

**MF. T6.- Máquinas Hidráulicas**

Las transparencias son el material de apoyo del profesor para impartir la clase. No son apuntes de la asignatura. Al alumno le pueden servir como guía para recopilar información (libros, ...) y elaborar sus propios apuntes

**Departamento:** Ingeniería Eléctrica y Energética  
**Area:** Máquinas y Motores Térmicos

CARLOS J RENEDO [renedoc@unican.es](mailto:renedoc@unican.es)  
Despachos: ETSN 236 / ETSIIT S-3 28  
<http://personales.unican.es/renedoc/index.htm>  
Tlfn: ETSN 942 20 13 44 / ETSIIT 942 20 13 82

1

**MF. T6.- Máquinas Hidráulicas**

**Objetivos:**

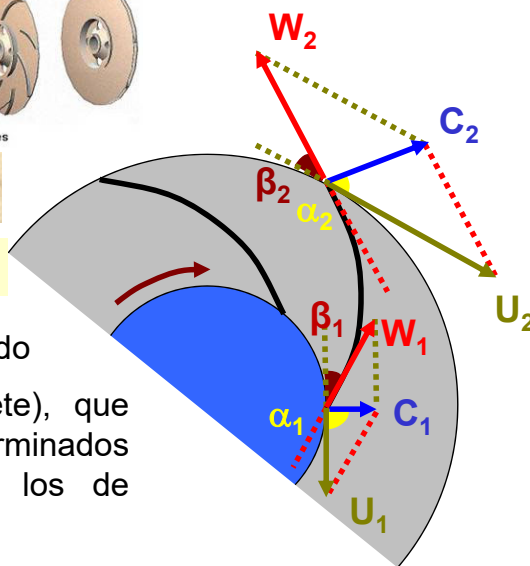
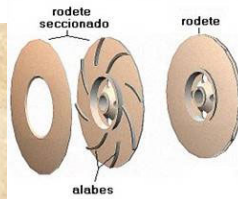
El objetivo de este tema es presentar al alumno el concepto de máquina hidráulica y su funcionamiento. De especial interés, por su extensa aplicación naval, resulta el conocimiento de las bombas centrífugas y los ventiladores. Finalmente se introducen las hélices

El tema se completa con dos prácticas de laboratorio:

- En la primera se explican despieces de máquinas hidráulicas, especialmente bombas centrífugas
- En la segunda se ensaya una bomba centrífuga, y acoplamiento en serie y paralelo

2

- 1.- Generalidades de las M.H.
- 2.- Bombas centrífugas
- 3.- Turbinas hidráulicas
- 4.- Ventiladores
- 5.- Compresores
- 6.- Hélices



### 1.- Generalidades de las M.H. (I)

M.H. comunican o extraen energía de un fluido

Suelen tener un elemento giratorio (rodete), que tiene una serie de álabes con unos determinados ángulo de incidencia del fluido, siendo los de entrada ( $\alpha_1$ ), y los de salida ( $\alpha_2$ )

La velocidad del fluido (C) es la suma de:

- Velocidad de rotación (U), debida al giro del rodete
- Velocidad de traslación a lo largo del rodete (W), sigue los álabes

Estas velocidades y los ángulos entre ellas  $\Rightarrow$  triángulos de velocidades

3

### 1.- Generalidades de las M.H. (II)

**Para una Bomba Centrífuga:**

Aspiración:

El líquido es aspirado por el ojo del rodete

Rodete:

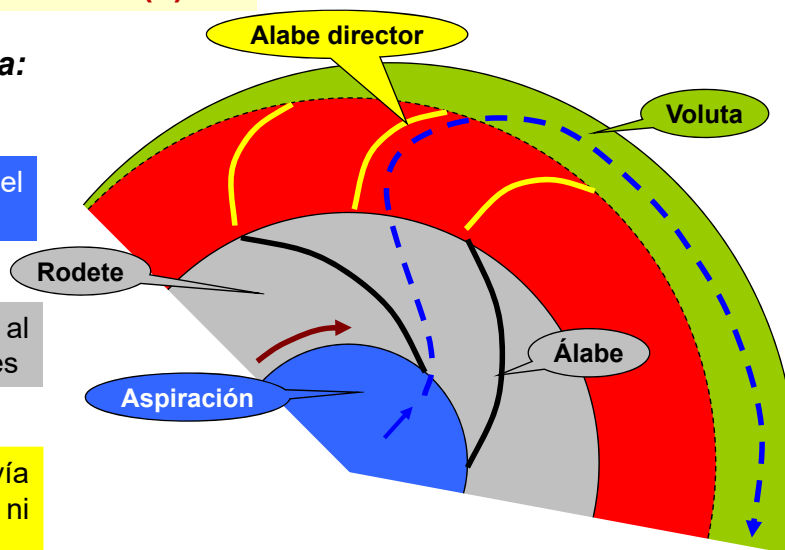
Comunica energía cinética al fluido por medio de los álabes

Alabes directores:

Recoger el fluido y lo envía hacia la voluta sin choques ni turbulencias (opcionales)

Voluta:

En ella se transforma la energía cinética del fluido en energía de presión



1.- Generalidades de las M.H. (III)

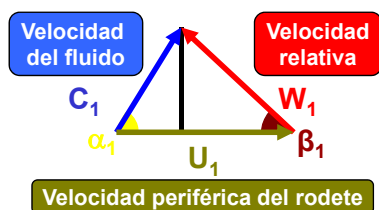
	Fluido (C)	Rotor (U)	Relativa $[\bar{C} - \bar{U}]$
Entrada	$C_1$	$U_1$	$\bar{W}_1 = [\bar{C}_1 - \bar{U}_1]$
Salida	$C_2$	$U_2$	$\bar{W}_2 = [\bar{C}_2 - \bar{U}_2]$

Forma del álabe

$\alpha$	$\beta$
$[\bar{C} \wedge \bar{U}]$	$[\bar{W} \wedge \bar{U}]$

$$U_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot n}{60} \text{ (m/s)}$$

$$U_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot n}{60} \text{ (m/s)}$$



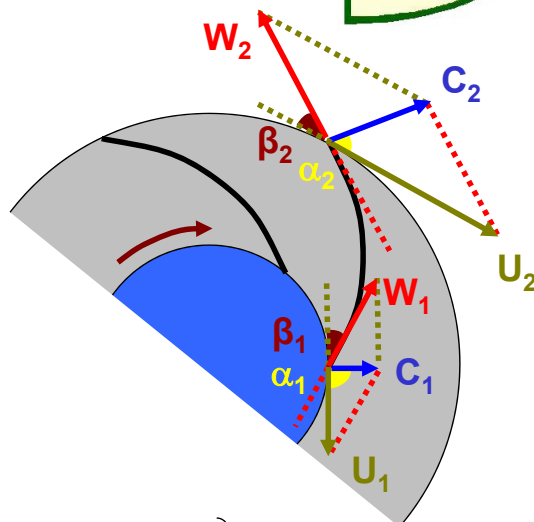
$$C_1 \cdot \sin \alpha_1 = W_1 \cdot \sin \beta_1 \Rightarrow W_1 = \frac{C_1 \cdot \sin \alpha_1}{\sin \beta_1}$$

$$U_1 = C_1 \cdot \cos \alpha_1 + W_1 \cdot \cos \beta_1 = C_1 \cdot \left( \cos \alpha_1 + \frac{\sin \alpha_1}{\tan \beta_1} \right)$$

$$C_1 = \frac{U_1}{\left( \cos \alpha_1 + \frac{\sin \alpha_1}{\tan \beta_1} \right)}$$

Si  $\alpha_1 = 90^\circ \Rightarrow C_1 = C_{1 \perp A_1} = U_1 \cdot \tan \beta_1 \text{ (m/s)}$

$$C_{2 \perp A_2} = \frac{\text{Caudal}}{A_2} = \frac{C_{1 \perp A_1} \cdot A_1}{A_2} = \frac{C_1 \cdot A_1}{A_2} = \frac{C_1 \cdot \pi \cdot r_1^2}{2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot \text{Ancho}_{\text{rodete}}}$$



1.- Generalidades de las M.H. (IV)

	Fluido (C)	Rotor (U)	Relativa $[\bar{C} - \bar{U}]$
Entrada	$C_1$	$U_1$	$\bar{W}_1 = [\bar{C}_1 - \bar{U}_1]$
Salida	$C_2$	$U_2$	$\bar{W}_2 = [\bar{C}_2 - \bar{U}_2]$

Forma del álabe

$\alpha$	$\beta$
$[\bar{C} \wedge \bar{U}]$	$[\bar{W} \wedge \bar{U}]$

El salto creado por la bomba, H:

$$H = \frac{C_2 \cdot U_2 \cdot \cos \alpha_2 - C_1 \cdot U_1 \cdot \cos \alpha_1}{g}$$

Si  $\alpha_1 = 90^\circ \Rightarrow H_{\max}$

La altura real:  $H_R = H - H_{\text{loss}}$

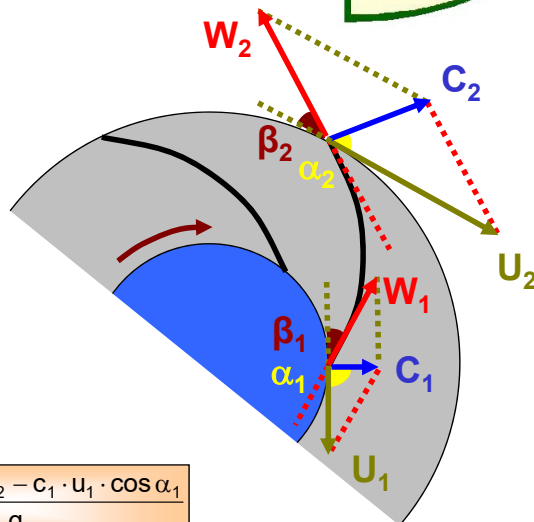
El par motor, C:

$$C = \frac{\gamma \cdot Q}{g} \cdot (c_2 \cdot r_2 \cdot \cos \alpha_2 - c_1 \cdot r_1 \cdot \cos \alpha_1)$$

La potencia hidráulica, N:

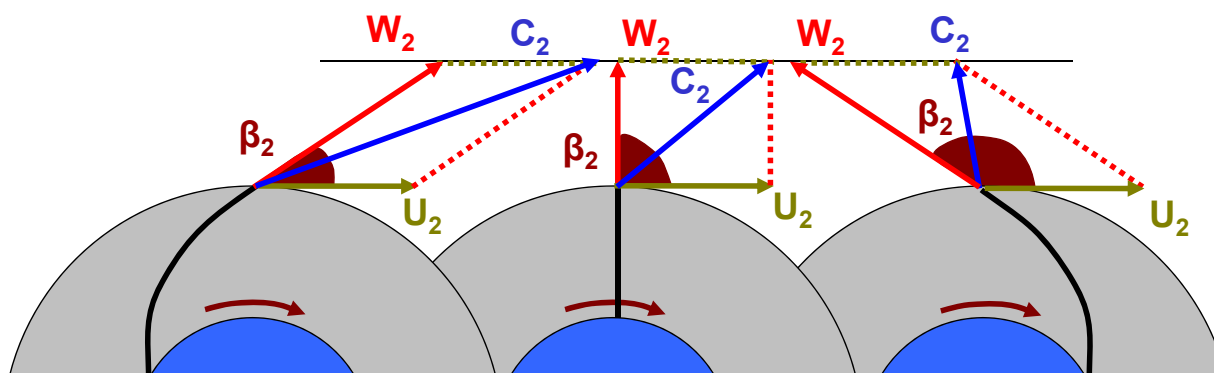
$$N = \gamma \cdot Q \cdot H = C \cdot \text{vel}_{\text{ang}} = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot n \cdot C$$

H en m.c.fluido



1.- Generalidades de las M.H. (V)

	Fluido (C)	Rotor (U)	Relativa
Entrada	$C_1$	$U_1$	$\bar{W}_1 = [\bar{C}_1 - \bar{U}_1]$
Salida	$C_2$	$U_2$	$\bar{W}_2 = [\bar{C}_2 - \bar{U}_2]$



Alabes curvados hacia delante

Alabes rectos

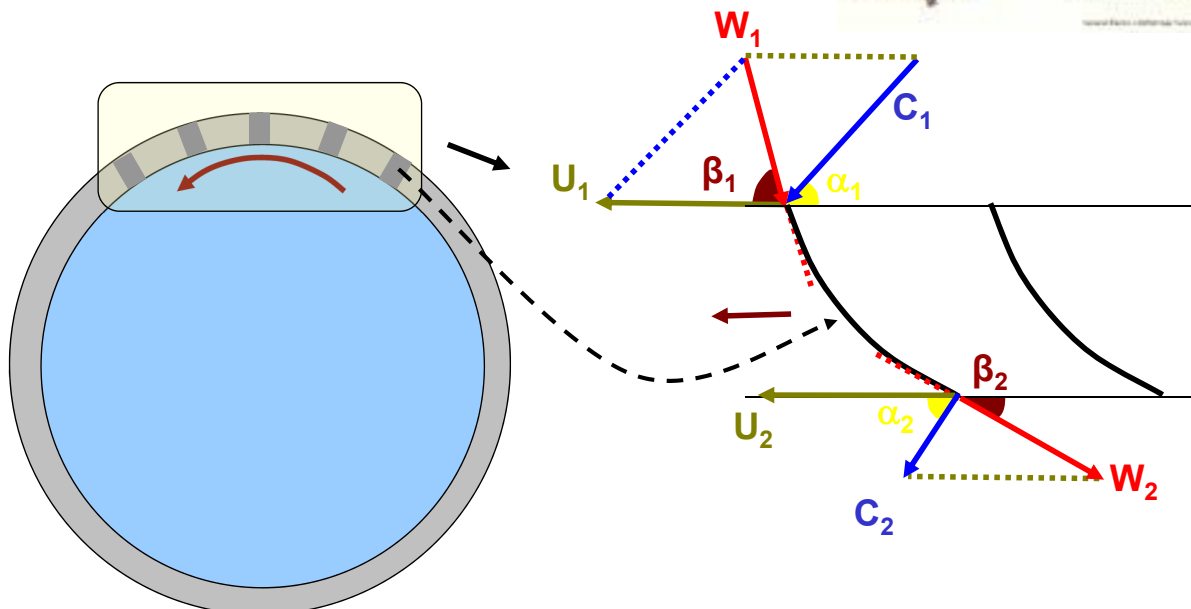
Alabes curvados hacia atrás

$$Q = c_{1\perp A_1} \cdot A_1 = c_{2\perp A_2} \cdot A_2$$

$$H = \frac{c_2 \cdot u_2 \cdot \cos \alpha_2 - c_1 \cdot u_1 \cdot \cos \alpha_1}{g}$$

1.- Generalidades de las M.H. (VI)

Máquina Axial:

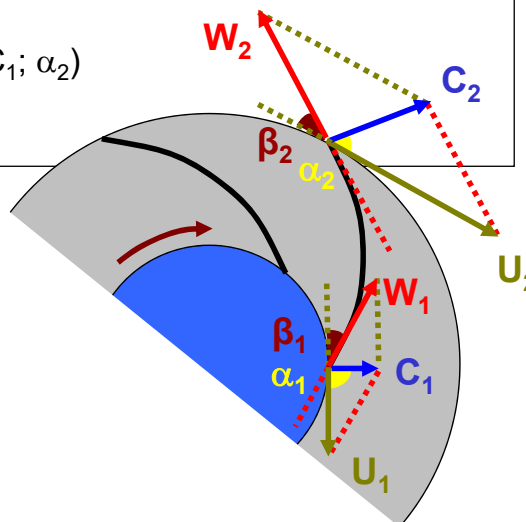


El vacuómetro a la entrada de una bomba que mueve aceite ( $D_r = 0,9$ ) marca 0,3 bar y el manómetro en su impulsión 14 kg/cm<sup>2</sup>. Calcular:

- La altura suministrada por la bomba
- La presión suministrada por la bomba en m.c.a.
- La presión suministrada por la bomba en Pa

Una bomba centrífuga gira a 1.500 rpm. La superficie de entrada del agua al rodete es de 0,03 m<sup>2</sup>, y la de salida 0,04 m<sup>2</sup>. El diámetro del rodete a la entrada es de 0,3 m y a la salida de 0,5 m. Los ángulos de los álabes son:  $\alpha_1 = 90^\circ$ ;  $\beta_1 = 22^\circ$ ;  $\beta_2 = 15^\circ$ . Calcular:

- Los triángulos de velocidades ( $U_1, U_2, C_1; \alpha_2$ )
- La altura teórica de impulsión
- La potencia teórica de impulsión



## 2.- Bombas Centrífugas (I)

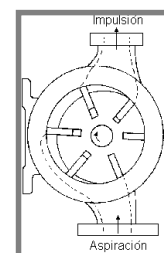
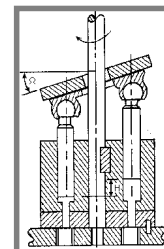
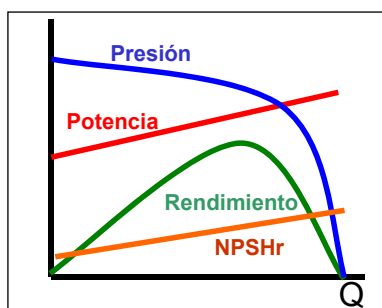
Provocan el movimiento de un líquido, venciendo las resistencias que impone el circuito hidráulico a su paso, consumen energía

Existen principalmente **dos tipos de bombas**:

- De **desplazamiento positivo**: de embolo, rotativas y de tornillo
- **Centrífugas**; son las empleadas en los sistemas de climatización, calefacción ...; producen un flujo continuo de líquido; el par de arranque es pequeño, lo que hace fácil su accionamiento

Características:

- caudal (m<sup>3</sup>/h o l/h)
- la presión o altura suministrada, h
- la altura de aspiración
- la potencia consumida
- la presión máxima que puede soportar



$$Pot = \gamma \cdot H \cdot Q$$

$$\eta_{Bomba} = \frac{P_{HB}}{P_{Eje}}$$

$$\eta_{Turbina} = \frac{P_{Eje}}{P_{HT}}$$

Formas típicas para una bomba centrífuga

11

## 2.- Bombas Centrífugas (II)

Ventajas:

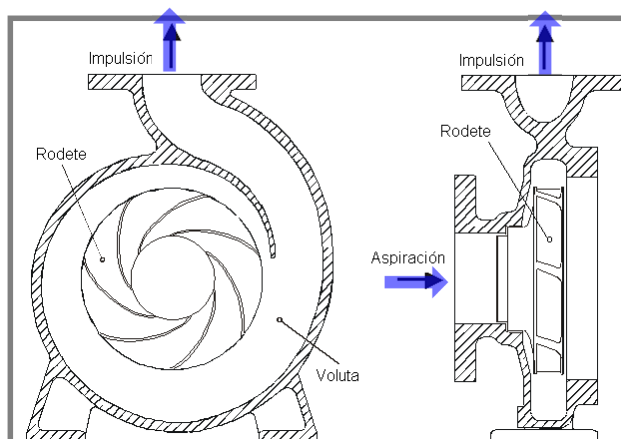
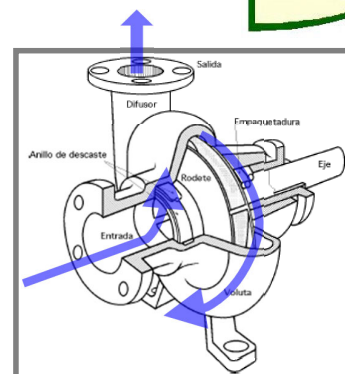
- de sencilla construcción, no requieren tolerancias estrictas
- no necesitan válvulas, no tienen movimientos alternativos
- compacta y poco peso,
- fácil mantenimiento y de vida prolongada

Inconvenientes:

- bajos rendimientos con caudales pequeños
- no se autocebaban (**válvula de pie de pozo**)

Las partes de la bomba son:

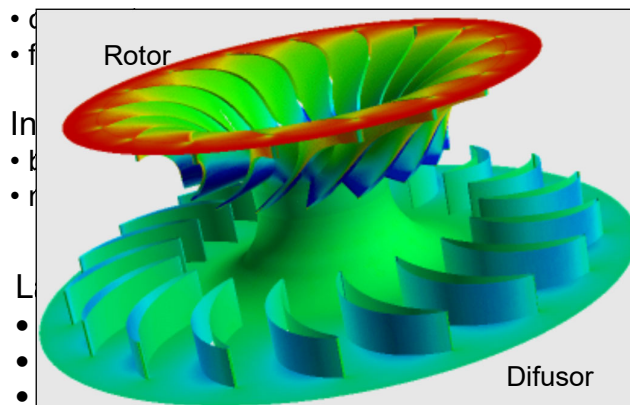
- el rodete.
- aspiración.
- carcasa o voluta., puede incluir un difusor (sistema de álabes fijos).
- empaquetaduras y cierres mecánicos.



## 2.- Bombas Centrífugas (II)

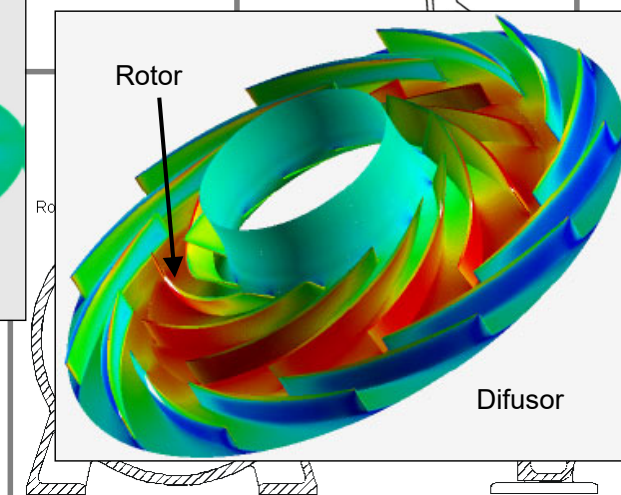
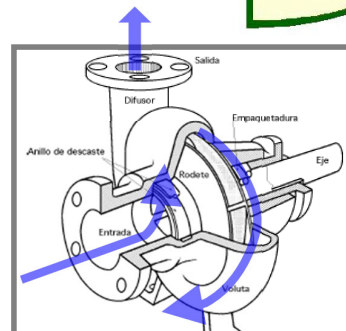
Ventajas:

- de sencilla construcción, no requieren tolerancias estrictas
- no necesitan válvulas, no tienen movimientos alternativos



(sistema de álabes fijos).

- empaquetaduras y cierres mecánicos.



## 2.- Bombas Centrífugas (III)

Existen bombas de **rotor húmedo** (sin mantenimiento, menos ruido, peor rendimiento y para circuitos cerrados) y de **rotor seco**.



Se llama bomba multifase o **multietapa** a las bombas que tienen varios rodets encerrados en una única carcasa (rodets en serie)

- Eje horizontal
- Eje vertical

2.- Bombas Centrífugas (IV)

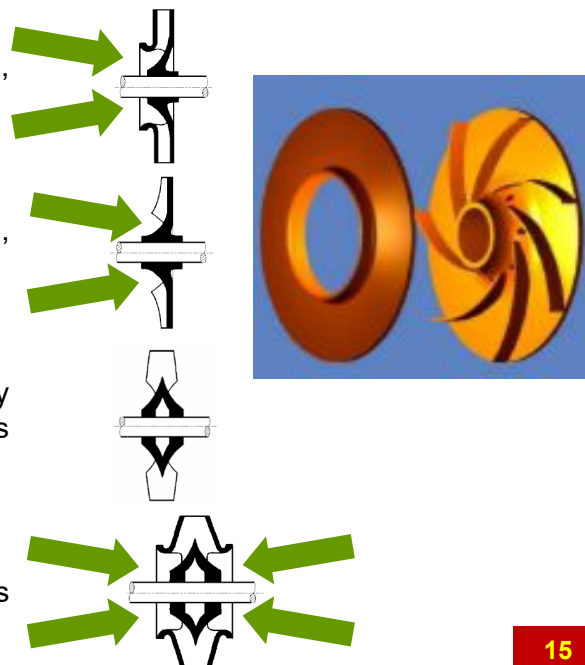
**Tipos de rodetes:**

**Cerrados:** el habitual, mejor rendimiento, posibles problemas de obstrucción

**Semiabiertos:** sin problemas de obstrucción, se emplean con fluidos "sucios"

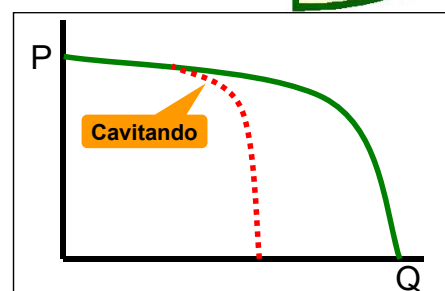
**Abiertos:** sin problemas de obstrucción, muy malos rendimientos hidráulicos por "fugas internas"

**Doble aspiración:** compensa esfuerzos axiales, para grandes caudales



2.- B. C.: Cavitación (I)

**Cavitación:** vaporización del líquido por la depresión creada en la entrada (ruidos, desgaste de piezas, vibraciones, ↓Q)  
El peligro aumenta con el líquido caliente



Las bombas centrífugas tienen una altura de aspiración limitada

**NPSH** (altura neta de succión positiva): es la presión mínima por debajo de la cual se produce cavitación en la bomba

Hay dos **NPSH**:

– **NPSH requerida:** es una característica de la bomba

$$NPSH_r = \lambda_1 \cdot \frac{W_1^2}{2 \cdot g} + \lambda_2 \cdot \frac{C_1^2}{2 \cdot g} \left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 \approx 0,29 \\ \lambda_2 \approx 1,32 \end{array} \right.$$

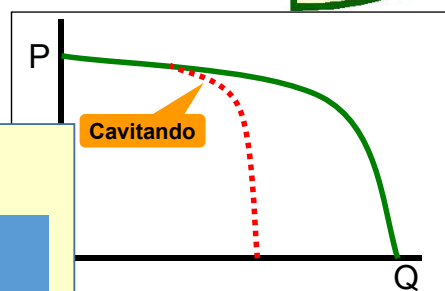
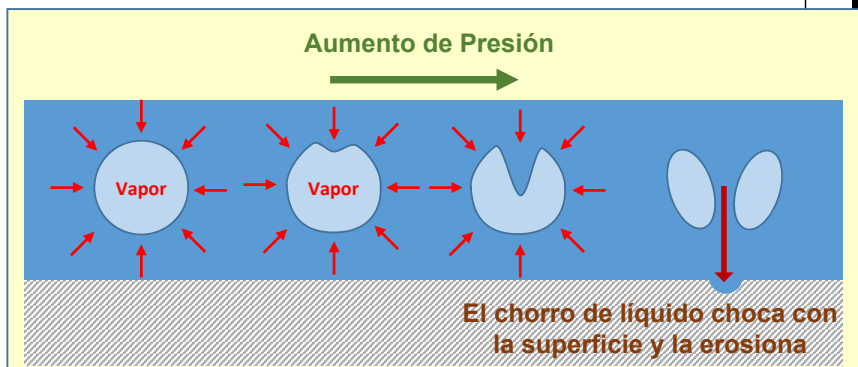
– **NPSH disponible:** es una característica del circuito de aspiración

$$NPSH_d = \frac{P_{atm} - P_{sat}}{\gamma} - \Delta cota - H_{per Tub}$$

$$NPSH_d \geq NPSH_r + 0,5m$$



2.- B. C.: Cavitación (I)



tada  
nima por debajo de la

Hay dos **NPSH**:



es una característica  
es una característica  
ción

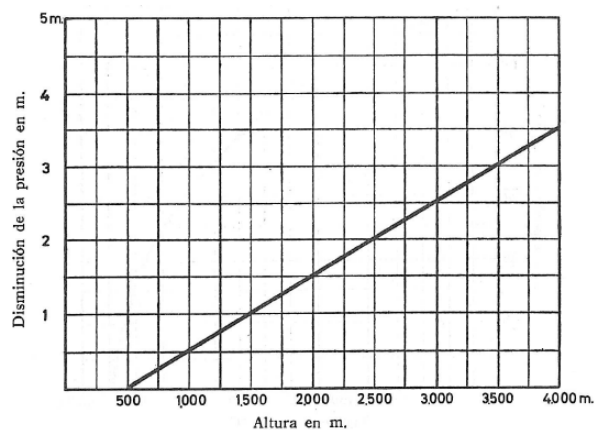
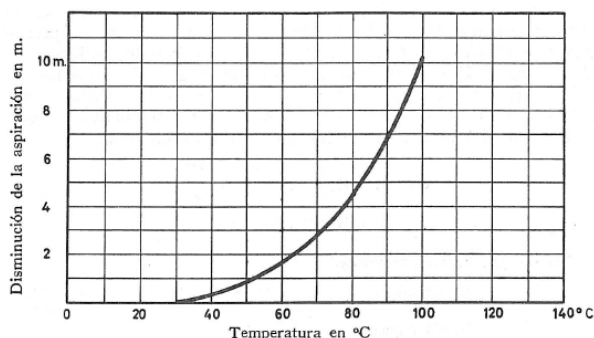
$$NPSH_d \geq NPSH$$



2.- B. C.: Cavitación (II)

$NPSH_d$  : ↓ al ↑ la altitud del lugar (↓ $p_{atm}$ ) y la  $T^a$  del líquido (↑  $p_{sat}$ )

$$NPSH_d = \frac{p_{atm} - p_{sat}}{\gamma} - \Delta cota - H_{per Tub}$$



2.- B.C.: Leyes de Semejanza

En m.c. del fluido

- Al  $\uparrow$  velocidad de giro (n),  $\uparrow$  el caudal (Q) proporcionalmente, y la altura (H) suministrada proporcionalmente a  $n^2$  (H depende de c y u)
- La potencia absorbida ( $P_{abs}$ ) es proporcional a  $n^3$  ( $P_{abs} = \gamma \cdot H \cdot Q$ )
- Al  $\uparrow$  el diámetro del rodete ( $D_r$ ),  $\uparrow$  Q y H proporcionalmente
- Al  $\uparrow$  la anchura del rodete,  $\uparrow$  Q prop.

$$\frac{rpm_1}{rpm_2} = \frac{D_1}{D_2} = \frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{1/2} = \left(\frac{P_{abs_1}}{P_{abs_2}}\right)^{1/3}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{rpm_1}{rpm_2}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{rpm_1}{rpm_2}\right)^2$$

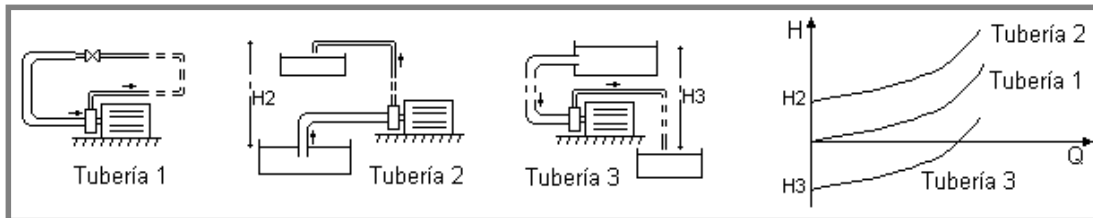
$$\frac{P_{abs_1}}{P_{abs_2}} = \left(\frac{rpm_1}{rpm_2}\right)^3$$

- Al  $\uparrow$  los ángulos o el nº de álabes cambia la forma de la curva H-Q
- La curva H-Q se ve afectada por  $\mu$ , y es sensible a la T
- Para mantener un caudal determinado si  $\downarrow T$  ( $\uparrow \mu$ )  $\Rightarrow \downarrow \eta$ ,  $\uparrow P_{abs}$  y  $\downarrow H$

Se amplia en ventiladores

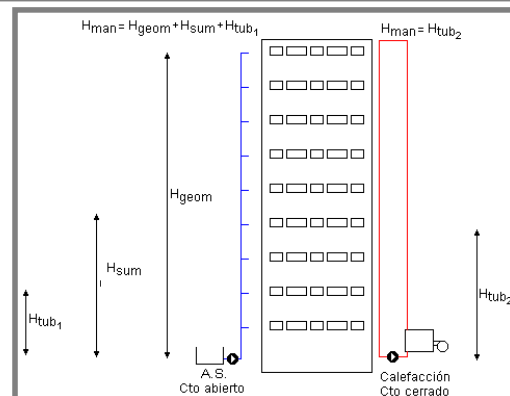
2.- B.C.: Punto de Funcionamiento (I)

El **punto de funcionamiento** está marcado por la intersección entre la curva de la bomba y la de la tubería ( $\approx k \cdot Q^2$ )

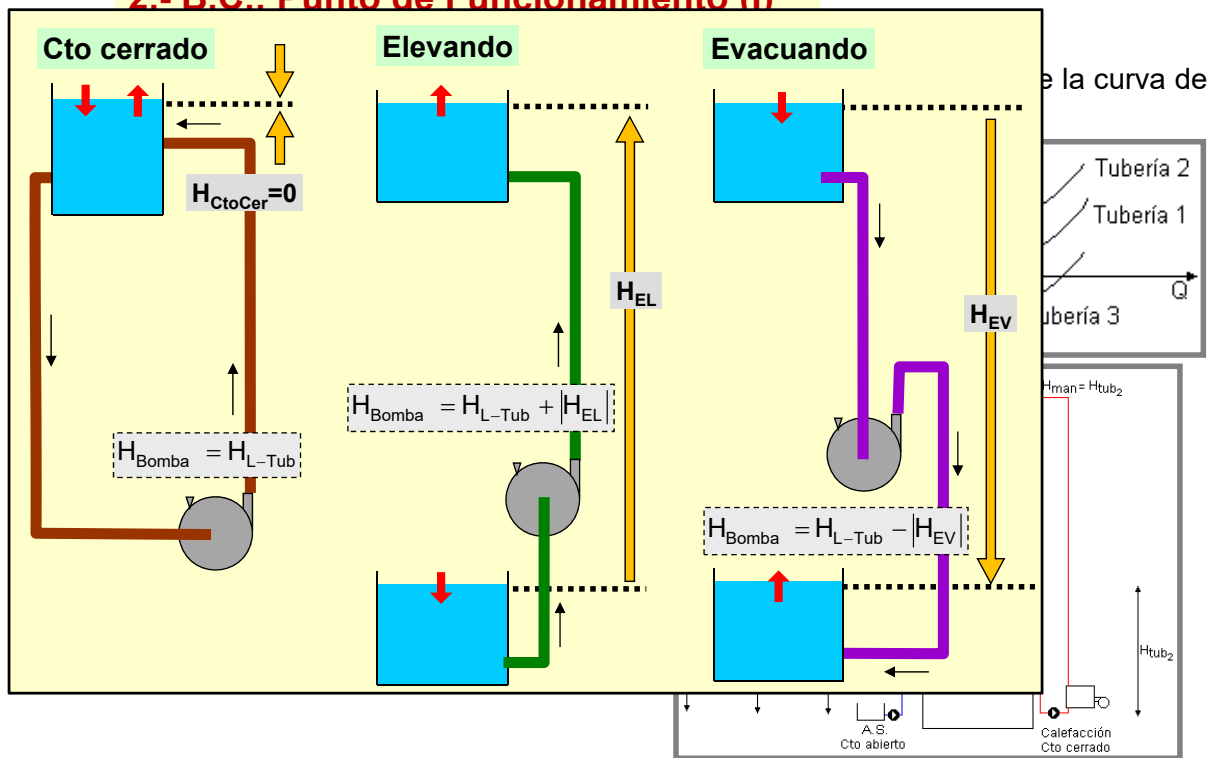


**Circuito abierto:**  
P. estática + Fric. Tubería

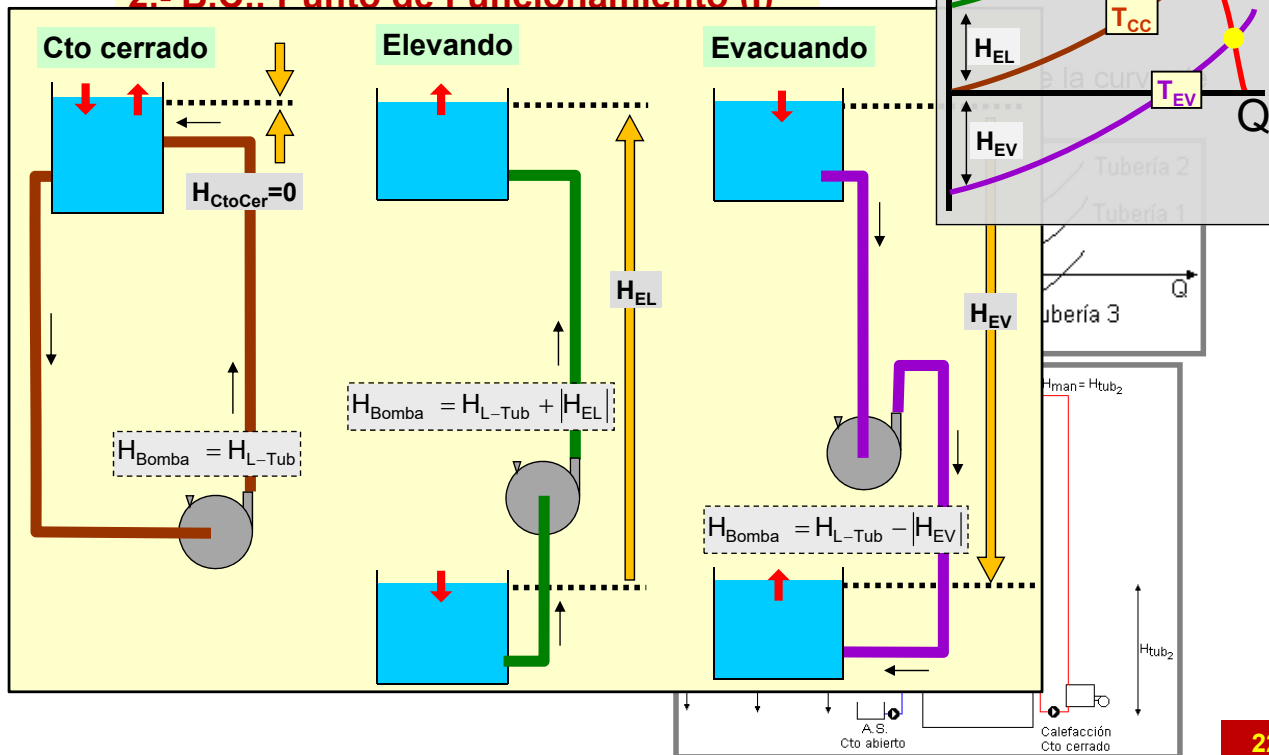
**Circuito cerrado**  
Fricción en Tubería



2.- B.C.: Punto de Funcionamiento (I)



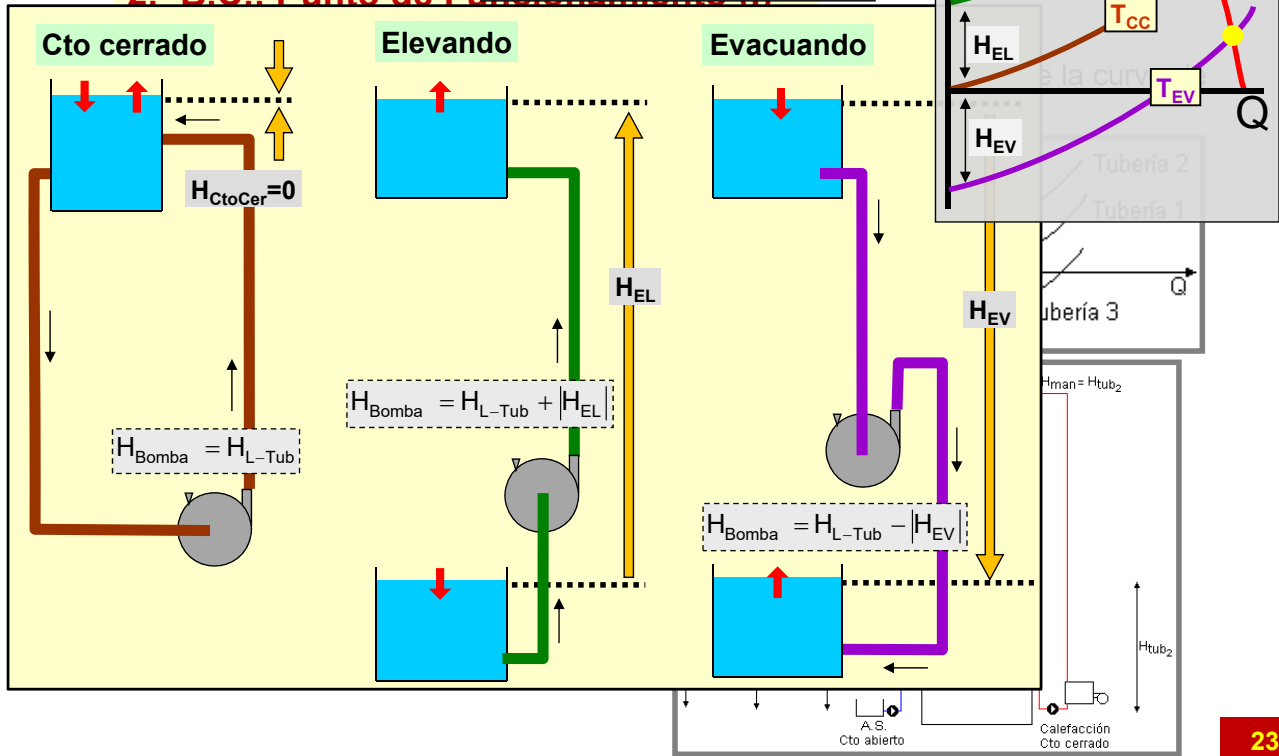
2.- B.C.: Punto de Funcionamiento (I)



CURVA [H - Q] de una TUBERIA

$$\begin{cases} H_{TEL} = H_{EL} + cte_{TEL} \cdot Q^2 \\ H_{TCC} = cte_{TCC} \cdot Q^2 \\ H_{TEV} = -H_{EV} + cte_{TEV} \cdot Q^2 \end{cases}$$

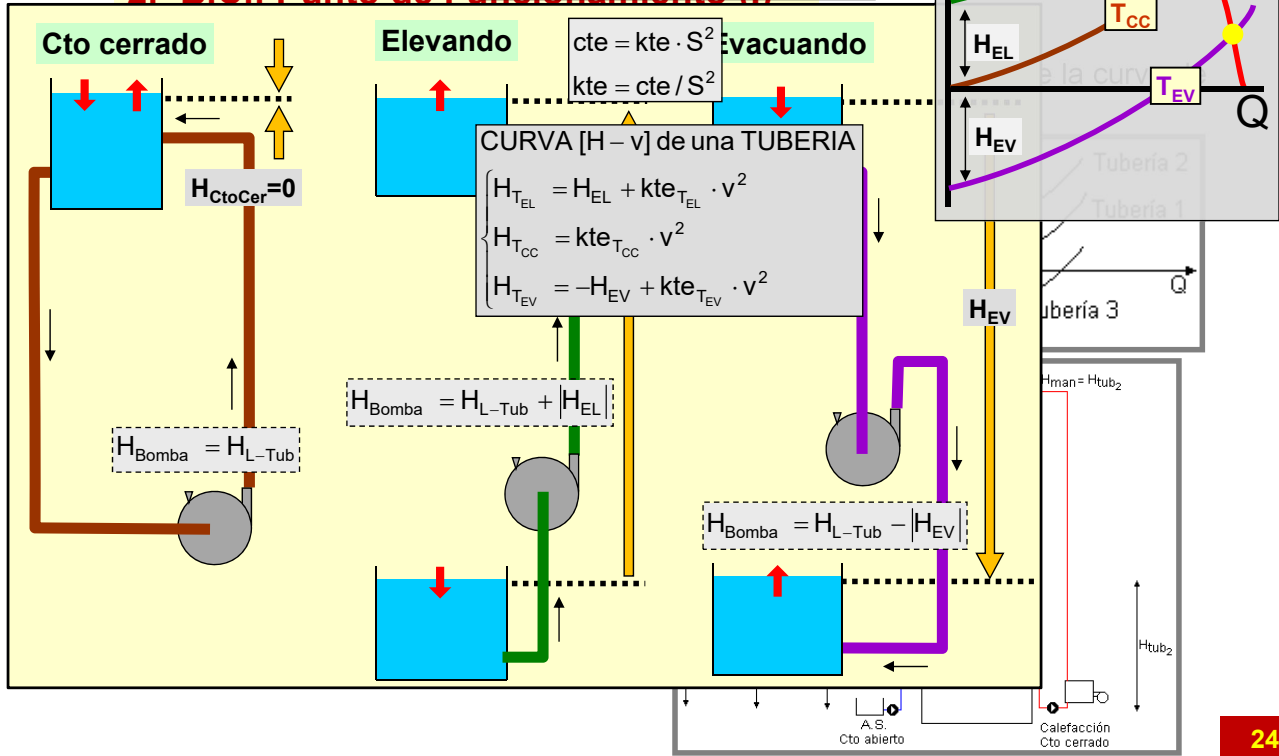
2.- B.C.: Punto de Flujo



CURVA [H - Q] de una TUBERIA

$$\begin{cases} H_{TEL} = H_{EL} + cte_{TEL} \cdot Q^2 \\ H_{TCC} = cte_{TCC} \cdot Q^2 \\ H_{TEV} = -H_{EV} + cte_{TEV} \cdot Q^2 \end{cases}$$

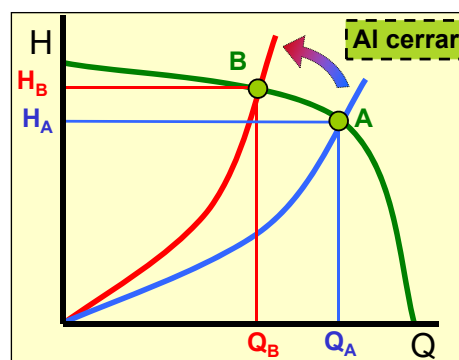
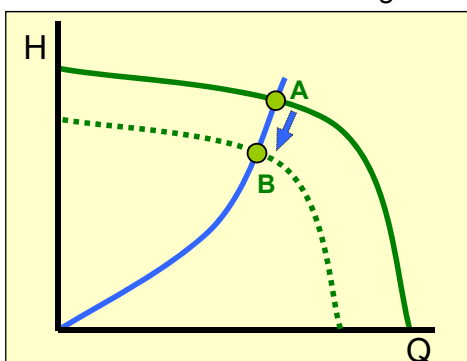
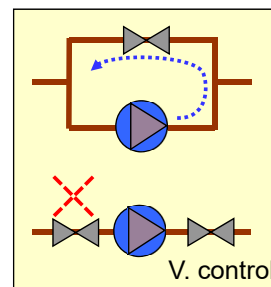
2.- B.C.: Punto de Flujo



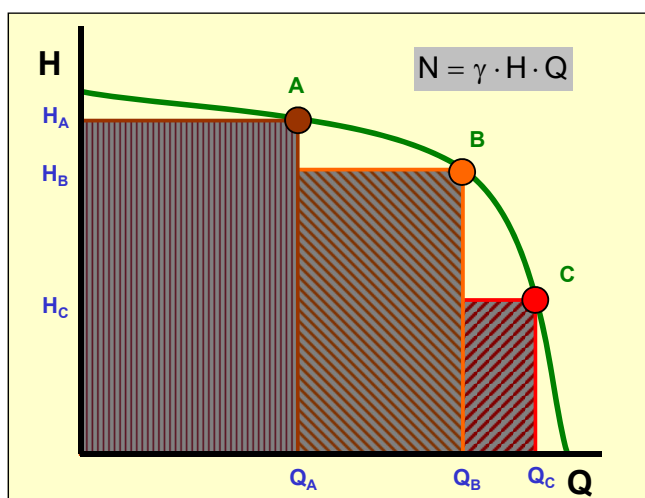
2.- B.C.: Punto de Funcionamiento (II)

Para **variar el punto de funcionamiento** de la bomba:

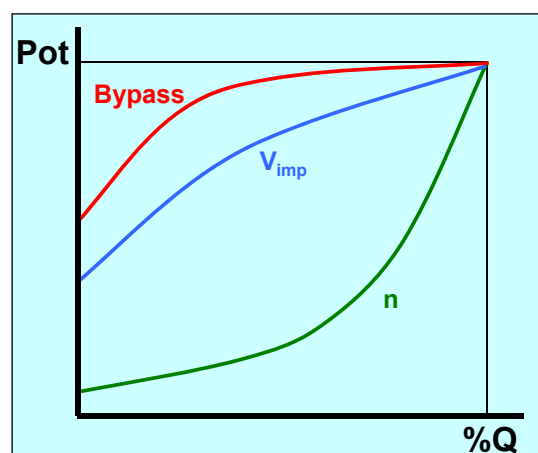
- Instalando un depósito de acumulación para las puntas de demanda
- Instalando varias bombas en paralelo
- Con un bypass y una válvula entre la impulsión y la aspiración
- Provocando una pérdida de carga con una válvula situada en la tubería de impulsión
- Variando la velocidad de giro



2.- B.C.: Punto de Funcionamiento (III)



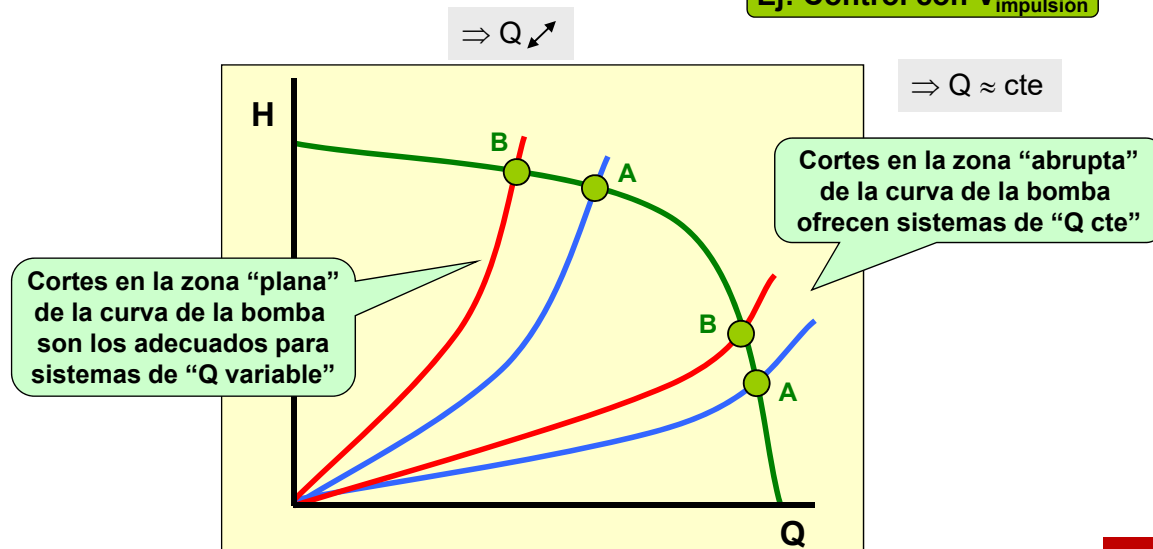
Comparando consumos:



2.- B.C.: Punto de Funcionamiento (IV)

Control con válvula en la impulsión:  
ojo al pto de funcionamiento

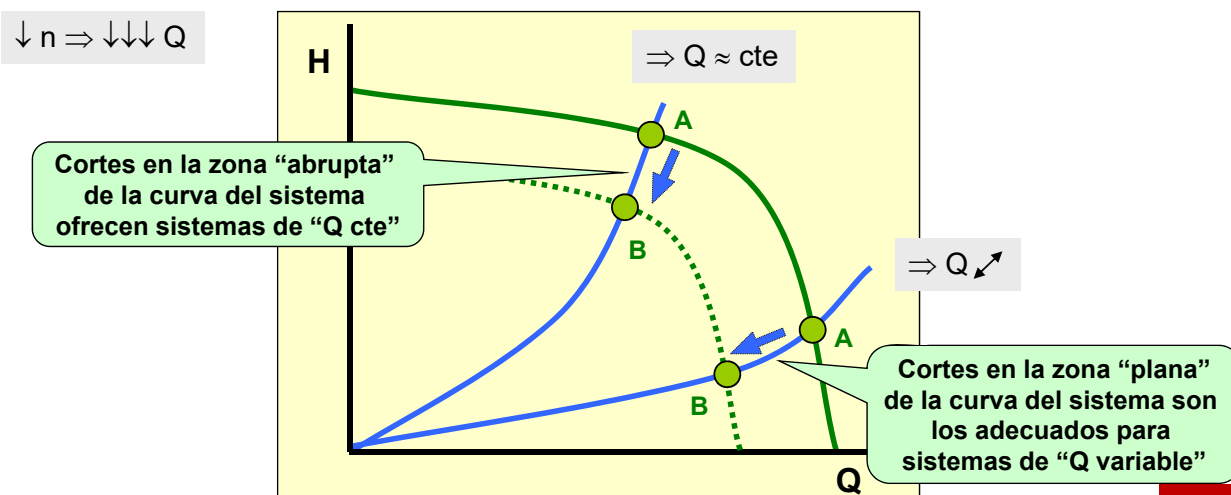
Ej: Control con  $V_{impulsión}$



27

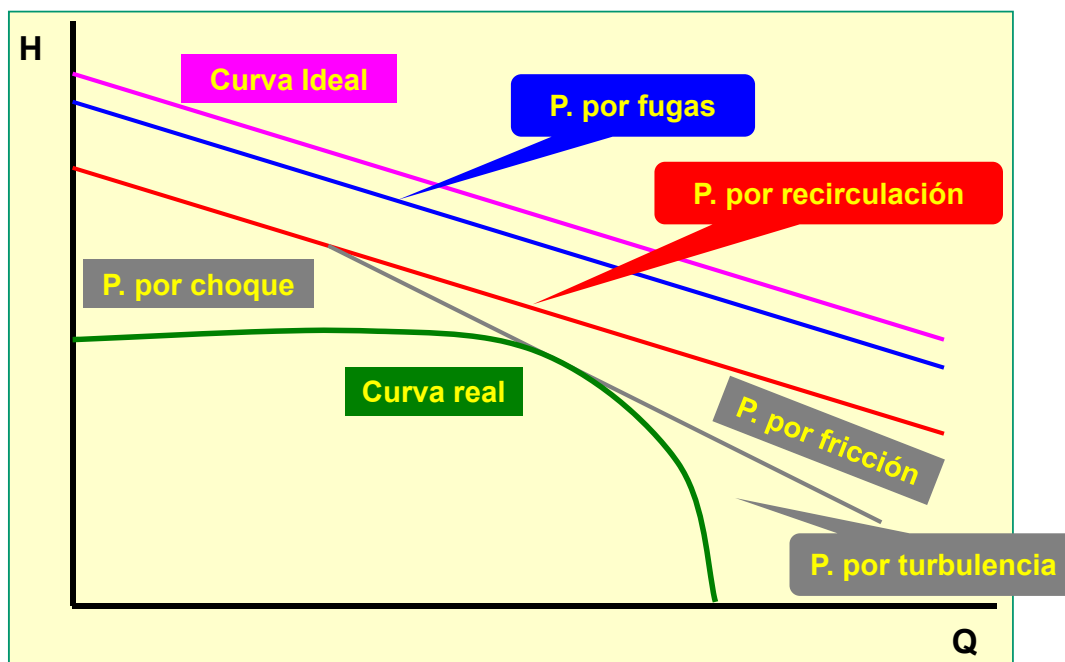
2.- B.C.: Punto de Funcionamiento (V)

Control con velocidad variable:  
ojo al pto de funcionamiento



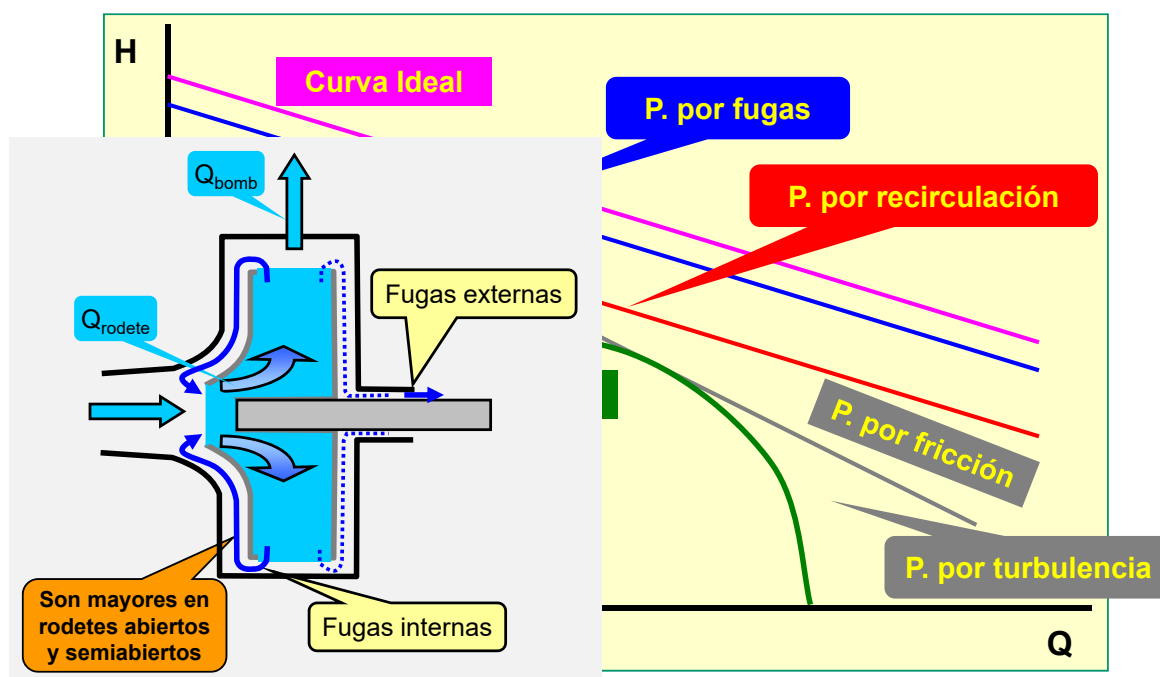
28

2.- B.C.: Punto de Funcionamiento (VI)



29

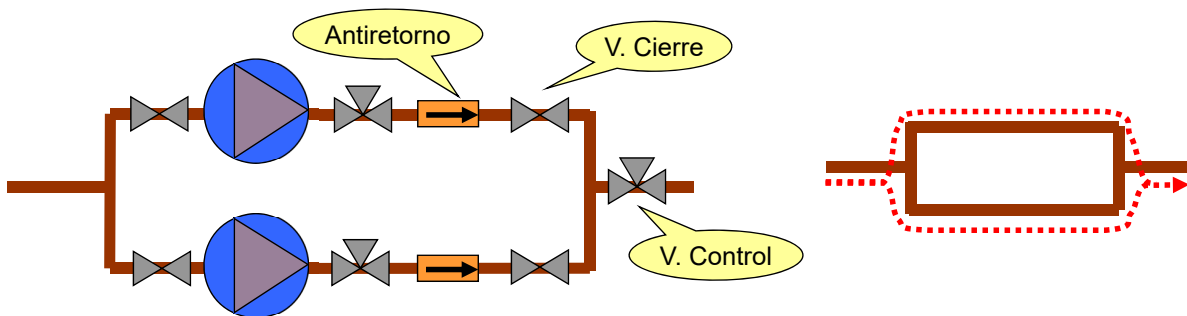
2.- B.C.: Punto de Funcionamiento (VI)



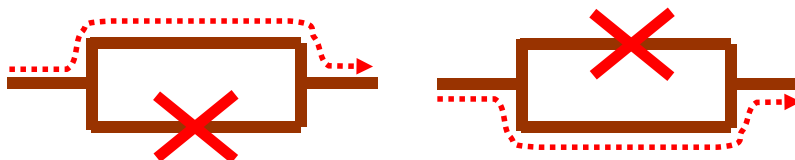
30

2.- B.C.: Acoplamiento (I)

En paralelo ("suma" de caudales)

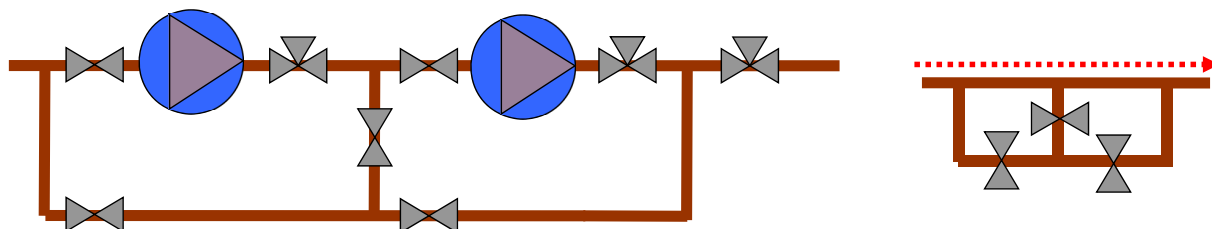


Las válvulas antiretorno evitan reflujos por paro de una bomba

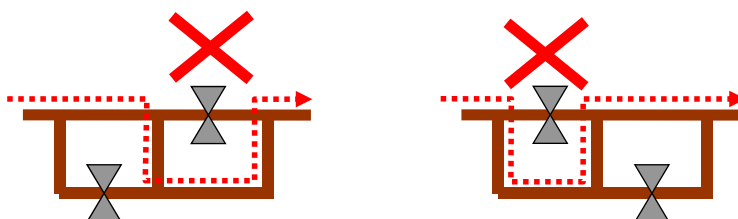


2.- B.C.: Acoplamiento (II)

En serie ("suma" de presiones)



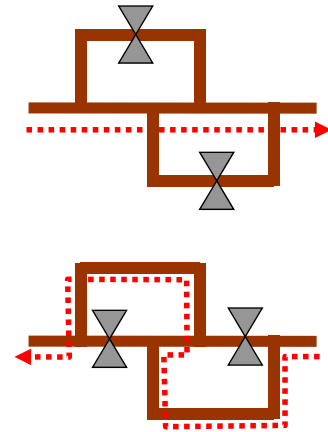
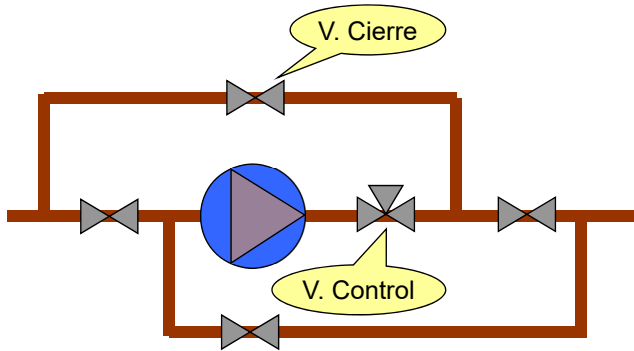
Se permite funcionar con sólo una bomba





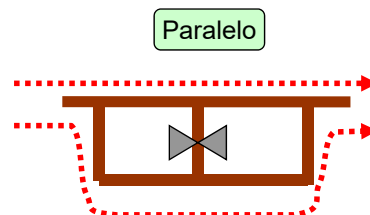
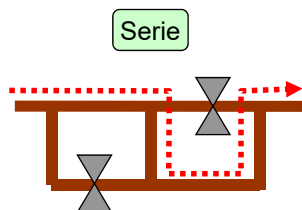
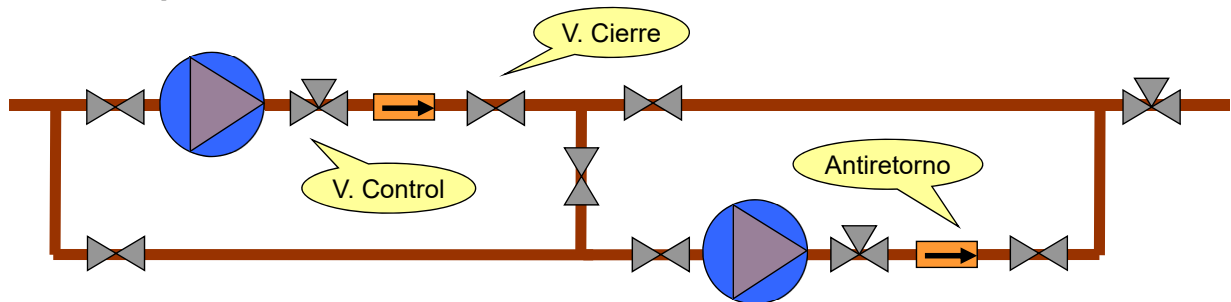
2.- B.C.: Acoplamientos (III)

Una bomba para dos sentidos de circulación

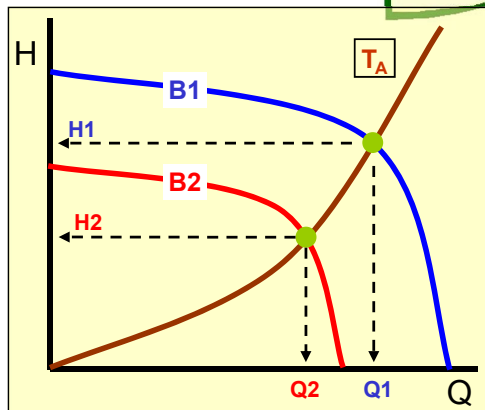
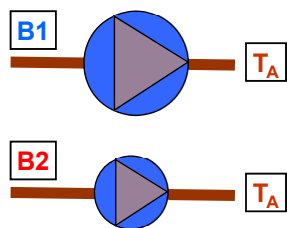


2.- B.C.: Acoplamientos (IV)

En serie-paralelo

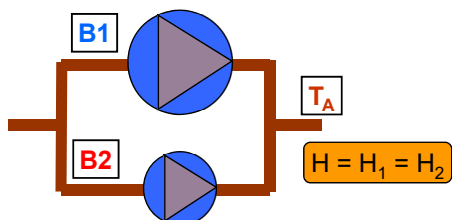


2.- B.C.: Acoplamientos (IV)



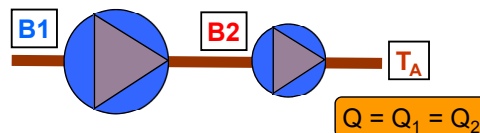
**Paralelo: "suma caudales"**

La presión suministrada por las dos bombas es la misma



**Serie: "suma alturas"**

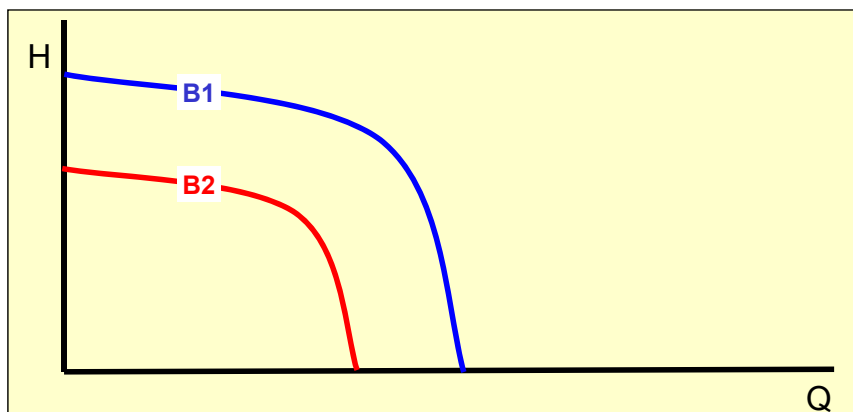
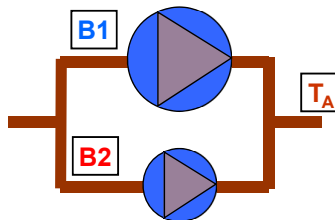
El caudal suministrado por las dos bombas es el mismo



2.- B.C.: Acoplamientos (V)

**Paralelo: "suma caudales"**

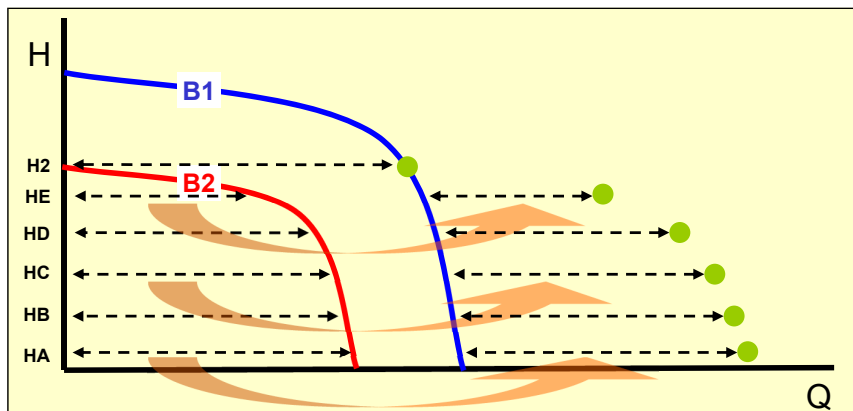
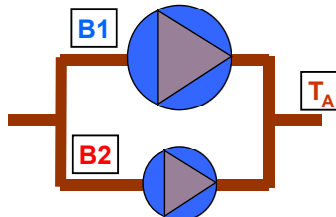
La presión suministrada por las dos bombas es la misma



Para cada H se suman los Q

2.- B.C.: Acoplamientos (V)

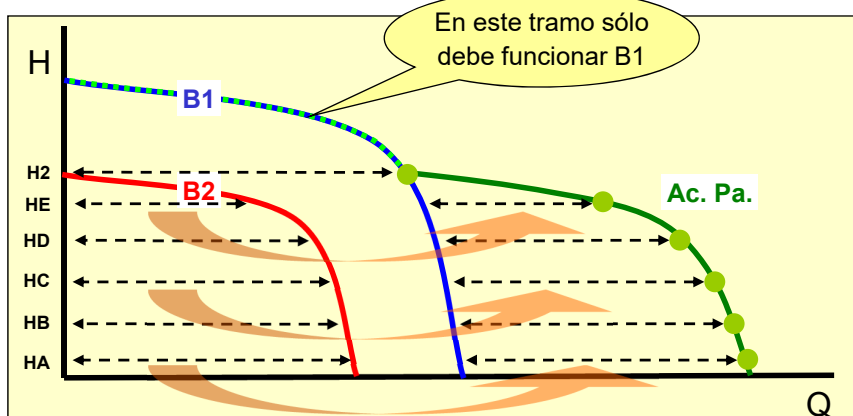
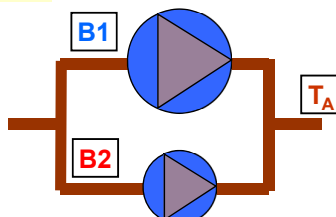
**Paralelo: "suma caudales"**  
La presión suministrada por las dos bombas es la misma



Para cada H se suman los Q

2.- B.C.: Acoplamientos (V)

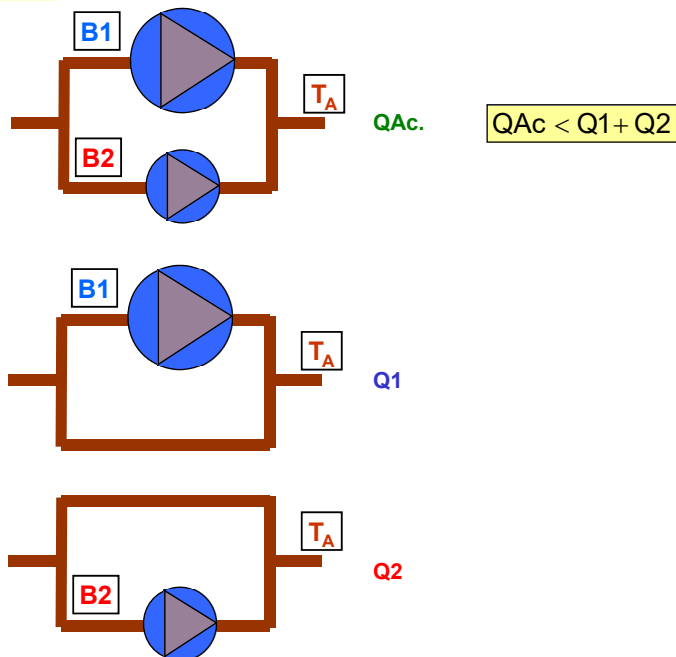
**Paralelo: "suma caudales"**  
La presión suministrada por las dos bombas es la misma



Para cada H se suman los Q

2.- B.C.: Acoplamiento (V)

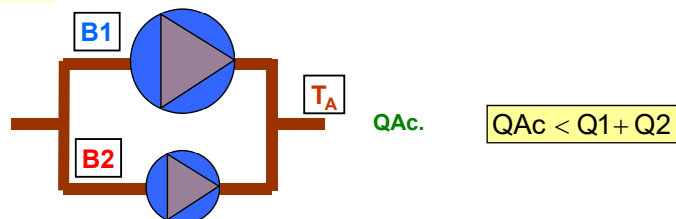
**Paralelo: "suma caudales"**  
La presión suministrada por las dos bombas es la misma



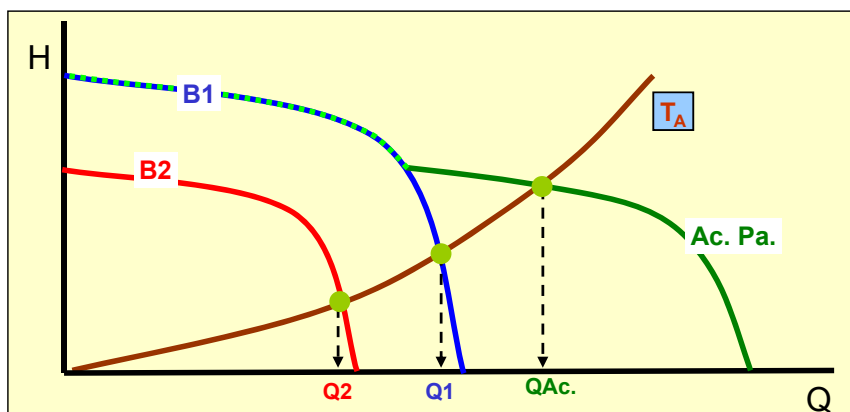
El caudal resultante al enfrentar el acoplamiento a la misma tubería que cada una de las bombas individualmente, es menor que la suma de los caudales de las bombas individuales

2.- B.C.: Acoplamiento (V)

**Paralelo: "suma caudales"**  
La presión suministrada por las dos bombas es la misma

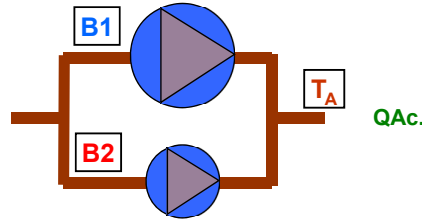


El caudal resultante al enfrentar el acoplamiento a la misma tubería que cada una de las bombas individualmente, es menor que la suma de los caudales de las bombas individuales



2.- B.C.: Acoplamientos (V)

**Paralelo: "suma caudales"**  
La presión suministrada por las dos bombas es la misma

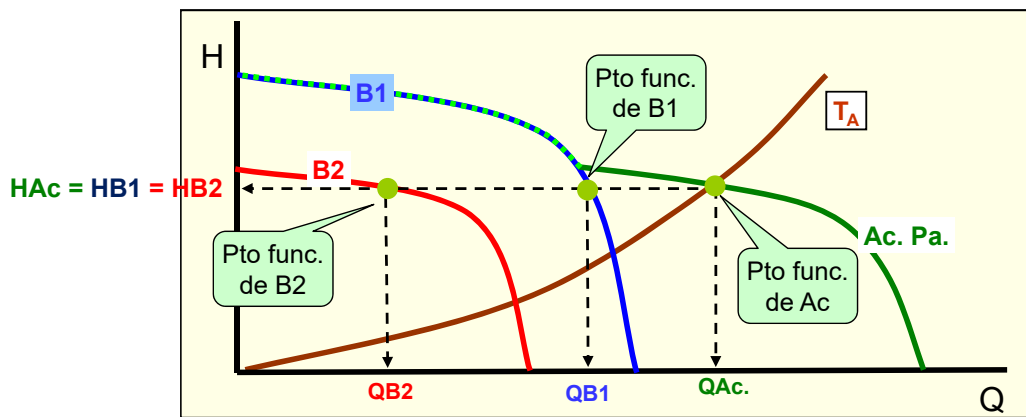


$Q_{Ac} < Q_1 + Q_2$

$Q_{Ac} < Q_1 + Q_2$

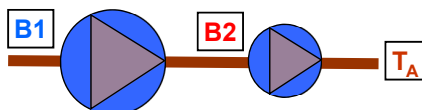
$Q_{Ac} = Q_{B1} + Q_{B2}$

El caudal suministrado por cada bomba:  $Q_{B1}$  y  $Q_{B2}$

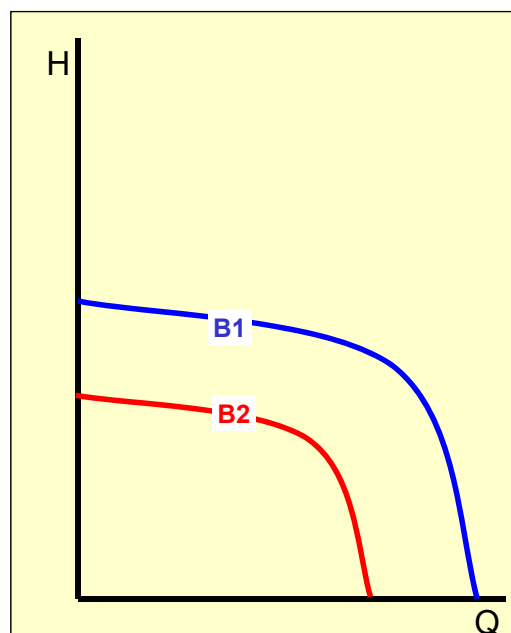


2.- B.C.: Acoplamientos (VI)

**Serie: "suma alturas"**  
El caudal suministrado por las dos bombas es el mismo



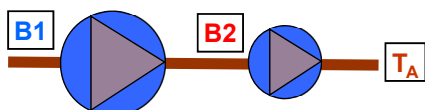
Para cada Q se suman las H



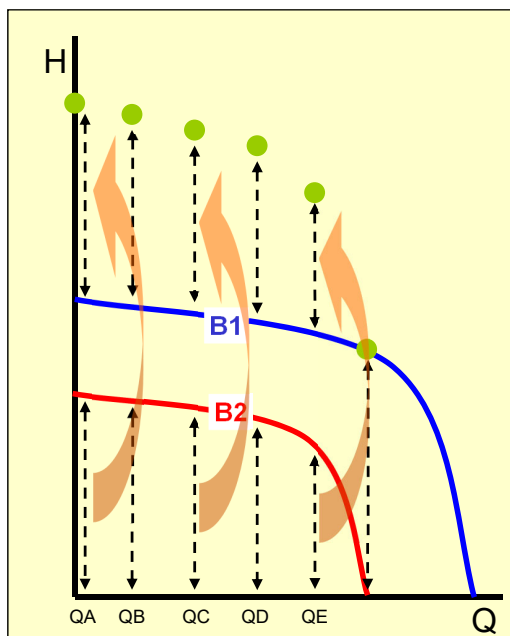
2.- B.C.: Acoplamientos (VI)

Serie: "suma alturas"

El caudal suministrado por las dos bombas es el mismo



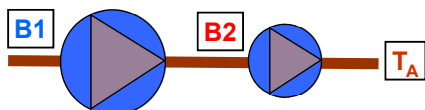
Para cada Q se suman las H



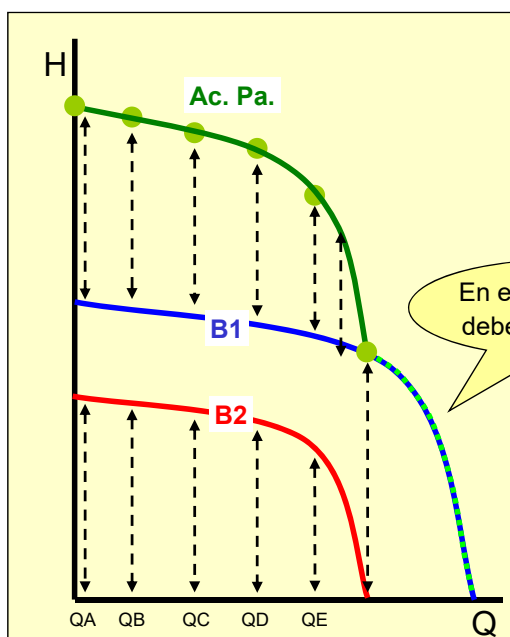
2.- B.C.: Acoplamientos (VI)

Serie: "suma alturas"

El caudal suministrado por las dos bombas es el mismo



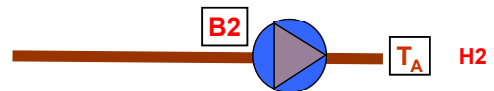
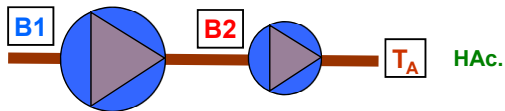
Para cada Q se suman las H



2.- B.C.: Acoplamiento (VI)

**Serie: "suma alturas"**

El caudal suministrado por las dos bombas es el mismo



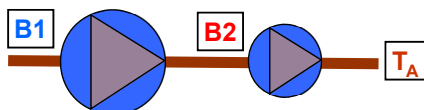
$H_{Ac} < H_1 + H_2$

La altura resultante al enfrentar el acoplamiento a la misma tubería que cada una de las bombas, es menor que la suma de las alturas de las bombas individuales

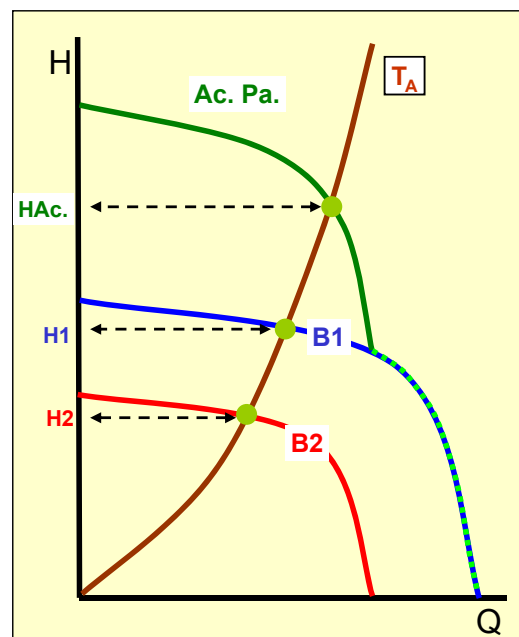
2.- B.C.: Acoplamiento (VI)

**Serie: "suma alturas"**

El caudal suministrado por las dos bombas es el mismo



$H_{Ac} < H_1 + H_2$

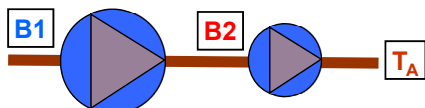


La altura resultante al enfrentar el acoplamiento a la misma tubería que cada una de las bombas, es menor que la suma de las alturas de las bombas individuales

2.- B.C.: Acoplamientos (VI)

Serie: "suma alturas"

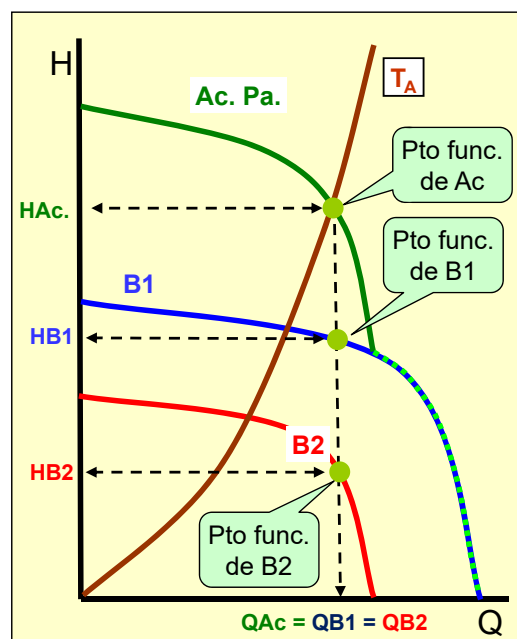
El caudal suministrado por las dos bombas es el mismo



La presión suministrada por cada una de las dos bombas HB1 y HB2

$$H_{Ac} < H_1 + H_2$$

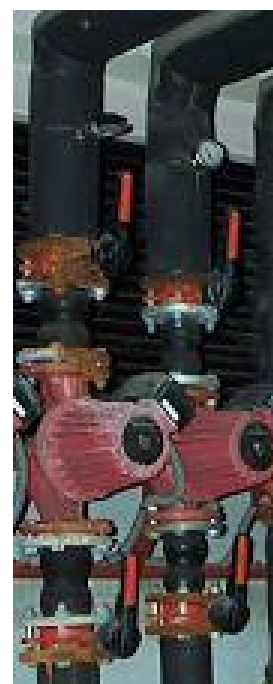
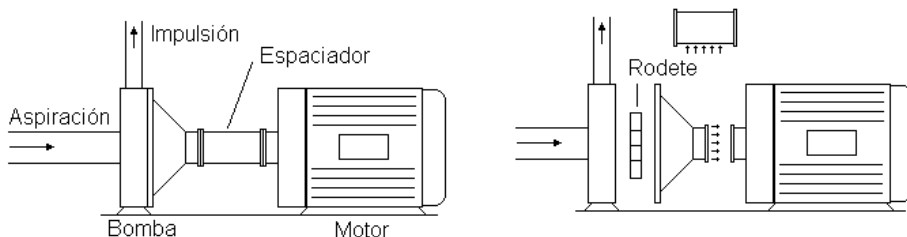
$$H_{Ac} = H_{B1} + H_{B2}$$



2.- B.C.: Montaje e Instalación (I)

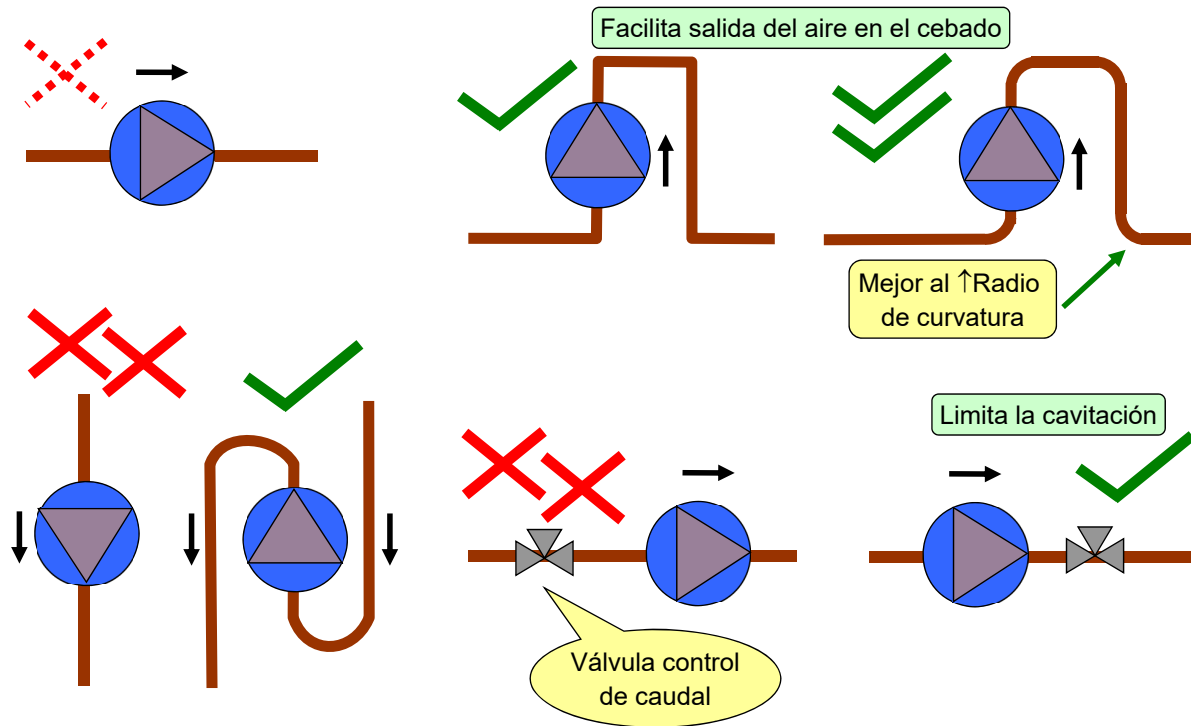
Se debe tener en cuenta:

- Lugar accesible
- Fácil aspiración
- Cebado, válvulas de pie de pozo
- Alineación
- Uniones flexibles
- Válvulas de retención
- Conos difusores
- Elementos de medida

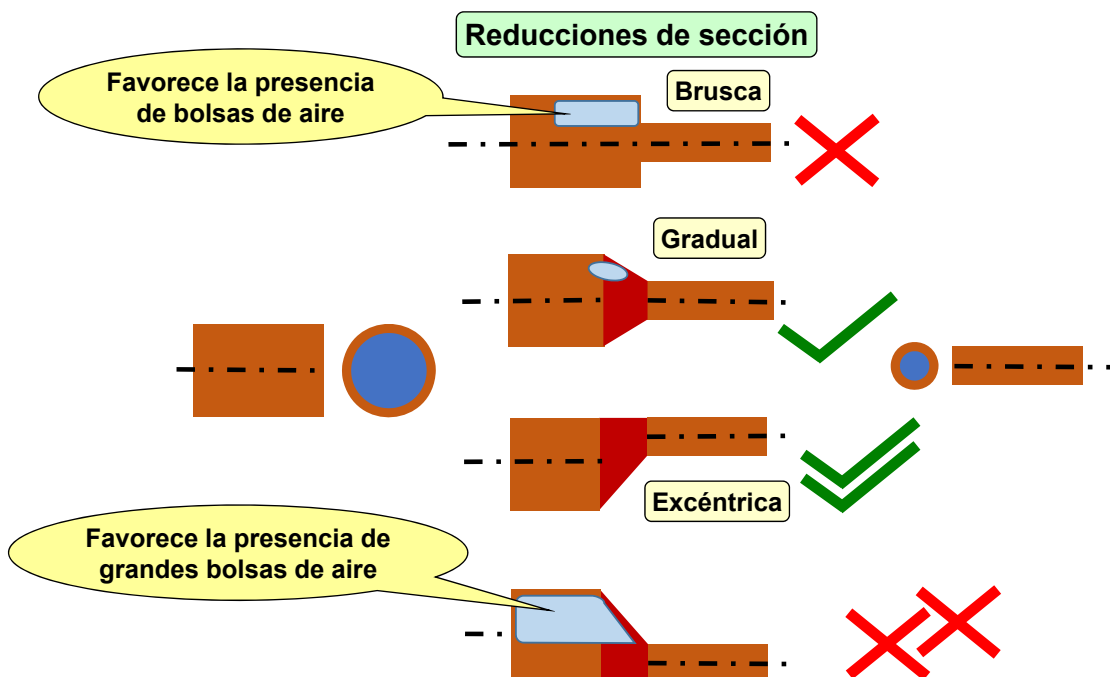




2.- B.C.: Montaje e Instalación (II)

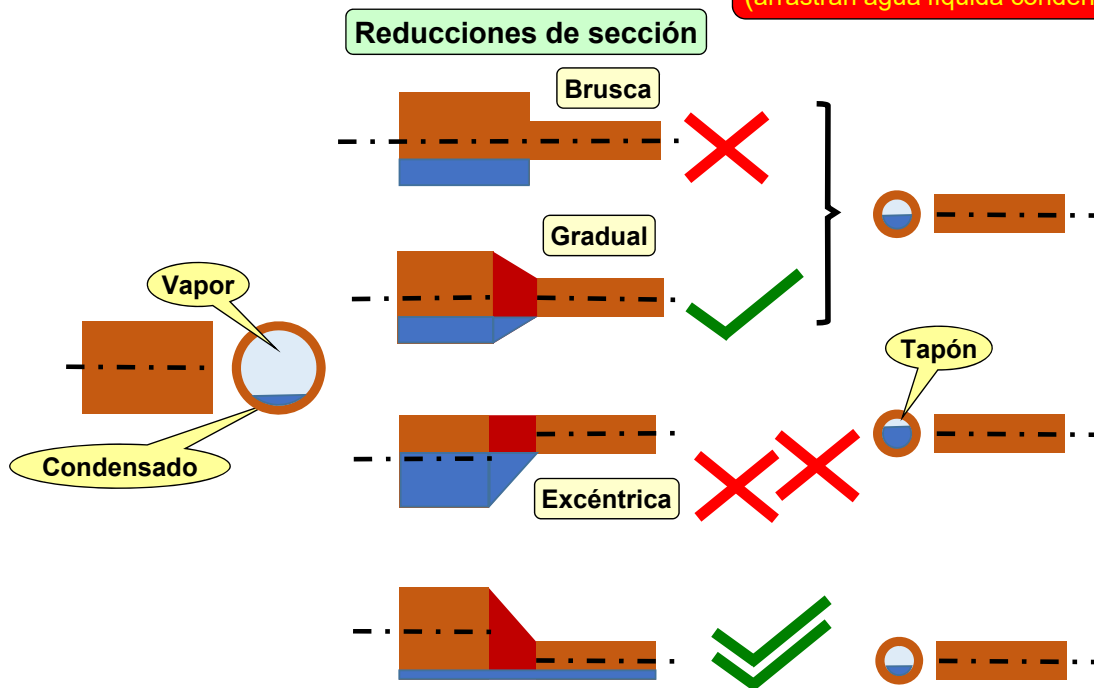


2.- B.C.: Montaje e Instalación (III)



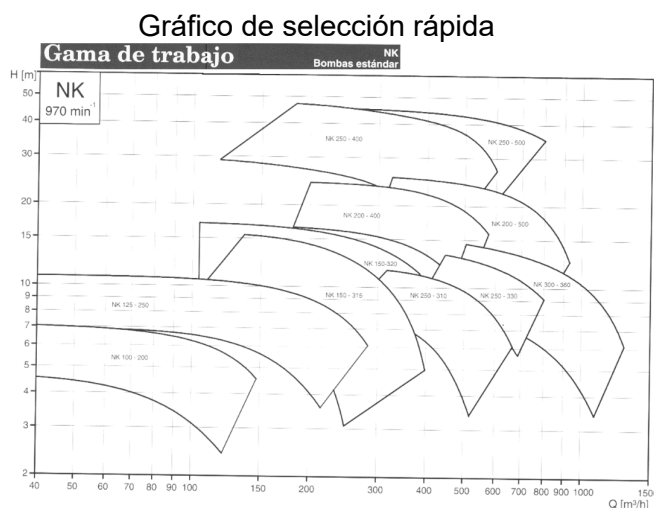
**2.- B.C.: Montaje e Instalación (IV)**

Ojo en tuberías de Vapor, (arrastran agua líquida condensada)

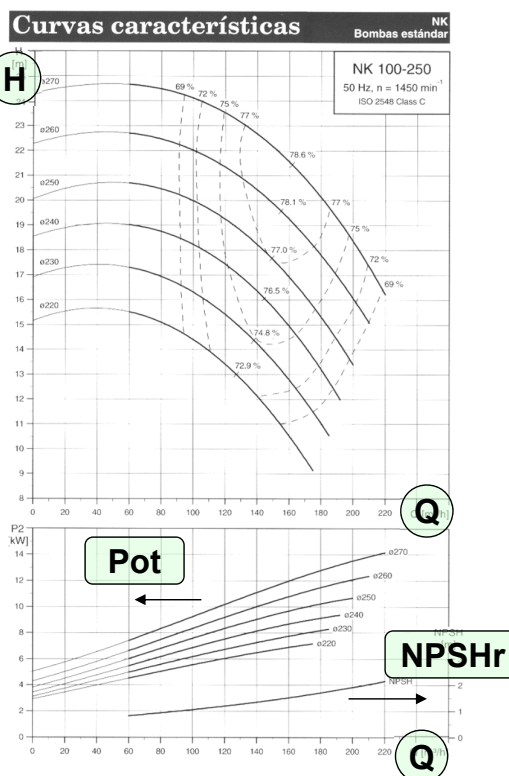


**2.- B.C.: Selección (I)**

Hay que acudir a las curvas del fabricante:

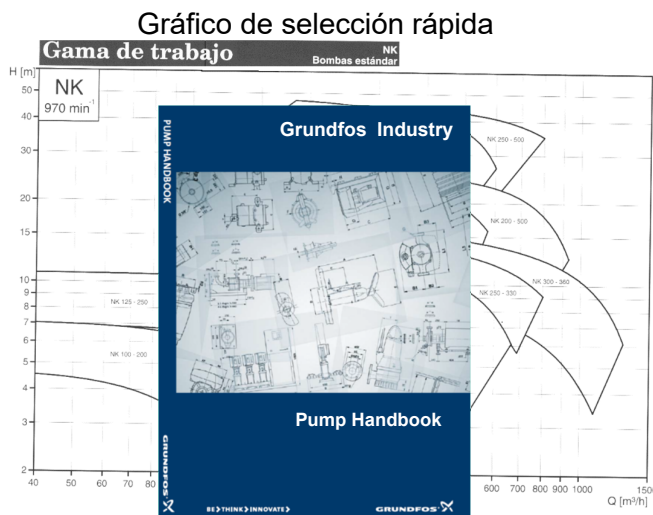


<http://www.grundfos.com/web/homees.nsf>



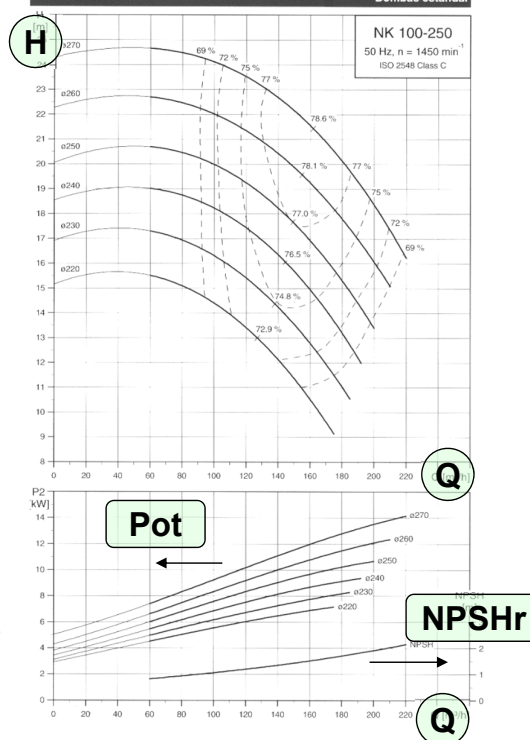
**2.- B.C.: Selección (I)**

Hay que acudir a las curvas del fabricante:



<http://www.grundfos.com/web/homees.nsf>

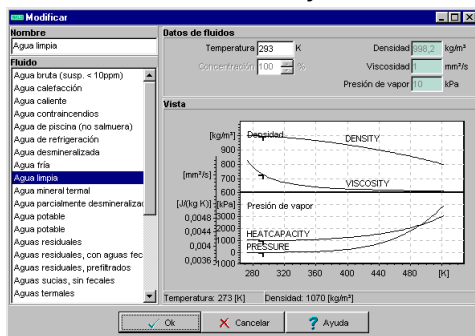
**Curvas características**



**2.- B.C.: Selección (II)**

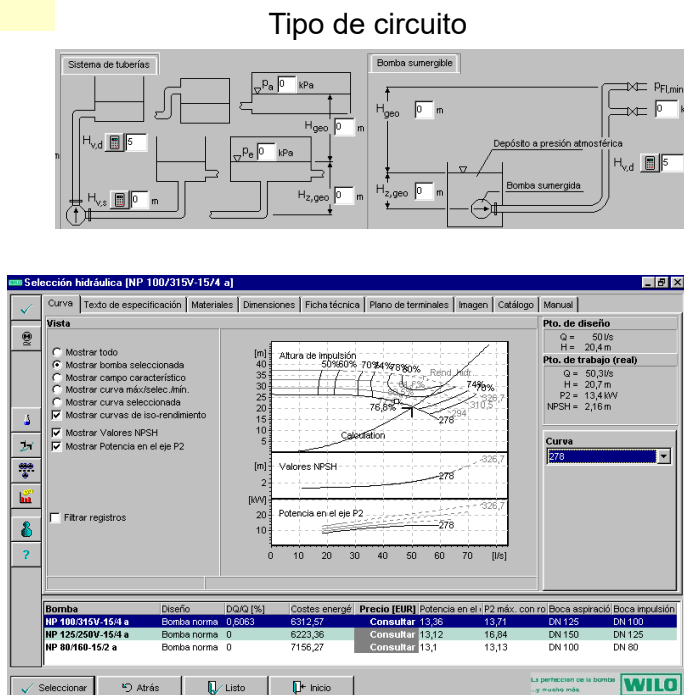
Hay software de fabricantes

**Fluido de trabajo**



En ventiladores es similar

**Resultados**



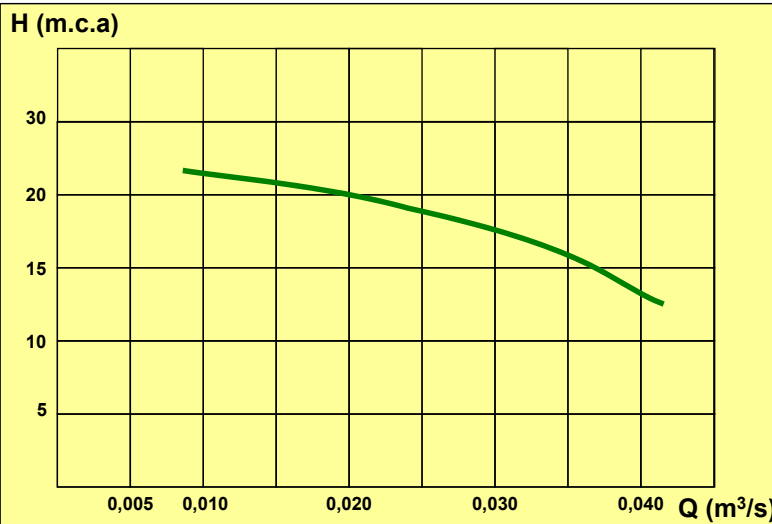
Un bomba girando a 1.750 rpm tiene una curva como la de la figura. La bomba impulsa agua a través de una tubería de 15 cm de diámetro y 450 m de largo con un factor de fricción  $\lambda = 0,025$ . La carga estática es de 10 m y las pérdidas menores se pueden despreciar.

➤ Calcular el punto de funcionamiento de la bomba

Curva tub.  $H_T = A + B \cdot v^2 \Rightarrow A + \infty \cdot Q^2$

A = (Carga estática, elevación) = 10 m

B  $\Rightarrow$  Ec Darcy (T4)  $H_L = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$  (m)



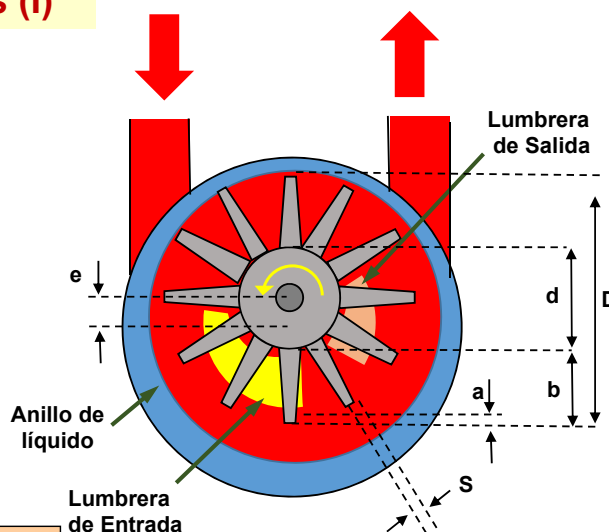
55

2.- B.C.: Otras B; Autocebantes (I)

Bajos rendimientos (20-40%)

**De anillos de agua:**

- Rodete excéntrico
- Lumberras de entrada y salida en las paredes perpendiculares al eje
- Como bombas de vacío con gases

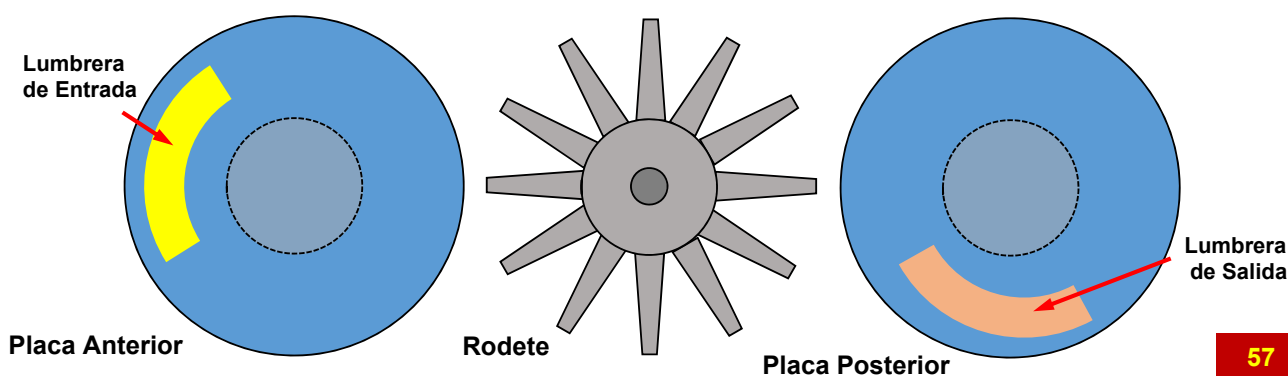


$$Q = \frac{\text{ancho} \cdot n}{60} \cdot \left( \frac{\pi}{4} \cdot (D - a)^2 - d^2 - n^{\circ} \text{alabes} (b - a) \right) \cdot s$$

2.- B.C.: Otras B; Autocebantes (II)

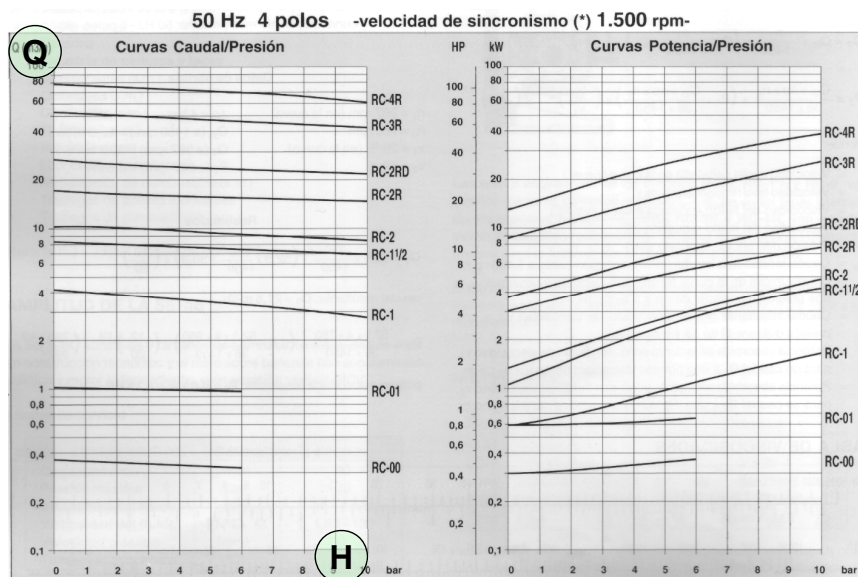
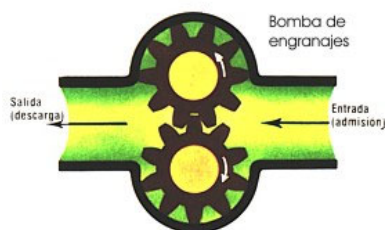
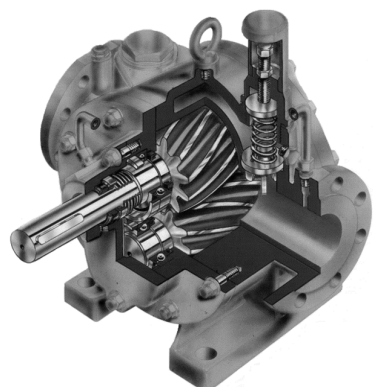
De canales de derivación:

- Rodete concéntrico
- En una, o las dos paredes hay canales de derivación (espiral)
- Lumbreras de entrada y salida en cada una de las paredes
- Trabajan mejor con líquidos



2.- B.C.: Otras B; Engranajes (I)

Para líquidos viscosos: aceites, gasóleos, ...

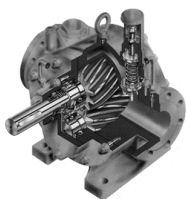


$$Q = cte_1 \cdot n = cte_2$$

$$Pot = \gamma \cdot Q \cdot H = cte_3 \cdot H$$

2.- B.C.: Otras B; Engranajes (II)

FACTORES DE CORRECCION



Cuando la viscosidad del fluido y/o la velocidad de funcionamiento son diferentes a las expresadas en las curvas, los valores de **caudal** y **potencia absorbida** se determinan mediante las siguientes fórmulas:

$$Q_2 = Q_{th} \times \frac{n_2}{1450} - \left( Q_{th} \times \frac{n_1}{1450} - Q_1 \right) \times \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{-1/3}$$

$$P_2 = \frac{Q_{th} \times \Delta p \times n_2}{36 \times 1450} + \left( P_1 - \frac{Q_{th} \times \Delta p \times n_1}{36 \times 1450} \right) \times \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{1/3} \times \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^{4/3}$$

donde:

- $n_1$  = Velocidad inicial señalada en la curva (r.p.m.)
- $n_2$  = Velocidad final requerida (r.p.m.)
- $v_1$  = Viscosidad del fluido señalada en la curva (°E)
- $v_2$  = Viscosidad del fluido requerido (°E)
- $\Delta p$  = Presión diferencial requerida (bar)
- $Q_{th}$  = Caudal teórico de la bomba (m³/h), a presión **cero** y a 1.450 r.p.m.
- $Q_1$  = Caudal inicial de la curva (m³/h), con fluido de viscosidad  $v_1$ , a una presión diferencial de  $\Delta p$  y a  $n_1$  r.p.m.
- $Q_2$  = Caudal resultante (m³/h), con fluido de viscosidad  $v_2$ , a una presión diferencial de  $\Delta p$  y a  $n_2$  r.p.m.
- $P_1$  = Potencia absorbida en la curva (kW), con fluido de viscosidad  $v_1$ , para un caudal  $Q_1$  a una presión diferencial de  $\Delta p$  y a  $n_1$  r.p.m.
- $P_2$  = Potencia absorbida resultante (kW), con fluido de viscosidad  $v_2$ , para un caudal  $Q_2$  a una presión diferencial de  $\Delta p$  y a  $n_2$  r.p.m.

**EJEMPLO.-** Calcular los valores de caudal y potencia absorbida para la bomba RC-3R, con un aceite de viscosidad 12 °E, girando a 780 r.p.m. y una presión diferencial de 4 bar. Se basará en la curva disponible más próxima: 50 Hz - 6 polos - 987 r.p.m.

Datos de partida

- $n_1$  = 987 rpm (en la curva)
- $n_2$  = 780 rpm
- $v_1$  = 20 °E (en la curva)
- $v_2$  = 12 °E
- $\Delta p$  = 4 bar
- $Q_{th}$  (a 1450 rpm) = 52,5 m³/h
- $Q_1$  (a 987 rpm) = 30,3 m³/h
- $P_1$  (a 987 rpm) = 8,6 kW

Resultados

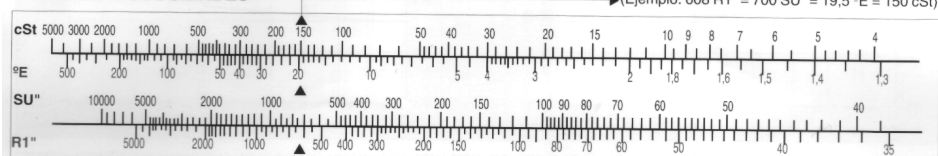
$$Q_2 = 52,5 \times \frac{780}{1450} - \left( 52,5 \times \frac{987}{1450} - 30,3 \right) \times \left( \frac{12}{20} \right)^{-1/3}$$

caudal resultante:  $Q_2 = 21,8 \text{ m}^3/\text{h}$

$$P_2 = \frac{52,5 \times 4 \times 780}{36 \times 1450} + \left( 8,6 - \frac{52,5 \times 4 \times 950}{36 \times 1450} \right) \times \left( \frac{12}{20} \right)^{1/3} \times \left( \frac{780}{987} \right)^{4/3}$$

potencia absorbida resultante:  $P_2 = 6,0 \text{ kW} = 8,15 \text{ HP}$

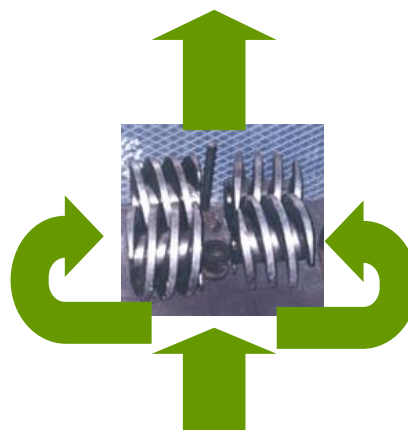
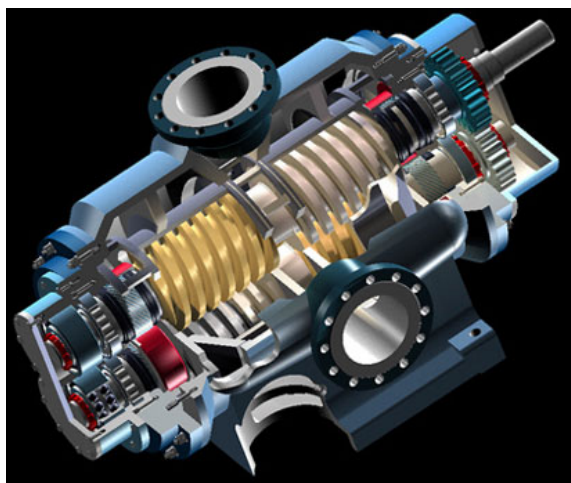
TABLA DE VISCOSIDADES



2.- B.C.: Otras B; Tornillo (I)

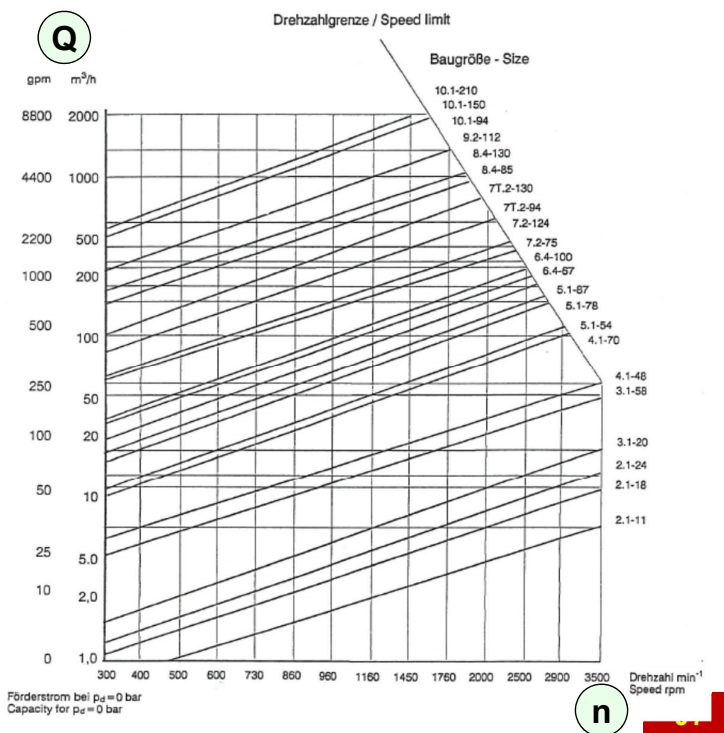
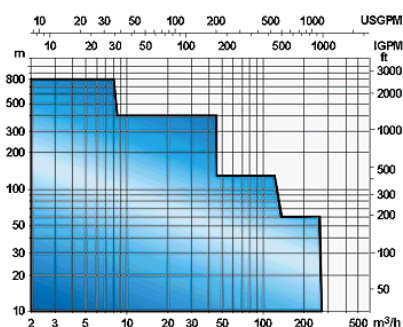
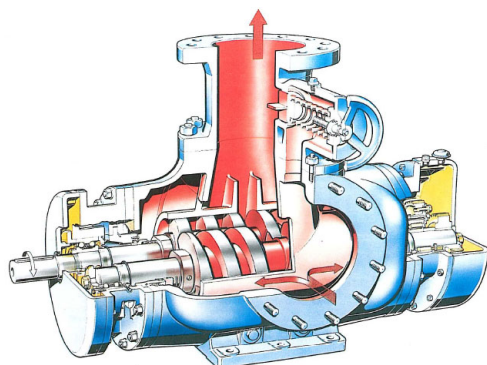
Líquidos viscosos

Hasta presiones > 100 bar



Limitar esfuerzos axiales

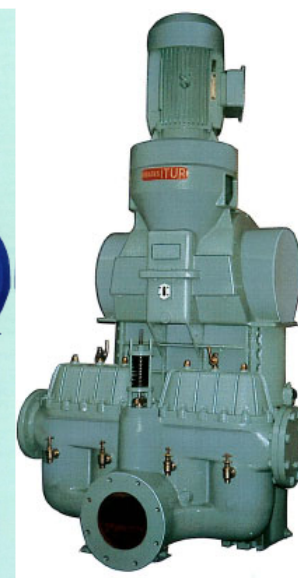
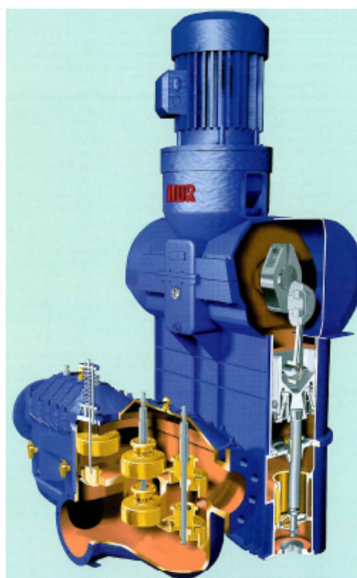
**2.- B.C.: Otras B; Tornillo (II)**



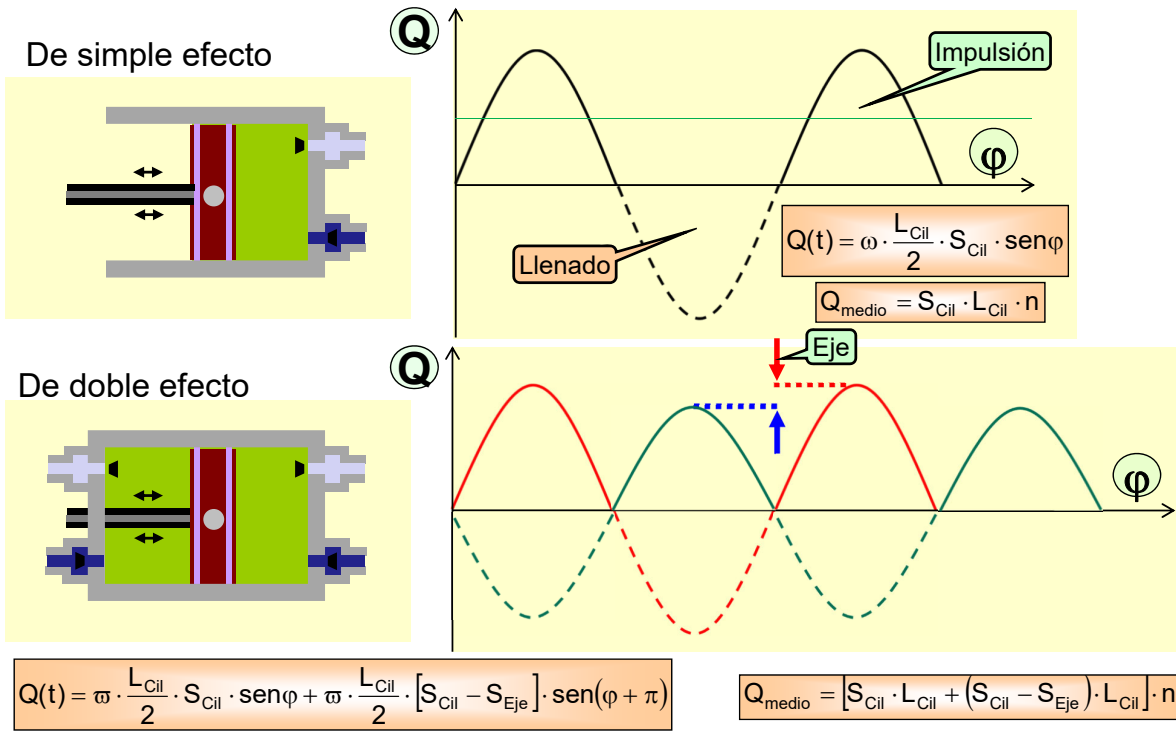
**2.- B.C.: Otras B; Pistones (I)**

Bajos caudales y grandes presiones

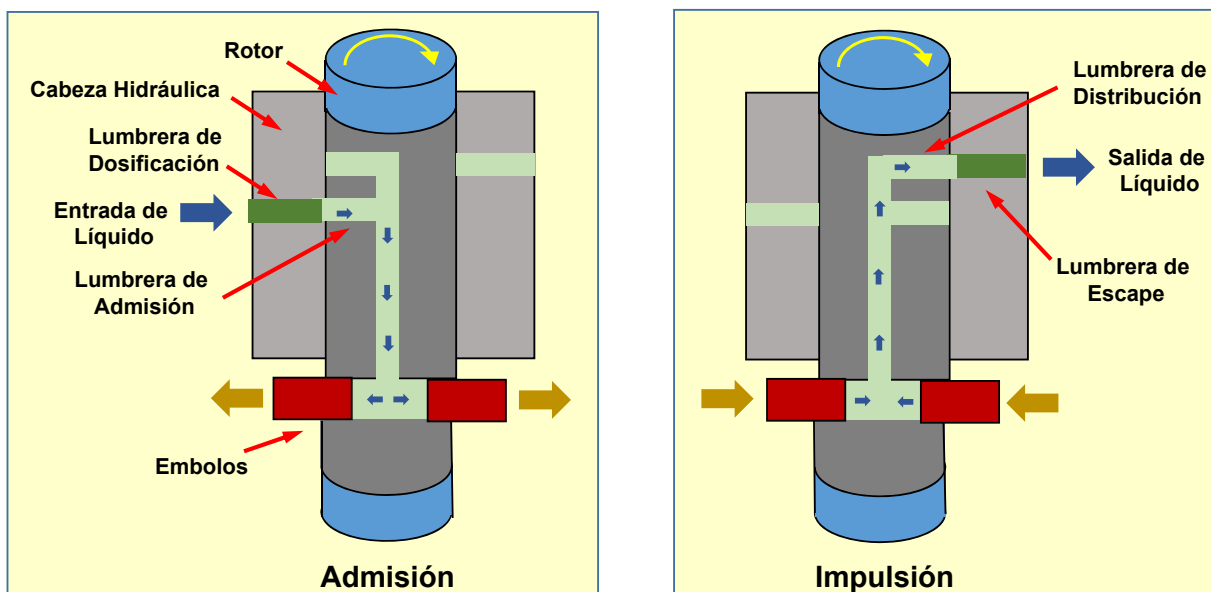
Líquidos limpios



2.- B.C.: Otras B; Pistones (II)



2.- B.C.: Otras B; Dosificadoras



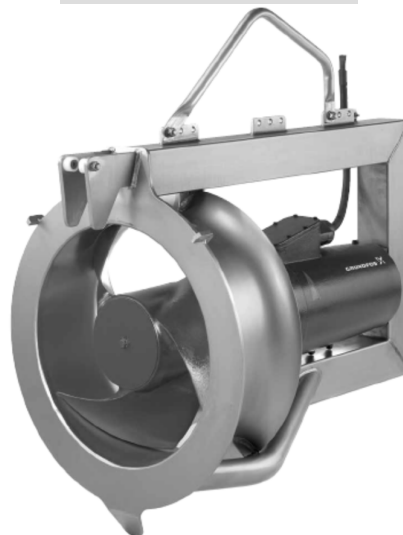


**2.- B.C.: Otras B; Axiales**

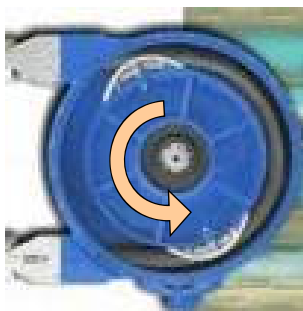
Agitador



Recirculadoras

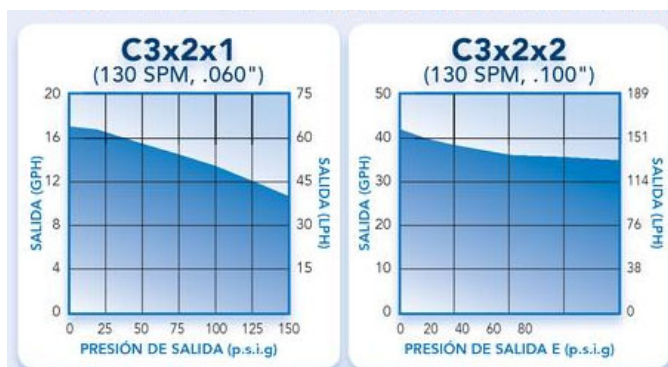


**2.- B.C.: Otras B; Peristálticas**



Empleadas para bombear:

- Fluidos estériles (evitar contaminación)
- Fluidos agresivos (evitar daño en la bomba)



Una bomba de émbolo de doble efecto ( $d_{\text{embolo}} = 250 \text{ mm}$ ,  $d_{\text{vástago}} = 50 \text{ mm}$ , carrera = 375 mm,  $n = 60 \text{ rpm}$ ) tiene una presión en la aspiración de -4,5 m.c.a. y de impulsión de 18 m.c.a., calcular:

- La fuerza que requiere la bomba en las dos carreras
- El caudal de la bomba
- La potencia absorbida

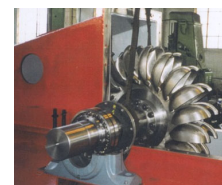
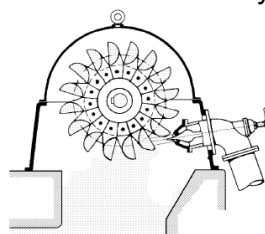
67

### 3.- Turbinas Hidráulicas

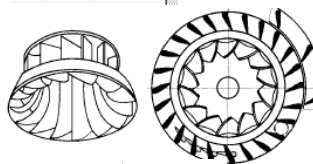
Aprovechan la energía potencial o cinética de un líquido para transformarla en energía mecánica

Existen múltiples tipos; su clasificación se suele hacer en de acción y de reacción

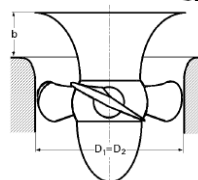
• **Turbina Pelton:** de acción, cazoletas e inyector, en saltos grandes con pequeños caudales.



• **Turbina Francis:** de reacción, álabes, distribuidor, en pequeños saltos y grandes caudales.



• **Turbina Kaplan:** de reacción, "similar" a una hélice. Para pequeños saltos hidráulicos.



8

Un turbina desarrolla en el eje 93 kW bajo un salto de 64 m

- Cual es el caudal si el rendimiento de la turbina es el 90%
- Cuanto se incrementa su velocidad si el nivel del salto en la presa asciende hasta 88 m
- Si se mantiene el rendimiento, cual sería la potencia desarrollada en la nueva situación
- Cual es el caudal con el nuevo salto de 88 m
- Cuanto habría que reducir el caudal para que mantuviera la velocidad de giro inicial
- Si se mantuviera el rendimiento, cual sería la potencia desarrollada en esta nueva situación

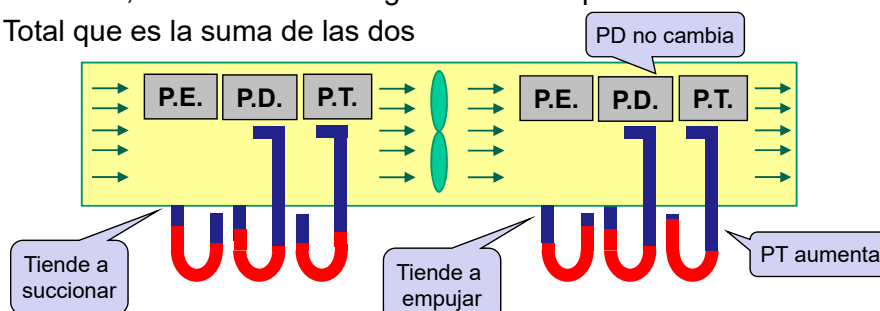
#### 4.- Ventiladores (I)

Destinados a producir **movimiento de aire**. Los conceptos fundamentales son:

- Caudal volumétrico.
- Incremento de la presión estática.
- Potencia disponible.
- Rendimiento del ventilador.
- Ruido, las dimensiones, o el modo de arrastre

Tres tipos de **presiones**:

- Presión estática, sobre las paredes del conducto
- Dinámica, al convertir la energía cinética en presión
- Total que es la suma de las dos



#### 4.- Ventiladores (II)

##### Clasificación (I):

- Por **la diferencia de presión estática**:
  - Alta presión:  $180 < \Delta p < 300$  mm.c.a.
  - Media presión:  $90 < \Delta p < 180$  mm.c.a.
  - Baja presión:  $\Delta p < 90$  mm.c.a.
- Por el **sistema de accionamiento**:
  - Accionamiento directo
  - Accionamiento indirecto por transmisión
- Por el **modo de trabajo**:
  - **Ventiladores axiales**: mueven grandes caudales con incrementos de presión estática baja.
    - Hélice
    - *Tubo axial*: en una envolvente, dan mayores presiones, generan mucho ruido

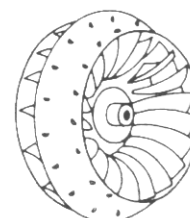
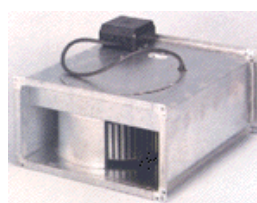


71

#### 4.- Ventiladores (III)

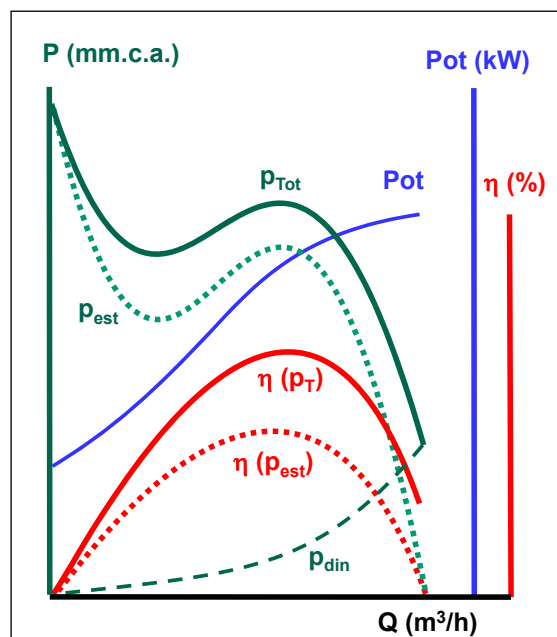
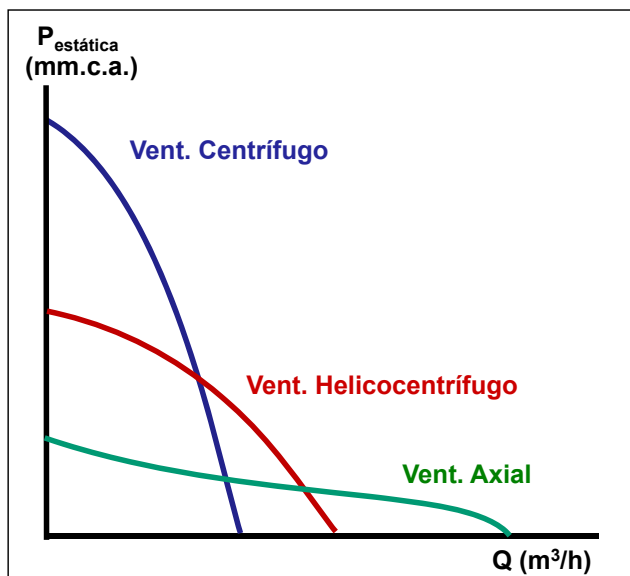
##### Clasificación (II):

- Por el **modo de trabajo (II)**:
  - **Ventiladores centrífugos**: el flujo de salida es perpendicular al de entrada.
    - De alabes curvados hacia delante
    - De alabes curvados hacia atrás
    - *De álabes rectos a radiales*; captación de residuos
  - **Ventiladores transversales**; la trayectoria del aire en el rodete es normal al eje tanto a la entrada como a la salida.
  - **Ventiladores helicocentrífugos**; son intermedios entre los centrífugos y los axiales, en ellos el aire entra como en los helicoidales y sale como en los centrífugos

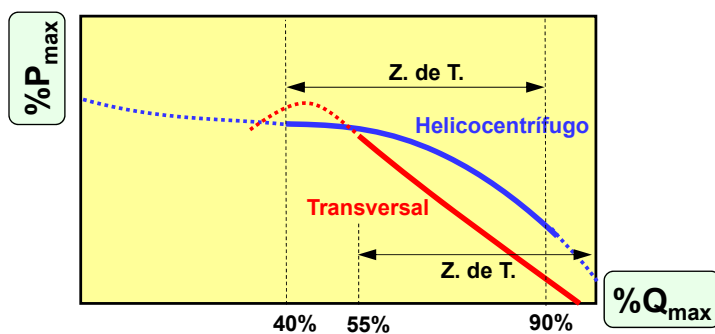
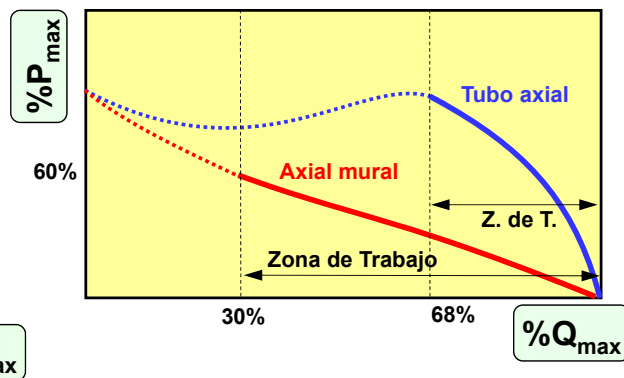
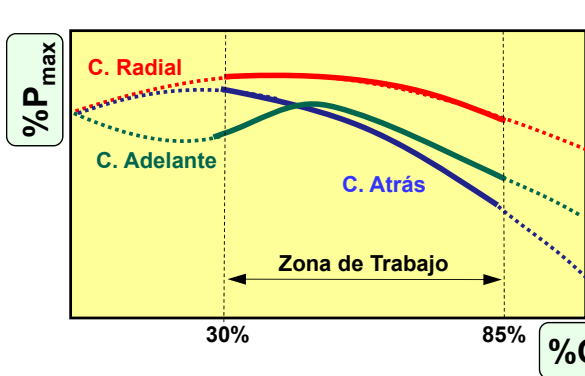


72

**4.- V.: Curvas Características (I)**



**4.- V.: Curvas Características (II)**



### 4.- V.: Leyes de semejanza (I)

Son iguales para las B.C.

- Variación de la velocidad de giro: **En m.c. del fluido**

$$Q = Q_0 \cdot \frac{n}{n_0} \quad H = H_0 \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \quad \text{Pot} = \text{Pot}_0 \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^3 \quad Lw = Lw_0 + 50 \cdot \log\left(\frac{n}{n_0}\right)$$

- Variación del diámetro del rodete: **En m.c. del fluido**

$$Q = Q_0 \cdot \left(\frac{D}{D_0}\right)^3 \quad H = H_0 \cdot \left(\frac{D}{D_0}\right)^2 \quad \text{Pot} = \text{Pot}_0 \cdot \left(\frac{D}{D_0}\right)^5 \quad Lw = Lw_0 + 70 \cdot \log\left(\frac{D}{D_0}\right)$$

- Variación de la densidad del aire: **En Pa**

$$Q = Q_0 \quad H = H_0 \quad p = p_0 \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \quad \text{Pot} = \text{Pot}_0 \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \quad Lw = Lw_0 + 20 \cdot \log\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)$$

**En m.c. del fluido**

Q caudal, H Altura, p presión, Pot Potencia absorbida, Lw ruido

75

### 4.- V.: Leyes de semejanza (II)

Son iguales para las B.C.

- Variación de las prestaciones:

$$D = D_0 \cdot \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{1/4} \quad \text{Pot} = \text{Pot}_0 \cdot \left(\frac{Q}{Q_0}\right) \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)$$

$$n = n_0 \cdot \left(\frac{Q_0}{Q}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^{3/4} \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{3/4} \quad Lw = Lw_0 + 10 \cdot \log\left(\frac{Q}{Q_0}\right) + 20 \cdot \log\left(\frac{H}{H_0}\right)$$

- Variación varios parámetros:

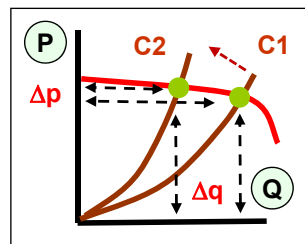
$$Q = Q_0 \cdot \left(\frac{D}{D_0}\right)^3 \cdot \frac{n}{n_0} \quad \text{Pot} = \text{Pot}_0 \cdot \left(\frac{D}{D_0}\right)^5 \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^5 \cdot \frac{\rho}{\rho_0}$$

$$n = n_0 \cdot \left(\frac{Q_0}{Q}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^{3/4} \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{3/4} \quad Lw = Lw_0 + 70 \cdot \log\left(\frac{D}{D_0}\right) + 50 \cdot \log\left(\frac{n}{n_0}\right) + 20 \cdot \log\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)$$

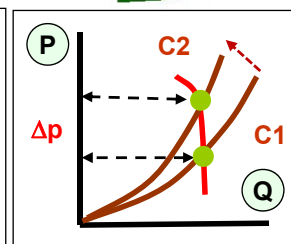
76

4.- V.: Pto Funcionamiento

Depende del sistema de distribución de aire (es cambiante, filtros)



Para Q variable

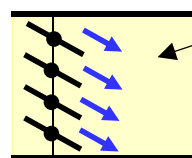
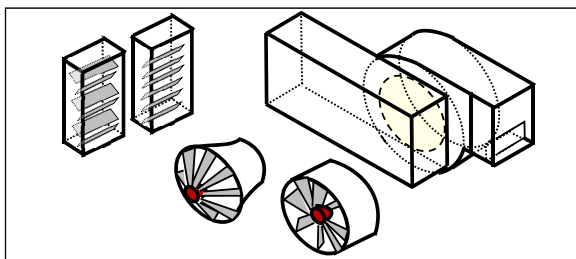


Para Q cte

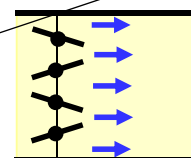
Control del caudal

Ventilador	Sistema de regulación	Zona posible de regulación		Zona de regulación recomendada		Coste inicial	Consumo energía	Nivel acústico
		de %	a %	de %	a %			
Centrífugo y helicoidal	Compuerta	100	70	100	90	Bajo	Malo	Malo
	Bypas	100	0	100	80	Alto	Regular	-
	Reg. velocidad	100	20	100	20	Medio	Bueno	Regular
Helicoidal	Ang. álabes	100	0	100	0	Muy alto	Muy bueno	Bueno

No



Compuertas de lamas paralelas

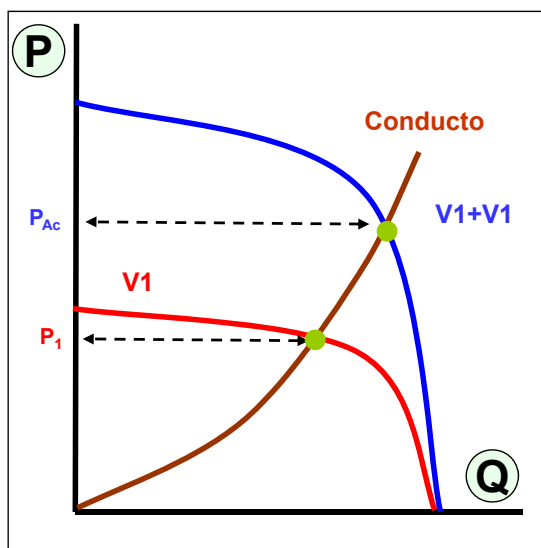


Compuertas de lamas opuestas

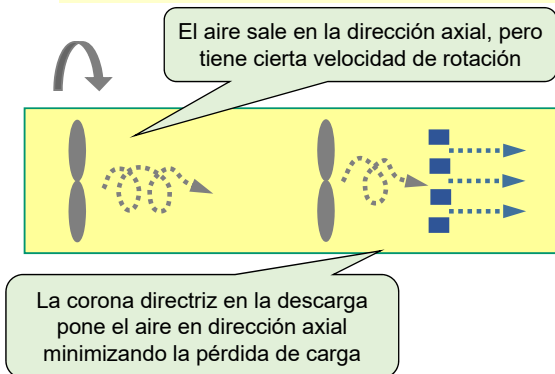
4.- V.: Acoplamiento (I)

**Serie:** "suma de presiones"

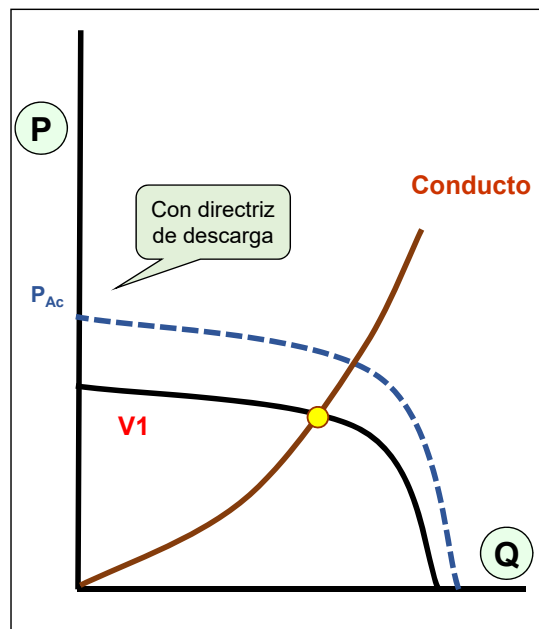
El caudal suministrado por los dos ventiladores es el mismo



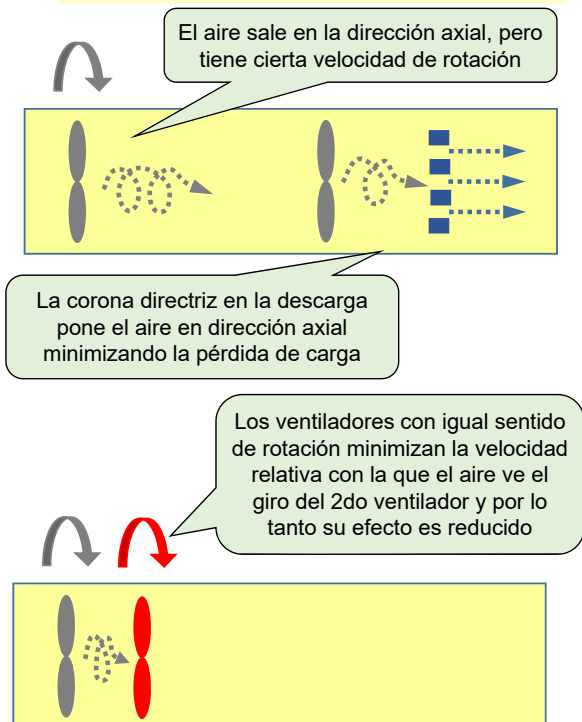
**4.- V.: Acoplamiento (II)**



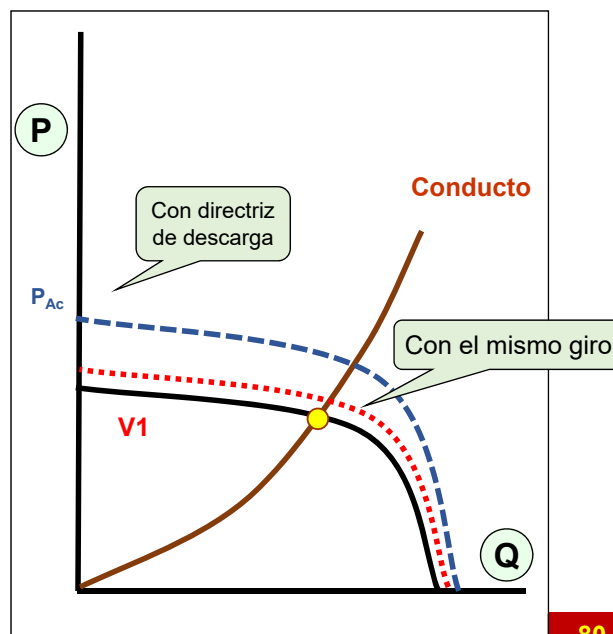
**• V. tuboaxiales en serie**



**4.- V.: Acoplamiento (III)**

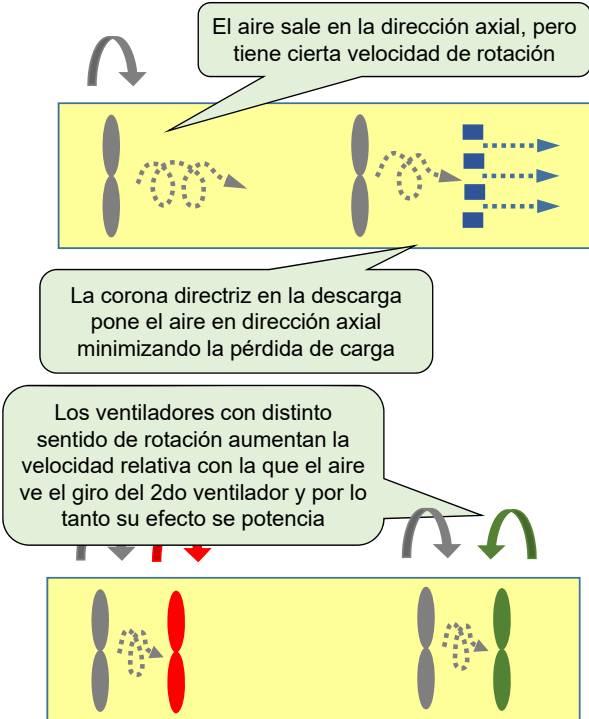


**• V. tuboaxiales en serie**

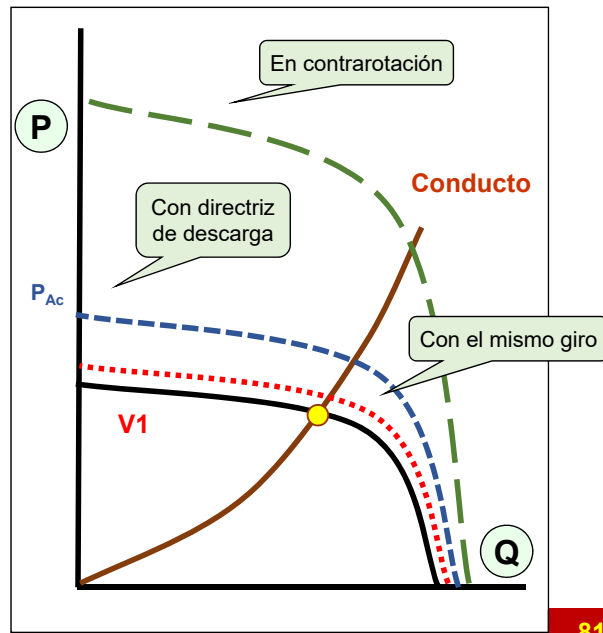




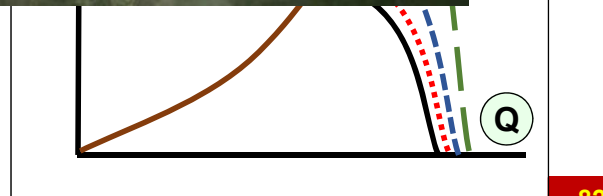
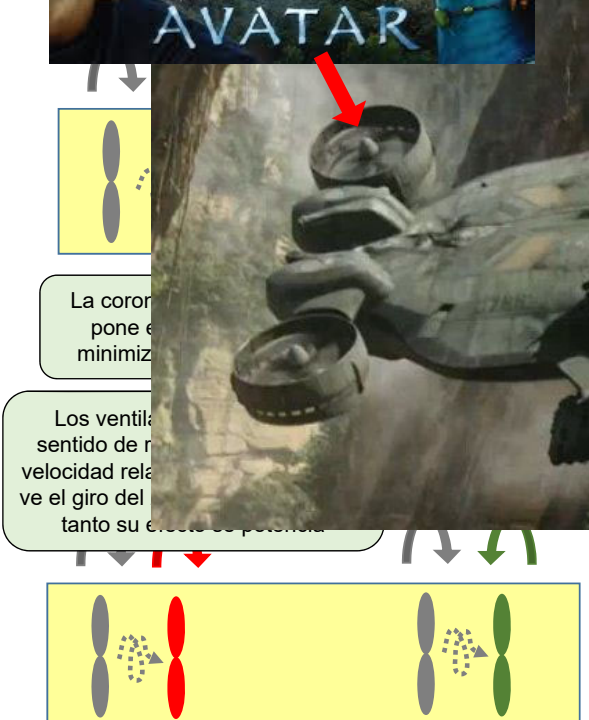
4.- V.: Acoplamiento (IV)



• V. tuboaxiales en serie

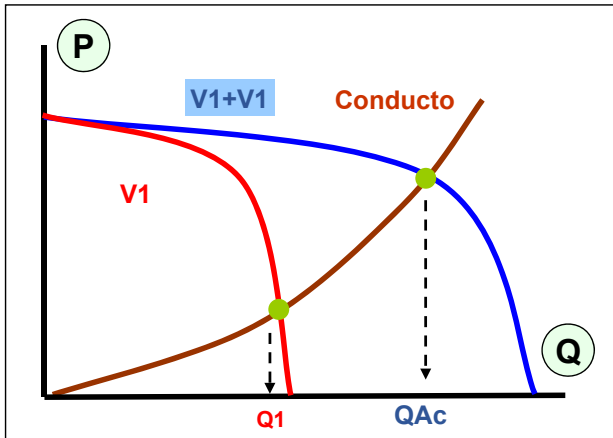


• V. tuboaxiales en serie

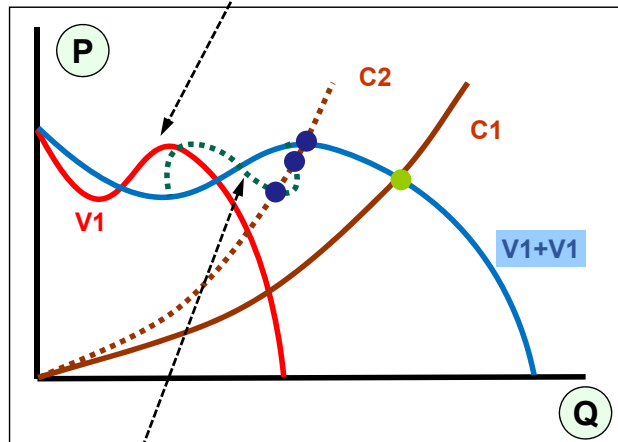


4.- V.: Acoplamiento (V)

**Paralelo:** "suma de caudales"  
La presión suministrada por los dos ventiladores es la misma



Cuidado con los acoplamientos en serie cuando la curva del ventilador presenta un máximo relativo



La curva del acoplamiento serie presenta una forma extraña, y puede que el funcionamiento sea inestable

4.- V.: Selección (I)

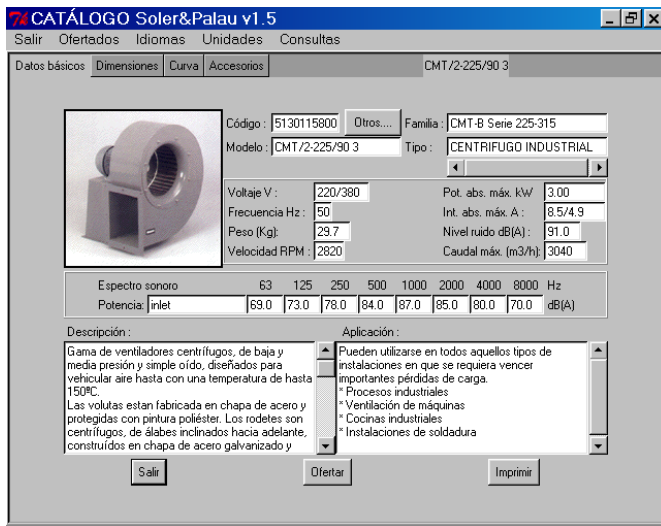
Datos generales

Datos del conducto

Pdc acum. (mmH2O)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Anchura (mm)	Caudal (m3/h)	Longitud (m)	Nº codos
1.5	630	XXXXXX	XXXXXX	3000	35	4

**4.- V.: Selección (II)**

**Ventilador**



**CATÁLOGO Soler&Palau v1.5**

Salir Ofertados Idiomas Unidades Consultas

Datos básicos Dimensiones Curva Accesorios CMT/2-225/90 3

Código: 5130115800 Otros... Familia: CMT-B Serie 225-315  
 Modelo: CMT/2-225/90 3 Tipo: CENTRIFUGO INDUSTRIAL

Voltaje V: 220/380 Pot. abs. máx. kW: 3.00  
 Frecuencia Hz: 50 Int. abs. máx. A: 8.5/4.9  
 Peso (Kg): 29.7 Nivel ruido dB(A): 91.0  
 Velocidad RPM: 2820 Caudal máx. (m<sup>3</sup>/h): 3040

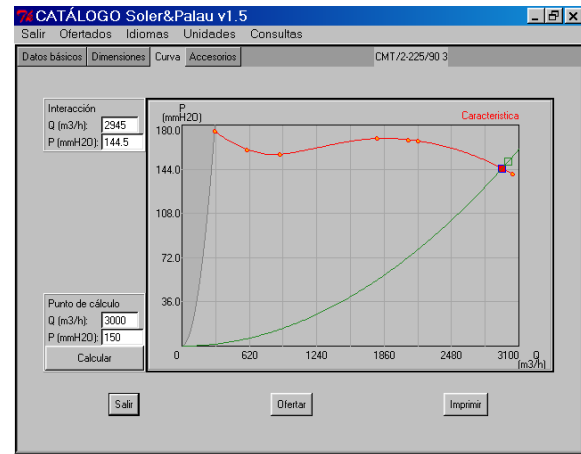
Espectro sonoro		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Hz
Potencia:	inlet	69.0	73.0	78.0	84.0	87.0	85.0	80.0	70.0	dB(A)

Descripción: Gama de ventiladores centrífugos, de baja y media presión y simple oído, diseñados para vehicular aire hasta con una temperatura de hasta 150°C. Las volutas están fabricada en chapa de acero y protegidas con pintura poliéster. Los rodetes son centrífugos, de álabes inclinados hacia adelante, contruístidos en chapa de acero galvanizado y

Aplicación: Pueden utilizarse en todos aquellos tipos de instalaciones en que se requiera vencer importantes pérdidas de carga.  
 \* Procesos industriales  
 \* Ventilación de máquinas  
 \* Cocinas industriales  
 \* Instalaciones de soldadura

Salir Ofertar Imprimir

**Curva ....**



<http://www.soler-palau.com/flash/presentacionSP.html>

<http://www.salvadorescodas.com/sd1/index.htm>

<http://www.sodeca.com/>

[http://www.casals.tv/ventilacion\\_sat/catalogo/index.html](http://www.casals.tv/ventilacion_sat/catalogo/index.html)

85

Un ventilador debe suministrar 5.000 m<sup>3</sup>/h, en sus condiciones normales de presión y T ( $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ ) suministra una presión de 20 mm.c.a. y consume 480 W; calcular el punto de trabajo si se le instala en una cámara de refrigeración a -35°C ( $\rho = 1,48 \text{ kg/m}^3$ )

86

Un ventilador aspira de una gran habitación que está a 725 mm.Hg y  $1,15 \text{ kg/m}^3$ , el aire se impulsa por un conducto rectangular de  $0,25 \text{ m}^2$ . a la salida del ventilador la presión es de 75 mm.c.a, y un tubo de Prandtl marca una presión (dinámica) de 88 mm.c.a., calcular:

- Las presiones estática, dinámica y total que suministra el ventilador
- La velocidad de aire en el conducto de salida
- Caudal de aire que proporciona el ventilador
- Potencia suministrada por el ventilador

### 5.- Compresores (I)

#### *Clasificación por el accionamiento*

- **Eléctrico**, más habituales, problema de saturación de la líneas eléctricas
- Por **motores de gas**, fácil regulación de velocidad, requieren de instalación adicional y mantenimiento.



5.- Compresores (II)

Clasificación por separación del compresor y el accionamiento

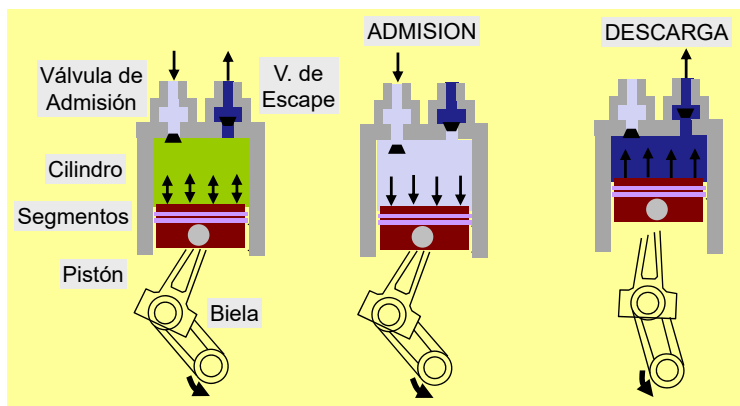
- **Abiertos**, separación entre el compresor y el accionamiento, tiene partes accesibles, problema de estanqueidad en el eje.
- **Herméticos**, generalizados en los equipos de pequeña potencia, hay interacción de las averías.
- **Semiherméticos**, herméticos con cierta accesibilidad.



5.- Compresores (III)

Clasificación por el modo de compresión (I)

- **Alternativos:**
  - Flujo pulsante (varios cilindros)
  - Necesitan válvulas (ruido)
  - La presión de descarga se auto ajusta



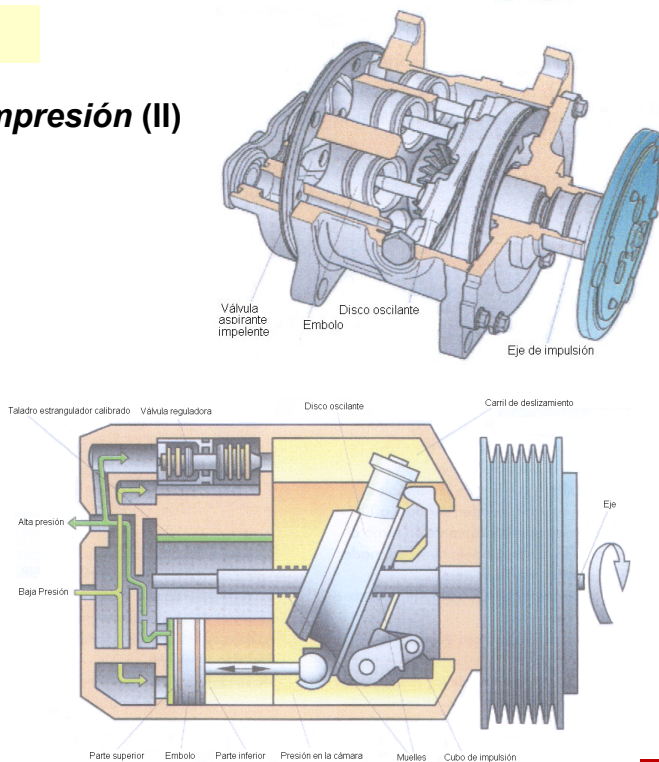
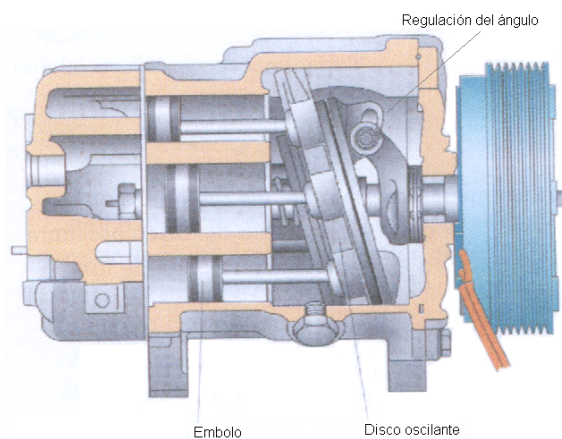
$p_{adm} > p_{int} \Rightarrow V.A. \text{ abierta}$	$p_{adm} < p_{int} \Rightarrow V.A. \text{ cerrada}$
$p_{des} > p_{int} \Rightarrow V.D. \text{ cerrada}$	$p_{des} < p_{int} \Rightarrow V.D. \text{ abierta}$

La capacidad se puede regular descargando cilindros

5.- Compresores (IV)

Clasificación por el modo de compresión (II)

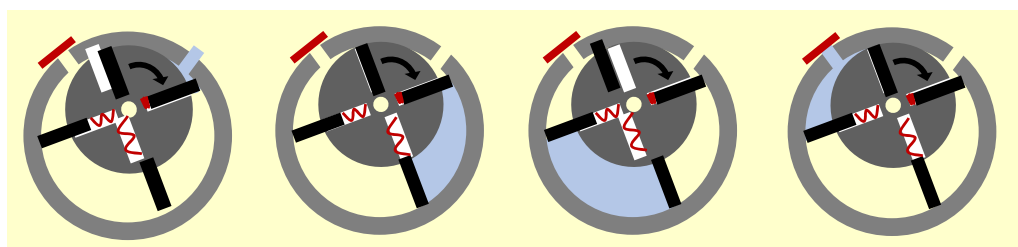
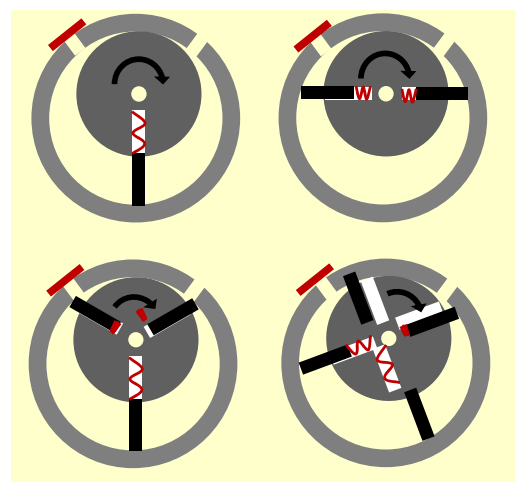
- De pintones axiales:



5.- Compresores (V)

Clasificación por el modo de comp. (III)

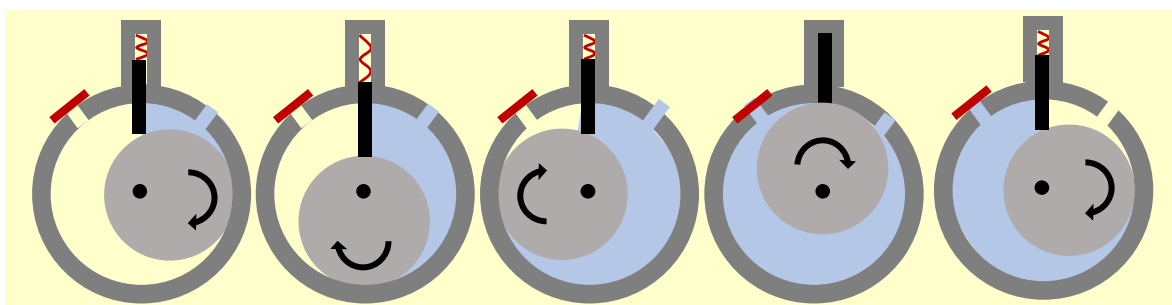
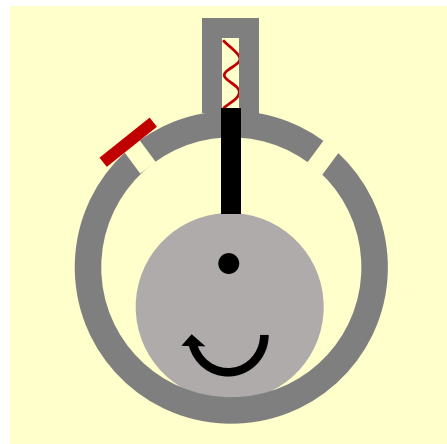
- Rotativos (I): no tienen válvulas de admisión
  - De Paletas: silenciosos, pero muy sensibles a la entrada de líquido



5.- Compresores (VI)

Clasificación por el modo de comp. (IV)

- **Rotativos (I):** no tienen válvulas de admisión
  - De Paletas: silenciosos, pero muy sensibles a la entrada de líquido
  - De Rodillo: débil estanqueidad

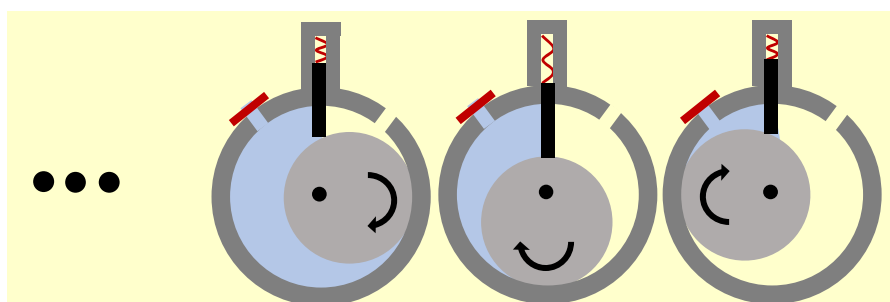
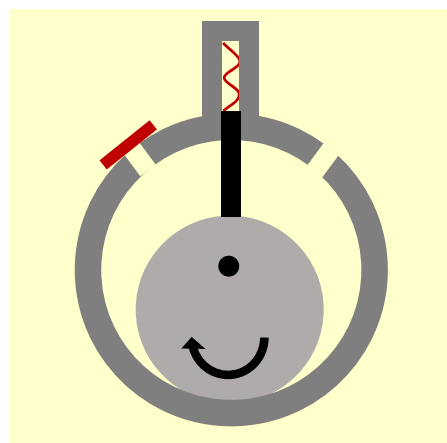


93

5.- Compresores (VI)

Clasificación por el modo de comp. (IV)

- **Rotativos (I):** no tienen válvulas de admisión
  - De Paletas: silenciosos, pero muy sensibles a la entrada de líquido
  - De Rodillo: débil estanqueidad



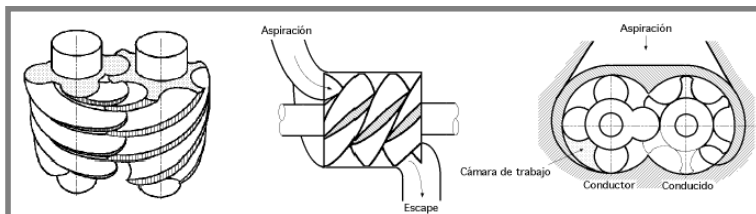
94

5.- Compresores (VII)

Clasificación por el modo de compresión (IV)

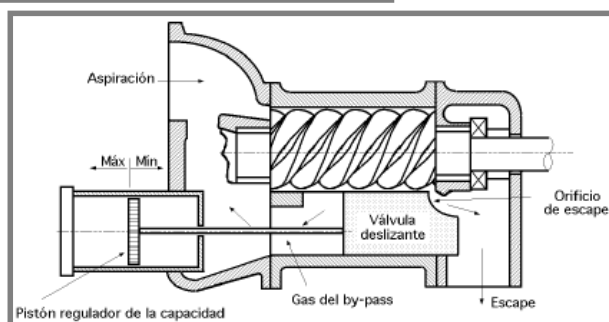
• Rotativos (II):

- De Doble Tornillo: el sellado entre la alta y la baja presión se realiza con el aceite lubricante.



Sin válvulas, tiene fija la relación de compresión

Regulación de capacidad y relación de compresión con lumbrera de descarga

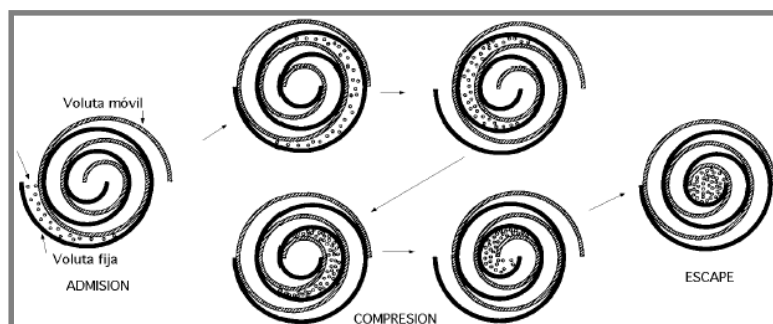
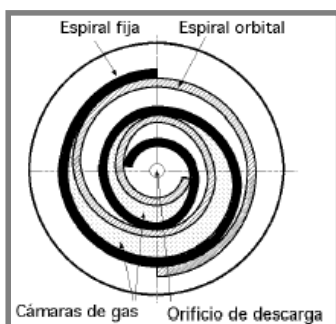
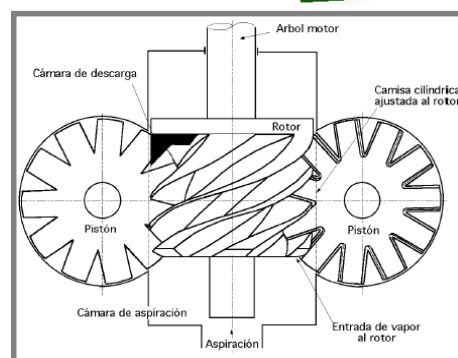


5.- Compresores (VIII)

Clasificación por el modo de compresión (V)

• Rotativos (III):

- De Tornillo Simple: el control de capacidad se realiza con un anillo
- Scroll: son dos espirales



Tiene relación de compresión fija  
la regulación de la capacidad se hace con varias lumbreras de descarga

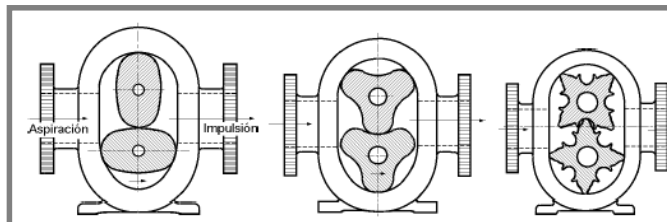


5.- Compresores (VII)

Clasificación por el modo de compresión (VI)

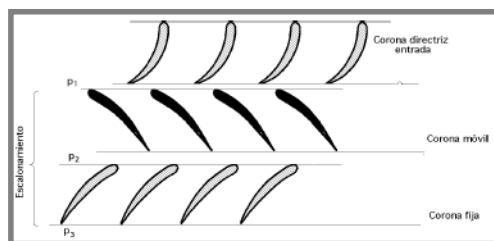
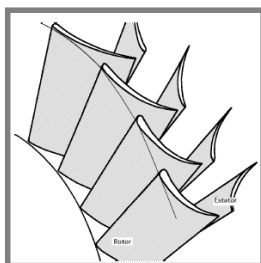
• Rotativos (IV):

- De Engranajes:

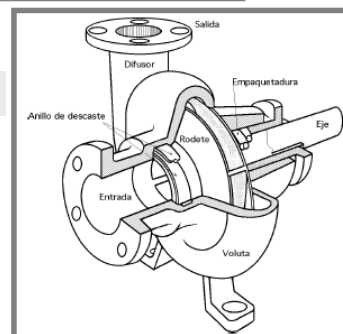


- Centrifugos: grandes volúmenes, con baja relación de compresión

• Flujo Axial



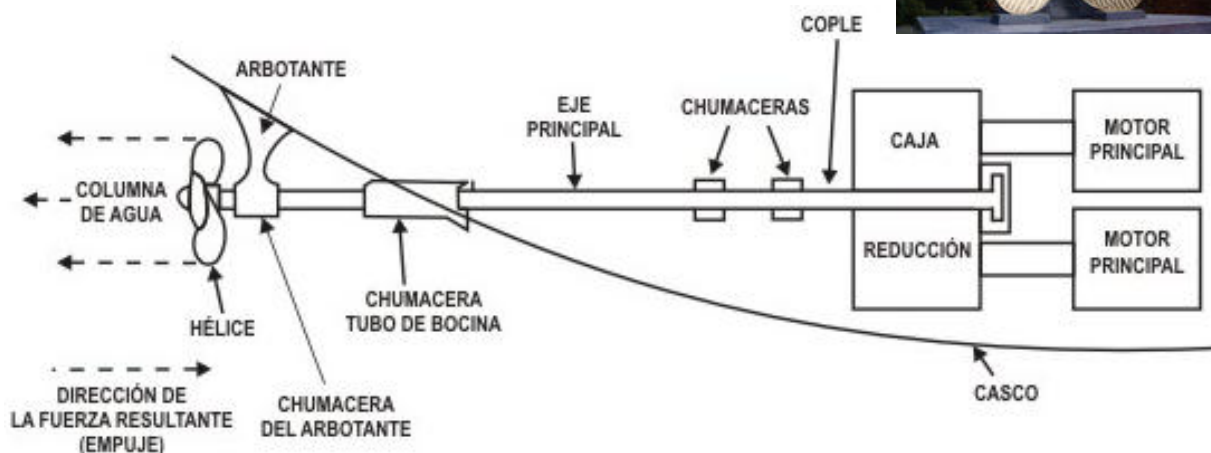
V. antirretorno



6.- Hélices (I)

Principio de Acción-Reacción

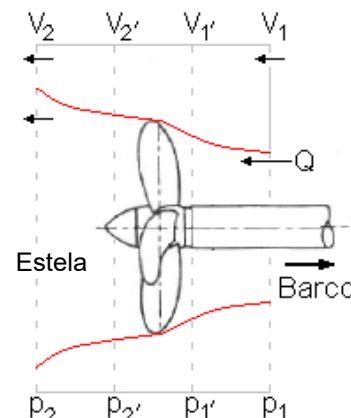
Empujan agua hacia atrás, el barco reacciona adelante



6.- Hélices (II)

La fuerza resultante se puede descomponer en:

- $\Delta F_a$  (axial), produce el empuje en propulsión interesa maximizarla
- $\Delta F_u$  (tangencia, rotación) en aerogeneradores interesa maximizarla



Cantidad de Movimiento

$$F = m \cdot a = (\rho \cdot \text{Vol}) \cdot \left(\frac{dv}{dt}\right) = \rho \cdot (Q \cdot dt) \cdot \frac{dv}{dt} = \rho \cdot Q \cdot dv$$

Fuerza Propulsiva  $F_{\text{prop}} = \rho \cdot Q \cdot (v_2 - v_1) = \left| P = F/A \Rightarrow F = A \cdot P \right| = A \cdot (p_1 - p_2)$

Potencia Propulsiva  $P_{\text{prop}} = \frac{W_{\text{prop}}}{t} = \frac{F_{\text{prop}} \cdot d}{t} = F_{\text{prop}} \cdot v = [\rho \cdot Q \cdot (v_2 - v_1)] \cdot v_1$

6.- Hélices (III)

$$P_{\text{prop}} = [\rho \cdot Q \cdot (v_2 - v_1)] \cdot v_1$$

Potencia de Accionamiento

$$\begin{aligned}
 P_{\text{ac}} &= \frac{\text{Energía}}{t} = \frac{E_{\text{cinetica}}}{t} = \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2)}{t} = \\
 &= \frac{[\text{Vol} \cdot \rho] \cdot (v_2^2 - v_1^2)}{2 \cdot t} = \\
 &= \frac{[Q \cdot t] \cdot \rho \cdot (v_2^2 - v_1^2)}{2 \cdot t} = \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot (v_2^2 - v_1^2)
 \end{aligned}$$

Rendimiento de la Propulsión

$$\eta_{\text{prop}} = \frac{P_{\text{prop}}}{P_{\text{ac}}} = \frac{2 \cdot v_1}{v_2 + v_1}$$

