

# Bombas Centrífugas

(CONTINUACIÓN)

# Bombas Centrífugas

- ❖ Generalidades
  - ❖ Principio de funcionamiento
  - ❖ Partes componentes
  - ❖ Curvas características
- ❖ Leyes de similitud
  - ❖ Acoplamiento de bombas
  - ❖ Recomendaciones para el diseño de la instalación
  - ❖ Trabajando con bombas centrífugas
  - ❖ Ventajas y desventajas

## EJERCICIO

1. Considere la “curva teórica”  $H$  vs  $Q$  de una bomba centrífuga a cierta velocidad de giro del rodete
  - a. ¿cómo variaría la curva si se trabajara con una bomba idéntica pero con el doble de tamaño?
  - b. ¿cómo variaría la curva si se trabajara con el rodete girando al doble de velocidad?
2. Las conclusiones de arriba ¿son aplicables para las curvas “reales”?

# Leyes de similitud o semejanza

La utilidad de la teoría de la similitud trasciende la problemática de las bombas centrífugas.

Es una herramienta importantísima para el diseño y el análisis de equipos en ingeniería de procesos.

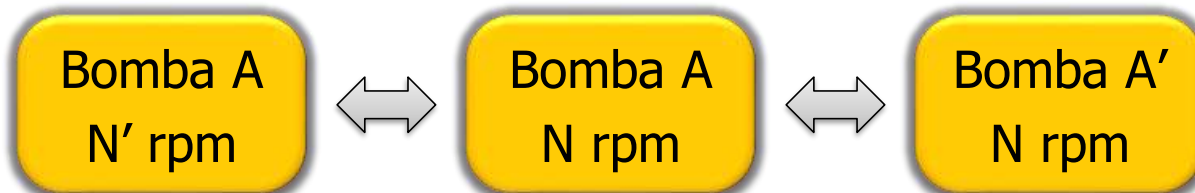
Su uso adecuado permite el “escalado”, por ejemplo, poder derivar conclusiones sobre el comportamiento de un sistema real a partir del comportamiento de un modelo a escala.

## Utilidad de las leyes de similitud para el análisis de las bombas centrífugas

Si no se dispone de las curvas de funcionamiento para:

- un tamaño dado de bomba o
- para la condición de operación (rpm),

se pueden utilizar las **leyes de similitud** para estimar las curvas de  $Q$ ,  $H$  y  $P_m$  de la bomba a partir de otras curvas conocidas.



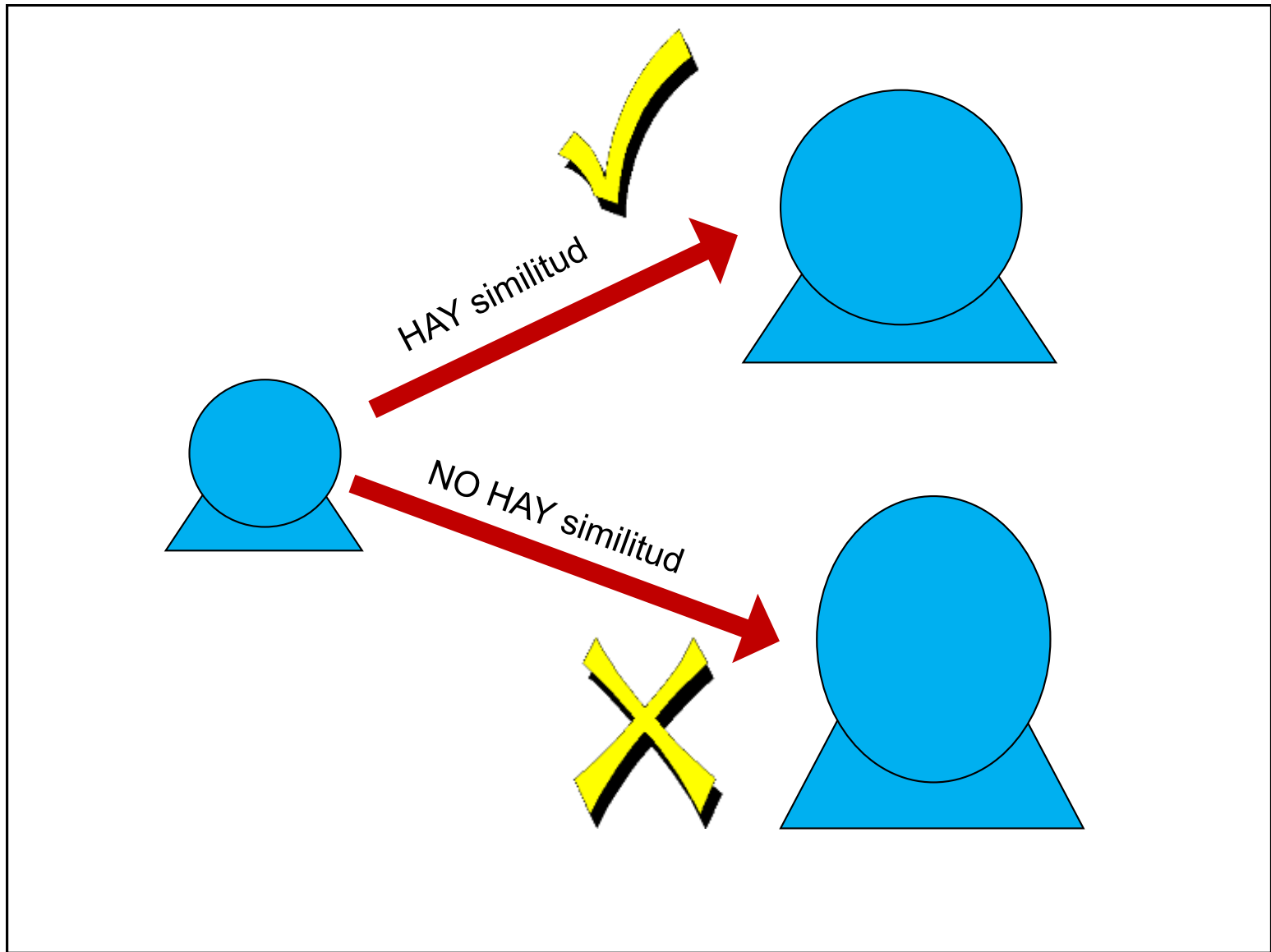
## ¿A qué nos referimos con: *“Similitud”* ?

Para que se puedan escalar los datos de funcionamiento de bombas debe existir ***similitud*** entre las bombas involucradas

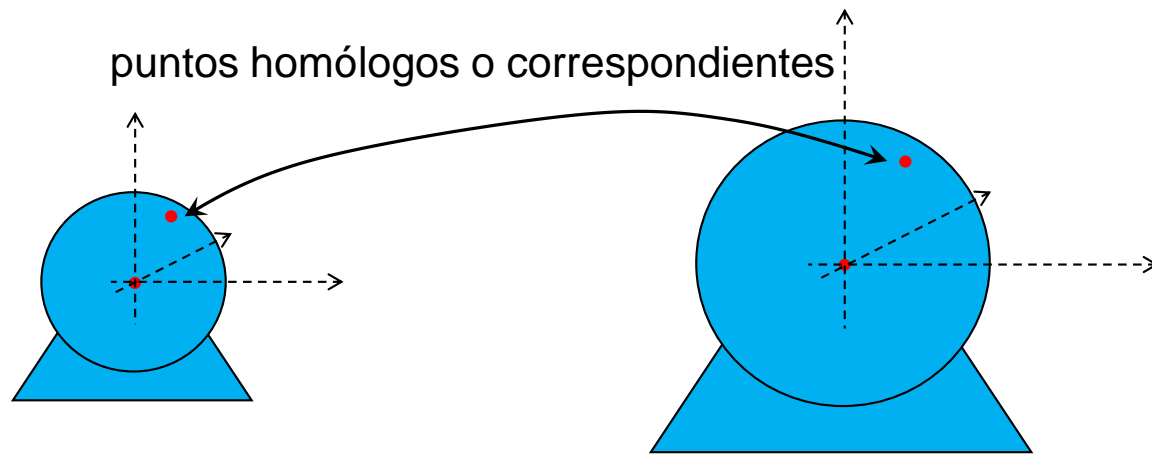
- *Similitud geométrica*
- *Similitud cinemática*
- *Similitud dinámica*

## ***Similitud geométrica:***

- requiere que las bombas en cuestión sean de la **misma forma**, y
  - que todas las **dimensiones lineales** de una se relacionen con las correspondientes dimensiones de la otra por medio de un **factor de escala constante**
- (puntos homólogos tienen la misma posición relativa).



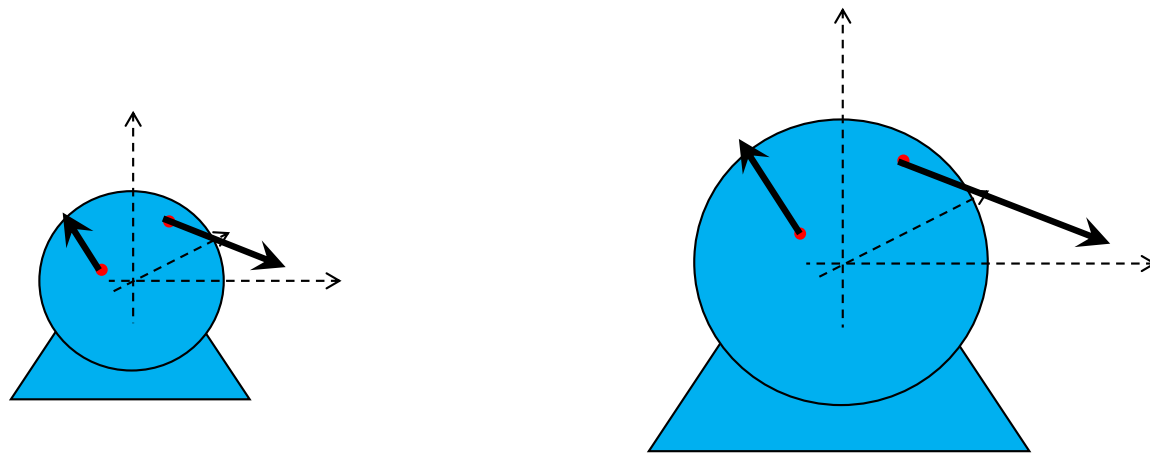




## ***Similitud cinemática:***

- requiere que las **velocidades** en puntos correspondientes estén en la **misma dirección** y
- se relacionen en **magnitud** mediante un **factor de escala constante**

*La similitud cinemática requiere que los **regímenes** de flujo sean los mismos en las bombas en cuestión*



## ***Similitud dinámica:***

- requiere que dos flujos tengan **distribuciones de fuerza** tales que tipos idénticos de fuerzas sean **paralelas** y
- se relacionen en **magnitud** por medio de un **factor de escala constante** en todos los puntos correspondientes.

Para alcanzar ***similitud dinámica*** se requiere ***similitud geométrica*** y ***cinemática***.

Cuando existe *similitud dinámica*, los datos medidos en un flujo de una bomba se pueden relacionar cuantitativamente con las condiciones en el flujo de la otra

Una definición formal de semejanza completa (*similitud dinámica*) podría ser:

Las condiciones del flujo para un *modelo* son completamente semejantes a las del *prototipo* si los valores correspondientes al modelo y prototipo coinciden para todos los *parámetros adimensionales*.

## *Teorema Pi de Buckingham*

El teorema Pi de Buckingham establece que dada una relación entre parámetros, éstos se pueden agrupar en **números adimensionales** independientes o parámetros  $\Pi$ ...

... de forma tal que puede establecerse otra relación equivalente a la primera en términos de tales números adimensionales.

Si una ley física involucra una relación entre **n** parámetros, y si el total de dimensiones independientes involucradas es **m**  
Entonces,  
se puede hacer una reducción de variables de forma tal que la ley física se pueda expresar como una relación entre **x** números adimensionales (usualmente,  $x = n - m$ )

## *Parámetros $\Pi$ para una bomba centrífuga*

Para una bomba dada, las variables o parámetros de interés son:

- *parámetros dependientes:*

$$H, P_m, \eta$$

- *parámetros independientes:*

$$Q, \omega, D, \rho, \mu, \varepsilon$$

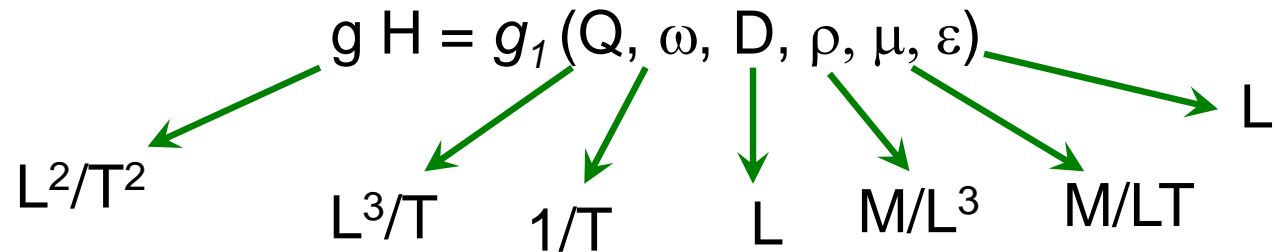
Podemos expresar esta dependencia según:

$$gH = g_1 (Q, \omega, D, \rho, \mu, \varepsilon)$$

$$P_m = g_2 (Q, \omega, D, \rho, \mu, \varepsilon)$$

$$\eta = P_h / P_m = (g H Q \rho) / P_m$$

Tomando por ejemplo la relación entre la altura que da la bomba y los parámetros independientes...



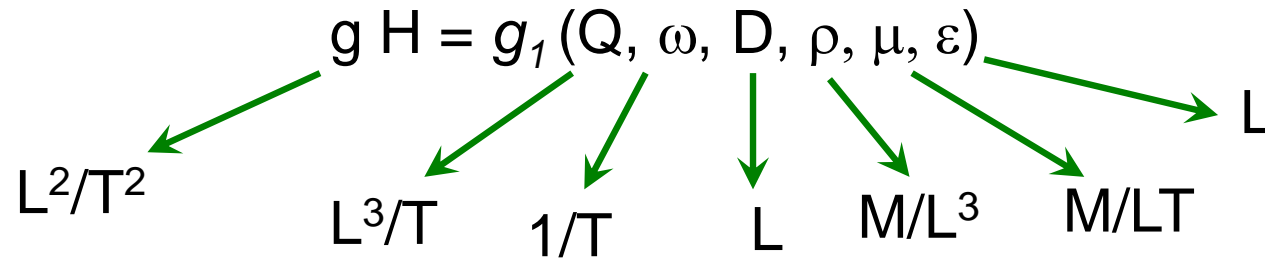
Parámetros involucrados = 7                      ( $gH, Q, \omega, D, \rho, \mu, \epsilon$ )

Dimensiones independientes involucradas

(Según el teorema Pi, podemos encontrar una relación que involucre números adimensionales...)

Números adimensionales relacionados =

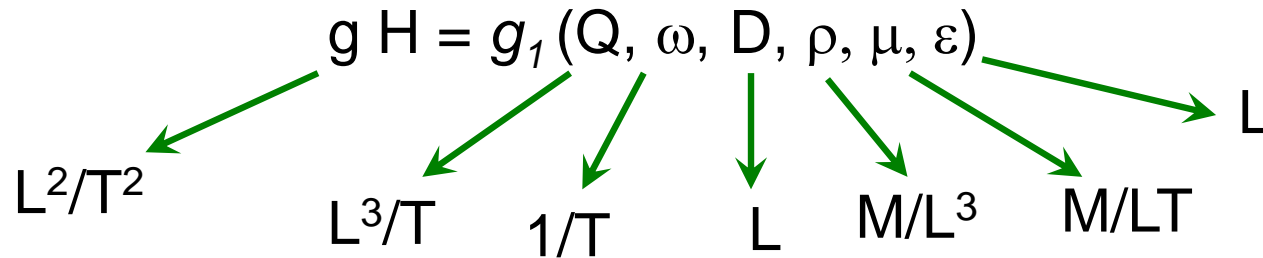




Si asumimos una dependencia del tipo:

$$g H = \sum k Q^a \omega^b D^c \rho^d \mu^e \varepsilon^f$$

El requerimiento de consistencia dimensional exige que las dimensiones de ambos términos de la ecuación sean iguales



Si asumimos una dependencia del tipo:

$$g H = \sum k Q^a \omega^b D^c \rho^d \mu^e \varepsilon^f$$

$L^2 T^{-2} = L^{3a} T^{-a} T^{-b} L^c M^d L^{-3d} M^e L^{-e} T^{-e} L^f$

$$L^2 T^{-2} = L^{3a+c-3d-e+f} T^{-a-b-e} M^{d+e}$$

Igualando exponentes para L:  $2 = 3a+c-3d-e+f$

Igualando exponentes para T:  $-2 = -a-b-e$

Igualando exponentes para M:  $0 = d+e$

$$\begin{array}{lcl}
 \text{Igualando exponentes para L:} & & 2 = 3a + c - 3d - e + f \\
 \text{Igualando exponentes para T:} & & -2 = -a - b - e \\
 \text{Igualando exponentes para M:} & & 0 = d + e
 \end{array}$$

Expresamos 3 de ellas en función de las otras 3...

$$e = -d$$

$$b = 2 - a + d$$

$$c = 2 - 3a + 2d - f$$

Reemplazando en  $g H = \sum k Q^a \omega^b D^c \rho^d \mu^e \varepsilon^f$

$$g H = \sum k Q^a \omega^{2-a+d} D^{2-3a+2d-f} \rho^d \mu^{-d} \varepsilon^f$$

$$\boxed{g H / \omega^2 D^2} = \sum k \boxed{(Q / \omega D^3)^a} \boxed{(\omega D^2 \rho / \mu)^d} \boxed{(\varepsilon / D)^f}$$

### Del análisis dimensional para

$$gH = g_1 (Q, \omega, D, \rho, \mu, \varepsilon):$$

$$\Pi_1 \leftarrow \frac{(gH)}{\omega^2 D^2} = g_1 \left( \frac{Q}{\omega D^3}, \frac{\mu}{\rho \omega D^2}, \frac{\varepsilon}{D} \right)$$

### Del análisis dimensional para

$$P_m = g_2 (Q, \omega, D, \rho, \mu, \varepsilon):$$

$$\frac{P_m}{\rho \omega^3 D^5} = g_2 \left( \frac{Q}{\omega D^3}, \frac{\mu}{\rho \omega D^2}, \frac{\varepsilon}{D} \right)$$

### Del análisis dimensional para

$$gH = g_1 (Q, \omega, D, \rho, \mu, \varepsilon):$$

$$\frac{(gH)}{\omega^2 D^2} = g_1 \left( \frac{Q}{\omega D^3}, \frac{\mu}{\rho \omega D^2}, \frac{\varepsilon}{D} \right)$$

### Del análisis dimensional para

$$P_m = g_2 (Q, \omega, D, \rho, \mu, \varepsilon):$$

$$\frac{P_m}{\rho \omega^3 D^5} = g_2 \left( \frac{Q}{\omega D^3}, \frac{\mu}{\rho \omega D^2}, \frac{\varepsilon}{D} \right)$$

$\Pi_2$

### Del análisis dimensional para

$$gH = g_1 (Q, \omega, D, \rho, \mu, \varepsilon):$$

$$\frac{(gH)}{\omega^2 D^2} = g_1 \left( \frac{Q}{\omega D^3}, \frac{\mu}{\rho \omega D^2}, \frac{\varepsilon}{D} \right)$$

### Del análisis dimensional para

$$P_m = g_2 (Q, \omega, D, \rho, \mu, \varepsilon):$$

$$\frac{P_m}{\rho \omega^3 D^5} = g_2 \left( \frac{Q}{\omega D^3}, \frac{\mu}{\rho \omega D^2}, \frac{\varepsilon}{D} \right)$$

$\Pi_3$

### Del análisis dimensional para

$$gH = g_1 (Q, \omega, D, \rho, \mu, \varepsilon):$$

$$\frac{(gH)}{\omega^2 D^2} = g_1 \left( \frac{Q}{\omega D^3}, \frac{\mu}{\rho \omega D^2}, \frac{\varepsilon}{D} \right)$$

### Del análisis dimensional para

$$P_m = g_2 (Q, \omega, D, \rho, \mu, \varepsilon):$$

$$\frac{P_m}{\rho \omega^3 D^5} = g_2 \left( \frac{Q}{\omega D^3}, \frac{\mu}{\rho \omega D^2}, \frac{\varepsilon}{D} \right)$$

$\Pi_4$

### Del análisis dimensional para

$$gH = g_1 (Q, \omega, D, \rho, \mu, \varepsilon):$$

$$\frac{(gH)}{\omega^2 D^2} = g_1 \left( \frac{Q}{\omega D^3}, \frac{\mu}{\rho \omega D^2}, \frac{\varepsilon}{D} \right)$$

### Del análisis dimensional para

$$P_m = g_2 (Q, \omega, D, \rho, \mu, \varepsilon):$$

$$\Pi_5 \leftarrow \frac{P_m}{\rho \omega^3 D^5} = g_2 \left( \frac{Q}{\omega D^3}, \frac{\mu}{\rho \omega D^2}, \frac{\varepsilon}{D} \right)$$



## Números adimensionales relevantes (números Pi)

- $\Pi_1$  : coeficiente de carga ( $C_H$ )

$$\Pi_1 = \frac{(gH)}{\omega^2 D^2}$$

- $\Pi_2$  : coeficiente de caudal ( $C_Q$ )

$$\Pi_2 = \frac{Q}{\omega D^3}$$

- $\Pi_3$  : inverso de una forma de Re

$$\Pi_3 = \frac{\mu}{\rho \omega D^2}$$

- $\Pi_4$  : rugosidad relativa ( $\varepsilon/D$ )

$$\Pi_4 = \frac{\varepsilon}{D}$$

- $\Pi_5$  : coeficiente de potencia ( $C_P$ )

$$\Pi_5 = \frac{P_m}{\rho \omega^3 D^5}$$

Otro coeficiente adimensional utilizado es el  
*coeficiente de altura neta de succión*:

$$C_{HS} = \frac{(g NPSH_R)}{\omega^2 D^2}$$

## *Puntos de operación homólogos*

Puntos de operación **homólogos** en dos bombas *geométricamente similares* son aquellos en los que  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ ,  $\Pi_3$ ,  $\Pi_4$  y  $\Pi_5$  tienen el **mismo valor** para ambas máquinas.

$$\text{Pero, como } \Pi_1 = g_1(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4)$$

$$\Pi_5 = g_2(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4)$$

...**puntos de operación homólogos** son aquellos en los cuales  $\Pi_2$ ,  $\Pi_3$ ,  $\Pi_4$  tienen el **mismo valor** en ambas bombas.

Ahora bien...

- Se encontró experimentalmente que si en dos máquinas *geométricamente similares* operando en condiciones de *flujo similares*, se supera un cierto valor crítico de  $Re$ , el comportamiento de las máquinas se independiza de este número (al igual que en el escurrimiento en tuberías).
- Los fabricantes suelen obviar la referencia a  $\varepsilon/D$  a pesar de que ésta puede variar entre bombas comerciales.

Por lo tanto, es común suponer que:

$$Re \text{ y } \varepsilon/D \quad (\Pi_3 \text{ y } \Pi_4)$$

tienen un *efecto constante* en bombas geoméricamente semejantes:

Puntos de operación *homólogos* en dos bombas *geoméricamente similares* son aquellos en los que  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ ,  $\Pi_3$ ,  $\Pi_4$  y  $\Pi_5$  tienen el mismo valor para ambas máquinas

$$\begin{aligned} \text{Como:} \quad \Pi_1 &= g_1(\Pi_2, \cancel{\Pi_3}, \cancel{\Pi_4}) \\ \Pi_5 &= g_2(\Pi_2, \cancel{\Pi_3}, \cancel{\Pi_4}) \end{aligned}$$

...puntos de operación *homólogos* son aquellos en los cuales  $\Pi_2$ ,  $\Pi_3$ ,  $\Pi_4$  tienen el mismo valor en ambas bombas.

Por lo tanto, es común suponer que:

$Re$  y  $\varepsilon/D$  ( $\Pi_3$  y  $\Pi_4$ )

tienen un *efecto constante* en bombas geométricamente semejantes:

$$\Pi_1 = g_1(\Pi_2, \cancel{\Pi_3}, \cancel{\Pi_4})$$

$$\Pi_5 = g_2(\Pi_2, \cancel{\Pi_3}, \cancel{\Pi_4})$$

En consecuencia, consideramos:

$$\Pi_1 \cong g_1(\Pi_2)$$

$$\Pi_5 \cong g_2(\Pi_2)$$

... y los puntos de operación homólogos  
los que tienen el mismo valor de  $\Pi_2$

Por lo tanto,

$$\frac{(gH)}{\omega^2 D^2} = g_1 \left( \frac{Q}{\omega D^3} \right)$$

$$\frac{P_m}{\rho \omega^3 D^5} = g_2 \left( \frac{Q}{\omega D^3} \right)$$

Si consideramos dos bombas semejantes (1 y 2) o una misma bomba en dos condiciones (1 y 2), ...

Entonces, si:

$$\frac{Q_1}{\omega_1 D_1^3} = \frac{Q_2}{\omega_2 D_2^3}$$

por las igualdades de arriba, también ocurre que:

$$\frac{gH_1}{\omega_1^2 D_1^2} = \frac{gH_2}{\omega_2^2 D_2^2}$$

y que

$$\frac{P_{m1}}{\rho_1 \omega_1^3 D_1^5} = \frac{P_{m2}}{\rho_2 \omega_2^3 D_2^5}$$

Y también... 
$$\frac{g \text{ NPSH}_{R_1}}{\omega_1^2 D_1^2} = \frac{g \text{ NPSH}_{R_2}}{\omega_2^2 D_2^2}$$

A su vez, el rendimiento  $\eta = P_h/P_m = (gHQ\rho) /P_m$  puede expresarse como:

$$\eta = \frac{\Pi_1 \Pi_2}{\Pi_5} = g^3 (\Pi_2)$$

Por lo tanto,  $\eta$  se debe conservar en puntos homólogos de funcionamiento.



En resumen

Dado que

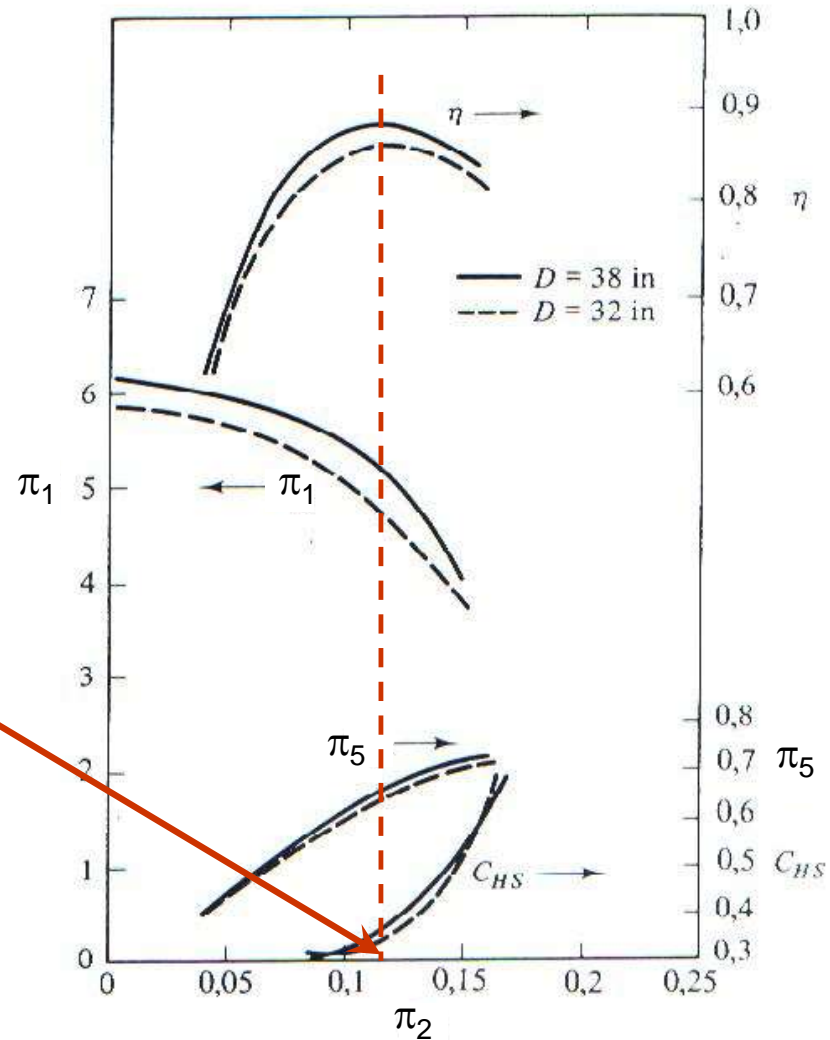
$$\begin{aligned}\Pi_1 &= g_1(\Pi_2) \\ \Pi_5 &= g_2(\Pi_2) \\ \eta &= g_3(\Pi_2) \\ C_{HS} &= g_4(\Pi_2)\end{aligned}$$

Si dos bombas con similitud geométrica tienen el mismo valor de  $\Pi_2$  ...

... entonces tendrán también los mismos valores de  $\Pi_1$ , de  $\Pi_5$ , de  $\eta$  y de  $C_{HS}$

Curvas características adimensionales para dos bombas geoméricamente semejantes (diferencia en tamaños de carcasa y rotor: aprox. 20 %)

Para máquinas *geoméricamente similares*, el valor de  $\Pi_2$  para  $\eta = \eta_{\max}$  es *característico* de la familia de máquinas.



## Aplicación de las leyes de similitud al trabajo con bombas centrífugas

Las “**leyes de similitud**” se pueden utilizar para **escalar** las características de funcionamiento de las bombas centrífugas cuando cambian la *velocidad* o el *diámetro del rotor*.

## Leyes de similitud

Si consideramos dos bombas semejantes (1 y 2) o una misma bomba en dos condiciones (1 y 2), ...

Cuando

$$\frac{Q_1}{\omega_1 D_1^3} = \frac{Q_2}{\omega_2 D_2^3}$$

$(\pi_2 \text{ ó } C_Q)$

Entonces:

$$\frac{H_1}{\omega_1^2 D_1^2} = \frac{H_2}{\omega_2^2 D_2^2}$$

$(\pi_1 \text{ ó } C_H)$

$$\frac{Pm_1}{\rho_1 \omega_1^3 D_1^5} = \frac{Pm_2}{\rho_2 \omega_2^3 D_2^5}$$

$(\pi_5 \text{ ó } C_P)$

$$\frac{g \text{ NPSH}_{R_1}}{\omega_1^2 D_1^2} = \frac{g \text{ NPSH}_{R_2}}{\omega_2^2 D_2^2}$$

$(C_{HS})$

$$\eta_1 = \eta_2$$

## Leyes de similitud

Como  $N$  (rpm)  $\propto \omega$  las leyes de similitud quedan:

Cuando

$$\frac{Q_1}{\omega_1 D_1^3} = \frac{Q_2}{\omega_2 D_2^3}$$

Entonces:

$$\frac{H_1}{\omega_1^2 D_1^2} = \frac{H_2}{\omega_2^2 D_2^2}$$

$$\frac{Pm_1}{\rho_1 \omega_1^3 D_1^5} = \frac{Pm_2}{\rho_2 \omega_2^3 D_2^5}$$

$$\frac{g NPSH_{R_1}}{\omega_1^2 D_1^2} = \frac{g NPSH_{R_2}}{\omega_2^2 D_2^2}$$

$$\eta_1 = \eta_2$$

## Leyes de similitud

Como  $N$  (rpm)  $\propto \omega$  las leyes de similitud quedan:

Cuando

$$\frac{Q_1}{N_1 D_1^3} = \frac{Q_2}{N_2 D_2^3}$$

Entonces:

$$\frac{H_1}{N_1^2 D_1^2} = \frac{H_2}{N_2^2 D_2^2}$$

$$\frac{Pm_1}{\rho_1 N_1^3 D_1^5} = \frac{Pm_2}{\rho_2 N_2^3 D_2^5}$$

$$\frac{g \text{ NPSH}_{R_1}}{N_1^2 D_1^2} = \frac{g \text{ NPSH}_{R_2}}{N_2^2 D_2^2}$$

$$\eta_1 = \eta_2$$

## Caso: Misma bomba. Diferentes velocidades

Hay *similitud geométrica* pues es la misma bomba.

Además  $D_1 = D_2$  y siendo el mismo fluido  $\rho_1 = \rho_2$

Cuando

$$\frac{Q_1}{N_1 \cancel{D_1^3}} = \frac{Q_2}{N_2 \cancel{D_2^3}}$$



$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Entonces:

$$\frac{H_1}{N_1^2 \cancel{D_1^2}} = \frac{H_2}{N_2^2 \cancel{D_2^2}}$$



$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

$$\frac{Pm_1}{\cancel{\rho_1} N_1^3 \cancel{D_1^5}} = \frac{Pm_2}{\cancel{\rho_2} N_2^3 \cancel{D_2^5}}$$



$$\frac{Pm_1}{Pm_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^3$$

$$\frac{g \text{ NPSH}_{R1}}{N_1^2 \cancel{D_1^2}} = \frac{g \text{ NPSH}_{R2}}{N_2^2 \cancel{D_2^2}}$$



$$\frac{\text{NPSH}_{R1}}{\text{NPSH}_{R2}} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

$$\eta_1 = \eta_2$$

## Caso: Misma velocidad, Diferente impulsor en bombas geoméricamente semejantes

$N_1 = N_2$  (además mismo fluido  $\rho_1 = \rho_2$ )

Cuando

$$\frac{Q_1}{\cancel{N_1} D_1^3} = \frac{Q_2}{\cancel{N_2} D_2^3}$$

$$\Rightarrow \frac{Q_1}{Q_2} = \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^3$$

Entonces:

$$\frac{H_1}{\cancel{N_1}^2 D_1^2} = \frac{H_2}{\cancel{N_2}^2 D_2^2}$$

$$\Rightarrow \frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

$$\frac{Pm_1}{\cancel{\rho_1} \cancel{N_1}^3 D_1^5} = \frac{Pm_2}{\cancel{\rho_2} \cancel{N_2}^3 D_2^5}$$

$$\Rightarrow \frac{Pm_1}{Pm_2} = \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^5$$

$$\frac{g NPSH_{R1}}{\cancel{N_1}^2 D_1^2} = \frac{g NPSH_{R2}}{\cancel{N_2}^2 D_2^2}$$

$$\Rightarrow \frac{NPSH_{R1}}{NPSH_{R2}} = \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

$$\eta_1 = \eta_2 \quad (*) \text{ ver diapositiva siguiente}$$



Se debería esperar que  $\eta_1 = \eta_2$  con semejanza perfecta.

Fórmula empírica para estimar el cambio en el rendimiento debido al tamaño (Moody):

$$\frac{1 - \eta_2}{1 - \eta_1} \approx \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{1/5}$$

### Caso: Misma velocidad, Diferente diámetro de impulsor con la misma voluta

Cuando el diámetro del impulsor ( $D$ ) cambia dentro de una voluta de geometría fija, la similitud geométrica no se conserva estrictamente pues cambian las dimensiones del espaciamiento entre el impulsor y la voluta de la bomba.

Sin embargo, el análisis de similitud puede brindar una estimación útil del funcionamiento si el cambio en el tamaño del impulsor no es demasiado drástico.

## Problema

Una bomba tiene la siguiente curva característica cuando el rodete gira a 1500 rpm

Q (m <sup>3</sup> /h)	H (m)
0	120,0
0,5	117,4
1	114,3
1,5	110,0
2	104,0
2,5	95,8
3	84,8
3,5	70,3

### Pregunta 1

¿Cuál será la curva de la bomba si se reduce la velocidad del rodete a 1200 rpm?

## Ejercicio

### Pregunta 2

¿Cómo haríamos para reducir la velocidad del rodete de 1500 rpm a 1200 rpm?

### Pregunta 3

Si la curva del sistema viene dada por

$$H = 20 + 10 Q^2 \quad (H \text{ en m, } Q \text{ en m}^3/\text{h})$$

Determine cómo varía el punto de operación al modificar la velocidad del rodete.

# Acoplamiento de bombas

Las bombas centrífugas se pueden acoplar para ampliar el rango de  $Q$  y  $H$  en el servicio que presta.

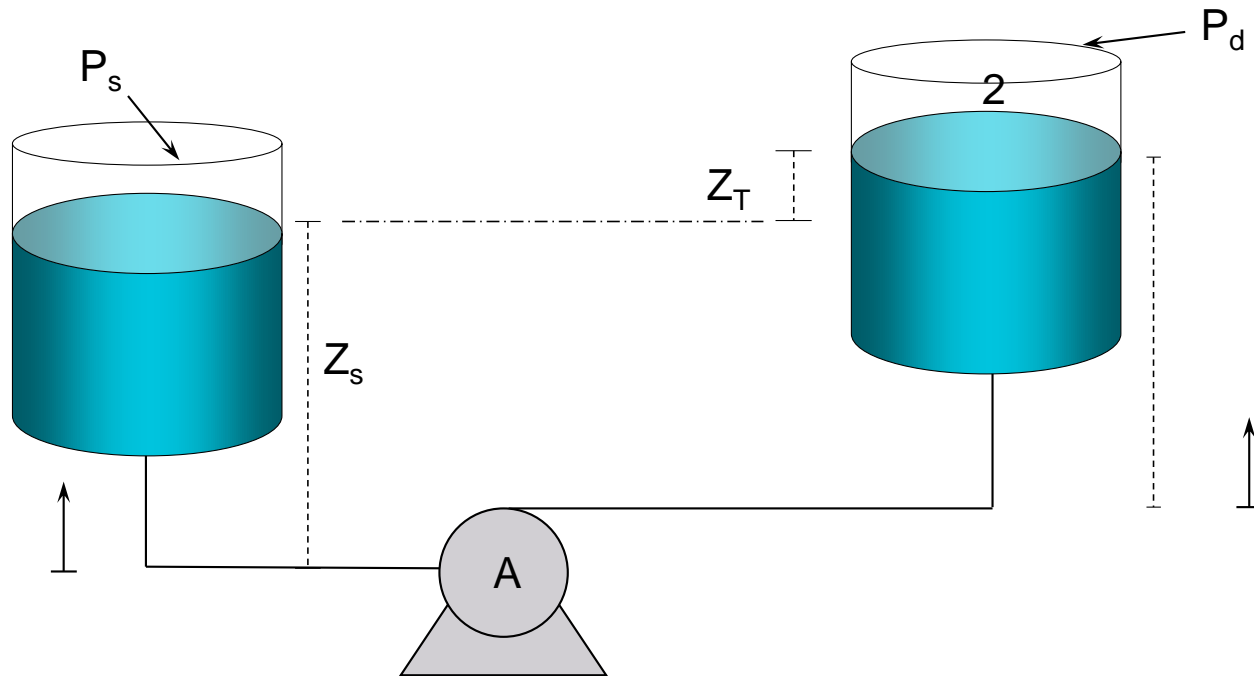
Se pueden acoplar

- en Paralelo
- en Serie

1825

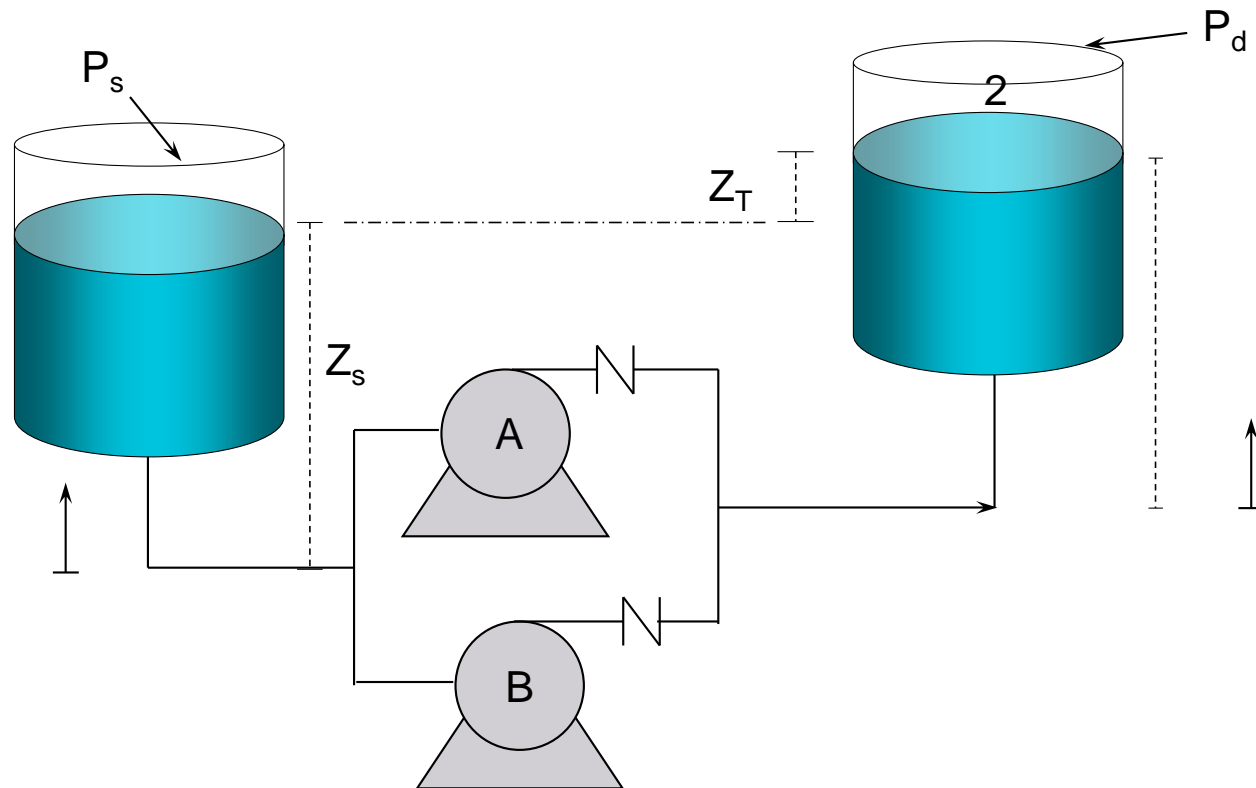
## Acoplamiento en Paralelo

Si la bomba proporciona  $H$  adecuada pero  $Q$  bajo.



... y disponemos de otra bomba.

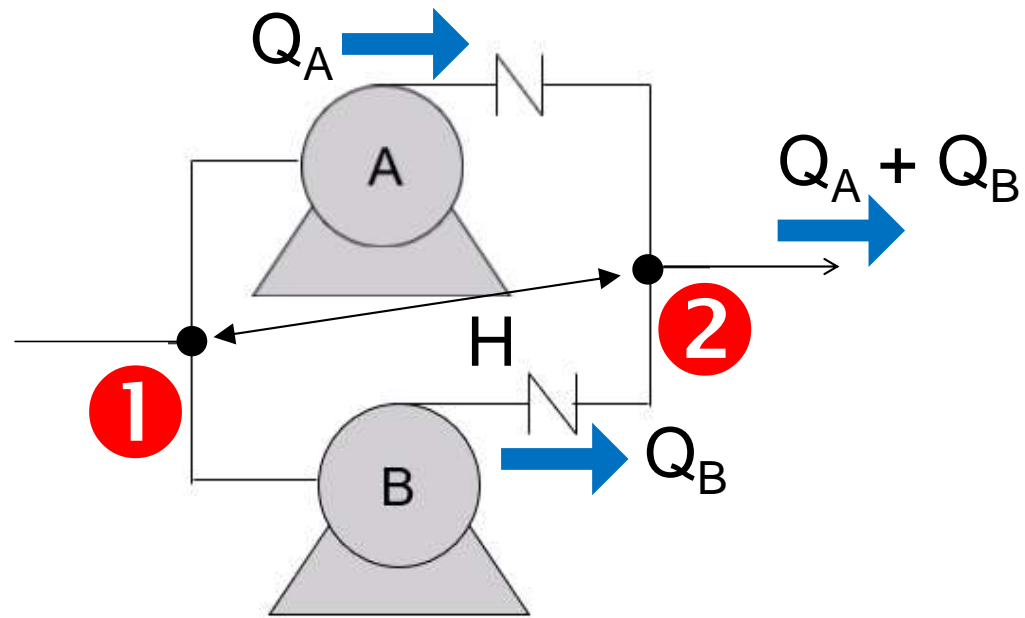
Podemos instalar dos bombas en paralelo.



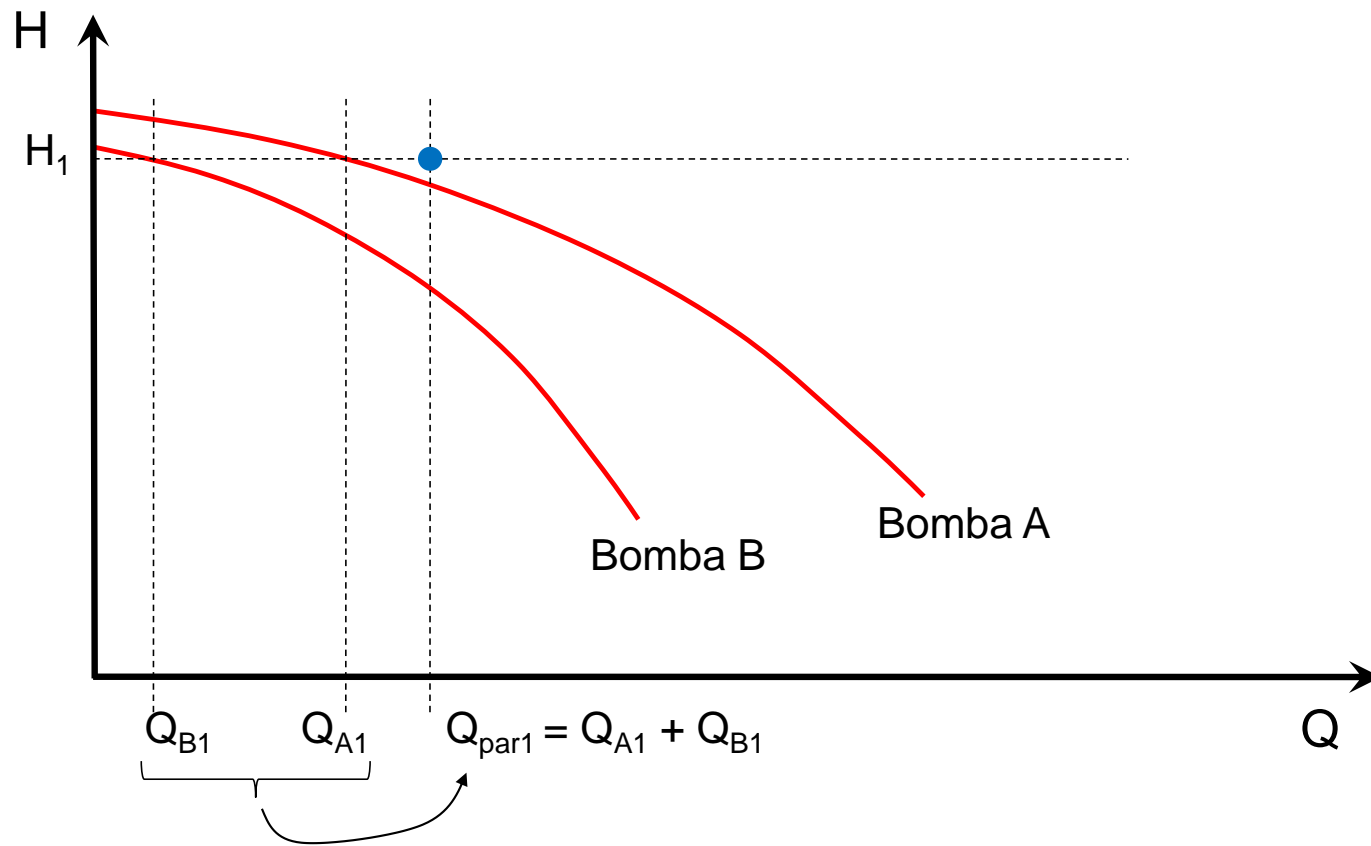
Una disposición en paralelo se puede usar:

- Cuando la bomba principal proporciona  $H$  adecuado pero  $Q$  bajo.  
(Si no se dispone de una bomba adecuada para las  $H$  y  $Q$  requeridas, dos bombas en paralelo pueden servir para el servicio requerido).
- Para el caso en que el  $Q$  requerido varía dentro de un rango amplio.  
(Se usa normalmente una bomba, pero si el  $Q$  requerido aumenta, entonces se arranca la segunda)

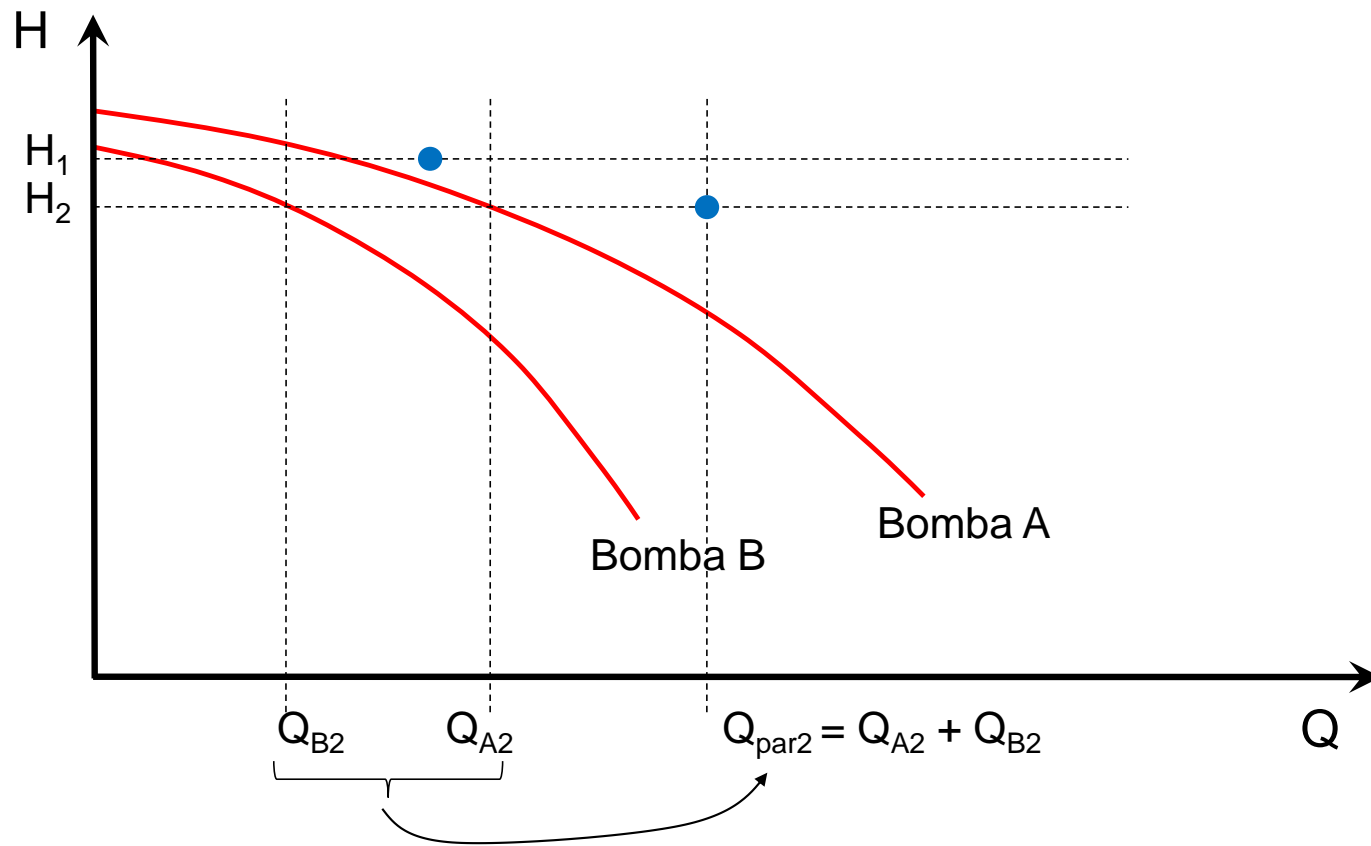




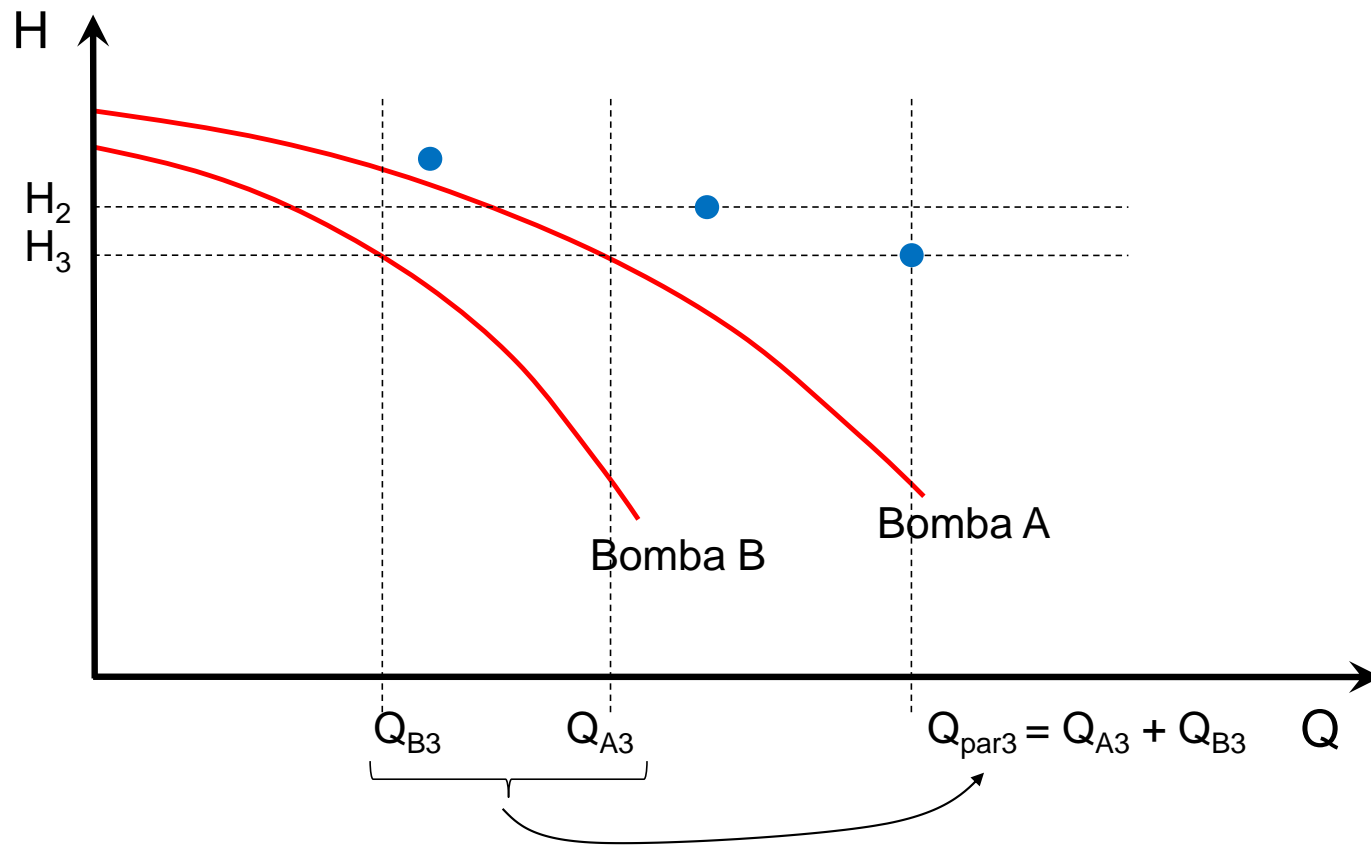
Para determinar la curva resultante del paralelo, para la misma  $H$  se suman los  $Q$ .



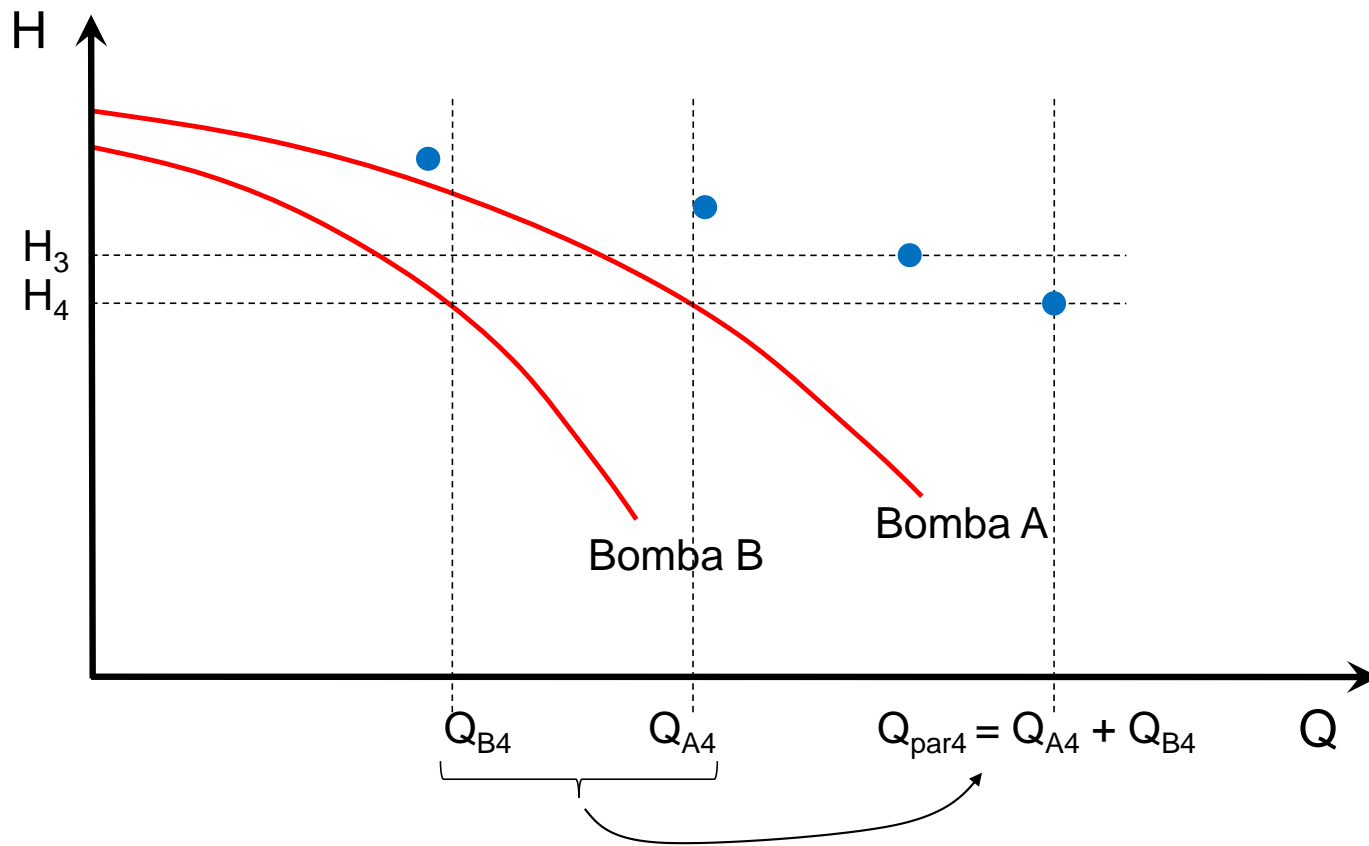
Para determinar la curva resultante del paralelo, para la misma  $H$  se suman los  $Q$ .



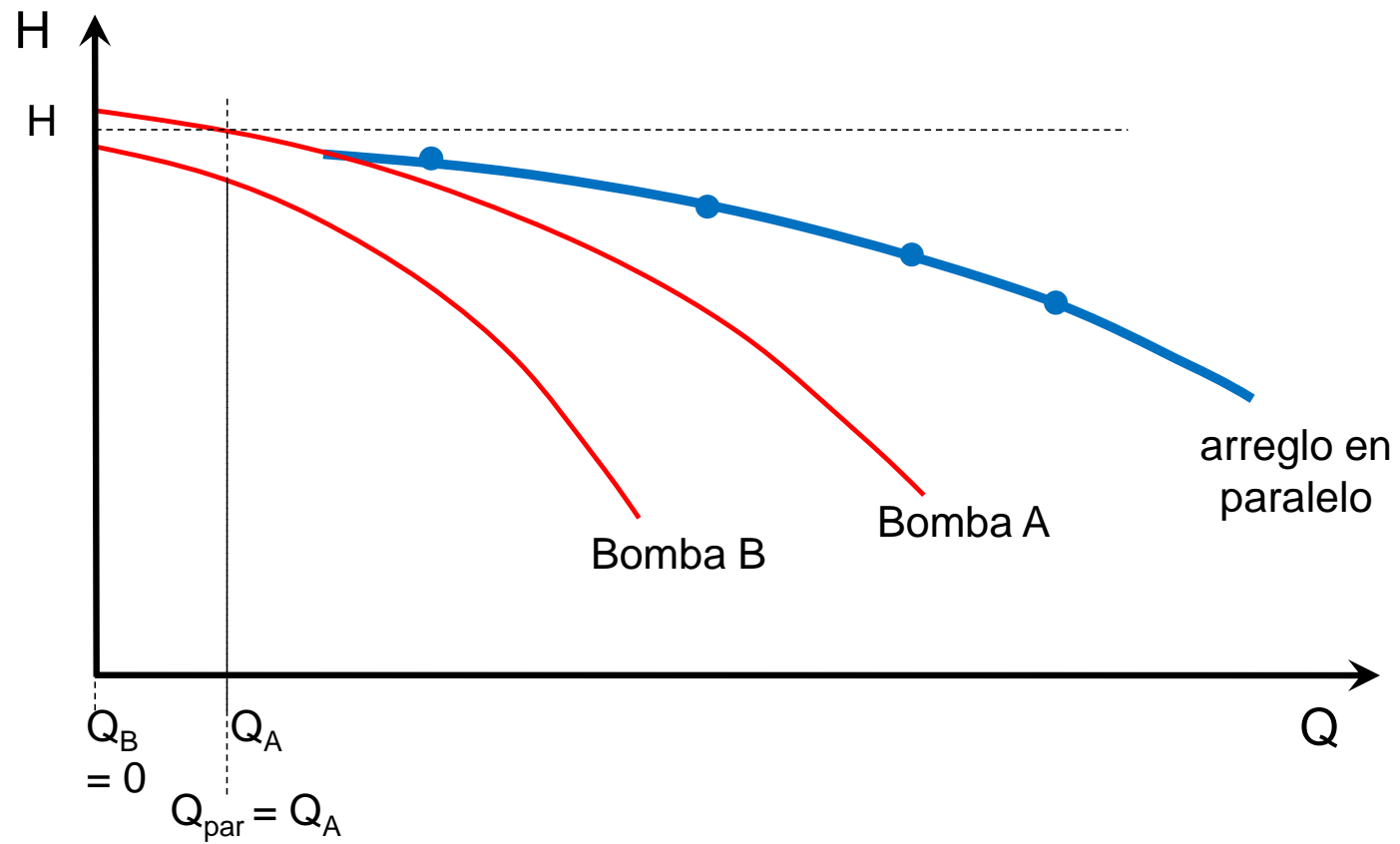
Para determinar la curva resultante del paralelo, para la misma  $H$  se suman los  $Q$ .



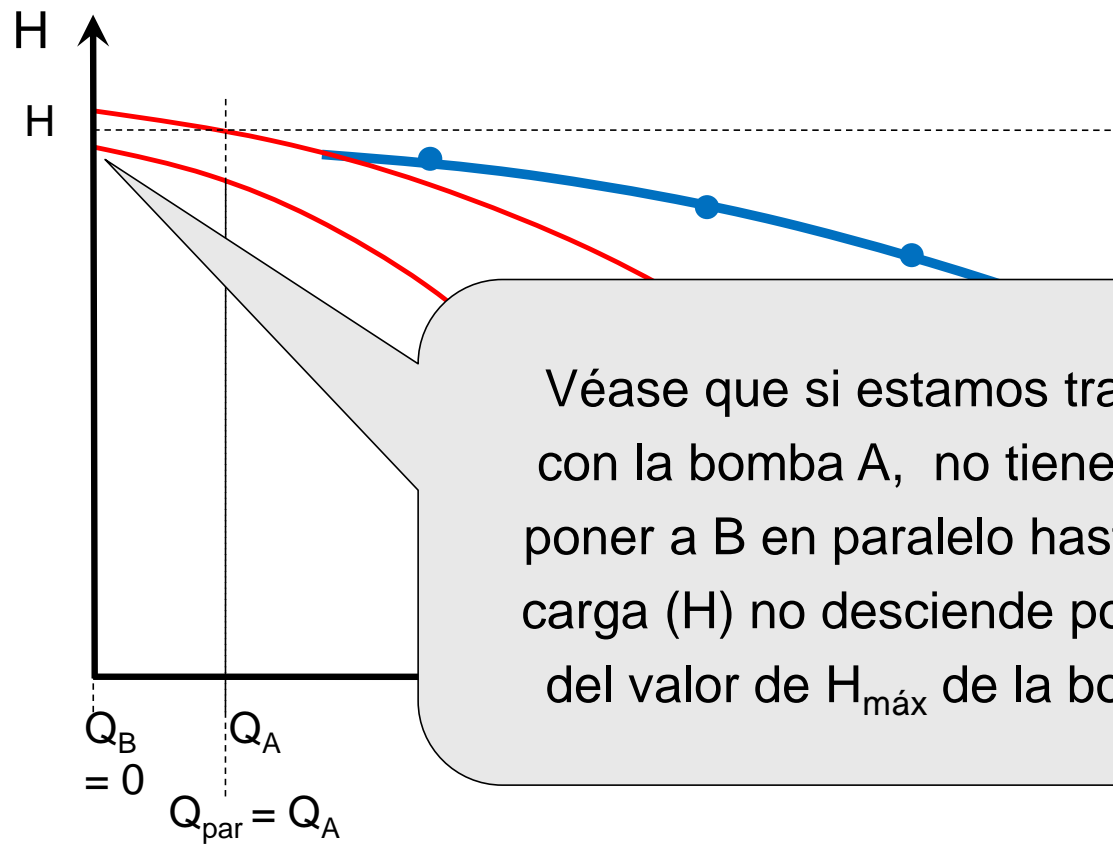
Para determinar la curva resultante del paralelo, para la misma  $H$  se suman los  $Q$ .



Para determinar la curva resultante del paralelo, para la misma  $H$  se suman los  $Q$ .

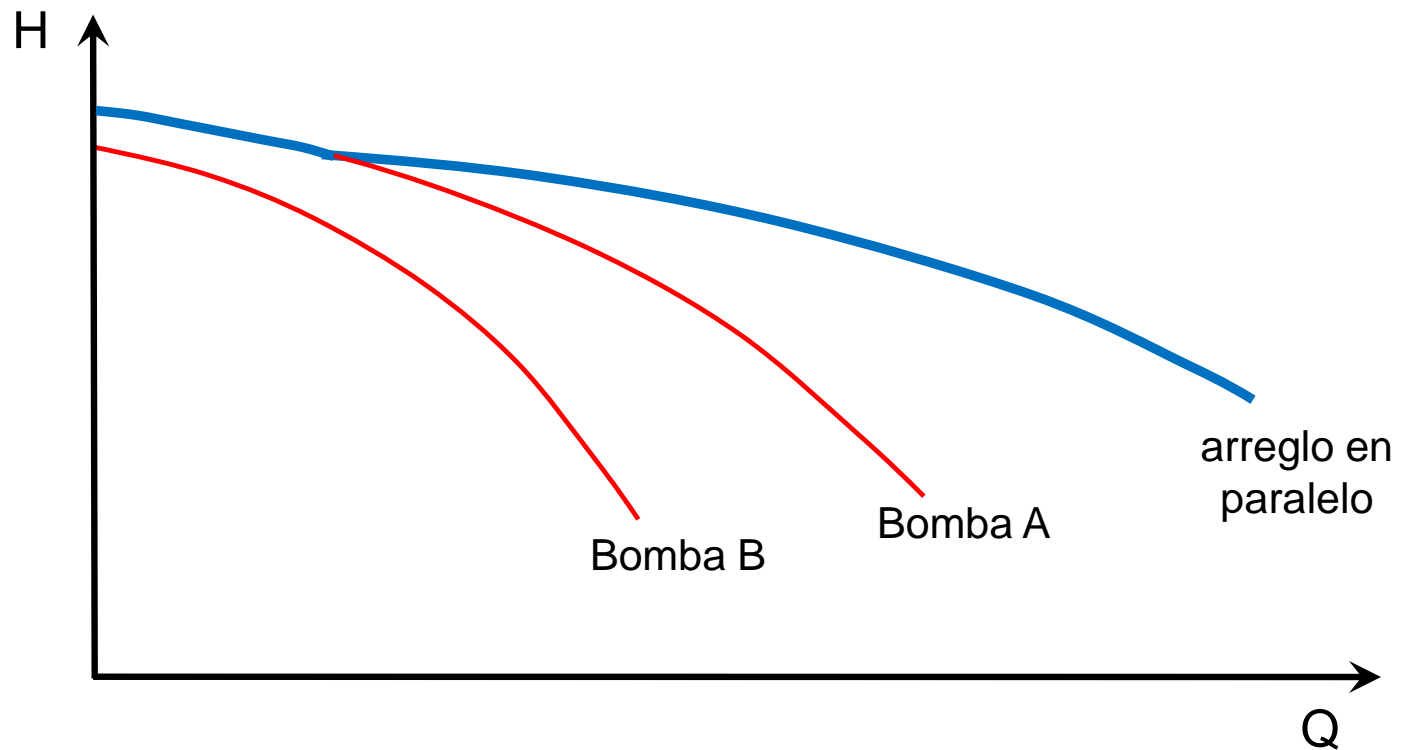


Para determinar la curva resultante del paralelo, para la misma  $H$  se suman los  $Q$ .



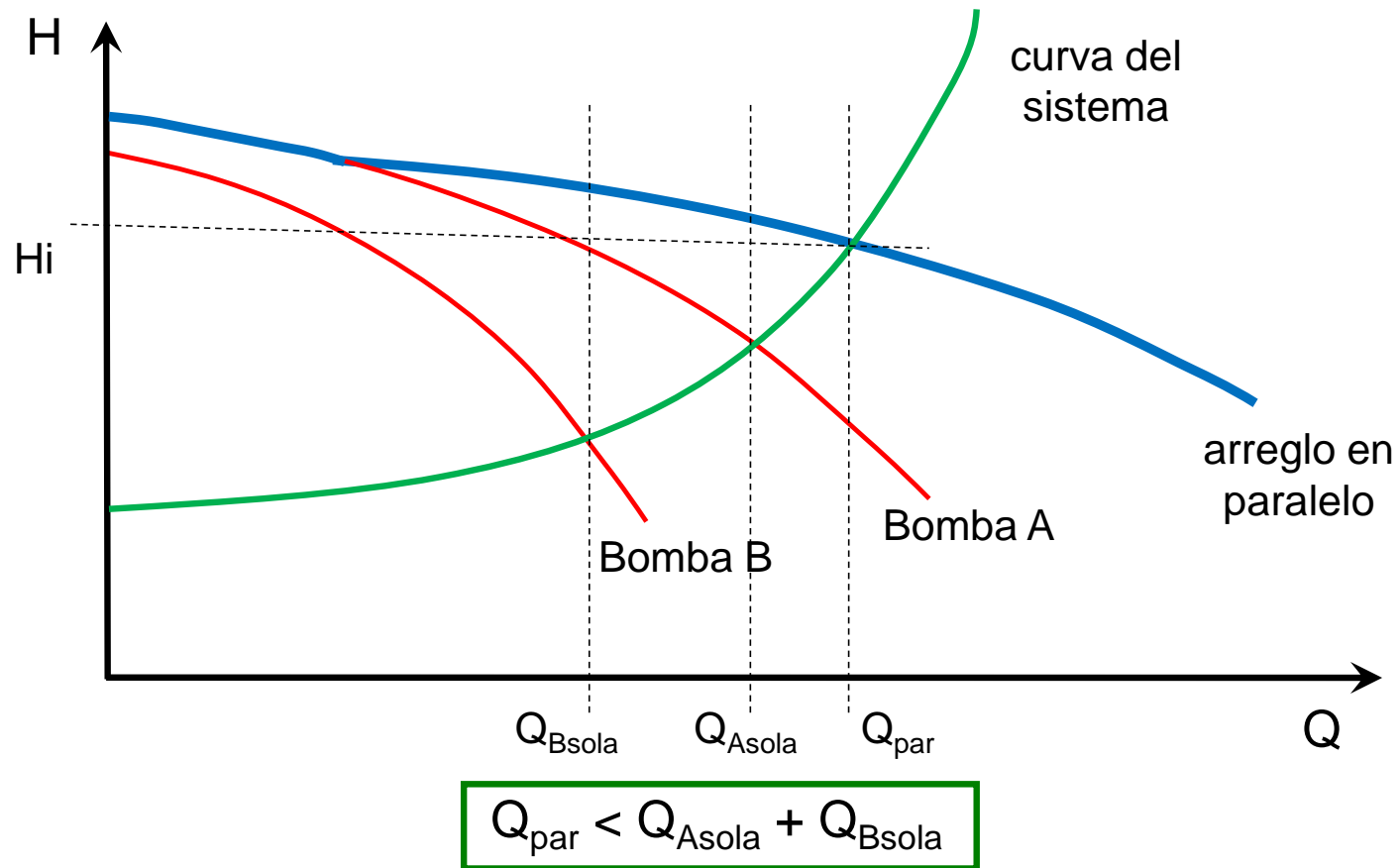
Véase que si estamos trabajando con la bomba A, no tiene sentido poner a B en paralelo hasta que la carga ( $H$ ) no desciende por debajo del valor de  $H_{m\acute{a}x}$  de la bomba B.

Para determinar la curva resultante del paralelo,  
para la misma  $H$  se suman los  $Q$ .

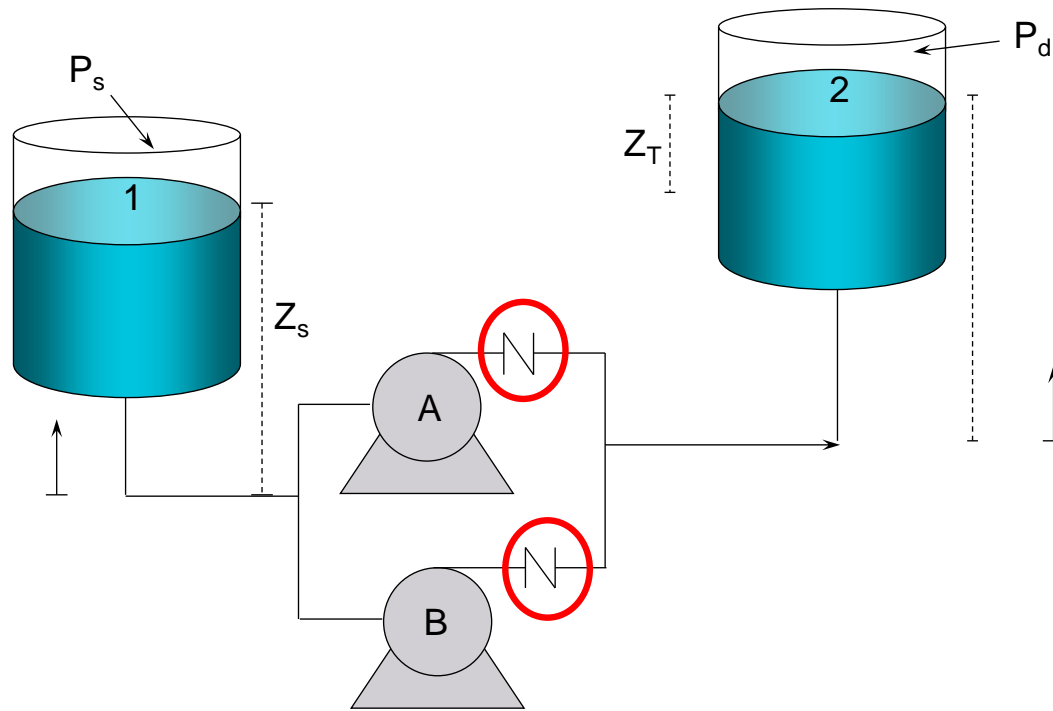




## Punto de operación con el arreglo en paralelo:



Ambas bombas deben disponer de válvulas que eviten flujo inverso cuando se para.



## Problema

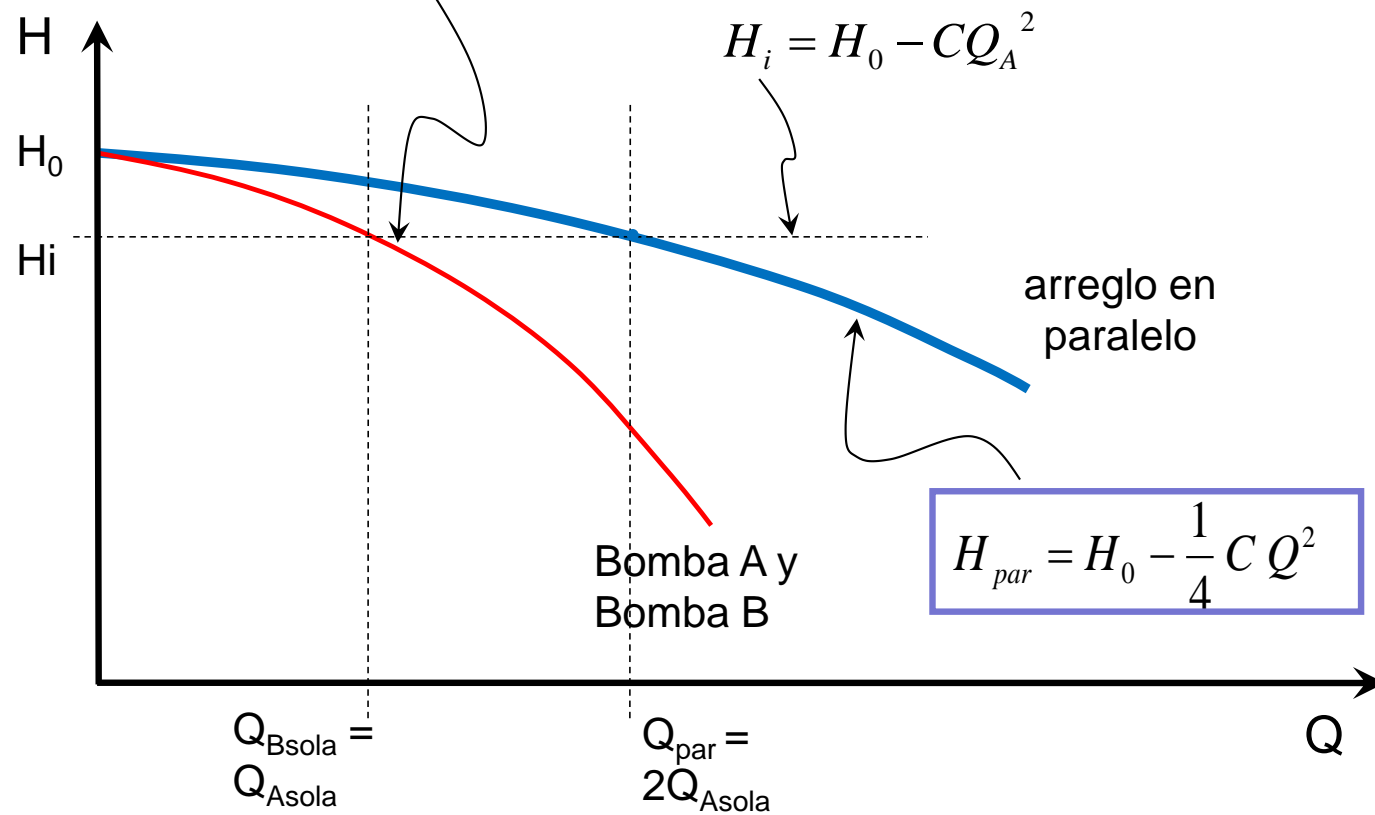
Considere que tiene dos bombas idénticas cuyas curvas características vienen dadas por la

ecuación:  $H = H_0 - C Q^2$

... y que las acopla en paralelo.

Determine la fórmula que relaciona  $H$  con  $Q$  para el arreglo paralelo.

A y B son bombas idénticas, con curvas del tipo:  
 $H = H_0 - C Q^2$

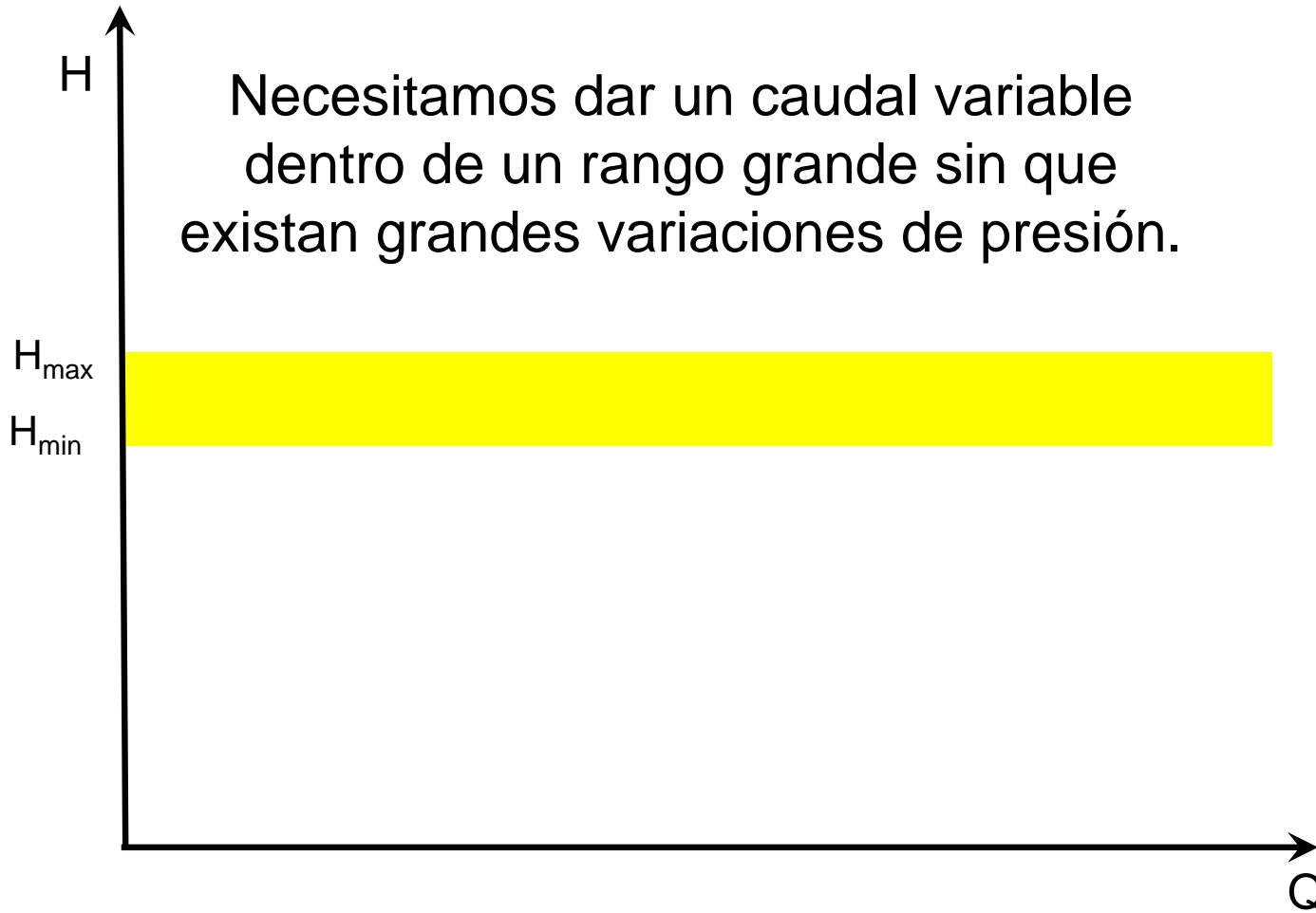


La potencia de la combinación se obtiene sumando la potencia de cada una de las bombas A y B a la misma H del punto de operación:

$$Pm_{A+B} = Pm_{A,H_{A+B}} + Pm_{B,H_{A+B}}$$

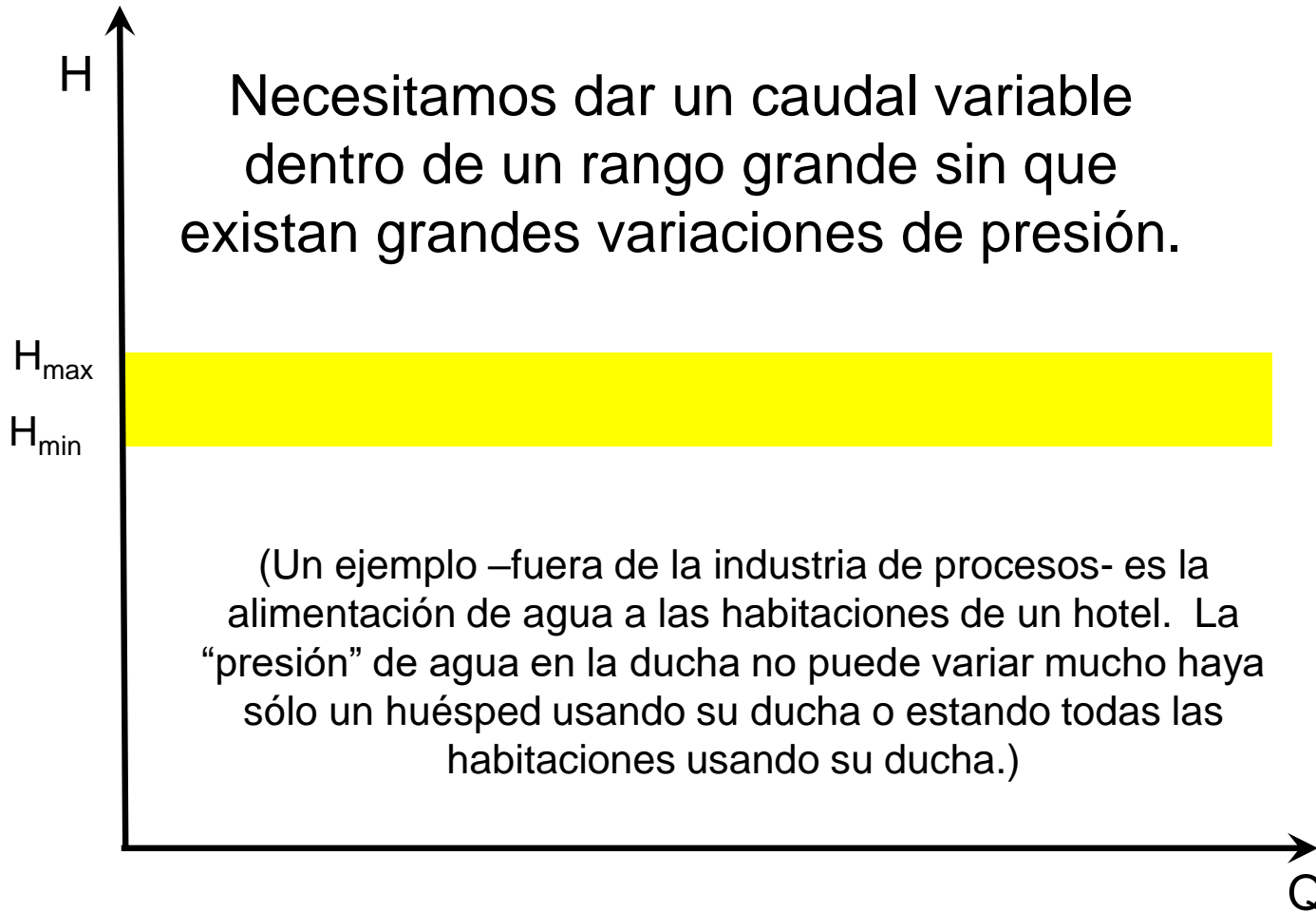
## Problema

Necesitamos dar un caudal variable dentro de un rango grande sin que existan grandes variaciones de presión.

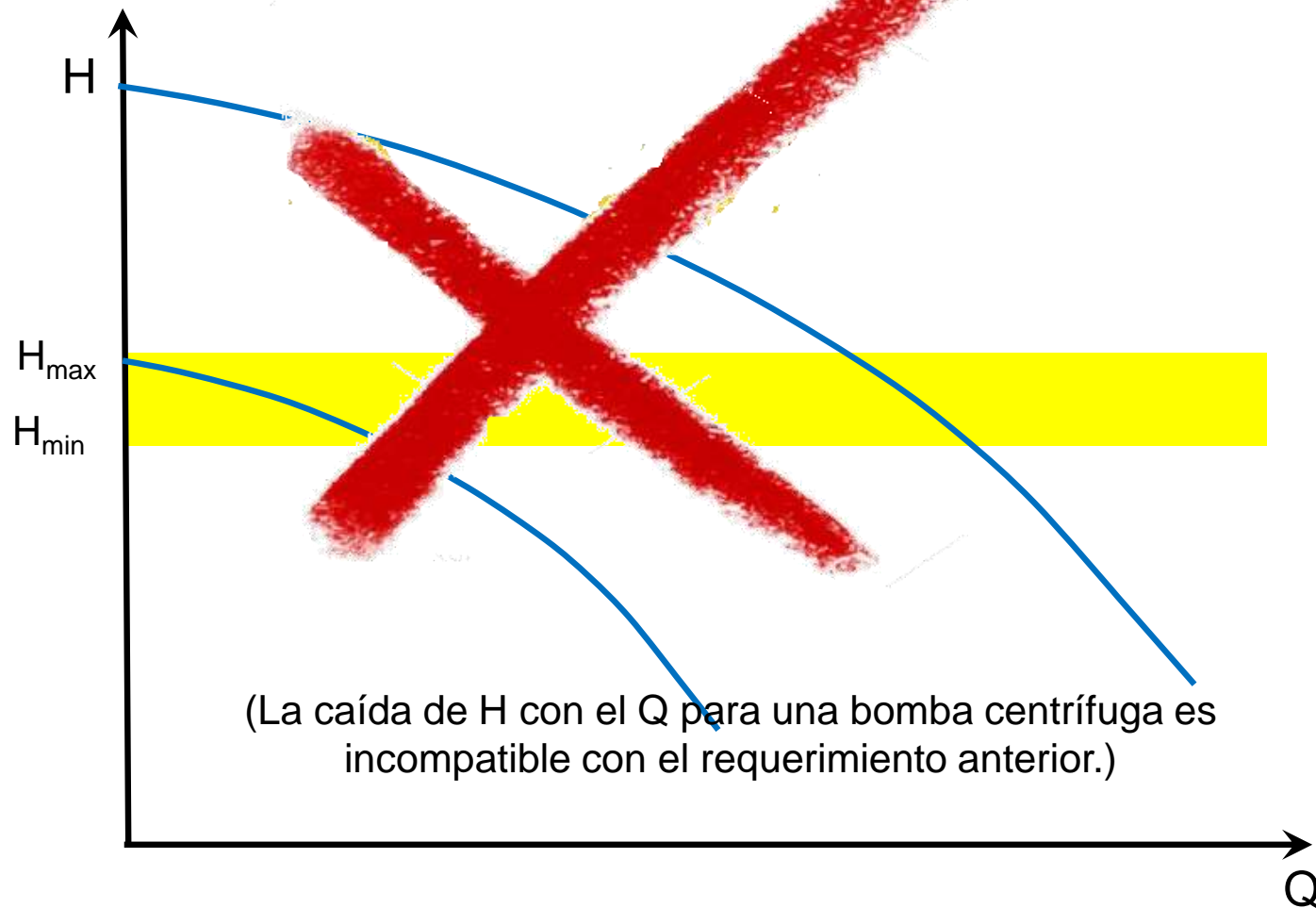


## Problema

Necesitamos dar un caudal variable dentro de un rango grande sin que existan grandes variaciones de presión.

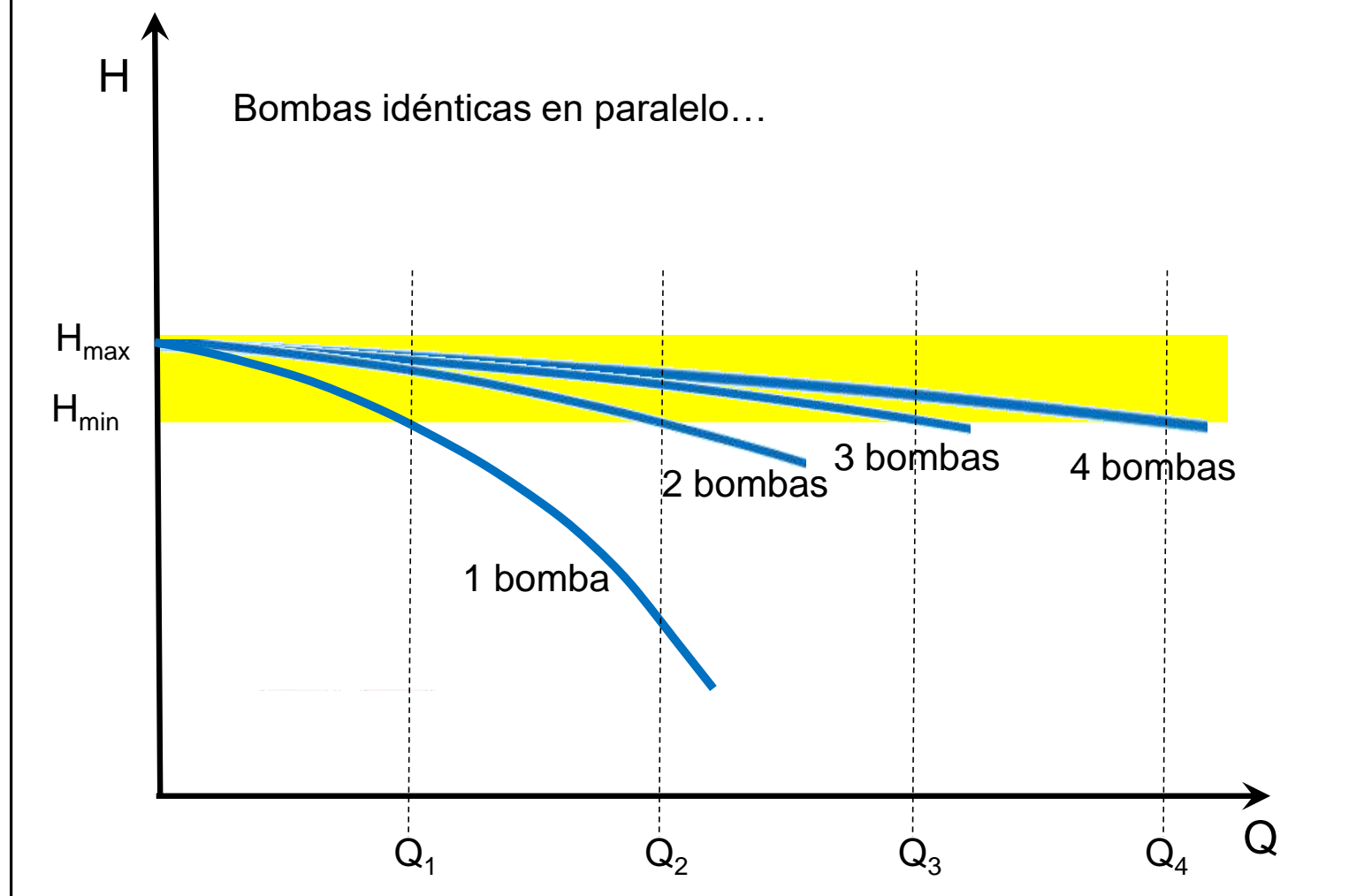


## Problema



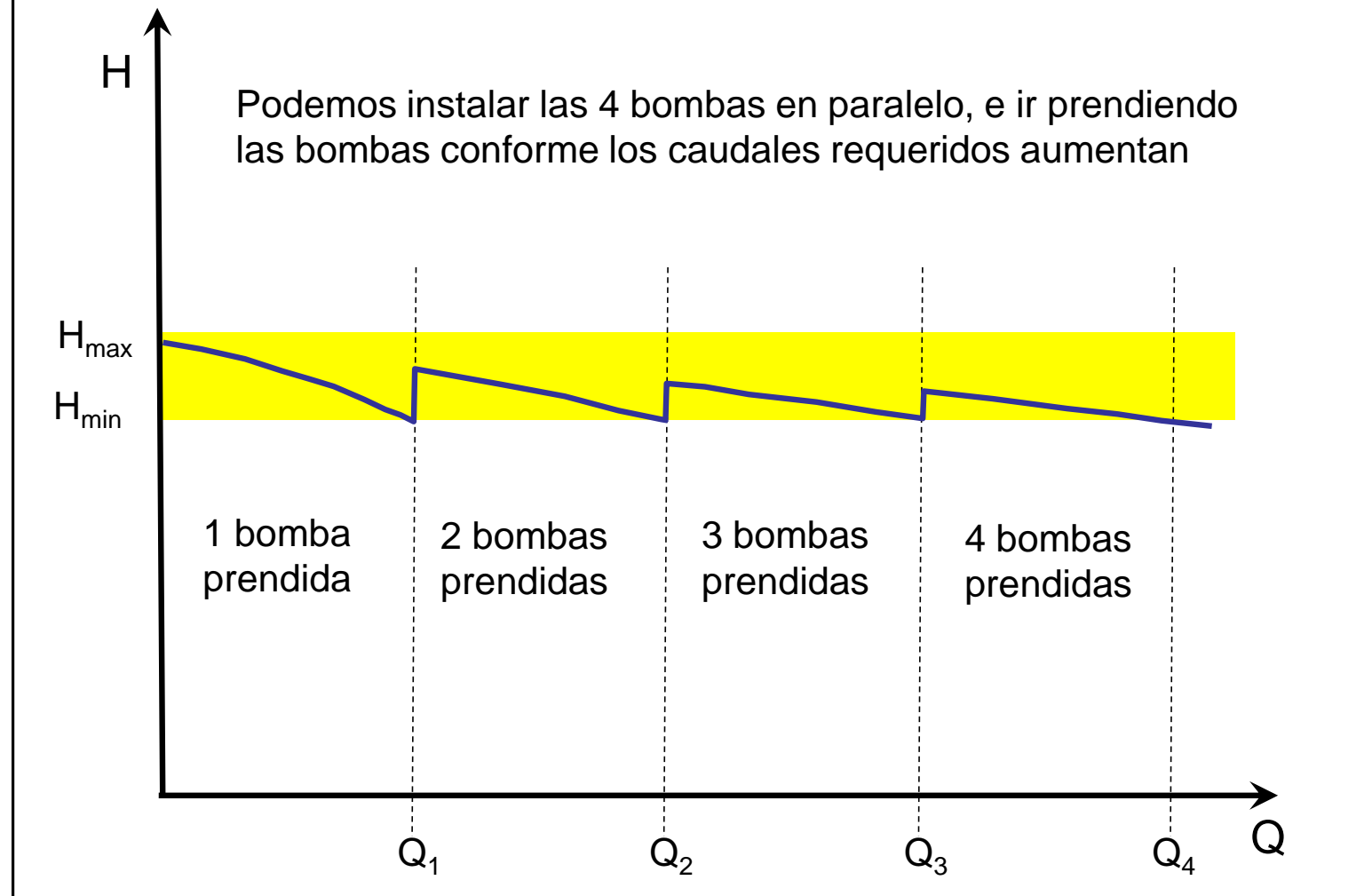


# Problema



# Problema

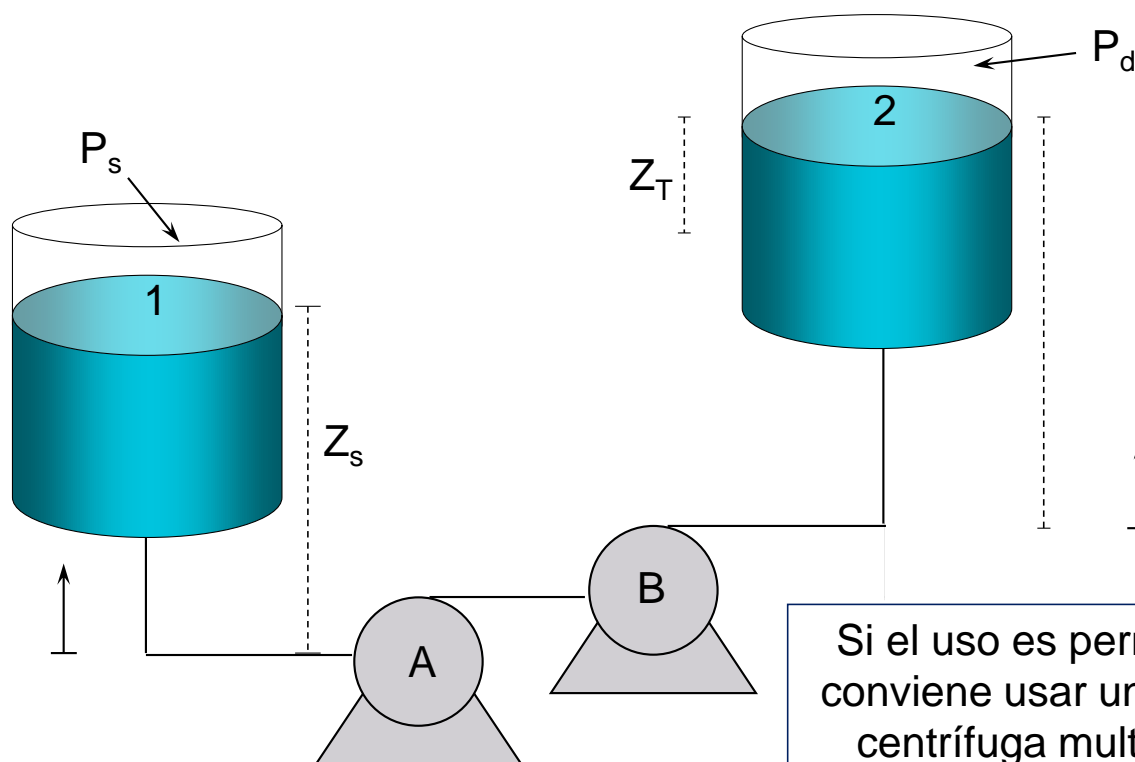
Podemos instalar las 4 bombas en paralelo, e ir prendiendo las bombas conforme los caudales requeridos aumentan



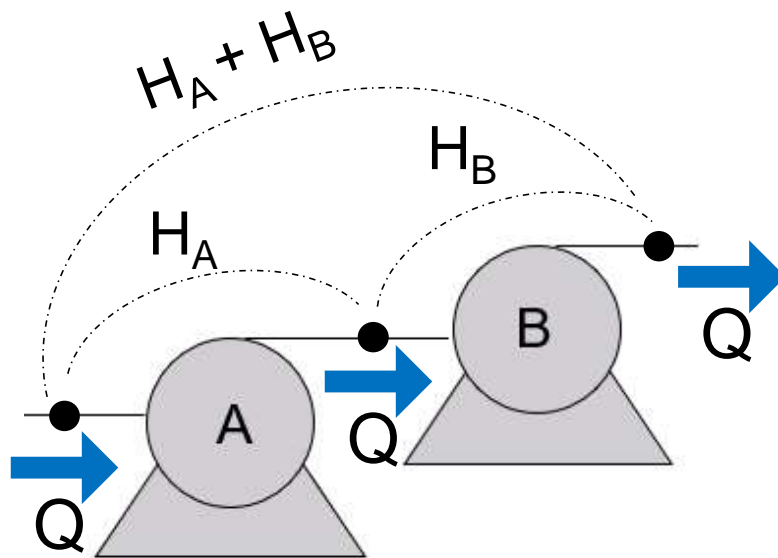


## Acoplamiento en Serie

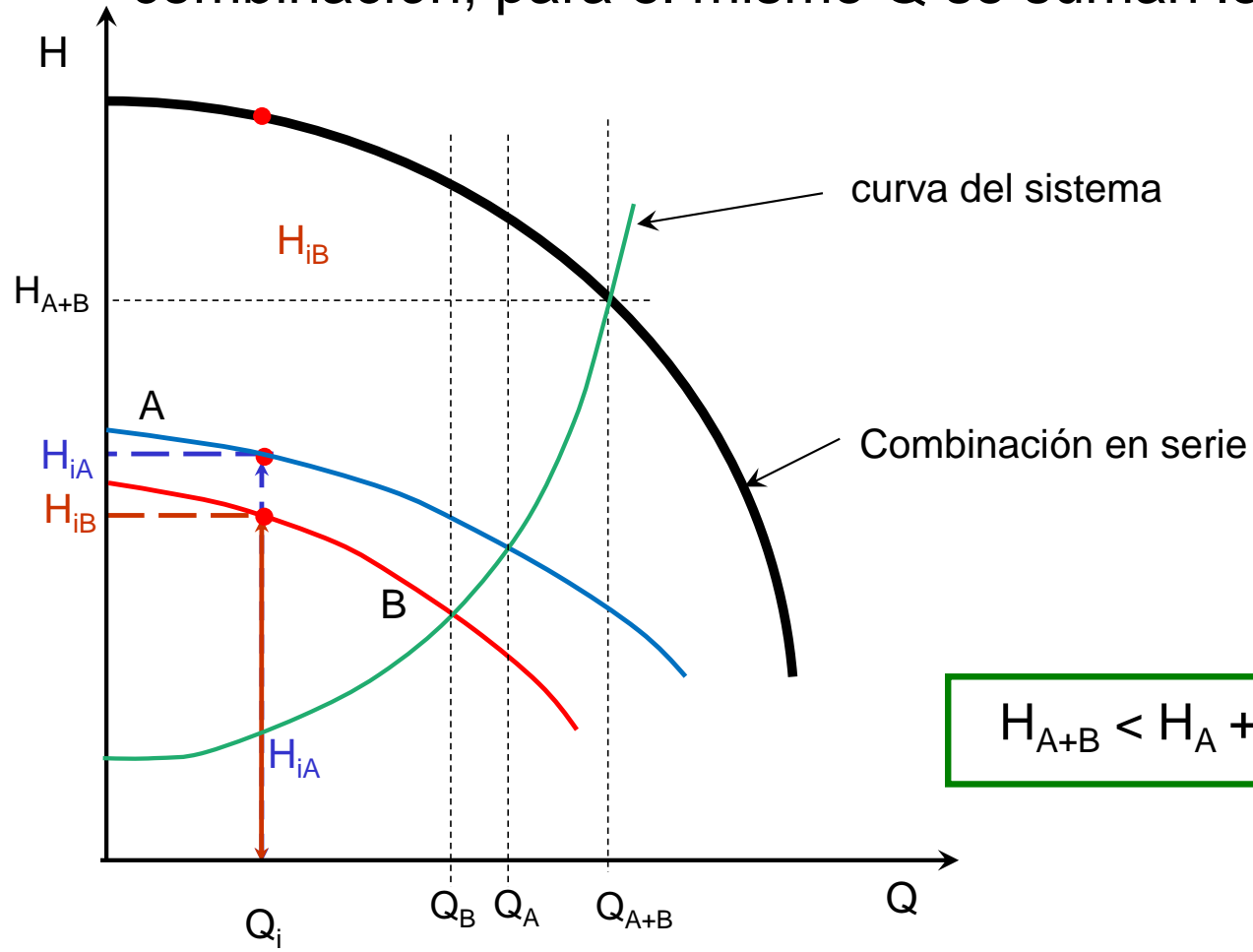
Si la bomba proporciona  $Q$  adecuado pero  $H$  bajo...



Si el uso es permanente conviene usar una bomba centrífuga multietapas



Para determinar la curva resultante de la combinación, para el mismo  $Q$  se suman los  $H$ .



$$H_{A+B} < H_A + H_B$$

## Problema

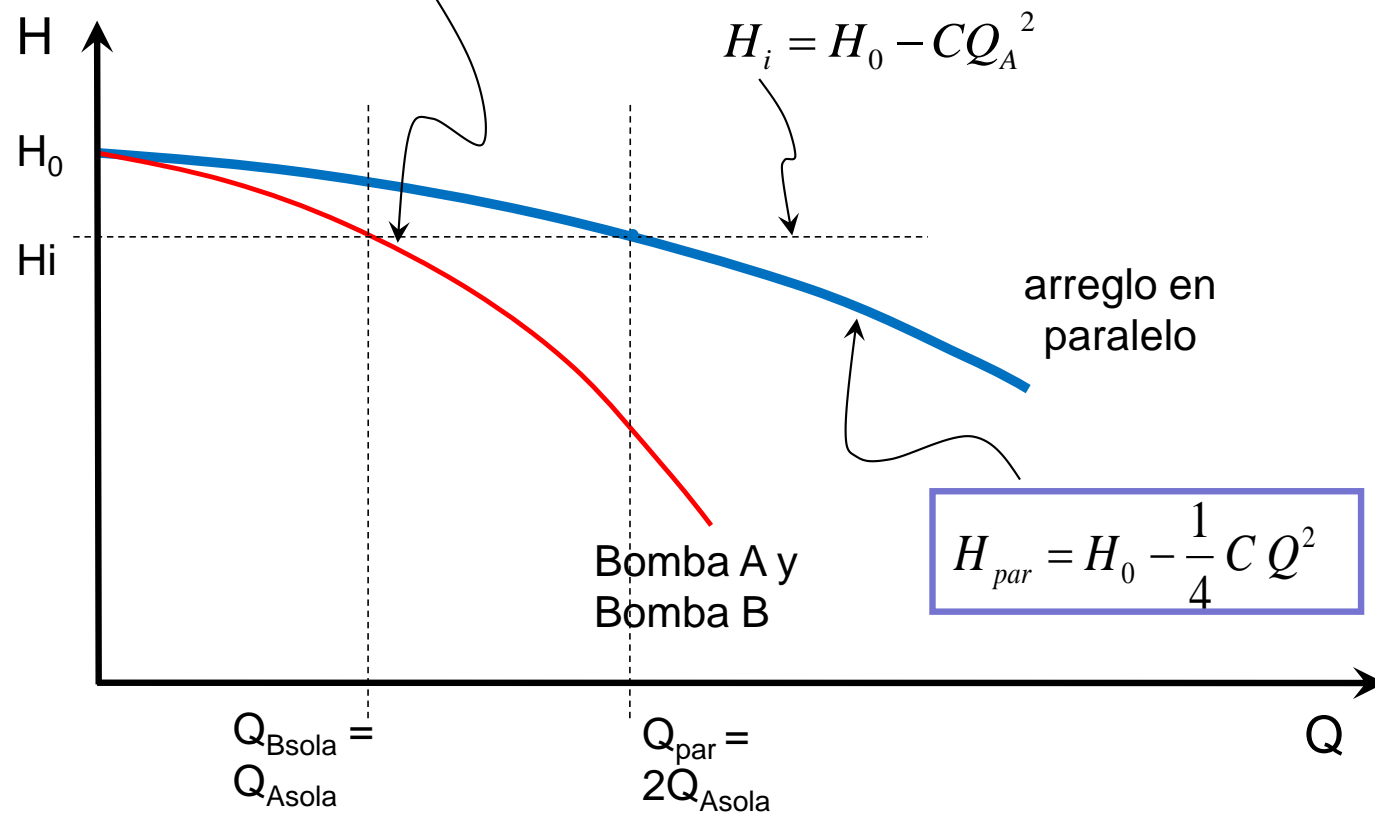
Considere que tiene dos bombas idénticas cuyas curvas características vienen dadas por la

ecuación:  $H = H_0 - C Q^2$

... y que las acopla en paralelo.

Determine la fórmula que relaciona  $H$  con  $Q$  para el arreglo paralelo.

A y B son bombas idénticas, con curvas del tipo:  
 $H = H_0 - C Q^2$





La potencia de la combinación se obtiene sumando la potencia de cada una de las bombas A y B a la misma H del punto de operación:

$$Pm_{A+B} = Pm_{A,H_{A+B}} + Pm_{B,H_{A+B}}$$

## Problema

Considere que tiene dos bombas idénticas cuyas curvas características vienen dadas por la

ecuación:  $H = H_0 - C Q^2$

... y que las acopla en serie.

Determine la fórmula que relaciona  $H$  con  $Q$  para el arreglo en serie.

Si las bombas que se acoplan son iguales, con curvas del tipo:  $H = H_0 - A Q^2$ ,

$$H_{\text{serie}} = H_A + H_B = 2 H_i = 2 (H_0 - A Q_i^2)$$

$$Q_{\text{serie}} = Q_A = Q_B = Q_i$$

$$H_{\text{serie}} = 2 H_0 - 2 A Q_{\text{serie}}^2$$

La potencia de la combinación se obtiene sumando la potencia de cada una de las bombas A y B al mismo Q del punto de operación:

$$Pm_{A+B} = Pm_{A,Q_{A+B}} + Pm_{B,Q_{A+B}}$$

## Recomendaciones para el diseño de la instalación

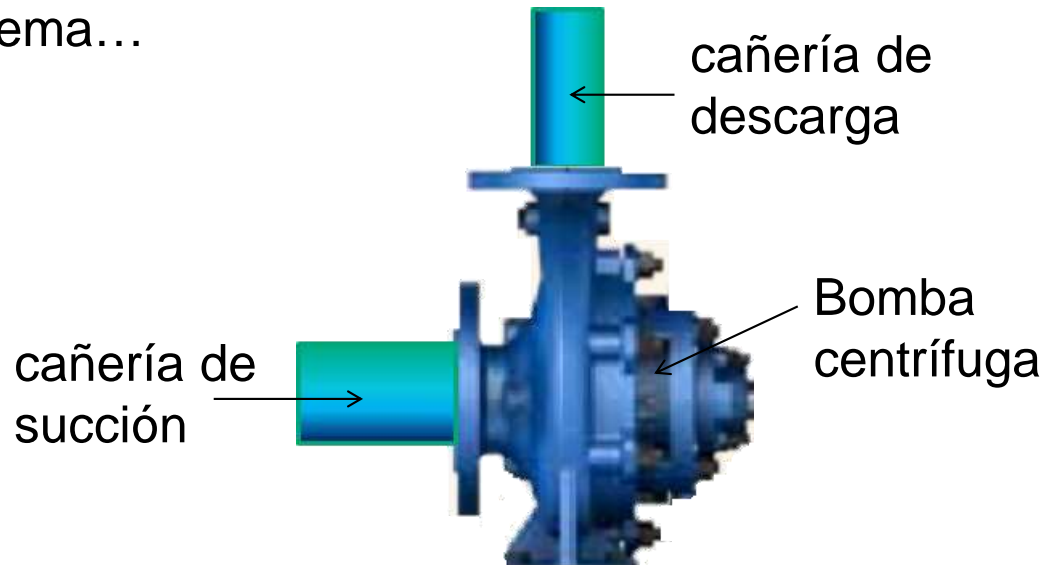
Además de elegir la bomba más adecuada para el servicio requerido, deberemos cuidar el diseño del resto de la instalación.

- ❑ Motor y acoplamiento
- ❑ Línea de succión
- ❑ Línea de descarga

# “La bomba sola no alcanza”

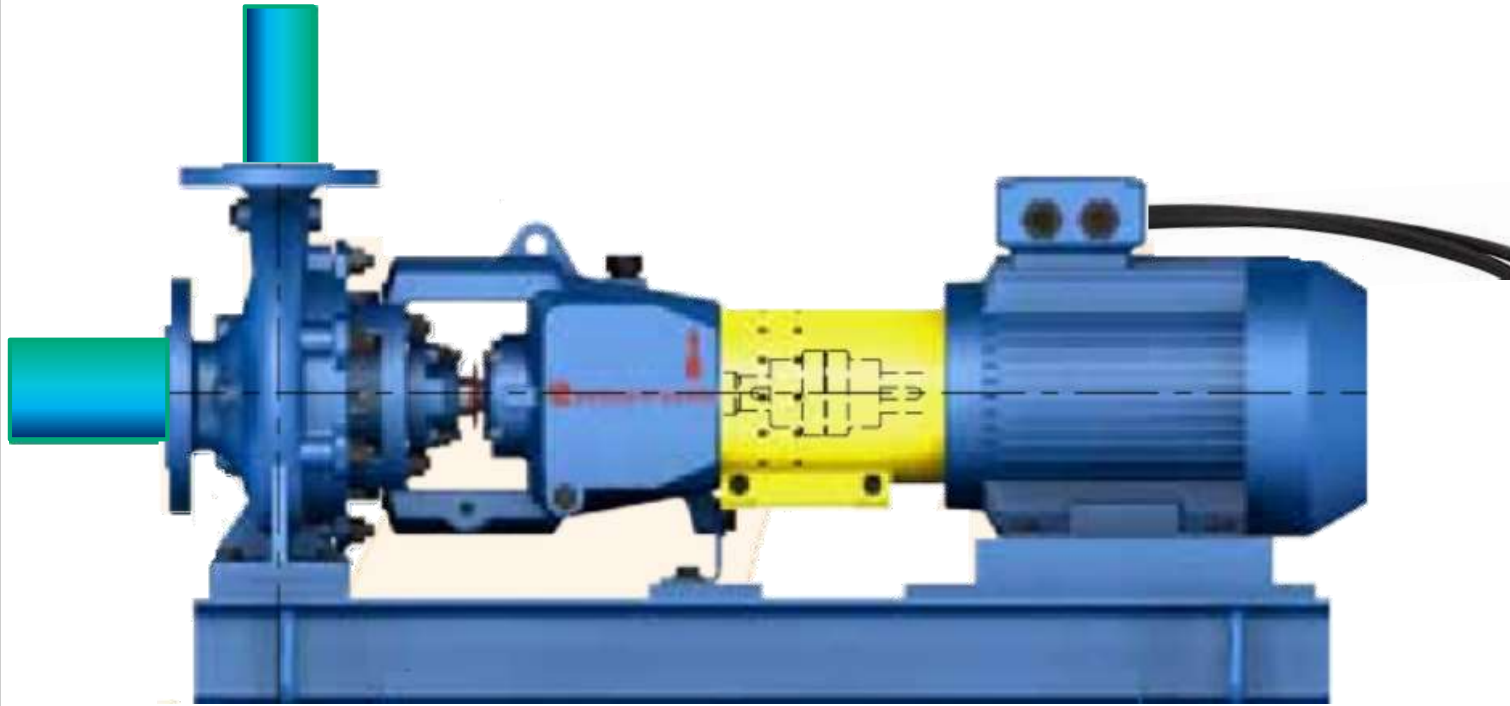
La mecánica de fluidos estudia las fuerzas y el movimiento de los fluidos. En particular la Fluidodinámica aborda la problemática asociada a las conducciones, los accesorios, los impulsores, los medidores,...

Estamos estudiando las bombas centrífugas y su correcta elección a partir de curvas características y curva del sistema...



... pero el ingeniero “tendrá que vérselas” con esto también:

sellos, ejes, rodamientos, acoples, motores y su alimentación eléctrica... son tan importantes como la bomba en sí para lograr el objetivo: bombear el líquido al caudal requerido y venciendo la presión requerida.



## Motor y acoplamiento

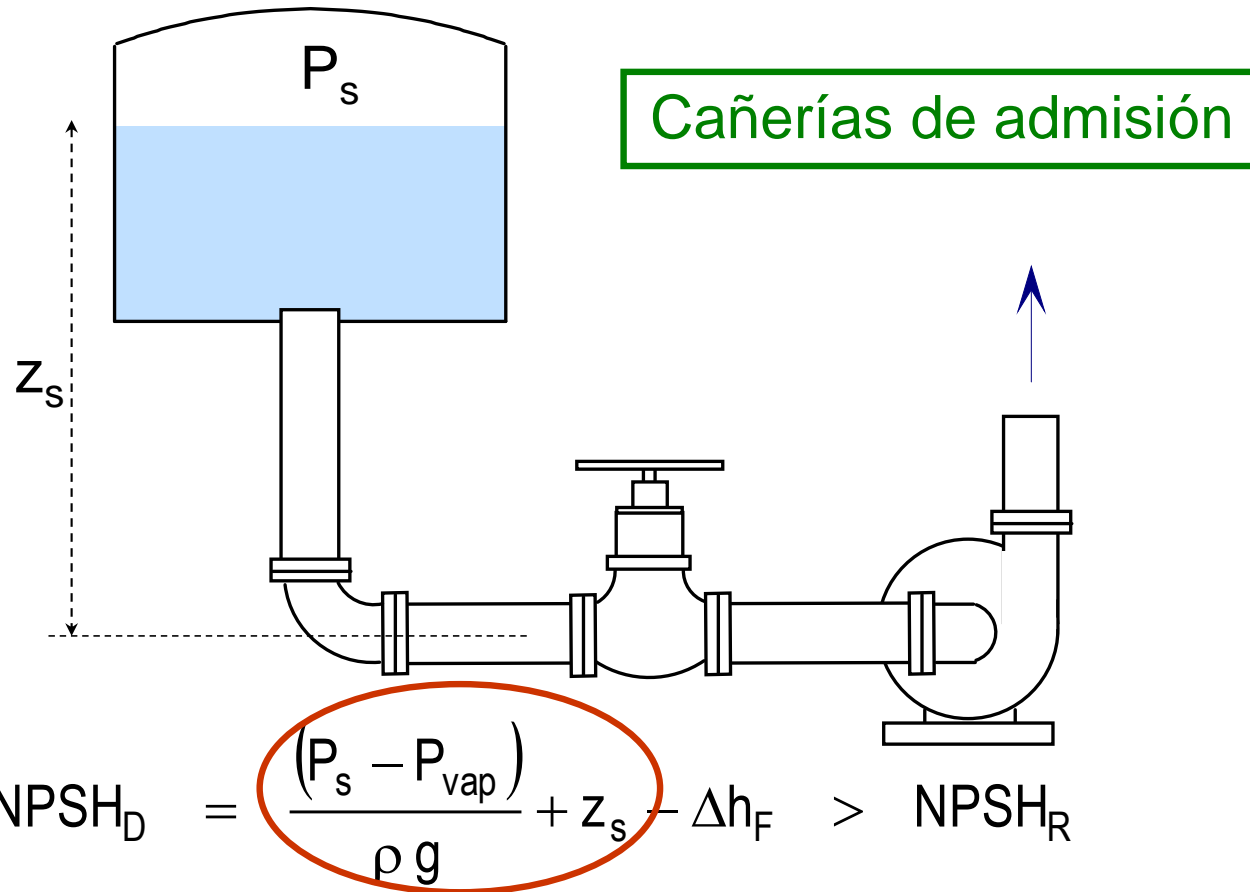
Algunas bombas son ofrecidas por el fabricante junto con su motor (como una unidad). En otros casos, el fabricante sólo provee la bomba (con su sello) y es necesario acoplar un motor.

Al elegir el motor se deberá tener en cuenta la potencia necesaria, velocidad de rotación y toda recomendación que pueda dar el fabricante de la bomba.

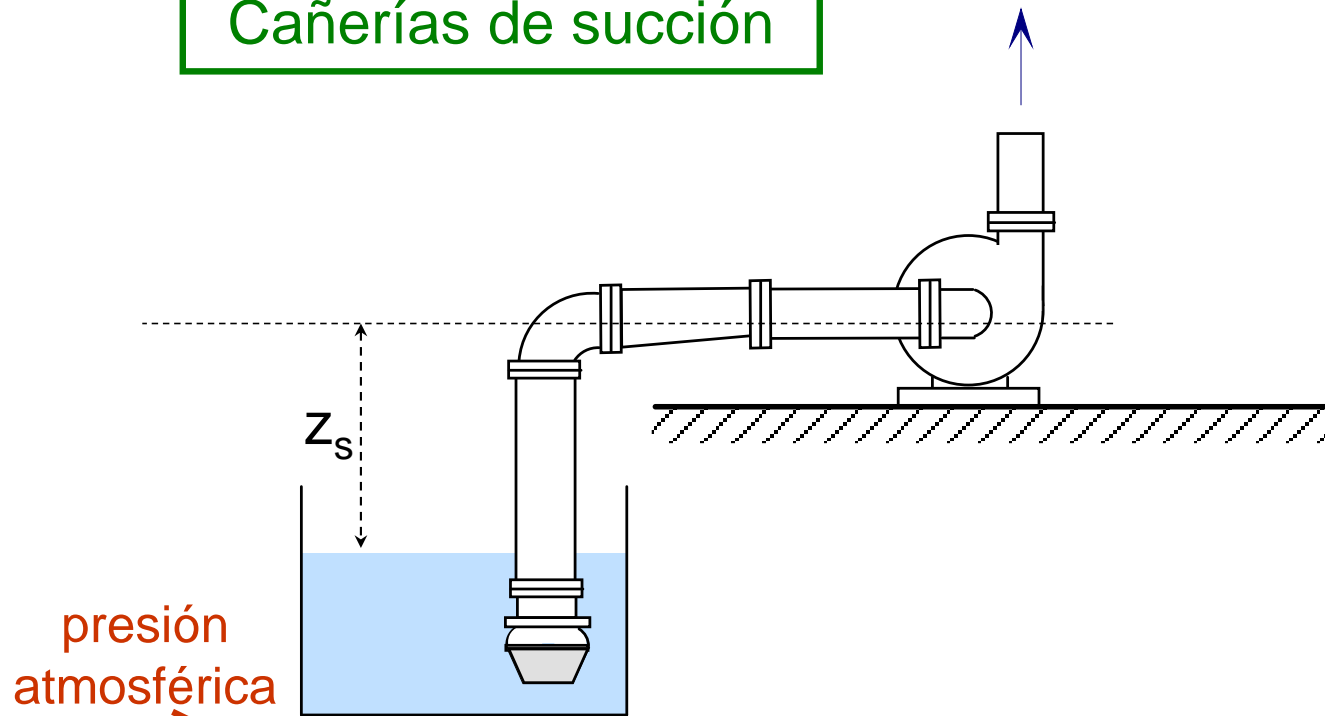
También será relevante tomar en cuenta las características del entorno donde se instalará (interior, exterior, ambiente con polvo, humedad, etc...)



# Línea de admisión/succión



## Cañerías de succión

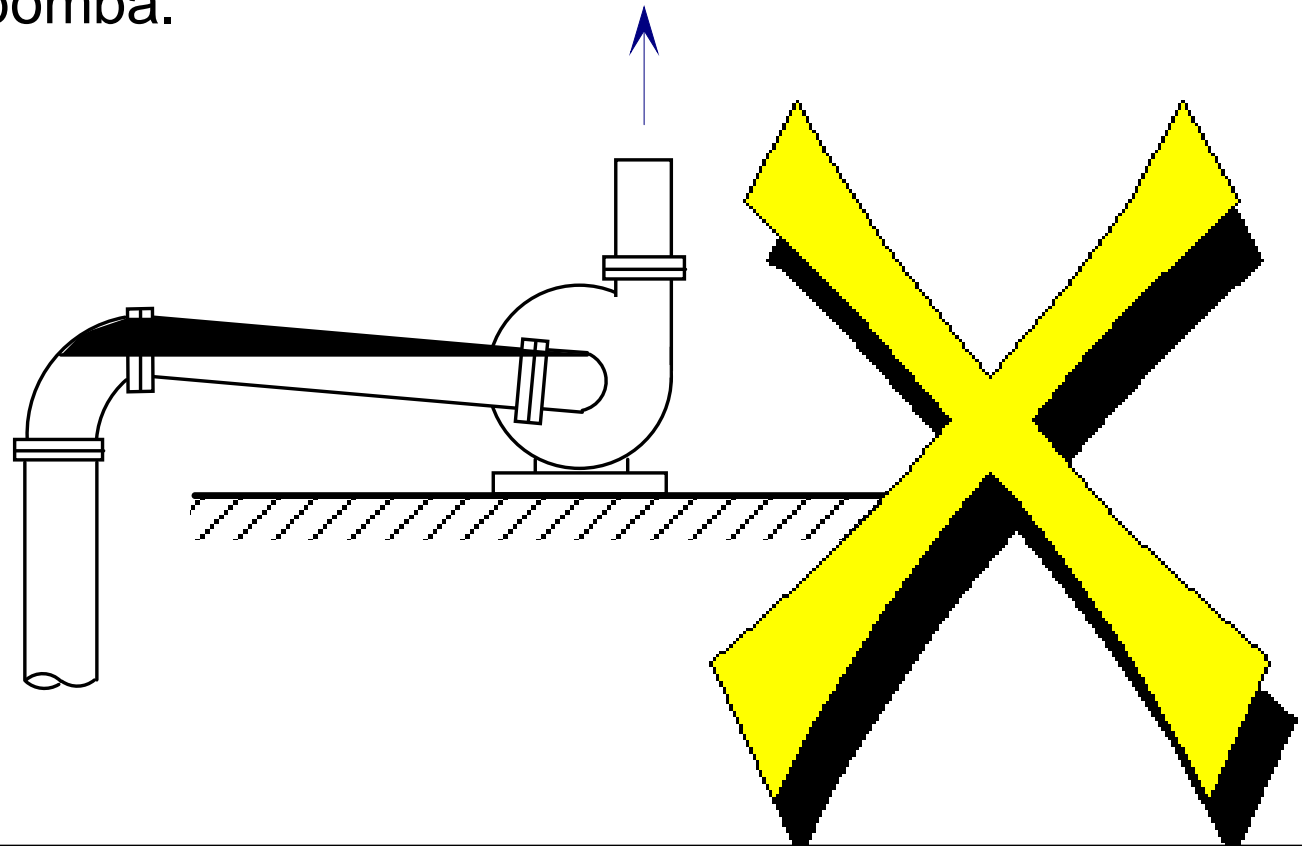


$$\text{NPSH}_D = \frac{(P_s - P_{\text{vap}})}{\rho g} - z_s - \Delta h_F > \text{NPSH}_R$$

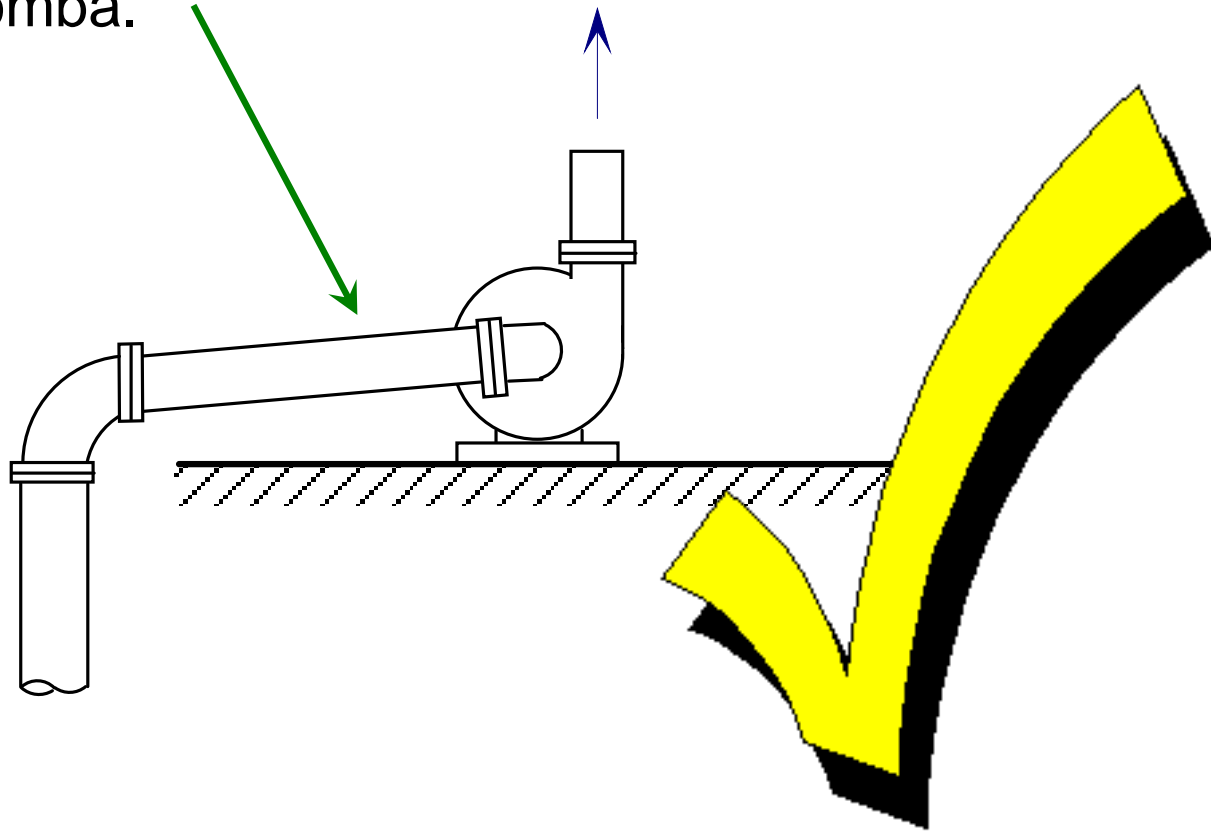
## Criterios generales

- Bajas  $\Delta h_F$ , para evitar la cavitación.
  - $\phi_{\text{cañería}}$  que permita bajas velocidades:
    - 1 a 2 m/s para cañerías de succión,
    - 1.5 a 2.5 m/s para cañerías de admisión
  - Cañería **directa** y tan **corta** como sea posible, evitar codos, curvas, tes, y piezas especiales (cambios de dirección con curvas de radio amplio; utilizar piezas en Y y no T)
  - En cañerías de **succión** evitar:
    - válvulas que no sean de retención y dispositivos de medida.
  - En cañerías de **admisión** son necesarias:
    - llaves de paso (reparaciones, no para regular Q).

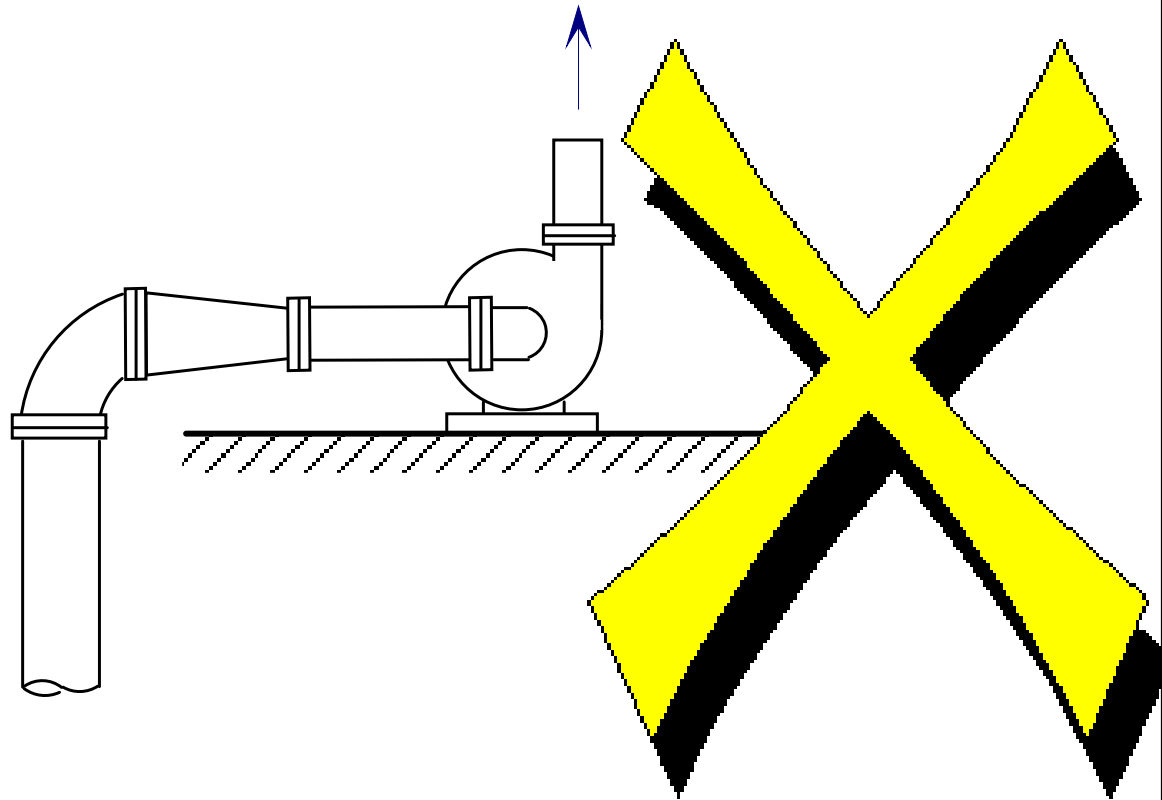
- Evitar puntos altos → purgas de aire
- Tramos horizontales con leve pendiente hacia la bomba.



- Evitar puntos altos ➡ purgas de aire
- Tramos horizontales con leve pendiente hacia la bomba.

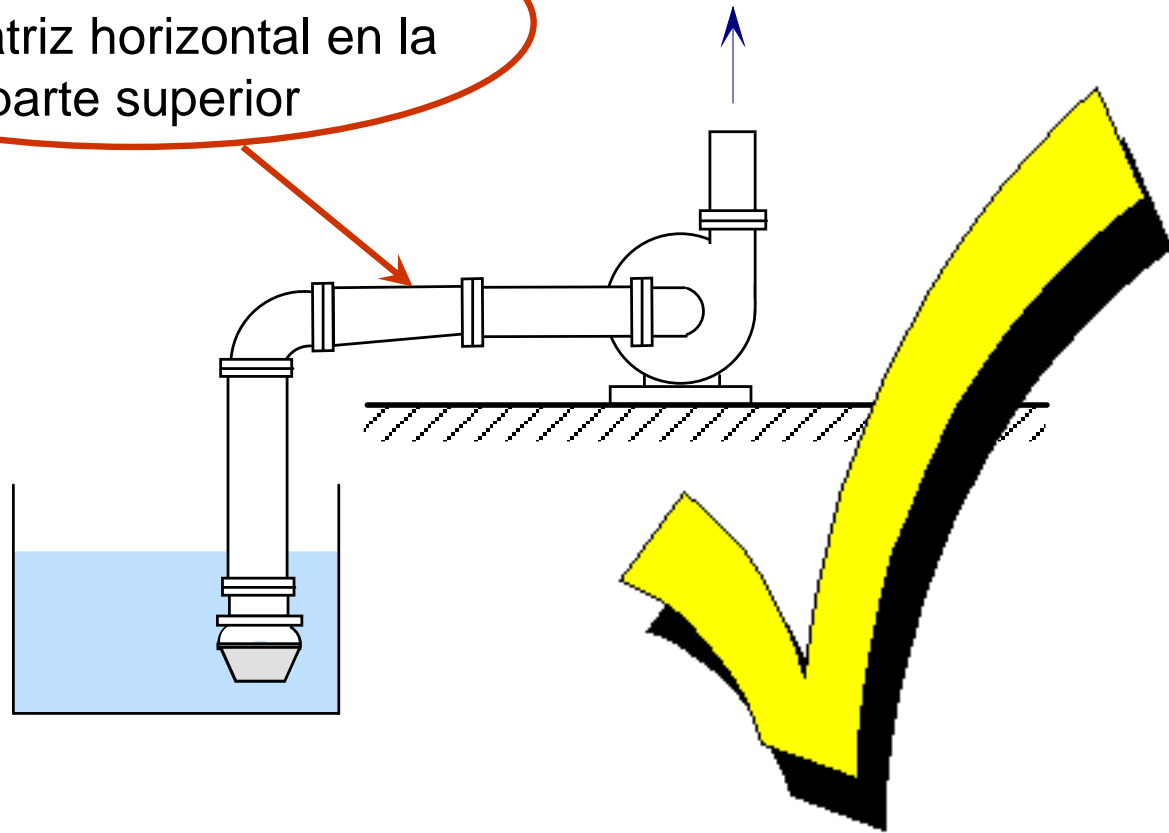


- Si debe realizarse reducción de diámetro ésta debe ser excéntrica:

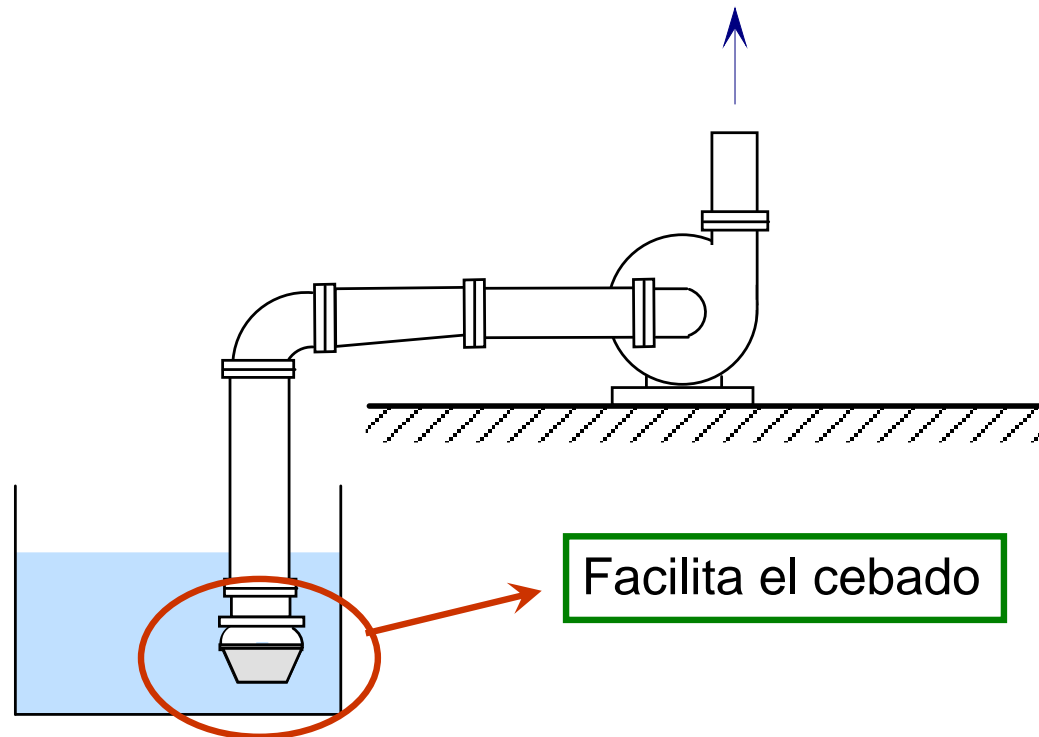


- Si debe realizarse reducción de diámetro:

reducción excéntrica con la generatriz horizontal en la parte superior

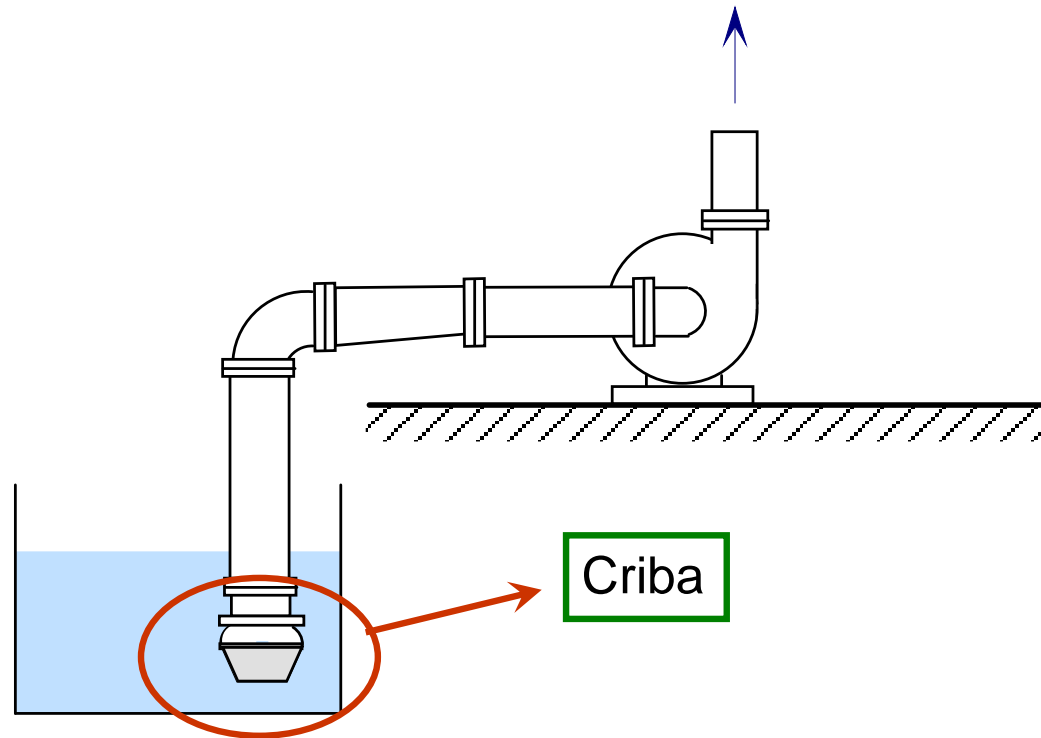


- Instalar una válvula de retención de pie:

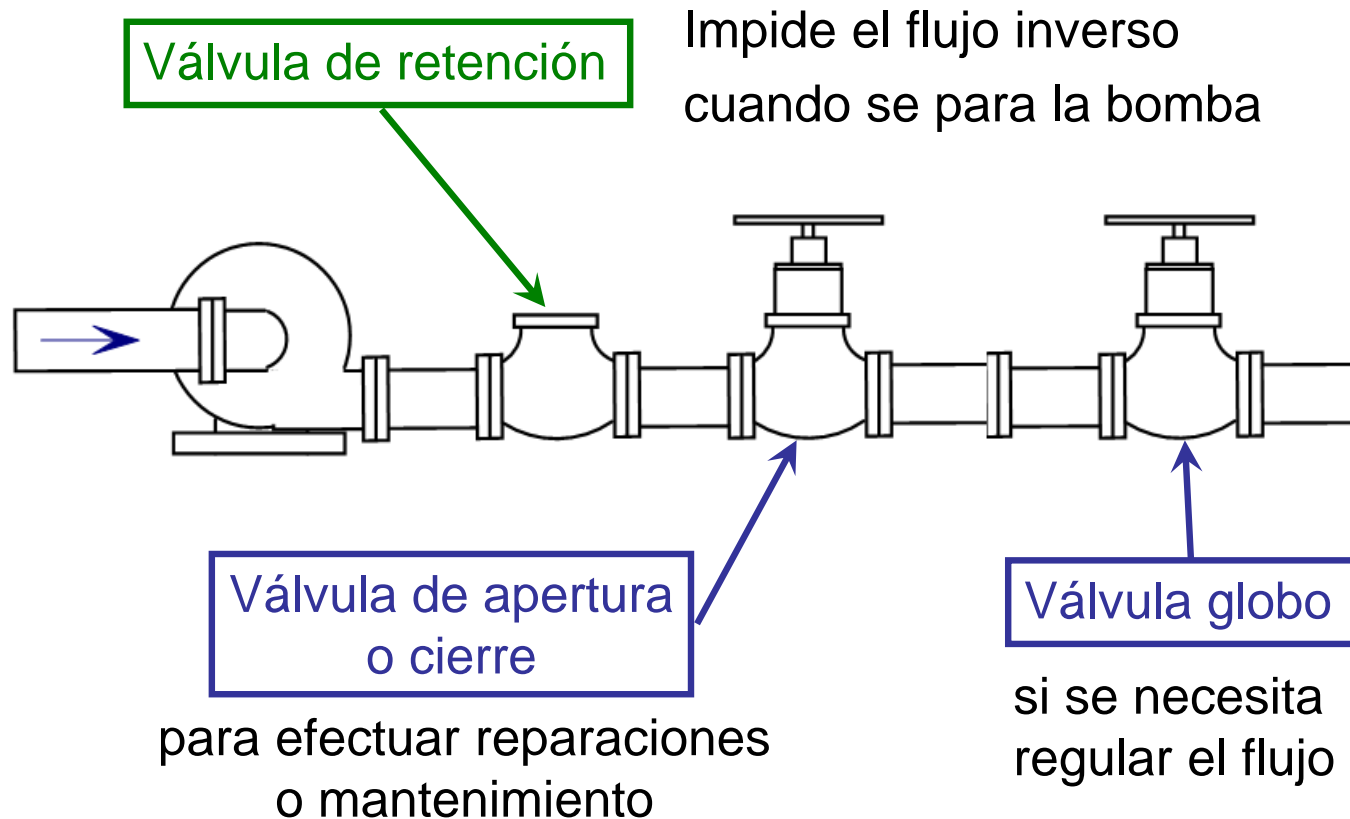




- Que no entren objetos extraños indeseables:



# Línea de descarga

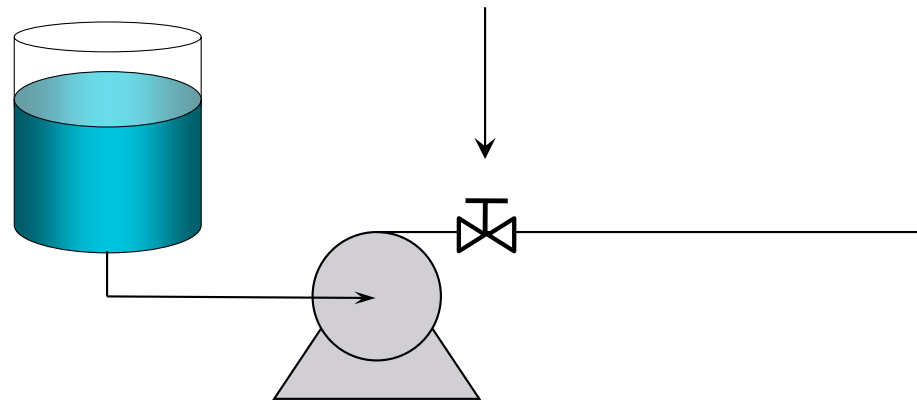


# Trabajando con Bombas Centrífugas

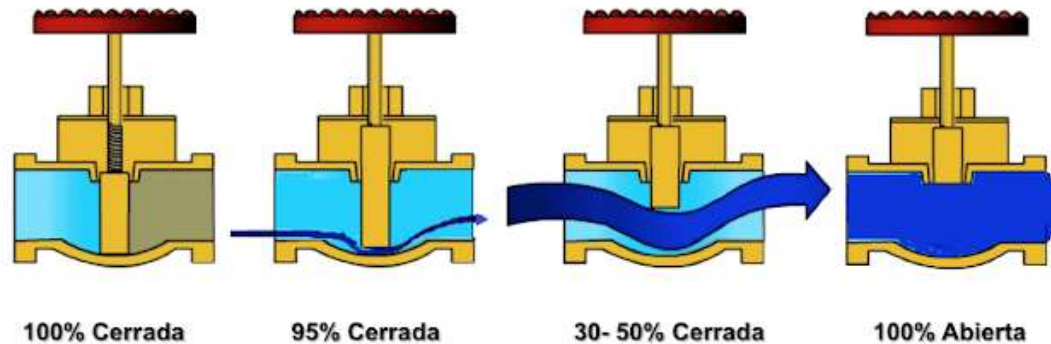
- ❑ Arranque y parada de la bomba
- ❑ Regulación del caudal
- ❑ Si la bomba no trabaja como se espera?
- ❑ Efectos de “envejecimiento”

# ¿Cómo arrancar la bomba?

¿Con la válvula de descarga abierta o cerrada?



¿Con la válvula de descarga abierta o cerrada?



- ❑ Depende de la bomba (LEER EL MANUAL !!!)
- ❑ Importa la presión máxima
- ❑ Importa mucho evitar golpes de ariete
- ❑ Importa minimizar el pico de consumo

# ¿Se acuerdan?....

## Otras causas que generan golpe de ariete

---

- En el arranque y parada de bombas (cierre de válvulas de retención)
- Uso de bombas reciprocantes
- Golpe de vapor. Sistemas de distribución de vapor generación de flujo bifásico tipo *slug*

42

## Ariete hidráulico (water hammer)



Detención abrupta del flujo











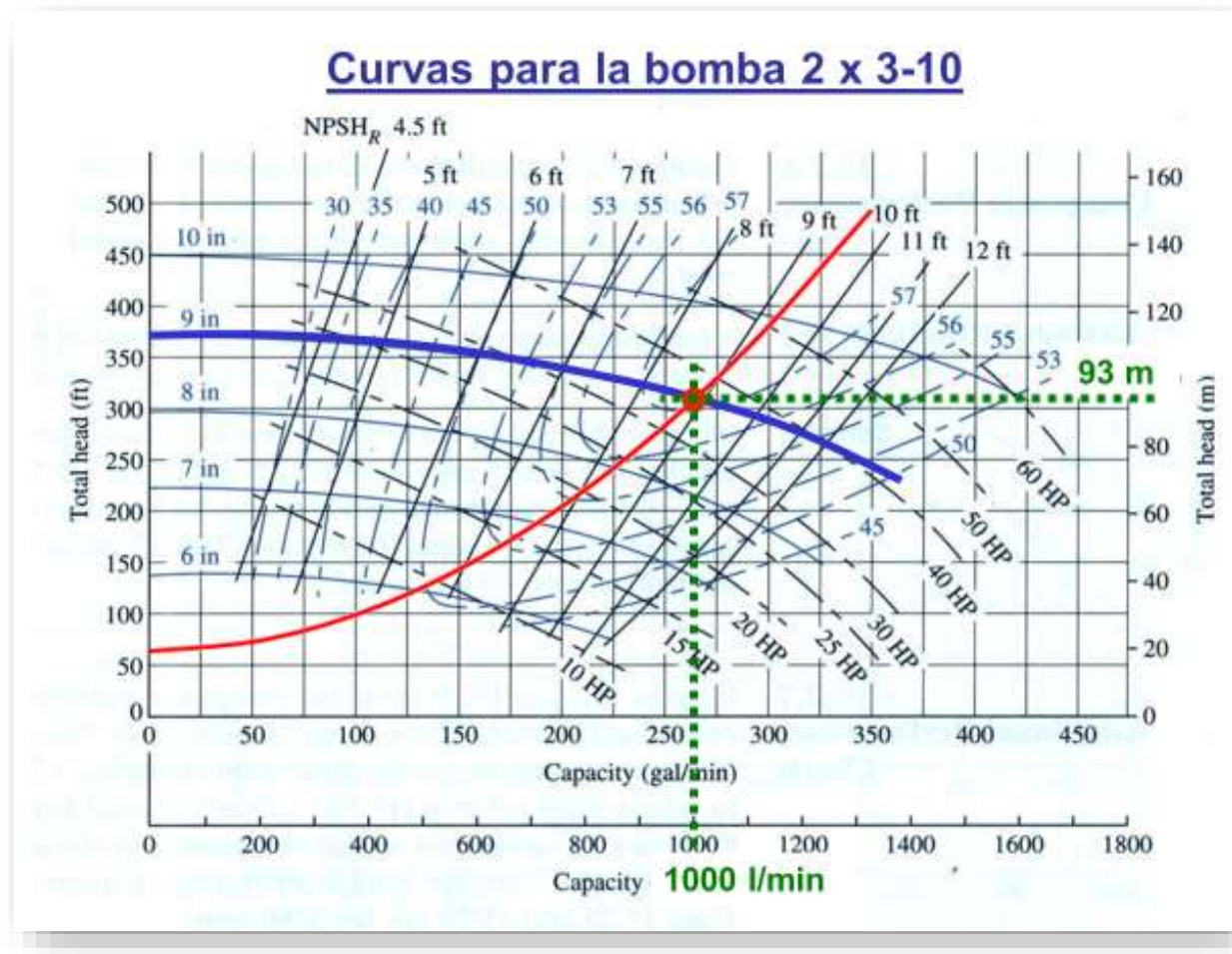
112

Fenómeno potencialmente perjudicial , ya que la sobrepresión generada puede llegar de **60 a 100 veces** la presión normal de la tubería, ocasionando roturas en los accesorios instalados

La fuerza del golpe de ariete es:

- ❑ directamente proporcional a la longitud del ducto, ya que las ondas de sobrepresión se cargarán de más energía, e
- ❑ inversamente proporcional a la aceleración (cambio de velocidad en el tiempo) – cuánto más rápido el cambio más fuerte será el golpe.

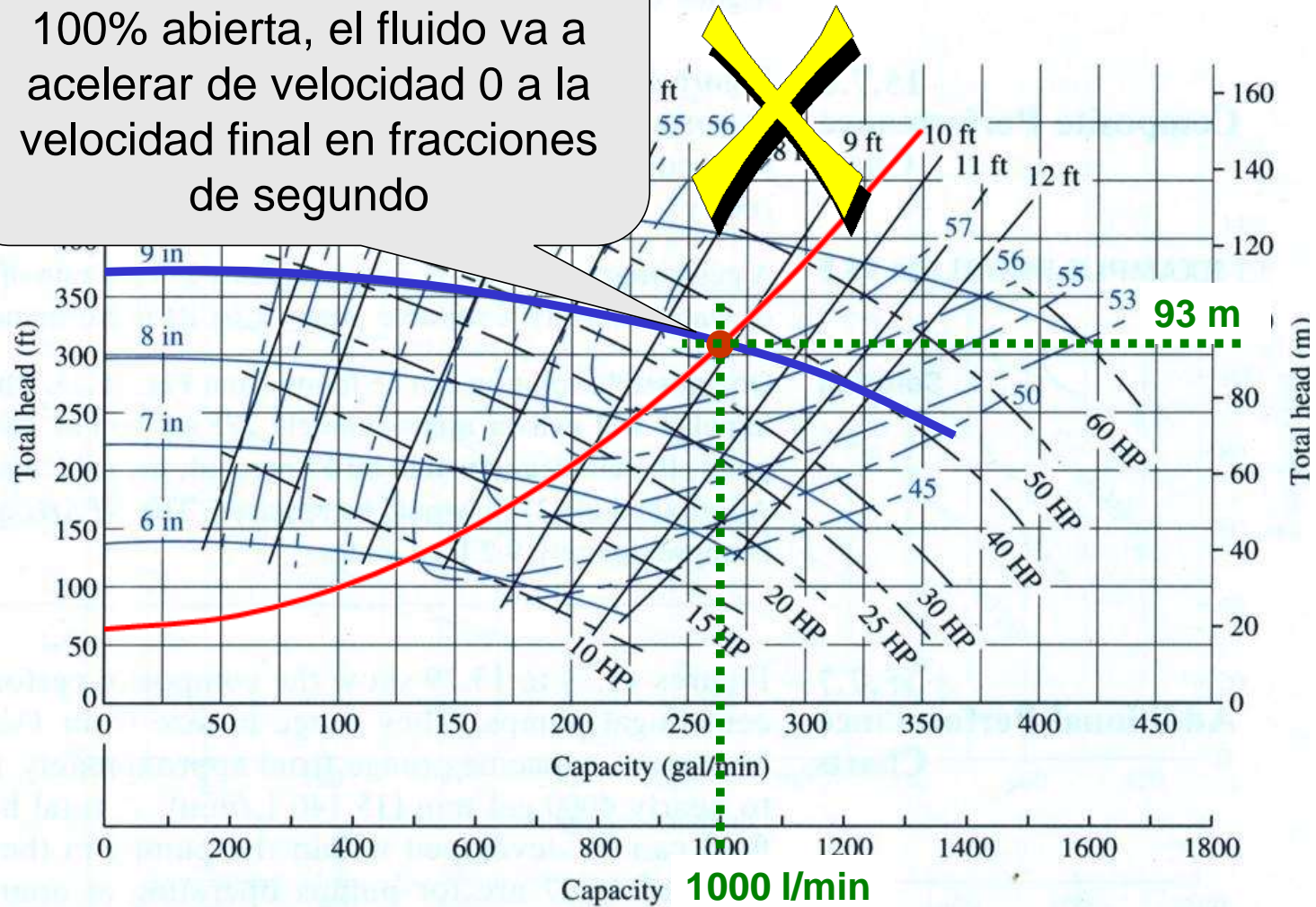
# Caso Bomba Centrífuga



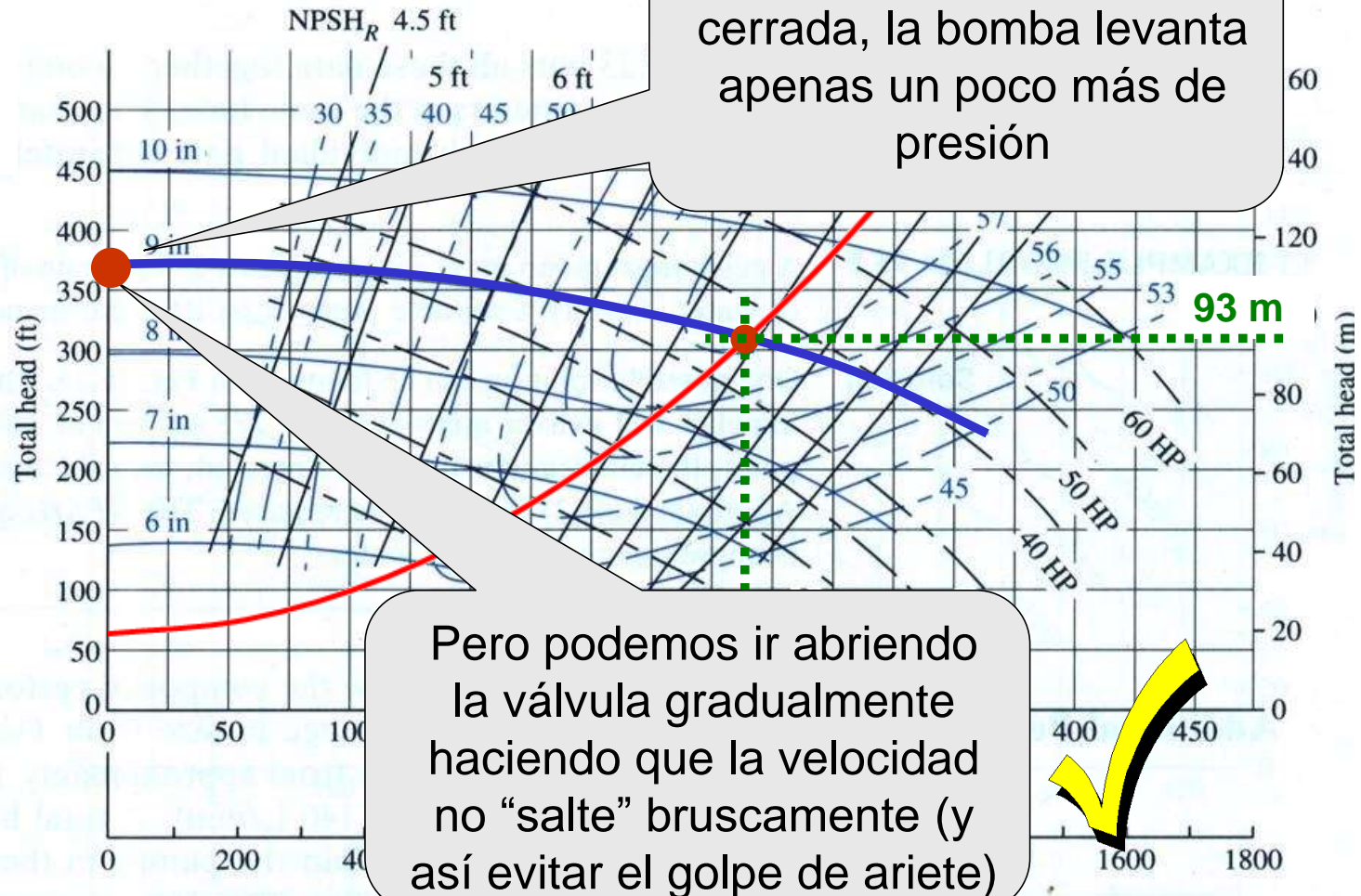


Si arrancamos con válvula 100% abierta, el fluido va a acelerar de velocidad 0 a la velocidad final en fracciones de segundo

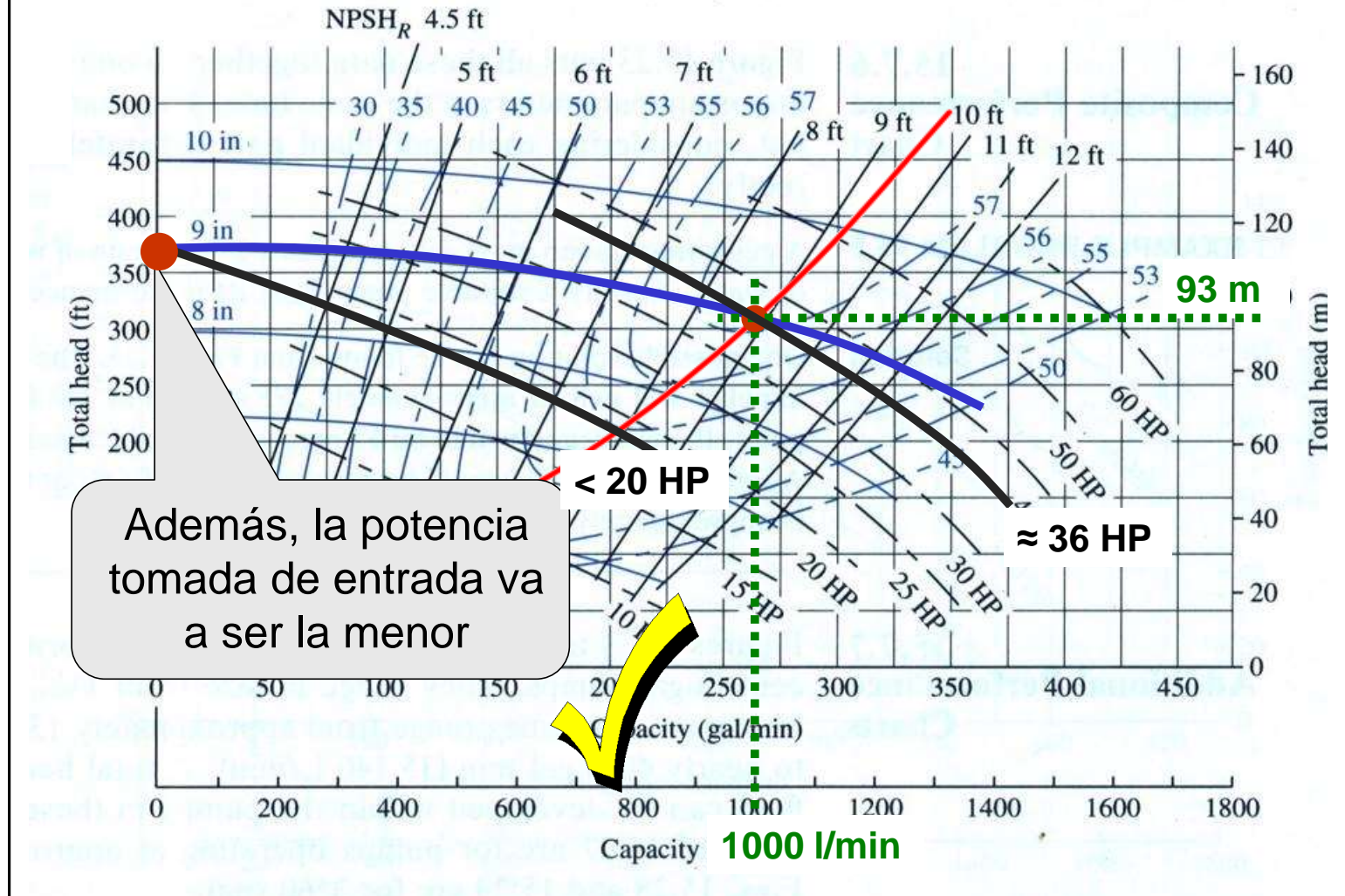
## bomba 2 x 3-10



## Curvas para la

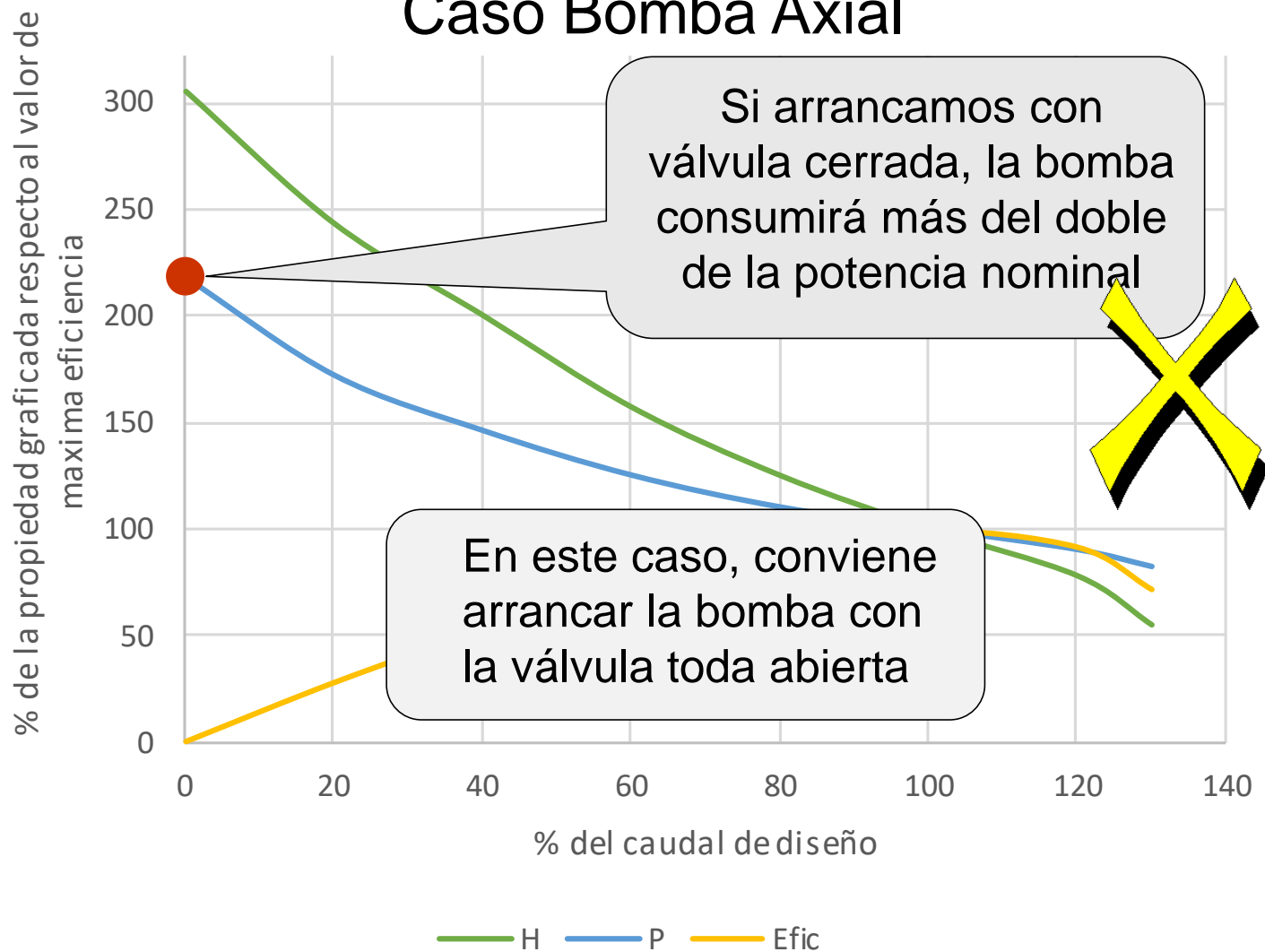


## Curvas para la bomba 2 x 3-10





## Caso Bomba Axial





# ¿Cómo arrancar la bomba?

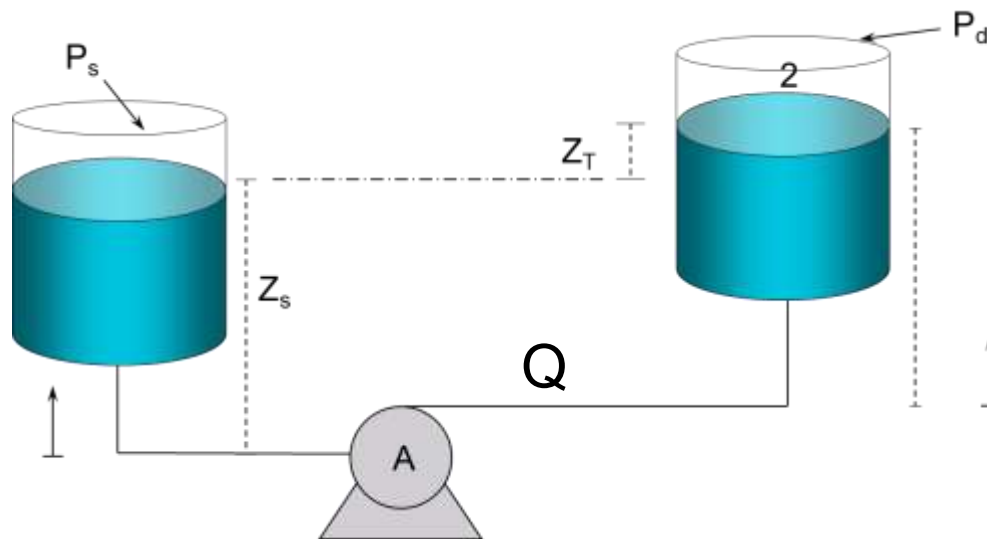
- Leer el manual del fabricante.
- Prestar atención a la apertura de la válvula de descarga (dependerá del tipo de bomba)
- Bomba llena de líquido (cebarla si es necesario)
- Al arrancar, verificar
  - sentido de giro
  - presiones “esperadas” en manómetros en succión y descarga
  - consumo de motor
  - ausencia de ruidos, olores, temperaturas anormales, pérdidas de fluido,...

## ¿Cómo apagar la bomba?

- Leer el manual del fabricante.
- Regla general: seguir los pasos del arranque en el orden inverso

# Regulación del caudal

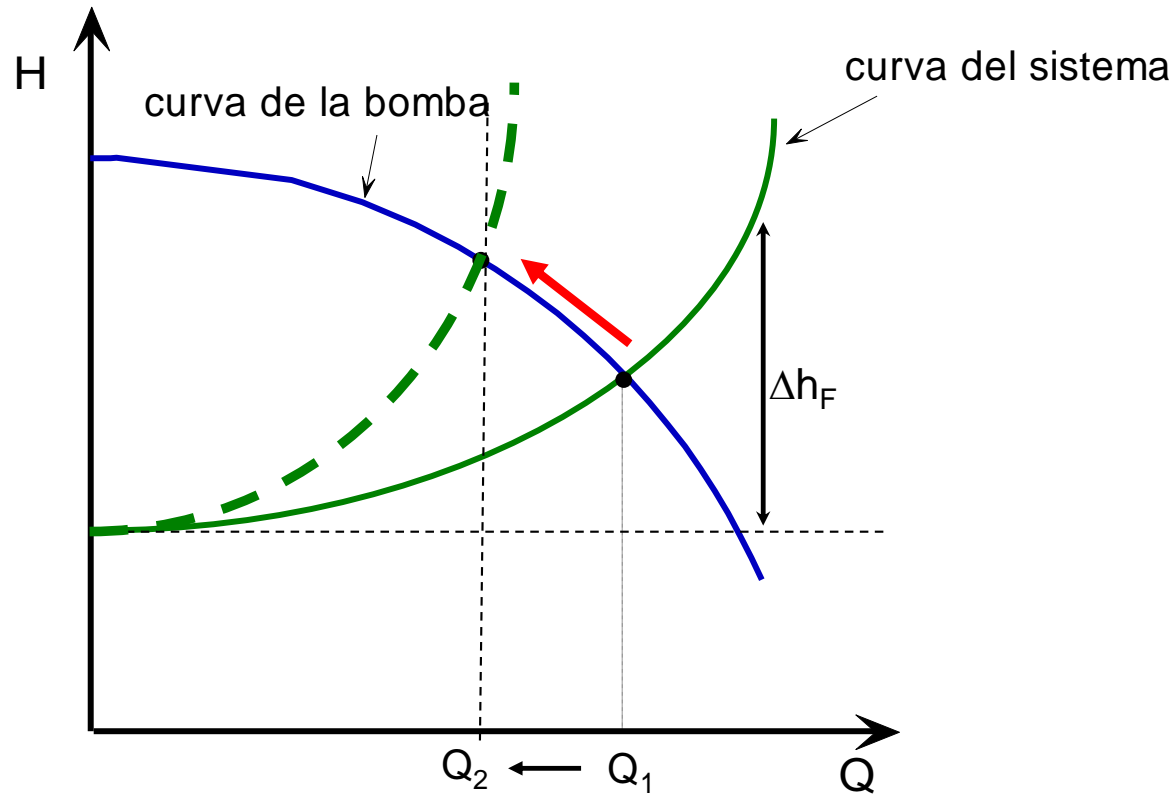
Muchas veces necesitaremos regular el caudal



Supongamos que queremos reducir el caudal...  
.... qué podemos hacer?

1. Estrangulación en la impulsión
2. Variación de la velocidad del rotor
3. Cegado de canales del rotor

## 1. Estrangulación en la impulsión

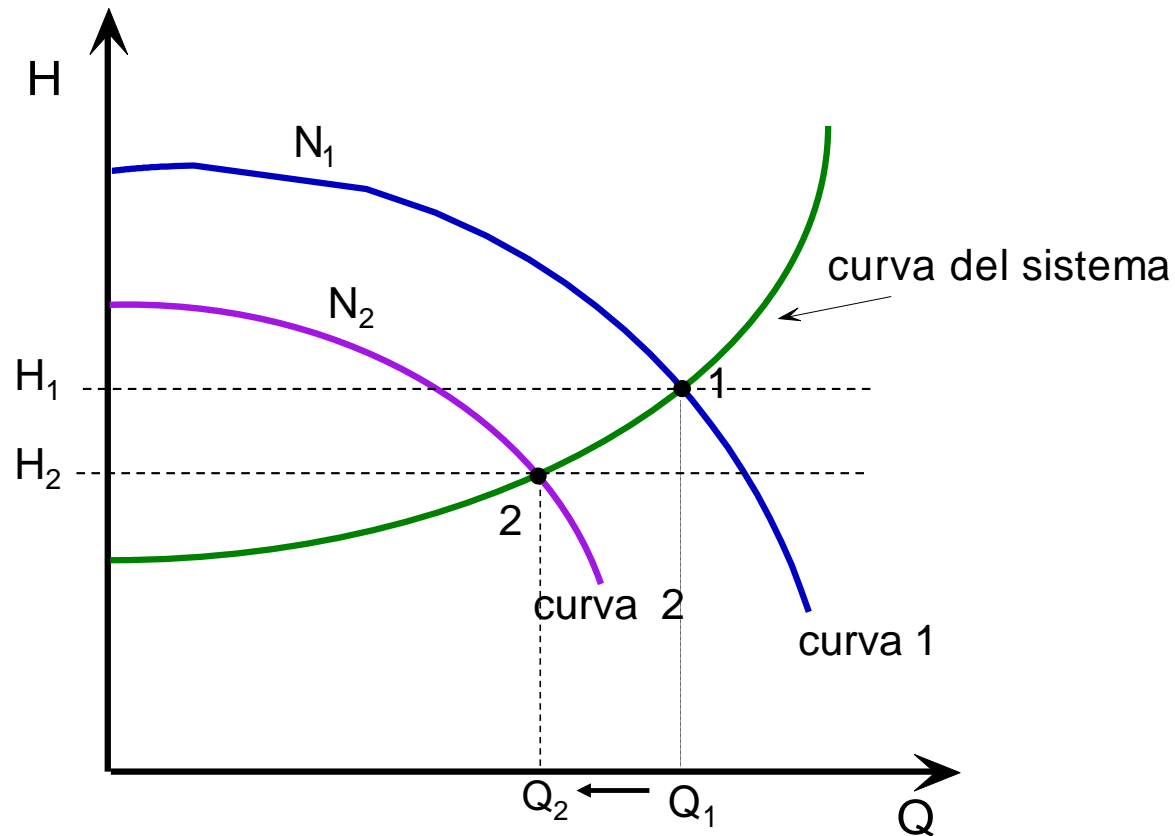


## 1. Estrangulación en la impulsión

- **ventajas**: muy fácil de concebir e instalar, barato y versátil.
- **desventaja**: disipa energía y puede hacer trabajar la bomba en un punto de bajo rendimiento.

¿Cómo hacemos en la práctica para regular caudal por esta vía?

## 2. Regulación por variación de velocidad del rotor

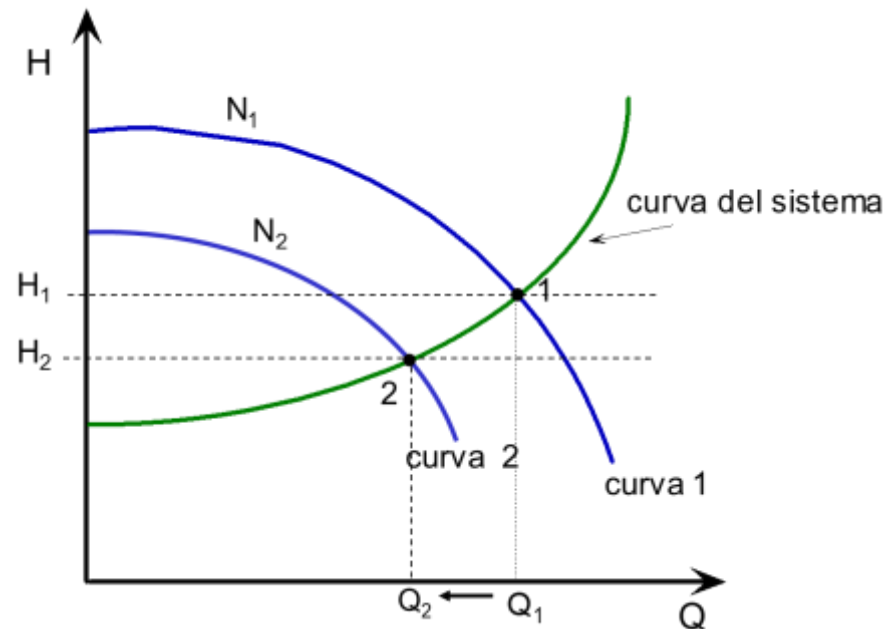


... pero ¿cuál debe ser el nuevo  $N$ ?

## Problema

Suponga que la curva de la bomba viene dada para  $N_1$  viene dada por  $H = H_0 - m Q^2$

¿Qué relación debe guardar  $N_2$  con  $N_1$  para que el punto de operación pase del caudal  $Q_1$  a  $Q_2$ ?

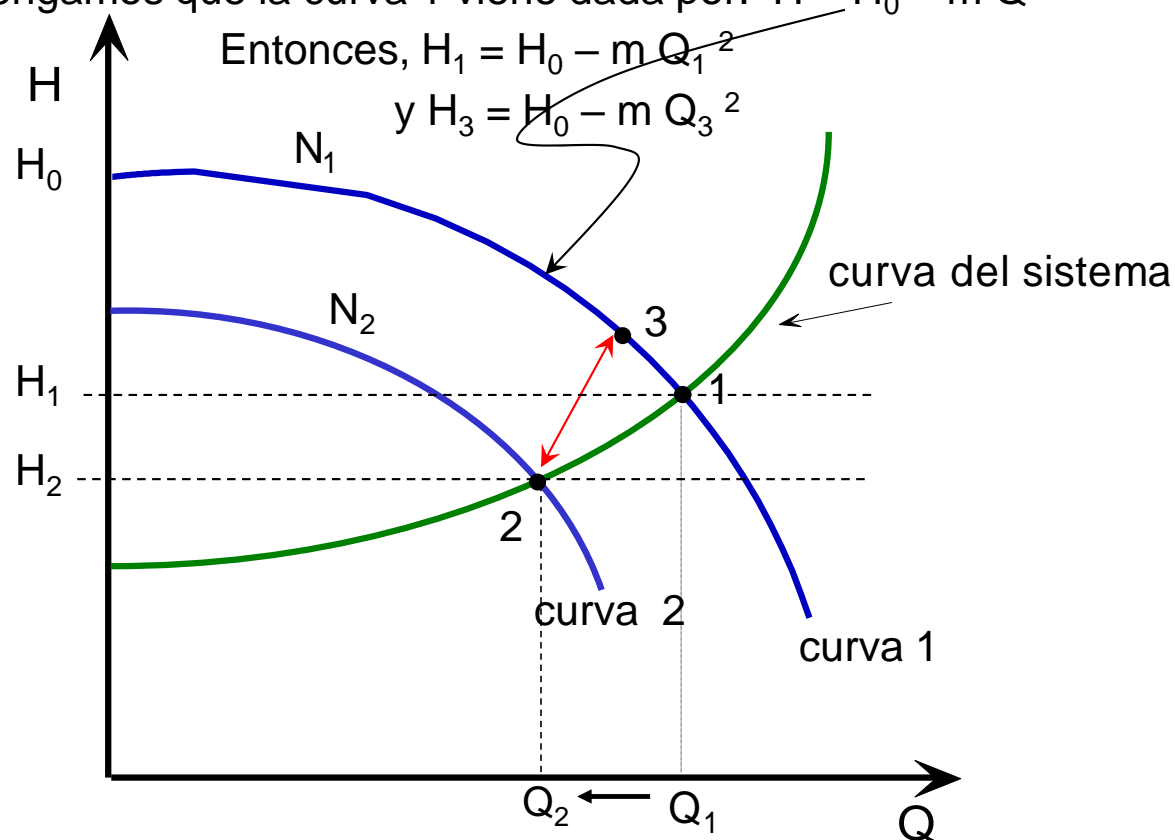




$N_2$  debe ser tal que la curva 2 pase por el punto 2 ( $Q_2, H_2$ )

Ahora bien, el punto 2 en la curva 2 tiene un homólogo en la curva 1 (punto 3) para el que se cumple:  $Q_2/Q_3 = N_2/N_1 = R$  y  $H_2/H_3 = R^2$   
(por una de las leyes de similitud)

Supongamos que la curva 1 viene dada por:  $H = H_0 - m Q^2$



$N_2$  debe ser tal que la curva 2 pase por el punto 2 ( $Q_2, H_2$ )

Ahora bien, el punto 2 en la curva 2 tiene un homólogo en la curva 1 (punto 3) para el que se cumple:  $Q_2/Q_3 = N_2/N_1 = R$  y  $H_2/H_3 = R^2$   
(por una de las leyes de similitud)

Supongamos que la curva 1 viene dada por:  $H = H_0 - m Q^2$

$$\text{Entonces, } H_1 = H_0 - m Q_1^2 \quad (\text{ec. 1})$$

$$\text{y } H_3 = H_0 - m Q_3^2 \quad (\text{ec. 2})$$

Pero como  $H_3 = H_2/R^2$  y  $Q_3 = Q_2/R$ , entonces:

$$H_3 = H_0 - m Q_3^2 \quad (\text{ec. 3})$$

De (ec.1) despejamos  $m = (H_0 - H_1)/Q_1^2$

Reemplazamos en (ec. 3)  $H_2/R^2 = H_0 - (H_0 - H_1) Q_2^2/(Q_1^2 R^2)$

Como  $H_0, H_1, H_2, Q_1$  y  $Q_2$  son conocidos, de aquí se puede determinar el valor de  $R$  que permite que la curva 2 pase por el punto 2.

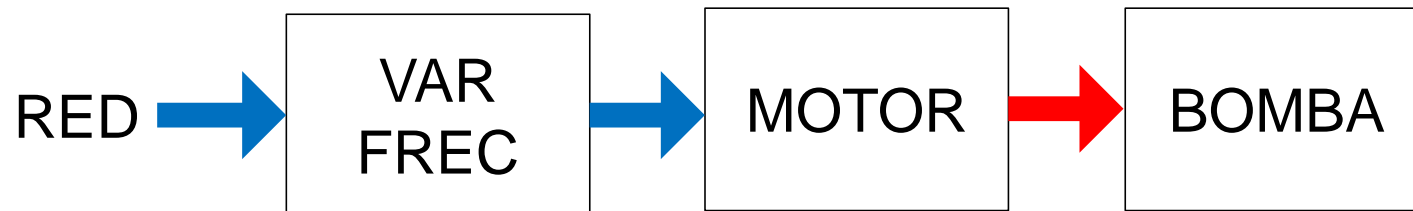
$$R = [H_2 + (H_0 - H_1)(Q_2^2/Q_1^2)]^{1/2} / H_0^{1/2}$$

$$\dots \text{ y } N_2 = N_1 R$$

## ¿Cómo hacemos en la práctica para regular caudal por esta vía?

Se puede usar un variador de frecuencia para la alimentación de energía eléctrica al motor de inducción.

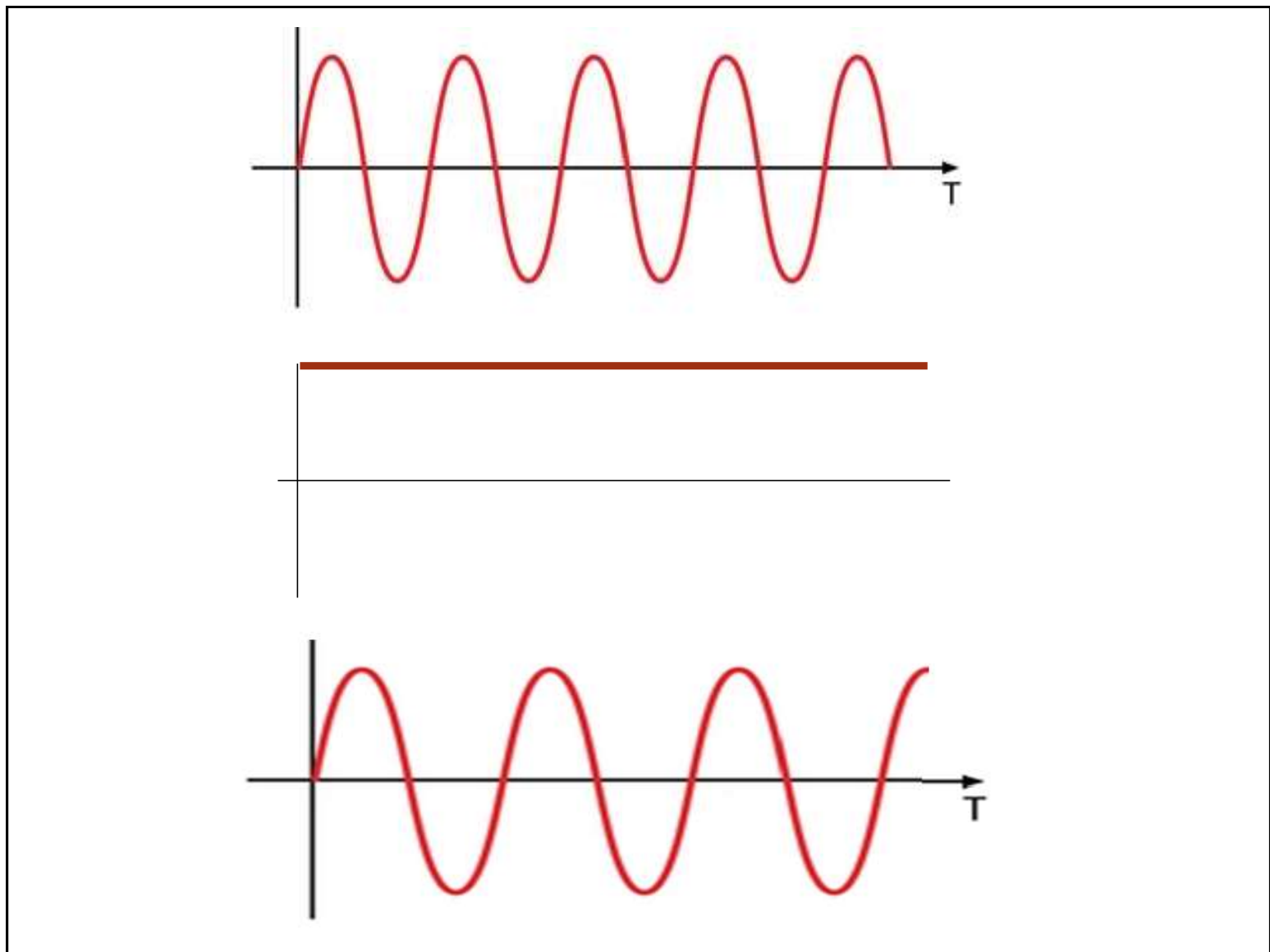
Al modificarse la frecuencia de la CA que se alimenta al motor, varía la velocidad sincrónica y por ende la velocidad de giro del motor.



Para modificar la frecuencia de la corriente alterna (CA) se emplea un “variador de frecuencia” que es un dispositivo electrónico. Su funcionamiento se puede dividir en tres etapas.



1. Se rectifica la CA de frecuencia  $F_1$  procedente de la red eléctrica y se convierte en corriente continua (CC).
2. Se elimina el rizado de la señal continua y se consigue una CC “plana”
3. Mediante un puente inversor se convierte la señal de CC en una señal trifásica de CA de la frecuencia deseada  $F_2$ .



El ajuste de la frecuencia (y en consecuencia el caudal) se puede hacer manualmente o por medio de un controlador.

- a) se mide una propiedad que depende del caudal (puede ser el propio caudal, o una velocidad, o el nivel en un tanque, o alguna otra propiedad que resulte afectada por el caudal).
- b) se compara ese valor contra un valor de consigna, y si existe un desvío:
- c) se actúa (manualmente o automáticamente) sobre el variador para alterar la frecuencia de forma que se ajuste la velocidad del rotor como para que se reduzca el desvío observado en b)

## Ventajas del empleo de variadores de velocidad

- Ahorro de energía (se reportan ahorros de hasta un 60% de energía eléctrica si lo comparamos con otros sistemas tradicionales de regulación de caudales.)
- Más facilidad para el control (favorece la calidad y productividad de los procesos)
- Aumento de la vida útil de los motores y reducción de su mantenimiento

## Ventajas del empleo de variadores de velocidad

- Ahorro de energía (se reportan ahorros de hasta un 60% de energía eléctrica si lo comparamos con otros sistemas tradicionales de regulación de caudales.)
- Más facilidad para el control (favorece la calidad y productividad de los procesos)
- Aumento de la vida útil de los motores y reducción de su mantenimiento



### 3. Cegado (cerrado) de canales del rotor (muy poco usado)

Si se cierran algunos de los canales en el rotor se obtienen un  $Q$  menor y también  $H$  menores con ahorro considerable de energía con respecto a la regulación por estrangulación.

**Ventaja:** hace perder poca energía.

**Desventaja:** exige desarmar la bomba y alterar el rotor, con difícil retorno a la condición original. Es una regulación muy gruesa.

## Bomba Centrífuga Multietapas

Las bombas multietapas poseen varios rotores y volutas contiguos. Cada grupo voluta/rotor es una etapa. Todos los rotores giran solidarios al mismo eje.

Las etapas están físicamente contiguas, de forma que la salida por la “boca de descarga” de una voluta está conectada con la “boca de entrada” de la etapa siguiente. El caudal que pasa por cada etapa es el mismo, pero la presión del fluido va aumentando cada vez que pasa a una nueva etapa (mismos argumentos que para el acople de bombas en serie).

Se usan en servicios donde se requieren presiones altas (ejemplos: para extracción de agua de pozos profundos, alimentación de generadores de vapor, sistemas de agua contra incendios)

Bomba centrífuga  
multietapas (se muestran  
cortes para poder apreciar la  
serie de etapas)



multietapas horizontal



multietapas vertical

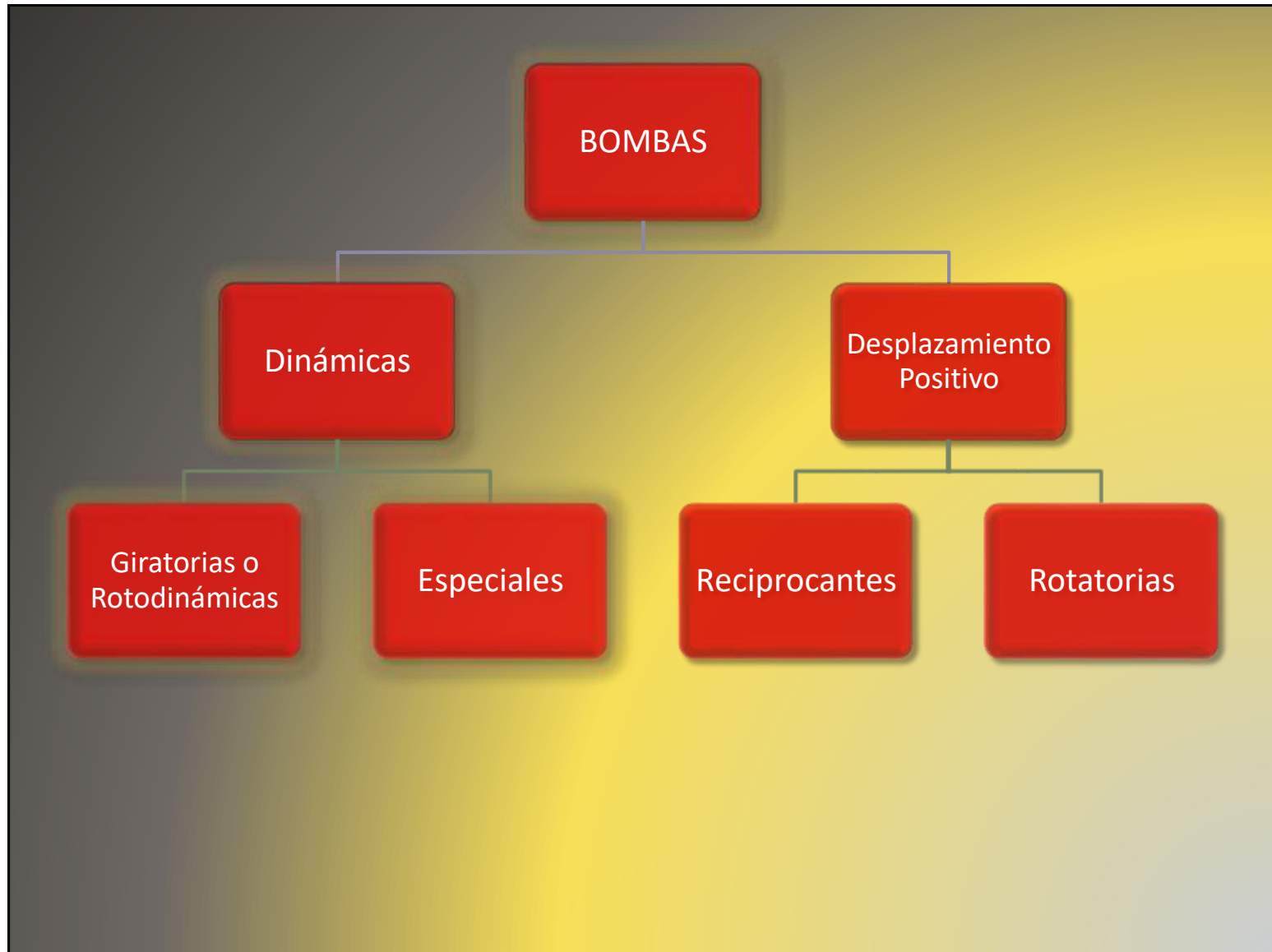
## Ventajas Bombas Centrífugas

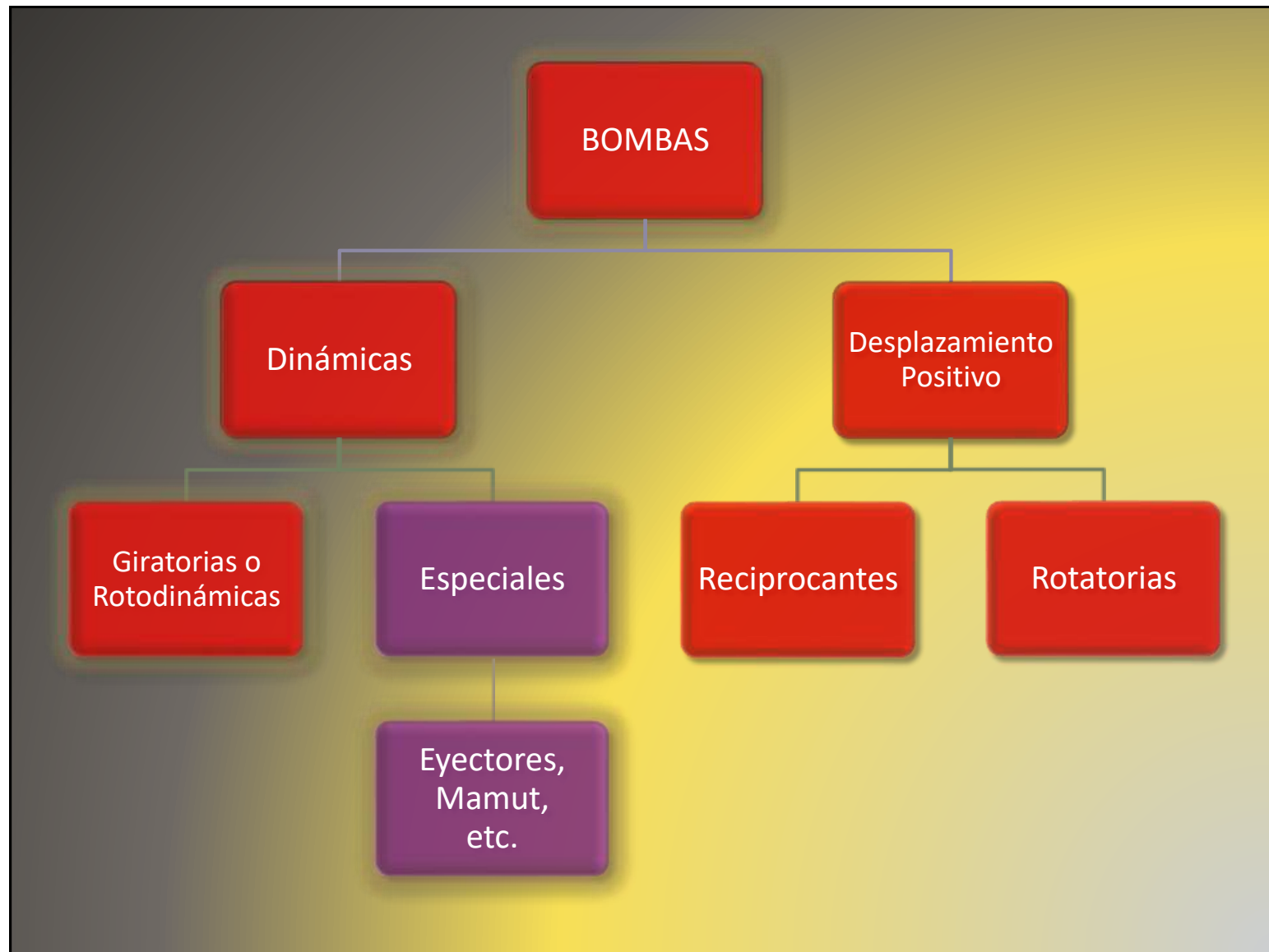
- Construcción y acoplamientos sencillos; materiales variados
- Dan Q constante –no pulsante- (dentro de ciertos límites).
- No requieren dispositivos de alivio.
- Pueden operar un corto tiempo con la descarga cerrada.
- La impulsión es generalmente con motor eléctrico.
- Son de peso pequeño y ocupan poco espacio físico (comparado con las bombas reciprocantes).
- Presentan bajo costo de mantenimiento.
- Son más baratas que las reciprocantes.
- Son máquinas giratorias más balanceadas pues tienen mayor equilibrio de masa que las reciprocantes.

## Desventajas Bombas Centrífugas

- Producen H bajos (salvo las de multietapas).
- Operan con alta eficiencia en estrechos márgenes de caudal.
- Hay que cebarlas.
- Requieren válvulas de retención de pie con colector para evitar que se descebe la bomba (si no la posee al detenerse el fluido vuelve a la zona de succión). El colector impide el ingreso de sólidos a la bomba.
- Las curvas están dadas para agua. Si se usa otro fluido hay que corregirlas por viscosidad.

# Bombas Dinámicas Especiales







# Bombas Dinámicas

Añaden cantidad de movimiento al fluido por medio de paletas o álabes giratorios, o **ciertos dispositivos especiales**.

En contraste con la Bomba de Desplazamiento Positivo el fluido nunca está confinado por completo.

# Bombas Especiales

Añaden cantidad de movimiento al fluido por medio **ciertos dispositivos especiales**.

Veremos algunas...

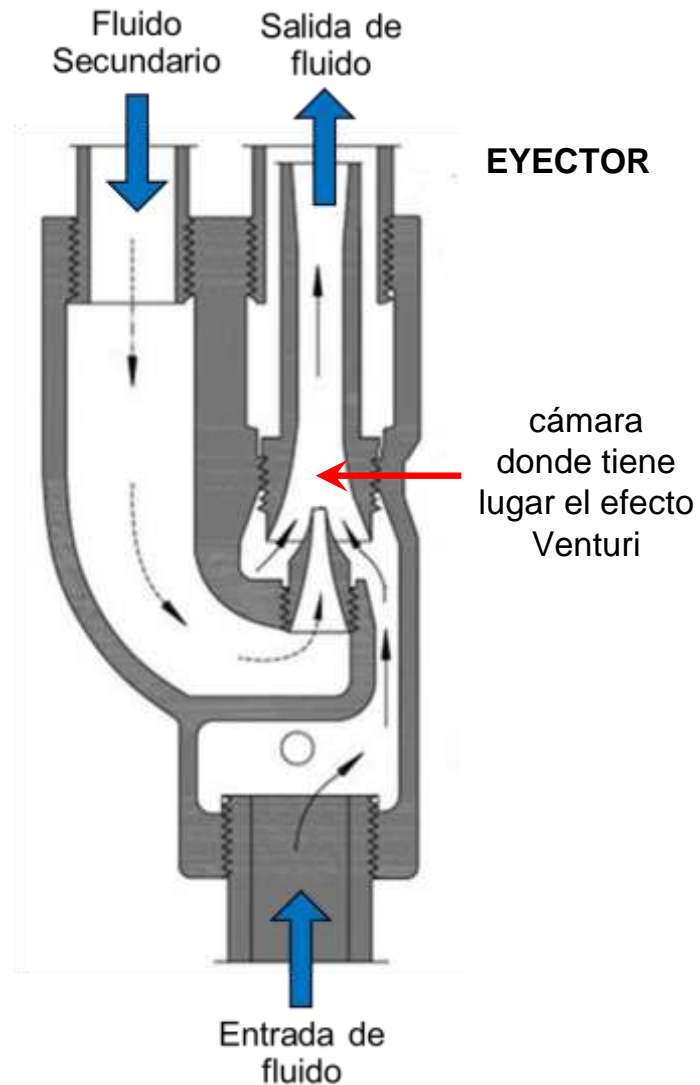
Tipo de Bomba	Forma de incorporar cantidad de movimiento
Jet o eyector	El ingreso de un jet o “chorro” de un fluido externo a alta velocidad provoca “efecto Venturi” y promueve el movimiento del fluido a ser impulsado.
Mamut	El aporte de un gas o vapor en la tubería reduce la densidad y provoca el movimiento ascendente de la mezcla (y con ella, el fluido a impulsar)
Monta ácido	El incremento de presión en el recipiente contenedor del líquido, obliga a este a fluir hacia el exterior por un tubería que lo conduce a zona de menor presión
De Golpe de Ariete	Utiliza la energía cinética de un golpe de ariete sobre un fluido para subir una parte de ese fluido a un nivel superior. No necesita por lo tanto aporte de otra energía exterior

## Bomba Jet

El ingreso de un jet o “chorro” de un fluido secundario a alta velocidad a un eyector provoca “efecto Venturi”, aspira y promueve el movimiento del fluido a ser impulsado.

Los fluidos se mezclan en el proceso, por lo que en general el fluido secundario que se usa es el mismo fluido que se pretende bombear

Este eyector puede ponerse en el extremo inferior de una tubería vertical y así provocar la elevación de agua por la tubería.



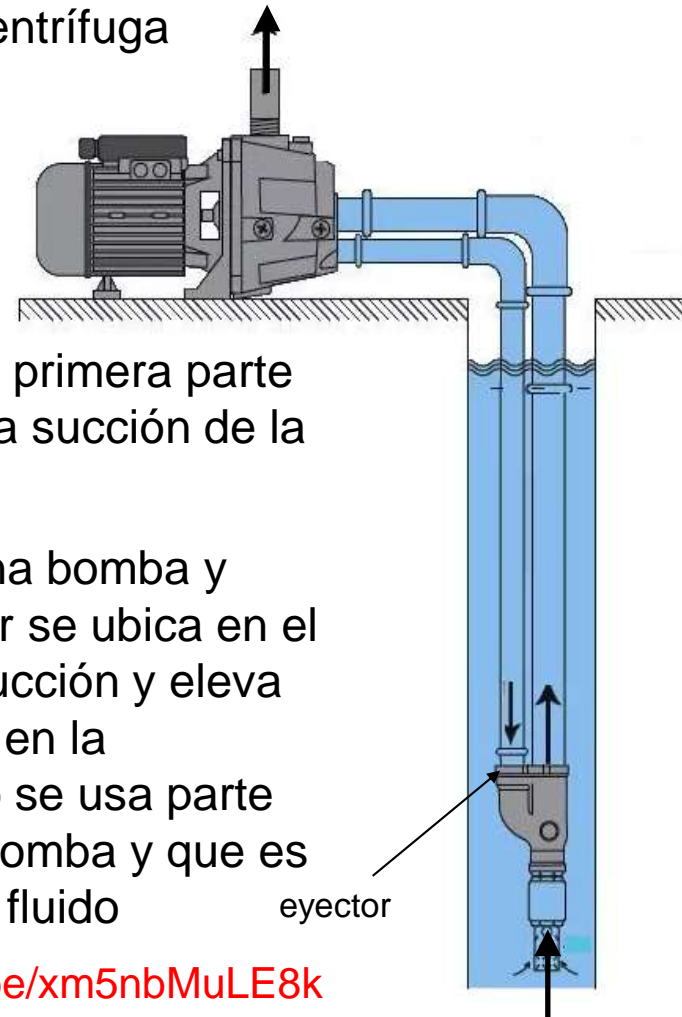
En general estos dispositivos se usan para extraer agua de pozos en combinación con una bomba centrífuga

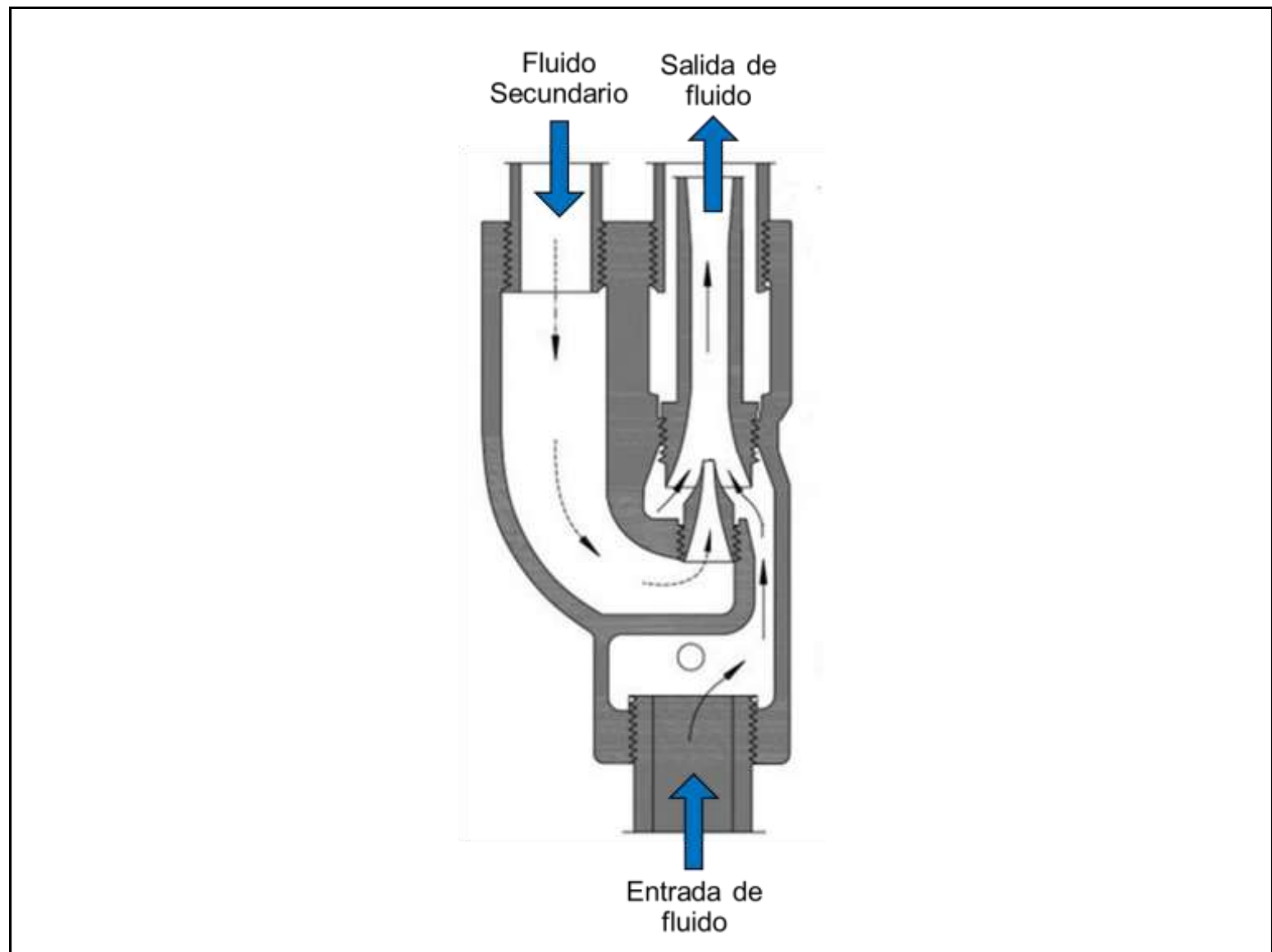
Si el pozo es profundo, la bomba sola no puede aspirar el agua porque la presión en la admisión sería tan baja que cavitaría.

El uso de eyector permite hacer la primera parte del trabajo: elevar el agua hasta la succión de la bomba

Una manera de lograrlo es usar una bomba y eyector independientes. El eyector se ubica en el extremo inferior de la tubería de succión y eleva el agua hasta la bomba centrífuga en la superficie. Como fluido secundario se usa parte de la propia agua que impulsa la bomba y que es enviada de vuelta al eyector como fluido secundario.

Ver: <https://youtu.be/xm5nbMuLE8k>

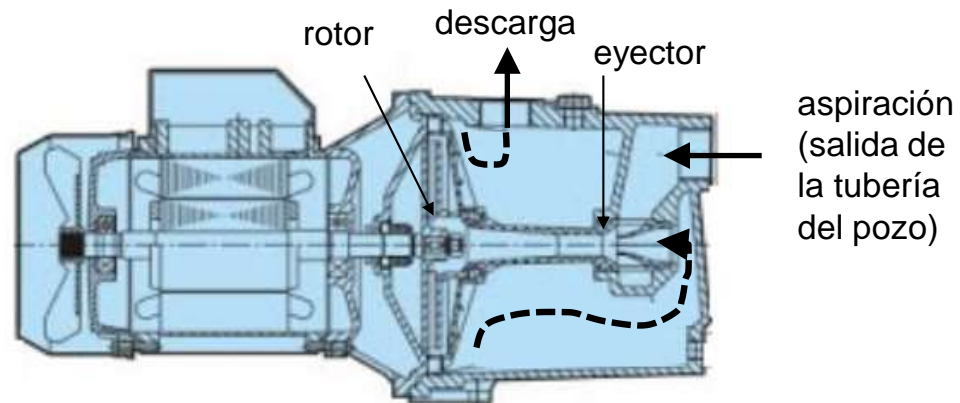




También se diseñan bombas centrífugas especiales que incorporan el eyector en una cámara previa. La tubería que lleva el agua del pozo está conectada a la entrada primaria del eyector, y del eyector el agua pasa a la boca de succión del rotor.

Parte del agua que sale del rotor es recirculada dentro de la cámara e ingresa al eyector como fluido secundario, y es esto lo que provoca la depresión que hace subir el agua por la tubería del pozo hacia la entrada del eyector.

Estas bombas son autocebantes.

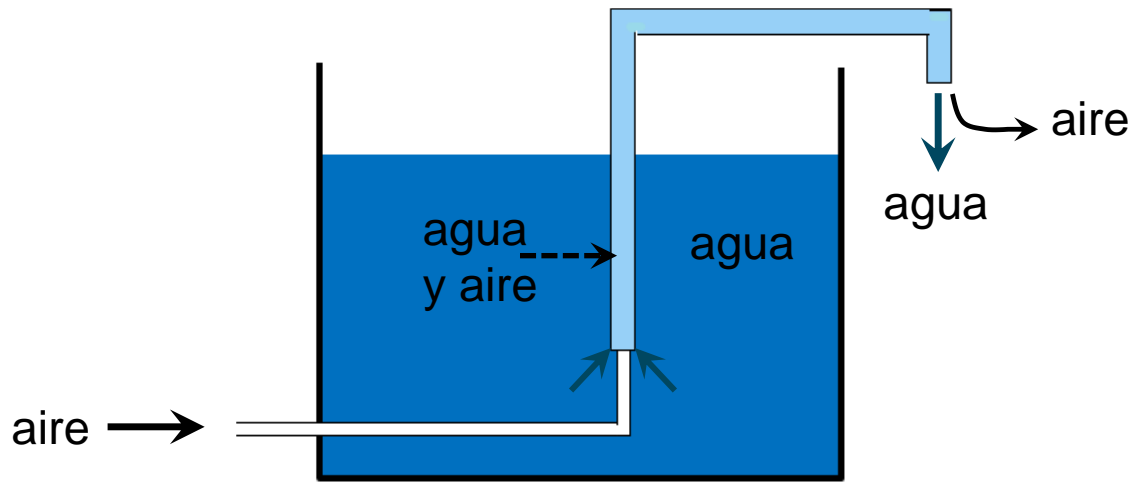


Ver: <https://youtu.be/8x6NI-F6mCo>

## Bomba Mamut / Airlift pump

Se extrae líquido de un depósito mezclándolo con aire o vapor en una tubería vertical. El aporte del fluido gaseoso en la tubería reduce la densidad y provoca el movimiento ascendente de la mezcla (y con ella, el fluido a impulsar).

Si la bomba usa aire se usa un compresor para impulsar el aire e inyectarlo en la tubería. No hay ninguna otra parte móvil

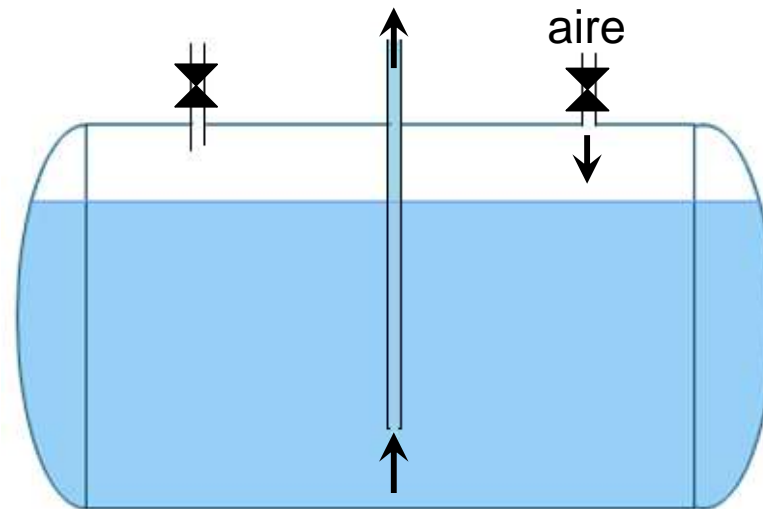


## Bomba Montaácido

Se inyecta aire en el recipiente lo que aumenta la presión y hace que el líquido salga por la tubería central.

(La tubería corta de la izquierda se usa para cargar el tanque con más líquido)

El nombre de este sistema de bombeo deriva de que su uso se difundió para el bombeo de ácidos.





## Bomba de ariete

Utiliza la energía cinética de un golpe de ariete sobre un fluido para subir una parte de ese fluido a un nivel superior.

Se usan para elevar agua tomada de una corriente a nivel superficial. Cuando se detiene bruscamente la corriente, el golpe de ariete eleva una parte del agua. No necesita por lo tanto aporte de otra energía exterior.

El proceso es cíclico pues para volver a elevar más agua se necesita que se recupere la velocidad de la corriente principal.

Ver <https://youtu.be/HNq06H5oRFg>

