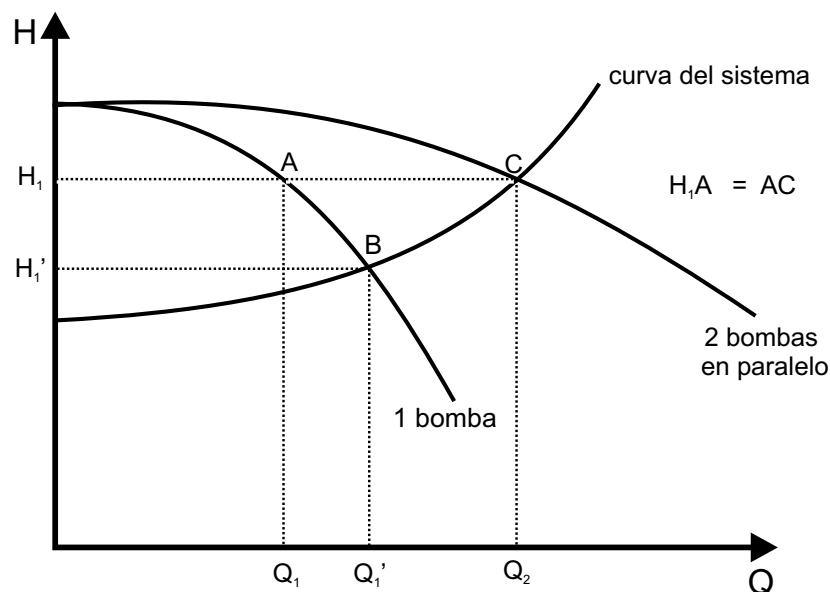
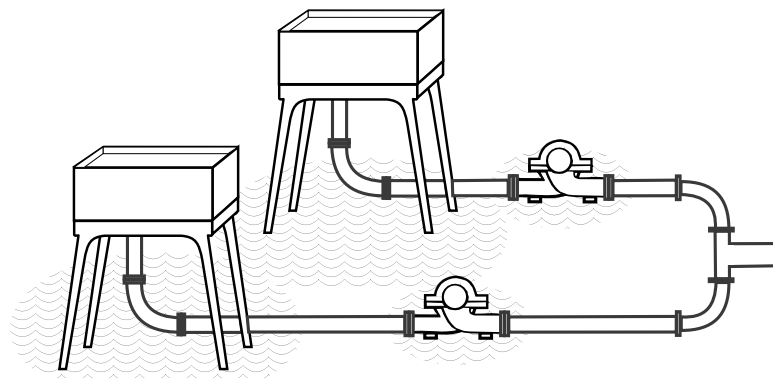
## 5.1 ASOCIACIÓN EN PARALELO

Dos o más bombas están operando en paralelo cuando descargan a una tubería común, de modo que cada una contribuye con una parte del caudal total.

Es interesante recordar que la bomba centrífuga vence las resistencias que encuentra, es decir, el desnivel geométrico estático más las pérdidas de carga. De esa manera, cuando están operando en paralelo, todas las bombas tendrán la misma altura manométrica total o, en otros términos: para la misma altura manométrica los caudales correspondientes se suman.

Para graficar la curva resultante de una asociación de bombas en paralelo, basta con graficar para cada altura los caudales correspondientes, tantas veces como fueran las bombas en paralelo.

### 5.1.1 ASOCIACIÓN DE DOS BOMBAS IGUALES EN PARALELO



Para explicarlo mejor, tomemos como ejemplo el esquema de la página anterior, dónde tenemos dos bombas iguales operando en paralelo, descargando en una línea común que lleva el líquido desde depósito de succión al depósito de descarga.

Cuando las dos bombas están operando, el caudal en el sistema es  $Q_2$  y cada bomba entrega un caudal  $Q_1$ , de tal una manera que  $Q_2 = 2Q_1$ .

Hacemos notar que las dos bombas operarán con una altura manométrica total  $H_1$ .

Cuando sólo una bomba opera, la altura manométrica total disminuye, pasando para  $H_1'$  ( $H_1' < H_1$ ) y para un caudal  $Q_1'$ , de tal una manera que  $Q_1 < Q_1' < Q_2$ .

Así, del ejemplo presentado, podemos extraer las siguientes conclusiones:

- 1) el caudal total del sistema es menor que la suma de los caudales de las bombas operando separadamente;
- 2) cuando las bombas están operando en paralelo, hay un desplazamiento del punto de operación de cada bomba hacia la izquierda de la curva (punto **A**). Esto se acentúa con el aumento de bombas en paralelo.
- 3) si una de las bombas sale de funcionamiento (como por ejemplo, por razones de mantención, de operación, etc), la unidad que continúa operando pasará del punto **A** para el punto **B**.

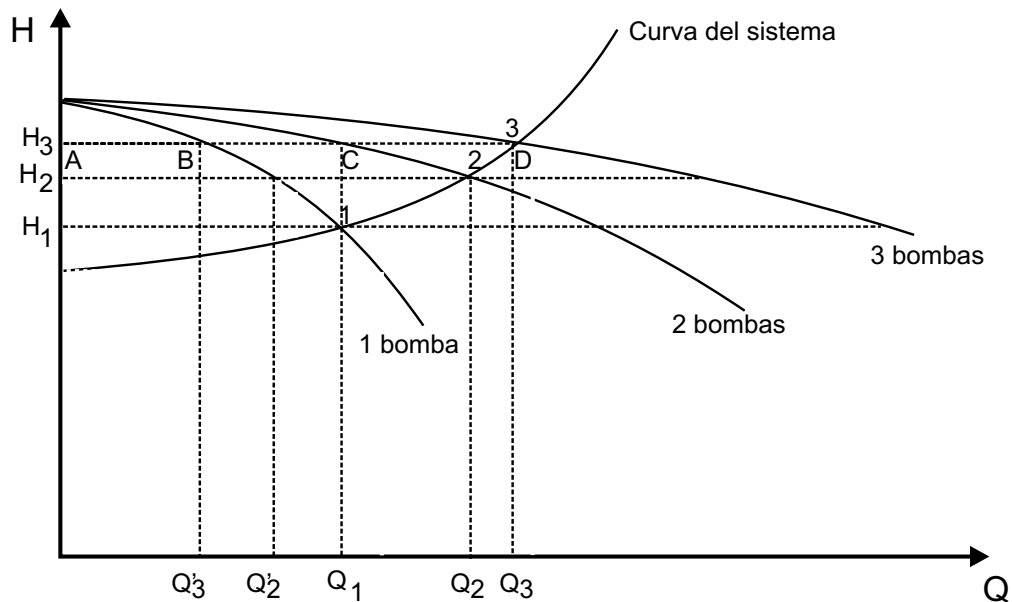
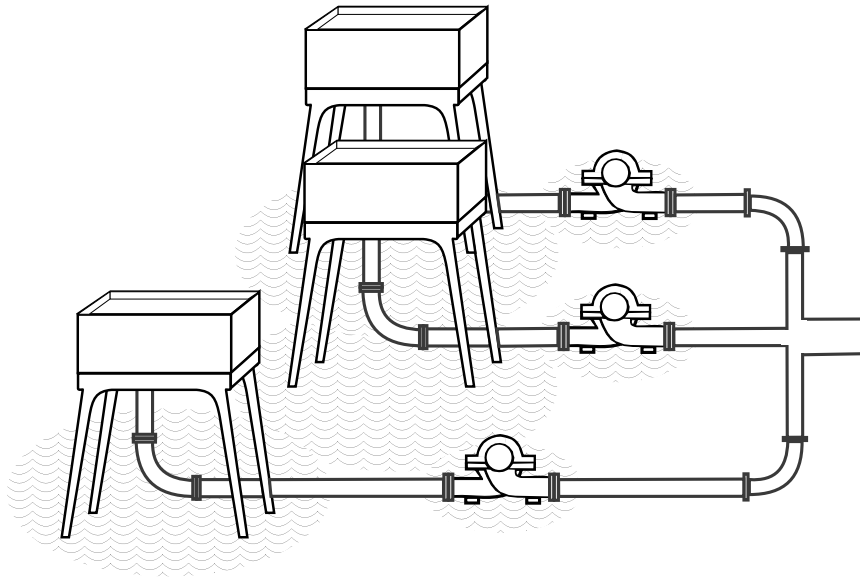
Recordemos que:

En el punto del funcionamiento **B**, tendremos un NPSH requerido y una potencia consumida mayor que en el punto **A**.

OBS.: Esto es válido para bombas centrífugas con rodetes radiales.

### **5.1.2 ASOCIACIÓN DE BOMBAS IGUALES CON CURVA ESTABLE**

Tomemos un ejemplo con tres bombas iguales con curvas estables, según la figura siguiente:



Operación con tres bombas iguales en paralelo

El caudal total que las tres bombas entregarán será:

$Q_3 = 3 Q'_3$ , es decir, cada bomba entregará  $1/3$  del caudal total y la altura manométrica será la misma para las tres bombas ( $H_3$ ).

Podemos sacar algunas conclusiones de esta asociación:

- 1)  $AB = BC = CD = Q_3 / 3$
- 2)  $Q_1$  = caudal de una sola bomba operando en el sistema;
- 3)  $Q'_2$  = caudal de cada bomba con dos operando en el sistema;
- 4)  $Q'_3$  = caudal de cada bomba con las tres operando en el sistema;
- 5)  $Q_1 > Q'_2 > Q'_3$

Para asociar “n” bombas operando en paralelo, bombeando un caudal total  $Q_{\text{total}}$  y una altura manométrica total  $H_{\text{total}}$ , la bomba deberá ser seleccionada para:

$$Q_{\text{bomba}} = \frac{Q_{\text{total}}}{n} \quad \text{y} \quad H_{\text{bomba}} = H_{\text{manométrica total}}$$

Observemos que cuanto más bombas operaran en paralelo, más a la izquierda del punto de menor rendimiento (punto de diseño) la bomba operará.

$$\text{Así: } Q_1 > Q'_2 > Q'_3 \quad .$$

La operación en un punto muy a la izquierda del punto de diseño trae serios problemas, como por ejemplo:

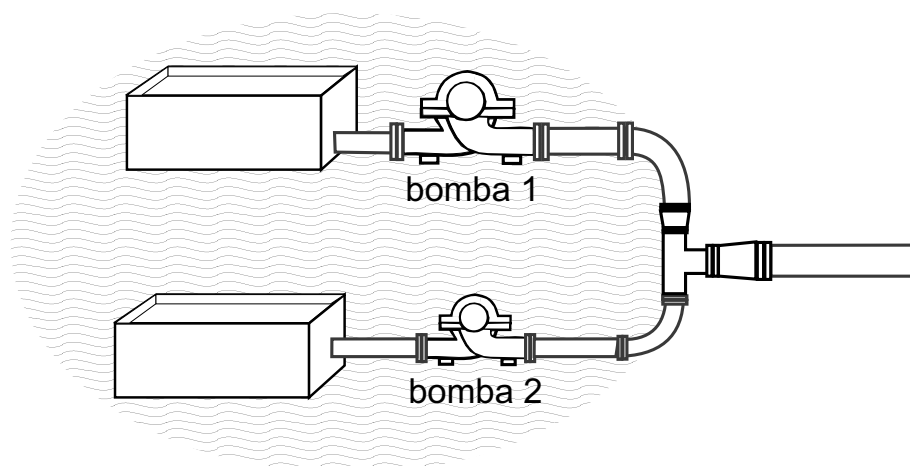
- vibración;
- recirculación hidráulica;
- calentamiento;
- esfuerzos elevados en los descansos;
- etc.

### 5.1.3 ASOCIACIÓN DE BOMBAS CON CURVAS DIFERENTES Y ESTABLES

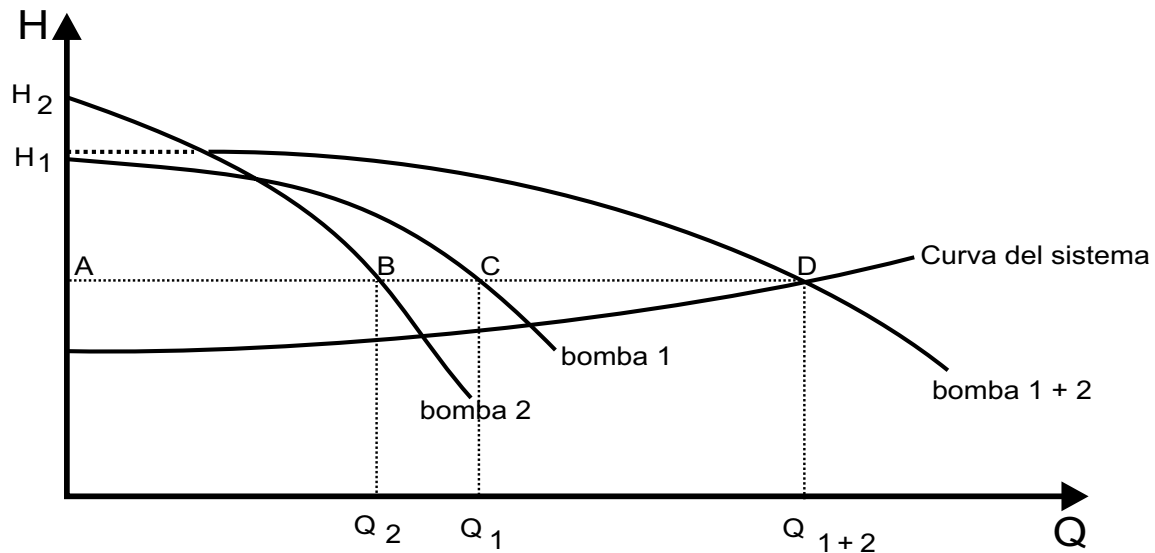
Dos o más bombas diferentes pueden trabajar en paralelo.

El buen funcionamiento de las bombas puede ser verificado por medio de la presentación gráfica de la asociación de las curvas.

Veamos por ejemplo la siguiente figura:



Trazando la curva de la asociación del esquema anterior, tenemos :



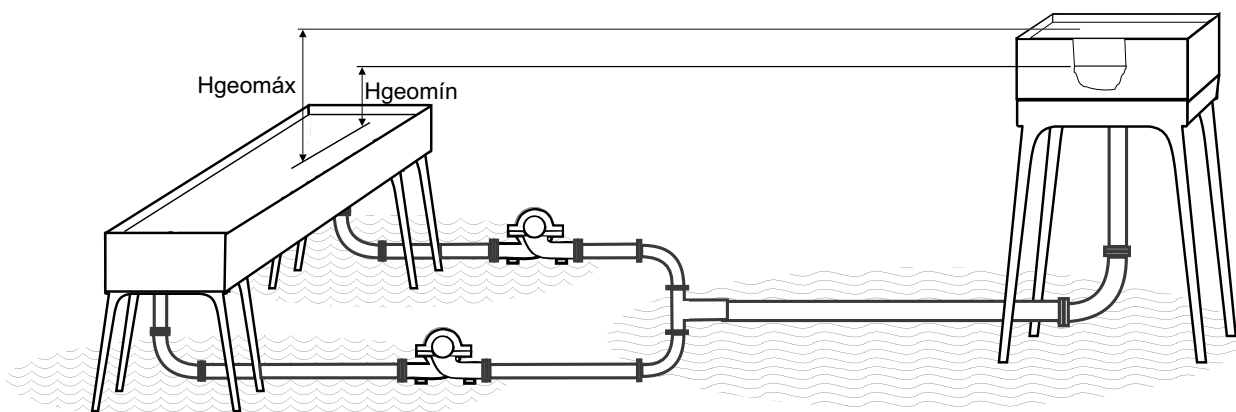
Notemos que:  $AB + AC = AD$ , esto es,  $Q_2 + Q_1 = Q_{1+2}$

Para caudal cero, la bomba 2 tiene  $H_2$  mayor que la bomba 1, es decir,  $H_2 > H_1$ .

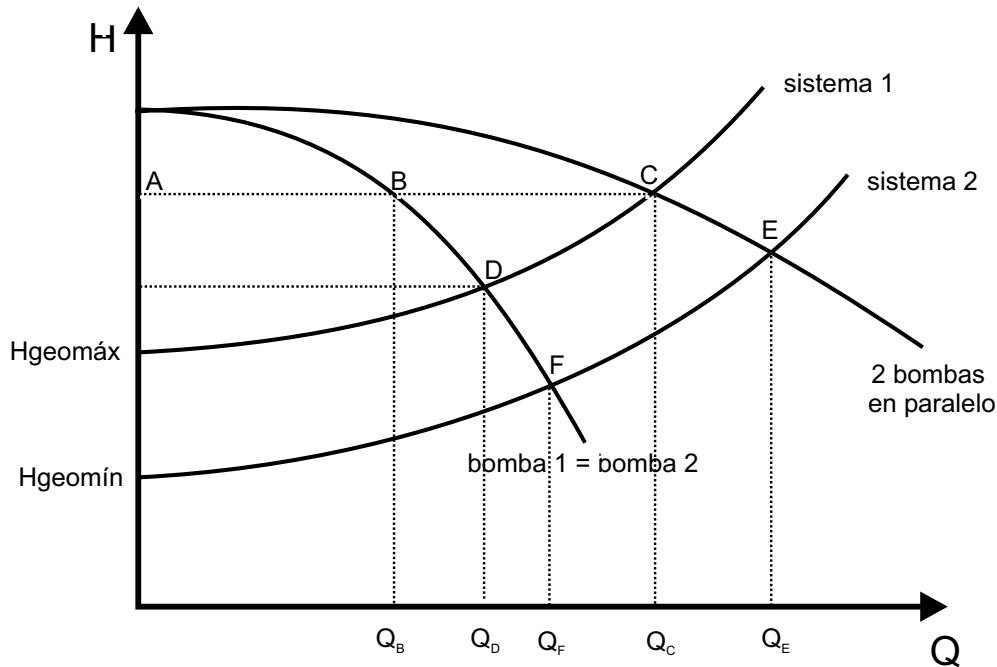
Así, la bomba 1 sólo aportará caudal para alturas manométricas menores que  $H_1$ .

En otras palabras, para alturas manométricas del sistema superiores a  $H_1$ , el caudal de la bomba 1 será nulo.

#### 5.1.4 ASOCIACIÓN DE BOMBAS IGUALES CON VARIACIÓN DE LA ALTURA GEOMÉTRICA / ESTÁTICA.



Trazando la curva de la asociación del esquema anterior, tenemos :



En este sistema, se tienen cuatro puntos de funcionamiento: **C, D, E y F**, respectivamente.

Una bomba funcionando con el nivel mínimo y máximo de los depósitos, puntos **D** y **F** y dos bombas funcionando en paralelo con el nivel mínimo y máximo de los depósitos, puntos **C** y **E**.

Se deben analizar principalmente dos puntos, estos son los puntos **F** y **B**.

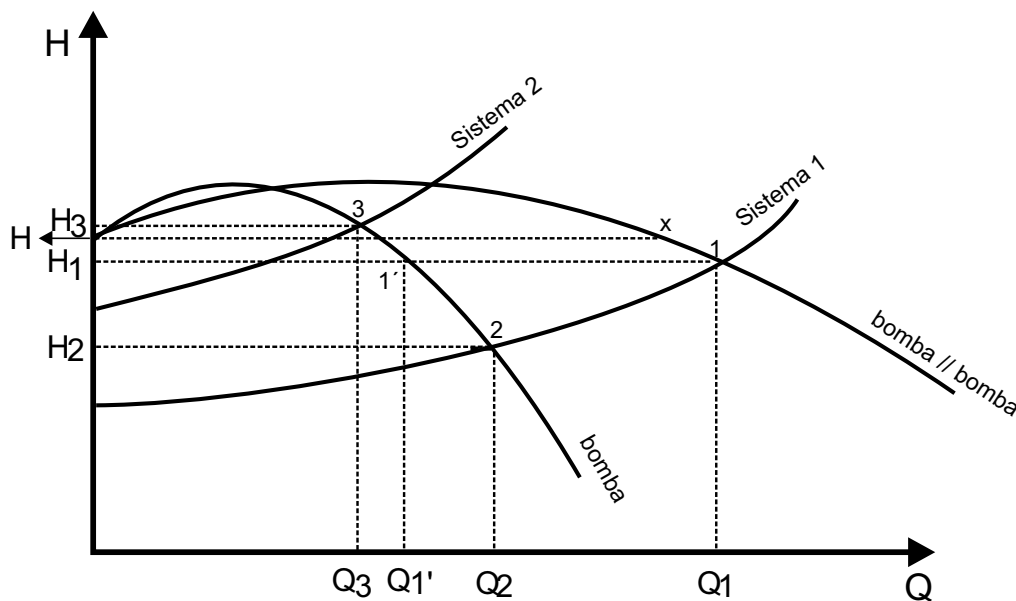
**Punto B** : Punto de funcionamiento por bomba, cuando ambas están en paralelo con una altura geométrica máxima. Se debe verificar que las bombas no operen con un caudal muy bajo.

**Punto F** : Punto de funcionamiento de una bomba con una altura geométrica mínima. Verificar la potencia consumida, el NPSRreq y el NPSHdisp y si el rendimiento, en ese punto, cae excesivamente.

Se debe verificar el NPSHdisp para la operación con el nivel mínimo en el depósito de succión, cuando una bomba opera separadamente, considerándose las diferentes formas de operación.

### 5.1.5 ASOCIACIÓN DE BOMBAS IGUALES CON CURVAS INESTABLES

Trazando la curva de la asociación de dos bombas iguales con curvas características inestables, tenemos:



Analizando en primer lugar el sistema 1 :

Tenemos para este sistema, dos puntos de trabajo:

**Punto 1:** punto de trabajo de dos bombas en paralelo en el sistema 1, donde  $Q_1$  es el caudal total;  $H_1$  es la altura manométrica total para el caudal  $Q_1$  y  $Q_1'$  es el caudal que contribuye cada bomba cuando las dos están opeando en paralelo:  $Q_1 = 2 Q_1'$ .

**Punto 2:** punto de trabajo de una bomba sola en el sistema 1, donde  $Q_2$  es el caudal de la bomba sola y  $H_2$  es la altura manométrica total para el caudal  $Q_2$ .

Analizando el sistema 2:

Con una bomba operando obtenemos un caudal  $Q_3$  y una altura manométrica  $H_3$ . En esta situación, debemos cambiar la bomba: debido a que la presión  $H_3$  que actúa sobre la válvula de retención de esta bomba, al momento de partir, haría que la válvula se mantenga cerrada, teniendo una presión  $H$ , inferior a presión  $H_3$ , por lo tanto no descargaría en el sistema.

Debido también a la inestabilidad de estas curvas, se recomienda que:

- en operación en paralelo, la altura total debe ser inferior a la altura correspondiente a caudal cero;
- en la partida de una de las bombas, la otra deberá estar operando con una altura manométrica total inferior a la altura manométrica total correspondiente a caudal cero. En el mismo ejemplo, la curva del sistema 1 cumple con estas recomendaciones.

## 5.2 SELECCIÓN DEL NÚMERO DE BOMBAS

Este es un problema que se acentúa cuando se están asociando bombas en paralelo, es decir:

- cuanto más bombas en paralelo tenemos asociadas, tenemos:

### Ventajas

- mayor flexibilidad del sistema, tanto en la operación como en la instalación.

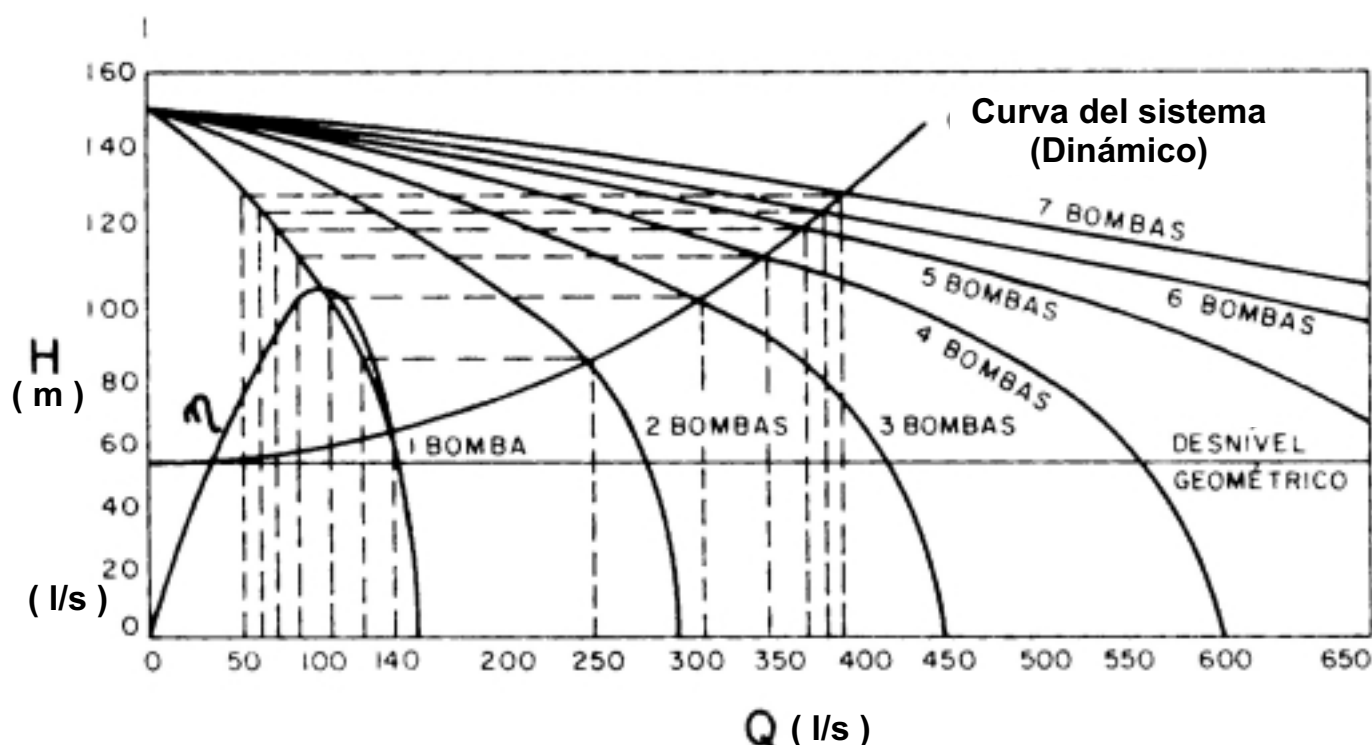
### Desventajas

- más unidades a ser mantenidas; motores super-dimensionados en relación al punto de operación, causando problemas con el factor de potencia ( $\cos \phi$ ); espacio de la instalación mayor, aumento en los costos de construcción.

Otros factores que deberán ser considerados son:

- un número excesivo de bombas en paralelo hace que cada una opere muy a la izquierda del punto de diseño, trayendo con esto todos los inconvenientes inherentes a este hecho.

Vamos a analizar la asociación de 7 (siete) bombas en paralelo:



De las curvas en la asociación anterior, se puede notar lo siguiente:

- cuando una bomba esta en operación, tenemos un caudal de 140 l/s.
- cuando agregamos una segunda bomba al sistema, tenemos un caudal de 250 l/s y no un caudal de  $140 \text{ l/s} \times 2 = 280 \text{ l/s}$ , que era lo esperado.
- al agregar una tercera bomba al sistema, el caudal resultante pasa a ser de 310 l/s.
- cuando las siete bombas están en operación, tenemos un caudal final en torno a 380 l/s y no  $140 \text{ l/s} \times 7 = 980 \text{ l/s}$ .

De lo anterior podemos sacar algunas conclusiones, como por ejemplo:

Por cada bomba que entra en el sistema, las otras pasan a operar más a izquierda de su punto de diseño, lo que se verifica en las curvas de la figura anterior ya que una bomba operando en el sistema entrega un caudal de 140 l/s.

Cuando las siete están en operación, cada una pasa a entregar individualmente un caudal en torno de los 50 l/s.

Notamos también que el aporte de caudal a partir de la tercera bomba es relativamente pequeña y en general podemos afirmar que la inclinación de las curvas de las bombas y de la curva del sistema afectarán a la selección del número limite de bombas a asociar.

### **5.3 PRECAUCIONES A CONSIDERAR EN ASOCIACIONES DE BOMBAS EN PARALELO**

- 1) en caso que salga de funcionamiento una de las unidades que está operando en el sistema, la bomba que permanece trabajando operará a la derecha de su punto de diseño, es decir, con un caudal mayor.
- 2) debido al número excesivo de bombas asociadas en paralelo, cada uno de ellas operará a la izquierda de su punto de diseño, como vimos previamente, eso es, con un caudal reducido

#### **5.3.1 CAUDAL EXCESIVO**

Cuando una bomba opera con un caudal excesivo, podrán ocurrir los problemas siguiente:

- El NPSH disponible es insuficiente, es decir, el NPSH requerido pasa a ser mayor que el NPSH disponible, en esas condiciones, la bomba podrá entrar en un régimen de cavitación;

- la eficiencia de la bomba cae;
- aparecen grandes esfuerzos radiales sobre el eje de la bomba;
- hay un aumento de la potencia consumida, la que en muchos casos puede superar la potencia nominal del motor eléctrico utilizado.

Así, se debe seleccionar el conjunto moto-bomba de manera que, cuando éste opere sólo en el sistema, no hayan problemas con el NPSH ni con la potencia consumida. Estos problemas de caudal excesivo son comunes en las captaciones de agua, cuando existe una variación del nivel del depósito o del río.

El caudal excesivo puede ser controlado por la válvula de la descarga. Junto con la salida de operación de las demás bombas que están en paralelo, se deben cerrar parcialmente las válvulas de descarga de las demás, con lo que se producen pérdidas locales, que obligan a cada bomba a operar con un caudal tal que no sobrecarguen su motor, evitando así la cavitación.

No siempre el control por medio de la válvula de descarga es el más conveniente, pues el buen funcionamiento del sistema dependerá de la realización de esta nueva regulación, la que muchas veces se hace tarde. Este no es recomendable para el caso de un número excesivo de bombas de gran tamaño.

### **5.3.2 CAUDAL MÍNIMO**

Si la bomba opera en la región de caudal mínimo, pueden ocurrir los siguientes problemas:

- excesiva recirculación de flujo;
- baja eficiencia de la bomba;
- esfuerzos radiales excesivos;
- calentamiento del líquido bombeado.

Normalmente el calentamiento provocado no es excesivo. Por ello una operación continua en esas condiciones dañará el sistema de sellado utilizado y disminuirá la vida de los rodamientos.

**IMPORTANTE:** En bombas axiales (propeller pumps), operando a caudales mínimos, se produce un aumento excesivo de la potencia consumida. Se debe evitar el trabajo paralelo con ese tipo de bombas.

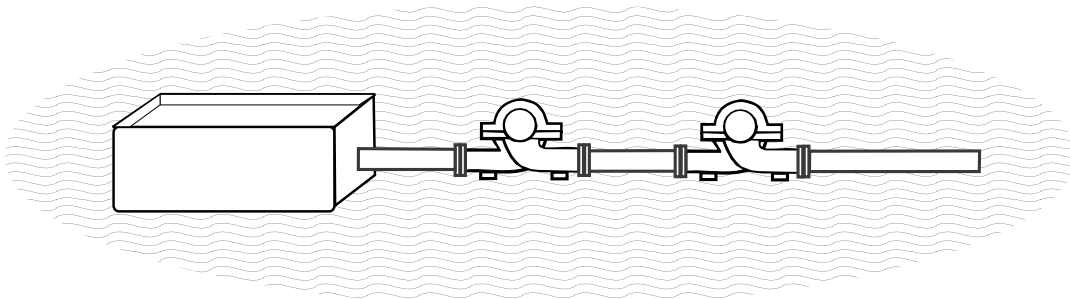
Las bombas de tamaño medio y grande, que tienen rodets de gran diámetro y que operan con caudales reducidos, pueden estar sujetas al problema de recirculación hidráulica. (tema visto en el módulo 4)

Las consecuencias son: ruidos excesivos, vibraciones semejantes a la cavitación (sólo que está ocurre con caudales excesivos).

## 5.4 ASOCIACIÓN DE BOMBAS EN SERIE

En algunas aplicaciones, como por ejemplo, debido a condiciones topográficas o por cualquier otro motivo, un sistema podría exigir grandes alturas manométricas, las que en algunos casos, pueden exceder los límites de operación de las bombas de una etapa. En estos casos, una de las soluciones es la asociación de bombas en serie.

Esquemáticamente, la asociación de bombas en serie se presenta de la siguiente forma:



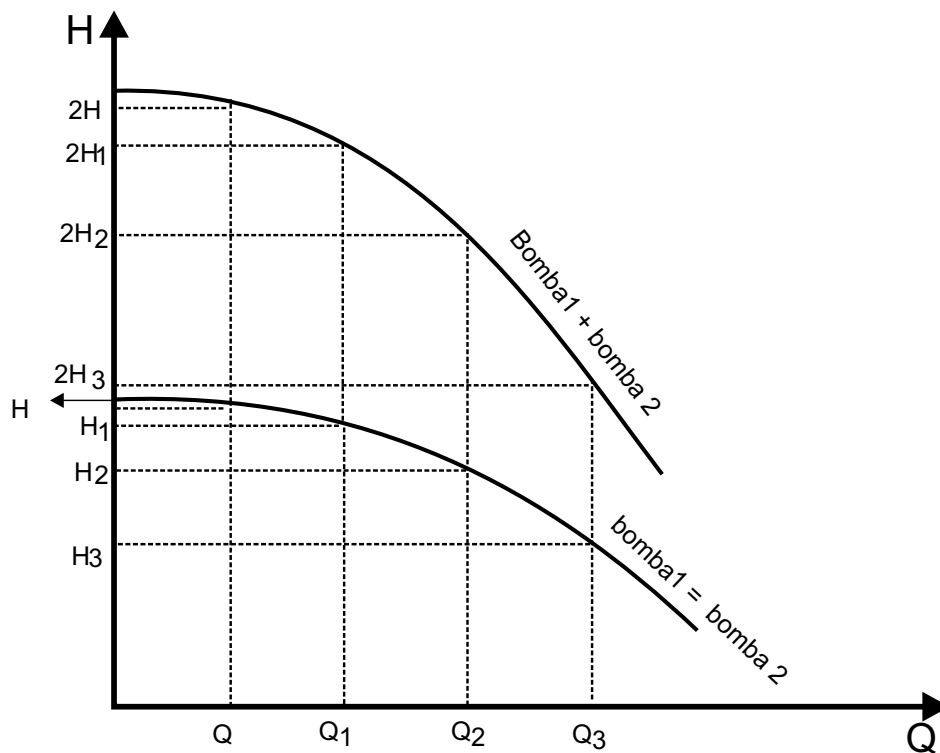
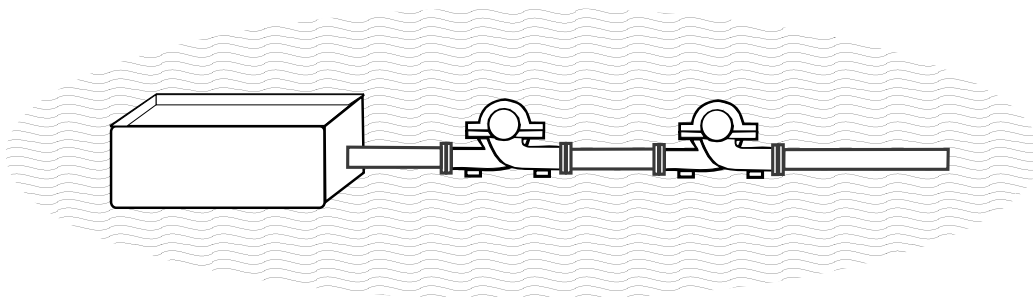
Es fácil notar, que el líquido que pasará por la primera bomba, recibirá una cierta energía de presión, entrará en la segunda bomba, donde habrá un nuevo crecimiento de energía a fin que el mismo cumpla con las condiciones solicitadas.

También queda claro que el caudal que sale de la primera bomba es el mismo que entra en la segunda, siendo por tanto el caudal, en una asociación de bombas en serie, constante.

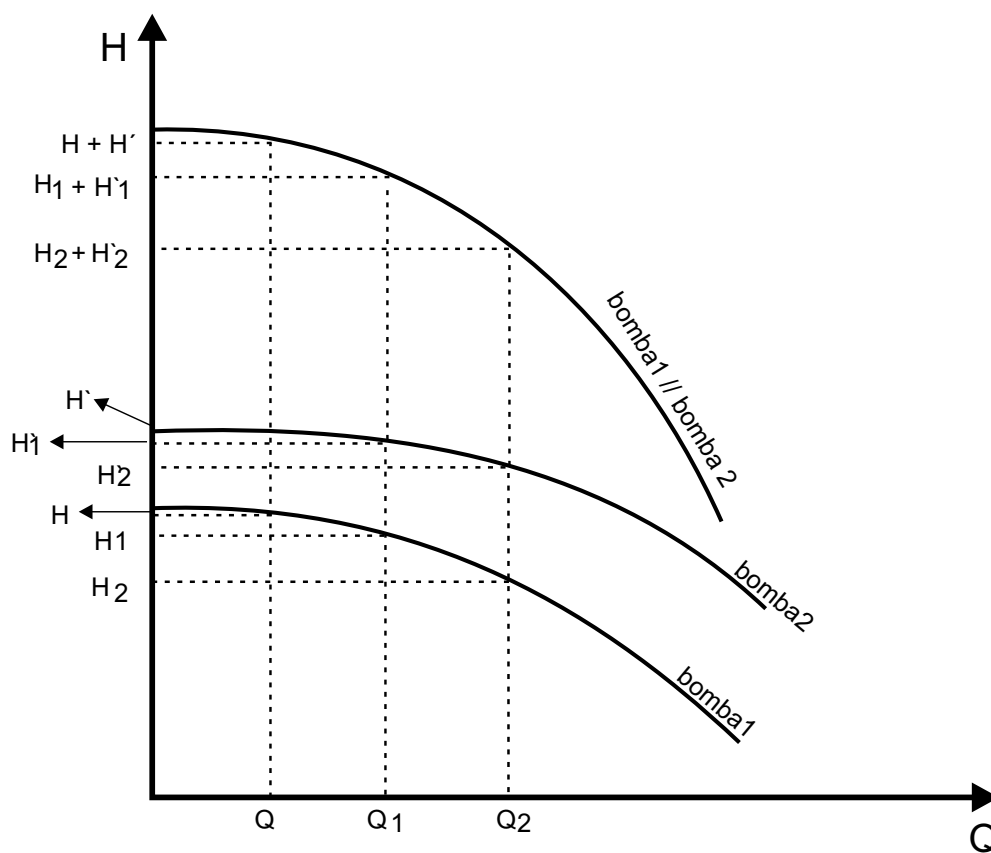
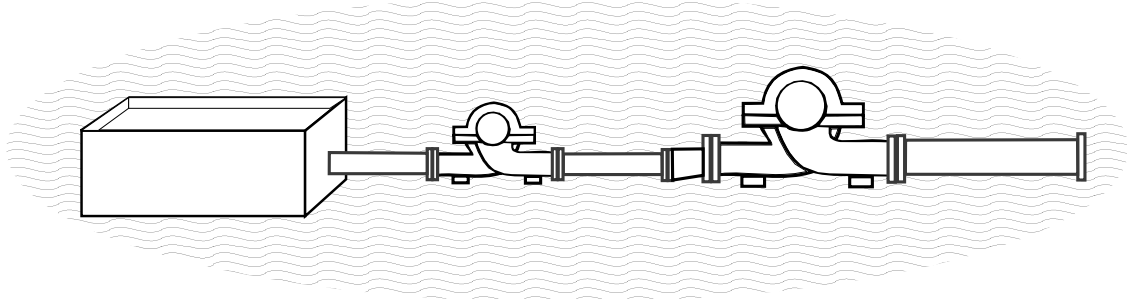
Podemos concluir de esa forma, que cuando asociamos dos o más bombas en serie, para un mismo caudal, la presión total (altura manométrica) será la suma de las presiones (altura) suministradas por cada bomba.

Para obtener la curva característica resultante de dos bombas en serie, iguales o diferentes, basta con sumar las alturas manométricas totales, correspondientes a los mismos valores de caudal, en cada bomba.

Por ejemplo, veamos la conexión de dos bombas iguales asociadas en serie:



Analicemos ahora, dos bombas diferentes asociadas en serie:



Entre los arreglos posibles para la instalación de bombas en serie, podemos tener:

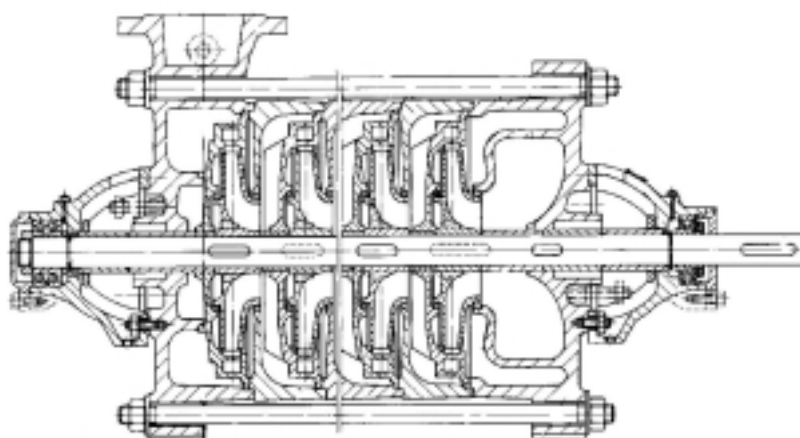
- 1) motor con dos puntas de eje, montado entre las bombas. Para la mayoría de las bombas, esto no es posible de realizar, debido a que la inversión del sentido de rotación para una de las bombas, no es admisible.
- 2) motor normal accionando dos bombas, con una bomba intermedia con dos puntas de eje (la bomba intermedia debe tener eje pasante y ser capaz de transmitir el torque a las dos bombas).
- 3) dos motores accionando cada uno a su propia bomba.

## 5.5 BOMBAS DE VARIAS ETAPAS

Un ejemplo común de bombas operando en serie es el de las bombas de varias etapas.

Todo ocurre como si cada etapa fuese una bomba sola. El caudal es el mismo en cada etapa y las alturas manométricas se van sumando a las anteriores.

Las aplicaciones más típicas son aquellas de caudales pequeños y medianos con alturas manométricas totales elevadas. Por ejemplo, las bombas de alimentación de calderas, bombas para abastecimiento de agua y bombas para riego, entre otras aplicaciones.



Bomba de eje horizontal de múltiples etapas

## 5.6 CONCLUSIONES

De acuerdo a lo expuesto en este capítulo, debemos considerar los siguientes puntos, cuando asociamos bombas en serie o en paralelo:

- dar preferencia al caso de asociación de bombas en paralelo que tengan curvas características estables;
- seleccionar, cuando sea posibles, bombas iguales, permitiendo de esa forma, facilidades de mantención y operación;
- en asociaciones en paralelo, el diámetro de la tubería de descarga deberá ser suficiente para transportar al caudal deseado con pérdidas de carga debidamente calculadas para este caudal, en caso contrario, la operación en paralelo no presentará ventajas apreciables en el sentido de aumento de caudal;
- seleccionar bombas de modo que la altura manométrica final del sistema nunca sobrepase la altura correspondiente a caudal cero, de cualquiera de las bombas asociadas en paralelo;

- seleccionar bombas donde el NPSH disponible sea siempre mayor que el NPSH requerido;
- seleccionar motores de modo de cumplir con todos los puntos de trabajo posibles en el sistema;
- en asociaciones en serie, verificar la presión máxima que soportan los flanges de las bombas siguientes;
- siempre tener a mano las curvas características de las bombas a ser la asociadas así como la curva característica del sistema, para que podamos analizar lo que pasará con esta asociación, y de esa forma adquirir el equipamiento adecuado.



## **MÓDULO 6**

### ***Bombas: Clasificación, Tipos, Características y Partes Principales***



## ÍNDICE

|             |                                                                                  |     |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>6</b>    | <i>Introducción</i>                                                              | 149 |
| <b>6.1</b>  | <i>Bombas</i>                                                                    | 151 |
| 6.1.1       | <i>Formas de accionamiento</i>                                                   | 151 |
| <b>6.2</b>  | <i>Clasificación de las bombas</i>                                               | 151 |
| 6.2.1       | <i>Bombas centrífugas</i>                                                        | 151 |
| 6.2.1.1     | <i>Clasificación de las bombas centrífugas</i>                                   | 151 |
| 6.2.2       | <i>Bombas de desplazamiento positivo</i>                                         | 152 |
| <b>6.3</b>  | <i>Bombas centrífugas - Clasificación</i>                                        | 154 |
| 6.3.1       | <i>Bomba centrífuga con rodete en voladizo</i>                                   | 155 |
| 6.3.2       | <i>Bomba centrífuga con rodete entre rodamientos</i>                             | 156 |
| 6.3.3       | <i>Bomba centrífuga tipo turbina (verticales)</i>                                | 157 |
| <b>6.4</b>  | <i>Componentes de las bombas centrífugas y sus características principales</i>   | 163 |
| <b>6.5</b>  | <i>Rodete</i>                                                                    | 165 |
| 6.5.1       | <i>Criterios para la selección de los tipos de rodetes</i>                       | 165 |
| <b>6.6</b>  | <i>Cuerpo espiral (voluta o carcasa)</i>                                         | 169 |
| 6.6.1       | <i>Norma</i>                                                                     | 171 |
| 6.6.2       | <i>Nomenclatura</i>                                                              | 171 |
| 6.6.3       | <i>Dimensionamiento de los Flanges</i>                                           | 171 |
| 6.6.4       | <i>Presión nominal</i>                                                           | 172 |
| 6.6.5       | <i>Selección</i>                                                                 | 172 |
| 6.6.6       | <i>Tablas</i>                                                                    | 173 |
| 6.6.6.1     | <i>Tabla 1 - ANSI - Flanges y contraflanges</i>                                  | 174 |
| 6.6.6.2     | <i>Tabla 2 - DIN - Flanges y contraflanges</i>                                   | 175 |
| 6.6.6.3     | <i>Tabla 3 - DIN - Flanges y contraflanges (Presiones y medidas usuales KSB)</i> | 176 |
| 6.6.6.4     | <i>Tabla 4 - ANSI - Presión admisible (bar) x Temperatura Máxima (°C)</i>        | 177 |
| 6.6.6.5     | <i>Tabla 5 - DIN - Presión admisible (bar) x Temperatura Máxima (°C)</i>         | 178 |
| <b>6.7</b>  | <i>Difusor</i>                                                                   | 179 |
| <b>6.8</b>  | <i>Eje</i>                                                                       | 179 |
| <b>6.9</b>  | <i>Casquillo protector de eje</i>                                                | 181 |
| <b>6.10</b> | <i>Anillos de desgaste</i>                                                       | 182 |
| <b>6.11</b> | <i>Caja de sellado</i>                                                           | 183 |
| <b>6.12</b> | <i>Prensaestopa</i>                                                              | 183 |
| 6.12.1      | <i>Límites de aplicación</i>                                                     | 185 |
| <b>6.13</b> | <i>Sello mecánico</i>                                                            | 186 |
| 6.13.1      | <i>Sellos estandarizados</i>                                                     | 188 |
| 6.13.2      | <i>Sellos mecánicos/Dispositivos auxiliares</i>                                  | 189 |
| 6.13.3      | <i>Planos de sellado conforme a la norma API, 6a edición</i>                     | 190 |
| 6.13.4      | <i>Descripción de los planos de sellado</i>                                      | 191 |
| <b>6.14</b> | <i>Soporte de rodamiento/Cavallette de rodamientos</i>                           | 192 |
| <b>6.15</b> | <i>Descansos</i>                                                                 | 193 |
| <b>6.16</b> | <i>Fuerzas</i>                                                                   | 196 |
| 6.16.1      | <i>Fuerza radial</i>                                                             | 196 |
| 6.16.2      | <i>Fuerza axial</i>                                                              | 198 |
| 6.16.2.1    | <i>Rodete de doble succión</i>                                                   | 199 |
| 6.16.2.2    | <i>Perforaciones de alivio en el rodete/Anillos de desgaste</i>                  | 199 |
| 6.16.2.3    | <b>Álabes traseros</b>                                                           | 200 |

## ÍNDICE

|             |                                                 |     |
|-------------|-------------------------------------------------|-----|
| 6.16.2.4    | <i>Configuración de Rodetes</i>                 | 200 |
| 6.16.2.5    | <i>Disco y contra-disco</i>                     | 201 |
| 6.16.2.6    | <i>Tambor o pistón de equilibrio</i>            | 201 |
| 6.16.2.7    | <i>Combinación pistón / disco de equilibrio</i> | 202 |
| <b>6.17</b> | <i>Normas</i>                                   | 203 |

## **BOMBAS: CLASIFICACIÓN, TIPOS CARACTERÍSTICAS Y PARTES PRINCIPALES**

### **6 INTRODUCCIÓN**

En este módulo, conoceremos los principales tipos de bombas centrífugas, su clasificación, características y partes principales.

Detallaremos sus componentes, sistemas de sellado, alivio de las fuerzas radiales y axiales, etc.

El objetivo de este módulo es que el lector conozca de forma detallada las bombas centrífugas como máquina.



## **6.1 BOMBAS**

Las bombas son máquinas hidráulicas que transfieren energía al fluido con la finalidad de transportarlo desde un punto a otro. Reciben energía de una fuente motora cualquiera y entregan parte de esta energía al fluido en forma de energía de presión, energía cinética o ambas, es decir, aumentan la presión del líquido, la velocidad o ambas.

### **6.1.1 FORMAS DE ACCIONAMIENTO**

Las principales formas de accionamiento son:

- motores eléctricos (forma más usual);
- motores de combustión interna (por ejemplo.; Diesel, muy utilizado en sistemas de riego y bombas para red de incendio );
- turbinas (en su gran mayoría, turbinas a vapor).

## **6.2 CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS**

No existe una terminología homogénea sobre bombas, pues existe varios criterios para designarlas; para nuestros efectos, las clasificaremos en dos grandes categorías:

- a) Bombas centrífugas (también llamadas Turbo-bombas);
- b) Bombas volumétricas o de desplazamiento positivo

### **6.2.1 BOMBAS CENTRÍFUGAS**

Este tipo de bomba tienen por principio de funcionamiento la transferencia de energía mecánica hacia el fluido bombeado en forma de energía cinética.

A su vez, esta energía cinética es transformada en energía potencial (energía de presión) siendo ésta su característica principal. El movimiento rotatorio de un rodete inserto en una carcasa (cuerpo de la bomba) es el órgano funcional responsable por tal transformación.

#### **6.2.1.1 CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS**

En función de los tipos y formas de los rodetes, las bombas centrífugas pueden ser divididas en la siguiente clasificación:

**a) Radiales**

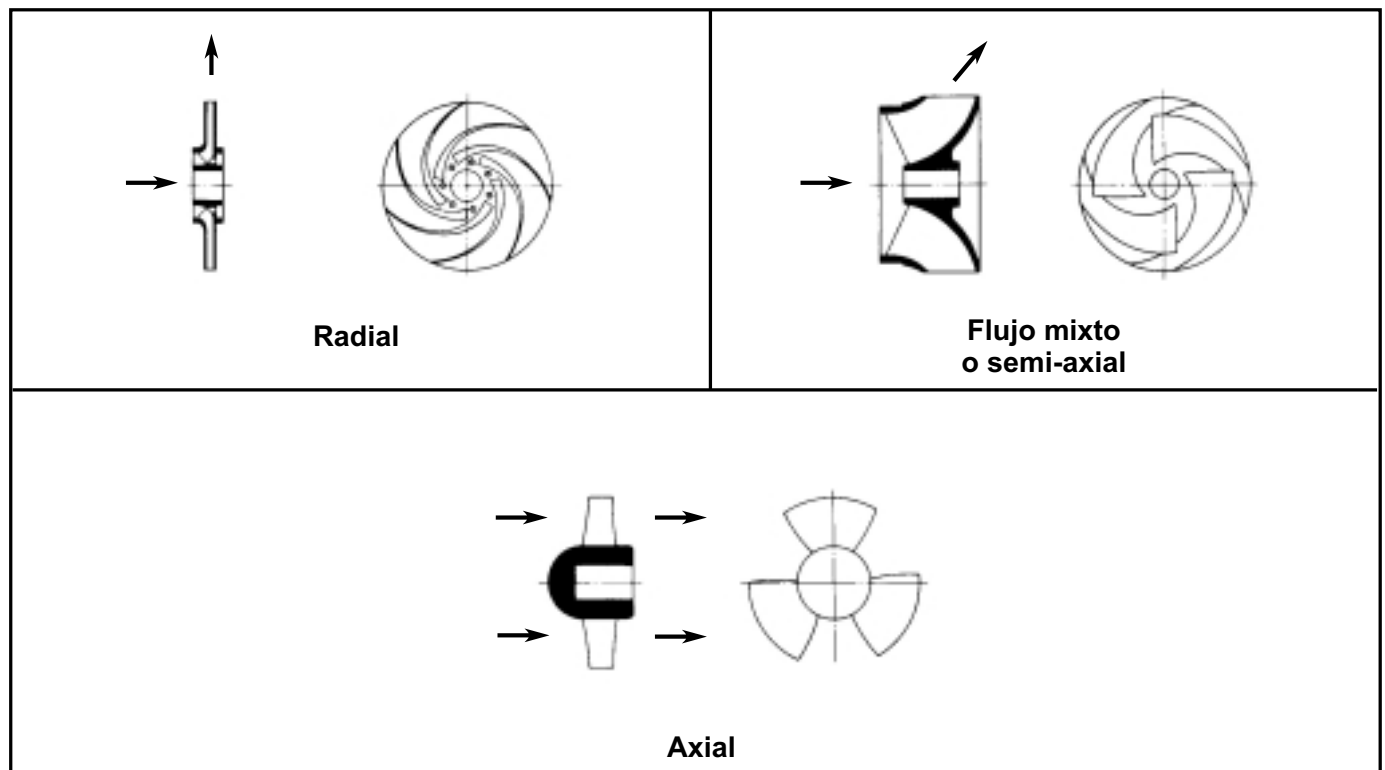
Cuando la dirección del fluido bombeado es perpendicular al eje de rotación.

**b) Flujo mixto o Semi-Axial**

Cuando la dirección del fluido bombeado es inclinada en relación al eje de rotación.

**c) Flujo Axial**

Cuando la dirección del fluido bombeado es paralela en relación al eje de rotación.



## 6.2.2 BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

Al contrario de las bombas centrífugas, este tipo de máquina tienen por característica de funcionamiento la transferencia directa de energía mecánica entregada por una fuente motriz en energía potencial (energía de presión). Esta transferencia se obtiene por el movimiento de una pieza mecánica en la bomba, la que obliga al fluido a ejecutar el mismo movimiento que este produce.

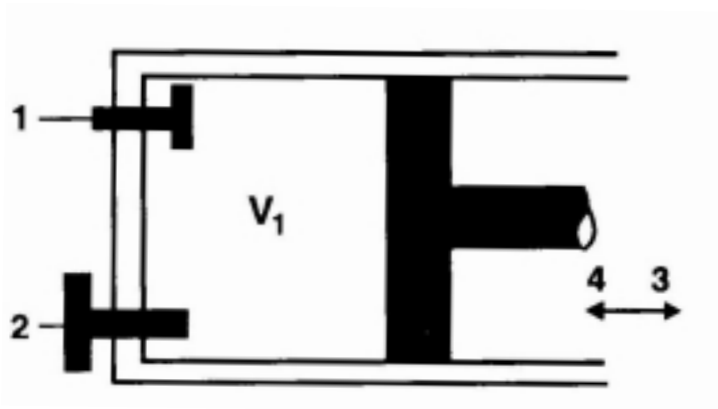
El líquido, sucesivamente llena los depósitos y después es expulsado de estos espacios con un volumen determinado hacia el interior de la bomba, dando origen al nombre de bombas volumétricas.

La variación en los tipos de estos órganos mecánicos (pistones, diafragmas, engranajes, tornillos, etc ) , son lo de clasificación de las bombas volumétricas o de desplazamiento positivo, las cuales se dividen en:

- a) Bombas de pistón o alternadas,
- b) Bombas rotativas

## A) BOMBAS DE PISTÓN

En las bombas de pistón, el órgano que produce el movimiento del fluido es un pistón que, en movimientos alternados aspira y expulsa el fluido bombeado como muestra la siguiente figura:



- 1 - Válvula de admisión
- 2 - Válvula de descarga
- 3 - Movimiento de aspiración
- 4 - Movimiento de descarga

Principio de funcionamiento:

- 1) Movimiento de aspiración con el consecuente cierre de la válvula de descarga y abertura de la válvula de admisión, llenado de fluido con un volumen  $V_1$ .
- 2) Movimiento de descarga con abertura de la válvula de descarga y cierre de la válvula de admisión, vaciando el fluido en el volumen  $V_1$ , imprimiéndole la energía potencial (de presión).

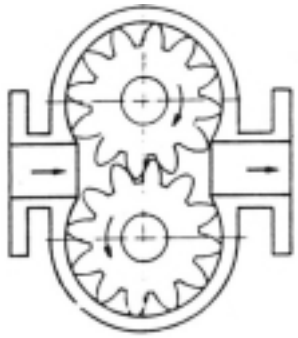
Observaciones generales:

- la descarga a través de la bomba es intermitente;
- las presiones varían periódicamente en cada ciclo;
- esta bomba es capaz de funcionar como bomba de vacío, en caso que no exista un fluido que aspirar.

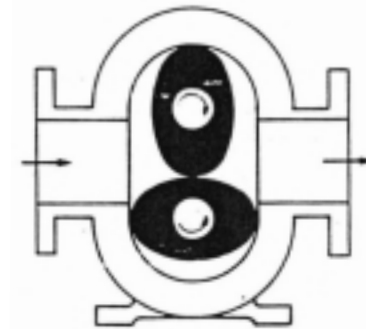
## B) BOMBAS ROTATIVAS

El nombre genérico de Bomba Rotativa, designa a una serie de bombas volumétricas accionadas por un movimiento de rotación, de ahí el origen del nombre.

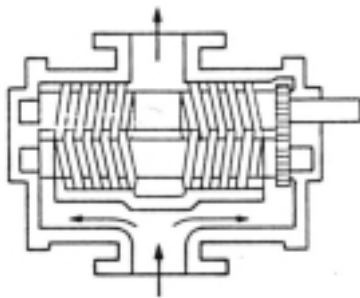
Las bombas rotativas pueden ser de tornillos (screw pumps), engranajes, paletas, lóbulos o peristálticas, entre otras, conforme se muestra en las siguientes figuras:



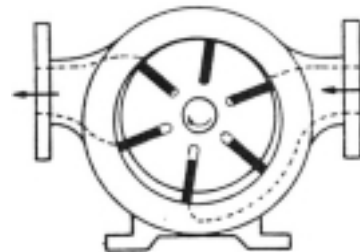
Bomba de engranaje



Bomba de lóbulos  
o peristáltica



Bomba de tornillo



Bomba de paletas

El funcionamiento volumétrico de todas ellas consiste en el llenado de los intersticios entre el componente giratorio y la carcasa, siendo que la suma de todos ellos, menos las pérdidas naturales (recirculación), corresponde al caudal total entregado por la bomba

En estas bombas, cuando la velocidad es constante, la descarga y la presión son prácticamente constantes, en la práctica habrán pequeñas fluctuaciones.

### 6.3 BOMBAS CENTRÍFUGAS - CLASIFICACIÓN

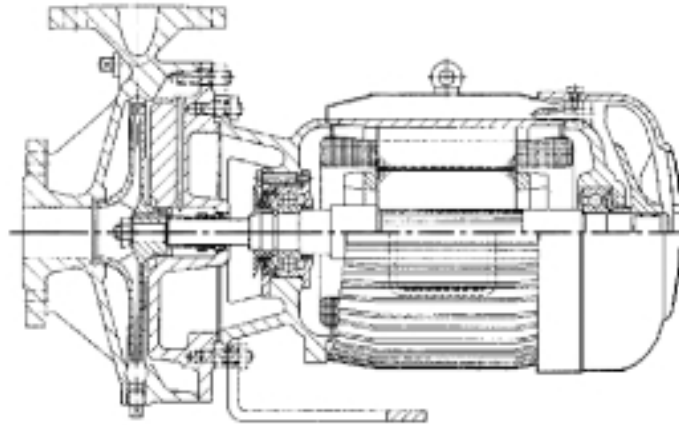
Las bombas centrífugas son generalmente clasificadas por su configuración mecánica general. Las características más importantes, las que incluyen virtualmente a todas las bombas centrífugas, son las siguientes:

### 6.3.1 BOMBA CENTRÍFUGA CON RODETE EN VOLADIZO

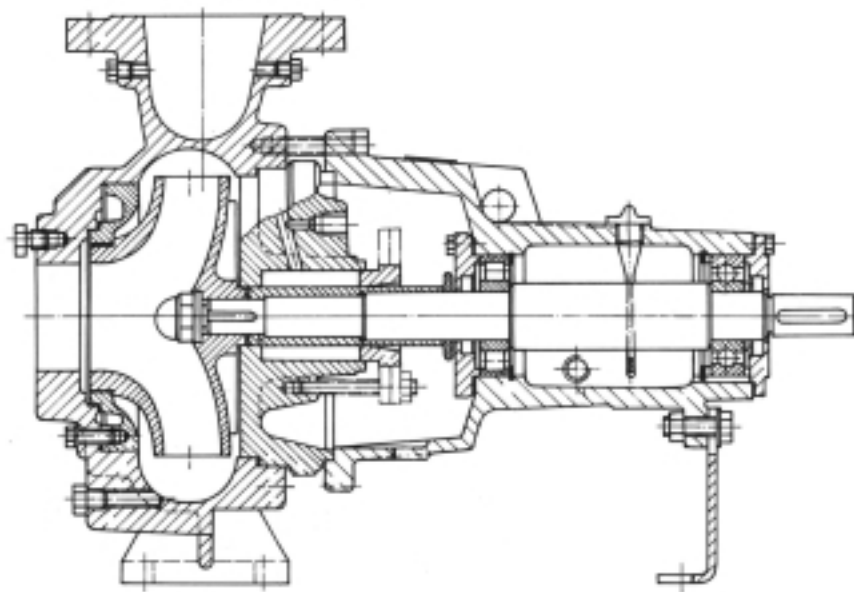
En este grupo de bombas, el rodete o rodetes, están montados en la extremidad posterior del eje del accionamiento que a su vez es fijado en voladizo sobre un soporte de rodamiento.

Este grupo de bombas se subdivide en bombas monobloc, donde el eje de accionamiento de la bomba es el propio eje del accionador y bombas no monobloc, donde el eje de accionamiento de la bomba es diferente del eje del accionador.

El acoplamiento entre los ejes es realizado normalmente por un acoplamiento elástico.



bomba centrífuga con rodete en voladizo,  
una etapa, monobloc

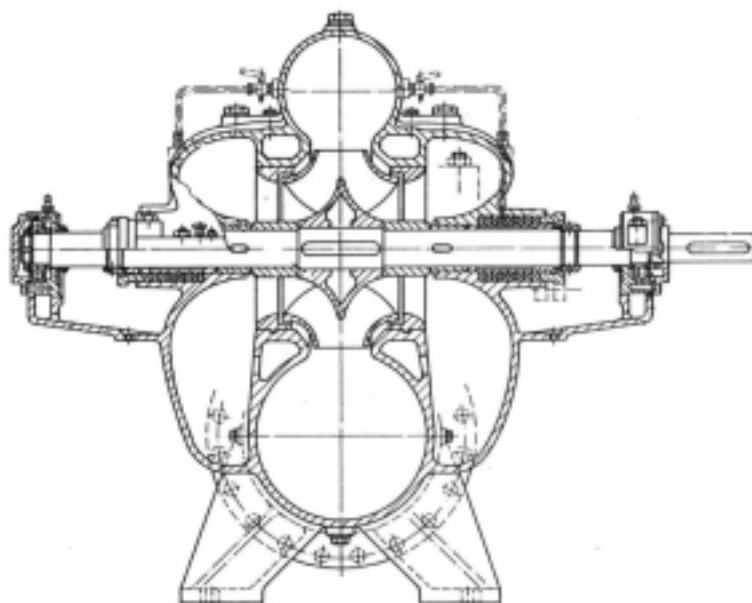


bomba centrífuga con rodete en voladizo,  
una etapa, bomba y motor separado

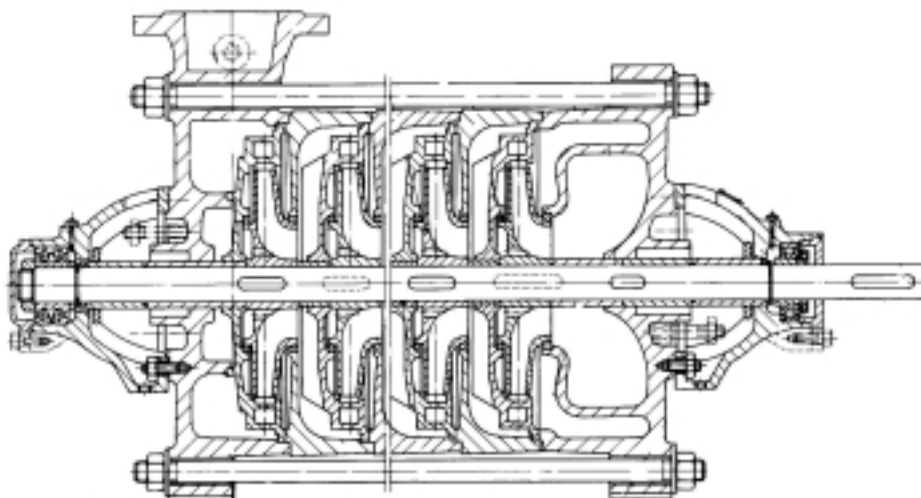
### 6.3.2 BOMBA CENTRÍFUGA CON RODETE ENTRE RODAMIENTOS

En este grupo de bombas, el rodete o rodetes son montados en un eje apoyado por rodamientos en ambos extremos y los mismos se sitúan entre ellas.

Este grupo puede ser subdividido en bombas de simple y múltiples etapas.



bomba centrífuga con el rodete  
entre rodamientos, una etapa,  
bomba y motor separados

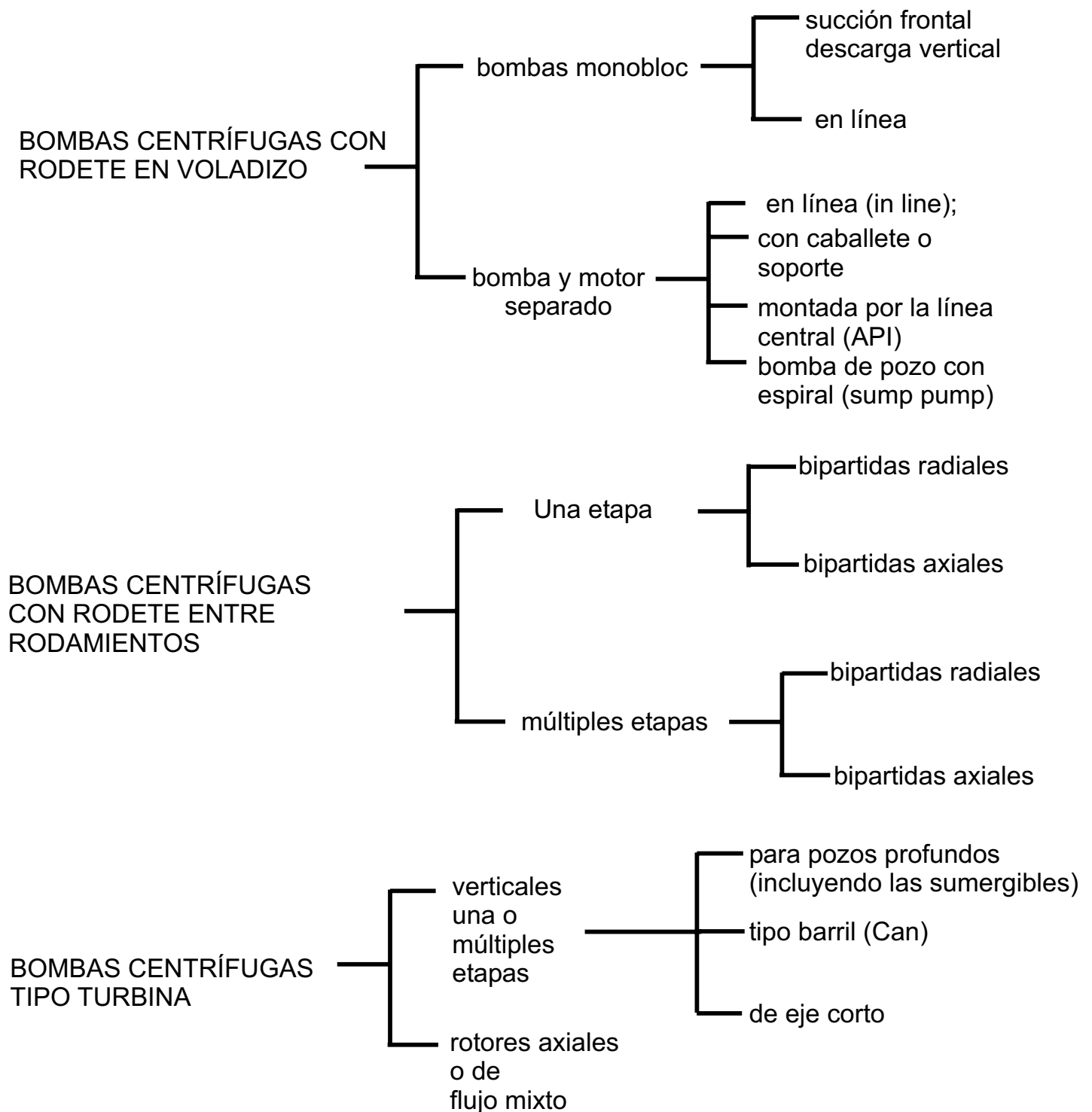


bomba centrífuga con rodetes  
entre los rodamientos, multietapa,  
bomba y motor separados

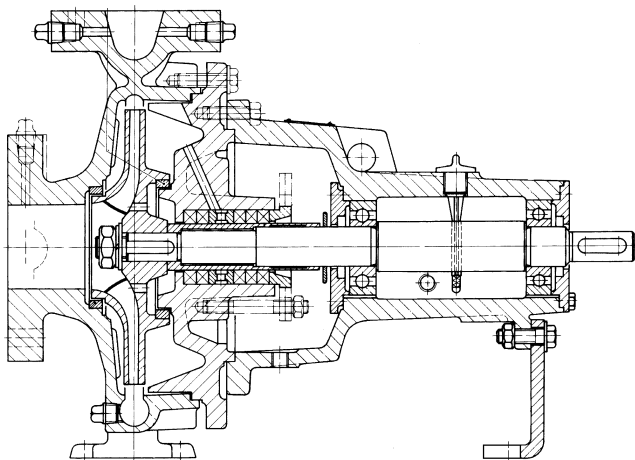
### 6.3.3 BOMBA CENTRÍFUGA TIPO TURBINA (VERTICALES)

Estas bombas pueden ser subdivididas en: bombas de pozo profundo; bomba tipo barril (CAN); bombas de una o múltiples etapas, con rodets radiales o semi-axiales; bombas sumergibles para norias, etc.

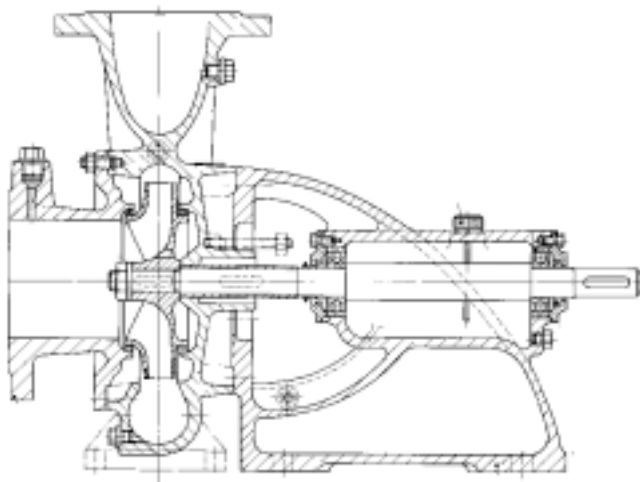
De acuerdo con el Hydraulic Institut, describiremos las sub-divisiones de las clasificaciones anteriormente citadas:



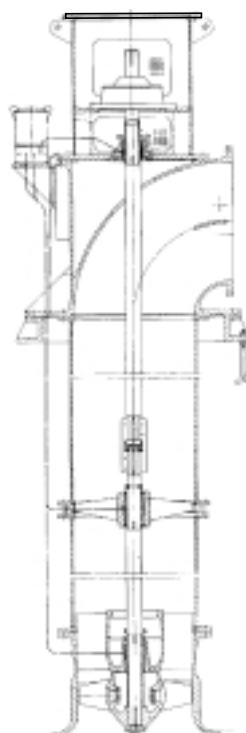
En las figuras siguientes, veremos algunos tipos de bombas con su clasificación general:



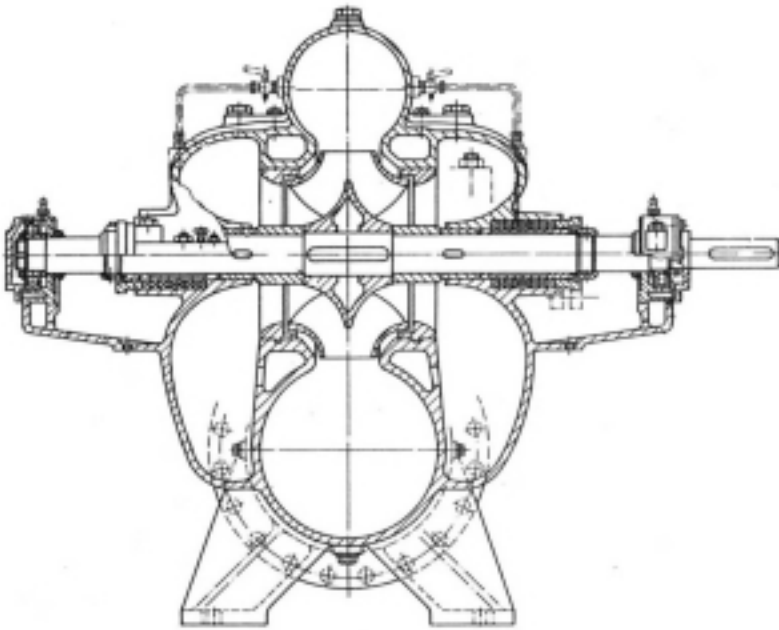
Bomba centrífuga horizontal, con rodete en voladizo, una etapa, bomba y motor separado, soporte de rodamiento.



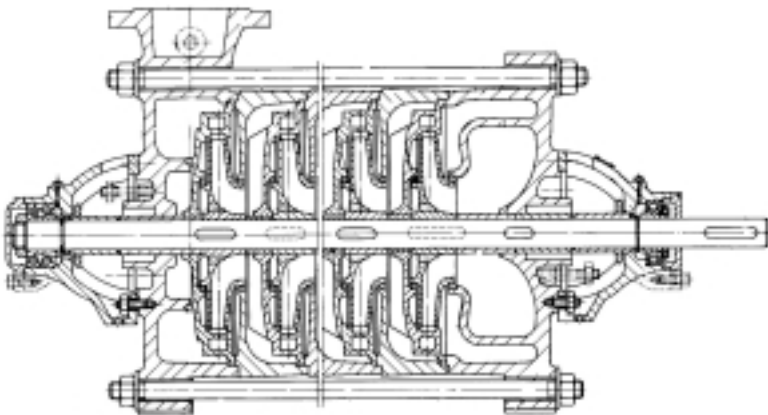
Bomba centrífuga horizontal, con rodete en voladizo, una etapa, bomba y motor separado, caballete de rodamiento.



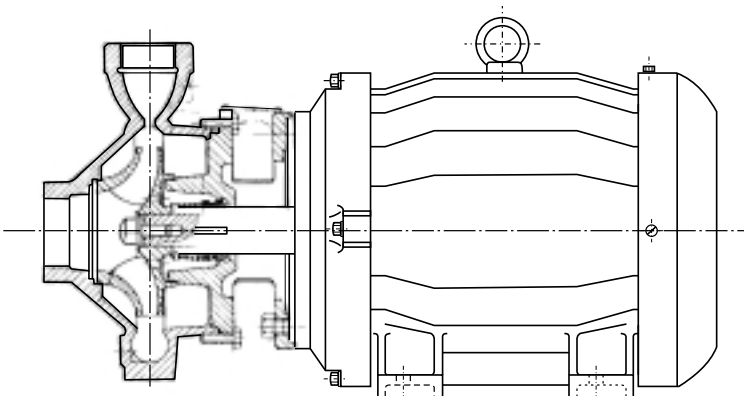
Bomba centrífuga vertical, tipo turbina, axial, una etapa, bomba y motor separado.



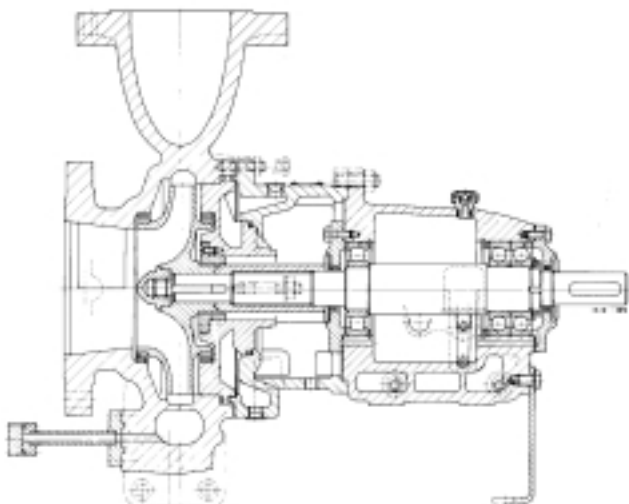
Bomba centrífuga horizontal,  
una etapa, con rodete entre  
rodamientos, rodete de doble succión,  
bipartida axialmente



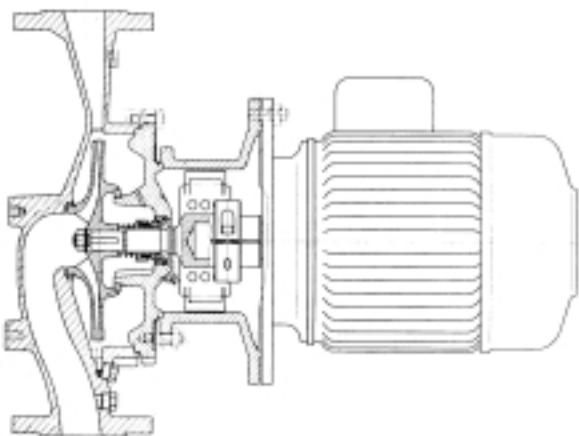
Bomba centrífuga horizontal,  
múltiples etapa, con rodetes entre  
rodamientos, bomba y motor separados



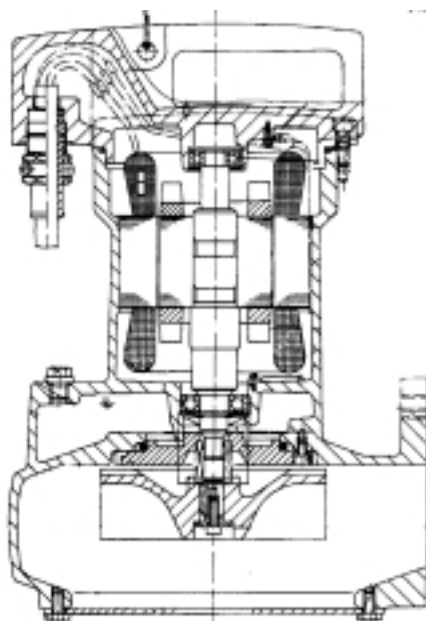
Bomba centrífuga horizontal,  
con rodete en voladizo, monobloc,  
succión frontal y descarga vertical



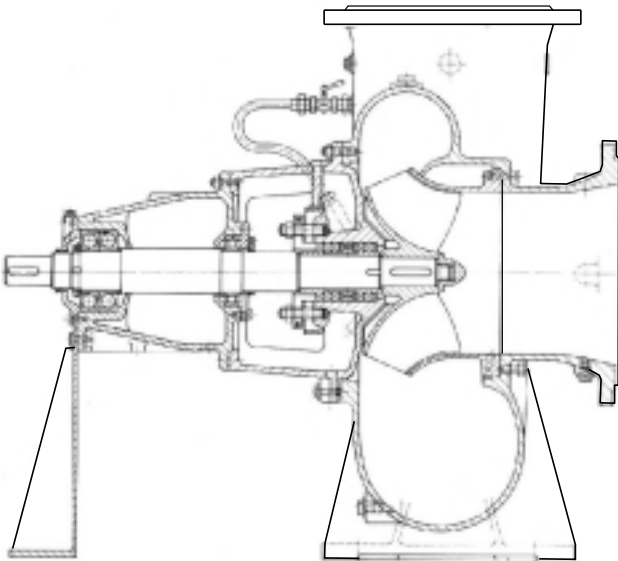
Bomba centrífuga horizontal,  
etapa simple, con rodete  
en voladizo, montada en la línea  
de centro (norma API)



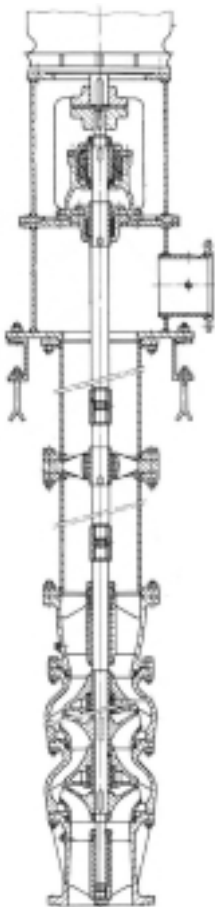
Bomba centrífuga con  
rodete en voladizo, una  
etapa, monobloc en línea  
(in line).



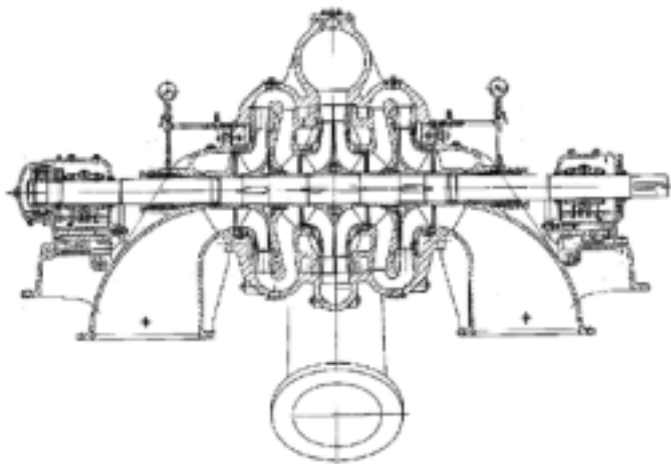
Bomba centrífuga con  
rodete en voladizo, una  
etapa, monobloc, bomba  
sumergible.



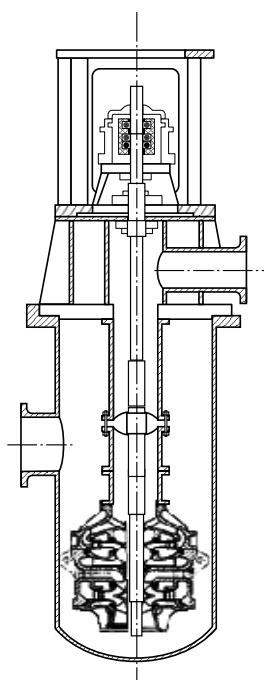
Bomba centrífuga horizontal,  
una etapa, con rodete  
semi-axial en voladizo



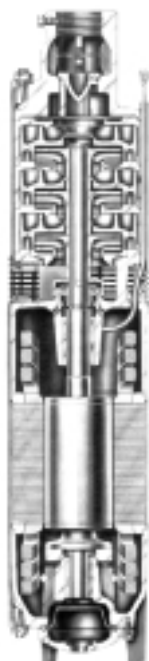
Bomba centrífuga vertical,  
tipo turbina, bomba y motor separado,  
múltiples etapas



Bomba centrífuga horizontal,  
múltiples etapas, con rodets  
entre rodamientos, bipartida axialmente.



Bomba centrífuga vertical,  
tipo turbina, múltiples etapas,  
bomba tipo barril ( can ).

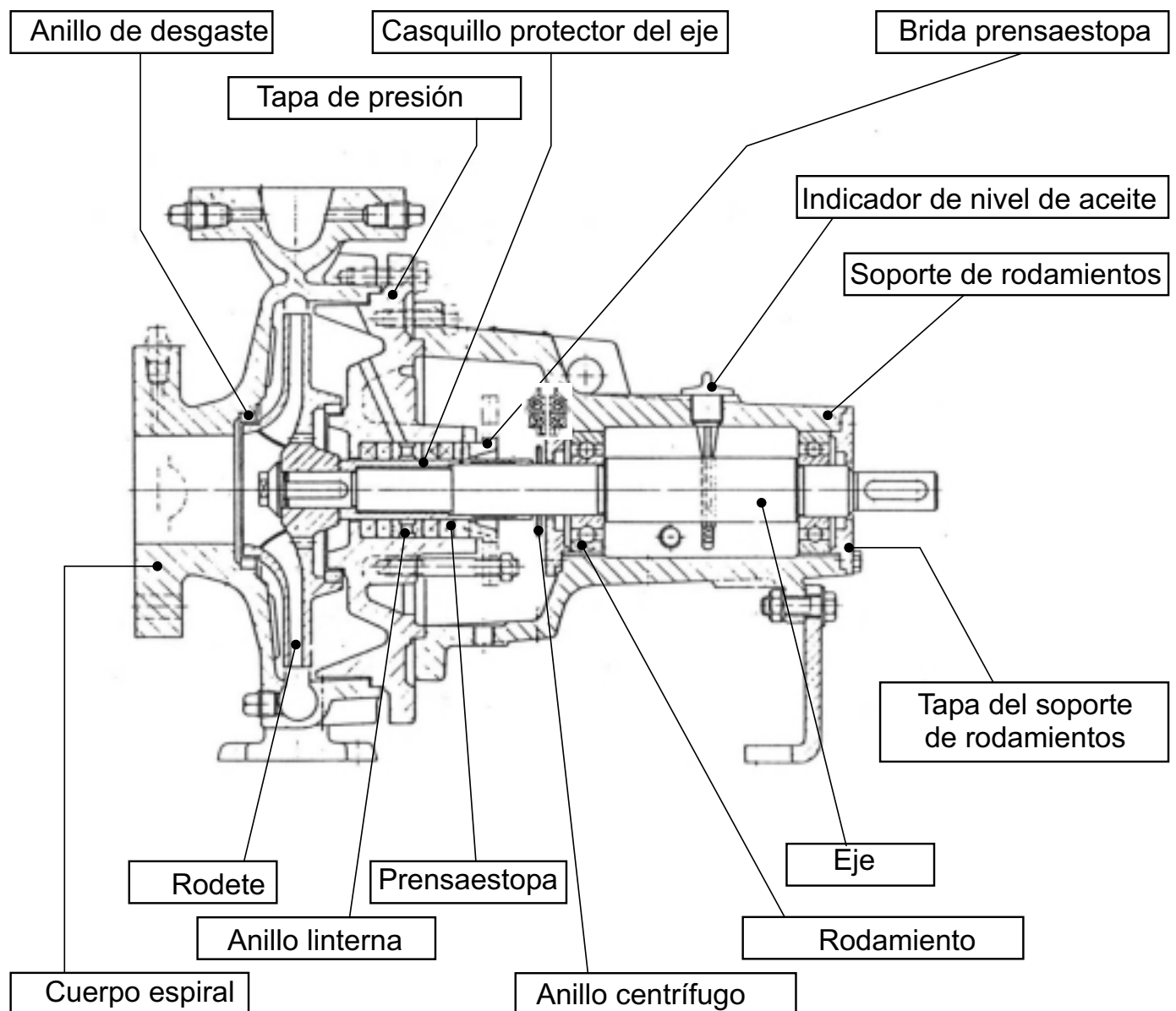


Bomba centrífuga vertical,  
tipo sumergible, múltiples etapas,

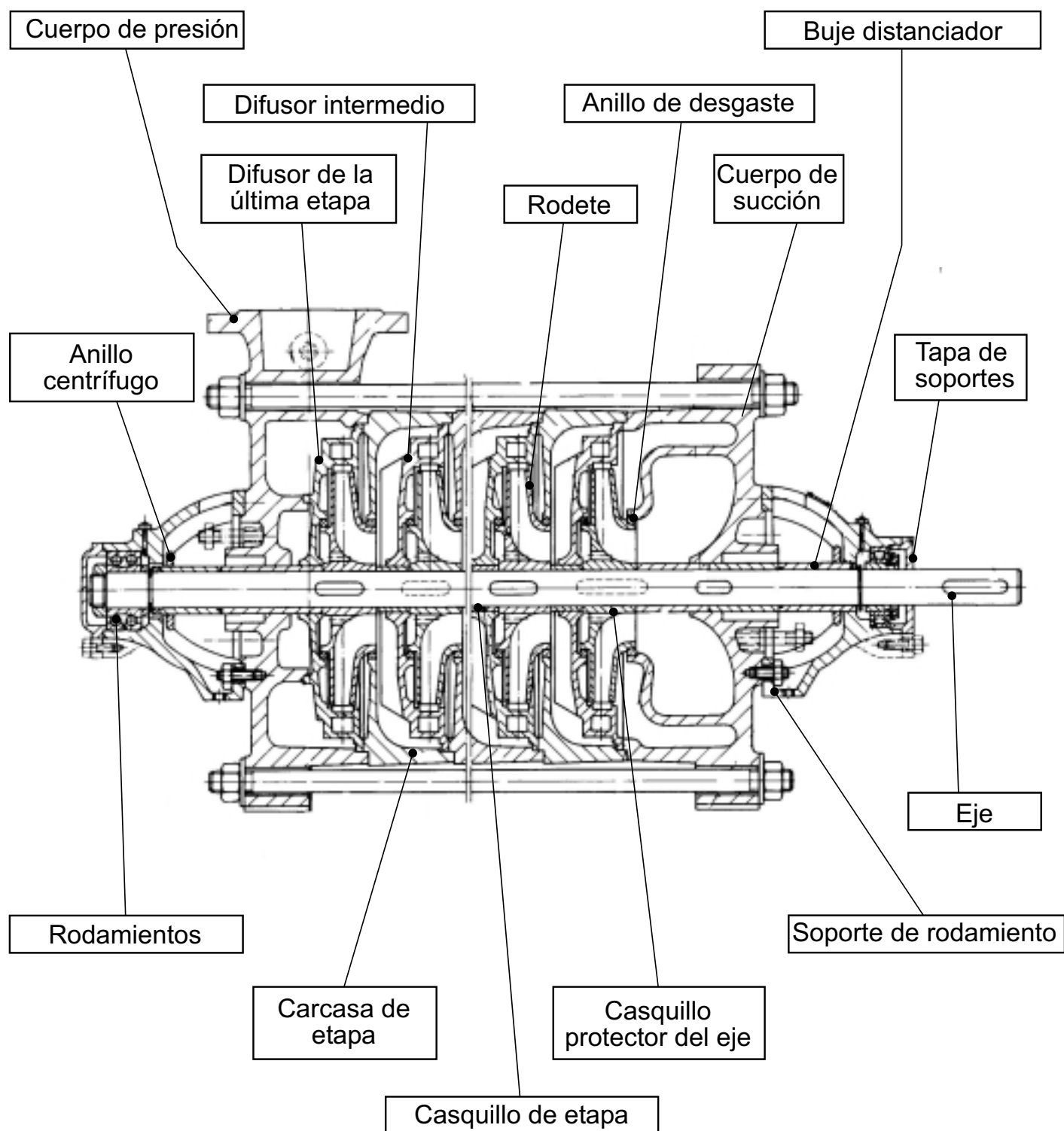
## 6.4 COMPONENTES DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS Y SUS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Los principales componentes de las bombas centrífugas son los siguientes:

- bomba de una etapa.



- bomba multietapa



## 6.5 RODETE

El rodete es el componente rotatorio, formado por álabes que tienen la función de transformar la energía mecánica que produce en energía de velocidad y energía de presión. En función de la velocidad específica de la bomba, el rodete puede ser del tipo radial , semi-axial o axial (asunto abordado en el módulo 3)

### 6.5.1 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LOS TIPOS DE RODETES

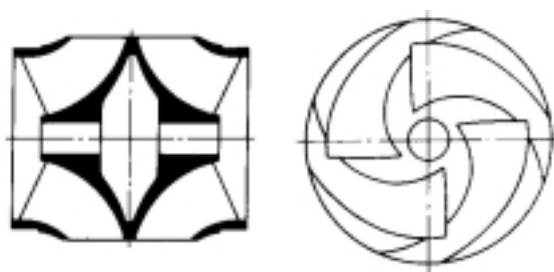
Abajo damos algunos ejemplos prácticos para la selección del tipo de rodete en función del líquido bombeado:

|                                                                                                              |                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Líquidos limpios o con baja cantidad de sólidos en suspensión, sólidos de pequeños diámetros y no abrasivos. | - rodetes radiales, flujo simple o doble, cerrado.<br>- rodetes semi-axiales, flujo simple o doble, cerrado o abierto. |
| Líquidos viscosos sin sólidos.                                                                               | - rodetes radiales, flujo simples o doble, cerrado.                                                                    |
| Líquidos con sólidos en suspensión y tamaño de sólidos máximo de acuerdo con el manual técnico.              | - rodetes con uno, dos o tres álabes, dependiendo del tamaño de los sólidos, cerrado.                                  |
| Aguas con peces, papas, naranjas y otras frutas.                                                             | - rodete de álabe único, cerrado.                                                                                      |
| Aguas servidas brutas sin pre-tratamiento y con fibras largas.                                               | - rodete de álabe único, cerrado.                                                                                      |
| Lodo y material fibroso (con fibras cortas), con poco contenido de gases o aire.                             | - rodete radial de dos o tres álabes, abierto.                                                                         |
| Lodo con alto contenido de gases y aire.                                                                     | - rodete de un álabe, cerrado o hacia atrás.                                                                           |
| Jugo de caña:<br><br>- con baja cantidad de desechos.<br>- con media cantidad de desechos.                   | - rodete radial cerrado.<br><br>- rodete radial con dos o tres álabes, cerrado.                                        |
| Jugo con desechos después de la primera molienda.                                                            | - rodete de álabe único, cerrado.                                                                                      |

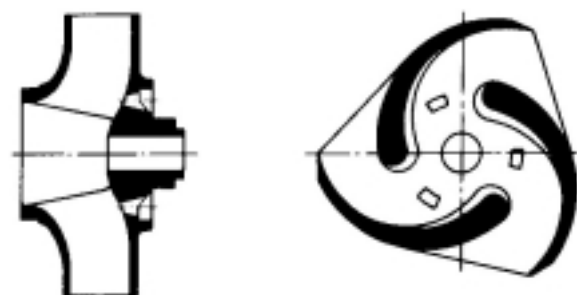
A continuación, mostraremos algunos ejemplos de los rodetes:



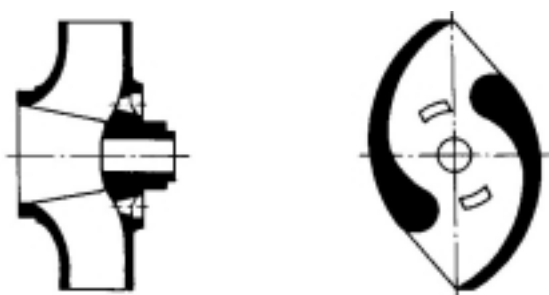
rodete cerrado, radial,  
flujo simple



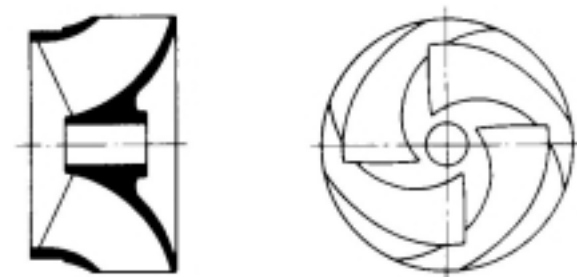
rodete de doble succión



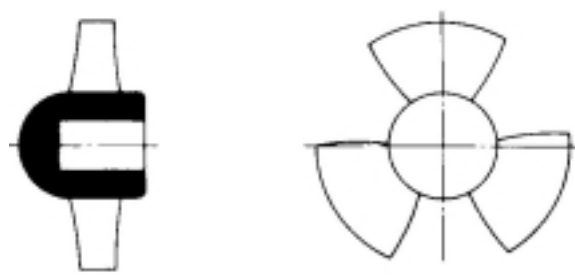
rodete cerrado, radial,  
de tres álabes



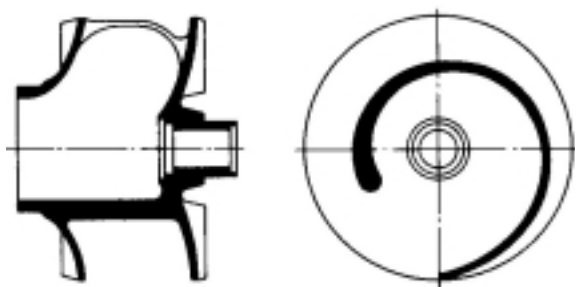
rodete cerrado, radial,  
de dos álabes



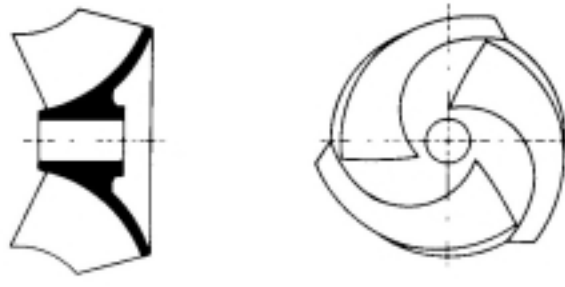
rodete cerrado  
semi-axial



rodete de flujo axial



rodete cerrado,  
de un álabe único



rodete abierto  
semi-axial

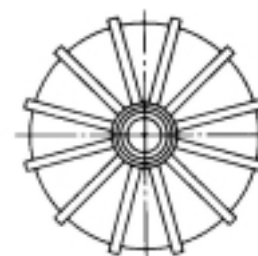
- Rodetes especiales (para líquidos con gases y contaminados)



rodete abierto,  
con tres álabes



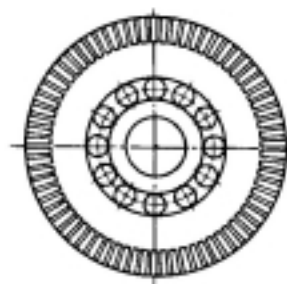
rodete de flujo libre



- Rodetes periféricos (para líquidos limpios, bajo caudal y alta presión)



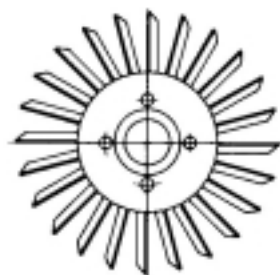
rodete periférico



- Rodete tipo estrella (generalmente usado em bombas autocebantes bombeando líquidos limpios)



rodete tipo estrella para  
bombas de canal lateral



Para determinar el material de construcción de los rodetes en bombas centrífugas, se deben considerar los siguientes factores, los que deben ser observados conjuntamente:

- corrosión/abrasión;
- velocidad periférica;
- cavitación.

#### A) Corrosión/abrasión

En este caso se deben observar las características del líquido bombeado. Para esto, existen tablas que recomiendan el material de construcción más adecuado en función del líquido bombeado. Por ende, en la mayoría de las aplicaciones, la experiencia del usuario final es el mejor indicador de las características del material a ser especificado, respecto de sus propiedades físico-químicas.

#### B) Velocidad periférica

La velocidad periférica de un rodete es calculada en base a la siguiente fórmula:

$$V_p = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}$$

Donde:  $V_p$  = velocidad periférica (m/s);

$D$  = diámetro do rodete (m);

$n$  = rotación (rpm).

Los siguientes son los límites de velocidad periférica para los materiales más usuales:

|                                              |        |
|----------------------------------------------|--------|
| ASTMA48CL30                                  | 40 m/s |
| ASTMA536 GR 60 40 8; SAE 40; SAE 65; A216WCB | 60 m/s |
| ASTMA743 CF8M; A 743 CA6NM; B148 C955        | 80 m/s |

#### C) Cavitación

Es importante destacar que las curvas de NPSH requerido, contenidas en los manuales técnicos, fueron obtenidas considerándose como criterio de medición del NPSHr una caída del 3% en la altura manométrica (Hydraulic Institut), es decir, en ciertas circunstancias puede ocurrir cavitación incipiente (inherente al diseño hidráulico), la que puede afectar al rodete con mayor o menor grado de intensidad, en función de la calidad del material del rodete.

Además de estas consideraciones, debemos verificar si el material del rodete soporta, por ejemplo, altas temperaturas y la presión del fluido bombeado; contaminación; etc.

## 6.6 CUERPO ESPIRAL (VOLUTA O CARCASA)

El cuerpo espiral es el responsable por la contención del fluido bombeado así como el de permitir la transformación de la energía cinética contenida en el fluido en energía de presión, paso fundamental para el bombeo.

La espiral propiamente dicha y la boca de descarga están separados por una pared llamada línea de la espiral.

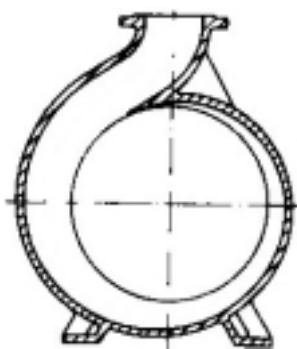
Existen las siguientes formas de carcasa de bombas, con una etapa:

- carcasa simple,
- carcasa doble,
- circular,
- mixta.

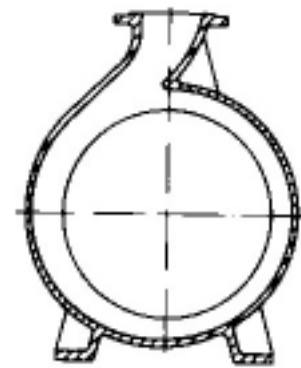
Las dos primeras formas son las más usuales y conocidas.

Dependiendo de la forma del cuerpo, la fuerza radial actuante varía en el conjunto rotatorio.

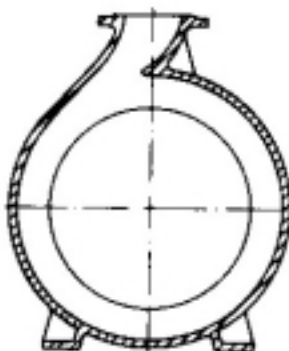
Veamos los principales tipos de carcasa:



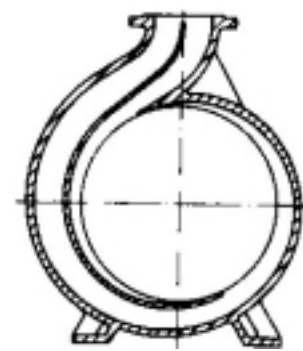
Simple espiral



Mixta



Circular

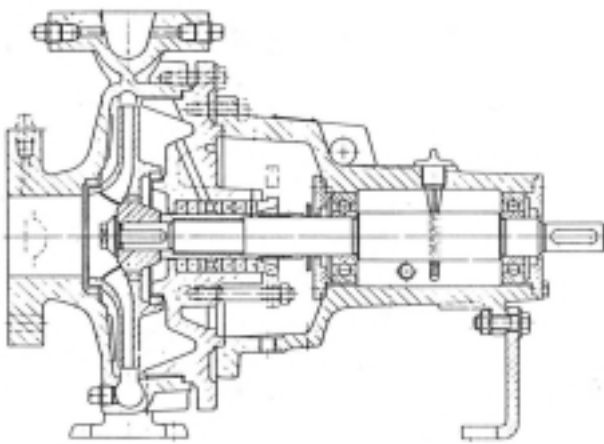


Doble espiral

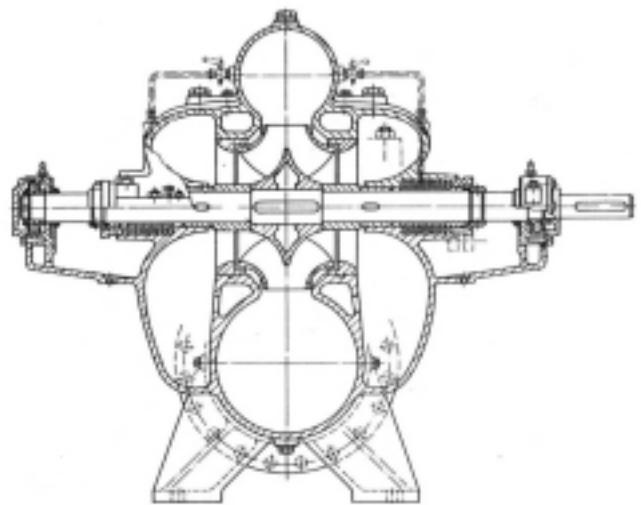
Otra clasificación de las carcasa está relacionada con su sección, es decir:

- cuerpo bipartido axialmente;
- cuerpo bipartido radialmente.

La ventaja esencial de los cuerpos bipartidos axialmente, dice relación con la facilidad de mantención, que puede ser hecha con la simple remoción del cuerpo superior.



Cuerpo bipartido radialmente



Cuerpo bipartido axialmente

En lo referente a las bocas de las bombas, se observan las siguientes formas:

- roscadas (normalmente utilizados en instalaciones de construcción civil, bombas de tamaño pequeño, bombas para pequeños riegos, etc). La norma de rosca utilizada es la BSP o también llamada rosca gas.
- flangeados (utilizados en instalaciones industriales, abastecimiento de agua, medias y grandes irrigaciones, etc).

Dentro de las innumerables normas existentes, se destacan las normas DIN (sistema métrico) y la norma ANSI (sistema USA).

Ambas normas presentan características propias cuyas diferencias se muestran a continuación y las que deben ser perfectamente entendidas, para la correcta determinación de los flanges.

### 6.6.1 NORMA

La norma ANSI, a pesar de ser más completa técnicamente, presenta una identificación más simple, distinguiéndose tres normas:

- ANSI B16.1 : para fierro
- ANSI B16.5 : para acero
- ANSI B16.24 : para bronce

Dentro de cada norma están definidas las diversas clases de presión nominal (125#, 150#, etc), siendo que las normas incluyen, además de los flanges, contra flanges, reducciones, flanges ciegos, etc, en las diversas variantes de materiales, ejecuciones, acabados, etc.

La norma DIN es una norma técnicamente más simples, con énfasis en la parte dimensional. La principal diferencia en relación a la ANSI es que en la norma DIN, cada tipo de flange y cada clase de presión presentan una norma propia (dimensional), llegando a más de 40 normas distintas.

En lo referente a la parte técnica, tenemos las normas DIN 2500, 2401, 2402, 2505, 2519, las que presentan los más diversos aspectos técnicos y son válidas para todas las normas dimensionales mencionadas.

### 6.6.2 NOMENCLATURA

La siguiente nomenclatura es utilizada en la identificación de los flanges además de la definición del diámetro nominal.

**ANSI** : se debe mencionar el tipo de pieza (flange, contraflange, slip-on, etc), el material (CF8, CF8M, etc), la norma (B16.1, etc), la clase de presión nominal (125#, 250#, etc), y el acabado de las caras (FF, RF).

Ejemplo: Contraflange tipo welding neck, en CF8M, según la norma ANSI B16.5, 300 # RF.

**DIN**: Ejemplo: Contraflange tipo welding-neck, en CF8M según la norma DIN 2633, PN 16.

OBS.: El indicar el tipo de contraflange y clase de presión son redundantes, ya que la DIN 2633 es específica para este tipo de contraflange y clase de presión.

### 6.6.3 DIMENSIONAMIENTO DE LOS FLANGES

Los flanges DIN presentan siempre un resalte, siendo que los ANSI pueden ser sin resalte (FF), o con resalte (RF).

En las normas ANSI se define un resalte padrón, siendo que, resaltes especiales también son definidos en la norma.

Cuando se va a conectar un flange ANSI de fierro o acero que tiene un resalte (RF), con un flange de bronce sin resalte (FF), se debe maquinar el mismo (RF).

#### **6.6.4 PRESIÓN NOMINAL**

Ambas normas definen innumerables clases de presión siendo estas presiones, nominales.

Las presiones decrecen con el aumento de la temperatura, conforme es señalado en las tablas 4 y 5.

Es importante observar que en las normas:

**ANSI** - la presión nominal en si, indica la presión admisible en el flange a una temperatura bastante superior a la ambiente.

A la temperatura ambiente la presión admisible es mucho más alta que la nominal.

**DIN** - en esta norma, la presión nominal del flange es la propia presión admisible a la temperatura ambiente, siendo consecuentemente mucho más simple la identificación de la presión admisible (hasta 120 °C).

#### **6.6.5 SELECCIÓN**

A) determinación del flange

En las tablas 1 y 2, se indican los flanges más usuales, según ANSI y DIN respectivamente, en función del diámetro nominal, clase de presión, material y tipo de flange.

(Notar que no existen contraflanges Welding neck y slip on definidos para fierro)

#### **IMPORTANTE:**

Varios diámetros nominales no están definidos en varias clases de presión nominal, y por consiguiente no existen. En este caso, se debe utilizar el flange de la clase o presión superior más próxima de la requerida.

En las tablas 1 y 2 basta con encontrar el próximo punto negro definido en la columna más próxima de la derecha, **dentro de la misma familia**.

Ejemplo.: ETA 50-20 en CF8

Succión: 65 mm, DIN 2543, PN 16

Descarga: 50 mm, DIN 2545, PN 40

(Notar que a pesar que la ETA es una bomba de la clase 10 bar, sus flanges en este caso, están definidos en las clases 16 y 40 bar).

A modo de facilitar la consulta de la tabla 2 (DIN), fue elaborada la tabla 3, limitada a los diámetros y clases de presión normalmente utilizados por KSB.

#### B) Verificación de la presión nominal

En las tablas 4 y 5, respectivamente para ANSI y DIN, debe ser verificada la presión admisible en el flange, seleccionado en función de la temperatura.

Ejemplo: CPK G 50-315

Presión final = 12 bar

Temperatura = 100 °C

Flanges :      Succión      80 mm, ANSI B16.1 125# FF

                 Descarga      50 mm, ANSI B16.1 250 # RF

Notar que si la temperatura fuese inferior a 70 °C, se podría utilizar flanges 125# FF para ambos.

En el caso anterior, debido a la estandarización, se podrán ofrecer ambos flanges en 250# RF.

**IMPORTANTE:** Para garantizar un buen funcionamiento de la bomba, no pueden ser aplicadas fuerzas y/o momentos de las tuberías sobre los flanges de la carcasa. En caso que no pueda ser evitado, el fabricante debe ser consultado sobre los valores máximos admisibles de fuerzas y momentos que puedan ser aplicados.

#### 6.6.6 TABLAS

## 6.6.6.1 ANSI - FLANGES Y CONTRAFLANGES

| MATERIAL         |      |      | FIERRO                         |          |          |          | ACERO                                                                                                         |          |          |          |          |           |           |          | BRONCE                                                  |  |  |
|------------------|------|------|--------------------------------|----------|----------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|---------------------------------------------------------|--|--|
| DESCRIPCIÓN      |      |      | - Flange<br><br>- Flange ciego |          |          |          | - Flanges<br>- Welding Neck<br>- Slip on<br>- Con rosca<br>- Ciego                                            |          |          |          |          |           |           |          | - Flange<br>- Contra flange con rosca<br>- Flange ciego |  |  |
| NORMA            |      |      | B 16.1                         |          |          |          | B 16.5                                                                                                        |          |          |          |          |           |           |          | B 16.24                                                 |  |  |
|                  |      |      | 25 # FF                        | 125 # FF | 250 # RF | 800 # RF | 150 # RF                                                                                                      | 300 # RF | 400 # RF | 600 # RF | 900 # RF | 1500 # RF | 2500 # RF | 150 # FF | 300 # FF                                                |  |  |
| Pol.             | mm   |      |                                |          |          |          |                                                                                                               |          |          |          |          |           |           |          |                                                         |  |  |
| DIÁMETRO NOMINAL | ½    | 15   |                                |          |          |          | ●                                                                                                             | ●        |          | ●        |          | ●         | ●         | ●        | ●                                                       |  |  |
|                  | ¾    | 20   |                                |          |          |          | ●                                                                                                             | ●        |          | ●        |          | ●         | ●         | ●        | ●                                                       |  |  |
|                  | 1    | 25   |                                | ●        | ●        |          | ●                                                                                                             | ●        |          | ●        |          | ●         | ●         | ●        | ●                                                       |  |  |
|                  | 1 ¼  | 32   |                                | ●        | ●        |          | ●                                                                                                             | ●        |          | ●        |          | ●         | ●         | ●        | ●                                                       |  |  |
|                  | 1 ½  | 40   |                                | ●        | ●        |          | ●                                                                                                             | ●        |          | ●        |          | ●         | ●         | ●        | ●                                                       |  |  |
|                  | 2    | 50   |                                | ●        | ●        | ●        | ●                                                                                                             | ●        |          | ●        |          | ●         | ●         | ●        | ●                                                       |  |  |
|                  | 2 ½  | 65   |                                | ●        | ●        | ●        | ●                                                                                                             | ●        |          | ●        |          | ●         | ●         | ●        | ●                                                       |  |  |
|                  | 3    | 80   |                                | ●        | ●        | ●        | ●                                                                                                             | ●        |          | ●        | ●        | ●         | ●         | ●        | ●                                                       |  |  |
|                  | 3 ½  | 90   |                                | ●        | ●        | ●        | ●                                                                                                             | ●        |          | ●        | ●        | ●         | ●         | ●        | ●                                                       |  |  |
|                  | 4    | 100  | ●                              | ●        | ●        | ●        | ●                                                                                                             | ●        | ●        | ●        | ●        | ●         | ●         | ●        | ●                                                       |  |  |
|                  | 5    | 125  | ●                              | ●        | ●        | ●        | ●                                                                                                             | ●        | ●        | ●        | ●        | ●         | ●         | ●        | ●                                                       |  |  |
|                  | 6    | 150  | ●                              | ●        | ●        | ●        | ●                                                                                                             | ●        | ●        | ●        | ●        | ●         | ●         | ●        | ●                                                       |  |  |
|                  | 8    | 200  | ●                              | ●        | ●        | ●        | ●                                                                                                             | ●        | ●        | ●        | ●        | ●         | ●         | ●        | ●                                                       |  |  |
|                  | 10   | 250  | ●                              | ●        | ●        | ●        | ●                                                                                                             | ●        | ●        | ●        | ●        | ●         | ●         | ●        | ●                                                       |  |  |
|                  | 12   | 300  | ●                              | ●        | ●        | ●        | ●                                                                                                             | ●        | ●        | ●        | ●        | ●         | ●         | ●        | ●                                                       |  |  |
|                  | 14   | 350  | ●                              | ●        | ●        |          | ●                                                                                                             | ●        | ●        | ●        | ●        | ●         |           |          |                                                         |  |  |
|                  | 16   | 400  | ●                              | ●        | ●        |          | ●                                                                                                             | ●        | ●        | ●        | ●        | ●         |           |          |                                                         |  |  |
|                  | 18   | 450  | ●                              | ●        | ●        |          | ●                                                                                                             | ●        | ●        | ●        | ●        | ●         |           |          |                                                         |  |  |
|                  | 20   | 500  | ●                              | ●        | ●        |          | ●                                                                                                             | ●        | ●        | ●        | ●        | ●         |           |          |                                                         |  |  |
|                  | 24   | 600  | ●                              | ●        | ●        |          | ●                                                                                                             | ●        | ●        | ●        | ●        | ●         |           |          |                                                         |  |  |
|                  | 30   | 750  | ●                              | ●        | ●        |          |                                                                                                               |          |          |          |          |           |           |          |                                                         |  |  |
|                  | 36   | 900  | ●                              | ●        |          |          | OBS.:<br><br>Los flanges slip-on y con rosca no se aplican a todos los diámetros de las clases 1500 y 2500 #. |          |          |          |          |           |           |          |                                                         |  |  |
|                  | 42   | 1050 | ●                              | ●        |          |          |                                                                                                               |          |          |          |          |           |           |          |                                                         |  |  |
|                  | 48   | 1200 | ●                              | ●        |          |          |                                                                                                               |          |          |          |          |           |           |          |                                                         |  |  |
|                  | 54   | 1350 | ●                              |          |          |          |                                                                                                               |          |          |          |          |           |           |          |                                                         |  |  |
|                  | 60   | 1500 | ●                              |          |          |          |                                                                                                               |          |          |          |          |           |           |          |                                                         |  |  |
| 72               | 1800 | ●    |                                |          |          |          |                                                                                                               |          |          |          |          |           |           |          |                                                         |  |  |
| 84               | 2100 | ●    |                                |          |          |          |                                                                                                               |          |          |          |          |           |           |          |                                                         |  |  |
| 96               | 2400 | ●    |                                |          |          |          |                                                                                                               |          |          |          |          |           |           |          |                                                         |  |  |

OBS.:

Los flanges slip-on y con rosca no se aplican a todos los diámetros de las clases 1500 y 2500 #.

Tabla 1



### 6.6.6.3 DIN - FLANGES Y CONTRAFLANGES - PRESIONES Y MEDIDAS USUALES DE KSB

| MATERIAL | DESCRIPCIÓN             | PRESIÓN NOMINAL | DIÁMETRO NOMINAL (DN)          |             |             |                                                                                       |
|----------|-------------------------|-----------------|--------------------------------|-------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|          |                         |                 | 32 / 40                        | 50          | 65-150      | 200-300                                                                               |
| FIERRO   | FLANGE FUNDIDO          | 10              | 2533, PN 16                    |             |             | 2532, PN 10                                                                           |
|          |                         | 16              |                                |             |             |                                                                                       |
|          |                         | 25              | 2535, PN 40                    |             |             | 2534, PN 25                                                                           |
|          |                         | 40              |                                |             |             |                                                                                       |
| ACERO    | FLANGE FUNDIDO          | 16              | 2545, PN 40                    |             | 2543, PN 16 |                                                                                       |
|          |                         | 25              |                                |             | 2544, PN 25 |                                                                                       |
|          |                         | 40              |                                |             |             |                                                                                       |
|          |                         | 64              | 2547, PN 100/<br>/2548, PN 160 | 2546, PN 64 |             |                                                                                       |
|          | CONTRA FLANGE           | 10              | 2633, PN 16                    |             |             | 2632, PN 10                                                                           |
|          |                         | 16              |                                |             |             |                                                                                       |
|          |                         | 25              | 2635, PN 40                    |             |             |                                                                                       |
|          |                         | 40              |                                |             |             |                                                                                       |
|          |                         | 64              | 2637, PN 100                   | 2636, PN 64 |             |                                                                                       |
|          | SLIP - ON               | 10              | 2576, PN 10                    |             |             |                                                                                       |
|          | CONTRA FLANGE CON ROSCA | 10              | 2566, PN 16                    |             |             |  |
|          |                         | 16              |                                |             |             |                                                                                       |
|          |                         | 25              | 2567, PN 40                    |             |             |                                                                                       |
|          |                         | 40              |                                |             |             |                                                                                       |
|          |                         | 64              | 2569, PN 100                   | 2568, PN 64 |             |                                                                                       |
|          | FLANGE CIEGO            | 10              | 2527, PN 16                    |             |             | 2527, PN 10                                                                           |
|          |                         | 16              |                                |             |             |                                                                                       |
|          |                         | 25              | 2527, PN 40                    |             |             | 2527, PN 25                                                                           |
|          |                         | 40              |                                |             |             |                                                                                       |
|          |                         | 64              | 2527, PN 100                   | 2527, PN 64 |             |                                                                                       |

Tabla 3

## 6.6.6.4 ANSI - PRESIÓN ADMISIBLE (BAR) X TEMPERATURA MÁXIMA ( °C )

| NORMA           |        | B 16.5     |      |      |            |      |      |            |      |      |            |      |      |            |       |       |              |       |       |              |       |       |
|-----------------|--------|------------|------|------|------------|------|------|------------|------|------|------------|------|------|------------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| Presión Nominal |        | 150 / 10,5 |      |      | 300 / 21,0 |      |      | 400 / 28,1 |      |      | 600 / 42,1 |      |      | 900 / 63,2 |       |       | 1500 / 105,4 |       |       | 2500 / 175,7 |       |       |
| Material        |        | WCB        | CF8  | CF8M | WCB        | CF8  | CF8M | WCB        | CF8  | CF8M | WCB        | CF8  | CF8M | WCB        | CF8   | CF8M  | WCB          | CF8   | CF8M  | WCB          | CF8   | CF8M  |
|                 |        |            |      |      |            |      |      |            |      |      |            |      |      |            |       |       |              |       |       |              |       |       |
| TEMPERATURA °C  | -30/38 | 19,5       | 16,3 | 16,3 | 51,0       | 42,5 | 42,5 | 68,0       | 56,7 | 56,7 | 102,1      | 85,0 | 85,1 | 153,1      | 127,6 | 127,5 | 255,2        | 212,7 | 212,7 | 425,4        | 354,5 | 354,6 |
|                 | 50     | 19,1       | 15,7 | 15,8 | 50,0       | 40,9 | 41,3 | 66,7       | 54,6 | 55,1 | 100,1      | 81,9 | 82,6 | 150,1      | 122,9 | 123,9 | 250,2        | 204,9 | 206,5 | 417,1        | 341,5 | 344,2 |
|                 | 100    | 17,7       | 13,3 | 14,0 | 46,3       | 34,9 | 36,5 | 61,8       | 46,5 | 48,6 | 92,7       | 69,8 | 72,9 | 139,0      | 104,8 | 109,4 | 231,8        | 174,7 | 182,3 | 386,3        | 291,2 | 303,9 |
|                 | 150    | 17,3       | 11,9 | 12,8 | 45,2       | 31,1 | 33,4 | 60,2       | 41,5 | 44,6 | 90,4       | 62,2 | 66,9 | 135,6      | 93,4  | 100,3 | 225,0        | 155,6 | 167,2 | 376,7        | 259,4 | 278,6 |
|                 | 200    | 16,7       | 10,7 | 12,1 | 43,8       | 28,0 | 31,6 | 58,4       | 37,4 | 42,2 | 87,6       | 56,1 | 63,3 | 131,4      | 84,2  | 94,9  | 219,0        | 140,3 | 158,2 | 365,0        | 233,9 | 263,7 |
|                 | 250    | 15,9       | 10,0 | 11,9 | 41,7       | 26,1 | 31,0 | 55,6       | 34,8 | 41,4 | 83,4       | 52,3 | 62,0 | 125,1      | 78,5  | 93,1  | 208,5        | 130,8 | 155,1 | 347,5        | 218,0 | 258,5 |
|                 | 300    | 14,8       | 9,5  | 11,6 | 38,7       | 24,8 | 30,3 | 51,6       | 33,1 | 40,4 | 77,4       | 49,7 | 60,6 | 116,1      | 74,6  | 90,9  | 193,5        | 124,4 | 151,5 | 322,5        | 207,4 | 252,5 |
|                 | 350    | 14,1       | 9,2  | 11,3 | 36,9       | 24,0 | 29,4 | 49,2       | 32,0 | 39,2 | 73,8       | 48,0 | 58,8 | 110,8      | 72,1  | 88,2  | 184,7        | 120,2 | 147,0 | 307,9        | 200,3 | 245,0 |
|                 | 375    | 13,9       | 9,1  | 11,1 | 36,4       | 23,7 | 29,0 | 48,6       | 31,7 | 38,6 | 72,9       | 47,5 | 58,0 | 109,3      | 71,3  | 86,9  | 182,2        | 118,9 | 144,9 | 303,7        | 198,2 | 241,5 |
|                 | 400    | 13,2       | 9,0  | 10,9 | 34,4       | 23,5 | 28,3 | 45,9       | 31,3 | 37,8 | 68,9       | 47,0 | 56,7 | 103,4      | 70,5  | 85,0  | 172,4        | 117,6 | 141,7 | 287,4        | 196,1 | 236,2 |
|                 | 425    | 11,0       | 8,9  | 10,7 | 28,7       | 23,2 | 28,0 | 38,3       | 31,0 | 37,3 | 57,4       | 46,5 | 55,9 | 86,2       | 69,8  | 83,9  | 143,7        | 116,3 | 139,8 | 239,5        | 193,9 | 233,0 |
|                 | 450    | 7,6        | 7,6  | 7,6  | 20,0       | 23,0 | 27,6 | 25,7       | 30,6 | 36,8 | 40,0       | 46,0 | 55,2 | 60,0       | 69,0  | 82,7  | 100,1        | 115,1 | 137,9 | 166,8        | 191,8 | 229,9 |
|                 | 475    | 5,1        | 5,1  | 5,1  | 13,5       | 22,7 | 27,5 | 18,0       | 30,3 | 36,7 | 27,0       | 45,5 | 55,0 | 40,6       | 68,2  | 82,5  | 67,6         | 113,8 | 137,6 | 112,8        | 189,7 | 229,3 |
|                 | 500    | 3,3        | 3,3  | 3,3  | 8,7        | 22,3 | 27,6 | 11,7       | 29,7 | 36,6 | 17,5       | 44,6 | 54,9 | 26,3       | 66,9  | 82,4  | 43,9         | 111,6 | 137,3 | 73,2         | 186,0 | 228,8 |
|                 | 525    | 1,9        | 1,9  | 1,9  | 5,1        | 21,7 | 27,2 | 6,9        | 28,9 | 35,2 | 10,3       | 43,4 | 54,3 | 15,5       | 65,2  | 81,5  | 25,8         | 108,7 | 135,8 | 43,1         | 181,1 | 226,4 |
|                 | 550    | 0,7        | 0,7  | 0,7  | 1,9        | 21,3 | 26,1 | 2,6        | 28,4 | 34,8 | 3,9        | 42,7 | 52,2 | 5,9        | 64,0  | 78,3  | 9,9          | 106,7 | 130,6 | 16,5         | 177,9 | 217,6 |
|                 | 600    |            |      |      |            | 16,7 | 21,4 |            | 22,2 | 28,6 |            | 33,4 | 42,9 |            | 50,1  | 64,3  |              | 83,5  | 107,1 |              | 139,2 | 178,5 |
|                 | 700    |            |      |      |            | 5,9  | 9,9  |            | 7,9  | 13,3 |            | 11,9 | 19,9 |            | 17,9  | 29,8  |              | 29,8  | 49,7  |              | 49,7  | 82,9  |
|                 | 800    |            |      |      |            | 2,0  | 3,5  |            | 2,7  | 4,7  |            | 4,1  | 7,0  |            | 6,1   | 10,5  |              | 10,2  | 17,5  |              | 17,0  | 29,2  |

| NORMA                      |        | B 16.1   |       |           |       |       |            |       |       |                  | B 16.24          |                  |
|----------------------------|--------|----------|-------|-----------|-------|-------|------------|-------|-------|------------------|------------------|------------------|
| Presión Nominal<br>PSI/bar |        | 25 / 1,7 |       | 125 / 8,8 |       |       | 250 / 17,6 |       |       | 800<br>/<br>56,3 | 150<br>/<br>10,5 | 300<br>/<br>21,0 |
| Material                   |        | FIERRO   |       |           |       |       |            |       |       |                  | BRONCE           |                  |
| Diámetro Nominal           |        | 4-36     | 42-96 | 1-12      | 14-24 | 30-48 | 1-12       | 14-24 | 30-48 | 2-12             |                  |                  |
| TEMPERATURA °C             | -30/65 | 3,1      | 1,7   | 12,3      | 10,5  | 10,5  | 28,1       | 21,1  | 21,1  | 56,3             | 15,8             | 35,2             |
|                            | 90     | 2,7      | 1,7   | 11,6      | 9,5   | 8,0   | 26,0       | 19,7  | 17,6  |                  | 14,7             | 32,7             |
|                            | 110    | 2,4      | 1,7   | 10,9      | 9,1   | 7,0   | 25,0       | 19,0  | 15,8  |                  | 14,4             | 31,3             |
|                            | 120    | 2,0      | 1,7   | 10,5      | 8,8   | 5,9   | 23,9       | 18,3  | 14,0  |                  | 13,7             | 29,9             |
|                            | 135    | 1,7      | 1,7   | 10,2      | 8,4   | 4,5   | 22,8       | 17,6  | 12,3  |                  | 13,3             | 28,8             |
|                            | 150    |          |       | 9,8       | 7,7   | 3,5   | 21,8       | 16,9  | 10,5  |                  | 12,6             | 27,4             |
|                            | 165    |          |       | 9,1       | 7,3   |       | 20,7       | 16,1  | 8,8   |                  | 12,1             | 26,0             |
|                            | 180    |          |       | 8,8       | 7,0   |       | 19,7       | 15,4  | 7,0   |                  | 11,6             | 24,6             |
| 190                        |        |          |       |           |       | 18,6  | 14,7       |       |       | 11,0             | 23,3             |                  |
| 200                        |        |          |       |           |       | 17,6  | 14,0       |       |       | 10,5             | 22,1             |                  |

Tabla 4

Observación: Para otros materiales, ver la norma ANSI B 16

## 6.6.6.5 DIN - PRESIÓN ADMISIBLE (BAR) X TEMPERATURA MÁXIMA ( °C )

| PRESIÓN NOMINAL (bar) | MATERIAL              | TEMPERATURA °C |     |     |     |     |     |
|-----------------------|-----------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                       |                       | 120            | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| 1                     | General               | 1              | 1   | 1   | 1   |     |     |
| 2,5                   | General               | 2,5            | 2   | 1,8 | 1,5 |     |     |
| 6                     | General               | 6              | 5   | 4,5 | 3,6 |     |     |
| 10                    | General               | 10             | 8   | 7   | 6   |     |     |
| 16                    | GG<br>GGG<br>BZ<br>CF | 16             | 13  | 11  | 10  |     |     |
|                       | WCB                   | 16             | 14  | 13  | 11  | 10  | 8   |
| 25                    | GG<br>BZ<br>CF        | 25             |     |     |     |     |     |
|                       | GGG                   | 25             | 20  | 18  | 16  |     |     |
|                       | WCB                   | 25             | 22  | 20  | 17  | 16  | 13  |
| 40                    | GG<br>GGG<br>BZ<br>CF | 40             |     |     |     |     |     |
|                       | WCB                   | 40             | 35  | 32  | 28  | 24  | 21  |
| 64                    | WCB                   | 64             | 50  | 45  | 40  | 36  | 32  |
| 100                   |                       | 100            | 80  | 70  | 60  | 56  | 50  |
| 160                   |                       | 160            | 130 | 112 | 96  | 90  | 80  |
| 250                   |                       | 250            | 200 | 175 | 150 | 140 | 125 |
| 320                   |                       | 320            | 250 | 225 | 192 | 180 | 160 |
| 400                   |                       | 400            | 320 | 280 | 240 | 225 | 200 |

Tabla 5

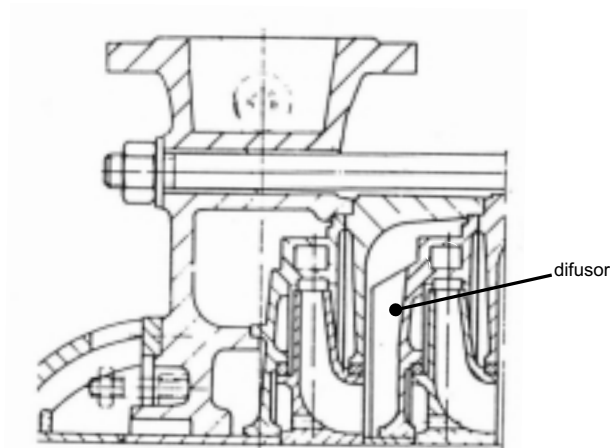
Obs.: Para otros materiales, ver la norma DIN 2401

## 6.7 DIFUSOR

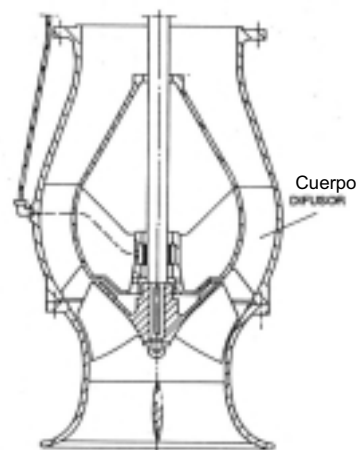
La función del difusor es idéntica a la carcasa, es decir, convierte parte de la energía cinética del fluido en energía de presión y principalmente, sirve como direccionador del fluido desde la salida de un rodete hasta la entrada del próximo.

Los difusores son usados principalmente en bombas multietapas con rodetes radiales, así como también en bombas verticales con rodetes semi-axiales o axiales. En este último caso, el difusor asume también la función de carcasa, siendo parte integrante de la misma.

Los difusores de las bombas multietapas son instalados en las carcasas de las etapas siendo fijados axial y radialmente buscando inclusive, impedir que ellos giren.



difusor



Cuerpo difusor

## 6.8 EJE

La función del eje es la de transmitir el torque del accionamiento al rodete. El eje es proyectado para que tenga una deflexión máxima pre-establecida cuando está en operación. Este factor es importante para evitar que los juegos entre las piezas rotativas y las estacionarias se alteren en operación, lo que provocaría contacto, desgaste prematuro y mayor consumo de energía.

El eje debe ser construido en un material que soporte las variaciones de temperatura, para aplicaciones que utilizan líquidos calientes, así como la fatiga debido a las cargas aplicadas que surgen durante la operación.

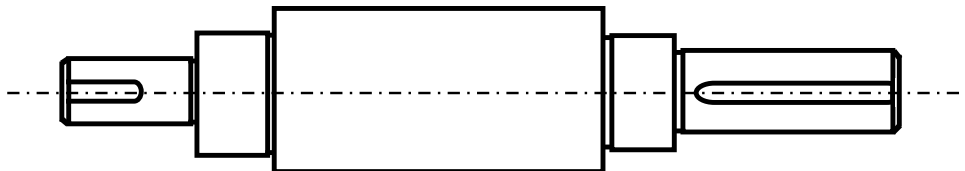
También por cuestiones de vida útil del sello mecánico, la deflexión del eje en la parte de la caja de sellado no debe ser superior a los límites definidos en normas y recomendaciones de los fabricantes de sellos mecánicos.

El punto más importante a considerar en el diseño de ejes es la velocidad crítica, que es la rotación con la cual un pequeño desbalanceamiento en el eje o en el rodete son amplificados de tal forma, manifestándose como una fuerza centrífuga, que produce deflexión y vibración. La velocidad crítica más baja es llamada primera velocidad crítica, la siguiente como segunda velocidad crítica y así sucesivamente.

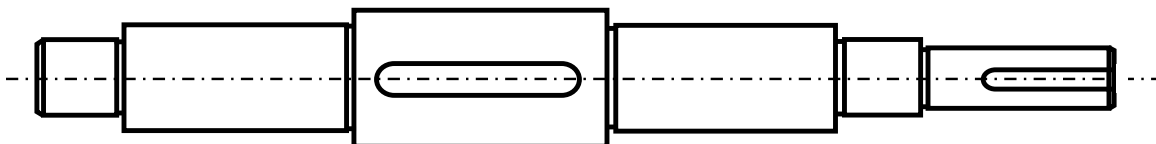
Cuando la bomba opera sobre la primera velocidad crítica se dice que el eje es flexible y cuando opera bajo, se dice que el eje es rígido.

El eje puede ser calculado para trabajar tanto como flexible o rígido, desde que en el primer caso la velocidad crítica sea del orden de 60 a 75 % de la velocidad de trabajo y en el segundo, un mínimo de 20 % por sobre. Generalmente las bombas trabajan bajo la velocidad crítica.

Los ejes soportados en ambos extremos, que poseen el rodete en el centro, tienen el diámetro máximo en el lugar de montaje del rodete. Los ejes de bombas con el rodete en voladizo tienen el diámetro máximo entre los rodamientos. La punta del eje es calculada para resistir el máximo torque o máxima deflexión que pueda ocurrir en operación.



Eje de una bomba  
con rodete en voladizo



Eje de una bomba  
con rodete entre rodamientos

Dependiendo del tipo de bomba, éstas poseen ejes sellados o no sellados.

Los ejes sellados garantizan que el líquido bombeado no entre en contacto con el eje, lo que se consigue por medio del sellado entre las piezas montadas en el eje del lado del rodete y una tuerca especial en el rodete.

Los ejes del tipo no sellados tienen contacto con el líquido bombeado.

En la selección del material del eje, se debe considerar que, para líquidos corrosivos, los ejes no sellados deben ser contruidos en materiales resistentes a la corrosión; por ende, los ejes sellados pueden ser suministrados en acero al carbono con un casquillo protector del eje en un material resistente a la corrosión.

## **6.9 CASQUILLO PROTECTOR DEL EJE**

El casquillo protector del eje tiene la función de proteger al eje contra la corrosión, erosión y el desgaste, causado por el líquido bombeado. Además de lo anterior, debe proteger el eje en la región de la prensaestopa, contra el desgaste causado por las mismas.

El casquillo protector gira con el eje y generalmente es fijado en forma axial, por chavetas o roscas en el eje.



## 6.10 ANILLOS DE DESGASTE

Son piezas montadas sólo en la carcasa (estacionaria), sólo en el rodete (rotatorio) o en ambos, y que mediante un pequeño juego operacional, produciendo una separación entre la región donde imperan las presiones de descarga y succión, impidiendo así un retorno exagerado de líquido desde la descarga hacia la succión.

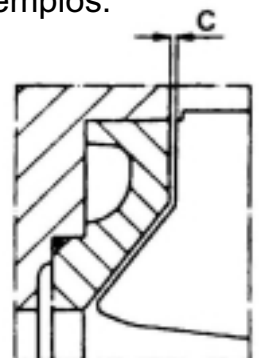
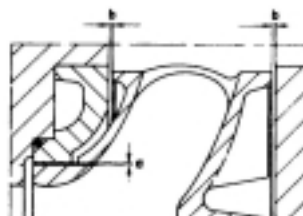
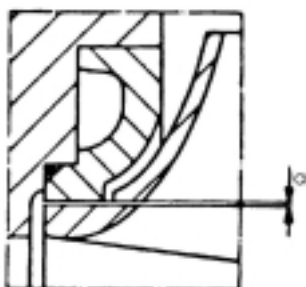
Los anillos son piezas de bajo costo y que evitan el desgaste y la necesidad de substituir piezas más costosas, como por ejemplo el rodete y la carcasa. Las bombas seriadas en servicios livianos no poseen anillos de desgaste. La propia carcasa y el rodete poseen superficies ajustadas de tal forma que el juego entre estas piezas sea pequeño.

Cuando el juego aumenta, se puede remaquinar el rodete o la carcasa y poner anillos, dejando así los juegos originales.

En bombas de mayor tamaño tanto la carcasa y/o rodete pueden ser suministradas con anillos de desgaste. Los anillos son cambiados cuando el juego diametral excede los límites definidos en los manuales de servicio del fabricante. Se debe destacar que, a medida que se aumenta el juego diametral de los anillos del desgaste, se produce una reducción en la eficiencia de la bomba, es decir, aumenta el retorno de líquido desde la descarga hacia la succión de la bomba, llamado recirculación hidráulica o pérdidas volumétricas.



El tipo de versión del anillo de desgaste depende del diseño de la bomba y del líquido bombeado, para casos especiales. A continuación se muestran algunos ejemplos:



En el bombeo de líquidos con sustancias abrasivas en suspensión, las bombas pueden ser suministradas con placas de desgaste con un sistema de lavado mediante un líquido limpio de una fuente externa.

El montaje de los anillos de desgaste y sus fijaciones locales, pueden ser realizadas con pasadores, montaje por interferencia, fijación por tornillo o soldadura, dependiendo del diseño de la bomba. Algunas normas de construcción incidan que, además de la pieza de fijación, es necesario soldarlos, este ocurre generalmente en aplicaciones con fluidos a altas temperaturas, con el fin de evitar que con una dilatación el anillo se suelte.

## **6.11 CAJA DE SELLADO**

La caja de sellado tiene como principal objetivo proteger a la bomba de posible derrames en los puntos donde el eje pasa a través de la carcasa.

Los principales sistemas de sellado utilizados en bombas centrífugas son:

- prensaestopa.
- sello mecánico.

## **6.12 PRENSAESTOPA**

Podemos definir la prensaestopa como un material deformable, utilizado para prevenir o controlar el paso de fluidos entre dos superficies en movimiento, una en relación a la otra.

Las prensaestopas son fabricadas por hilos trenzados de fibras vegetales (yute, rami, algodón), fibras minerales (asbesto) o fibras sintéticas. De acuerdo con el fluido a bombear, la temperatura, la presión, el ataque químico, etc, se determina el tipo de empaquetadura.

La función de la prensaestopa varía según como sea el funcionamiento de la bomba, es decir, si una bomba opera con succión negativa, su función es prevenir la entrada de aire hacia la bomba. Por otro lado, si la presión es más alta que la atmosférica, su función es evitar la salida del líquido de la bomba.

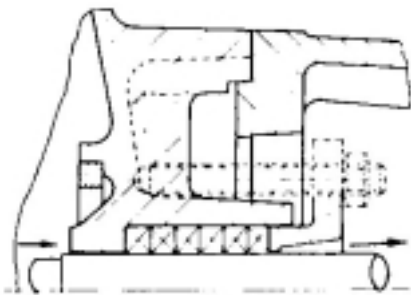
En bombas para aplicaciones generales, la caja de prensaestopa usualmente tiene forma de una caja cilíndrica que contiene un cierto número de anillos de prensaestopa envueltos en el eje o en el casquillo protector del eje.

La prensaestopa es comprimida para dar el ajuste deseado en el eje o en el casquillo protector del eje por una brida de prensaestopa que se desliza en la dirección axial. El sellado del eje por prensaestopa necesita de una pequeña gotera para garantizar la lubricación y refrigeración en el área de roce de la misma con el eje o el casquillo protector del eje.

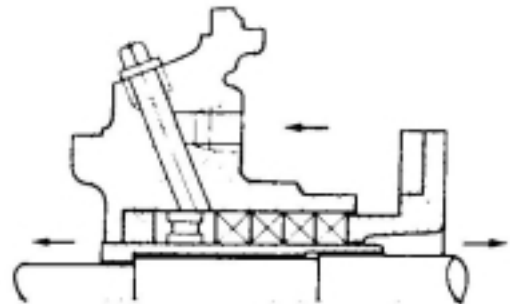
Generalmente entre los anillos de la prensaestopa, se utiliza un anillo candado o anillo linterna. Su uso se hace necesario, cuando por ejemplo el líquido bombeado contiene sólidos en suspensión, que podrían acumularse e impedir el libre paso de líquido o impedir la lubricación de la prensaestopa. Con esto, ocurriría un desgaste excesivo en el eje y en la prensaestopa por abrasión. Este sistema consiste en la inyección de un líquido limpio en la caja de prensaestopas. Este líquido llega hasta los anillos de prensaestopa a través de un anillo perforado llamado anillo linterna. Este líquido puede ser el propio fluido bombeado inyectado sobre el anillo linterna por medio de perforaciones internas o por medio de una derivación desde la boca de descarga de la bomba.

El anillo linterna puede ser también utilizado cuando la presión interna en la caja de prensaestopa es inferior a la atmosférica, impidiendo así la entrada de aire en la bomba.

La posición del anillo linterna en la prensaestopa es definida durante la etapa de diseño de la bomba por parte del fabricante.



prensaestopa sin anillo linterna



prensaestopa con anillo linterna

La inyección de un líquido de una fuente externa es siempre necesario en las siguientes condiciones:

- la altura de succión es mayor que 4,5 m;
- la presión de descarga es inferior a 0,7 kgf/cm<sup>2</sup>
- el líquido bombeado contiene arena, sólidos en suspensión o materiales abrasivos;
- en bombas de condensado que succionan directo del condensador.

El uso de prensaestopa es un dispositivo de reducción de presión. El material de las prensaestopas debe ser fácilmente moldeable y plástico para que puede ser fácilmente ajustadas, debiendo resistir el calor y el roce con el eje o el casquillo protector del eje.

La tabla en la página siguiente muestra los diversos tipos de prensaestopa y sus aplicaciones:

- asbesto grafitado;
- asbestos trenzado con hilos metálicos antifricción, impregnado y grafitado;
- asbestos de alta resistencia y flexibilidad, impregnado con compuestos especiales y acabado con grafito;
- asbesto impregnado con teflón y lubricado, no grafitado;
- teflón puro trenzado en filamentos y lubricado, no grafitado;
- grafito puro.

El sellado del eje por prensaestopa sólo puede ser usado para presiones hasta de 15 kgf/cm<sup>2</sup> en la entrada de la caja de prensaestopas. Para presiones mayores, se deben usar sellos mecánicos.

Cuando el líquido bombeado es inflamable, corrosivo, explosivo, tóxico o cuando no se permite goteo de líquido, es necesario el uso de sellos mecánicos.

### 6.12.1 LIMITES DE APLICACIÓN

| Denominación                       | Temp. máx. (°C) | Presión máx. En la cámara (bar) | Veloc. perif. máx. (m/s) | pH   | Aplicación                                                         |
|------------------------------------|-----------------|---------------------------------|--------------------------|------|--------------------------------------------------------------------|
| Asbesto grafitado                  | 105             | 15                              | 10                       | 4-10 | Líquidos limpios en general                                        |
| Asbesto grafitado antifricción     | 140             | 15                              | 10                       | 4-10 | Líquidos con sólidos en suspensión abrasivos                       |
| Asbesto grafitado alta resistencia | 140             | 15                              | 10                       | 4-10 | Líquidos leves, gasolina, aceites, solventes                       |
| Asbesto teflonado                  | 150             | 15                              | 10                       | 2-13 | Líquidos corrosivos en general, ácidos débiles, productos químicos |
| Teflón                             | 200             | 10                              | 10                       | 0-14 | Líquidos extremadamente corrosivos, ácidos fuertes                 |
| Grafito                            | 400             | 15                              | 15                       | 0-14 | Aceite térmico                                                     |

## 6.13 SELLO MECÁNICO

Cuando el líquido bombeado no puede gotear hacia el medio externo de la bomba, por un motivo cualquiera (líquido inflamable, tóxico, corrosivo, muy volátil o cuando no se desean goteras) se utiliza otro sistema de sellado llamado sello mecánico.

A pesar que los sellos mecánicos pueden diferir en aspectos físicos, todos tienen el mismo principio de funcionamiento. Las superficies de sellado están ubicadas en un plano perpendicular al eje y usualmente consisten en dos partes adyacentes y altamente pulidas; una superficie unida al eje y la otra a la parte estacionaria de la bomba.

Estas superficies altamente pulidas son mantenidas en contacto continuo por resortes, formando una capa de líquido entre las partes rotatorias y estacionarias con muy bajas pérdidas por roce. El goteo es prácticamente nulo cuando el sello es nuevo. Con un uso prolongado, puede ocurrir alguna gotera, obligando a la substitución de los sellos.

Los sellos mecánicos pueden ser de dos tipos:

- **Sellos de montaje interno:** En ellos la cara rotatoria, unida al eje, está en el interior de la caja de sello y está en contacto con el líquido bombeado.

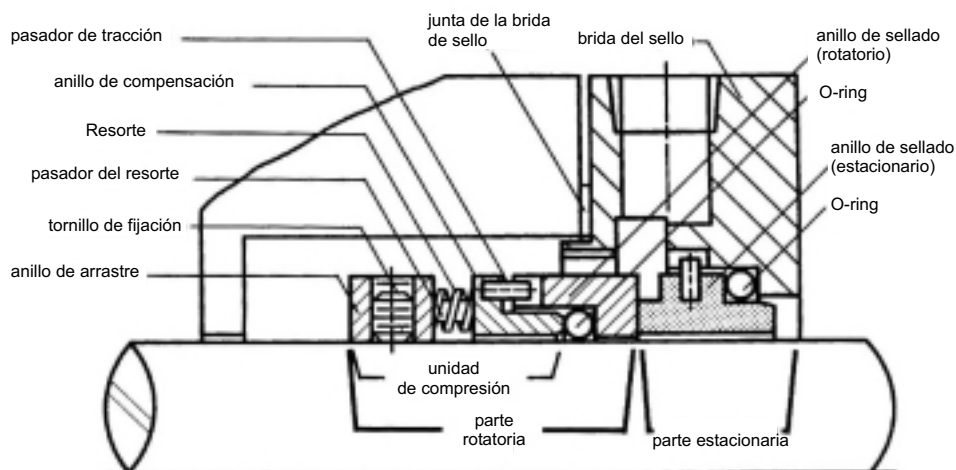
- **Sellos de montaje externo:** El elemento unido al eje se ubica en el lado externo de la caja.

En ambos tipos de montaje, el sellado se realiza en tres partes:

A) entre la cara estacionaria y la carcasa. Para conseguir este sellado, se usa un anillo común llamado “anillo en O” (O’ring).

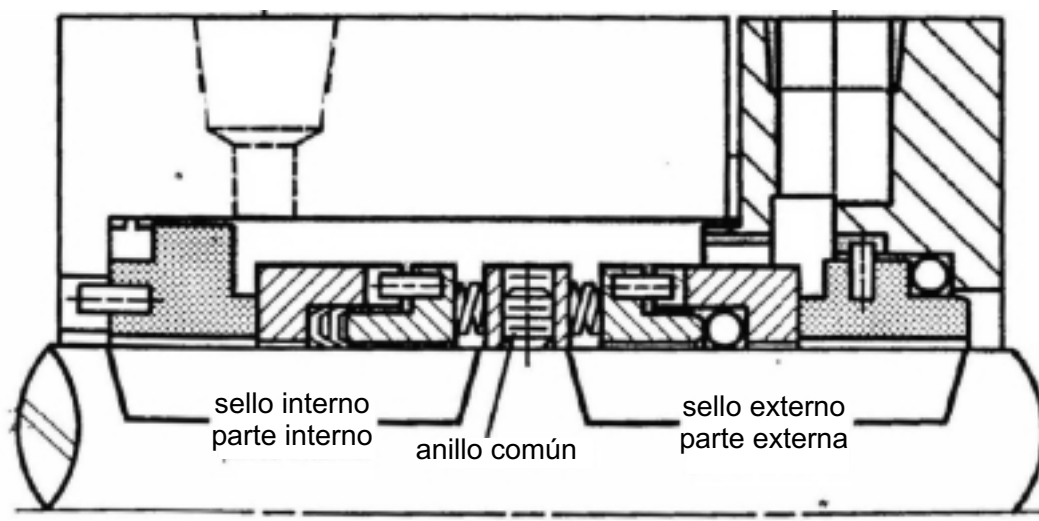
B) Entre la cara rotatoria y el eje o el casquillo protector del eje, cuando éste existe. Se usan O’rings, fuelles o cuñas.

C) Entre las superficies de contacto de los elementos de sellado. La presión mantenida entre las superficies asegura un mínimo de gotera.



Esquema de un sello mecánico de resortes múltiples

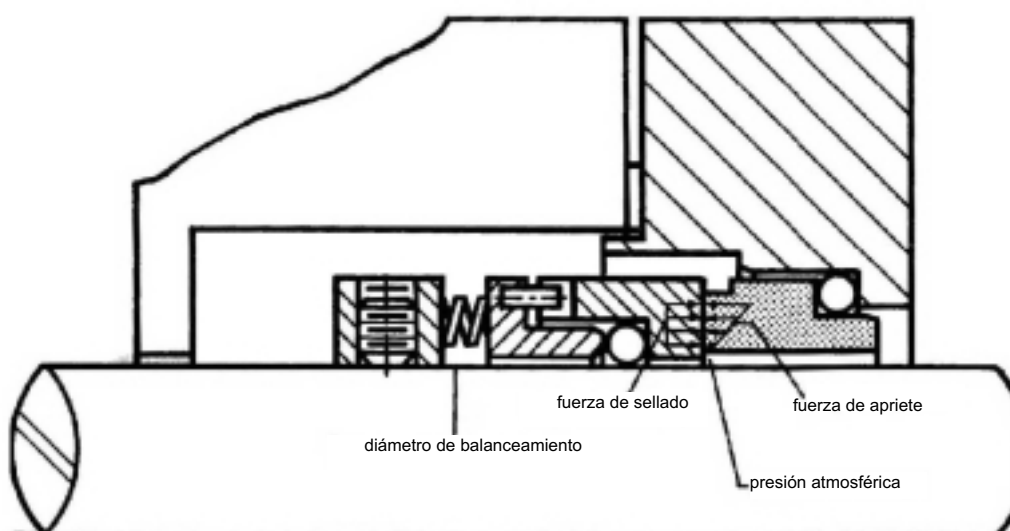
Cuando el líquido a bombear es inflamable, tóxico, por lo que no se debe escapar de la bomba, o cuando el líquido es corrosivo, abrasivo o se encuentra a temperaturas muy elevadas o muy bajas, se utiliza sello mecánico doble, en el que se realiza el sellado del líquido con agua limpia.



Sello mecánico doble de resortes múltiples

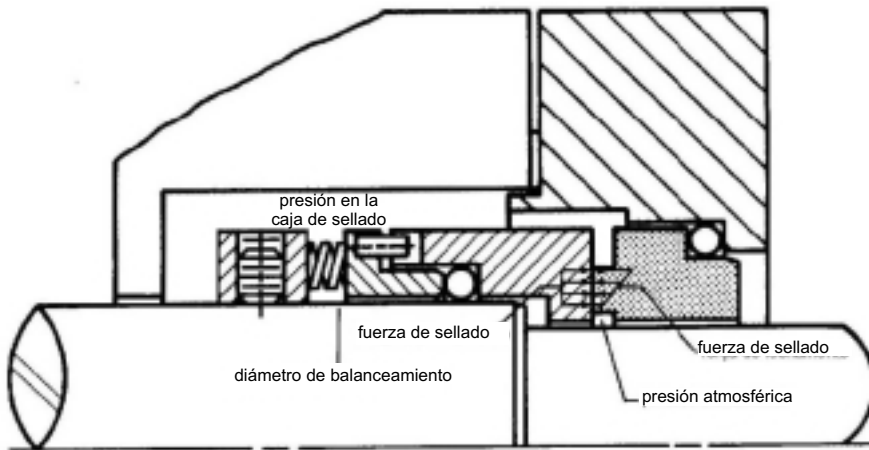
Existen sellos mecánicos balanceados y no balanceados.

En los no balanceados, utilizados para fluidos con propiedades lubricantes, iguales o mejores que los de la gasolina y presiones de hasta  $10 \text{ kgf/cm}^2$ , la presión de un resorte y la presión hidráulica actúan en el sello con el objeto de juntar las superficies de contacto.



Sello mecánico no balanceado de resortes múltiples

Los sellos mecánicos balanceados son utilizados para condiciones más severas, en el que la fuerza de sellado es atenuada por la existencia de una degradación en la cara estacionaria. Por otro lado debemos observar que los sellos balanceados no son normalmente aplicables para presiones internas en la caja de sellado menores que  $4 \text{ kgf/cm}^2$ , pues la presión interna de sellado sería tan reducida que podría ser insuficiente para entregar un sellado adecuado de las caras rotatoria y estacionaria.

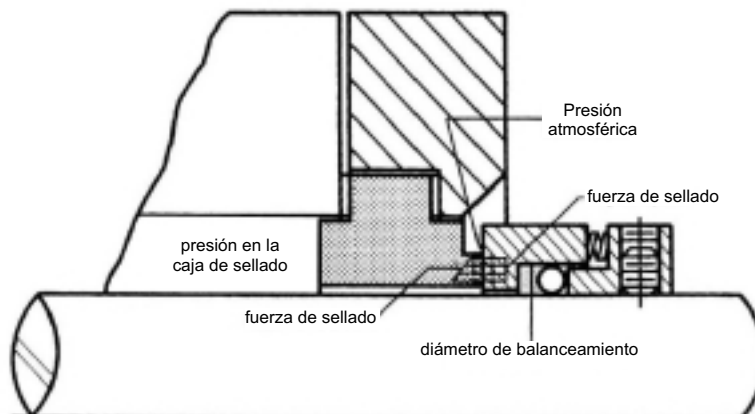


Sello mecánico balanceado de resortes múltiples

### 6.13.1 SELLOS ESTANDARIZADOS

Son sellos compactos de menor costo y aplicables a servicios livianos. Normalmente son fabricados como una unidad de sellado. De esta manera, si uno de los componentes falla, lo usual es substituir el conjunto. Generalmente son sellos utilizados en bombas monobloc.

Ejemplo de un sello mecánico de montaje externo



### 6.13.2 SELLOS MECÁNICOS/DISPOSITIVOS AUXILIARES

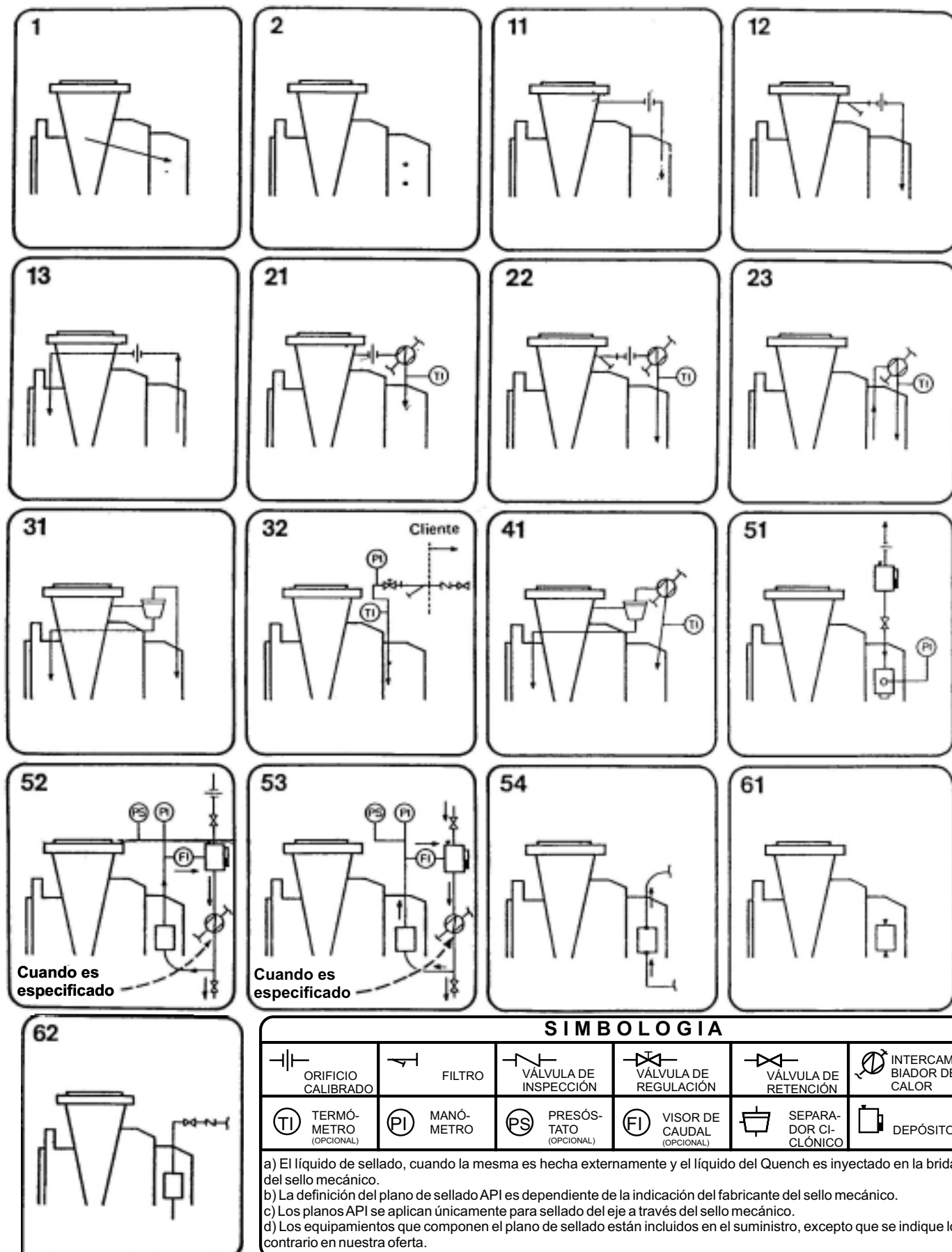
Los sellos mecánicos necesitan, para su adecuado funcionamiento, que se forme una capa de lubricación del líquido bombeado entre las caras de sellado .

Además de eso, una alta temperatura de bombeo, la presencia de abrasivos, líquidos con tendencia a la formación de cristales y servicios en que la bomba permanezca parada por mucho tiempo, son características negativas para el trabajo de sellos.

Como el objetivo de atenuar estas limitaciones, encontramos los siguientes dispositivos auxiliares eventualmente incorporados al sello mecánico:

- **Refrigeración o calentamiento de la caja de sellado** : es realizado introduciendo un fluido circulante por cámaras construidas para esta finalidad.
- **Refrigeración de la cara estacionaria**: realizado en forma similar al esquema anterior.
- **Lubricación de las caras de sellado** : en este caso el lubricante actúa sobre las caras de sellado a través de perforaciones existentes en la brida del sello y en la cara estacionaria.
- **Lavado líquido (flushing)**: consiste básicamente en inyectar un líquido de forma de alcanzar las caras de sellado. El líquido puede ser de la descarga de la bomba o de una fuente externa.
- **Recirculación con un anillo bombeador**: es un sistema en que, mediante el uso de un anillo bombeador, es posible hacer la recirculación del líquido con una pasada intermedia por un permutador para promover su refrigeración.
- **Lavado especial (quenching)**: en casos donde hay formación de cristales, una alternativa válida es la inyección y posterior drenado de un fluido, usualmente vapor de agua, y eventualmente agua o aceite para realizar el lavado.
- **Succión y drenaje**: en el caso de fluidos peligrosos el sello puede incorporar una conexión para succión y otra para drenaje independientemente de otros dispositivos auxiliares eventualmente utilizados.
- **Filtro o separador tipo ciclón**: cuando el líquido bombeado contiene sólidos en suspensión y se desea efectuar el lavado con el propio líquido bombeado, se hace necesario el uso de un filtro o separador tipo ciclón.

### 6.13.3 PLANOS DE SELLADO CONFORME A LA NORMA API, 6ª EDICIÓN



#### 6.13.4 DESCRIPCIÓN DE LOS PLANES DE SELLADO

**PLAN 1** - El sellado es hecho internamente con el propio líquido bombeado, a través de una perforación que comunica la tapa de presión con la caja de sellado.

**PLAN 2** - El sellado es hecho internamente con el propio líquido bombeado, a través de un buje de fondo. La brida del sello tiene perforaciones para eventuales conexiones futuras.

**PLAN 11** - El sellado es hecho externamente con el propio fluido bombeado.

**PLAN 12** - A sellado es hecho externamente con el propio fluido bombeado, después de pasar por un filtro.

**PLAN 13** - El sellado es hecho internamente con el propio líquido bombeado siendo el mismo, luego de salir por la brida del sello, dirigido hacia la succión de la bomba.

**PLAN 21** - El sellado es hecho externamente con el propio líquido bombeado, después de ser enfriado.

**PLAN 22** - El sellado es hecho externamente con el propio líquido bombeado, después de ser filtrado y enfriado.

**PLAN 23** - El líquido de sellado es el propio líquido bombeado, que es bombeado hacia afuera de la caja de sellado, y luego de ser enfriado es inyectado nuevamente en la caja de sellado.

**PLAN 31** - El sellado es hecho externamente con el propio líquido bombeado, después de pasar por un separador ciclónico. El líquido con partículas sólidas retorna hacia la succión de la bomba.

**PLAN 32** - El sellado es hecho con un líquido limpio de una fuente externa.

**PLAN 41** - El sellado primario es hecho por el propio líquido bombeado, después de pasar por un separador ciclónico y ser enfriado. El líquido con partículas sólidas retorna hacia la succión de la bomba.

**PLAN 51** - El sellado primario es hecho por el propio líquido bombeado, el sellado auxiliar es realizado por un líquido de fuente externa compatible con el líquido bombeado.

**PLAN 52** - El sellado primario es hecho por el propio líquido bombeado, el sellado auxiliar es realizado por un líquido de una fuente externa compatible con el líquido bombeado y es accionado por el anillo del bombeador.

**PLAN 53** - El sellado primario es hecho por el propio líquido bombeado, el sellado auxiliar es realizado por un líquido de una fuente externa presurizada compatible con el líquido bombeado.

**PLAN 54** - El sellado es hecho con un líquido limpio de una fuente externa.

**PLAN 61** - La brida del sello posee conexiones tapadas para eventuales usos (ventilaciones, drenaje, quench). Este plan es auxiliar siendo utilizado con otro plan.

**PLAN 62** - La brida del sello posee conexión para quench. Este plan es utilizado en conjunto con los demás planes (excepto con el 61).

## 6.14 SOPORTE DE RODAMIENTOS / CABALLETE DE RODAMIENTOS

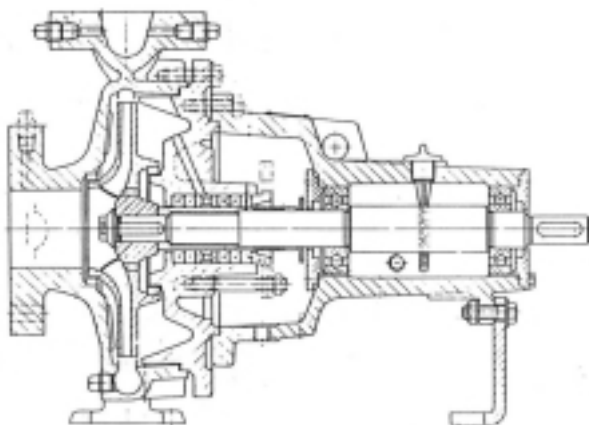
Las bombas de una etapa pueden tener, dependiendo del diseño, un soporte de rodamientos o un caballete de rodamientos.

Las bombas de una etapa con soporte de rodamiento son normalmente del tipo “back-pull-out”. Esto significa que el soporte de rodamiento junto con el rodete son desmontables por atrás, sin remover la carcasa de la bomba (que posee pies propios) del lugar de instalación. La ventaja es un fácil desmontaje de la bomba, sin ser necesario soltar las tuberías de succión y descarga.

Las bombas de una etapa con caballete de rodamiento tienen, para los tamaños menores y medios, normalmente el apoyo de la bomba sólo en el caballete de rodamiento y no permiten el desmontaje sin sacar la bomba interna del lugar de la instalación.

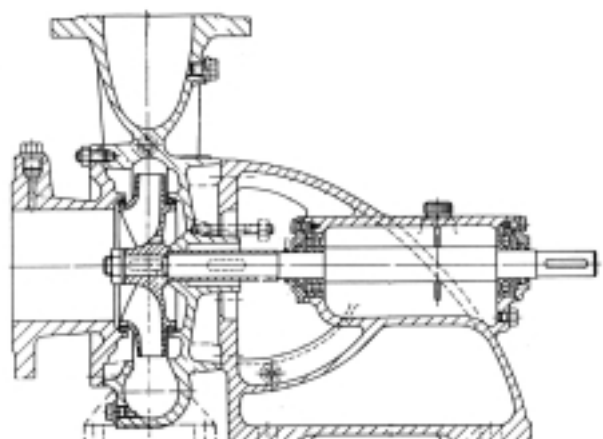
Ventajas: mayor robustez y accionamiento por poleas y correas directamente en la punta del eje de la bomba.

Las bombas multietapas o bombas bipartidas poseen soportes de rodamientos en los dos extremos de la bomba.



Soporte de rodamiento  
(bomba back-pull-out)

Caballete de rodamientos

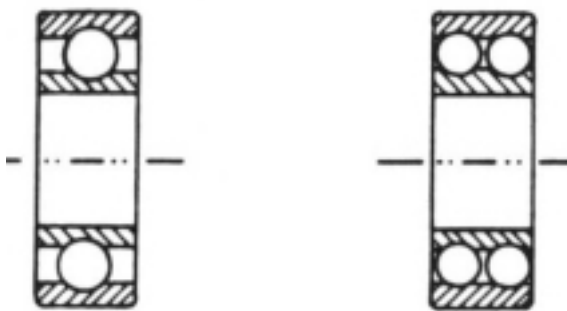


## 6.15 DESCANSOS

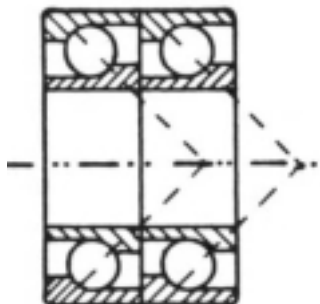
Los descansos tienen la función de soportar el peso del conjunto rotatorio, fuerzas radiales y axiales que ocurren durante la operación.

Los descansos que soportan las fuerzas radiales son llamadas como descansos radiales y los que soportan fuerzas axiales son llamados como descansos axiales.

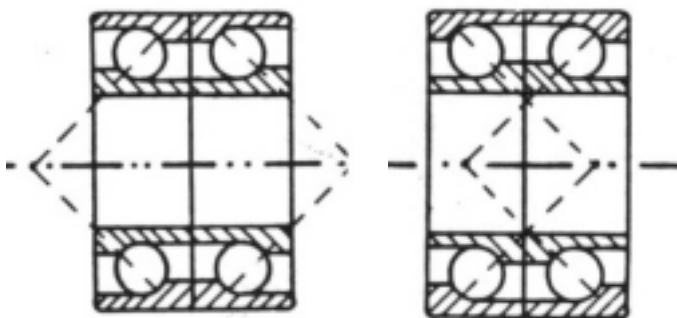
Las bombas de construcción horizontal poseen normalmente descansos de rodamientos para soportar fuerzas radiales y axiales. Los rodamientos más utilizados en bombas centrífugas son:



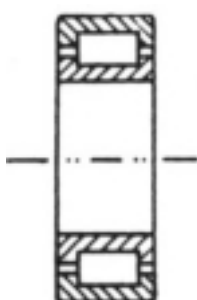
rodamientos de esfera  
de una o dos hileras  
(soporta fuerzas radiales y axiales)



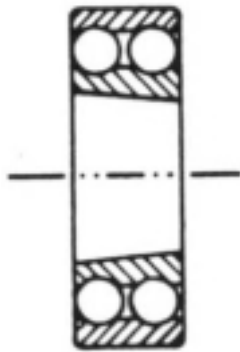
rodamientos de esferas de  
contacto angular. Montado en tándem, son  
capaces de soportar fuerzas radiales  
y axiales en una sola dirección



rodamientos de esferas de contacto  
angular. Montado en "O" o "X", son  
capaces de soportar fuerza  
y axiales en las dos direcciones



rodamientos de rodillos cilíndricos  
de una sola hilera  
(para soportar sólo fuerzas radiales)

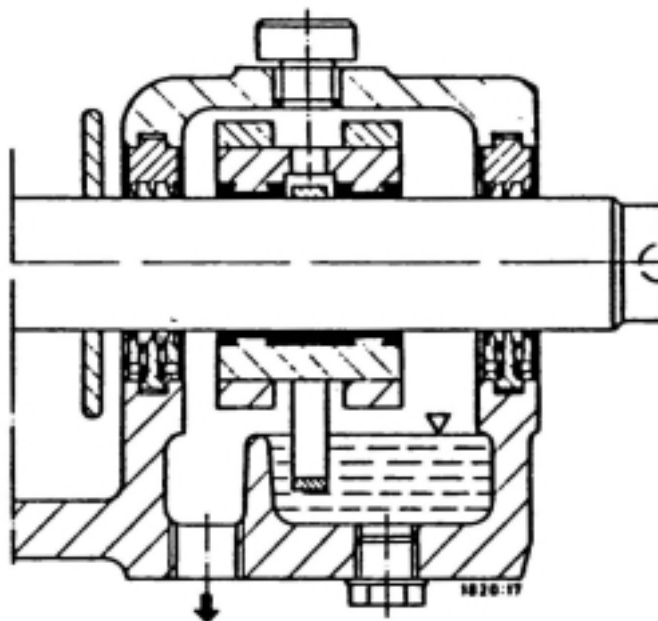


rodamientos auto-compensados  
de esferas (soporta fuerzas radiales y axiales)

Dependiendo del diseño de la bomba, los rodamientos pueden ser lubricados por grasa o aceite. Los diseños con lubricación de grasa generalmente poseen un surtidor en el soporte o caballete de rodamientos para ingresar la grasa (grasera).

Los soportes o caballetes con lubricación por aceite, poseen sellos en la pasada del eje, por ejemplo, en la tapa del soporte de rodamientos; un baso de lubricación automático ( constant level oil ), una vara de nivel de aceite y un respiradero en la parte superior del soporte de rodamientos (generalmente se incorpora una vara) o un visor de aceite (sight glass).

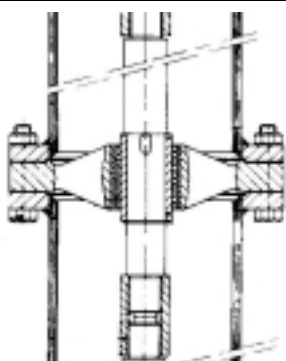
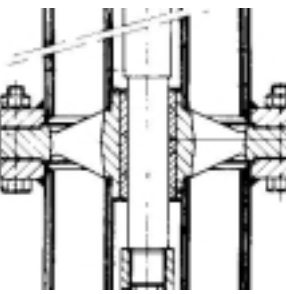
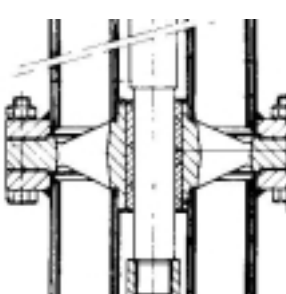
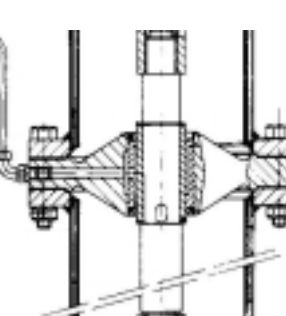
Las bombas de caldera de gran tamaño, poseen descansos deslizantes bipartidos axialmente, constituidos por un buje de apoyo, y un buje de metal. Estos descansos son lubricados por un baño de aceite y poseen un anillo pescador para mejorar la lubricación. Para ciertas aplicaciones es necesario tener un sistema de lubricación con aceite forzado.



Soporte deslizante

Las bombas verticales poseen bujes de descansos que funcionan como guía del eje.

Dependiendo del tipo de bomba, los bujes de descanso pueden ser suministrados según los siguientes diseños:

| TIPO                                                                                | BUJE DE DESCANSO                  | LUBRICACIÓN                          | APLICACIÓN                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|
|   | Goma sin tubo protector del eje   | Propio líquido bombeado              | Líquidos limpios sin sólidos en suspensión |
|  | Goma con tubo protector del eje   | Líquido limpio de una fuente externa | Líquido con sólidos en suspensión          |
|  | Bronce con tubo protector del eje | Aceite con dosificador               | Líquido con sólidos en suspensión          |
|  | Bronce sin tubo protector del eje | Grasa a través de una bomba de grasa | Líquido con sólidos en suspensión          |

## 6.16 FUERZAS

Cuando las bombas centrífugas están en operación, surgen fuerzas radiales y axiales sobre el rodete y consecuentemente sobre todo el conjunto rotatorio.

Estas fuerzas deben ser debidamente compensadas o reducidas, de forma de tener una vida útil mayor del equipamiento y principalmente de los descansos de las bombas.

### 6.16.1 FUERZA RADIAL

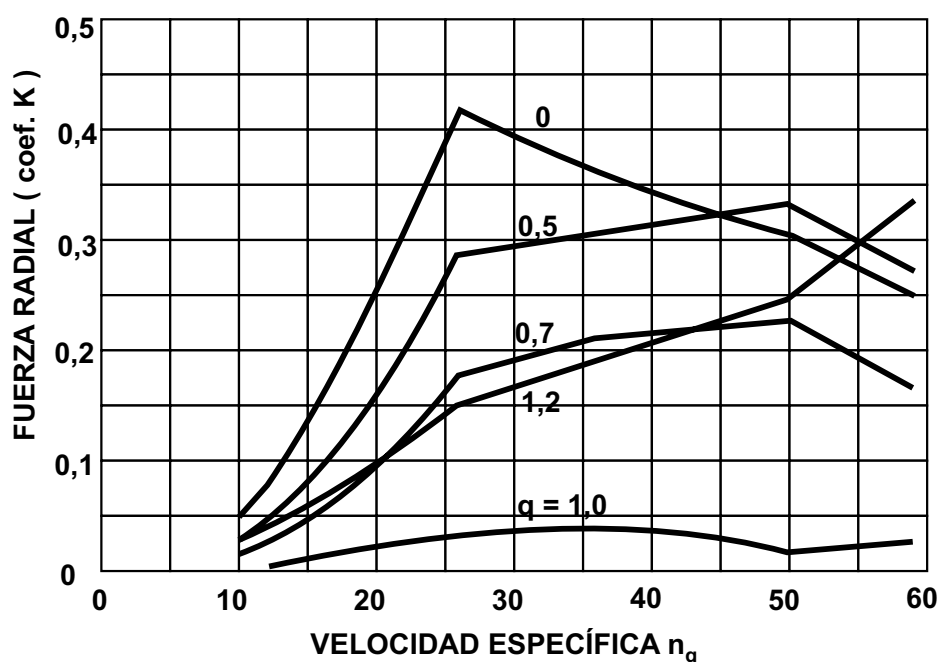
Las fuerzas radiales, en la tecnología de las bombas centrífugas, envuelven las fuerzas radiales hidráulicas generadas por la interacción entre el rodete y la carcasa o difusor de la bomba. Existe una distinción entre fuerzas radiales estáticas y no estáticas.

**- Fuerzas radiales estáticas:** El vector de la fuerza radial cambia su magnitud y dirección con la variación de caudal "q", dado por el cociente  $q = Q / Q_{\text{óptimo}}$ .

Si  $q = \text{constante}$ , su magnitud varía con la altura manométrica total, pero su dirección permanece inalterada.

En el caso de bombas con carcasa espiral simple, las fuerzas radiales son relativamente pequeñas en el punto de mejor rendimiento, y crece enormemente para caudales bajos ( $q < 1$ ) o superiores ( $q > 1$ ).

La magnitud de las fuerzas radiales (R), en bombas tipo voluta, depende mucho de la velocidad específica ( $n_q$ ), conforme se muestra en la siguiente figura.



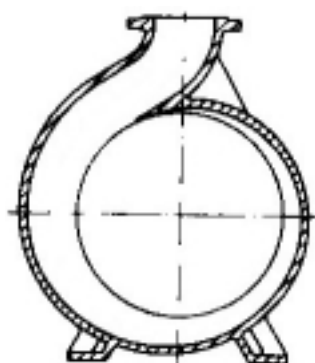
$$R = K \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot D \cdot B$$

donde:

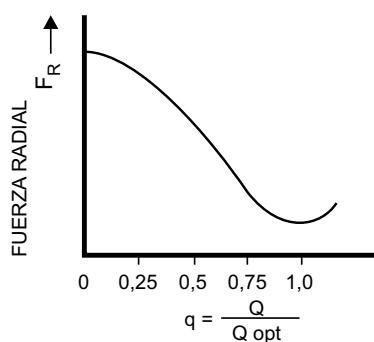
R = fuerza radial  
 K = coef. de la fuerza radial  
 $\rho$  = dens. del líq. bombeado  
 g = aceleración de gravedad  
 H = altura total  
 D = diámetro del rodete  
 B = ancho en la descarga del rodete

El medio más usado para la reducción de la fuerza radial en bombas centrífugas es la alteración de la carcasa de la bomba.

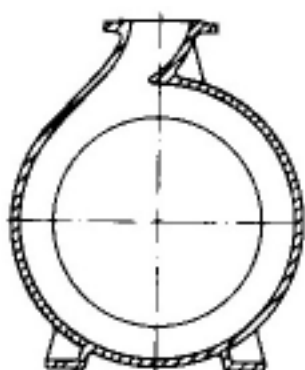
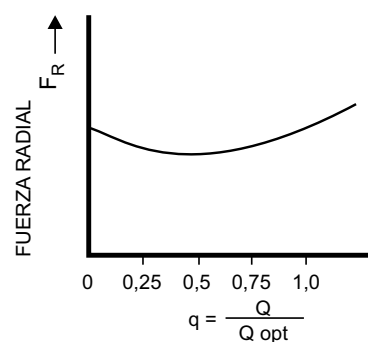
Las figuras siguientes muestran la intensidad de la fuerza radial en función de la relación  $q = Q / Q_{\text{óptimo}}$ , donde  $Q$  = caudal de diseño y  $Q_{\text{óptimo}}$  es el caudal en el punto de mejor rendimiento de la bomba.



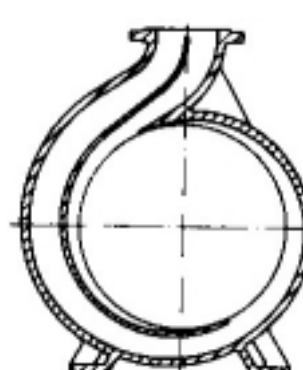
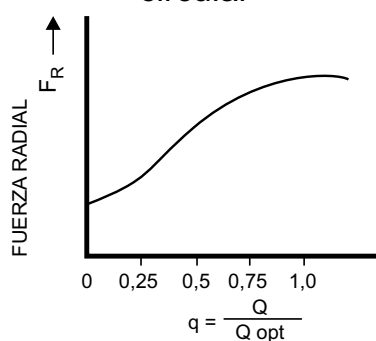
carcasa simple



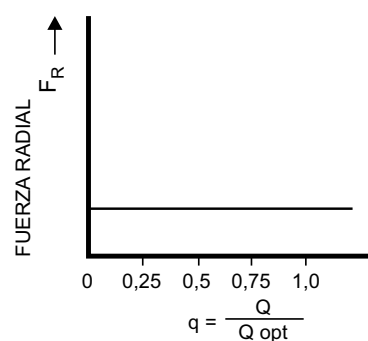
Mixta



circular



Espiral doble



Notar que la mejor forma de reducir la fuerza radial es utilizar una carcasa espiral doble, o sea, un cuerpo espiral con una segunda carcasa que se inicia a 180 grados de la primera. En este caso, la fuerza radial es prácticamente constante desde el caudal cero hasta el máximo. En el caso de bombas con difusores, no hay generación de fuerzas radiales estáticas si el rodete es instalado concéntricamente con el difusor.

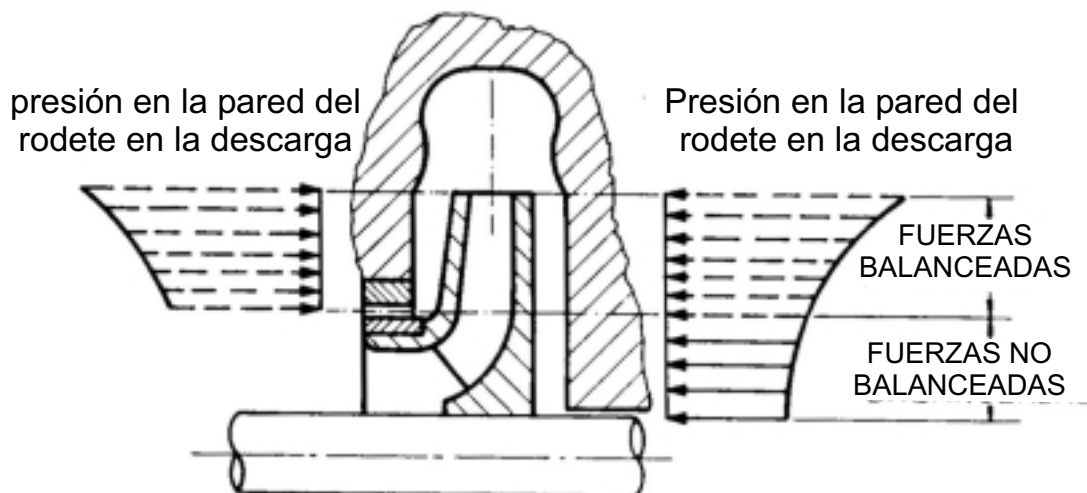
- **Fuerzas radiales no estáticas:** Las fuerzas radiales no estáticas pueden ocurrir conjuntamente con las fuerzas radiales estáticas. Su presencia se debe a varias causas y características. La causa más conocida de esta fuerza radial es la frecuencia del número de álabes del rodete versus la rotación.

Estas fuerzas radiales existen con mayor o menor intensidad en todos los diseños de bombas centrífugas. Este fenómeno existe especialmente en bombas con difusor operando con caudales reducidos.

## 6.16.2 FUERZAAXIAL

Las presiones generadas por las bombas centrífugas ejercen fuerzas, tanto en las partes móviles como en partes estacionarias. El diseño de estas partes balancea algunas de estas fuerzas, sin embargo es posible utilizar medios diferentes para contrabalancear a otras. El esfuerzo axial es la suma de las fuerzas no balanceadas actuando en la dirección axial del rodete.

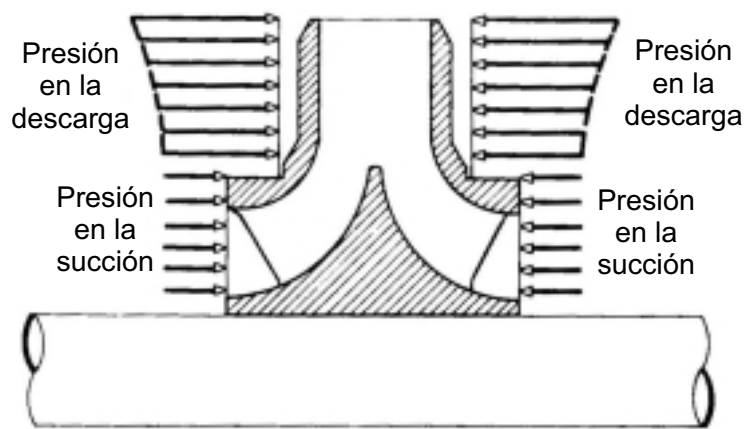
Los rodetes sin dispositivos de compensación axial tienen una fuerza axial hacia el lado de succión, debido al área de presión existente en el lado de descarga del rodete. Ver figura siguiente:



### 6.16.2.1 RODETE DE DOBLE SUCCIÓN

Los rodetes de flujo doble, teóricamente tiene las fuerzas compensadas gracias a la simetría de las áreas de las presiones en los dos lados del rodete. En la práctica, esta compensación no es total, debido a divergencias en el fundido del rodete, distribución desigual del flujo debido a localizaciones de la curva o una válvula próxima al flange de succión; el rodete está ubicado fuera de la línea de centro de la espiral; recirculación desigual por los anillos de desgaste en los dos lados del rodete.

El empuje axial residual deberá ser soportado por los descansos de la bomba.



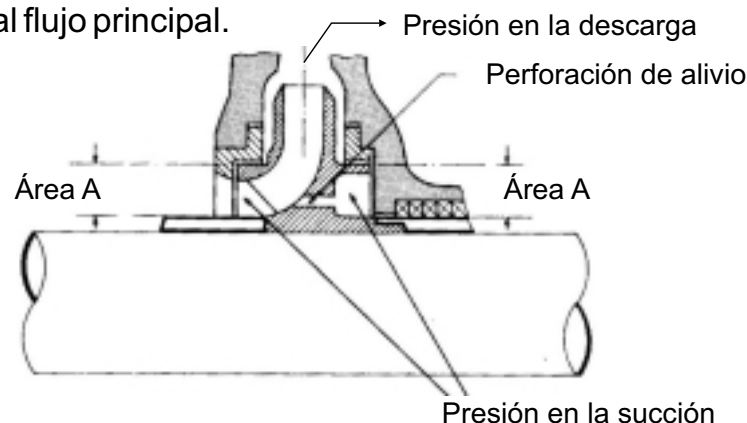
Rodete de succión doble

En las bombas de flujo simple, existen los siguientes métodos para compensar el empuje axial:

### 6.16.2.2 PERFORACIONES DE ALIVIO EN EL RODETE / ANILLOS DE DESGASTE

El anillo de desgaste ubicado en el lado de descarga, posee un diámetro igual o próximo al anillo de desgaste en el lado de succión y el rodete posee perforaciones en la cubo del mismo. A través de estas perforaciones se crea una presión entre el anillo de desgaste y el cubo del rodete, próxima a la presión de succión, produciendo un equilibrio de presiones en ambos lados del rodete.

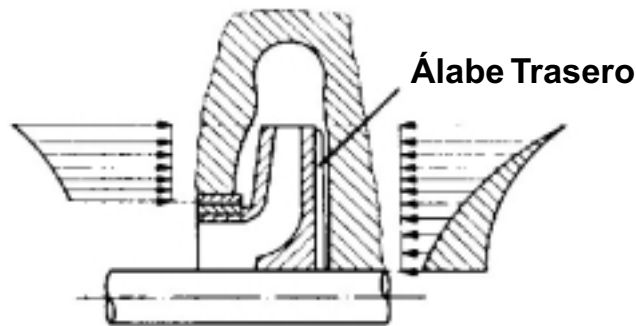
Este método tiene el inconveniente de generar turbulencia debido al retorno de fluido por los orificios en oposición al flujo principal.



La fuerza axial residual deberá ser soportada por los descansos.

### 6.16.2.3 ÁLABES TRASEROS

Este sistema consiste en álabes ubicados en la parte posterior del rodete los que inducen el equilibrio de las fuerzas axiales.



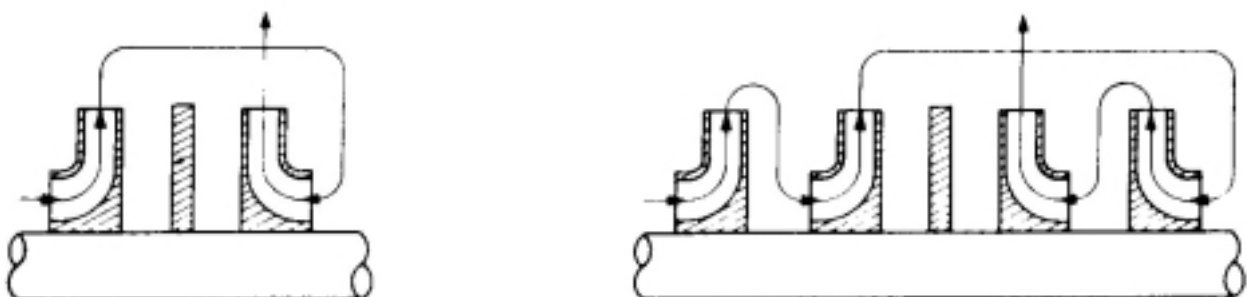
Este sistema es muy utilizado en bombas para la industria química y aplicaciones en el bombeo de fluidos sucios con sólidos en suspensión, donde estos álabes, además de producir el equilibrio producen el efecto adicional de mantener libre de impurezas el espacio entre la parte trasera del rodete y la carcasa.

El empuje axial en bombas multietapas es mayor comparado con bombas de una etapa, toda vez que el desbalanceamiento total será la sumatoria de los desbalanceamientos de todos los rodetes, teniéndose así la necesidad de utilizar una forma de equilibrio más eficaz en bombas multietapas.

### 6.16.2.4 CONFIGURACIÓN DE RODETES

Este método consiste en posicionar rodetes en formas opuestas, como se muestra en la figura siguiente, donde el empuje resultante de los rodetes dispuestos hacia un lado es balanceado por los rodetes dispuestos hacia el otro.

La desventaja de este método es que el flujo recorre un camino más complejo, influyendo de esta forma, negativamente en el valor de las pérdidas.



### 6.16.2.5 DISCO Y CONTRA-DISCO

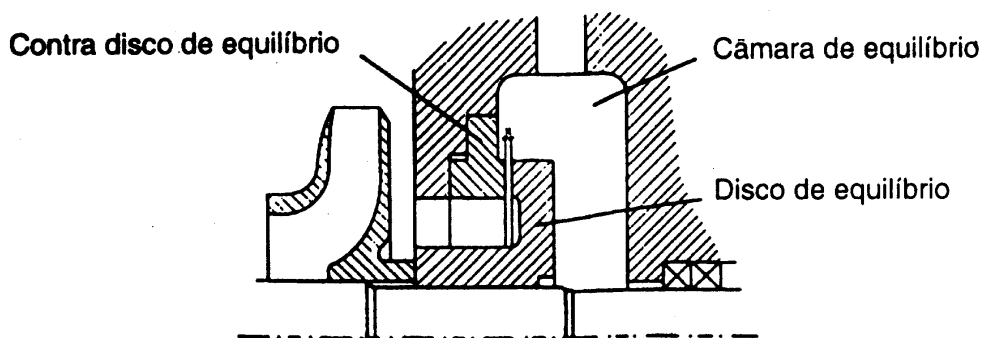
Este sistema consiste en un dispositivo llamado disco y contra-disco de equilibrio, donde el disco de equilibrio es solidario al eje y el contra-disco de equilibrio es fijado al cuerpo de descarga de la bomba.

Se forma una cámara atrás del disco que, a través de una tubería, es conectada a la succión o al estanque de succión, dependiendo de la cantidad de etapas de la bomba. Con eso, durante la operación se produce una presión frente del disco igual a la presión de descarga la cual abre un juego radial entre el disco y el contra-disco, produciéndose una fuga de líquido hacia la cámara trasera del disco, causando así el equilibrio.

Este tipo de compensación necesita de un eje fluctuante, para que el juego entre disco y contra-disco pueda variar a fin de equilibrar el conjunto.

Cuando parte y para la bomba, este sistema de compensación tiene una fase de inestabilidad donde se crea un contacto entre las dos piezas (disco y contra-disco), hasta que la bomba llega a una presión de cerca de  $13 \text{ kgf/cm}^2$ , donde a partir de esta presión este sistema comienza a funcionar.

El constante contacto entre las piezas rotativas (disco) y estacionarias (contra-disco), causa un desgaste entre estas piezas el que puede ser controlado a través de un indicador de posición ubicado en el lado opuesto al accionamiento, donde a través de marcas previamente establecidas, se controla el desgaste de estas piezas.

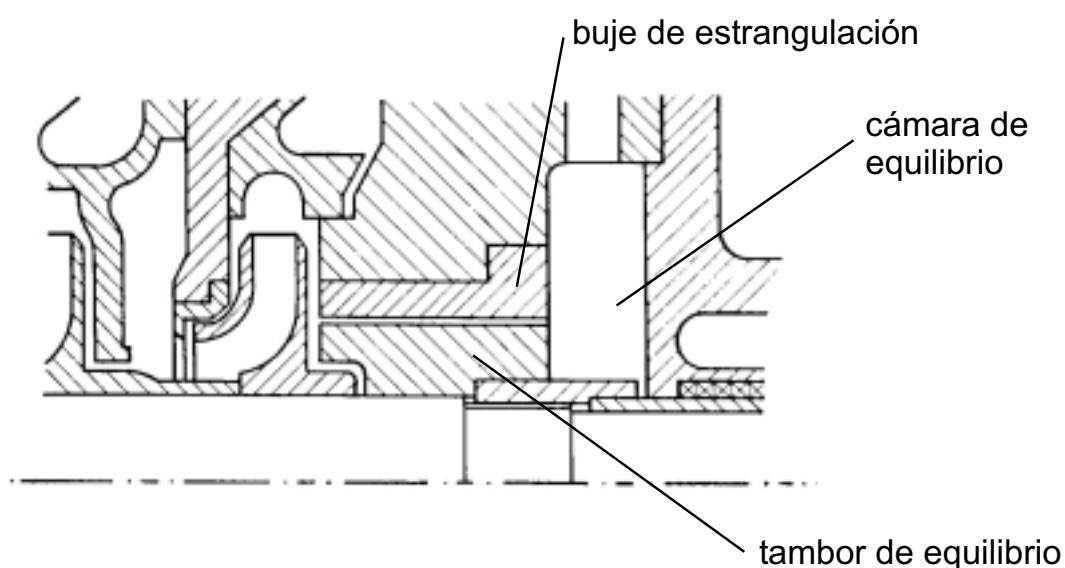


### 6.16.2.6 TAMBOR O PISTÓN DE EQUILIBRIO

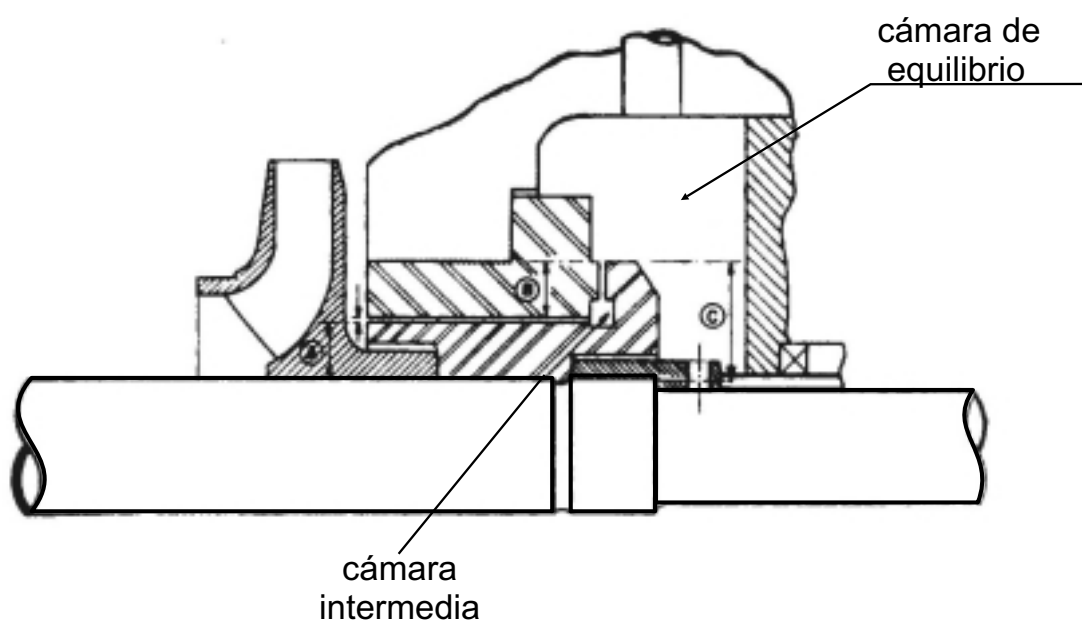
El funcionamiento de este sistema es similar al del disco y contra disco de equilibrio, excepto que el juego entre el componente estacionario y rotativo es axial.

Este sistema compensa el empuje axial solamente en el punto de operación, por lo tanto, las bombas con este tipo de dispositivo necesitan de un rodamiento axial sobre dimensionado para absorber la fuerza axial residual y permitir la operación en los límites de la curva característica.

**IMPORTANTE:** Los sistemas de compensación de empuje axial por medio de disco y contra-disco de equilibrio así como tambor de equilibrio sólo pueden ser utilizados para el bombeo de líquidos limpios, sin sólidos en suspensión.



#### 6.16.2.7 COMBINACIÓN PISTÓN / DISCO DE EQUILIBRIO



## 6.17 NORMAS

| Tipo de Aplicación y Responsables |                                                                                          | Estándares de Dimensiones para Bombas                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Accesorios                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Guías Principales y Especificaciones                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| República Federal Alemana         | <div>VDMA</div> <div>Asociación de Ingenieros Alemanes</div> <div>Comité de Bombas</div> | <div>VDMA 24253</div> <div>Bombas Centrifugas de carcasa anular (bombas anulares); flujo simple, una etapa, con succión axial, rango de operación, dimensiones principales</div> | <div>DIN 24252</div> <div>Bomba de Drenaje con presiones hasta 1000m</div> <div>DIN 24252</div> <div>Bombas centrifugas con platos de desgaste PN 10, rango de operación, dimensiones principales.</div> <div>DIN 24254</div> <div>Bomba de canal lateral PN 40; designación, nominal del rango de operación, principales dimensiones</div> <div>DIN 24255</div> <div>Bombas Centrifugas de succión axial, PN 10, con soporte de rodamiento, nominal del rango de operación, principales dimensiones</div> <div>DIN 24256</div> <div>Bomba centrifuga de succión axial, PN 16, con soporte de rodamiento, nominal del rango de operación principales dimensiones</div> | <div>DIN 24259 T.2</div> <div>Selección de bases para bombas centrifugas según dimensiones, clasificaciones</div> <div>DIN 24299 T.1</div> <div>Especificaciones generales de las placas de identificación de bombas.</div> <div>DIN 24960</div> <div>Cámaras de los sellos mecánicos; principales dimensiones, designaciones y los materiales</div> | <div>VDMA 24261 T.1</div> <div>Bombas centrifugas terminología según el modo de operación y las condiciones del diseño</div> <div>VDMA 24273</div> <div>Instrucciones para el procurement. Hojas de datos para el material y los ensayos de aceptación de la fabricación</div> <div>VDMA 24275</div> <div>dimensiones de las conexiones para bombas centrifugas desviaciones admisibles y tolerancias</div> <div>VDMA 24296</div> <div>Bombas centrifugas; procurement, ensayos, suministro y entregas especificaciones</div> <div>VDMA 24297</div> <div>Bombas centrifugas; requerimientos técnicos, especificaciones</div> | <div>DIN 1944</div> <div>Ensayos para aprobación de bombas centrifugas</div> <div>DIN 24250</div> <div>Nomenclatura y número de componentes de las partes de bombas centrifugas</div> <div>DIN 24260</div> <div>Bombas centrifugas e instalaciones de bombas centrifugas, símbolos, unidades</div> <div>DIN 45635 T.24</div> <div>Medida del nivel de ruido en máquinas, alborne noise measurements, enveloping surface method, bombas para líquidos</div> <div>DIN 24293</div> <div>Bombas centrifugas, documentación técnica, términos, ejecución del suministro.</div> <div>DIN 24295</div> <div>Bombas y set de bombas para líquidos, requerimientos de seguridad</div> <div>DIN ISO 5199</div> <div>Bombas centrifugas; requerimientos técnicos Clase II</div> <div>DIN 24420</div> <div>Lista de repuestos</div> |  |
|                                   | <div>CEN</div> <div>Comité Europeo de Normalización</div>                                |                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  |
| Europa*                           |                                                                                          |                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  |
| Mundial                           |                                                                                          |                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |  |
| Internacional                     |                                                                                          | <div>ISO 2858</div> <div>Bombas centrifugas de succión axial, presión (o bar) - Designación, punto nominal de operación y dimensiones</div>                                      | <div>ISO 3661</div> <div>Bases y dimensiones de instalación para bombas centrifugas de succión axial</div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <div>ISO 3069</div> <div>Dimensiones de las cavidades para sellos mecánicos y prensa-escoba para bombas centrifugas de succión axial</div>                                                                                                                                                                                                           | <div>ISO 2548</div> <div>Bombas centrifugas de flujo mixto y axial; Código de aceptación de ensayos - Clase I (former clase C)</div> <div>ISO 3555</div> <div>Bombas centrifugas de flujo mixto y axial; Código de aceptación de ensayos - Clase I (former clase B)</div> <div>ISO 5198</div> <div>Bombas centrifugas de flujo mixto y axial; Código de ensayos de funcionamiento hidráulico - Clase de precisión</div>                                                                                                                                                                                                      | <div>ISO 5199</div> <div>Especificaciones técnicas para bombas centrifugas Clase II</div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |

\* Países miembros : 12 de la EC y 6 de la EFTA



## ***LÍQUIDOS VISCOSOS***



## ÍNDICE

|             |                                                                                                                                             |            |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>7</b>    | <b><i>Líquidos viscosos</i></b>                                                                                                             | <b>209</b> |
| <b>7.1</b>  | <b><i>Viscosidad</i></b>                                                                                                                    | <b>209</b> |
| <b>7.2</b>  | <b><i>Bombeo de líquidos viscosos</i></b>                                                                                                   | <b>209</b> |
| <b>7.3</b>  | <b><i>Limitaciones para el uso de gráficos de factores de corrección</i></b>                                                                | <b>212</b> |
| 7.3.1       | Símbolos y definiciones usados en la corrección                                                                                             | 212        |
| 7.3.2       | Fórmulas de corrección                                                                                                                      | 212        |
| <b>7.4</b>  | <b><i>Pérdida de carga para fluidos viscosos en tuberías rectas</i></b>                                                                     | <b>216</b> |
| <b>7.5</b>  | <b><i>Gráfico de corrección de funcionamiento para líquidos viscosos</i></b>                                                                | <b>217</b> |
| <b>7.6</b>  | <b><i>Determinación del funcionamiento de bombas centrífugas para líquidos viscosos</i></b>                                                 | <b>218</b> |
| <b>7.7</b>  | <b><i>Coeficiente <math>K_{vis}</math> para el cálculo del efecto de la viscosidad en tuberías rectas</i></b>                               | <b>219</b> |
| <b>7.8</b>  | <b><i>Tabla 1 - Presión de vapor y densidad del agua</i></b>                                                                                | <b>220</b> |
| <b>7.9</b>  | <b><i>Tabla 2 - Presión de vapor de varios líquidos</i></b>                                                                                 | <b>221</b> |
| <b>7.10</b> | <b><i>Tabla 3 - Densidad de varios líquidos a la presión atmosférica</i></b>                                                                | <b>222</b> |
| <b>7.11</b> | <b><i>Gráfico para el cálculo de las pérdidas de carga en función del diámetro interior de la tubería, velocidad del flujo y caudal</i></b> | <b>223</b> |



## 7 LÍQUIDOS VISCOSOS

### 7.1 VISCOSIDAD

Es la propiedad física de un fluido que da cuenta de su resistencia a los esfuerzos de corte interno, es decir, a cualquier fuerza que tienda a producir un escurrimiento entre sus capas.

### 7.2 BOMBEO DE LÍQUIDOS VISCOSOS

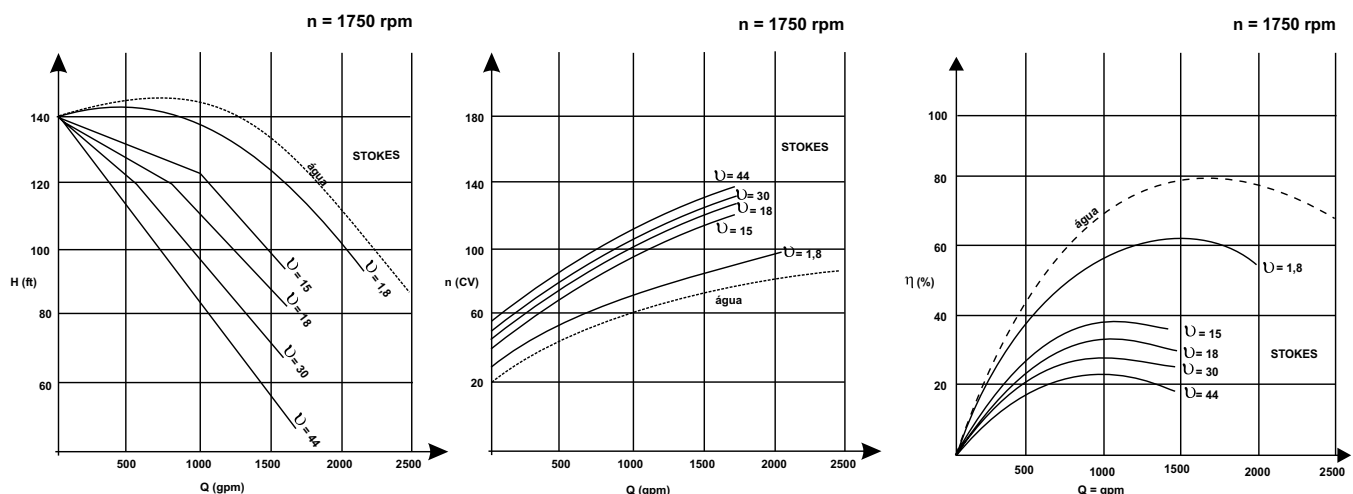
Para facilitar la selección de una bomba centrífuga, se ha estandarizado que todas las curvas de las bombas centrífugas deben ser levantadas utilizando agua limpia como fluido, a una temperatura de 20 °C y viscosidad igual a 1 centiPoise.

Entretanto, estas características sufren modificaciones cuando la bomba opera con fluidos muy viscosos. En general se produce una reducción de la eficiencia con un consecuente aumento de la potencia absorbida, una baja en el caudal y la altura manométrica.

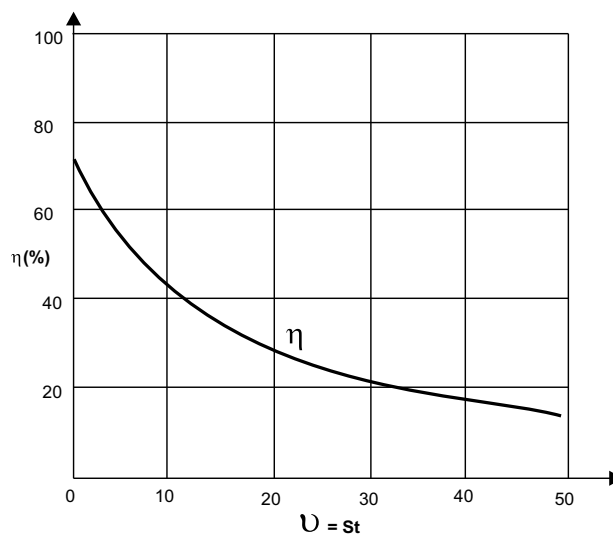
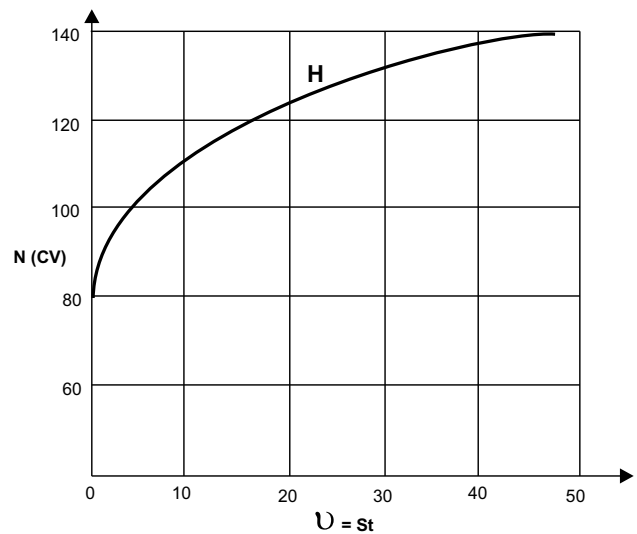
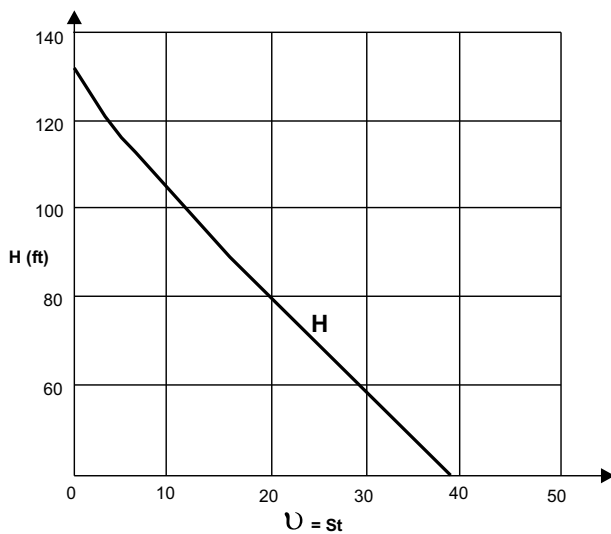
La caracterización de la naturaleza del producto a bombear es fundamental para el dimensionamiento del sistema.

La viscosidad aumenta con la presión para aceites, mientras que para agua disminuye. En el caso de aceites y de muchos líquidos, la viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura.

Las siguientes figuras representan curvas para una bomba centrífuga girando a 1750 rpm con agua y aceites de varias viscosidades expresadas en Stokes.



Los gráficos siguientes muestran la variación de estos valores en función de la viscosidad para un caudal constante de 340 m<sup>3</sup>/h.



Teóricamente, en bombas geométricamente semejantes estos valores presentarán variaciones proporcionales entre sí.

Según lo anterior, las curvas características deberían ser teóricamente semejantes, sin embargo en la práctica en una serie de bombas geométricamente semejantes, los tamaños menores tienen un rendimiento más bajo, debido a que el espesor de los álabes, los juegos, la rugosidad relativa y las imperfecciones son relativamente mayores que para las bombas de tamaños mayores, y por eso, las curvas no son exactamente semejantes.

El efecto de la viscosidad es acentuado en las bombas pequeñas, de modo que las bombas centrífugas deberán ser de dimensiones mayores tanto mayor es la viscosidad del líquido a bombear.

Las figuras siguientes representan el comportamiento de tres bombas semejantes. Los valores referentes a bombas con aceite de varias viscosidades son expresadas en forma de porcentaje, comparando su funcionamiento con el equivalente para el caso del agua.

En la figura “A” ,se verifica que una bomba con rodete de 300 mm de diámetro bombeará aceite de 1 Stoke a una altura manométrica igual a 90 % de la cual se conseguiría si el líquido fuese agua. Si el rodete tuviese 200 mm, bombearía apenas una altura igual al 80 %.

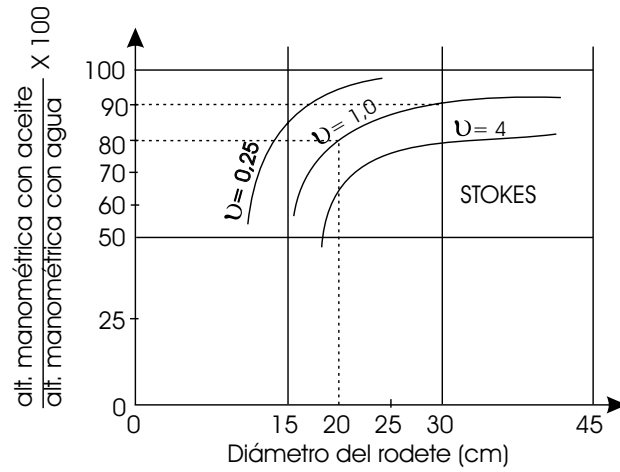


Figura A

La figura “B” muestra lo dicho anteriormente respecto de la necesidad de utilizar bombas de tamaño grande para viscosidades mayores, con el fin de no disminuir excesivamente el rendimiento.

Ejemplo: con un diámetro de 200 mm y una viscosidad = 1 St, el rendimiento de la bomba es del orden del 55 % del rendimiento de la misma trabajando con agua. Con un diámetro de 300 mm, el rendimiento mejoraría y pasaría a 78% del valor que obtendría usando agua.

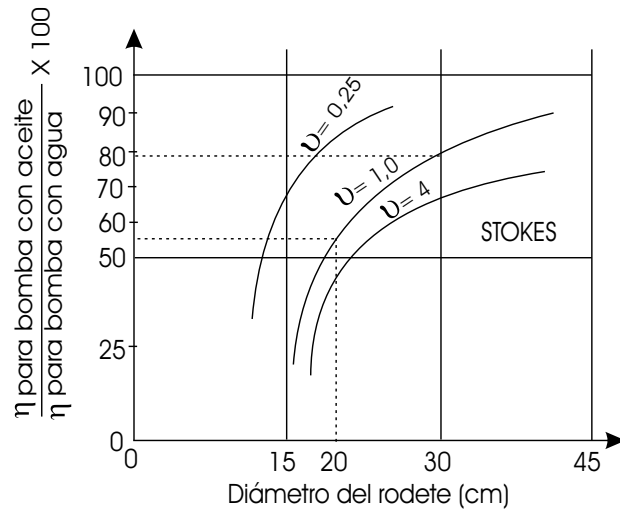


Figura B

### 7.3 LIMITACIONES PARA EL USO DE GRÁFICOS DE FACTORES DE CORRECCIÓN

- Usar solamente para las escalas indicadas. No extrapolar valores.
- Usar solamente para bombas de diseño hidráulico convencional con rodetes abiertos o cerrados. No usar para bombas con rodetes de flujo axial o mixto.
- Usar solamente donde el NPSH es el adecuado para evitar la cavitación.
- Usar solamente para líquidos Newtonianos.

#### 7.3.1 SÍMBOLOS Y DEFINICIONES UTILIZADOS EN LA CORRECCIÓN

- $Q_{vis}$  = caudal viscoso en  $m^3/h$  - caudal cuando se está trabajando con líquidos viscosos;
- $H_{vis}$  = Altura viscosa - altura cuando se está trabajando con líquidos viscosos;
- $\eta_{vis}$  = rendimiento viscoso en % - rendimiento cuando se trabaja con líquidos viscosos;
- $P_{cvis}$  = potencia viscosa - CV - potencia requerida por la bomba cuando está trabajando con líquidos viscosos;
- $Q_w$  = caudal de agua en  $m^3/h$  - caudal cuando se está trabajando con agua;
- $H_w$  = altura de agua en m - altura cuando se está trabajando con agua
- $\gamma$  = peso específico ( $kgf/dm^3$ );
- $f_Q$  = factor de corrección para el caudal;
- $f_H$  = factor de corrección para la altura manométrica;
- $f_{\eta}$  = factor de corrección para el rendimiento;
- $Q_{óp}$  = caudal en el punto de mejor rendimiento.

#### 7.3.2 FÓRMULAS DE CORRECCIÓN

$$Q_{vis} = f_Q \cdot Q_w$$

$$H_{vis} = f_H \cdot H_w$$

$$\eta_{vis} = f_{\eta} \cdot \eta_w$$

$$P_{vis} = \frac{Q_{vis} \cdot H_{vis} \cdot \gamma_{vis}}{2,7 \cdot \eta_{vis}}$$

Estas fórmulas pueden ser usadas como una aproximación para el caso inverso, es decir, conocidas las condiciones viscosas, cuáles serían las condiciones en agua.

$f_Q$ ,  $f_H$  e  $f_{\eta}$ , son determinados a través de la figura 2, basados en el funcionamiento para agua. La figura 1 solamente es usada con caudales en el punto de mejor eficiencia bajo de  $22,7 m^3/h$ . (funcionamiento con agua)

Consideremos dos casos que prácticos:

### Caso 1:

Selección de una bomba para condiciones dadas de  $H$  y  $Q$  de un líquido de viscosidad conocida.

Se entra en el gráfico, por el eje de las abscisas en el valor 0 (cero), con el caudal deseado de líquido viscoso ( $Q_{vis}$ ), se sigue por la línea vertical hasta obtener la altura manométrica  $H_{vis}$  (altura en metros de columna de líquido viscoso), por la línea inclinada. En el caso de bombas multietapas, se debe usar la altura de una etapa. Se prosigue por la horizontal (hacia la izquierda o hacia la derecha, según el caso) hasta la recta inclinada correspondiente a la viscosidad del líquido expresada en grados Engler. Se sube hasta las curvas de corrección donde se haya  $f_Q$ . Se divide en seguida el caudal viscoso ( $Q_{vis}$ ) por el factor ( $f_Q$ ) para obtener el caudal equivalente aproximado del agua ( $Q$ ).

Se divide la altura viscosa ( $H_{vis}$ ) por el factor de corrección ( $f_H$ ), encontrado en la curva marcada ( $1,0 \times Q$ ), y se tiene un valor aproximado de  $H$ , para agua con la bomba trabajando con un caudal normal. Si la bomba trabajara con un caudal mayor o menor del normal, se deben usar las curvas  $1,2 Q$ ,  $0,8 Q$  o  $0,6 Q$ .

Obtenidos así  $Q$  y  $H$  para agua, se selecciona la bomba de modo usual, donde en las curvas de las mismas encontraremos los valores de rendimiento ( $\eta$ ). Con la ayuda de las curvas  $f_{\eta}$ , se obtiene el factor de corrección, que multiplicado por el rendimiento ( $\eta$ ) de la bomba para agua, se obtiene el rendimiento viscoso  $\eta_{vis}$  de la bomba con un líquido viscoso.

Ejemplo:

Seleccionar una bomba capaz de entregar un caudal de  $170 \text{ m}^3/\text{h}$  con  $H = 30 \text{ m}$ , siendo la viscosidad del líquido igual a  $30^\circ \text{ E}$  (grados Engler) el peso específico ( $\gamma$ ) es igual a 0,90 a la temperatura de funcionamiento.

Así entrando en el gráfico 2 con  $Q_{vis} = 170 \text{ m}^3/\text{h}$ , se va hasta  $H_{vis} = 30 \text{ m}$ .

Después se sigue hasta la recta de  $^\circ \text{E} = 30$  y entonces en la vertical hasta las curvas que indican los factores de corrección.

$$f_Q = 0,92 \quad f_H 0,91 \text{ (para } 1,0 Q) \quad f_{\eta} = 0,6$$

Se calcula:

$$Q_w = 170 / 0,92 = 184,7 \text{ m}^3/\text{h} \text{ y } H_w = 30 / 0,91 = 32,96 \text{ m}$$

En el manual de curvas de bombas se busca una bomba con un caudal para 184,7 m<sup>3</sup>/h y 32,96 m de altura manométrica, analizando siempre el rendimiento.

Si el rendimiento encontrado en la curva para un caudal de 170 m<sup>3</sup>/h, por ejemplo, fue de un 80 %, entonces el rendimiento de la bomba con el líquido viscoso será:

$$\eta_{vis} = 0,6 \times 80 = 48 \text{ \%}.$$

La potencia consumida por el motor de la bomba cuando trabaje con el líquido viscoso , será:

$$P = \frac{170 \cdot 30 \cdot 0,9}{2,7 \cdot 48} = 35,41 \text{ CV}$$

## Caso 2:

Determinación de las condiciones de funcionamiento de la bomba con un líquido de viscosidad conocida, cuando se conocen las condiciones de funcionamiento con agua.

De la curva de rendimiento de la bomba con agua, se determina el caudal (Q) correspondiente al rendimiento máximo. Teniendo el valor de (1,0 Q).

En seguida, se calculan los caudales para los tres valores de Q, los que pueden ser:

(0,6 Q) , (0,8 Q) e (1,2 Q). Ver la figura 2.

Se entra en el gráfico, en el eje de las abscisa 0 (cero), con el caudal nominal (1,0 Q ); se sube hasta H correspondiente a una etapa para este caudal. En la horizontal, se sigue hasta la recta inclinada, para la viscosidad en cuestión. En seguida, se sube hasta las curvas de corrección, para obtener los valores de  $f \eta$  ,  $fQ$ , e  $fH$  para los cuatro valores de caudal.

Multiplicando los valores de H y  $\eta$  por los respectivos factores de corrección, obtenemos los valores corregidos para el caso de líquido viscoso.

Podemos trazar los puntos, utilizando la propia curva de la bomba, curvas ( $H_{vis}$  v/s  $Q_{vis}$ ) y ( $\eta_{vis}$  v/s  $Q_{vis}$ ) y también potencia ( $P_{vis}$ ) para el caso del producto viscoso, potencia que, como vimos, es calculada por la fórmula:

$$P_{vis} = \frac{Q_{vis} \cdot H_{vis} \cdot \gamma_{vis}}{2,7 \cdot \eta_{vis}} = \text{CV}$$

## Ejemplo:

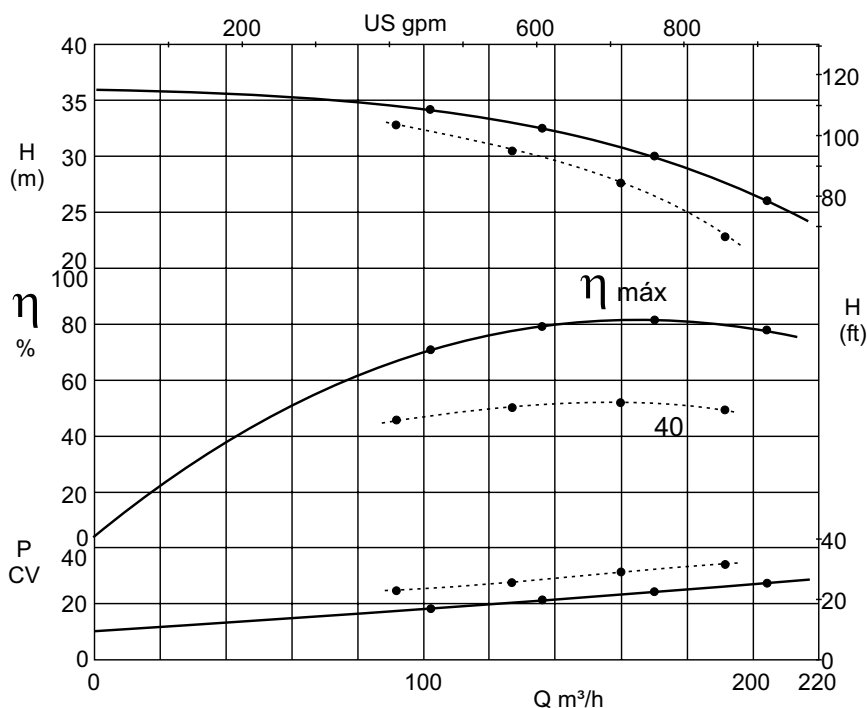
Dadas las curvas características de una bomba, obtenidas en ensayo con agua, trazar la curva para el caso de aceite de densidad igual a 0,90 y una viscosidad de 1000 SSU a la temperatura de bombeo.

En la curva característica de la bomba, se marcan los valores de H y Q que corresponden al rendimiento máximo. Dado el ejemplo  $Q = 170 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $H = 30 \text{ m}$ , se calculan los valores de  $Q_{vis}$ ,  $H_{vis}$  y  $\eta_{vis}$  se multiplicandose los valores Q, H y  $\eta$  por 0,6; 0,8 y 1,2. Después se calculan los valores de  $P_{vis}$ .

En seguida se trazan, con los puntos obtenidos, las curvas características para la bomba con aceite de viscosidad 30° E, y  $\gamma = 0,9$ .

Ejemplificando tenemos:

|                                               | 0,6 x Q<br>(agua) | 0,8 x Q<br>(agua) | 1,0 x Q<br>(agua) | 1,2 x Q<br>(agua) |
|-----------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Flujo (agua) $Q_w$                            | 102               | 136               | 170               | 204               |
| Altura $H_w$                                  | 34                | 32,5              | 30                | 26                |
| Rendiimiento                                  | 72,5              | 80                | 82                | 79                |
| Viscosidad del líquido                        | 30 °E             | 30 °E             | 30 °E             | 30 °E             |
| $f_Q$ (del gráfico)                           | 0,94              | 0,94              | 0,94              | 0,94              |
| $f_H$ (del gráfico)                           | 0,96              | 0,94              | 0,92              | 0,89              |
| $f_\eta$ (del gráfico)                        | 0,635             | 0,635             | 0,635             | 0,635             |
| Caudal para aceite ( $Q \times f_Q$ )         | 96                | 128               | 160               | 192               |
| Altura para aceite ( $H \times f_H$ )         | 32,6              | 30,5              | 27,6              | 23,1              |
| Rendimiento p/aceite ( $\eta \times f_\eta$ ) | 46                | 50,8              | 52                | 50                |
| Peso específico del líquido                   | 0,90              | 0,90              | 0,90              | 0,90              |
| Potencia para el líquido viscoso              | 22,6              | 25,6              | 28,3              | 29,5              |



## 7.4 PÉRDIDA DE CARGA PARA FLUIDOS VISCOSOS EN TUBERÍAS RECTAS

La pérdida de carga para flujos de líquidos viscosos en tuberías puede ser calculada por la misma ecuación básica usada para agua, agregándole un coeficiente cuyo valor depende de la viscosidad cinemática y del número de Reynolds, pasando la ecuación a tener la siguiente característica:

$$H_p = K_{vis} (L/d) \cdot (v^2/2g)$$

Donde:

$K_{vis}$  = coeficiente por efecto de la viscosidad cuando los símbolos arriba son seguidos de la letra W, se refieren a agua; para líquidos diferentes se usa F;

L = largo de la tubería (m);

d = diámetro de la tubería (m);

v = velocidad del flujo (m/s);

g = aceleración de gravedad = 9,81 m/s<sup>2</sup>.

La pérdida de carga ( $H_{pvis}$ ), de un líquido viscoso en una determinada tubería de descarga, en este caso es igual la pérdida de carga con agua ( $H_{pw}$ ), aumentada en la razón del coeficiente:  $K_{visF} / K_{visW}$ .

$$H_{pvis} = (K_{visF} / K_{visW}) \cdot H_{pw}$$

Ejemplo: Caudal de 100 m<sup>3</sup>/h para un fluido de viscosidad 200 cSt en una tubería de fierro fundido de diámetro 10".

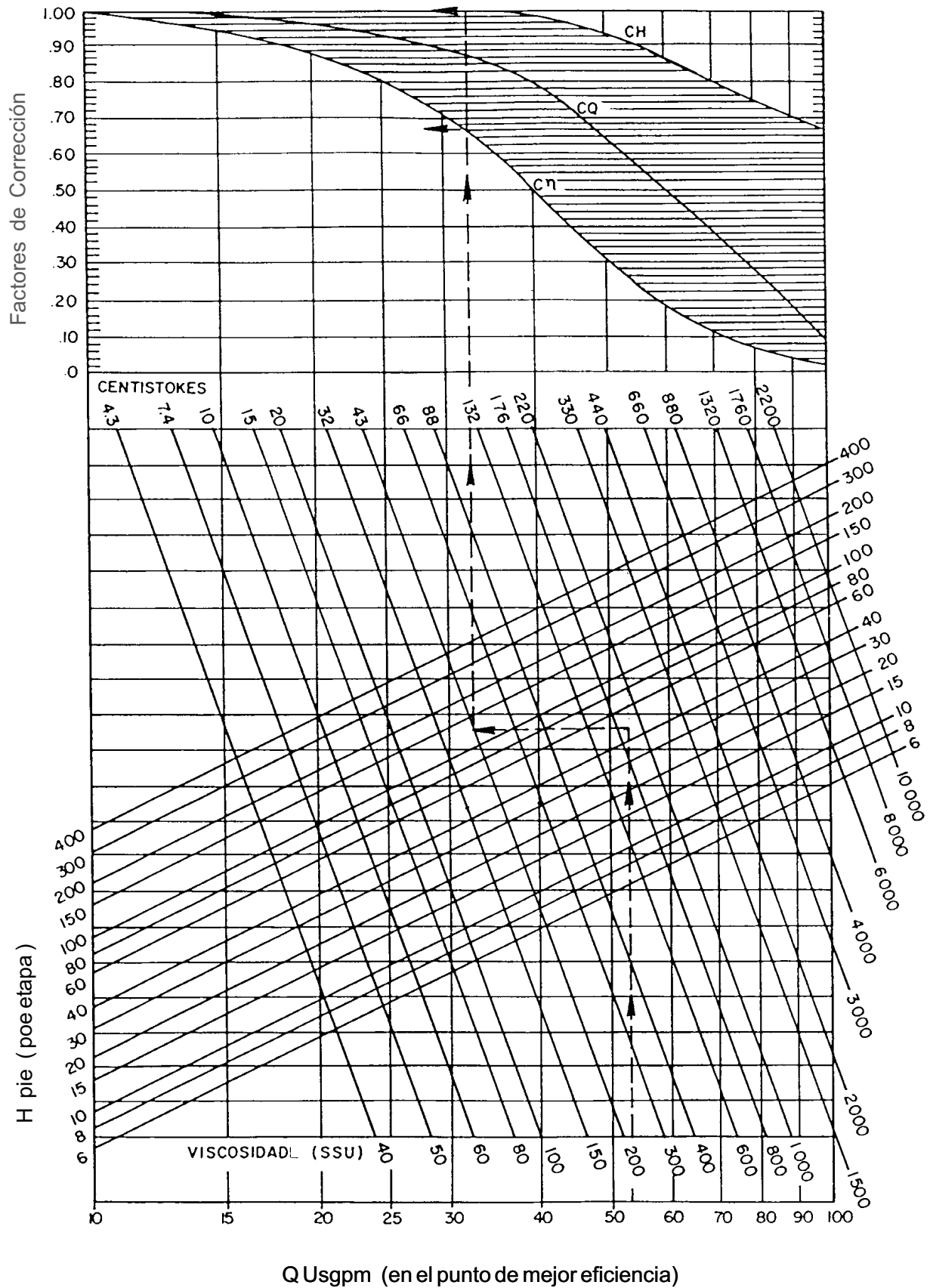
Por la tabla de pérdidas de carga, determinamos :  $H_{pw} = 0,14$  m por 100 m de tubería.

En la figura 3 tenemos  $K_{visF} = 0,08$  y  $K_{visw} = 0,021$ .

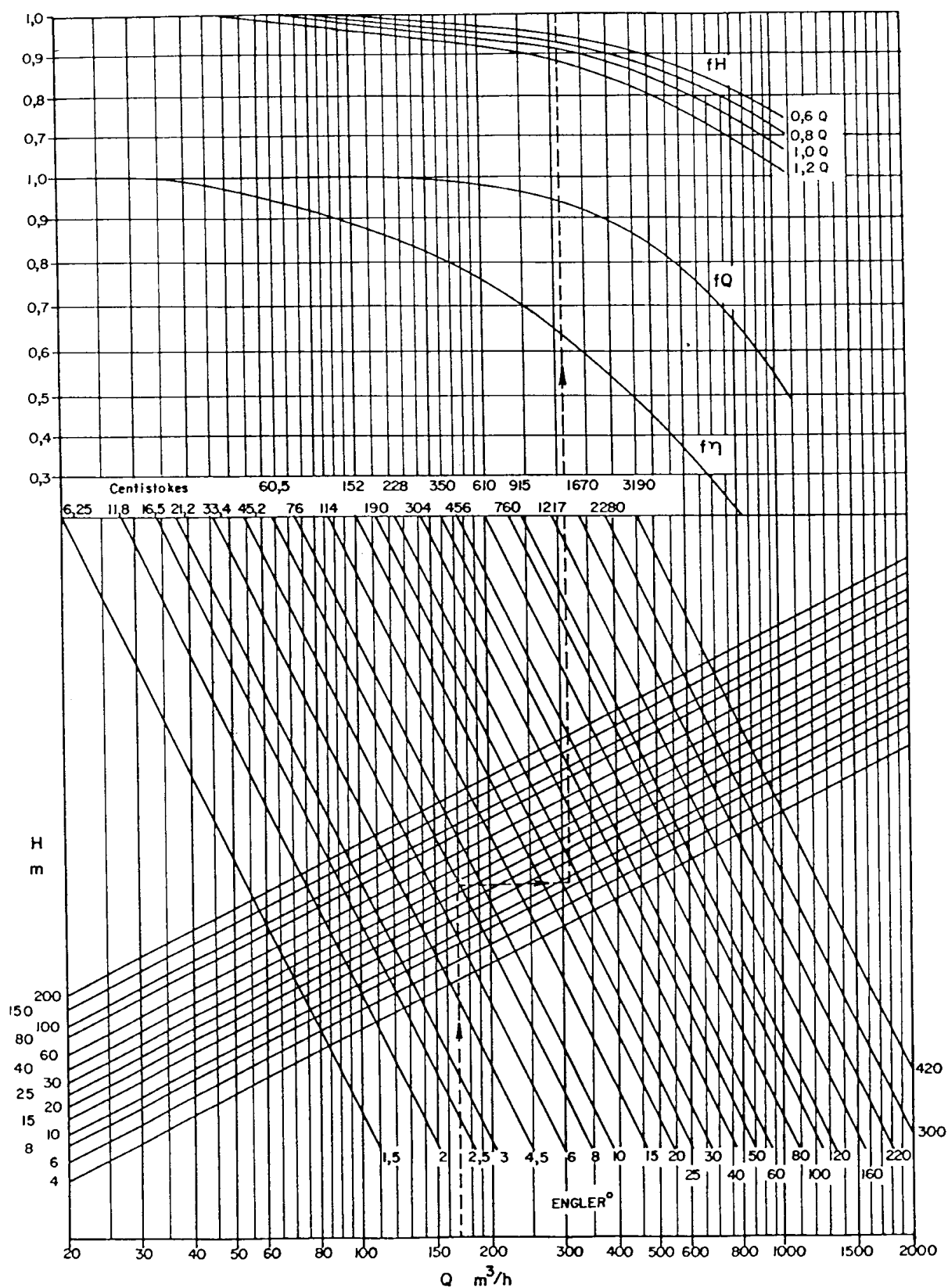
Por lo tanto:  $H_{pvis} = 0,08 / 0,021 \times 0,14 = 0,53$  m por 100 metros de tubería.

La figura 3 sirve también para mostrar si el flujo es laminar o turbulento. En la región de transición entre los dos tipos de flujo como sugerencia es recomendado usar el coeficiente de resistencia 0,04.

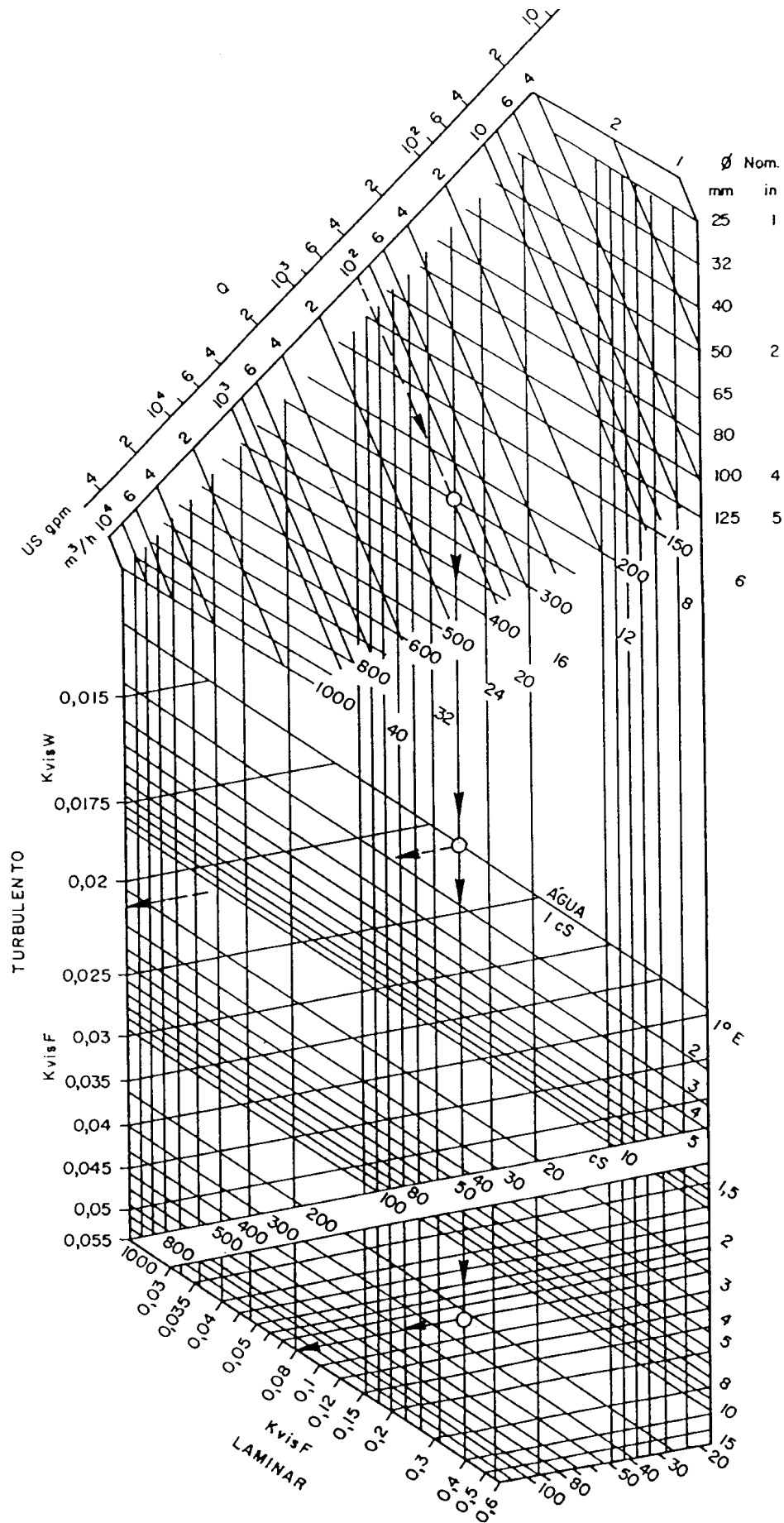
## 7.5 GRÁFICO DE CORRECCIÓN DE FUNCIONAMIENTO PARA LÍQUIDOS VISCOSOS



## 7.6 DETERMINACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS PARA LÍQUIDOS VISCOSOS



## 7.7 COEFICIENTE KVIS PARA EL CALCULO DEL EFECTO DE LA VISCOSIDAD EN TUBERÍAS RECTAS



## 7.8 TABLA 1 - PRESIÓN DE VAPOR Y DENSIDAD DEL AGUA

| t<br>°C | T<br>K | p <sub>D</sub><br>bar | ρ<br>kg/dm <sup>3</sup> | t<br>°C | T<br>K | p <sub>D</sub><br>bar | ρ<br>kg/dm <sup>3</sup> | t<br>°C | T<br>K | p <sub>D</sub><br>bar | ρ<br>kg/dm <sup>3</sup> |
|---------|--------|-----------------------|-------------------------|---------|--------|-----------------------|-------------------------|---------|--------|-----------------------|-------------------------|
| 0       | 273.15 | 0.00611               | 0.9998                  | 61      | 334.15 | 0.2086                | 0.9826                  | 138     | 411.15 | 3.414                 | 0.9276                  |
| 1       | 274.15 | 0.00657               | 0.9999                  | 62      | 335.15 | 0.2184                | 0.9821                  | 140     | 413.15 | 3.614                 | 0.9258                  |
| 2       | 275.15 | 0.00706               | 0.9999                  | 63      | 336.15 | 0.2286                | 0.9816                  | 145     | 418.15 | 4.155                 | 0.9214                  |
| 3       | 276.15 | 0.00758               | 0.9999                  | 64      | 337.15 | 0.2391                | 0.9811                  | 150     | 423.15 | 4.760                 | 0.9168                  |
| 4       | 277.15 | 0.00813               | 1.0000                  | 65      | 338.15 | 0.2501                | 0.9805                  | 155     | 428.15 | 5.433                 | 0.9121                  |
| 5       | 278.15 | 0.00872               | 1.0000                  | 66      | 339.15 | 0.2615                | 0.9799                  | 160     | 433.15 | 6.181                 | 0.9073                  |
| 6       | 279.15 | 0.00935               | 1.0000                  | 67      | 340.15 | 0.2733                | 0.9793                  | 165     | 438.15 | 7.008                 | 0.9024                  |
| 7       | 280.15 | 0.01001               | 0.9999                  | 68      | 341.15 | 0.2856                | 0.9788                  | 170     | 433.15 | 7.920                 | 0.8973                  |
| 8       | 281.15 | 0.01072               | 0.9999                  | 69      | 342.15 | 0.2984                | 0.9782                  | 175     | 448.15 | 8.924                 | 0.8921                  |
| 9       | 282.15 | 0.01147               | 0.9998                  | 70      | 343.15 | 0.3116                | 0.9777                  | 180     | 453.15 | 10.027                | 0.8869                  |
| 10      | 283.15 | 0.01227               | 0.9997                  | 71      | 344.15 | 0.3253                | 0.9770                  | 185     | 458.15 | 11.233                | 0.8815                  |
| 11      | 284.15 | 0.01312               | 0.9997                  | 72      | 345.15 | 0.3396                | 0.9765                  | 190     | 463.15 | 12.551                | 0.8760                  |
| 12      | 285.15 | 0.01401               | 0.9996                  | 73      | 346.15 | 0.3543                | 0.9760                  | 195     | 468.15 | 13.987                | 0.8704                  |
| 13      | 286.15 | 0.01497               | 0.9994                  | 74      | 347.15 | 0.3696                | 0.9753                  | 200     | 473.15 | 15.55                 | 0.8647                  |
| 14      | 287.15 | 0.01597               | 0.9993                  | 75      | 348.15 | 0.3855                | 0.9748                  | 205     | 478.15 | 17.243                | 0.8588                  |
| 15      | 288.15 | 0.01704               | 0.9992                  | 76      | 349.15 | 0.4019                | 0.9741                  | 210     | 483.15 | 19.077                | 0.8528                  |
| 16      | 289.15 | 0.01817               | 0.9990                  | 77      | 350.15 | 0.4189                | 0.9735                  | 215     | 488.15 | 21.060                | 0.8467                  |
| 17      | 290.15 | 0.01936               | 0.9988                  | 78      | 351.15 | 0.4365                | 0.9729                  | 220     | 493.15 | 23.198                | 0.8403                  |
| 18      | 291.15 | 0.02062               | 0.9987                  | 79      | 352.15 | 0.4547                | 0.9723                  | 225     | 498.15 | 25.501                | 0.8339                  |
| 19      | 292.15 | 0.02196               | 0.9985                  | 80      | 353.15 | 0.4736                | 0.9716                  | 230     | 503.15 | 27.976                | 0.8273                  |
| 20      | 293.15 | 0.02337               | 0.9983                  | 81      | 354.15 | 0.4931                | 0.9710                  | 235     | 508.15 | 30.632                | 0.8205                  |
| 21      | 294.15 | 0.02485               | 0.9981                  | 82      | 355.15 | 0.5133                | 0.9704                  | 240     | 513.15 | 33.478                | 0.8136                  |
| 22      | 295.15 | 0.02642               | 0.9978                  | 83      | 356.15 | 0.5342                | 0.9697                  | 245     | 518.15 | 36.523                | 0.8065                  |
| 23      | 296.15 | 0.02808               | 0.9976                  | 84      | 357.15 | 0.5557                | 0.9691                  | 250     | 523.15 | 39.776                | 0.7992                  |
| 24      | 297.15 | 0.02982               | 0.9974                  | 85      | 358.15 | 0.5780                | 0.9684                  | 255     | 528.15 | 43.246                | 0.7916                  |
| 25      | 298.15 | 0.03166               | 0.9971                  | 86      | 359.15 | 0.6011                | 0.9678                  | 260     | 533.15 | 46.943                | 0.7839                  |
| 26      | 299.15 | 0.03360               | 0.9968                  | 87      | 360.15 | 0.6249                | 0.9671                  | 265     | 538.15 | 50.877                | 0.7759                  |
| 27      | 300.15 | 0.03564               | 0.9966                  | 88      | 361.15 | 0.6495                | 0.9665                  | 270     | 543.15 | 55.058                | 0.7678                  |
| 28      | 301.15 | 0.03778               | 0.9963                  | 89      | 362.15 | 0.6749                | 0.9658                  | 275     | 548.15 | 59.496                | 0.7593                  |
| 29      | 302.15 | 0.04004               | 0.9960                  | 90      | 363.15 | 0.7011                | 0.9652                  | 280     | 553.15 | 64.202                | 0.7505                  |
| 30      | 303.15 | 0.04241               | 0.9957                  | 91      | 364.15 | 0.7281                | 0.9644                  | 285     | 558.15 | 69.186                | 0.7415                  |
| 31      | 304.15 | 0.04491               | 0.9954                  | 92      | 365.15 | 0.7561                | 0.9638                  | 290     | 563.15 | 74.461                | 0.7321                  |
| 32      | 305.15 | 0.04753               | 0.9951                  | 93      | 366.15 | 0.7849                | 0.9630                  | 295     | 568.15 | 80.037                | 0.7223                  |
| 33      | 306.15 | 0.05029               | 0.9947                  | 94      | 367.15 | 0.8146                | 0.9624                  | 300     | 573.15 | 85.927                | 0.7122                  |
| 34      | 307.15 | 0.05318               | 0.9944                  | 95      | 368.15 | 0.8453                | 0.9616                  | 305     | 578.15 | 92.144                | 0.7017                  |
| 35      | 308.15 | 0.05622               | 0.9940                  | 96      | 369.15 | 0.8769                | 0.9610                  | 310     | 583.15 | 98.700                | 0.6906                  |
| 36      | 309.15 | 0.05940               | 0.9937                  | 97      | 370.15 | 0.9094                | 0.9602                  | 315     | 588.15 | 105.61                | 0.6791                  |
| 37      | 310.15 | 0.06274               | 0.9933                  | 98      | 371.15 | 0.9430                | 0.9596                  | 320     | 593.15 | 112.89                | 0.6669                  |
| 38      | 311.15 | 0.06624               | 0.9930                  | 99      | 372.15 | 0.9776                | 0.9586                  | 325     | 598.15 | 120.56                | 0.6541                  |
| 39      | 312.15 | 0.06991               | 0.9927                  | 100     | 373.15 | 1.0133                | 0.9581                  | 330     | 603.15 | 128.63                | 0.6404                  |
| 40      | 313.15 | 0.07375               | 0.9923                  | 102     | 375.15 | 1.0878                | 0.9567                  | 340     | 613.15 | 146.05                | 0.6102                  |
| 41      | 314.15 | 0.07777               | 0.9919                  | 104     | 377.15 | 1.1668                | 0.9552                  | 350     | 623.15 | 165.35                | 0.5743                  |
| 42      | 315.15 | 0.08198               | 0.9915                  | 106     | 379.15 | 1.2504                | 0.9537                  | 360     | 633.15 | 186.75                | 0.5275                  |
| 43      | 316.15 | 0.08639               | 0.9911                  | 108     | 381.15 | 1.3390                | 0.9522                  | 370     | 643.15 | 210.54                | 0.4518                  |
| 44      | 317.15 | 0.09100               | 0.9907                  | 110     | 383.15 | 1.4327                | 0.9507                  | 374.15  | 647.30 | 221.2                 | 0.3154                  |
| 45      | 318.15 | 0.09582               | 0.9902                  | 112     | 385.15 | 1.5316                | 0.9491                  |         |        |                       |                         |
| 46      | 319.15 | 0.10086               | 0.9898                  | 114     | 387.15 | 1.6362                | 0.9476                  |         |        |                       |                         |
| 47      | 320.15 | 0.10612               | 0.9894                  | 116     | 389.15 | 1.7465                | 0.9460                  |         |        |                       |                         |
| 48      | 321.15 | 0.11162               | 0.9889                  | 118     | 391.15 | 1.8628                | 0.9445                  |         |        |                       |                         |
| 49      | 322.15 | 0.11736               | 0.9884                  | 120     | 393.15 | 1.9854                | 0.9429                  |         |        |                       |                         |
| 50      | 323.15 | 0.12335               | 0.9880                  |         |        |                       |                         |         |        |                       |                         |
| 51      | 324.15 | 0.12961               | 0.9876                  |         |        |                       |                         |         |        |                       |                         |
| 52      | 325.15 | 0.13613               | 0.9871                  |         |        |                       |                         |         |        |                       |                         |
| 53      | 326.15 | 0.14293               | 0.9866                  |         |        |                       |                         |         |        |                       |                         |
| 54      | 327.15 | 0.15002               | 0.9862                  |         |        |                       |                         |         |        |                       |                         |
| 55      | 328.15 | 0.15741               | 0.9857                  |         |        |                       |                         |         |        |                       |                         |
| 56      | 329.15 | 0.16511               | 0.9852                  |         |        |                       |                         |         |        |                       |                         |
| 57      | 330.15 | 0.17313               | 0.9846                  |         |        |                       |                         |         |        |                       |                         |
| 58      | 331.15 | 0.18147               | 0.9842                  |         |        |                       |                         |         |        |                       |                         |
| 59      | 332.15 | 0.19016               | 0.9837                  |         |        |                       |                         |         |        |                       |                         |
| 60      | 333.15 | 0.19920               | 0.9832                  |         |        |                       |                         |         |        |                       |                         |

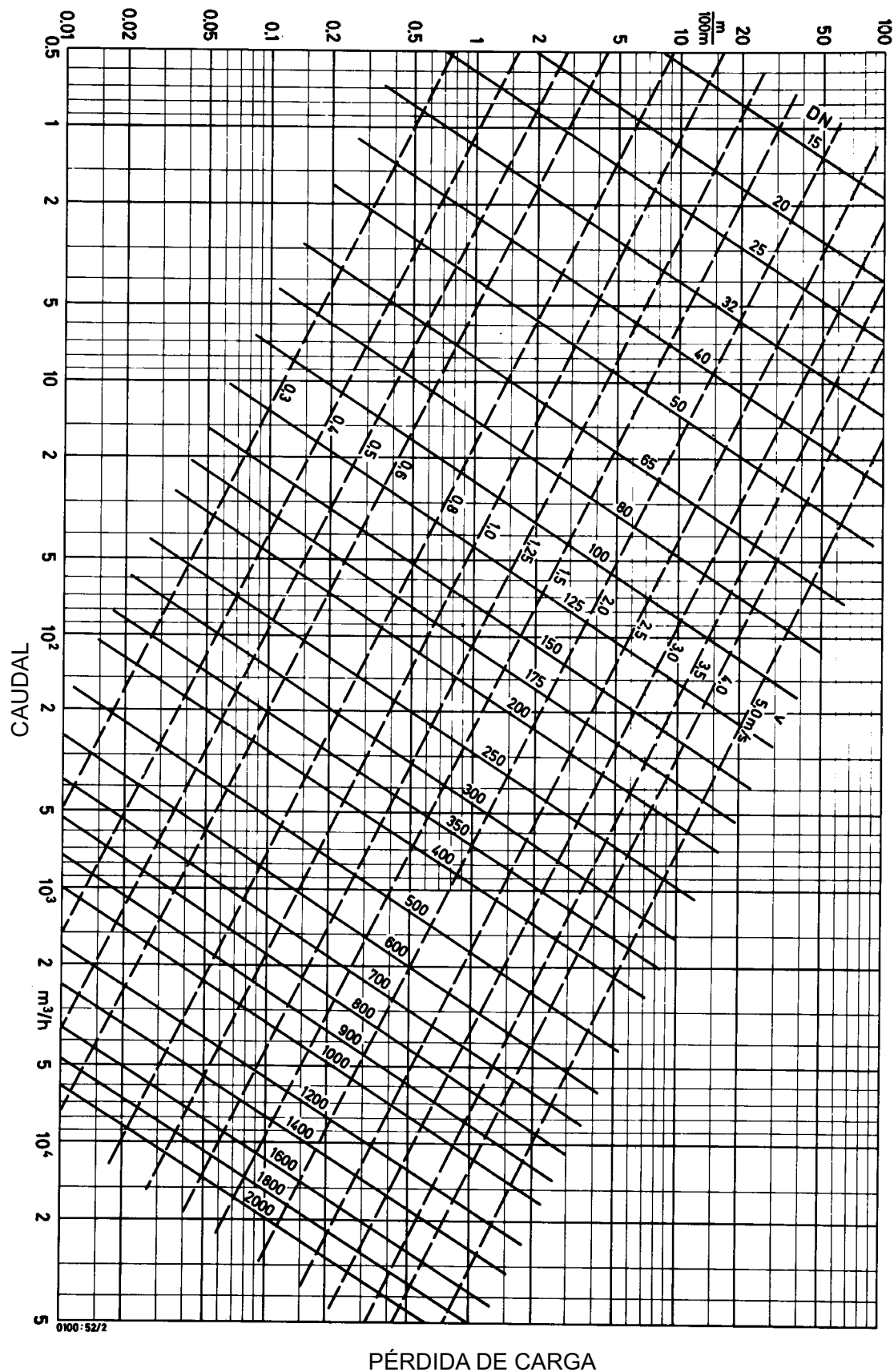
## 7.9 TABLA 2 - PRESIÓN DE VAPOR DE VARIOS LÍQUIDOS

| Temperature |     | Ethane C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | Acetone (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO | Ammonia NH <sub>3</sub> | Ethyl alcohol C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | n-Butane C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | i-Butane C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | Benzol C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> | Aniline C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>2</sub> | Ether C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> | Formic acid CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | Acetic acid C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> | n-Propane C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | Methyl alcohol CH <sub>4</sub> O | Sulphurous acid H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> | Carbon disulphide CS <sub>2</sub> | Toluol C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> | Carbon tetrachloride CCl <sub>4</sub> |
|-------------|-----|---------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| t           | T   | Vapour pressure p <sub>D</sub> in bar |                                            |                         |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          |                                         |                                  |                                                |                                   |                                      |                                       |
| °C          | K   |                                       |                                            |                         |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          |                                         |                                  |                                                |                                   |                                      |                                       |
| -50         | 223 | 5.517                                 | 0.00319                                    | 0.409                   |                                                | 0.103                                   |                                         |                                      |                                                       | 0.0127                                                             |                                            |                                                          | 0.707                                   |                                  | 0.1157                                         |                                   |                                      |                                       |
| -45         | 228 | 6.574                                 |                                            | 0.545                   |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 0.890                                   |                                  | 0.1598                                         |                                   |                                      |                                       |
| -40         | 233 | 7.776                                 |                                            | 0.718                   |                                                | 0.179                                   |                                         |                                      |                                                       | 0.0255                                                             |                                            |                                                          | 1.115                                   |                                  | 0.2157                                         |                                   |                                      |                                       |
| -35         | 238 | 9.129                                 |                                            | 0.932                   |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 1.379                                   |                                  | 0.2883                                         |                                   |                                      |                                       |
| -30         | 243 | 10.65                                 | 0.0149                                     | 1.195                   |                                                | 0.294                                   | 0.483                                   |                                      |                                                       | 0.050                                                              |                                            |                                                          | 1.672                                   |                                  | 0.3805                                         | 0.0335                            |                                      |                                       |
| -25         | 248 | 12.34                                 |                                            | 1.516                   |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 2.017                                   |                                  | 0.4942                                         |                                   |                                      |                                       |
| -20         | 253 | 14.23                                 | 0.0293                                     | 1.902                   |                                                | 0.469                                   | 0.748                                   |                                      |                                                       | 0.0883                                                             |                                            |                                                          | 2.423                                   |                                  | 0.6355                                         | 0.0609                            |                                      | 0.0129                                |
| -15         | 258 | 16.31                                 |                                            | 2.363                   |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 2.889                                   |                                  | 0.8071                                         |                                   |                                      | 0.0180                                |
| -10         | 263 | 18.59                                 | 0.0516                                     | 2.909                   |                                                | 0.691                                   | 1.103                                   |                                      |                                                       | 0.150                                                              |                                            |                                                          | 3.405                                   |                                  | 1.014                                          | 0.1047                            |                                      | 0.0246                                |
| - 5         | 268 | 21.10                                 |                                            | 3.549                   |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 4.015                                   |                                  | 1.2611                                         |                                   |                                      | 0.0330                                |
| ± 0         | 273 | 23.76                                 | 0.0856                                     | 4.294                   | 0.0159                                         | 1.039                                   | 1.613                                   | 0.0354                               |                                                       | 0.247                                                              |                                            | 0.0044                                                   | 4.684                                   | 0.0381                           | 1.554                                          | 0.1697                            |                                      | 0.0439                                |
| 5           | 278 | 26.86                                 | 0.115                                      | 5.157                   |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       | 0.311                                                              |                                            |                                                          | 5.453                                   |                                  | 1.899                                          |                                   |                                      | 0.0576                                |
| 10          | 283 | 30.16                                 | 0.1542                                     | 6.149                   | 0.0306                                         | 1.50                                    | 2.201                                   | 0.0606                               |                                                       | 0.389                                                              | 0.0245                                     | 0.0085                                                   | 6.339                                   | 0.0699                           | 2.302                                          | 0.2648                            | 0.017                                | 0.0746                                |
| 15          | 288 | 33.76                                 | 0.196                                      | 7.283                   |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       | 0.481                                                              |                                            |                                                          | 7.298                                   |                                  | 2.768                                          |                                   |                                      | 0.0956                                |
| 20          | 293 | 37.75                                 | 0.246                                      | 8.572                   | 0.0568                                         | 2.069                                   | 3.119                                   | 0.0996                               |                                                       | 0.589                                                              | 0.0419                                     | 0.0156                                                   | 8.334                                   | 0.1227                           | 3.305                                          | 0.3996                            | 0.0298                               | 0.1213                                |
| 25          | 298 | 42.15                                 | 0.306                                      | 10.03                   |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       | 0.716                                                              |                                            |                                                          | 9.489                                   |                                  | 3.9197                                         |                                   |                                      | 0.1527                                |
| 30          | 303 | 47.07                                 | 0.377                                      | 11.67                   | 0.1008                                         | 2.824                                   | 4.232                                   | 0.1578                               |                                                       | 0.864                                                              | 0.0688                                     | 0.0275                                                   | 10.807                                  | 0.2068                           | 4.619                                          | 0.5848                            | 0.0489                               | 0.1907                                |
| 35          | 308 |                                       | 0.462                                      | 13.498                  |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 12.219                                  |                                  | 5.411                                          |                                   |                                      | 0.2349                                |
| 40          | 313 |                                       | 0.562                                      | 15.54                   | 0.1722                                         | 3.765                                   | 5.609                                   | 0.2412                               |                                                       | 1.228                                                              | 0.1097                                     | 0.0464                                                   | 13.739                                  | 0.336                            | 6.303                                          | 0.8306                            | 0.0784                               | 0.2876                                |
| 45          | 318 |                                       | 0.681                                      | 17.81                   |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 15.455                                  |                                  | 7.303                                          |                                   |                                      | 0.3499                                |
| 50          | 323 |                                       | 0.817                                      | 20.33                   | 0.2836                                         | 4.98                                    | 7.257                                   | 0.3589                               | 0.00319                                               | 1.702                                                              | 0.1696                                     | 0.0754                                                   | 17.269                                  | 0.5283                           | 8.417                                          | 1.1466                            | 0.121                                | 0.4228                                |
| 55          | 328 |                                       |                                            |                         |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          |                                         |                                  |                                                |                                   |                                      | 0.5057                                |
| 60          | 333 |                                       | 1.118                                      |                         | 0.4519                                         | 6.37                                    | 9.267                                   | 0.5188                               | 0.0075                                                | 2.306                                                              | 0.2549                                     | 0.1186                                                   | 20.89                                   | 0.8095                           |                                                | 1.549                             | 0.1863                               | 0.6010                                |
| 65          | 338 |                                       |                                            |                         |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          |                                         |                                  |                                                |                                   |                                      | 0.7078                                |
| 70          | 343 |                                       | 1.55                                       |                         | 0.6979                                         | 8.14                                    | 11.719                                  | 0.7301                               | 0.0139                                                | 3.061                                                              | 0.3733                                     | 0.1812                                                   | 25.79                                   | 1.1954                           |                                                |                                   | 0.2689                               | 0.8296                                |
| 75          | 348 |                                       |                                            |                         |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          |                                         |                                  |                                                |                                   |                                      |                                       |
| 80          | 353 |                                       | 2.08                                       |                         | 1.047                                          | 10.20                                   |                                         | 1.0052                               | 0.0239                                                | 3.991                                                              | 0.533                                      | 0.269                                                    | 31.38                                   | 1.7298                           |                                                | 2.700                             | 0.3818                               | 1.1169                                |
| 85          | 358 |                                       |                                            |                         |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 34.127                                  |                                  |                                                |                                   |                                      |                                       |
| 90          | 363 |                                       | 2.76                                       |                         | 1.531                                          | 12.55                                   |                                         | 1.355                                | 0.0389                                                | 5.121                                                              | 0.7439                                     | 0.3915                                                   | 36.58                                   | 2.445                            |                                                |                                   | 0.5369                               | 1.4828                                |
| 95          | 368 |                                       |                                            |                         |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 39.91                                   |                                  |                                                |                                   |                                      |                                       |
| 100         | 373 |                                       | 3.60                                       |                         | 2.184                                          | 15.40                                   |                                         | 1.795                                | 0.0609                                                | 6.478                                                              | 1.0159                                     | 0.556                                                    |                                         | 3.384                            |                                                | 4.333                             | 0.7354                               | 1.9505                                |
| 105         | 378 |                                       |                                            |                         |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          |                                         |                                  |                                                |                                   |                                      |                                       |
| 110         | 383 |                                       | 4.65                                       |                         | 3.045                                          | 18.34                                   |                                         | 2.331                                | 0.0922                                                | 8.092                                                              |                                            | 0.774                                                    |                                         | 4.595                            |                                                |                                   | 0.9924                               | 2.5164                                |
| 115         | 388 |                                       |                                            |                         |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          |                                         |                                  |                                                |                                   |                                      |                                       |
| 120         | 393 |                                       | 5.89                                       |                         | 4.159                                          | 21.77                                   |                                         | 2.984                                | 0.1327                                                | 9.992                                                              |                                            | 1.059                                                    |                                         | 6.131                            |                                                | 6.999                             | 1.267                                | 3.1911                                |
| 125         | 398 |                                       |                                            |                         |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          |                                         |                                  |                                                |                                   |                                      |                                       |
| 130         | 403 |                                       | 7.38                                       |                         | 5.572                                          | 25.69                                   |                                         | 3.766                                | 0.1926                                                | 12.209                                                             |                                            | 1.423                                                    |                                         | 8.050                            |                                                |                                   | 1.7407                               | 3.956                                 |
| 135         | 408 |                                       |                                            |                         |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          |                                         |                                  |                                                |                                   |                                      |                                       |
| 140         | 413 |                                       | 9.15                                       |                         |                                                |                                         |                                         | 4.694                                | 0.2719                                                | 14.768                                                             |                                            | 1.885                                                    |                                         |                                  |                                                | 10.399                            | 2.2457                               | 4.945                                 |
| 145         | 418 |                                       |                                            |                         |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          |                                         |                                  |                                                |                                   |                                      |                                       |
| 150         | 423 |                                       | 11.28                                      |                         |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       | 17.711                                                             |                                            | 2.499                                                    |                                         |                                  |                                                |                                   | 2.824                                | 6.073                                 |

## 7.10 TABLA 3 - DENSIDAD DE VARIOS LÍQUIDOS A LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA

| Temperature |        | Ethane C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | Acetone (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO | Ammonia NH <sub>3</sub> | Ethyl alcohol C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH | n-Butane C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | i-Butane C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | Benzol C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> | Aniline C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>2</sub> | Ether C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> | Formic acid CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | Acetic acid C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> | n-Propane C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | Methyl alcohol CH <sub>4</sub> O | Sulphurous acid H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> | Carbon disulphide CS <sub>2</sub> | Toluol C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> | Carbon tetrachloride CCl <sub>4</sub> | Heavy water D <sub>2</sub> O |
|-------------|--------|--------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| t<br>°C     | T<br>K | Density ρ in kg/dm <sup>3</sup>      |                                            |                         |                                                |                                         |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          |                                         |                                  |                                                |                                   |                                      |                                       |                              |
| -100        | 173    | 0.5589                               | 0.920                                      |                         |                                                | 0.6900                                  |                                         |                                      |                                                       | 0.842                                                              |                                            |                                                          |                                         |                                  |                                                |                                   | 1.432                                |                                       |                              |
| - 90        | 183    | 0.5479                               |                                            |                         |                                                | 0.6827                                  |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          |                                         |                                  |                                                |                                   |                                      | 0.9697                                |                              |
| - 80        | 193    | 0.5367                               |                                            |                         |                                                | 0.6744                                  |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 0.6240                                  |                                  |                                                |                                   |                                      | 0.9604                                |                              |
| - 70        | 203    | 0.5250                               |                                            |                         |                                                | 0.6663                                  |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 0.6134                                  |                                  |                                                |                                   |                                      | 0.9509                                |                              |
| - 60        | 213    | 0.5125                               |                                            |                         |                                                | 0.6577                                  |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 0.6025                                  |                                  |                                                |                                   |                                      | 0.9419                                |                              |
| - 50        | 223    | 0.4993                               | 0.868                                      | 0.695                   |                                                | 0.6492                                  |                                         |                                      |                                                       | 0.790                                                              |                                            |                                                          | 0.5910                                  |                                  | 1.555                                          | 1.362                             |                                      | 0.9327                                |                              |
| - 40        | 233    | 0.4850                               | 0.855                                      |                         |                                                | 0.6400                                  |                                         |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 0.5793                                  |                                  |                                                |                                   |                                      | 0.9234                                |                              |
| - 30        | 243    | 0.4700                               |                                            |                         |                                                | 0.6306                                  | 0.6156                                  |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 0.5680                                  |                                  | 1.509                                          |                                   |                                      | 0.9141                                |                              |
| - 20        | 253    | 0.4526                               | 0.832                                      |                         |                                                | 0.6210                                  | 0.6052                                  |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 0.5555                                  |                                  |                                                |                                   |                                      | 0.9049                                | 1.670                        |
| - 10        | 263    | 0.4339                               |                                            |                         |                                                | 0.6107                                  | 0.5940                                  |                                      |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 0.5430                                  |                                  | 1.460                                          |                                   |                                      | 0.8956                                |                              |
| ± 0         | 273    | 0.4117                               | 0.812                                      | 0.636                   | 0.8080                                         | 0.6008                                  | 0.5835                                  | 0.9001                               | 1.039                                                 | 0.736                                                              |                                            |                                                          | 0.5300                                  | 0.810                            | 1.435                                          | 1.292                             |                                      | 0.8863                                | 1.630 (1.105)                |
| 10          | 283    | 0.3865                               |                                            |                         | 0.7990                                         | 0.5898                                  | 0.5718                                  | 0.8920                               |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 0.5160                                  | 0.801                            |                                                |                                   |                                      | 0.8769                                | 1.107                        |
| 20          | 293    | 0.3502                               | 0.791                                      | 0.609                   | 0.7902                                         | 0.5788                                  | 0.5590                                  | 0.8790                               | 1.022                                                 | 0.714                                                              | 1.220                                      | 1.049                                                    | 0.5015                                  | 0.792                            | 1.380                                          | 1.262                             |                                      | 0.8677                                | 1.585 1.105                  |
| 30          | 303    | 0.2860                               |                                            |                         | 0.7815                                         | 0.5665                                  | 0.5462                                  | 0.8675                               |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 0.4860                                  | 0.783                            |                                                |                                   |                                      | 0.8583                                |                              |
| 40          | 313    |                                      | 0.765                                      |                         | 0.7726                                         | 0.5546                                  | 0.5340                                  | 0.8576                               |                                                       |                                                                    | 1.192                                      | 1.028                                                    | 0.4690                                  | 0.774                            |                                                |                                   |                                      | 0.8489                                | 1.545 1.100                  |
| 50          | 323    |                                      | 0.756                                      | 0.561                   | 0.7634                                         | 0.5422                                  | 0.5198                                  | 0.8460                               | 0.996                                                 | 0.676                                                              | 1.184                                      | 1.018                                                    | 0.4500                                  | 0.765                            |                                                |                                   |                                      | 0.8395                                |                              |
| 60          | 333    |                                      | 0.740                                      |                         | 0.7546                                         | 0.5284                                  | 0.5052                                  | 0.8357                               |                                                       |                                                                    | 1.169                                      | 1.003                                                    | 0.4328                                  | 0.755                            |                                                |                                   |                                      | 0.8301                                | 1.505 1.090                  |
| 70          | 343    |                                      |                                            |                         | 0.7452                                         | 0.5148                                  | 0.4900                                  | 0.8248                               |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 0.4090                                  | 0.746                            |                                                |                                   |                                      | 0.8205                                |                              |
| 80          | 353    |                                      |                                            |                         | 0.7357                                         | 0.5003                                  |                                         | 0.8145                               |                                                       |                                                                    |                                            | 0.980                                                    | 0.3764                                  | 0.736                            |                                                |                                   |                                      | 0.8110                                | 1.460 1.070                  |
| 90          | 363    |                                      |                                            |                         | 0.7260                                         | 0.4848                                  |                                         | 0.8041                               |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          | 0.3230                                  | 0.725                            |                                                |                                   |                                      | 0.8012                                |                              |
| 100         | 373    |                                      |                                            | 0.458                   | 0.7158                                         | 0.4680                                  |                                         | 0.7927                               | 0.951                                                 | 0.611                                                              |                                            | 0.960                                                    |                                         | 0.714                            | 1.110                                          |                                   |                                      | 0.7914                                | 1.420 1.040                  |
| 110         | 383    |                                      |                                            |                         | 0.7048                                         | 0.4492                                  |                                         | 0.7809                               |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          |                                         | 0.702                            |                                                |                                   |                                      | 0.7813                                |                              |
| 120         | 393    |                                      |                                            |                         | 0.6927                                         | 0.4272                                  |                                         | 0.7692                               |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          |                                         | 0.691                            |                                                |                                   |                                      | 0.7710                                |                              |
| 130         | 403    |                                      |                                            |                         | 0.6791                                         | 0.4003                                  |                                         | 0.7568                               |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          |                                         | 0.678                            |                                                |                                   |                                      | 0.7608                                |                              |
| 140         | 413    |                                      |                                            |                         |                                                | 0.3620                                  |                                         | 0.7440                               |                                                       |                                                                    |                                            |                                                          |                                         |                                  |                                                |                                   |                                      | 0.7501                                |                              |
| 150         | 423    |                                      |                                            |                         |                                                | 0.2900                                  |                                         | 0.7310                               |                                                       | 0.518                                                              |                                            | 0.896                                                    |                                         |                                  |                                                |                                   |                                      | 0.7392                                | 1.310                        |

## 7.11 GRÁFICO PARA EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO INTERIOR DE LA TUBERÍA, VELOCIDAD DEL FLUJO Y CAUDAL



## **8 BIBLIOGRAFÍA**

- Manual de Selección y Aplicación de Bombas Centrífugas  
KSB Bombas Hidráulicas S/A  
3ª Edición - Septiembre/91
- Manuales Técnicos  
KSB Bombas Hidráulicas S/A
- Bombas y Instalaciones de Bombeo  
Archibald Joseph Macyntire  
Editorial Guanabara - 2ª Edición
- Bombas Industriales  
Edson Ezequiel de Mattos y Reinaldo de Falco  
Editorial Técnica Ltda - 1989
- Bombas, Válvulas y Accesorios  
Raúl Peragallo Torreira  
Editorial Libris - 1996
- Centrifugal Pump Lexicon  
KSB Aktiengesellschaft - 1990
- Centrifugal Pump Design  
KSB Aktiengesellschaft
- Manual de Hidráulica  
Azevedo Netto / G. A. Alvarez  
Editorial Edgard Blücher Ltda - 7ª Edición



**KSB Compañía Sudamericana de Bombas S.A.**

Av. Ader 3625 – Carapachay – Buenos Aires – Argentina

Tel: +54 11 4766-3021/ 3121/ 3221

Fax: +54 11 4766-5449

e-mail: [ventas@ksb.com.ar](mailto:ventas@ksb.com.ar) [servicio@ksb.com.ar](mailto:servicio@ksb.com.ar)

[www.ksb.com.ar](http://www.ksb.com.ar)