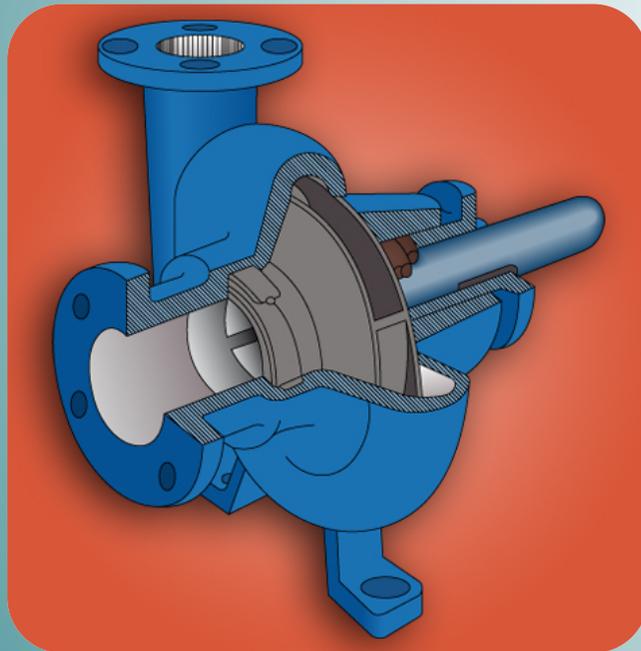


Sistemas y Máquinas Fluido Mecánicas

Bloque I. Tema 2.2.3. Bombas Centrífugas III



Carlos J. Renedo

Inmaculada Fernández Diego

Juan Carcedo Haya

Félix Ortiz Fernández

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

BLOQUE 1: Máquinas de Fluidos Incompresibles



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

En esta presentación se incluye un listado de problemas en el orden en el que se pueden resolver siguiendo el desarrollo de la teoría. Es trabajo del alumno resolverlos y comprobar la solución



1.1.- Introducción a las Máquinas Hidráulicas

1.2.- Bombas Hidráulicas

1.1.1.- Generalidades de las Bombas Hidráulicas

1.2.2.- Bombas Centrífugas

1.2.3.- Bombas Volumétricas

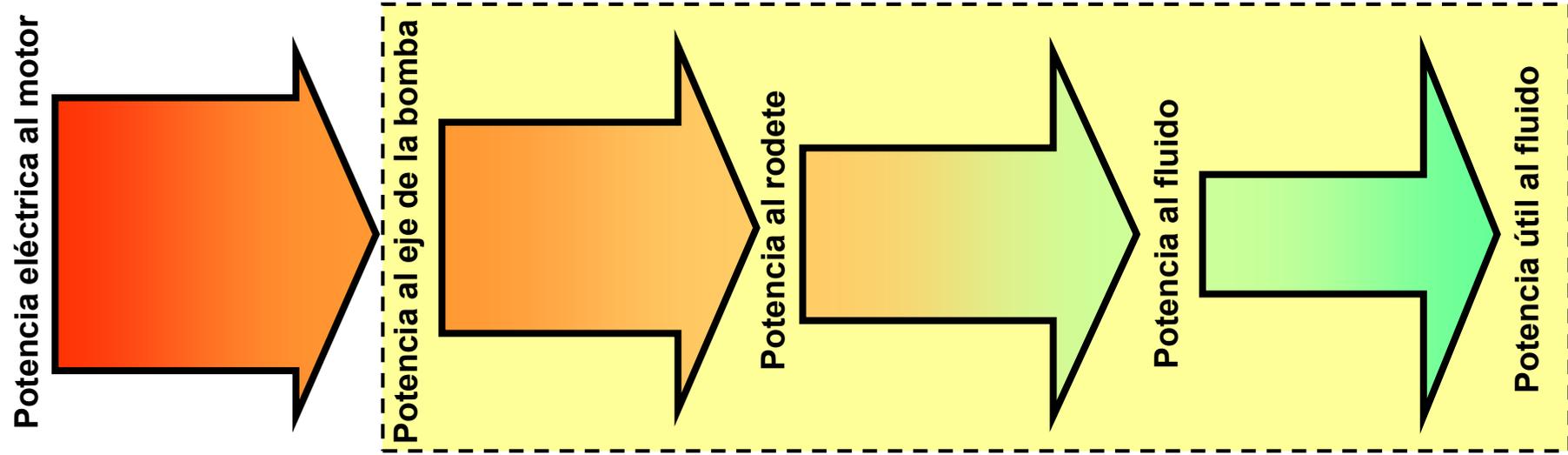
1.3.- Turbinas Hidráulicas



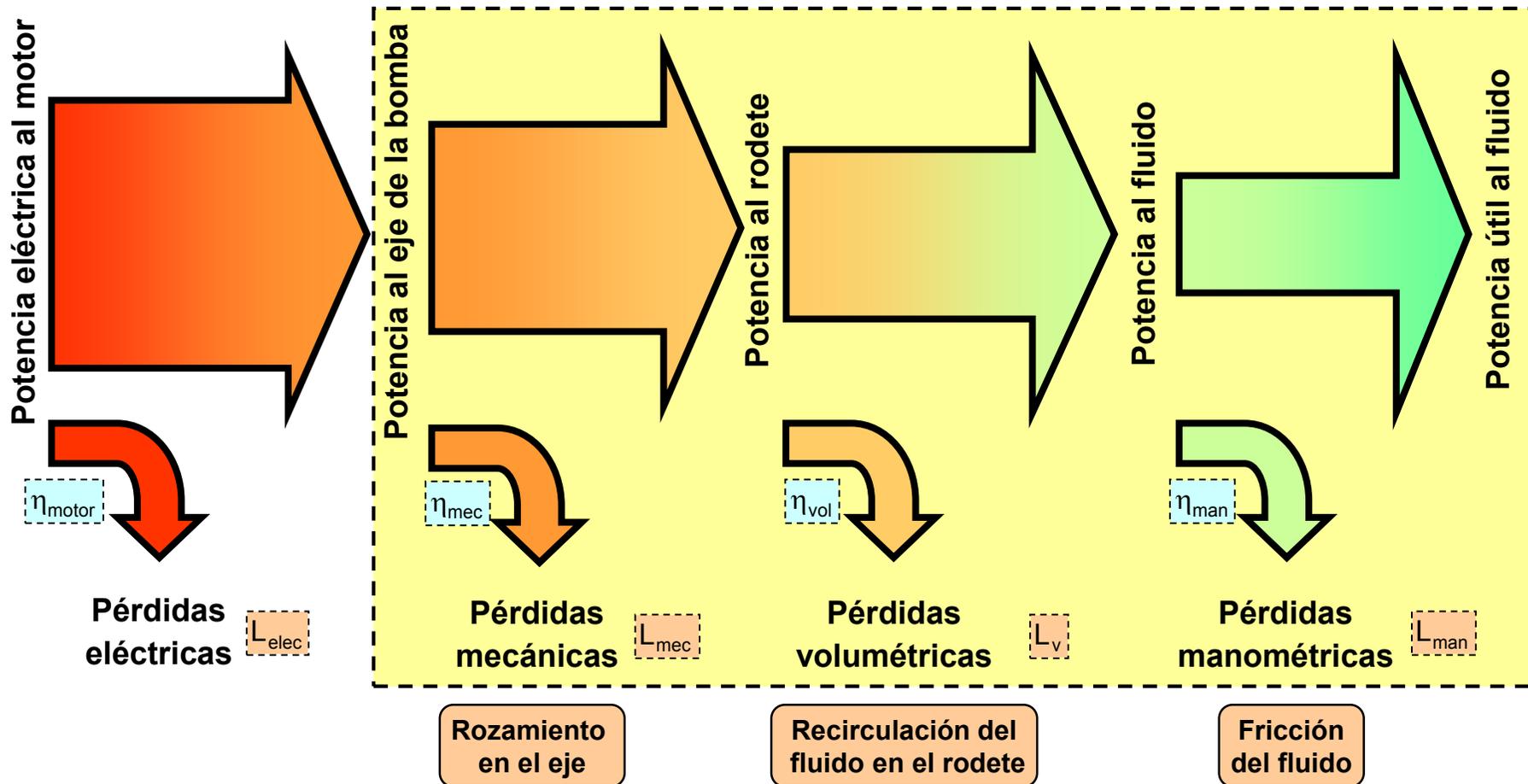
- **Características**
- **Campos de Aplicación**
- **Partes**
- **Rodetes**
- **La Voluta**
- **Clasificación**
- **Curva Característica**
- **Cebado**
- **Instalación**
- **Acoplamiento**

- **Potencias, Rendimientos y Pérdidas**
- **Cavitación**
- **Golpe de Ariete**
- **Catálogos de Fabricantes**
- **Leyes de Semejanza**
- **Número Específico de Revoluciones**
- **Influencia del Número de Alabes**
- **Punto de Funcionamiento**
- **Selección de una Bomba**

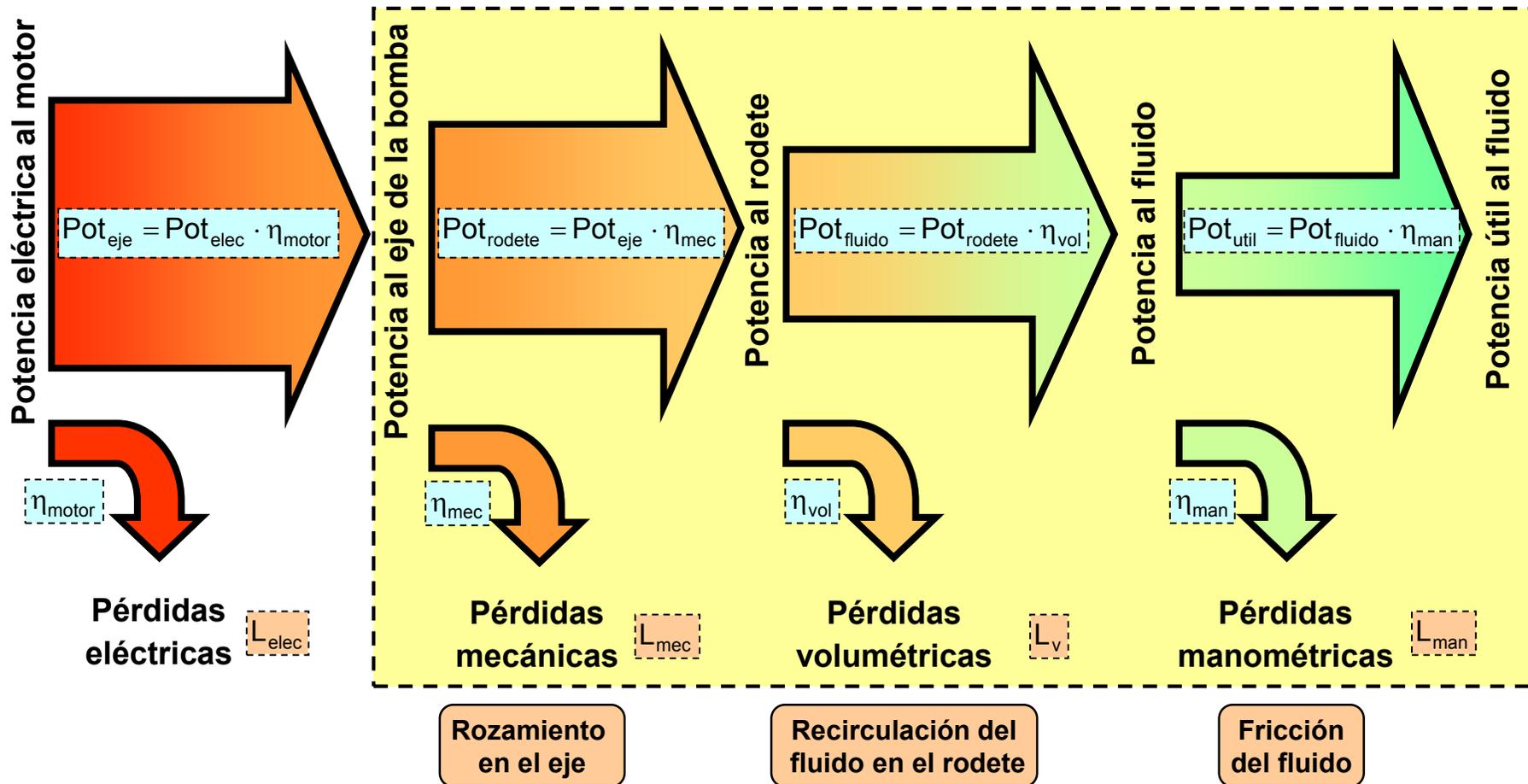
Potencias, Rendimientos y Pérdidas en las Bombas (I)



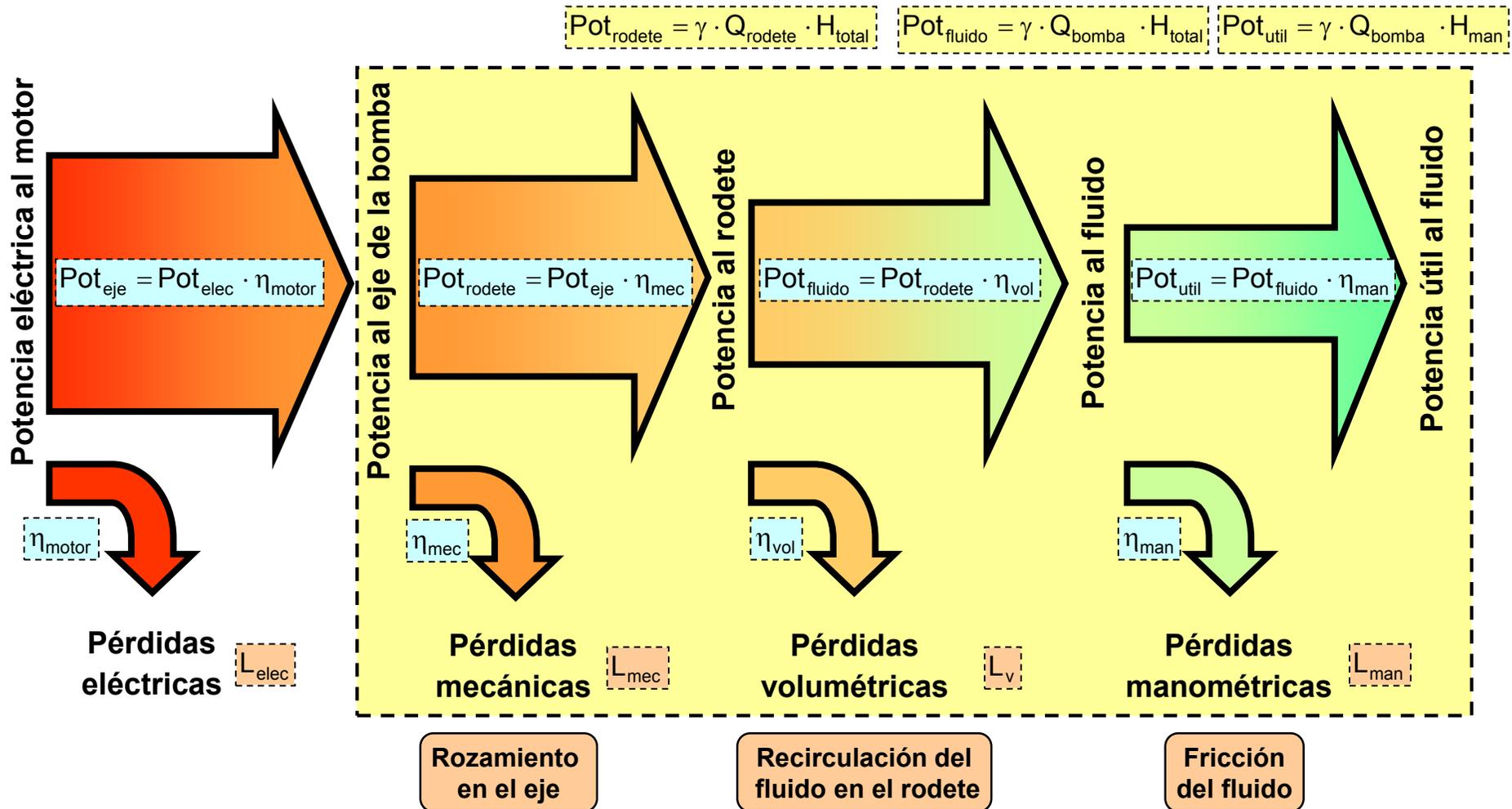
Potencias, Rendimientos y Pérdidas en las Bombas (I)

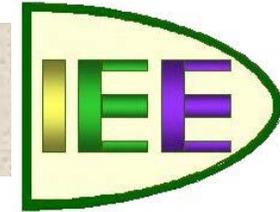


Potencias, Rendimientos y Pérdidas en las Bombas (I)



Potencias, Rendimientos y Pérdidas en las Bombas (I)





Potencias, Rendimientos y Pérdidas en las Bombas (II)

➤ Pot_{eje} , Potencia de accionamiento del eje de la bomba

$$Pot_{eje} = M \text{ [N m]} \cdot \omega \text{ [rad/s]} = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot n \text{ [rpm]} \cdot M \text{ [N m]} \quad [\text{W}]$$

✓ Pérdidas Mecánicas (rozamientos), L_m

- En el eje
- En los cojinetes
- Entre el rodete y la cámara de agua en la que gira

▪ Diminuyen la potencia comunicada al rodete, Pot_{rod}

$$Pot_{rod} = Pot_{eje} - L_{mec}$$

▪ Aparece el rendimiento mecánico, η_{mec}

$$\eta_{mec} = \frac{Pot_{rod}}{Pot_{eje}}$$

➤ Pot_{rodete}

$$Pot_{rodete} = \gamma \cdot Q_{rodete} \cdot H_{total}$$

Potencias, Rendimientos y Pérdidas en las Bombas (III)

➤ Pot_{rodete}

$$Pot_{rod} = Pot_{eje} - L_{mec}$$

$$Pot_{rodete} = \gamma \cdot Q_{rodete} \cdot H_{total}$$

$$\eta_{mec} = \frac{Pot_{rod}}{Pot_{eje}}$$

➤ Pot_{flu} , Potencia comunicada al fluido

$$Pot_{fluido} = \gamma \cdot Q_{bomba} \cdot H_{total}$$

✓ Volumétricas, L_v $Pot_{fluido} = Pot_{rodete} - L_{vol}$

- Fugas al exterior (prensaestopas)
- Reflujos internos (parte de lo expulsado por el rodete vuelve a la aspiración)

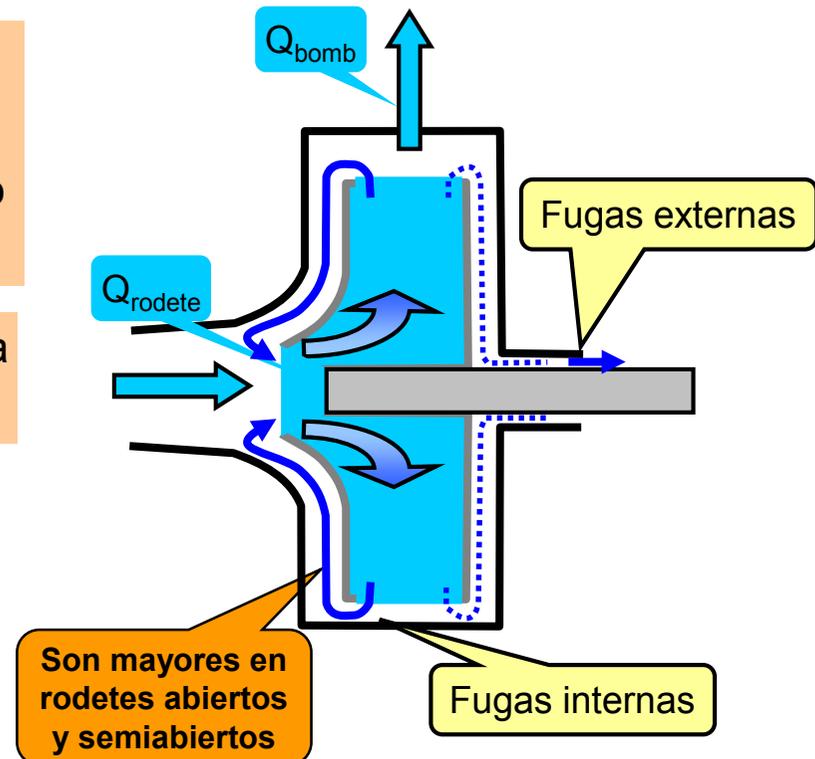
- Disminuyen el caudal suministrado por la bomba respecto al que aspira el rodete

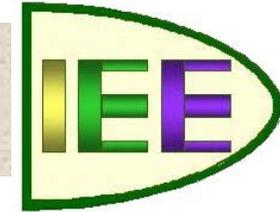
$$Q_{bomba} = Q_{rodete} - Q_L$$

- Aparece el rendimiento volumétrico, η_{vol}

$$\eta_{vol} = \frac{Pot_{bomba}}{Pot_{rodete}}$$

Típicamente $\eta_{vol} = 1$





Potencias, Rendimientos y Pérdidas en las Bombas (IV)

➤ Pot_{flu} , Potencia comunicada al fluido

$$Pot_{fluido} = \gamma \cdot Q_{bomba} \cdot H_{total}$$

$$\eta_{vol} = \frac{Pot_{bomba}}{Pot_{rodete}}$$

➤ P_{util} , Potencia hidráulica comunicada por la bomba

$$Pot_{util} = \gamma \cdot Q_{bomba} \cdot H_{man}$$

✓ Pérdidas Manométricas, L_{man}

$$Pot_{util} = Pot_{fluido} - L_{man}$$

- Por rozamiento del líquido (voluta, rodete, ...)
- Por cambios de dirección (desprendimiento de la capa límite)

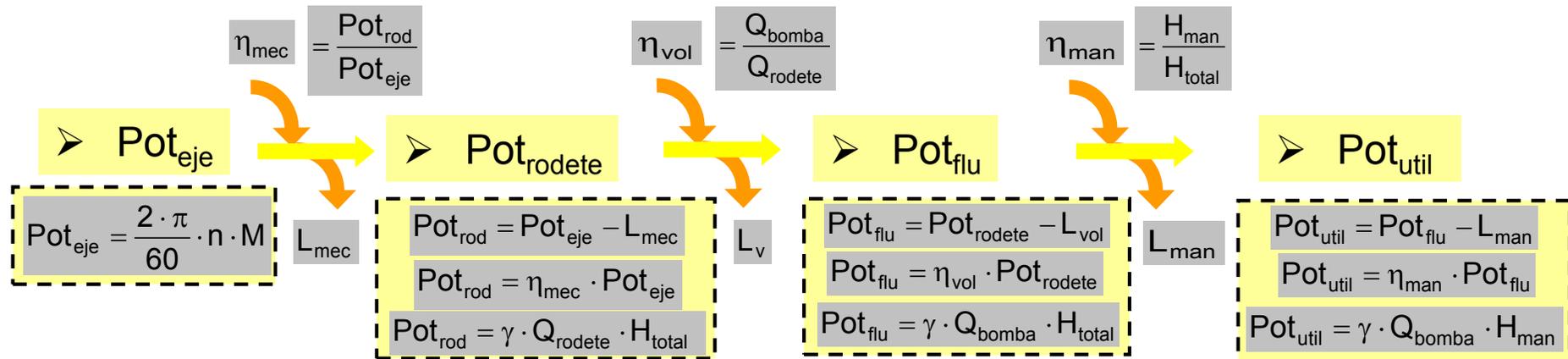
▪ Disminuye la altura útil que la bomba realmente suministra al líquido, manométrica, H_{man}

$$H_{man} = H_{total} - H_{L-intB}$$

▪ Aparece el rendimiento manométrico, η_{man}

$$\eta_{man} = \frac{H_{man}}{H_{total}}$$

Potencias, Rendimientos y Pérdidas en las Bombas (V)



$Pot_{rod} = Pot_{eje} - L_{mec}$

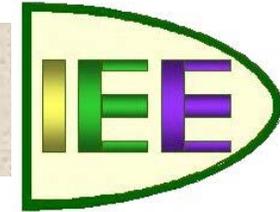
$Q_{bomba} = Q_{rodete} - Q_L$

$H_{man} = H_{total} - H_{Lman}$

$H_{geom} = H_{elev} = H_{imp} + H_{asp}$
 $H_{util} = H_{man} = H_{elev} + H_{L-tub}$
 $H_{Euler} = H_{total} = H_{man} + H_{L-intB}$

$Pot_{util} = Pot_{eje} - L_{mec} - L_{vol} - L_{man}$
 $\eta_{tot} = \eta_{mec} \cdot \eta_{vol} \cdot \eta_{man} = \frac{Pot_{util}}{Pot_{eje}}$
 $Pot_{eje} = \frac{Pot_{util}}{\eta_{tot}} = \frac{\gamma \cdot H_{util} \cdot Q_{bomba}}{\eta_{mec} \cdot \eta_{vol} \cdot \eta_{man}}$

$\eta_{hidraulico} = \eta_{vol} \cdot \eta_{man}$



Cavitación (I):

No es de aire

Proceso de formación y posterior colapso (implosión) de **burbujas de vapor** (cavidades) en el seno de un líquido

Se produce cuando la presión en algún punto de la corriente de un líquido desciende por debajo de la presión de saturación del mismo ($p < p_{sat}$)

Para el agua: $\log(p_v) = 7,5 \cdot \frac{T}{(T + 273) - 35,85} + 2,7858$ p_v en Pa y T en °C

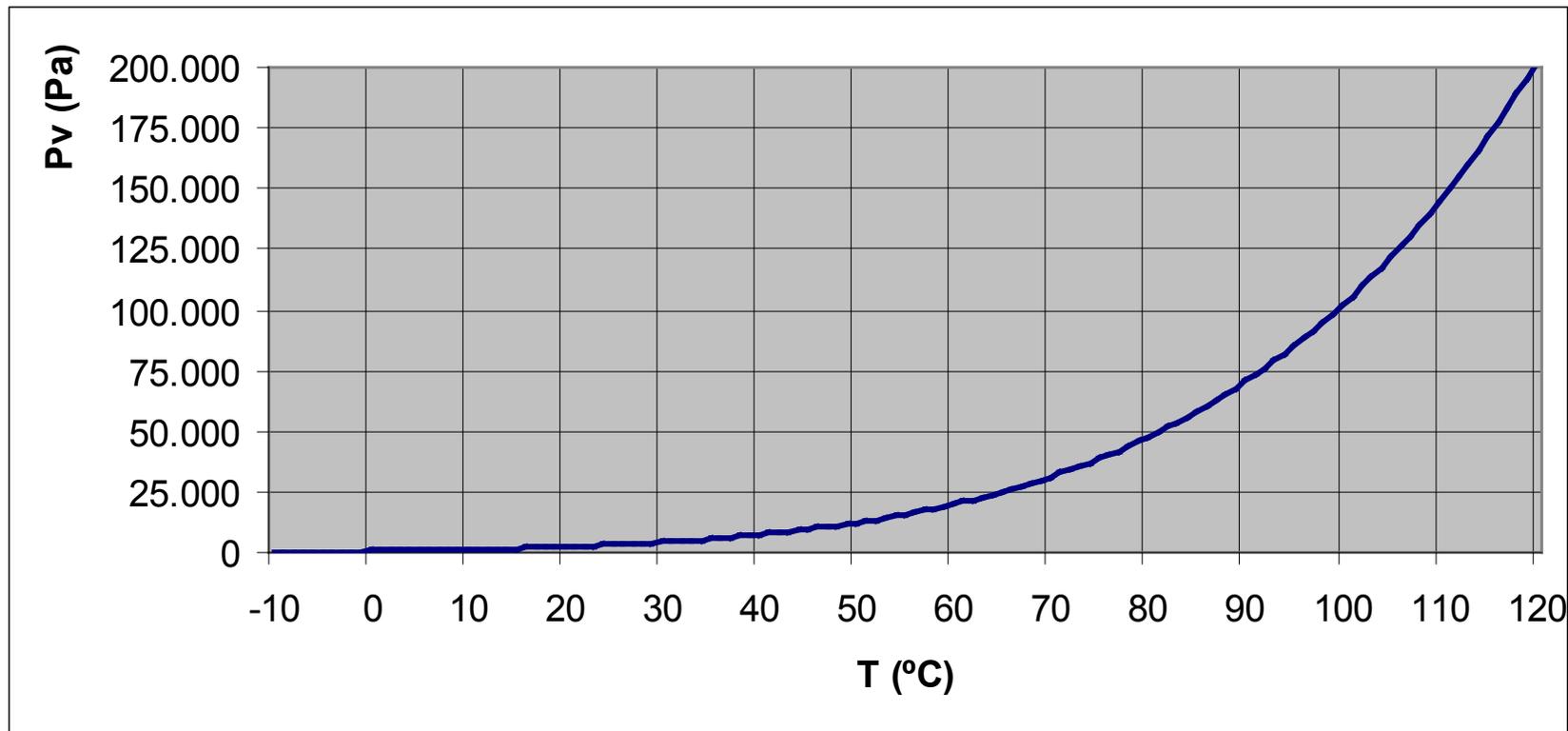
Temperatura (°C)	5	10	20	40	60	80	100
p_{sat} (bar) [p_{abs}]	0,00872	0,01227	0,02337	0,07375	0,1992	0,4736	1,0133

(p_{sat} ↑ con T; peligro con calor)

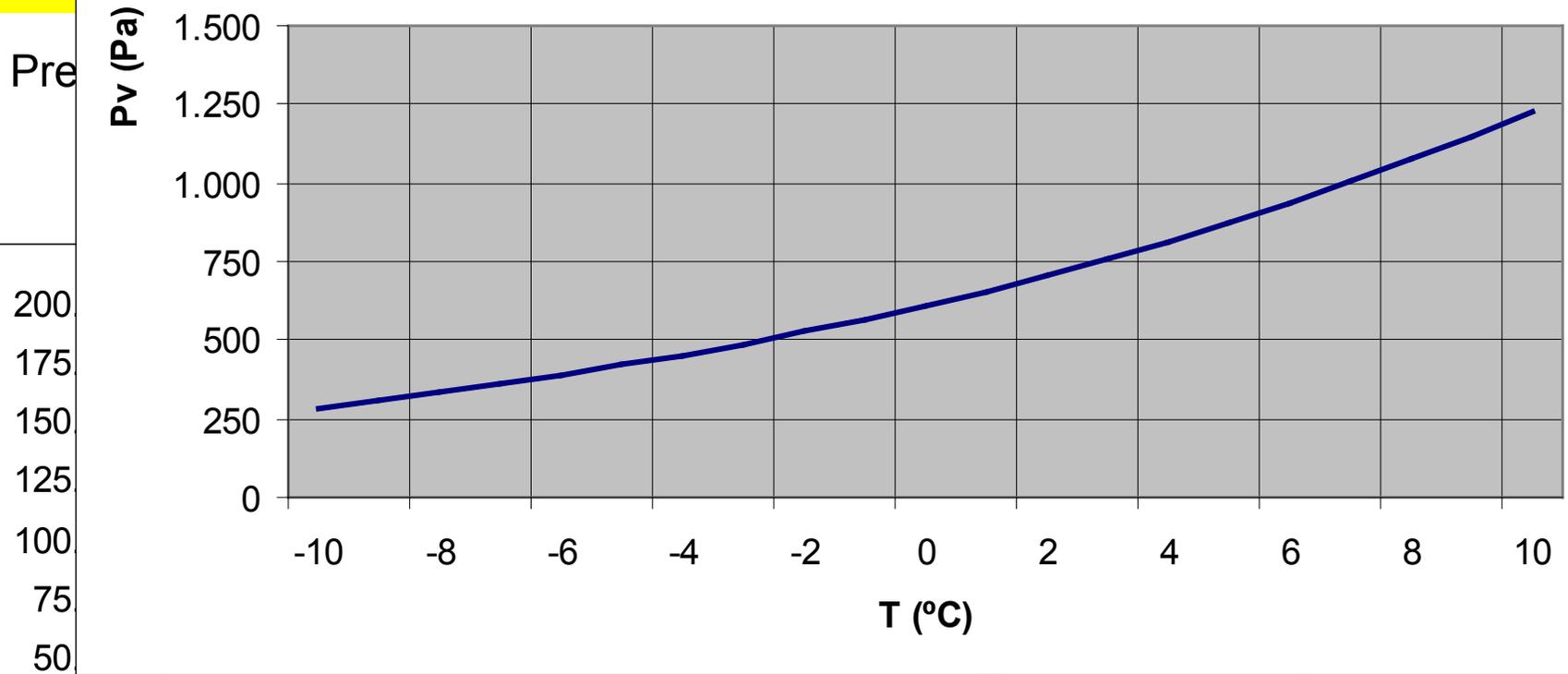
No es la entrada de aire en el sistema

Cavitación (II):

Presión de Vapor del Agua: $\log(p_v) = 7,5 \cdot \frac{T}{(T + 273) - 35,85} + 2,7858$ p_v en Pa y T en °C



Cavitación (II)



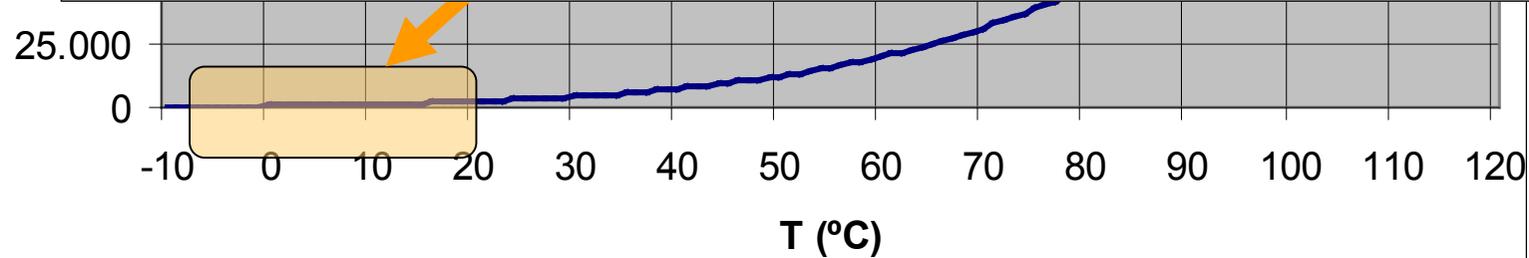
P_v (Pa)

200
175
150
125
100
75
50

1.500
1.250
1.000
750
500
250
0

-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10

T (°C)

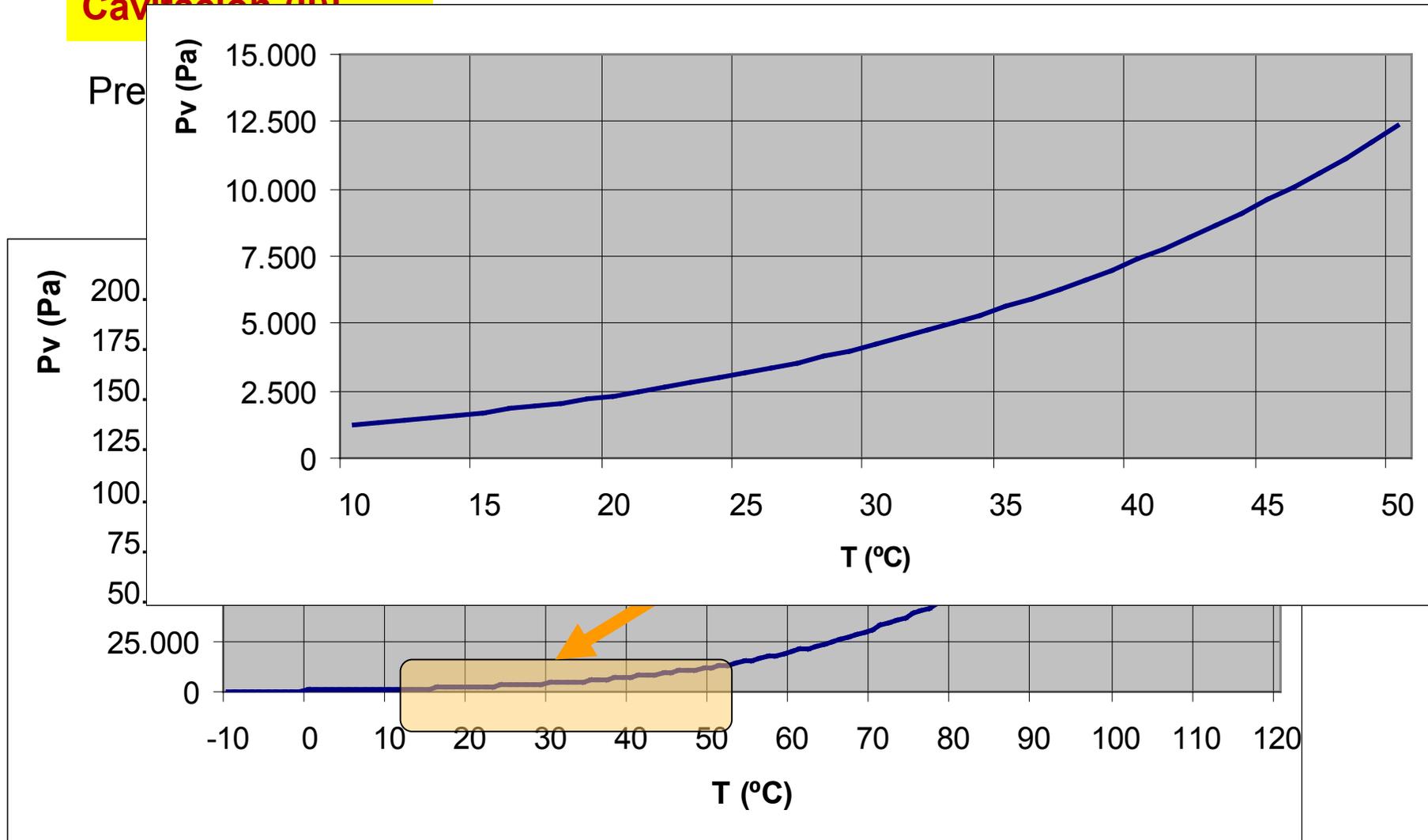


25.000
0

-10 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120

T (°C)

Cavitación (II)



Cavitación (III):

Puede suceder en estructuras estáticas (tuberías, codos, estrechamientos, ...) y en máquinas hidráulicas (bombas, turbinas, hélices, ...)



<http://foroparalelo.com/general/diseño-contrucción-submarinos-nucleares-documental-completo-213160/>

En las bombas:

- Las burbujas de vapor se forman en la aspiración (entrada del rodete), en el punto de mínima presión
- La implosión en el interior del rodete, a medida que el fluido va adquiriendo más presión y $p > p_{\text{sat}}$

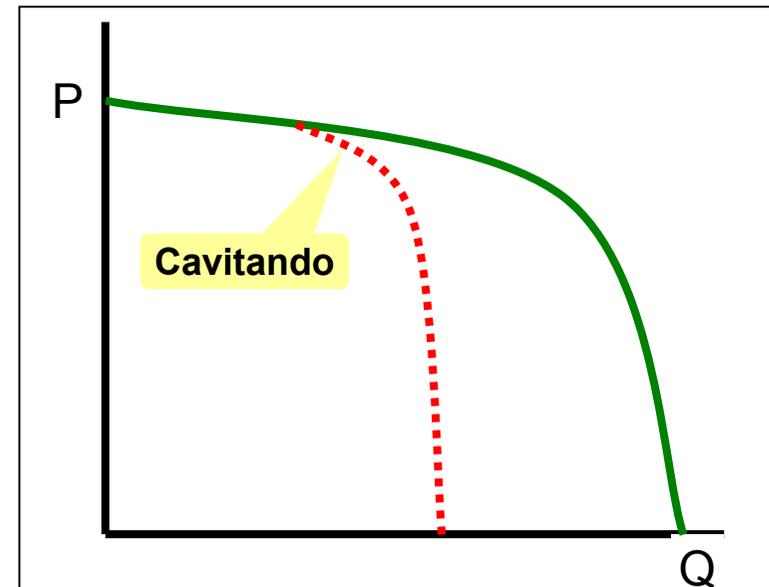
Cavitación (IV):

Los efectos desfavorables de la cavitación son:

- Disminución de la sección de paso (la masa en vapor ocupa más volumen que en líquido), lo cual puede motivar incluso el descebado ($\downarrow \Pi_B$)
- Caída brusca de las curvas características para caudales elevados
- Ruidos y vibraciones debido al colapso de las burbujas
- Erosión de superficies (desequilibrio masas \Rightarrow vibraciones y ruido \Rightarrow desgaste)
(desgaste superficial \Rightarrow corrosión)



http://www.interempresas.net/Componentes_Mecanicos/Articulos/34521-Cavitacion-en-el-bombeo-de-fluidos.html

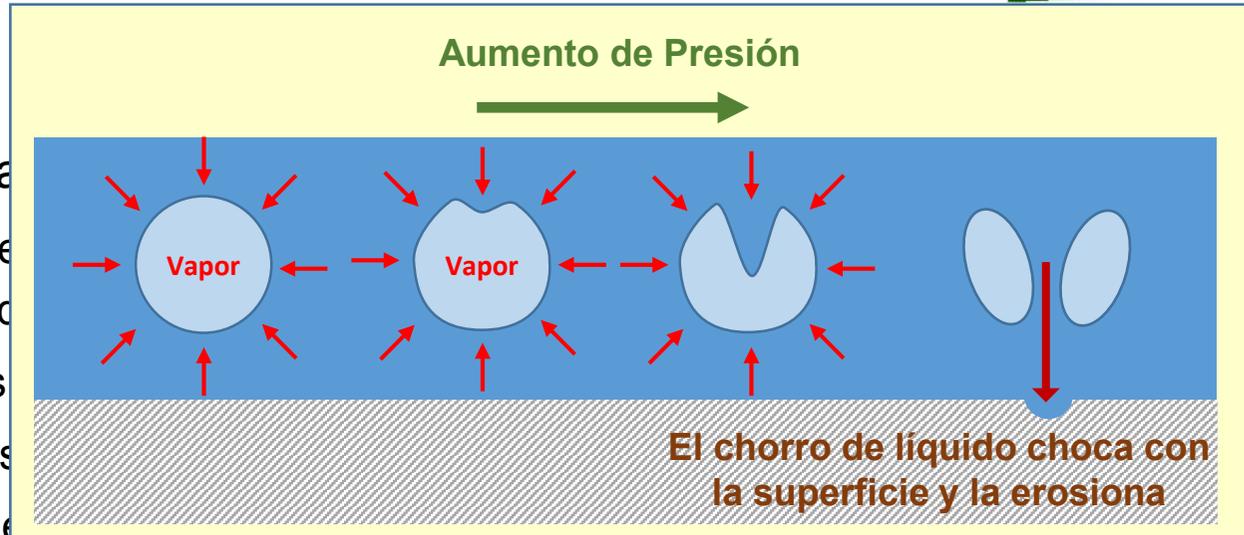


Cavitación (IV):

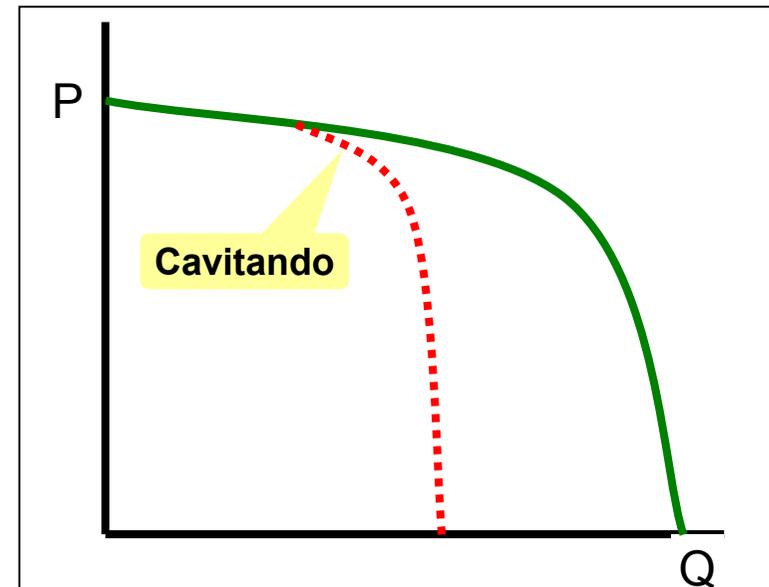
Los efectos desfavorables

- Disminución de la sección (por el vapor del líquido), lo cual puede provocar una pérdida de eficiencia
- Caída brusca de las características de la bomba
- Ruidos y vibraciones
- Erosión de superficies

(desgaste superficial \Rightarrow corrosión)



http://www.interempresas.net/Componentes_Mecanicos/Articulos/34521-Cavitacion-en-el-bombeo-de-fluidos.html



Cavitación (V):

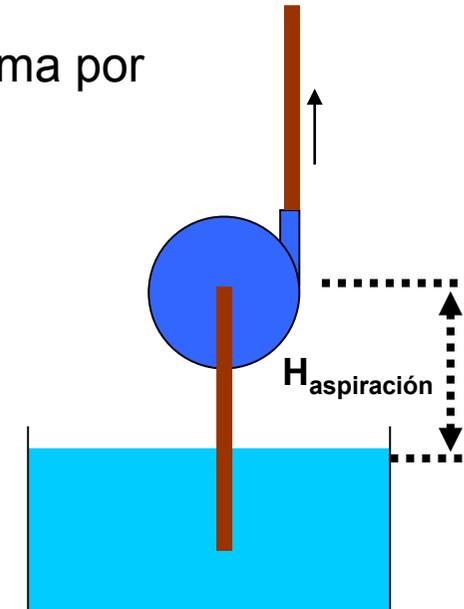
Las bombas centrífugas tienen una altura de aspiración limitada

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

Hay dos **NPSH**:

Se obtiene con ensayos

- **NPSH requerida**: es una característica de la bomba
Lo debe suministrar el fabricante (ver curvas catalogo)
- **NPSH disponible**: es una característica del circuito de aspiración, se debe calcular



Net Positive Suction High

Cavitación (VI):

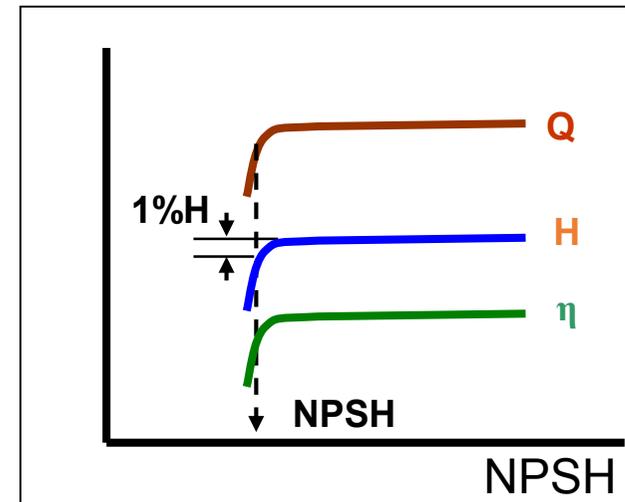
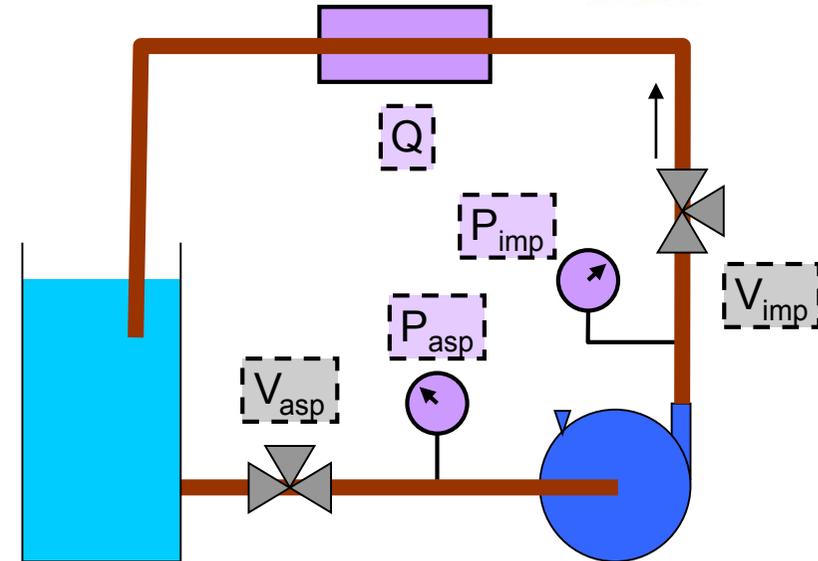
Ensayo del ***NPSH_r*** (I):

Procedimiento:

- Se fijan Q y H ($H_{imp} - H_{asp}$)
- Se cierra un poco V_{asp}
 - $\downarrow Q \Rightarrow \uparrow H$
 - $\uparrow H_{asp}$
- Se abre V_{imp} buscando
 - $\uparrow Q$ hasta valor inicial $\Rightarrow \downarrow H$

El proceso se repite hasta que se aprecie que la H suministrada ($H_{imp} - H_{asp}$) por la bomba es sensiblemente menor que la inicial (1%)

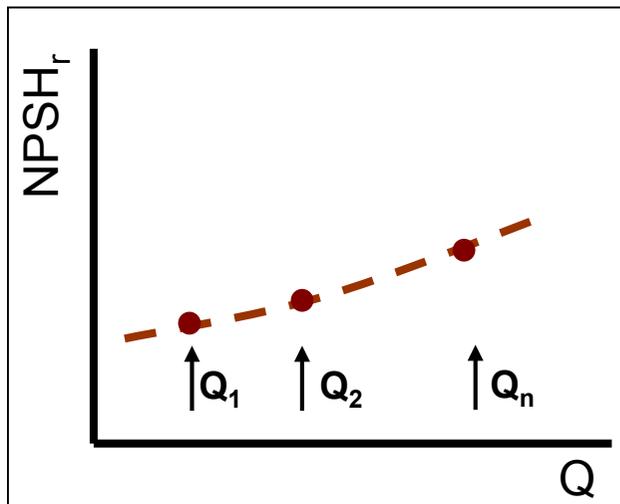
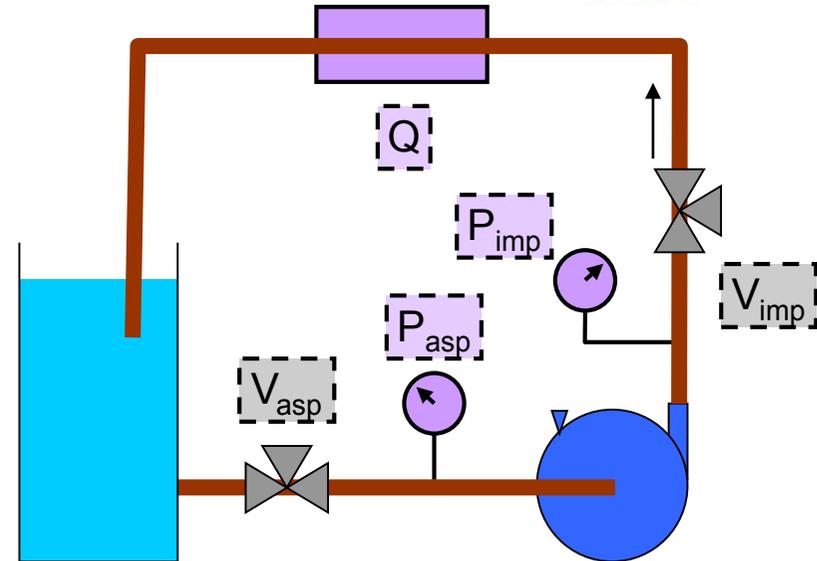
- Se fijan otros Q y H ($H_{imp} - H_{asp}$)
- ...



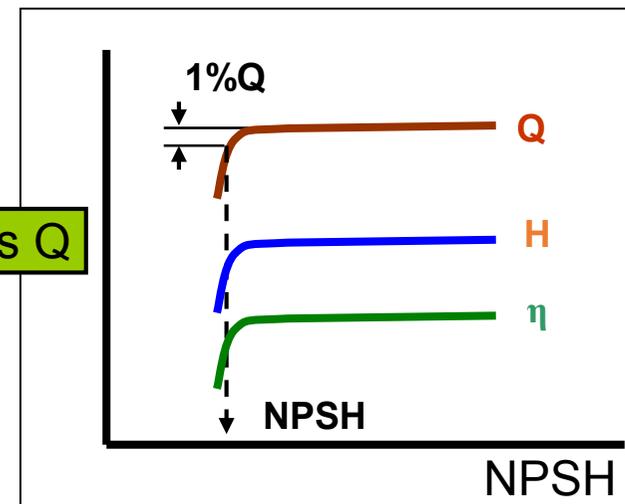
Cavitación (VII):

Ensayo del $NPSH_r$ (II):

Los resultados del ensayo con diferentes Q y H iniciales ofrecen la curva del $NPSH_r$ de la bomba



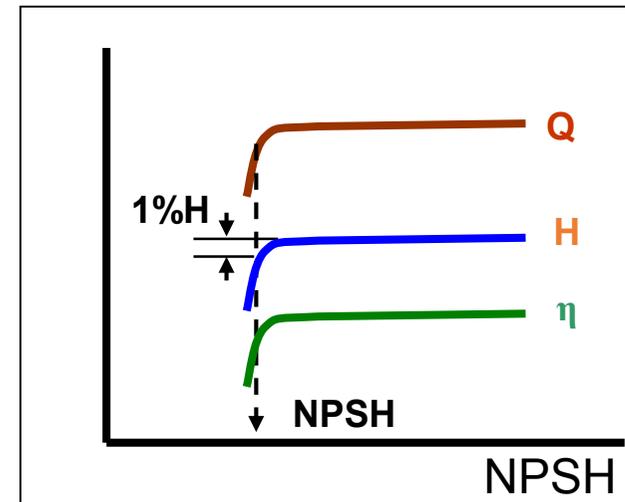
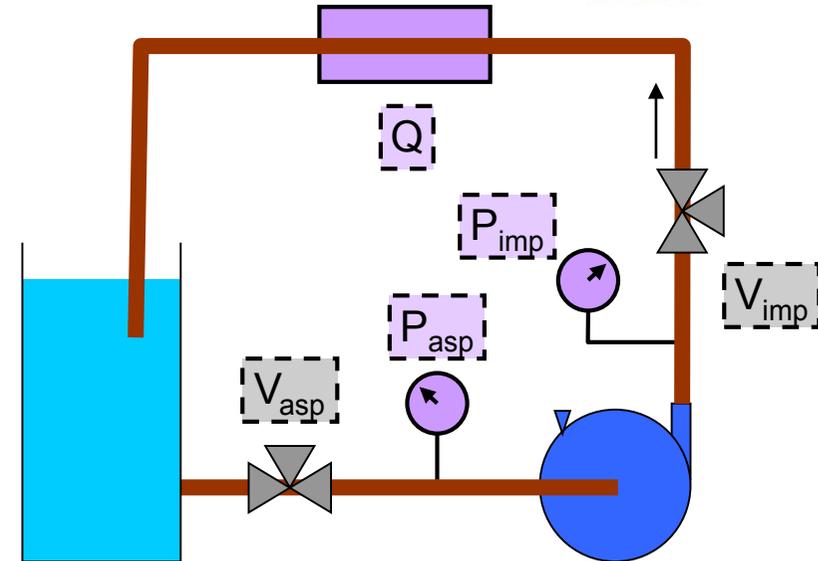
Múltiples Q



Cavitación (VIII):

Ensayo del ***NPSH_r*** (III):

- Se cierran parcialmente V_i y V_a
- Se obtiene un Q (p.ej: $1 \text{ m}^3/\text{s}$)
- Se anotan P_a (10 m) y P_i (110 m)
- Se calcula ΔP_B ($110 - 10 = 100 \text{ m}$)
- Se cierra más V_a , y se abre V_i para ajustar el mismo Q ($1 \text{ m}^3/\text{s}$)
- ... La cavitación empieza cuando $\Delta P_B < 99\% \Delta P_{B \text{ inicial}}$



Se fija $Q (= 1 \text{ m}^3/\text{s})$

P_a	P_i	ΔP_B
10	110	100
9	109	100
'''	'''	'''
4	104	100
3	102	99

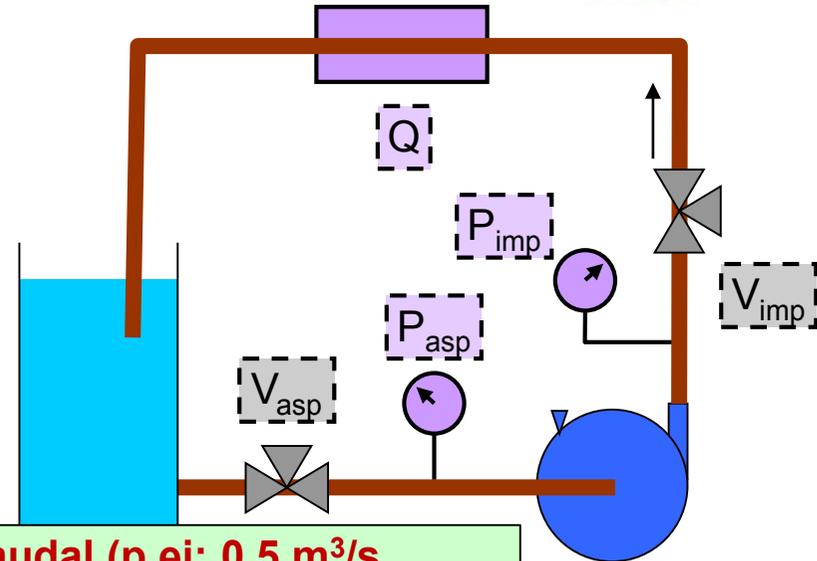
$NPSH_r$ a $1 \text{ m}^3/\text{s}$

Empieza la cavitación

Cavitación (VIII):

Ensayo del **NPSH_r** (III):

- Se cierran parcialmente V_i y V_a
- Se obtiene un Q (p.ej: $1 \text{ m}^3/\text{s}$)
- Se anotan P_a (10 m) y P_i (110 m)
- Se calcula ΔP_B ($110 - 10 = 100 \text{ m}$)
- Se cierra más V_a y se abre V_i para ajustar el mis
- ... La cavitación comienza cuando $\Delta P_B < 99\% \Delta P_B$



• Se repite con otro caudal (p.ej: $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$)

Se fija Q (= $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$)		
P_a	P_i	ΔP_B
10	112	102
9	111	102
'''	'''	'''
3	105	102
2,5	103,5	101

Se fija Q (= $1 \text{ m}^3/\text{s}$)		
P_a	P_i	ΔP_B
10	110	100
9	109	100
'''	'''	'''
3	102	99

NPSH_r a $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Empieza la cavitación

NPSH_r a $1 \text{ m}^3/\text{s}$

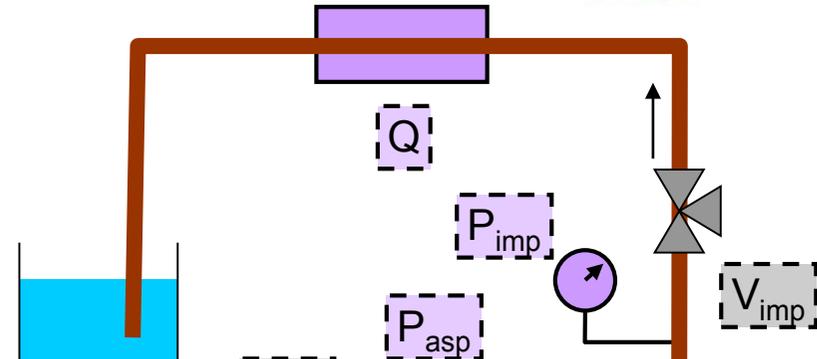
Empieza la cavitación

Q
H
 η
NPSH

Cavitación (VIII):

Ensayo del **NPSH_r** (III):

- Se cierran parcialmente V_i y V_a
- Se obtiene un Q (p.ej: $1 \text{ m}^3/\text{s}$)
- Se anotan P_a (10 m) y P_i (110 m)
- Se calcula ΔP_B ($110 - 10 =$
- Se cierra más V_i y se abre V_a para
ajustar el mismo caudal Q
- ... La cavitación empieza cuando
 $\Delta P_B < 99\% \Delta P_B$



• Se repite con otro caudal (p.ej: $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$)

Se fija $Q (= 1,5 \text{ m}^3/\text{s})$

P_a	P_i	ΔP_B
10	108	98
9	107	98
'''	'''	'''
4	102	98
3,5	100,5	97

NPSH_r a $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Empieza la cavitación

NPSH_r a $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$

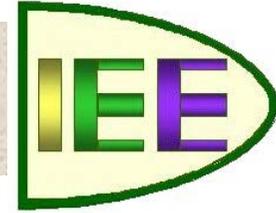
Empieza la cavitación

NPSH_r a $1 \text{ m}^3/\text{s}$

Empieza la cavitación

Se fija $Q (= 1 \text{ m}^3/\text{s})$		
P_a	P_i	ΔP_B
10	102	92
9	101	92
'''	'''	'''
4	99	95
3	102	99

NPSH



Cavitación (IX):

Ensayo del $NPSH_r$ (III):

$NPSH_r \uparrow$ con Q

Se puede estimar el valor $NPSH_r$ con formulación, entre otras:

$$\rightarrow NPSH_r \cong s \cdot \frac{(Q \cdot n^2)^{2/3}}{2 \cdot g}$$

“s” depende de las características de la bomba

$$s = 0,0435 \cdot \sqrt[3]{\alpha^2 \cdot (1 + \alpha)}$$

En la mayor parte de los rodetes, se puede considerar:

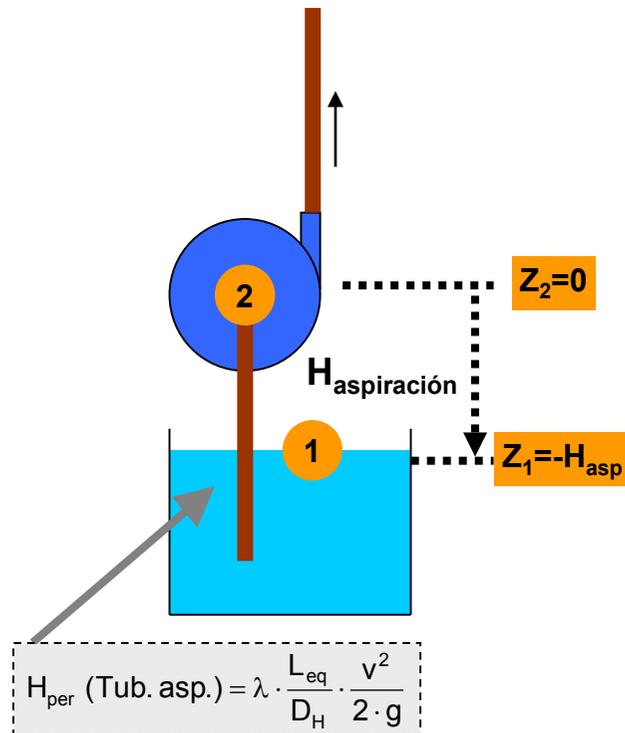
$$\alpha = 0,25 \Rightarrow s = 0,02$$

$$\rightarrow NPSH_r = \lambda_1 \cdot \frac{W_1^2}{2 \cdot g} + \lambda_2 \cdot \frac{C_1^2}{2 \cdot g}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 \approx 0,29 \\ \lambda_2 \approx 1,32 \end{array} \right.$$

Cavitación (X):

Cálculo del $NPSH_d$ (I):



Considerando los accesorios de la tubería (válvulas, codos, etc)

La **altura total** a la entrada de la bomba, referida a su cota, es:

$$H_2 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g}$$

La altura máxima de aspiración disponible en la entrada de la bomba para que no cavite, $H_{B \text{ disp}}$, es tal que $\Rightarrow p_2 > p_{\text{sat}}$

$$H_{B \text{ disp}} = \frac{p_2 - p_{\text{sat}}}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g}$$

Aplicando Bernoulli entre 1 y 2:

$$\left(z_1 + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\gamma} \right) - H_{\text{per}} = \left(z_2 + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\gamma} \right)$$

$$\left(z_1 + 0 + \frac{p_{\text{atm}}}{\gamma} \right) - H_{\text{per}} = \left(0 + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\gamma} \right)$$

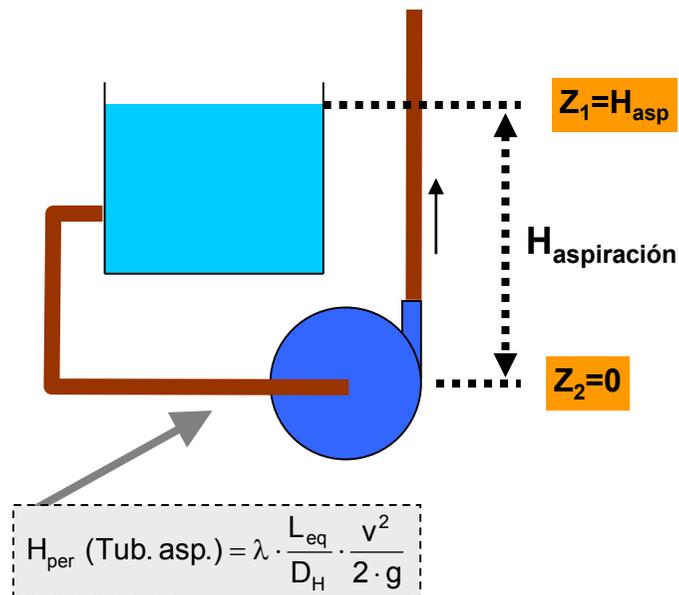
$$\frac{V_2^2}{2 \cdot g} = \frac{p_{\text{atm}} - p_2}{\gamma} - H_{\text{per}} - H_{\text{asp}}$$

\Rightarrow

Cavitación (XII):

Cálculo del $NPSH_d$ (III):

Si la bomba trabaja “en carga”
(más baja que el depósito):



Considerando los accesorios de la tubería (válvulas, codos, etc)

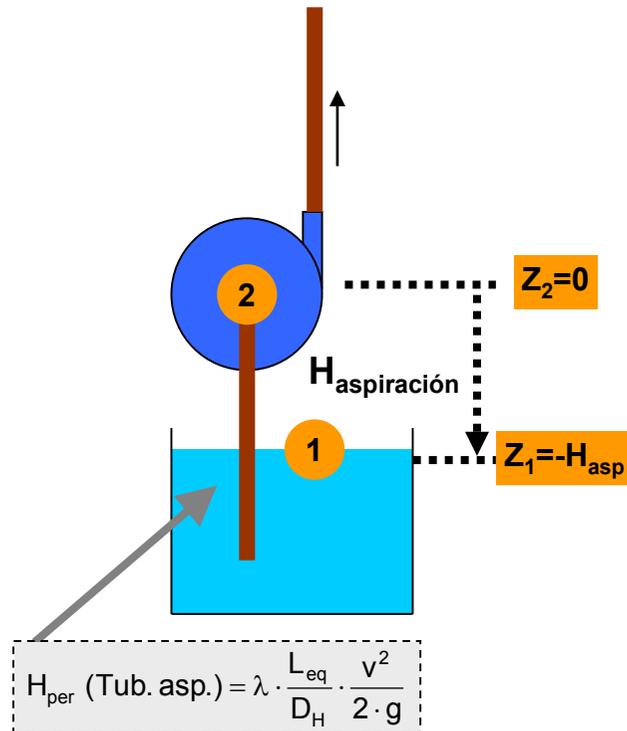
$$H_{B \text{ disp}} = \frac{p_{atm} - p_{sat}}{\gamma} + H_{asp} - H_{per}$$

Cambia el signo de la H_{asp} , y se “protege” la bomba de la cavitación

Cavitación (XIII):

$H_{B\ req} \Rightarrow$ Fabricante

$$H_{B\ disp} = \frac{p_{atm} - p_{sat}}{\gamma} - H_{asp} - H_{per}$$



Considerando los accesorios de la tubería (válvulas, codos, etc)

Para que no se produzca cavitación:

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

Seguridad

Es más fácil que se produzca si:

- \uparrow altitud del lugar ($p_{atm} \downarrow$)
- $\uparrow T$ del fluido ($p_{sat} \uparrow$)
- \uparrow altura hasta la bomba (H_{asp})
- $\uparrow H_{per}$
 - \uparrow la rugosidad de la tubería
 - longitud y accesorios tub. asp.
 - $\downarrow \phi$ tubería asp. (\uparrow velocidad del fluido)
 - \uparrow Caudal (\uparrow velocidad del fluido)

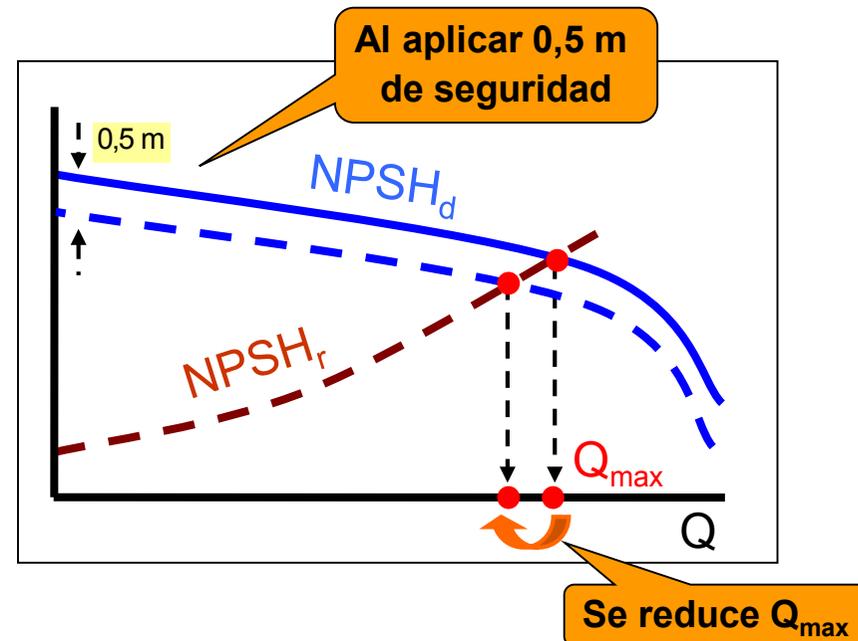
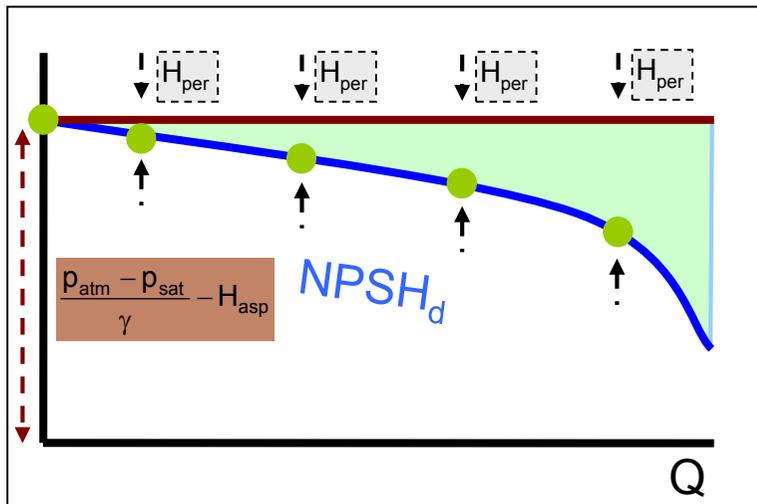
Ojo con vál. pie pozo

Cavitación (XIV):

$$H_{B \text{ disp}} = \frac{p_{\text{atm}} - p_{\text{sat}}}{\gamma} - H_{\text{asp}} - H_{\text{per}}$$

$$H_{\text{per}} (\text{Tub. asp.}) = \lambda \cdot \frac{L_{\text{eq}}}{D_H} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

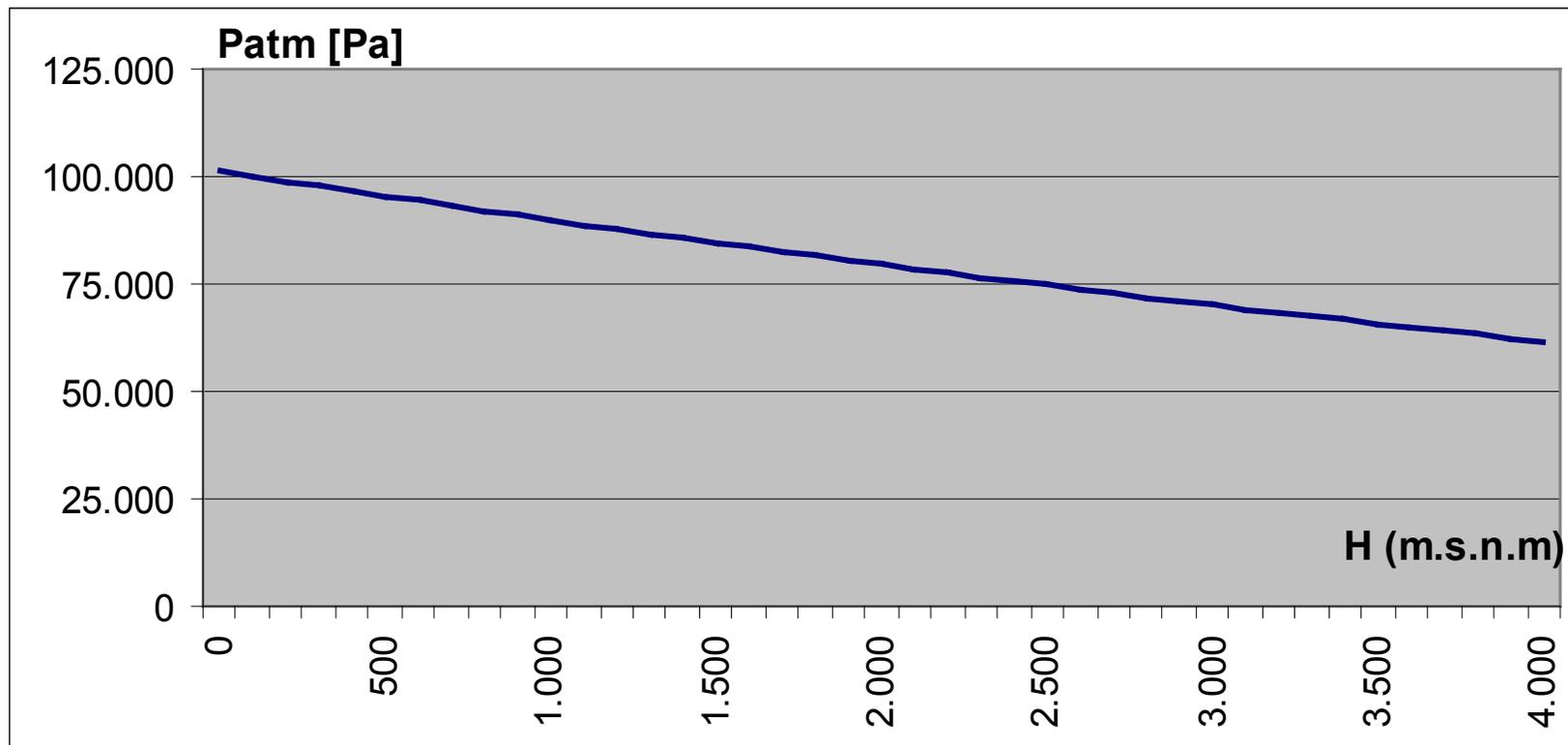
$$Q = 0 \Rightarrow H_{\text{per}} = 0 \Rightarrow H_{B \text{ disp}} = \frac{p_{\text{atm}} - p_{\text{sat}}}{\gamma} - H_{\text{asp}}$$



Cavitación (XV):

Presión atmosférica en función de la altitud

$$P \text{ [Pa]} = 101.325 \left(1 - 2,2610^{-5} H \text{ [m]}\right)^{5,26}$$





Cavitación (XVI):

Los ensayo se realizan con modelos a escala reducida

Se define el coeficiente de cavitación o índice Thoma, σ :

$$\sigma = \frac{NPSH_r}{H}$$

Es igual para las bombas
geoméricamente semejantes

Hay fórmulas teóricas para determinarlo como: $\sigma = 2,14 \cdot 10^{-4} \cdot n_s^{4/3}$

- Siendo n_s el número específico de revoluciones $n_s = 3,65 \cdot \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$

Pero tienen un valor orientativo

Cavitación (XVII):

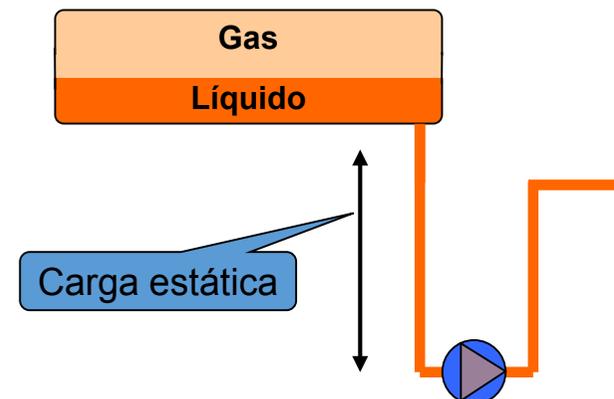
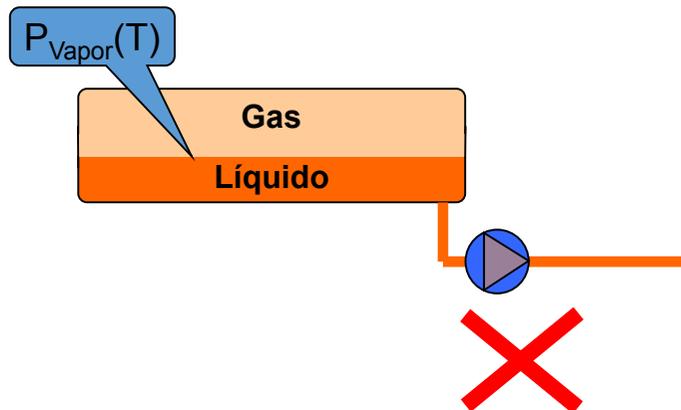
Situación especialmente problemática se produce en el caso de:

- Bombes de GLP desde un depósito

La presión en la superficie del líquido es la que tiene el vapor en equilibrio, por lo que a poca pérdida de carga que se produzca en la tubería de aspiración, la presión puede disminuir del vapor límite y el líquido vaporiza. Además a medida que sale líquido del depósito, la presión del gas se reduce

Se puede solucionar dando carga estática a la bomba

- Bombas de recogida de condensado, ...



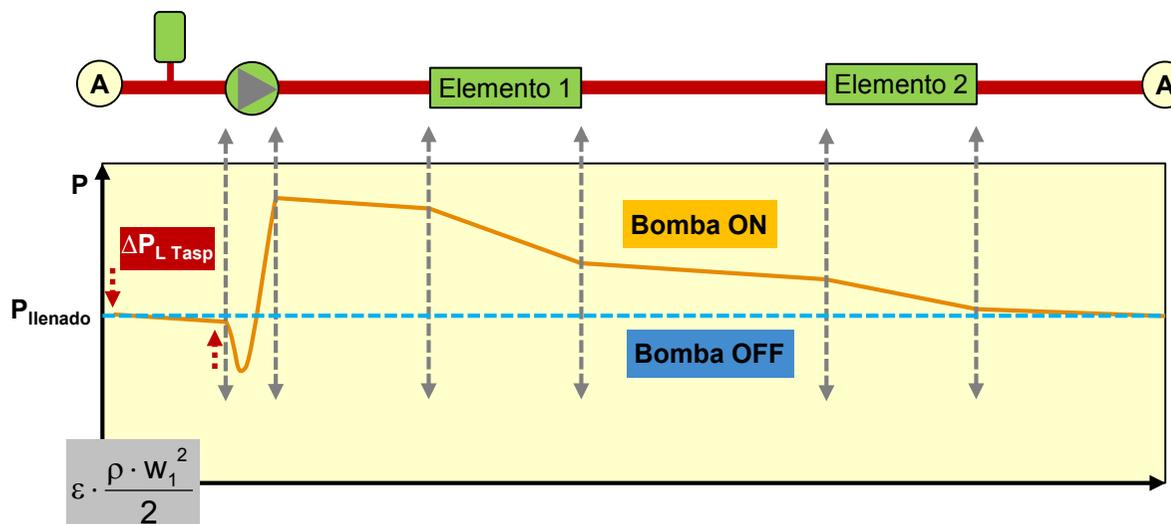
Cavitación (XVIII):

Depósito de Expansión

Su instalación se hace necesaria en los circuitos cerrados para absorber las dilataciones térmicas del fluido

Su posición respecto a la bomba, y la presión de llenado tienen influencia en la presión en todos los puntos del circuito y por tanto en la cavitación

- Situado en la aspiración de la bomba



Al arrancar la bomba la P en el vaso permanece casi cte

La presión mínima es:

$$P_{\min} = P_{\text{inicial}} - \epsilon \cdot \frac{\rho \cdot W_1^2}{2} - \Delta P_{L-Tasp}$$

ϵ parámetro adimensional que depende de la bomba

El primer elementos sufre fuertes variaciones de presión al arrancar y parar la bomba

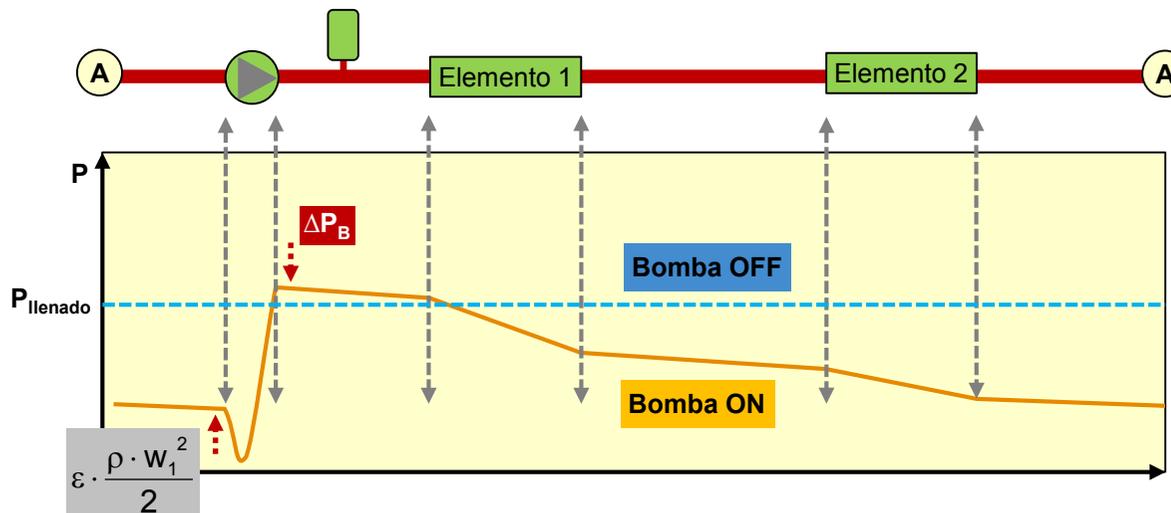
Cavitación (XVIII):

Depósito de Expansión

Su instalación se hace necesaria en los circuitos cerrados para absorber las dilataciones térmicas del fluido

Su posición respecto a la bomba, y la presión de llenado tienen influencia en la presión en todos los puntos del circuito y por tanto en la cavitación

- Situado en la aspiración de la bomba
- Situado en la impulsión de la bomba



Al arrancar la bomba la P en el vaso permanece casi cte

La presión mínima es:

$$P_{\min} = P_{\text{inicial}} - \Delta P_{\text{Bomba}} - \varepsilon \cdot \frac{\rho \cdot W_1^2}{2}$$

ε parámetro adimensional que depende de la bomba

Al arrancar la bomba la presión en la aspiración cae sustancialmente, lo que puede provocar problemas de cavitación

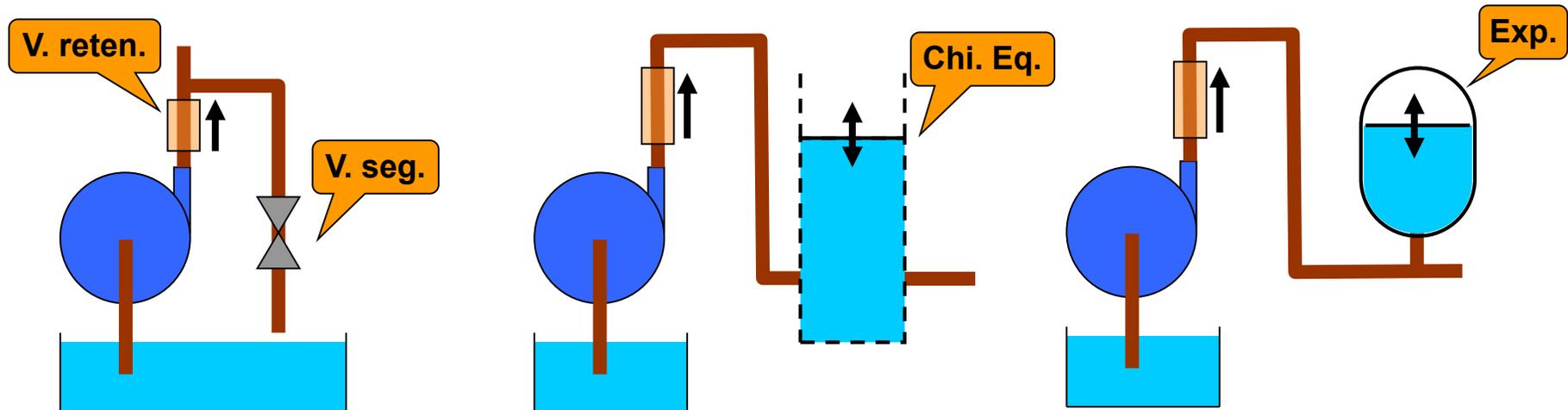
Golpe de Ariete:

Se puede producir por:

- Parada brusca (corte suministro eléctrico)
- Cierre brusco en la válvula de impulsión

Se puede limitar con:

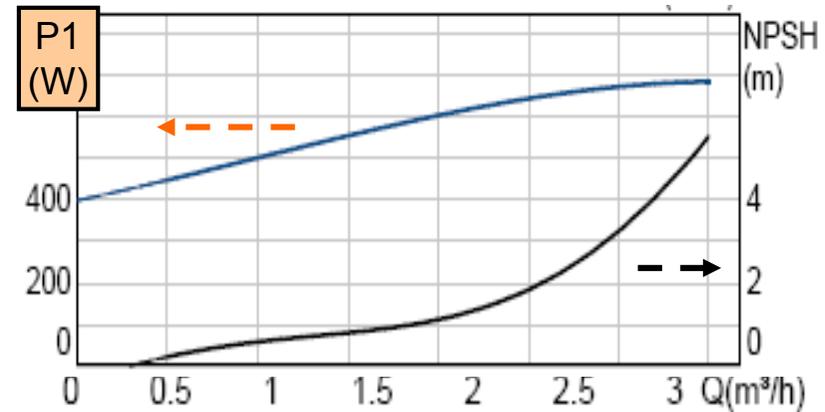
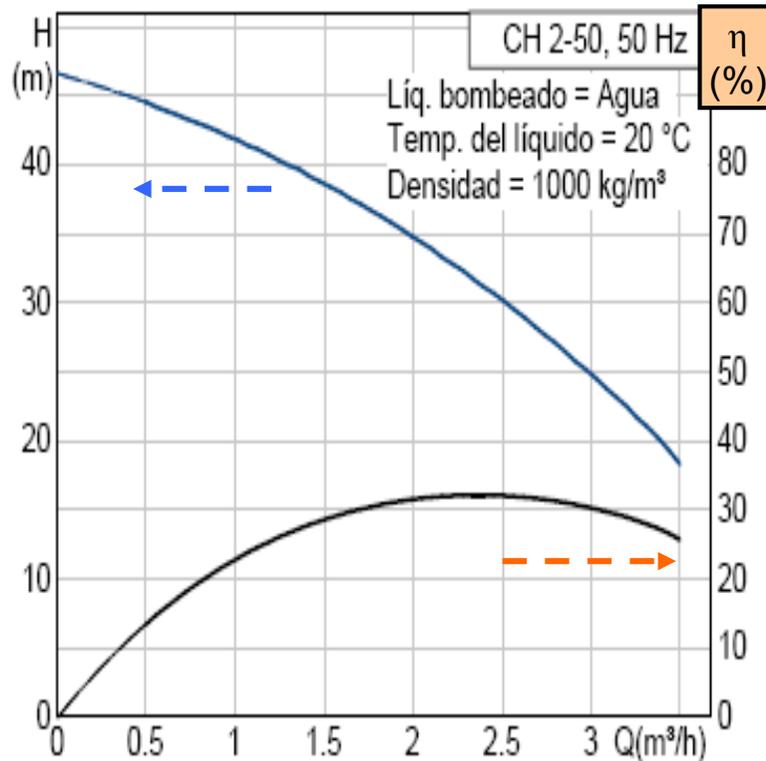
- Cierre lento en la válvula de impulsión antes de parar la bomba
- Instalando válvulas de seguridad, chimeneas de equilibrio, válvulas de retención, ...



Catálogos de Fabricantes (I)

Ej: Grundfos

<http://product-selection.grundfos.com/catalogue.html?familycode=NKFAM&custid=BGE&lang=ESP#/Cat%C3%A1logo%20de%20prod./Familia%20de%20prod./NK%2C%20NKE/NK>



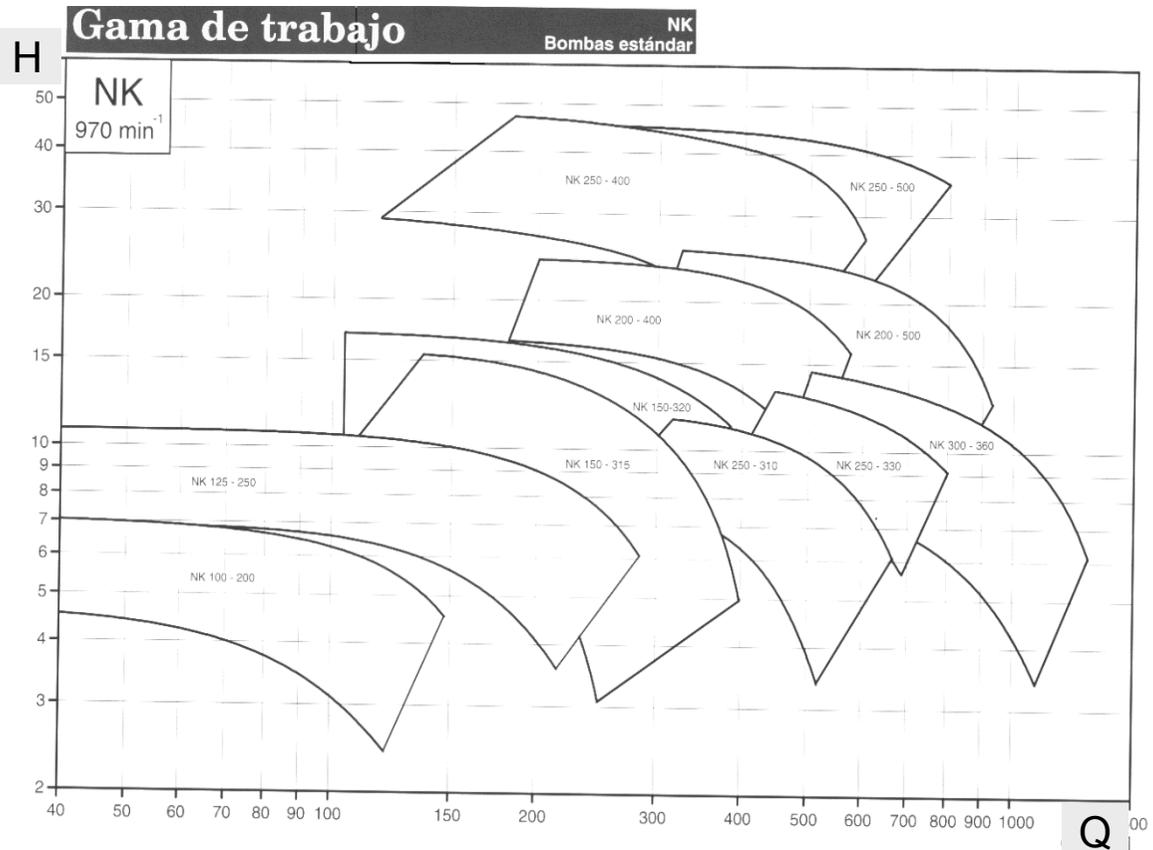
Catálogos de Fabricantes (II)

Ej: Grundfos

<http://product-selection.grundfos.com/catalogue.html?familycode=NKFAM&custid=BGE&lang=ESP#/Cat%C3%A1logo%20de%20prod./Familia%20de%20prod./NK%2C%20NKE/NK>

Familia de bombas

- Gráfico de selección rápida



Catálogos de Fabricantes (III)

Ej: Grundfos

Familia de bombas

- Gráfico de selección rápida
- Gráfico de selección

<http://product-selection.grundfos.com/catalogue.html?familycode=NKFAM&custid=BGE&lang=ESP#/Cat%C3%A1logo%20de%20prod./Familia%20de%20prod./NK%2C%20NKE/NK>

