

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

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

CARLOS J RENEDO [renedoc@unican.es](mailto:renedoc@unican.es)  
INMACULADA FERNANDEZ DIEGO [fernandei@unican.es](mailto:fernandei@unican.es)  
JUAN CARCEDO HAYA [juan.carcedo@unican.es](mailto:juan.carcedo@unican.es)  
FELIX ORTIZ FERNANDEZ [felix.ortiz@unican.es](mailto:felix.ortiz@unican.es)

### 1.1.- Introducción a las Máquinas Hidráulicas

### 1.2.- Bombas Hidráulicas

#### 1.1.1.- Generalidades de las Bombas Hidráulicas

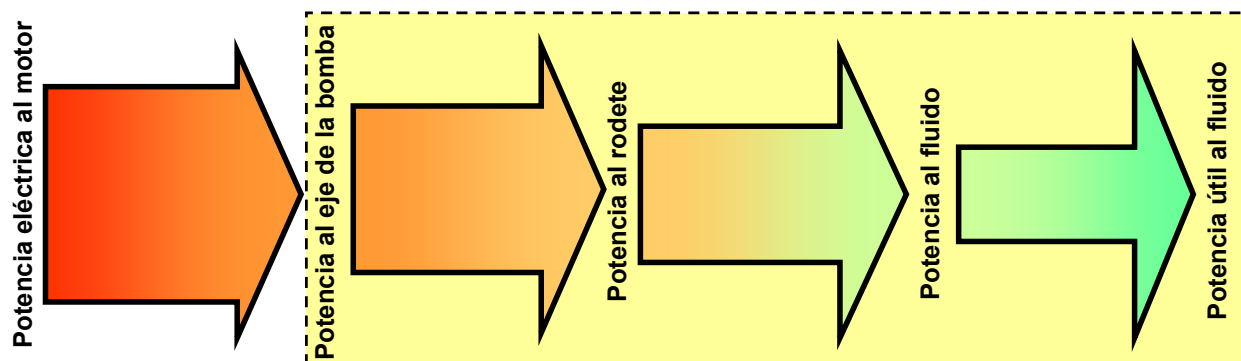
#### 1.2.2.- Bombas Centrifugas

#### 1.2.3.- Bombas Volumétricas

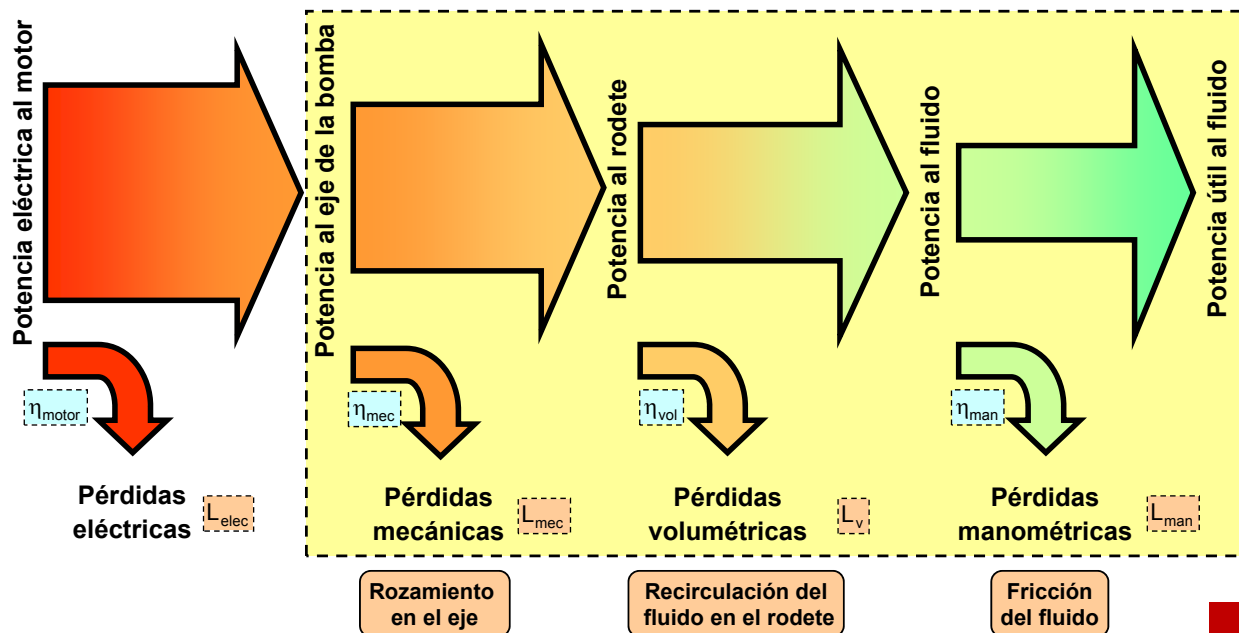
### 1.3.- Turbinas Hidráulicas

- 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
  - Grado de Reacción del Rodete
  - Punto de Funcionamiento
  - Selección de una Bomba

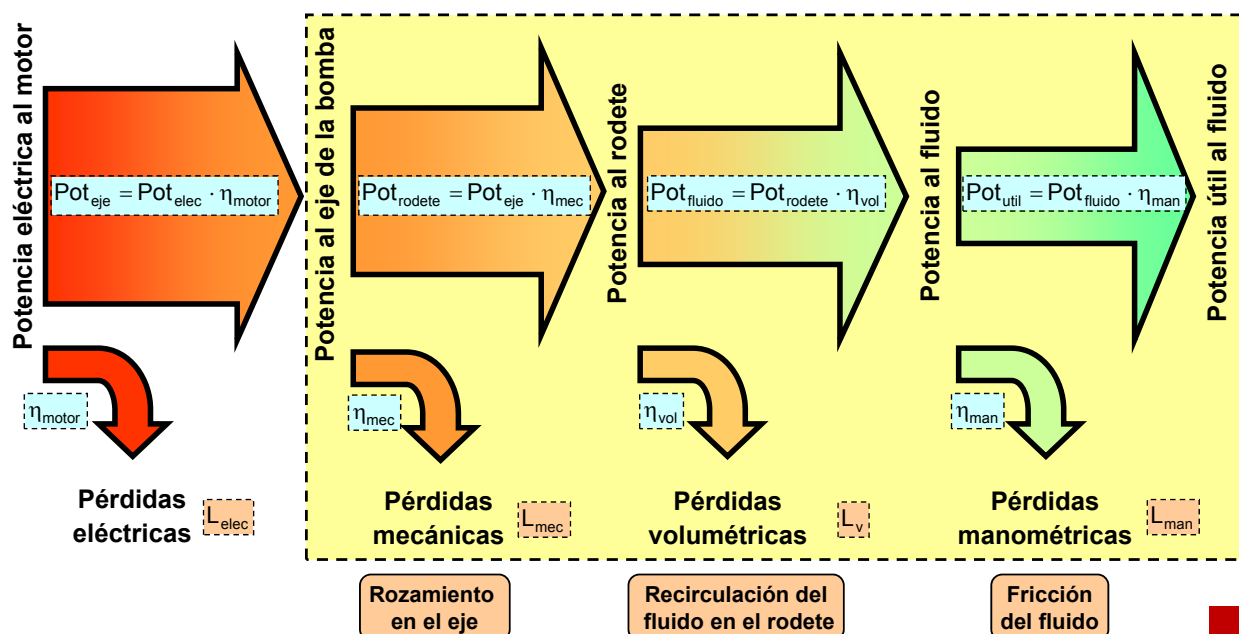
Potencias, Rendimientos y Pérdidas en las Bombas (I)



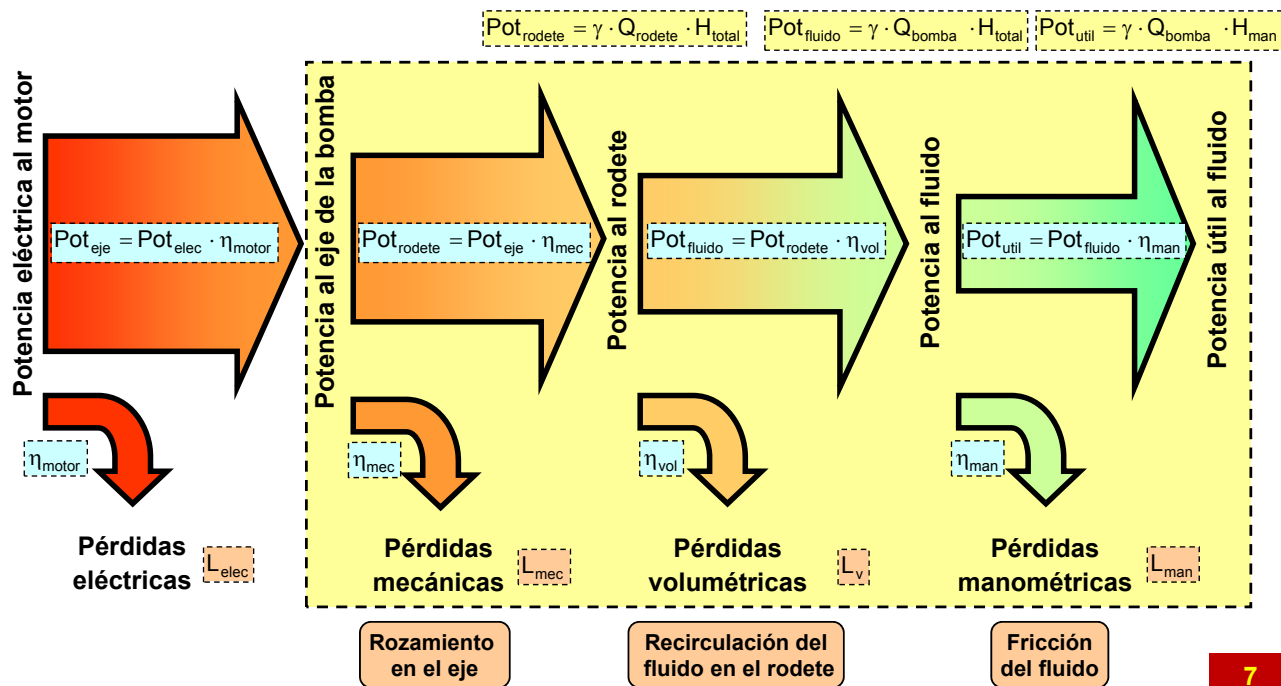
Potencias, Rendimientos y Pérdidas en las Bombas (I)



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

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

- ✓ Pérdidas Mecánicas (rozamientos),  $L_m$ 
  - En el eje
  - En los cojinetes
  - Entre el rodete y la cámara de agua en la que gira

- Disminuyen la potencia comunicada al rodete,  $Pot_{rod}$

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

- Aparece el rendimiento mecánico,  $\eta_{mec}$

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

➤  $Pot_{rodete}$

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

$$H_{total} = H_{Teorica} = H_{EULER}$$

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)

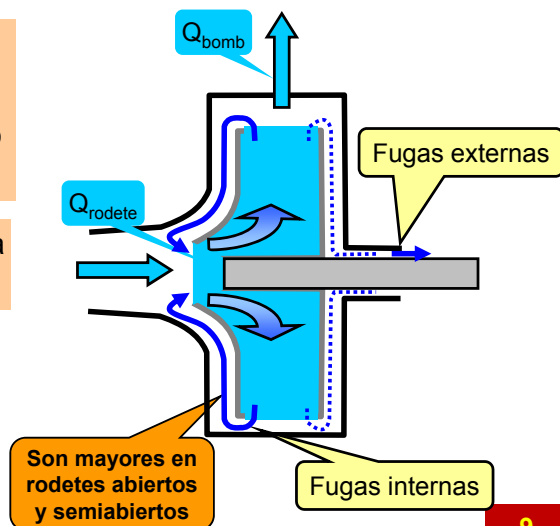
- Disminuyen el caudal suministrado por la bomba respecto al que aspira el rodete

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

- Aparece el rendimiento volumétrico,  $\eta_{vol}$

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

Típicamente  $\eta_{vol} = 1$



9

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,  $H_{man}$

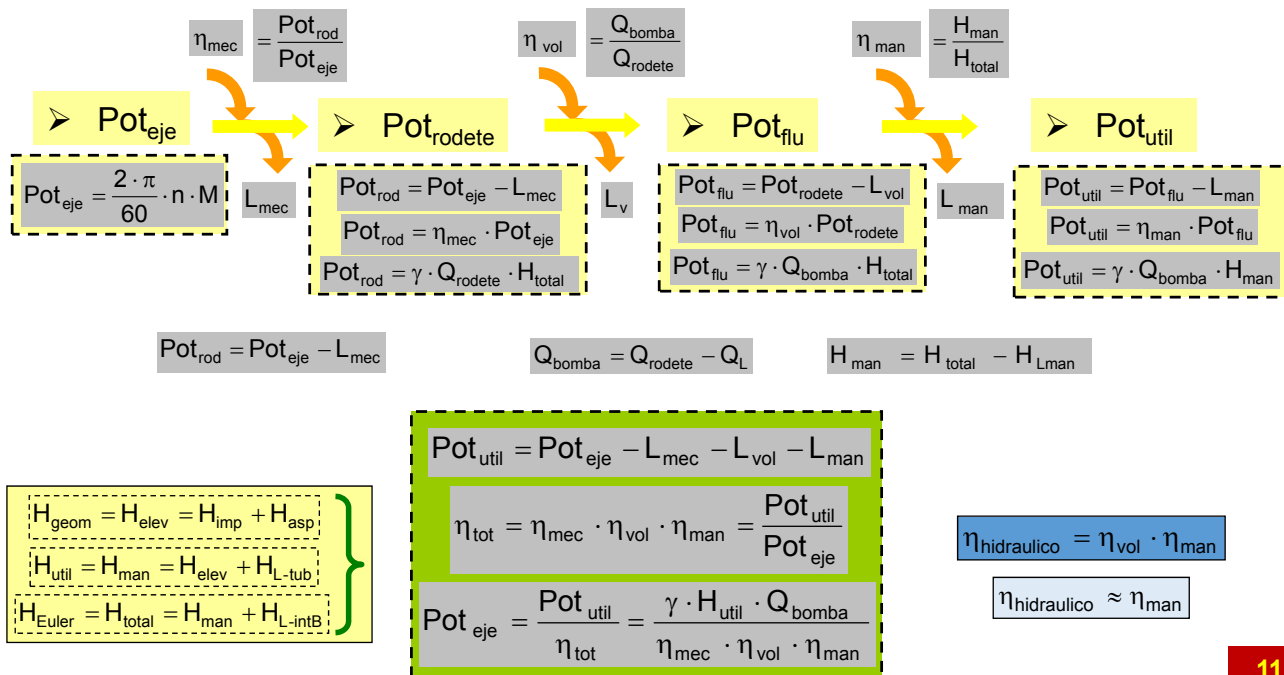
$$H_{man} = H_{total} - H_{L-intB}$$

- Aparece el rendimiento manométrico,  $\eta_{man}$

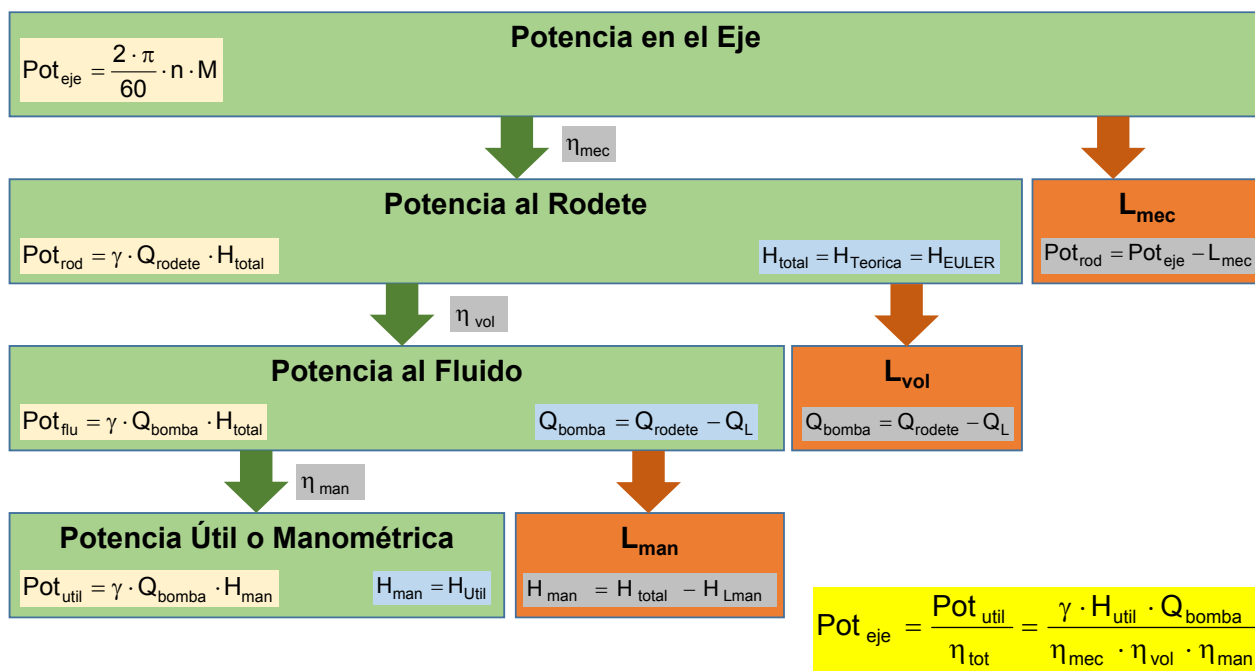
$$\eta_{man} = \frac{H_{man}}{H_{total}} = \frac{H_{Util}}{H_{Euler}}$$

10

Potencias, Rendimientos y Pérdidas en las Bombas (V)



Potencias, Rendimientos y Pérdidas en las Bombas (V)



Una bomba centrifuga 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:  $\beta_1 = 22^\circ$ ;  $\beta_2 = 15^\circ$ ; con  $\alpha_1 = 90^\circ$

- Calcular los triángulos de velocidades ( $U_1, U_2, C_1, C_2; \alpha_2$ )
- La altura teórica y el caudal de impulsión

- Las potencias (mecánica, rodete, fluido y útil) si  $\eta_{man} = 0,85$ ;  $\eta_{vol} = \eta_{mec} = 1$
- La curva característica de la bomba

Una bomba centrifuga 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:  $\beta_1 = 22^\circ$ ;  $\beta_2 = 15^\circ$ ; con  $\alpha_1 = 90^\circ$

- Calcular los triángulos de velocidades ( $U_1, U_2, C_1, C_2; \alpha_2$ )
- La altura teórica y el caudal de impulsión

- Las potencias (mecánica, rodete, fluido y útil) si  $\eta_{man} = 0,85$ ;  $\eta_{vol} = \eta_{mec} = 1$
- La curva característica de la bomba

- Representar la variación de: la altura teórica de impulsión, del caudal y de las pérdidas internas si la **velocidad de giro** va aumentando de **250 a 2.000 rpm**

Una bomba centrifuga 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:  $\beta_1 = 22^\circ$ ;  $\beta_2 = 15^\circ$ ; con  $\alpha_1 = 90^\circ$

- Calcular los triángulos de velocidades ( $U_1$ ,  $U_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ;  $\alpha_2$ )
- La altura teórica de impulsión

- Las potencias (mecánica, rodete, fluido y útil) si  $\eta_{man} = 0,85$ ;  $\eta_{vol} = \eta_{mec} = 1$
- La curva característica de la bomba

- Representar la variación de: la altura teórica de impulsión, del caudal y de las pérdidas internas si el **ángulo  $\beta_2$**  varía de grado en grado desde **11° a 18°**

Una bomba centrifuga 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:  $\beta_1 = 22^\circ$ ;  $\beta_2 = 15^\circ$ ; con  $\alpha_1 = 90^\circ$

- Calcular los triángulos de velocidades ( $U_1$ ,  $U_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ;  $\alpha_2$ )
- La altura teórica de impulsión

- Las potencias (mecánica, rodete, fluido y útil) si  $\eta_{man} = 0,85$ ;  $\eta_{vol} = \eta_{mec} = 1$
- La curva característica de la bomba

- Representar la variación de: la altura teórica de impulsión, del caudal y de las pérdidas internas si **ángulo  $\beta_1$**  varía de grado en grado desde **18° a 25°**



Una bomba centrifuga 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:  $\beta_1 = 22^\circ$ ;  $\beta_2 = 15^\circ$ ; con  $\alpha_1 = 90^\circ$

- Calcular los triángulos de velocidades ( $U_1, U_2, C_1, C_2; \alpha_2$ )
- La altura teórica de impulsión
- Las potencias (mecánica, rodete, fluido y útil) si  $\eta_{man} = 0,85$ ;  $\eta_{vol} = \eta_{mec} = 1$
- La curva característica de la bomba
- Representar la variación de: la altura teórica de impulsión, del caudal y de las pérdidas internas si **ángulo  $\alpha_1$**  varía de 2 grados en 2 grados desde **82° a 96°**

**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

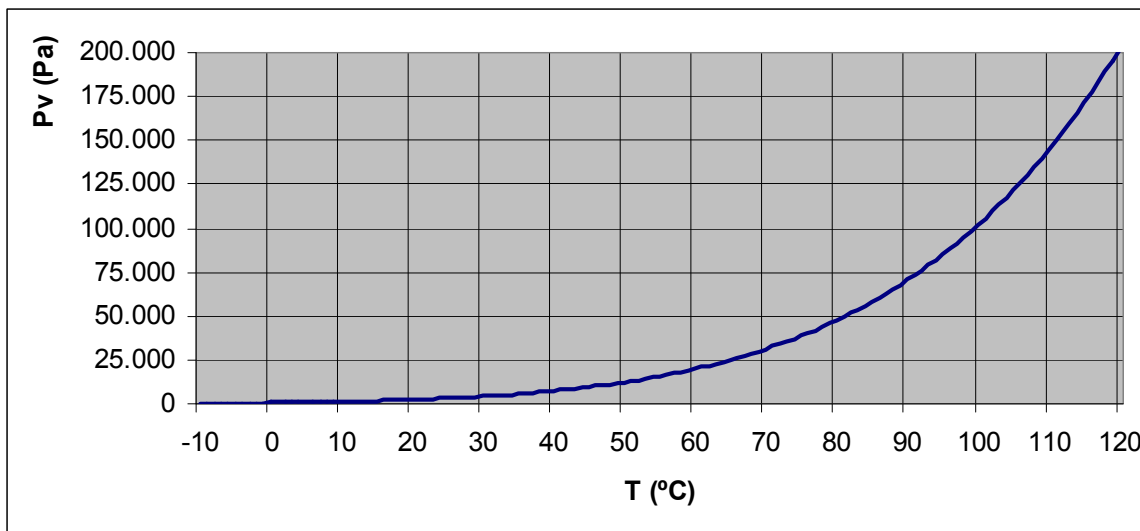
Temperatura (°C)	5	10	20	40	60	80	100
$p_{sat}$ (bar) [ $p_{abs}$ ]	0,00872	0,01227	0,02337	0,07375	0,1992	0,4736	1,0133

( $p_{sat}$  con T; peligro con calor)

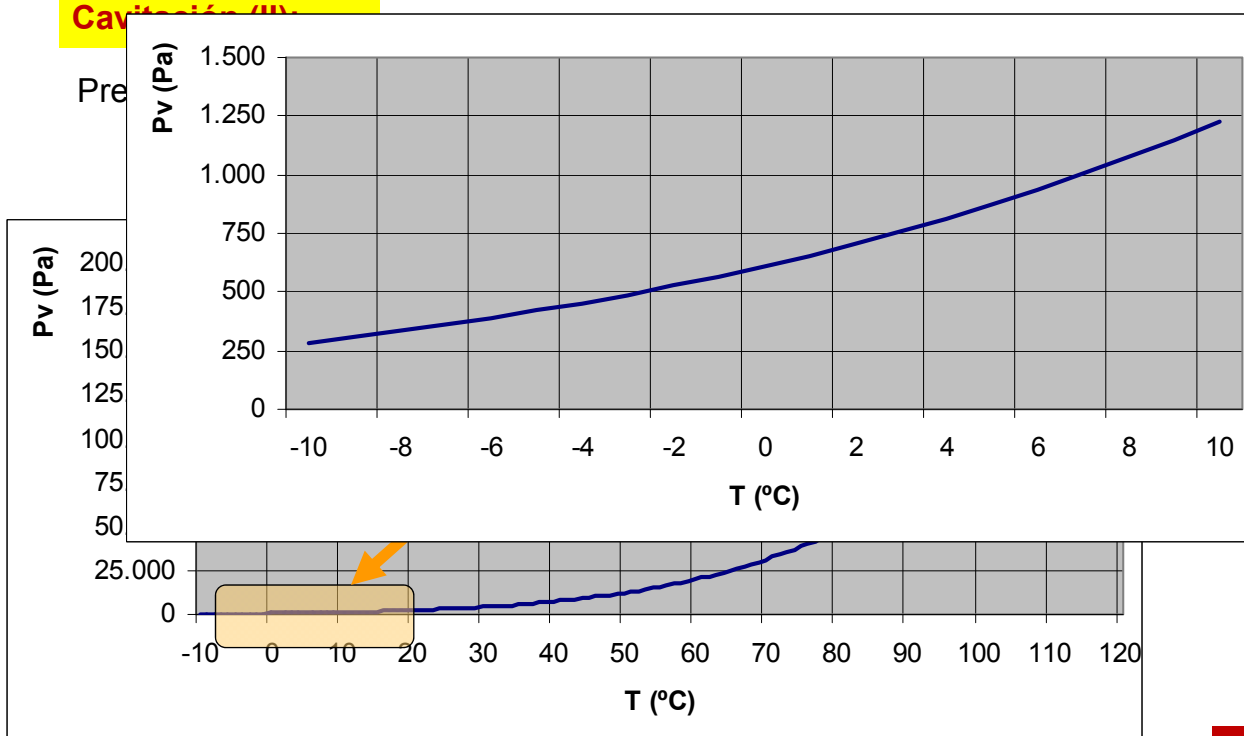
No es la entrada de aire en el sistema

**Cavitación (II):**

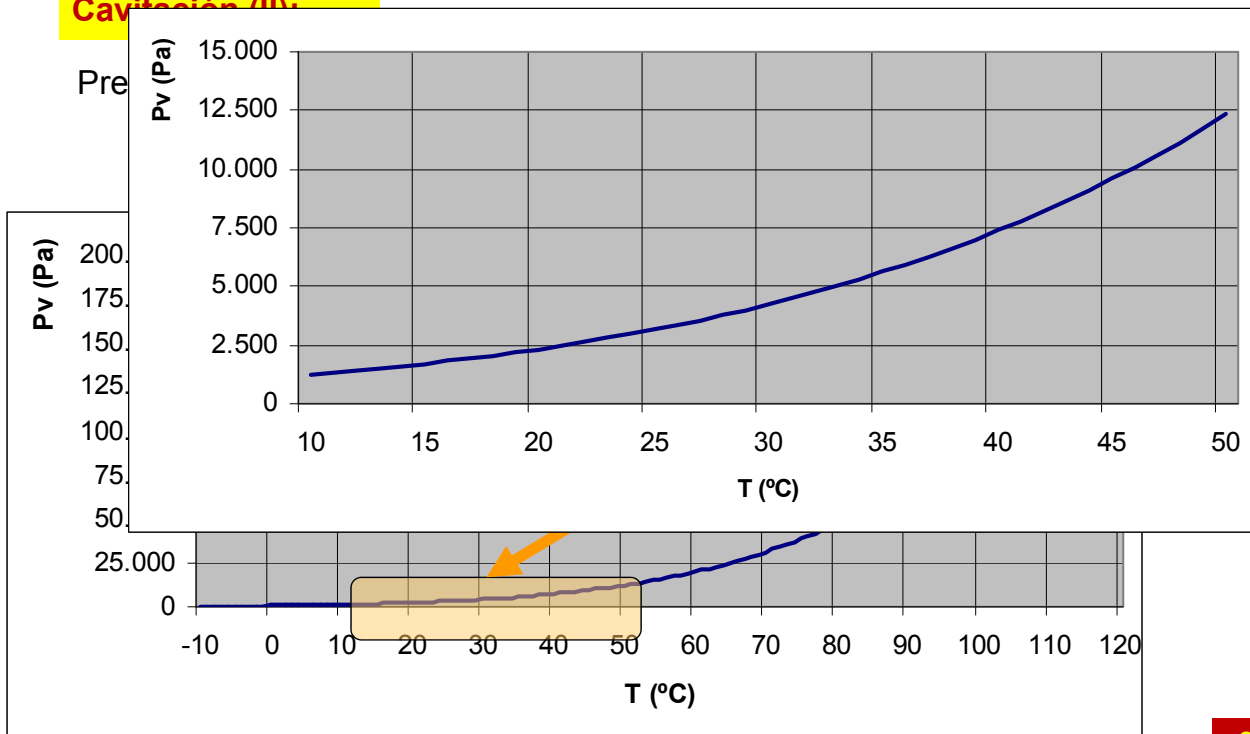
Presión de Vapor del Agua:  $\log(p_v) = 7,5 \cdot \frac{T}{(T + 273) - 35,85} + 2,7858$   $p_v$  en Pa y T en °C



**Cavitación (III):**



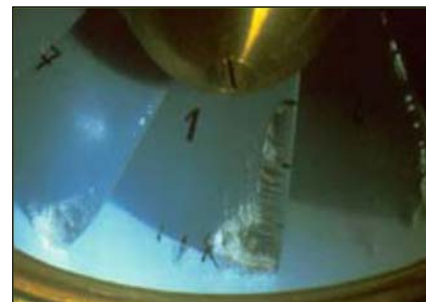
**Cavitación (II):**



21

**Cavitación (III):**

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



En las bombas:

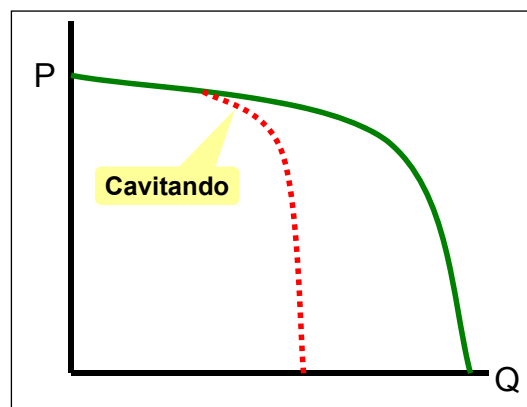
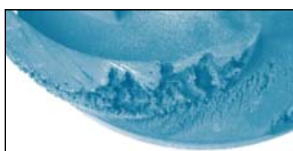
- Las burbujas de vapor se forman en la aspiración (entrada del rodete), en el punto de mínima presión
- La implosión en el interior del rodete, a medida que el fluido va adquiriendo más presión y  $p > p_{sat}$

22

**Cavitación (IV):**

Los efectos desfavorables de la cavitación son:

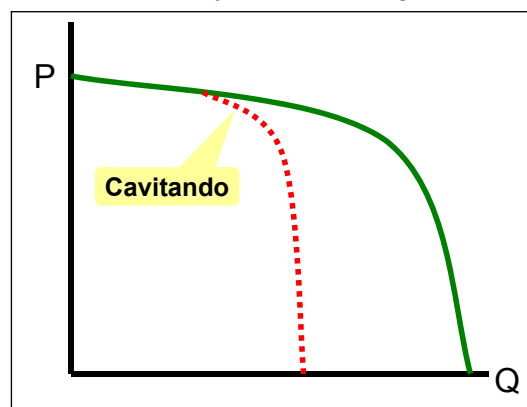
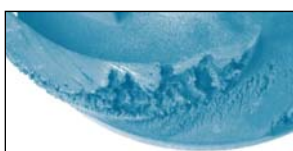
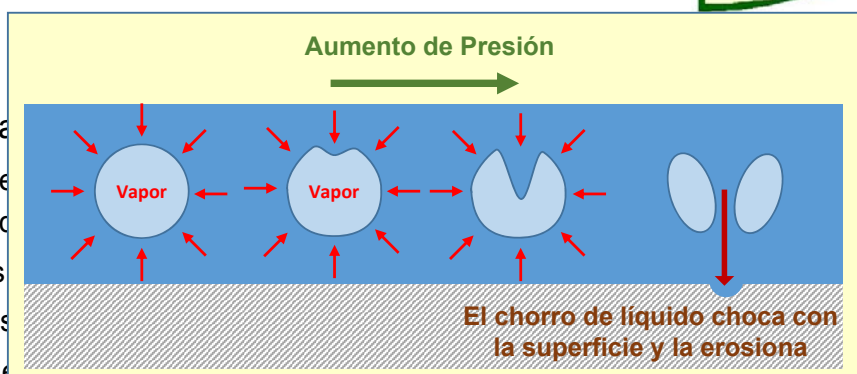
- Disminución de la sección de paso (la masa en vapor ocupa más volumen que en líquido), lo cual puede motivar incluso el descebado ( $\downarrow \Pi_B$ )
- Caída brusca de las curvas características para caudales elevados
- Ruidos y vibraciones debido al colapso de las burbujas
- Erosión de superficies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



**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)



**Cavitación (V):**

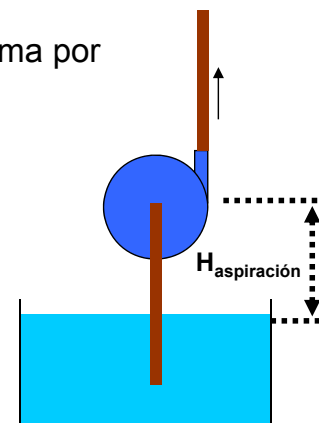
Las bombas centrifugas tienen una altura de aspiración limitada

**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):**

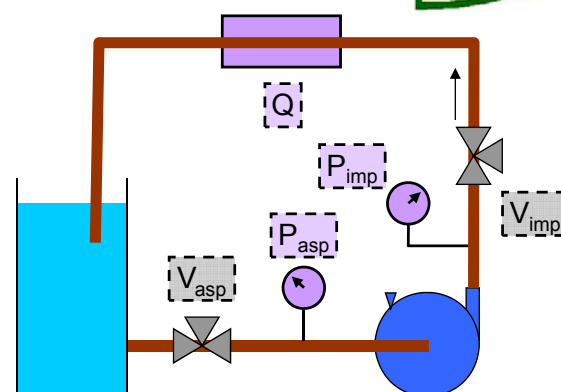
Ensayo del **NPSH<sub>r</sub> (I)**:

Procedimiento:

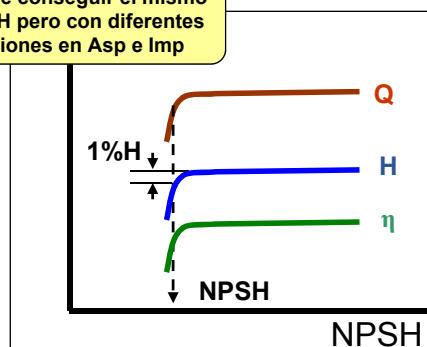
- Se fija el pto de trabajo Q-H ( $H_{imp} - H_{asp}$ )
- Se cierra un poco  $V_{asp}$ 
  - $\downarrow Q \Rightarrow \uparrow H$
  - $\uparrow H_{asp}$
- Se abre  $V_{imp}$  buscando
  - $\uparrow Q$  hasta valor inicial  $\Rightarrow \downarrow H$

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 ptos de trabajo Q-H ( $H_{imp} - H_{asp}$ )
- ...

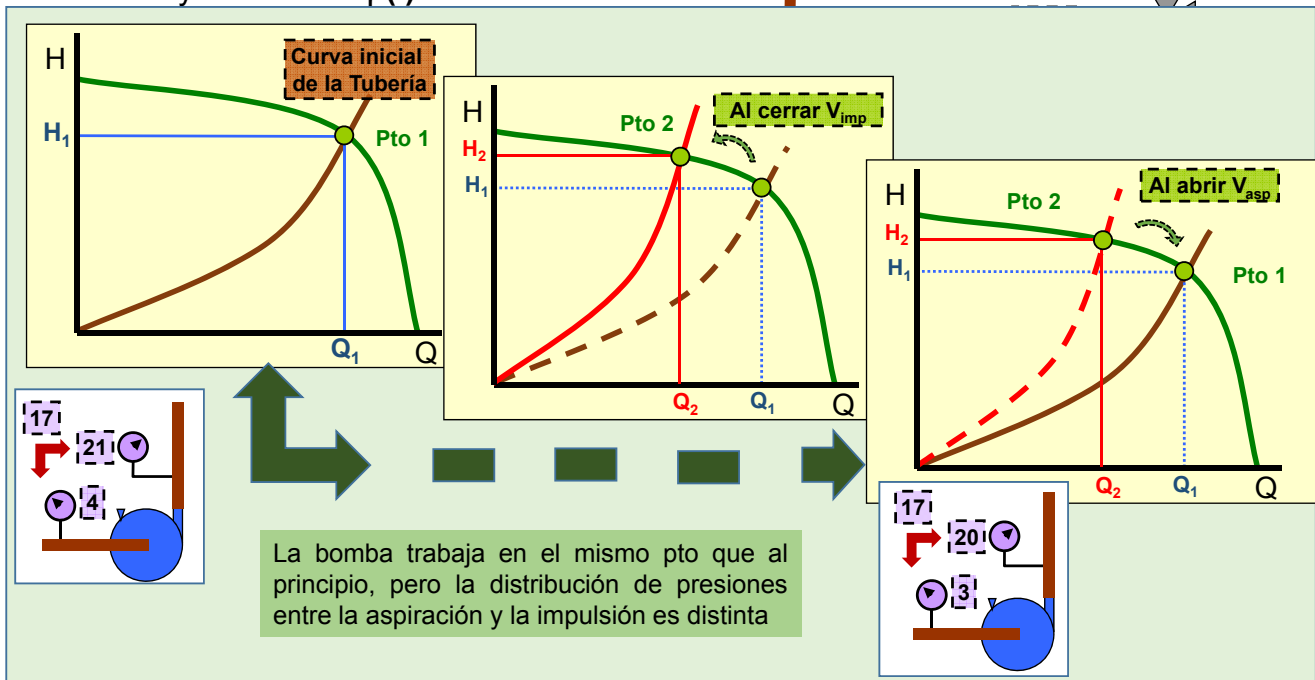


Se debe conseguir el mismo pto Q-H pero con diferentes presiones en Asp e Imp



**Cavitación (VI):**

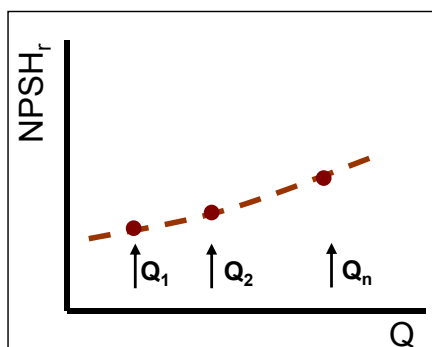
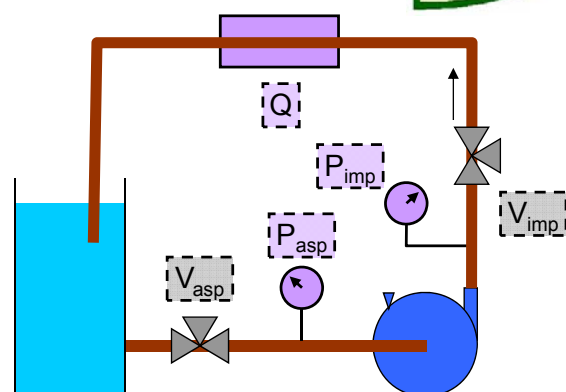
Ensayo del  $NPSH_r$  (I):



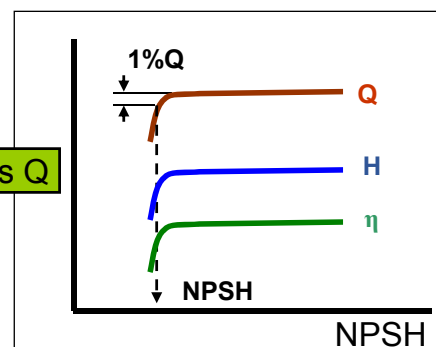
**Cavitación (VII):**

Ensayo del  $NPSH_r$  (II):

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



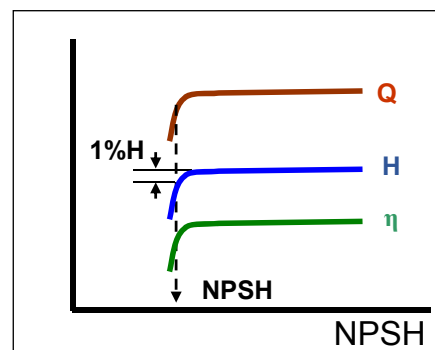
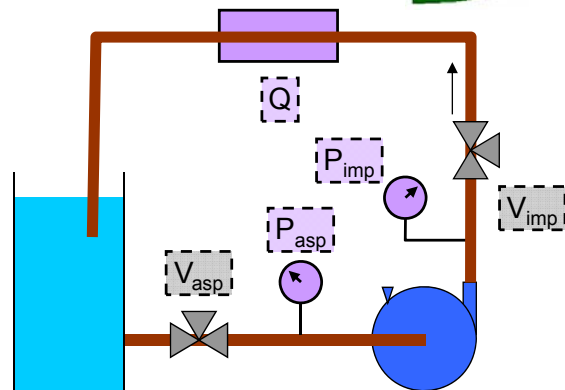
Múltiples  $Q$



**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  $\Delta P_B$  ( $110 - 10 = 100 \text{ m}$ )
- 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  $Q (= 1 \text{ m}^3/\text{s})$

$P_a$	$P_i$	$\Delta P_B$
10	110	100
9	109	100
...	...	...
4	104	100
3	102	99

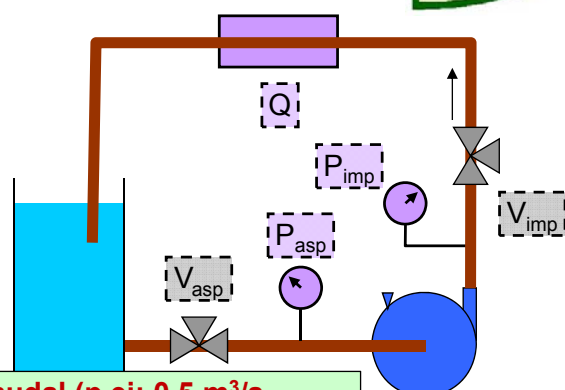
NPSHr a  $1 \text{ m}^3/\text{s}$

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  $\Delta P_B$  ( $110 - 10 = 100 \text{ m}$ )
- Se cierra más  $V_a$  y se abre  $V_i$  para ajustar el mismo  $Q$
- ... La cavitación empieza cuando  $\Delta P_B < 99\% \Delta P_{B \text{ inicial}}$
- **Se repite con otro caudal (p.ej:  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ )**



Se fija  $Q (= 0,5 \text{ m}^3/\text{s})$

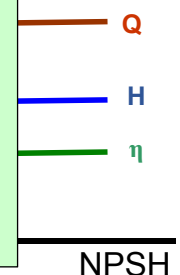
$P_a$	$P_i$	$\Delta P_B$
10	112	102
9	111	102
...	...	...
3	105	102
2,5	103,5	101

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

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

Empieza la cavitación

Empieza la cavitación

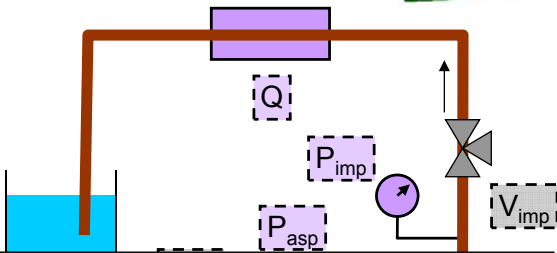


**Cavitación (VIII):**

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  $\Delta P_B$  ( $110 - 10 =$
- Se cierra más  $V_i$  y se abre  $V_a$  para ajustar el nivel de  $NPSH_r$
- ... La cavitación comienza cuando  $\Delta P_B < 99\% \Delta P_{B, \text{max}}$

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



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

$P_a$	$P_i$	$\Delta P_B$
10	108	98
9	107	98
...	...	...
4	102	98
3,5	100,5	97

Se fija  $Q (= 0,5 \text{ m}^3/\text{s})$

$P_a$	$P_i$	$\Delta P_B$
10	108	98
9	107	98
...	...	...
4	102	98
3	105	102
2,5	103,5	101
3	102	99

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

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

Empieza la cavitación

Empieza la cavitación

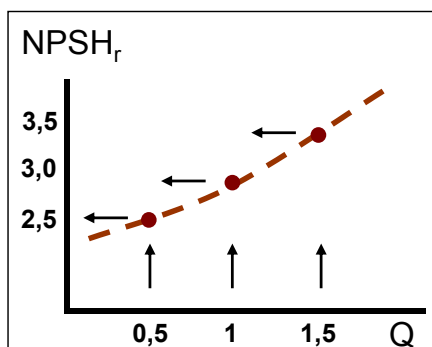
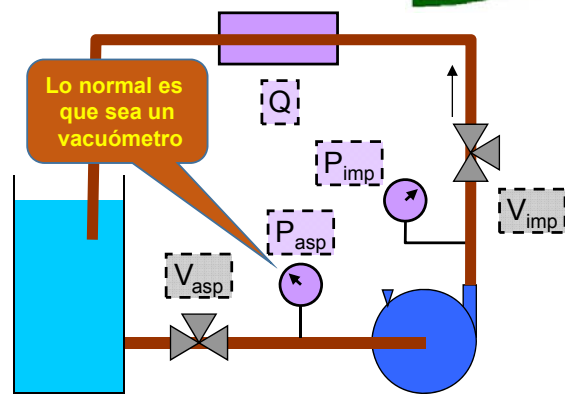
Empieza la cavitación

NPSH

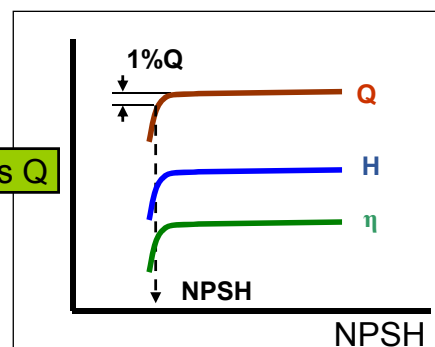
**Cavitación (VII):**

Ensayo del  $NPSH_r$  (IV):

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



Múltiples Q





**Cavitación (IX):**

Ensayo del  $NPSH_r$  (V):

$NPSH_r \uparrow$  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 rodets, se puede considerar:

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

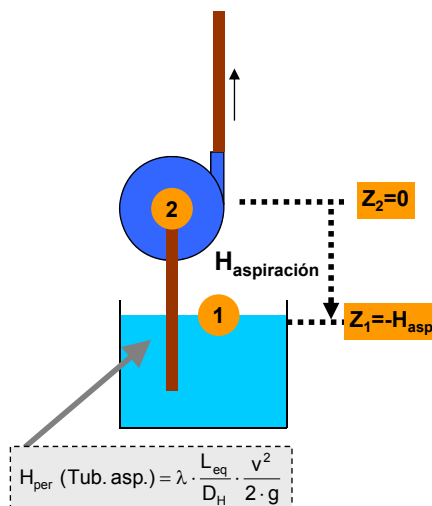
$$\rightarrow NPSH_r = \lambda_1 \cdot \frac{W_1^2}{2 \cdot g} + \lambda_2 \cdot \frac{C_1^2}{2 \cdot g}$$

$$\begin{cases} \lambda_1 \approx 0,29 \\ \lambda_2 \approx 1,32 \end{cases}$$

33

**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:

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

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

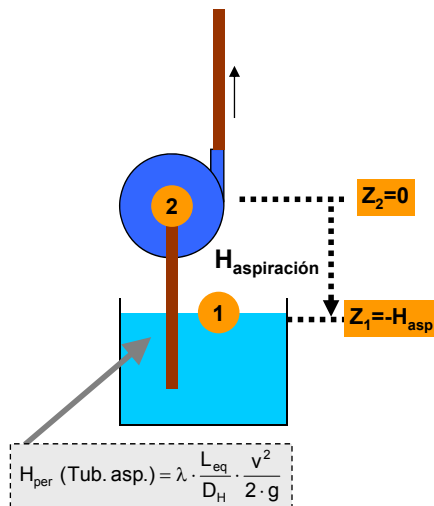
$$\frac{V_2^2}{2 \cdot g} = \frac{p_{\text{atm}} - p_2}{\gamma} - H_{\text{per}} - H_{\text{asp}}$$

$\Rightarrow$

34

**Cavitación (XI):**

Cálculo del  $NPSH_d$  (II):



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

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

$$\Rightarrow H_{B \text{ disp}} = \frac{p_2 - p_{\text{sat}}}{\gamma} + \left( \frac{p_{\text{atm}} - p_2}{\gamma} - H_{\text{per}} - H_{\text{asp}} \right)$$

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

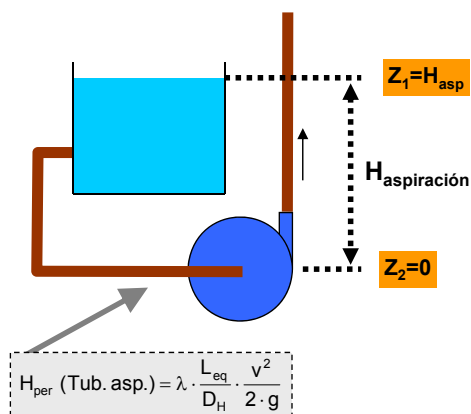
$$(p_{\text{atm}} \approx 101.325 \text{ Pa} \approx 10 \text{ m.c.a.})$$

Max. teórico de aspiración de una bomba

**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)

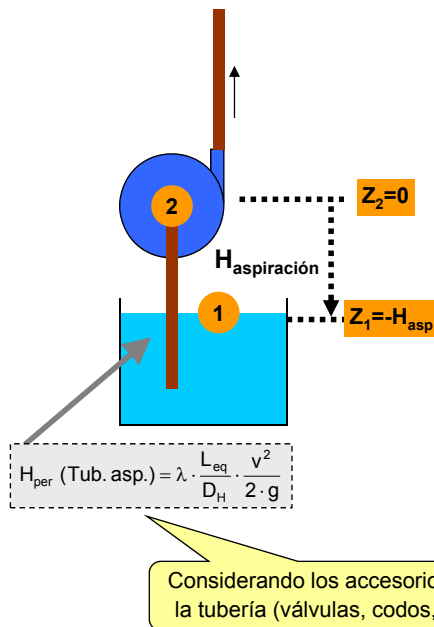
$$H_{B \text{ disp}} = \frac{p_{\text{atm}} - p_{\text{sat}}}{\gamma} + H_{\text{asp}} - H_{\text{per}}$$

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

**Cavitación (XIII):**

$H_{B\text{ req}} \Rightarrow \text{Fabricante}$

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



Para que no se produzca cavitación:  
 $NPSH_d \geq NPSH_r + 0,5m$   
Seguridad

Es más fácil que se produzca si:

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

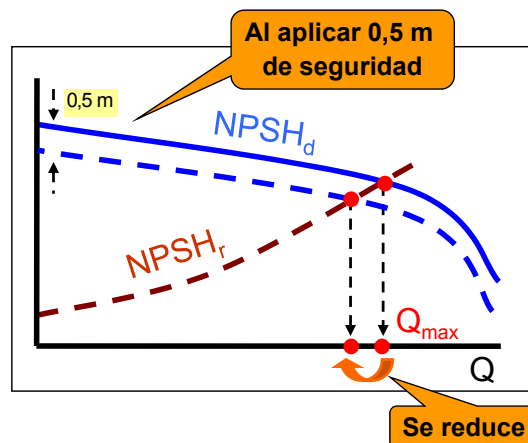
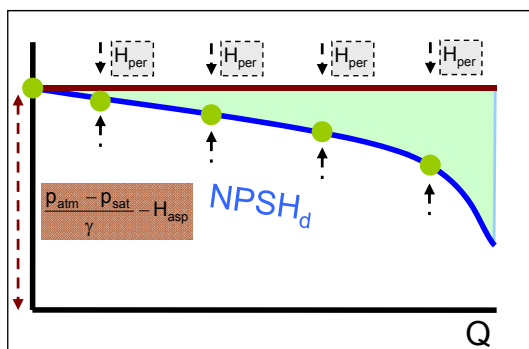
Ojo con vál. pie pozo

**Cavitación (XIV):**

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

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

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

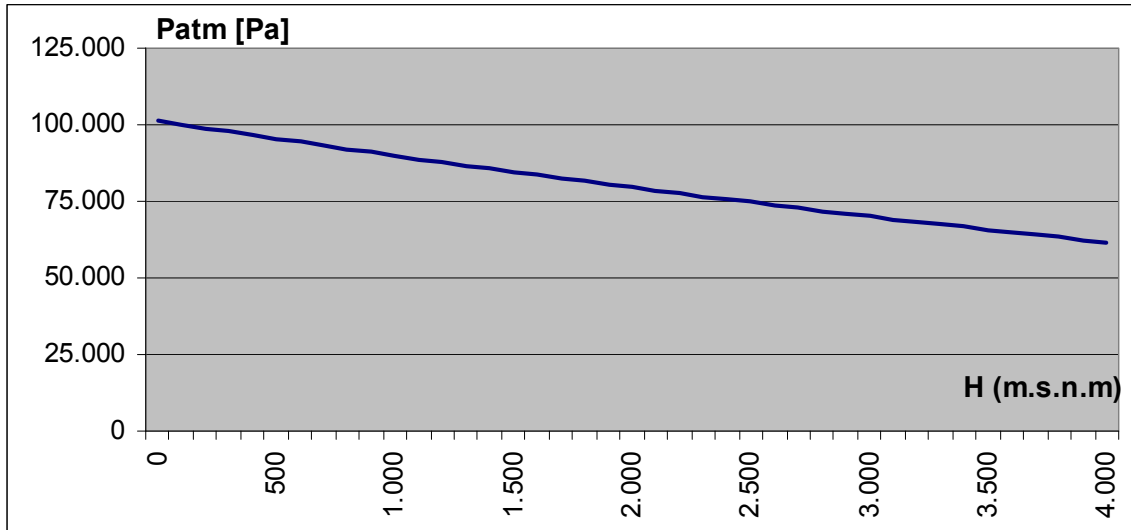


Se reduce  $Q_{\text{max}}$

**Cavitación (XV):**

Presión atmosférica en función de la altitud

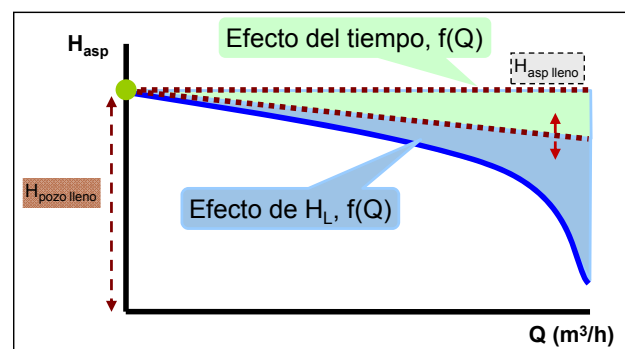
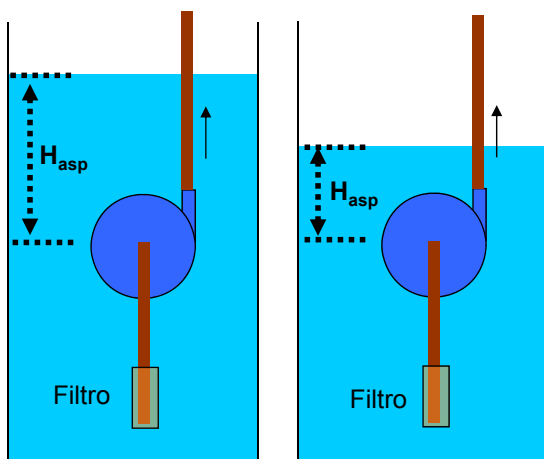
$$P \text{ [Pa]} = 101.325 (1 - 2,26 \cdot 10^{-5} H \text{ [m]})^{5,26}$$



**Cavitación (XVI):**

En el vaciado de un pozo el nivel del agua descende, por lo que la altura de aspiración de la bomba se hace menos favorable

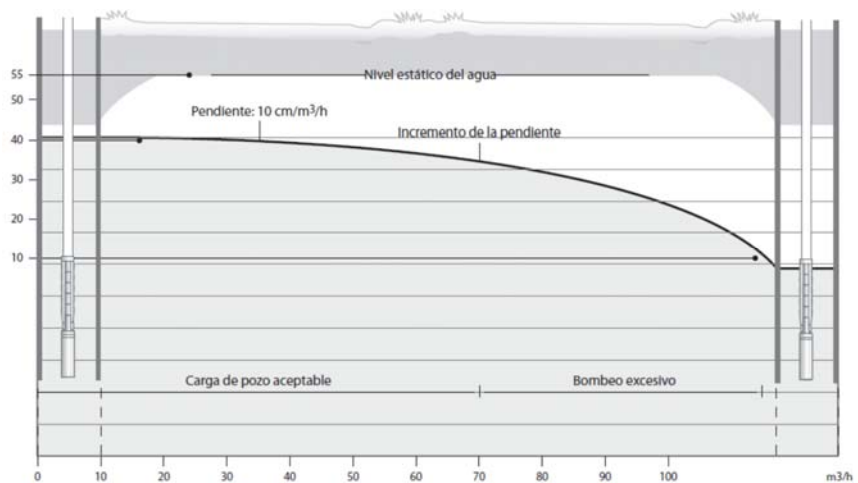
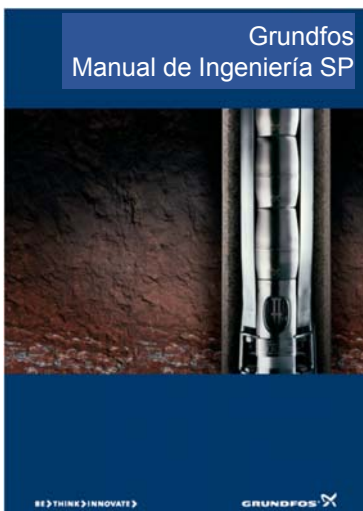
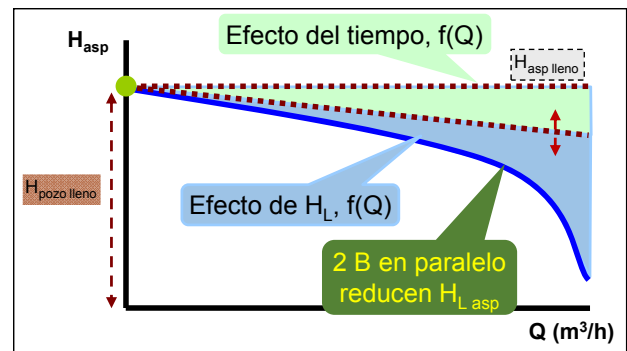
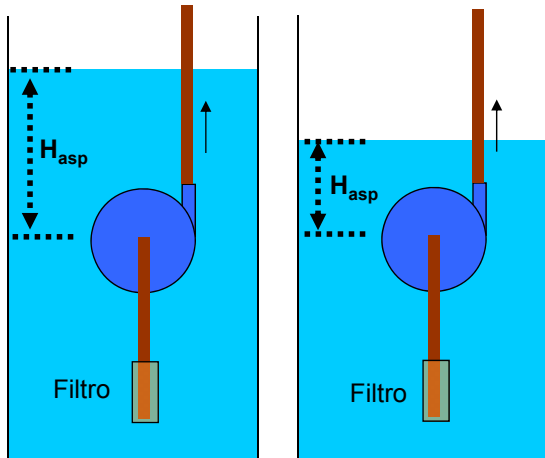
Si el descenso de nivel viene por sobreexplotación del pozo, la velocidad del agua será grande, y la pérdidas por fricción en el filtro de entrada también lo serán



**Cavitación (XVI):**

En el vaciado de un pozo el nivel del agua desciende, por lo que la altura de aspiración de la bomba se hace menos favorable

Si el descenso de nivel viene por sobreexplotación del pozo, la velocidad del agua será grande, y la pérdidas por fricción en el filtro de entrada también lo serán



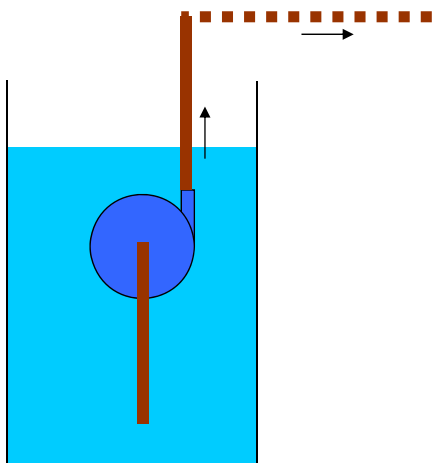
Variaciones en el nivel dinámico del agua mediante bombeos de prueba

**Cavitación (XVII):**

Al parar una bomba sumergida:

- El agua de la tubería vertical tiende a caer al pozo
- El agua de la tubería horizontal tiende a seguir fluyendo

Se crea un vacío en la tubería vertical



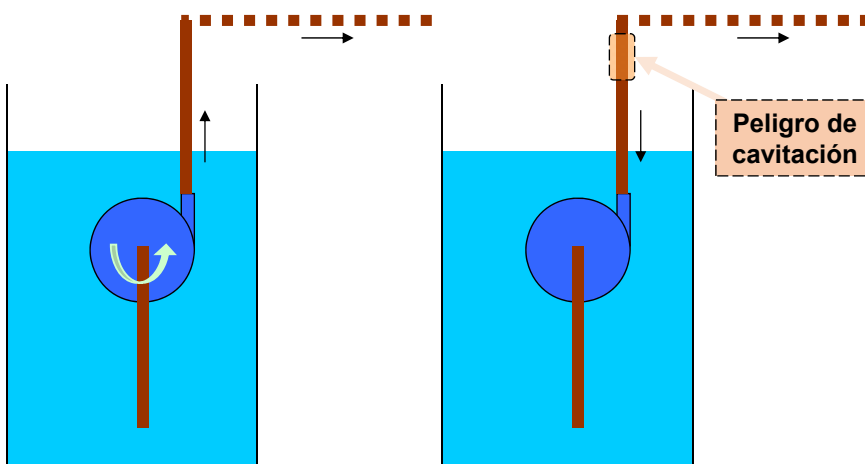
43

**Cavitación (XVII):**

Al parar una bomba sumergida:

- El agua de la tubería vertical tiende a caer al pozo
- El agua de la tubería horizontal tiende a seguir fluyendo

Se crea un vacío en la tubería vertical



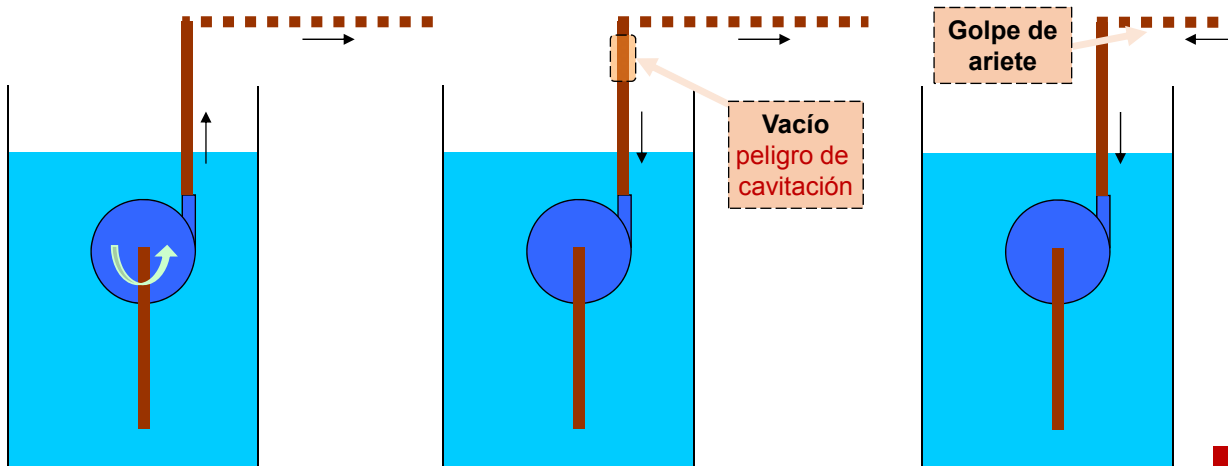
44

**Cavitación (XVII):**

Al parar una bomba sumergida:

- El agua de la tubería vertical tiende a caer al pozo
- El agua de la tubería horizontal tiende a seguir fluyendo

Se crea un vacío en la tubería vertical



45

**Cavitación (XVIII):**

Los ensayo se realizan con modelos a escala reducida

Se define el coeficiente de cavitación o índice Thoma,  $\sigma$ :

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

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

46

**Cavitación (XIX):**

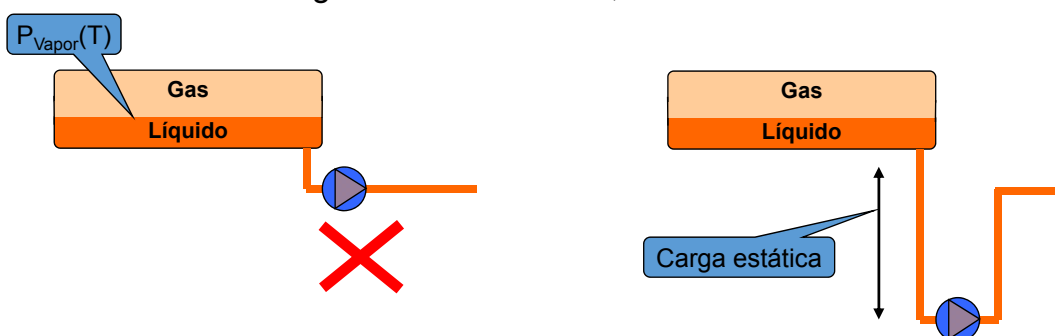
Situación especialmente problemática se produce en el caso de:

- Bombeos 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, ...



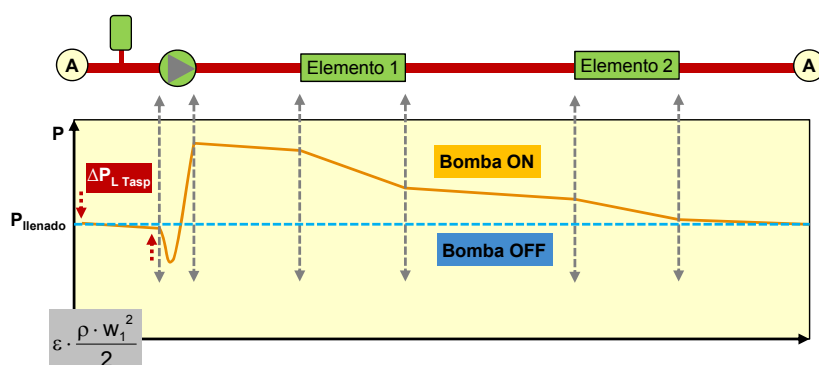
**Cavitación (XX):**

**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:

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

$\varepsilon$  parámetro adimensional que depende de la bomba

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



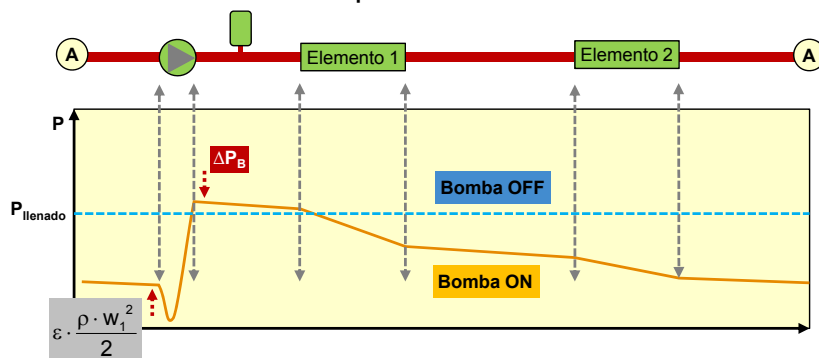
**Cavitación (XXI):**

**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

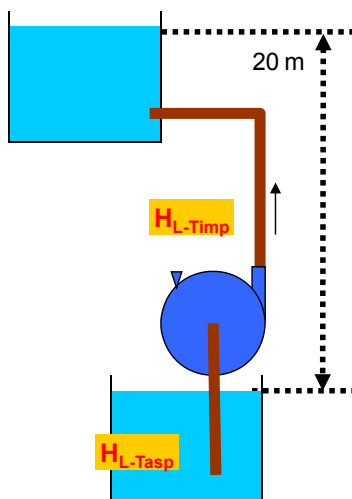
La presión mínima es:

$$P_{\min} = P_{\text{inicial}} - \Delta P_{\text{Bomba}} - \varepsilon \cdot \frac{\rho \cdot w_1^2}{2}$$

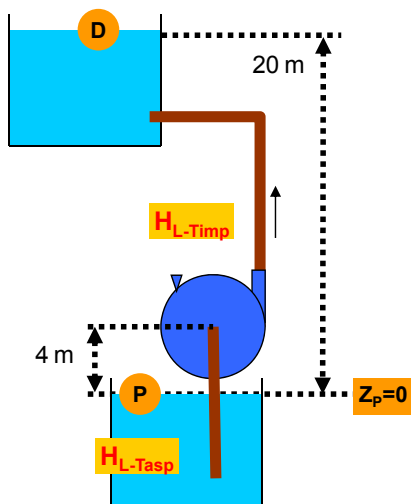
$\varepsilon$  parámetro adimensional que depende de la bomba

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

Una bomba centrífuga extrae agua de un pozo y lo eleva a un depósito situado en una cota de 20 m. La tubería de aspiración tiene una longitud equivalente de 20 m y es de diámetro 300 mm. La de impulsión tiene una longitud equivalente de 150 m y es de diámetro 250 mm. La bomba posee un  $\eta_{\text{man}}$  del 70%, siendo el  $\eta_{\text{vol}}$  de 1 y el  $\eta_{\text{mec}}$  85%. Si el caudal bombeado es 4.800 l/min calcular la potencia que debe entregar el motor eléctrico. El factor de fricción es de 0,02



Una bomba centrífuga extrae agua de un pozo y lo eleva a un depósito situado en una cota de 20 m. La tubería de aspiración tiene una longitud equivalente de 20 m y es de diámetro 300 mm. La de impulsión tiene una longitud equivalente de 150 m y es de diámetro 250 mm. La bomba posee un  $\eta_{man}$  del 70%, siendo el  $\eta_{vol}$  de 1 y el  $\eta_{mec}$  85%. Si el caudal bombeado es 4.800 l/min calcular la potencia que debe entregar el motor eléctrico. El factor de fricción es de 0,02



Calcular el  $NPSH_D$  si  $p_{sat} = 0,02337$  bar (20°C) y el eje de bomba se eleva 4 m sobre el nivel del pozo, y el  $NPSH_R$  que debe tener la bomba

51

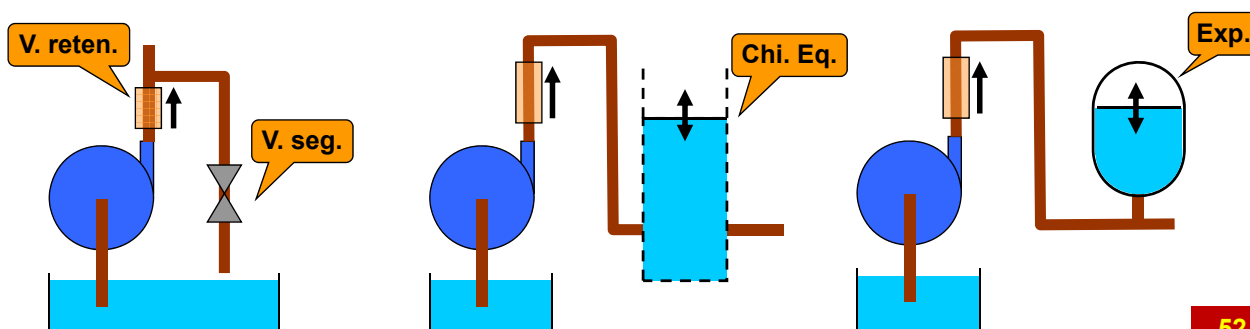
### Golpe de Ariete:

Se puede producir por:

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

Se puede limitar con:

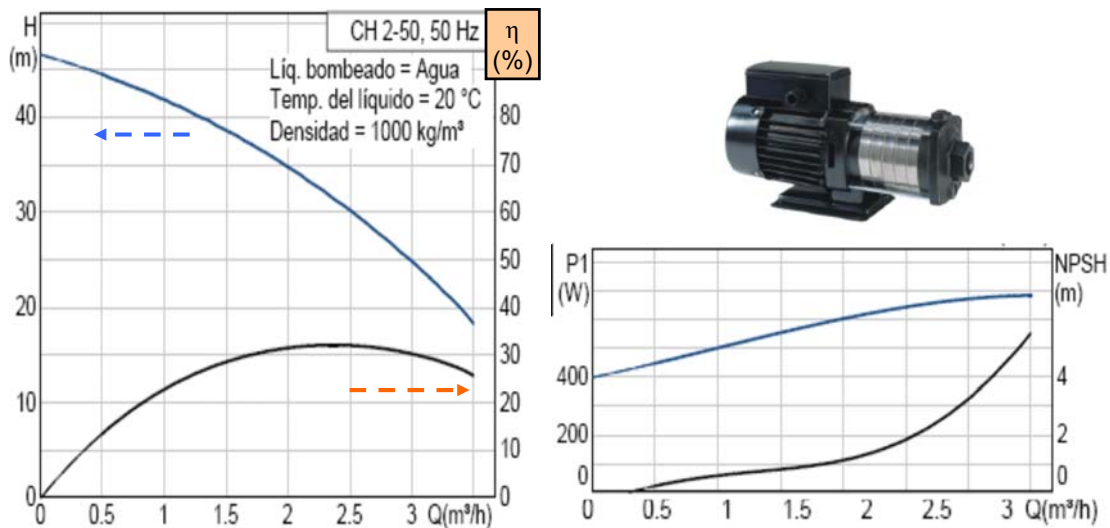
- Cierre lento en la válvula de impulsión antes de parar la bomba
- Instalando válvulas de seguridad, chimeneas de equilibrio, válvulas de retención, ...



52

**Catálogos de Fabricantes (I)**

Ej: Grundfos

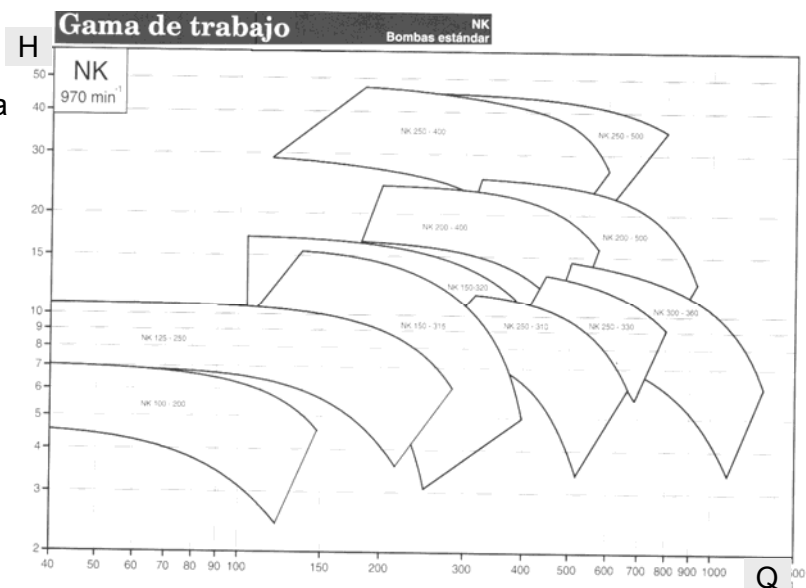


**Catálogos de Fabricantes (II)**

Ej: Grundfos

**Familia de bombas**

- Gráfico de selección rápida



Catálogos de Fabricantes (III)

Ej: Grundfos

Familia de bombas

- Gráfico de selección rápida
- Gráfico de selección

