

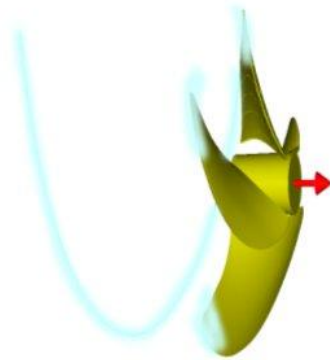
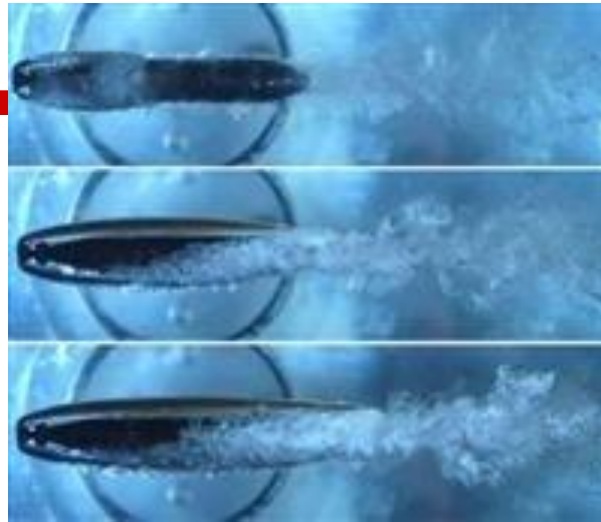
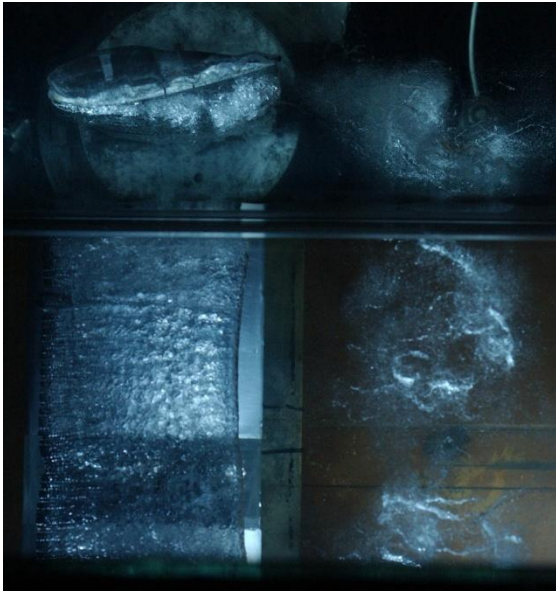
INTRODUCCIÓN A LAS MÁQUINAS HIDRÁULICAS

Prof. Jesús DE ANDRADE

Prof. Miguel ASUAJE

Enero 2009

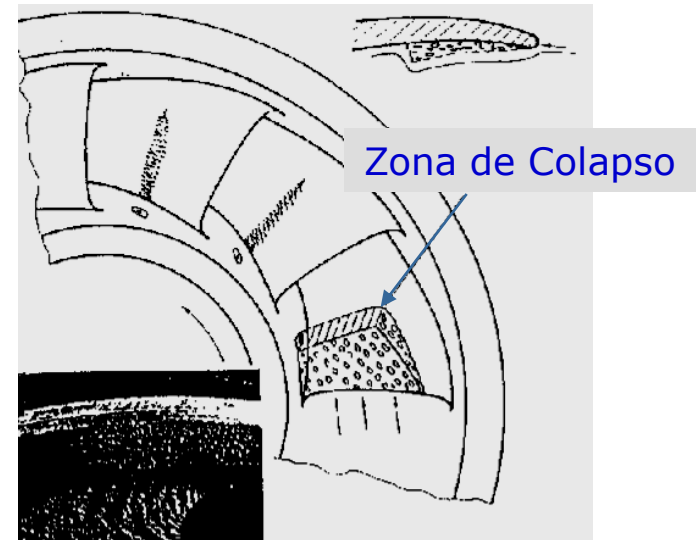
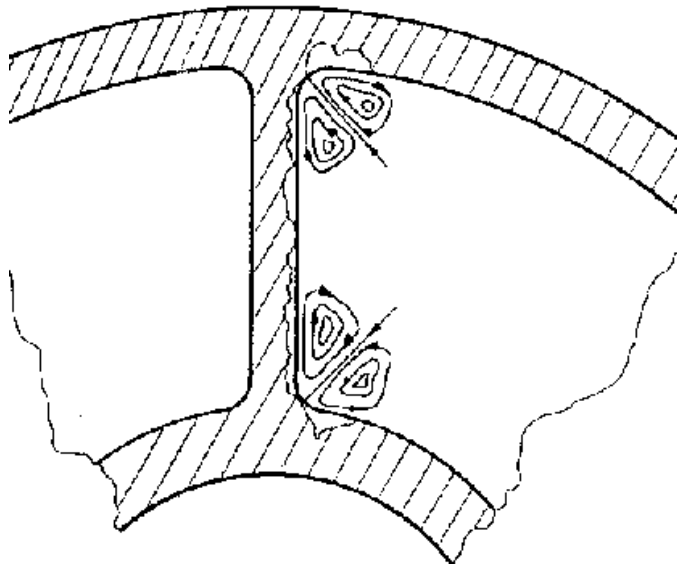
CAVITACIÓN



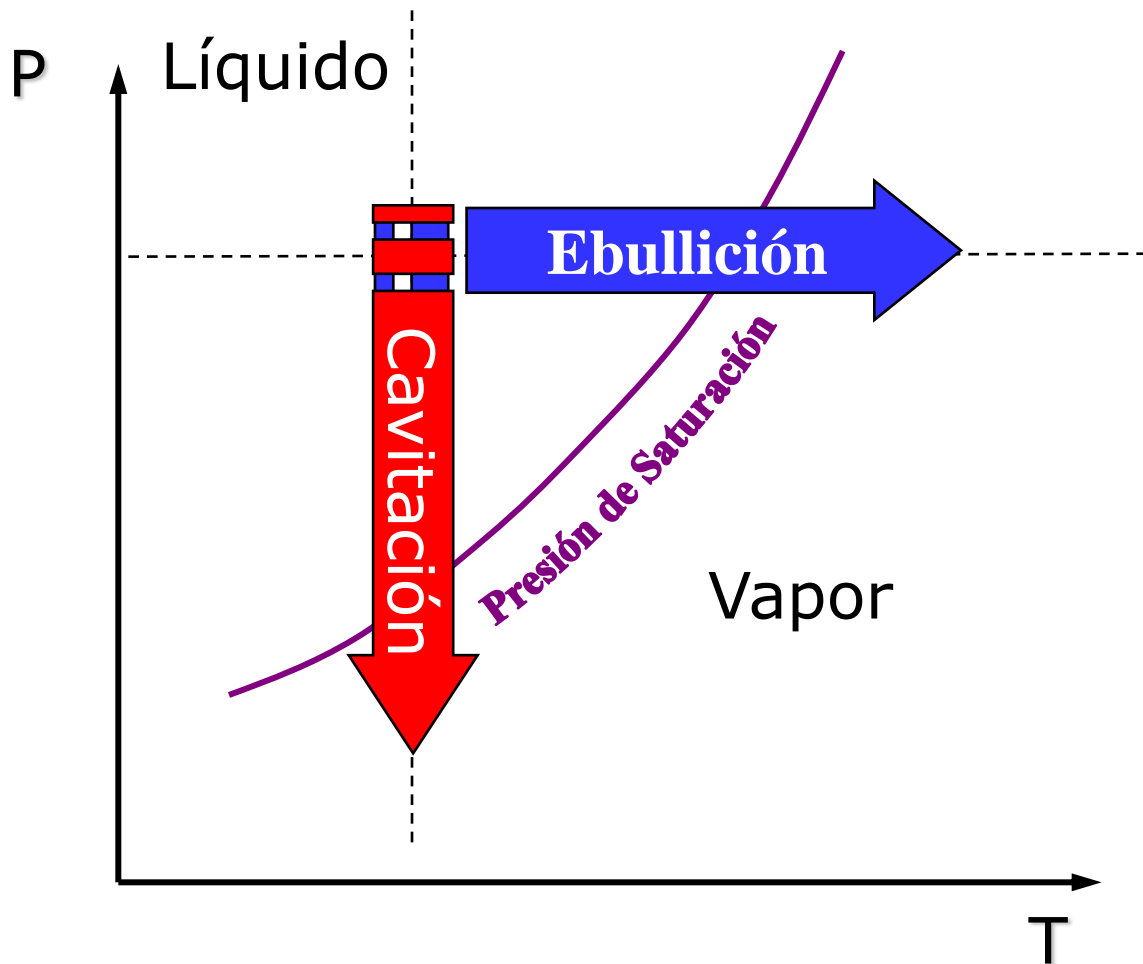
Definición Cavitación

Cavitación

Fenómeno que ocurre en una corriente de un fluido al disminuir la presión en un punto de la misma por debajo de la presión de vaporización " P_v ", **produciéndose burbujas de vapor** (cavidades), las cuales al llegar a una zona aguas abajo, donde la presión sea superior a la P_v , **implotan**, ocasionando la erosión de las paredes del ducto en contacto con esta zona.



Cavitación



Cavitación

¿Por qué se produce Cavitación?

- La presión sobre la superficie del líquido disminuye hasta ser igual o inferior a su presión de vapor (a la temperatura actual)
- La temperatura del líquido sube hasta hacer que la presión de vapor sobrepase a la presión sobre la superficie de líquido

Las burbujas de vapor se forman dentro de la bomba cuando la presión estática en algún punto baja a un valor igual o menor que la presión de vapor del líquido

Factores que Afectan la Aparición de Cavitación

- **Temperatura del Fluido**
 - **Contenido de Gases Disueltos**
 - **Naturaleza del Fluido (contenido de sólidos en suspensión)**
- Nucleación de Burbujas**

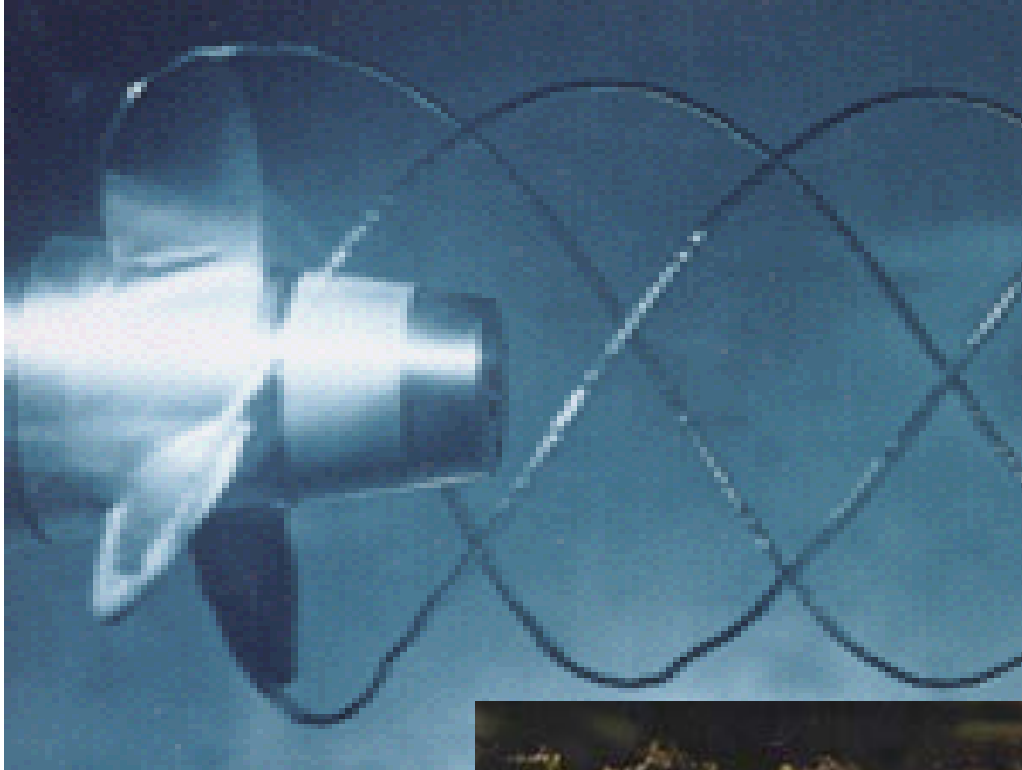
Cavitación

Dos condiciones en las que la presión de la bomba puede bajar hasta un nivel inferior al presión de vapor:

1. Porque la caída de presión actual en el sistema externo de succión es mayor que la que se consideró durante el diseño del sistema. (Es una situación bastante corriente). Esto resulta en que la **presión disponible** en la succión de la bomba (NPSHd) no es suficientemente alta para suministrar la energía **requerida** para superar la caída de presión interna (NPSHr) propia del diseño de la bomba.
2. Porque la caída de presión actual dentro de la bomba (NPSHr) es más grande que la informada por el fabricante y que se usó para seleccionar la bomba.

Consecuencia de la cavitación





Cavitación

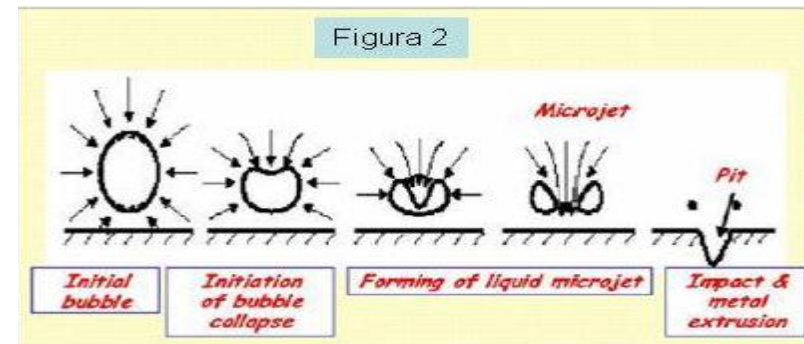
Etapas de la Cavitación

Formación de burbujas dentro del líquido

Crecimiento de las burbujas

Colapso de las burbujas

cavitación



Cavitación

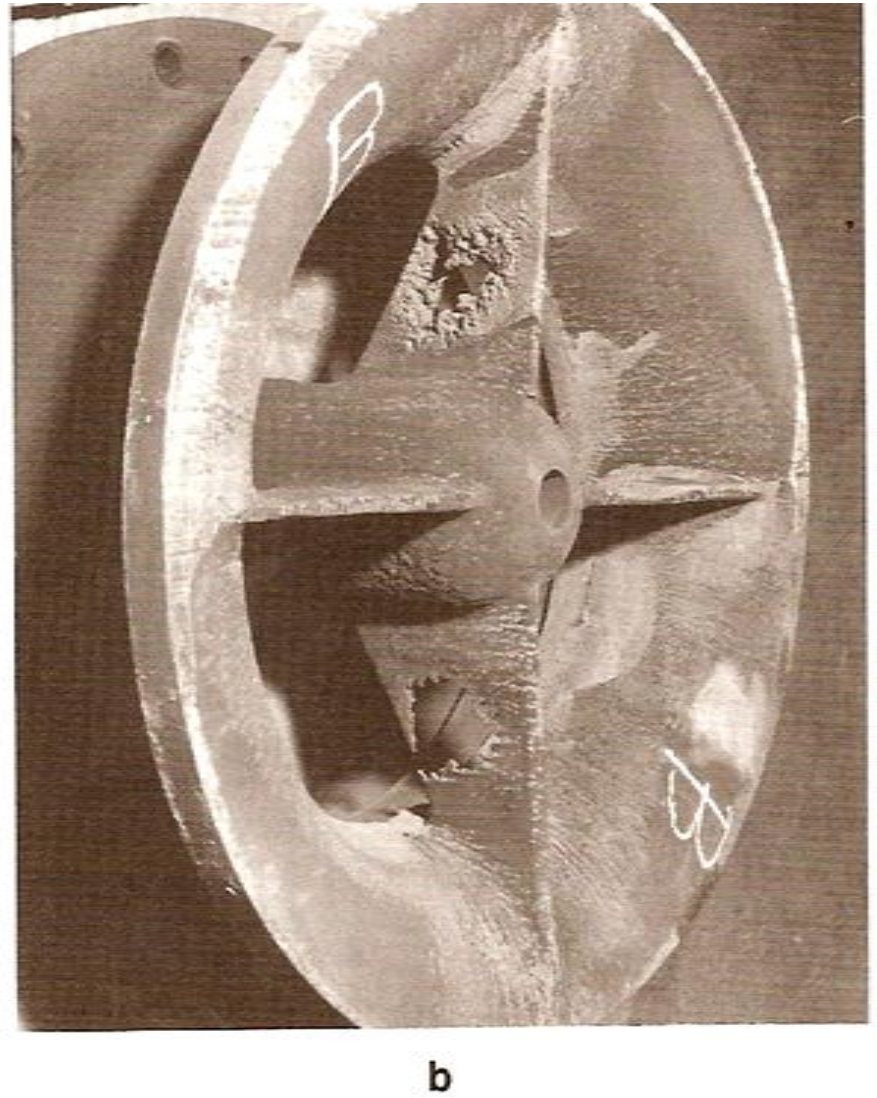
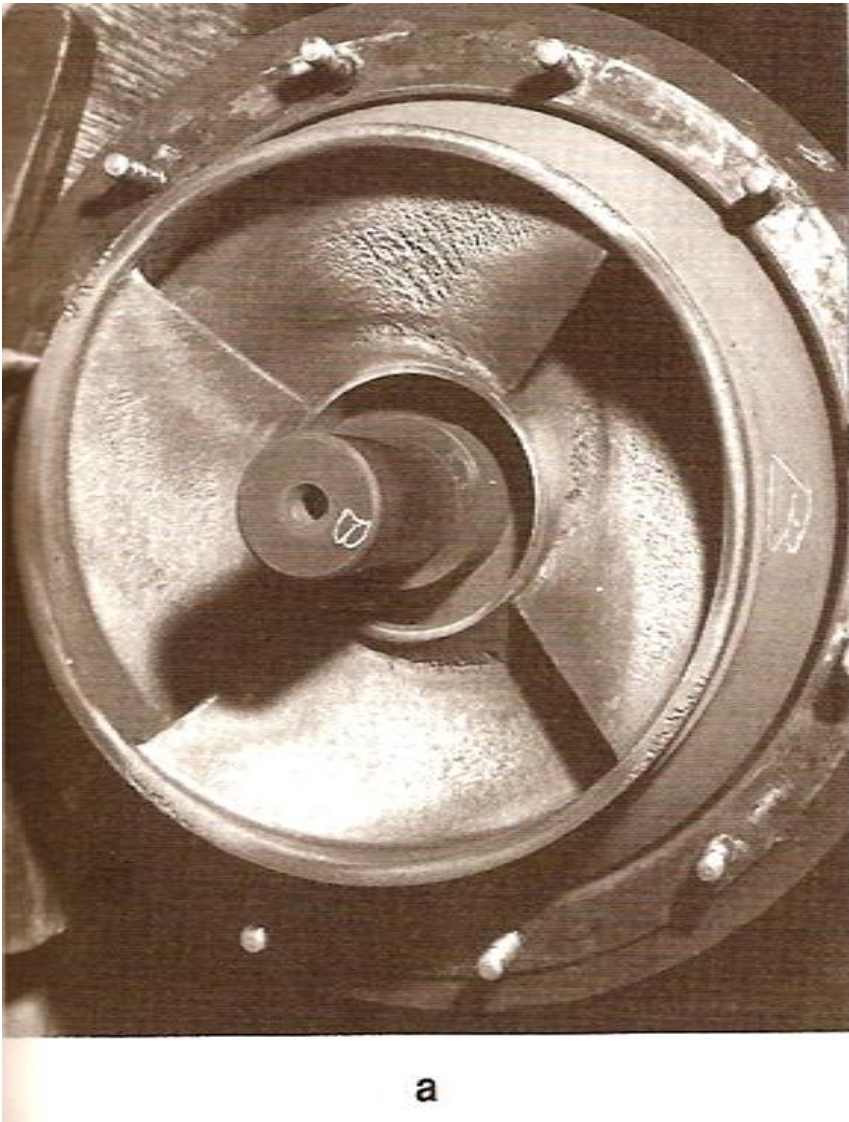
Dos tipo de burbujas:

Burbujas de vapor: se forman debido a la vaporización del líquido bombeado. La cavitación inducida por la formación y colapso de estas burbujas se conoce como **Cavitación Vaporosa.**

Burbujas de gas: se forman por la presencia de gases disueltos en el líquido bombeado (generalmente aire pero puede ser cualquier gas presente en el sistema). La cavitación inducida por la formación y colapso de estas burbujas se conoce como **Cavitación Gaseosa.**

DAÑOS POR CAVITACIÓN





Daños por cavitación en una bomba vertical. a) Impulsor, b) Campana de succión

Cavitación

Presión de Implosión de las Burbujas

$$P = a \cdot \rho \cdot c \quad \text{donde:}$$

a Velocidad del sonido en el medio [m/s]

c Velocidad de Implosión [m/s]

ρ Densidad del medio [Kgf·s²/m⁴]

$$c = \left(2P_o \frac{\left(\frac{R_o}{R}\right)^3 - 1}{3\rho} \right)^{0.5}$$

Ro radio de la burbuja antes de la implosión [m]

R radio de la burbuja después de la implosión [m]

Po Presión del liquido lejos de la zona de burbujas ~ **NPSH**_{disponible} [Kgf/m²]

Cavitación

Pérdida de Material por Cavitación

$$\frac{V_V}{V_L} = \frac{K_1}{\sigma_{U1}^m} - \frac{K_2}{\sigma_{U10}^m} \longrightarrow \text{Energía Destructiva}$$

V_V Volumen de vapor
 V_L Volumen de liquido
 K_1, K_2 Constantes para determinado material
 σ_{U1} Coeficiente de Cavitación

$$\sigma_{U1} = \text{NPSH} \frac{2g}{U_1^2}$$

U_1 Velocidad periférica a la entrada del rodete.
 σ_{U10} Coeficiente de Cavitación (Sin Burbujas)
 $\sigma_{U10} \sim 1.5$ Teórico ; $\sigma_{U10} \sim 1$ Experimental
 m 6 @ 8 (constante)



Cavitación

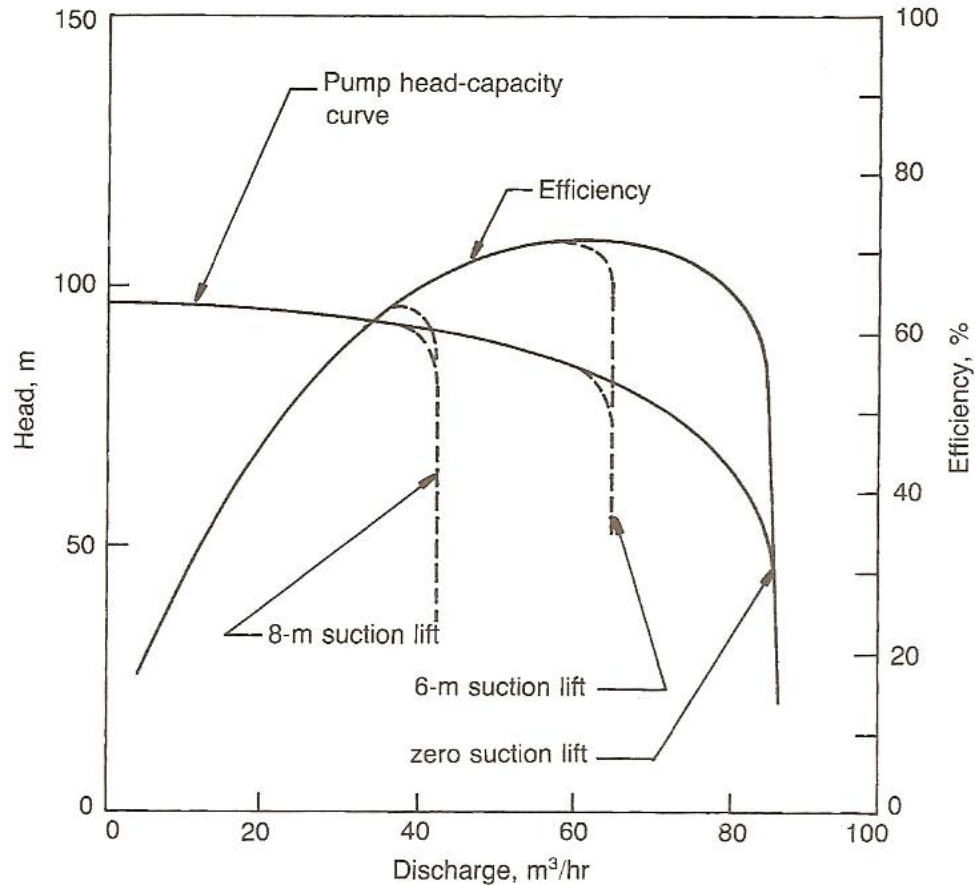
$$\frac{\Delta G}{T} \sim \frac{V_V}{V_L} = \frac{K_1}{\sigma_{U1}^m} - \frac{K_2}{\sigma_{U10}^m}$$

Pérdida de Material
por unidad de
Tiempo [mgr/h]

Variación de la erosión en una B.C. con el
cambio de la Velocidad periférica **U1**

$$\frac{\frac{\Delta G}{T_{n2}}}{\frac{\Delta G}{T_{n1}}} = \left(\frac{U_{12}}{U_{11}}\right)^6$$

La cavitación y el desempeño



Curvas de desempeño en bombas a varias alturas de succión con cavitación.
Note lo rápido que comienza la cavitación

Cavitación

Definiciones Importantes

Presión Estática P:

La presión estática en una corriente de fluido es la fuerza normal por unidad de área actuando sobre un plano o contorno sólido en un punto dado. Describe la diferencia de presión entre el interior y el exterior de un sistema, despreciando cualquier movimiento en el líquido. Es una medida de la **energía potencial de un fluido**.

Presión Dinámica Pd:

Es la presión ejercida por la energía cinética de un fluido ($mv^2/2$). Es decir, es la presión que existiría en una corriente de fluido que ha sido desacelerada desde su velocidad "v" a velocidad "cero".

Presión Total Pt ó de Estancamiento Po:

Es la suma de la presión estática más la dinámica.

$$P_o = P_s + \frac{\rho V^2}{2}$$

Cavitación – Net Positive Suction Head (NPSH)

Definición

$$\text{NPSH} = H_{\text{pts}} - \frac{P_v}{\gamma}$$

Altura de Presión
Total a la entrada
de la bomba

Referida a la
presión de vapor

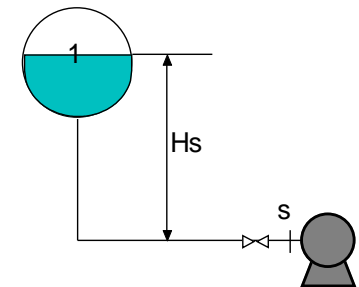
$$H_{\text{pts}} = \frac{P_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g}$$

Altura de presión
absoluta en la
brida de succión

Altura de presión
absoluta en la
brida de succión

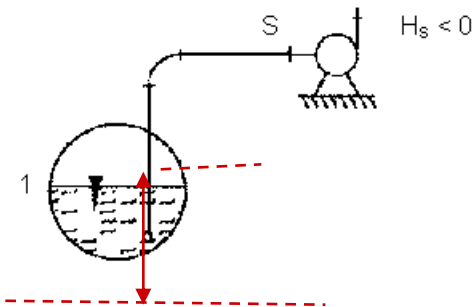
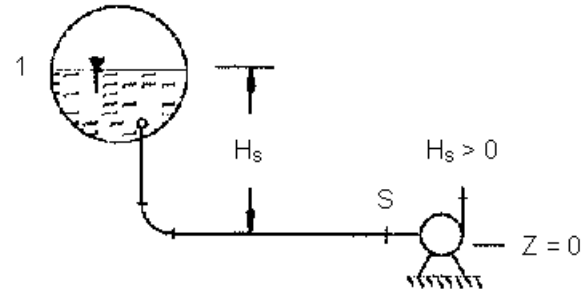
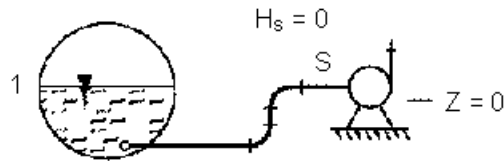
Zs Altura geodésica en la brida de succión → 0 (bomba eje horizontal)

$$\text{NPSH} = \frac{P_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma}$$



Cavitación – NPSH_{disponible}

Altura de Succión:



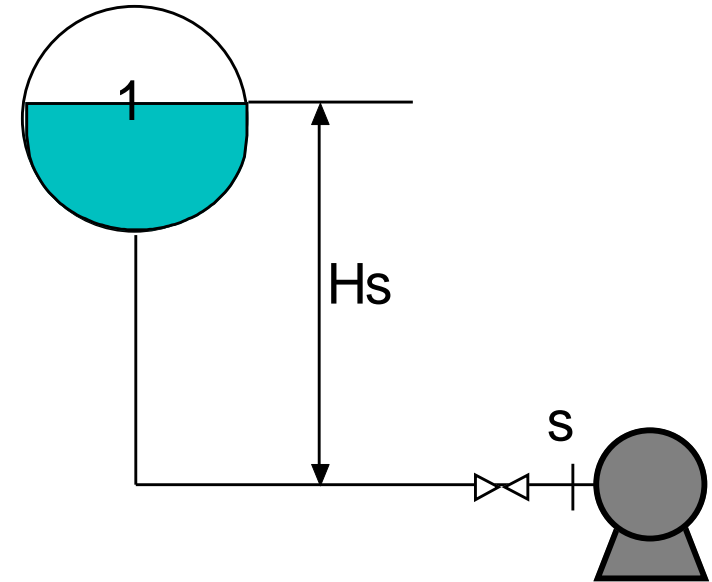
Cavitación – NPSH_{disponible}

Bernoulli entre 1 y s:

Sumatoria de pérdidas
en la tubería de succión

$$1 \quad \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} + z_s + \sum hf_{1s}$$

$$2 \quad \text{NPSH} = \frac{P_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma}$$

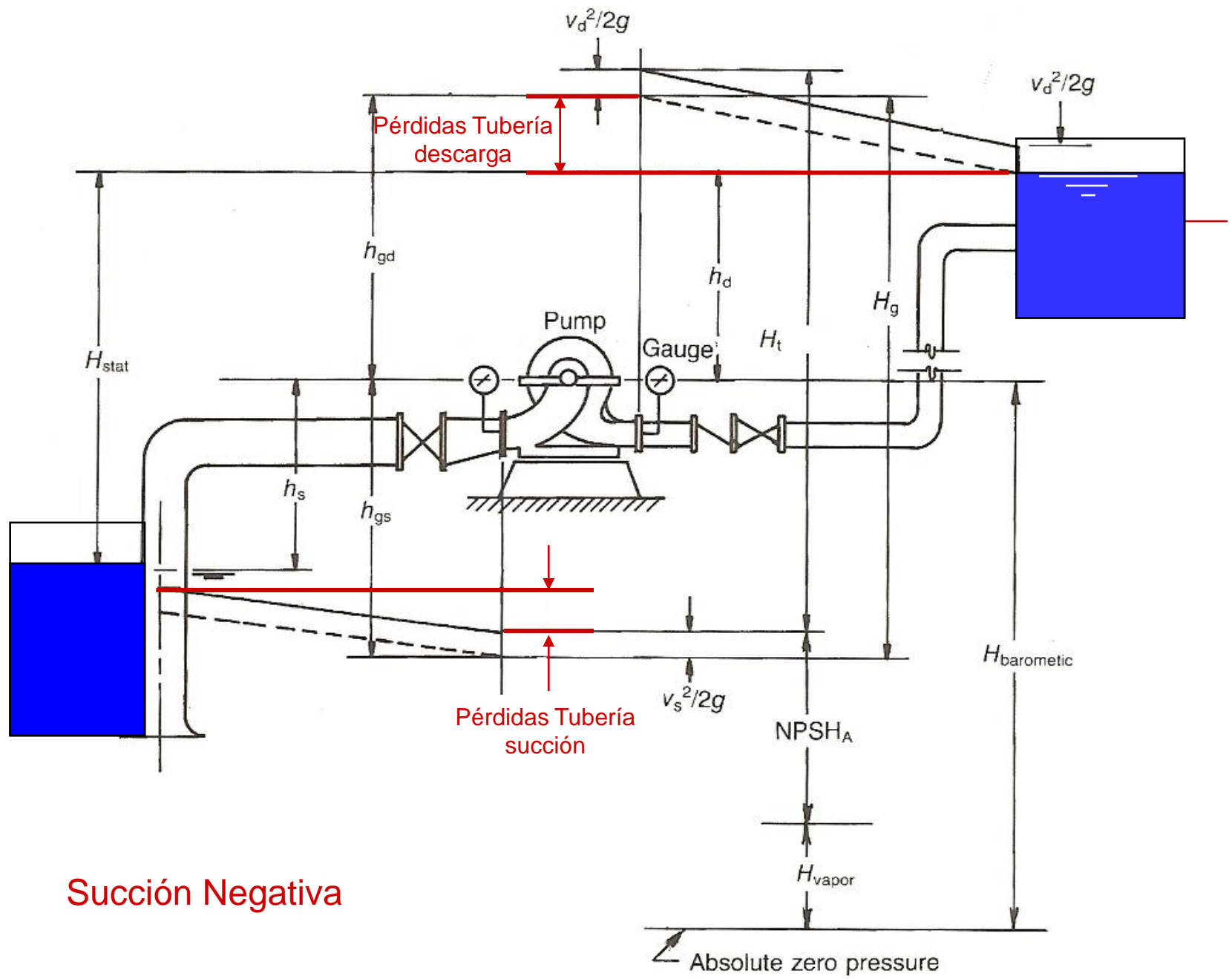


Con 1 y 2:

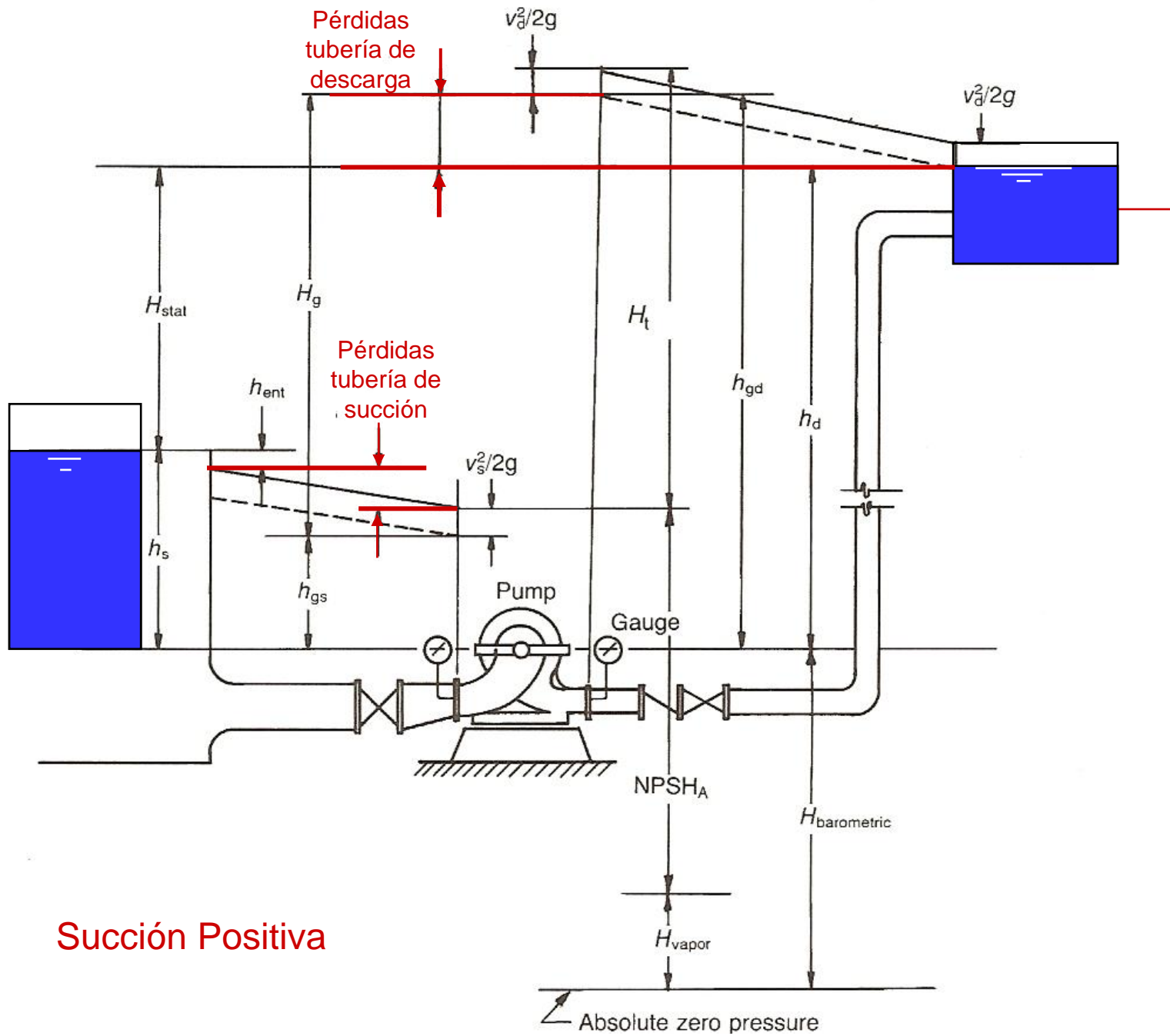
$$\text{NPSH}_d = \frac{P_1 - P_v}{\gamma} + z_1 - z_s - \sum hf_{1s}$$

$$H_s = z_1 - z_s$$

$$\text{NPSH}_d = \frac{P_1}{\gamma} + H_s - \frac{P_v}{\gamma} - \sum hf_{1s}$$



Succión Negativa



Cavitación - $NPSH_{requerido}$

$$NPSH_r = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma}$$

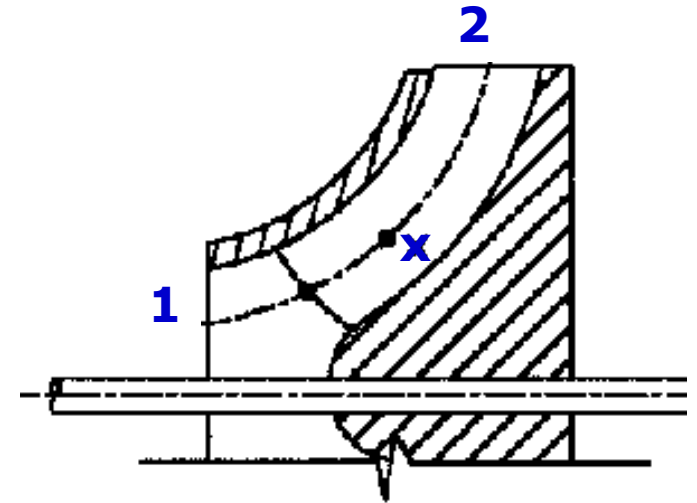
$E_{r1} = E_{rx} + \Sigma hf_{1x}$ Ec. Bernoulli Mov. Relativo

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{W_1^2}{2g} - \frac{U_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_x}{\gamma} + \frac{W_x^2}{2g} - \frac{U_x^2}{2g} + z_x + \Sigma hf_{1x}$$

Si... $\frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_x}{\gamma}$ y $\frac{P_v}{\gamma} \approx 0$

Se tiene que

$$NPSH_r = \frac{V_1^2}{2g} + \frac{W_x^2 - W_1^2}{2g} + \frac{U_1^2 - U_x^2}{2g} + z_x + z_1 + \Sigma hf_{1x}$$



Cavitación - NPSH_{requerido}

Se puede decir que:

$$\frac{W_X^2 - W_1^2}{2g} + \frac{U_1^2 - U_X^2}{2g} + z_X + z_1 \sim 0$$

Las pérdidas son: $\sum hf_{1X} = \lambda \frac{W_1^2}{2g}$

Define el
comienzo
teórico de la
cavitación

$$\text{NPSH}_r = \frac{V_1^2}{2g} + \lambda \frac{W_1^2}{2g}$$

Existen fórmulas
empíricas muy
utilizadas. *i.e.*:
Stepanoff, Sulzer

Cómo Evitar Cavitación

Se debe cumplir, sin excepción, las siguientes condiciones:

a.- $NPSH_d > 0$

b.- $NPSH_d > NPSH_r$

c.- $NPSH_d / NPSH_r \geq F_s \quad (1,3 - 1,5)$

d.- $M = NPSH_d - NPSH_r \geq 1 \text{ m } \text{ó} \text{ 3 pies} \quad (\text{Según norma})$

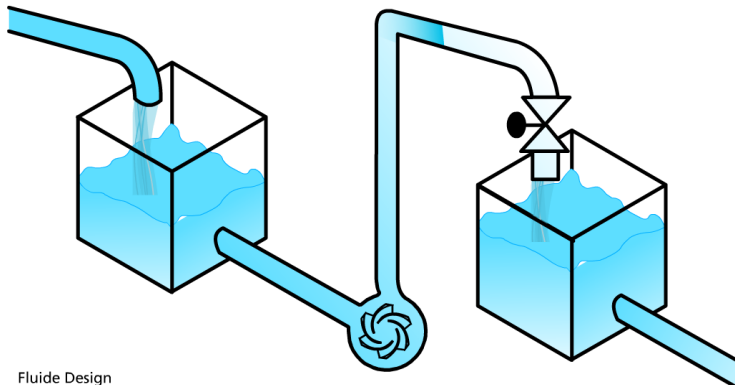
El nivel del tanque de succión respecto a la bomba **Hs** debe seleccionarse de manera que se cumplan "c" y "d"

Control de la aparición de Cavitación

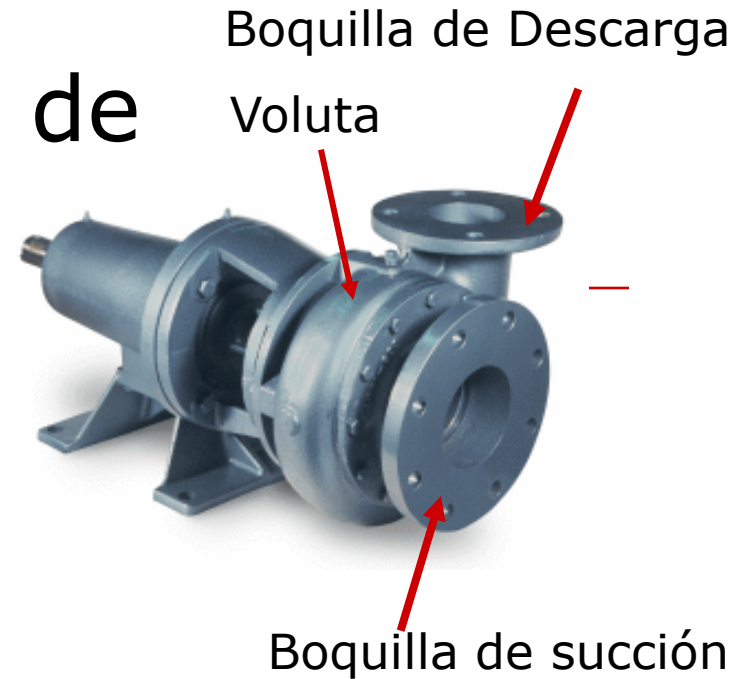
- Disminuir V_s (aumentar diámetro succión)
- Aumentar P_1
- Aumentar H_s
- Disminuir

$$\sum hf_{1s}$$

- Disminuir en lo posible la longitud de la tubería de Succión
- Disminuir el número de accesorios
- Disminuir el número de codos y aumentar la curvatura de los mismos



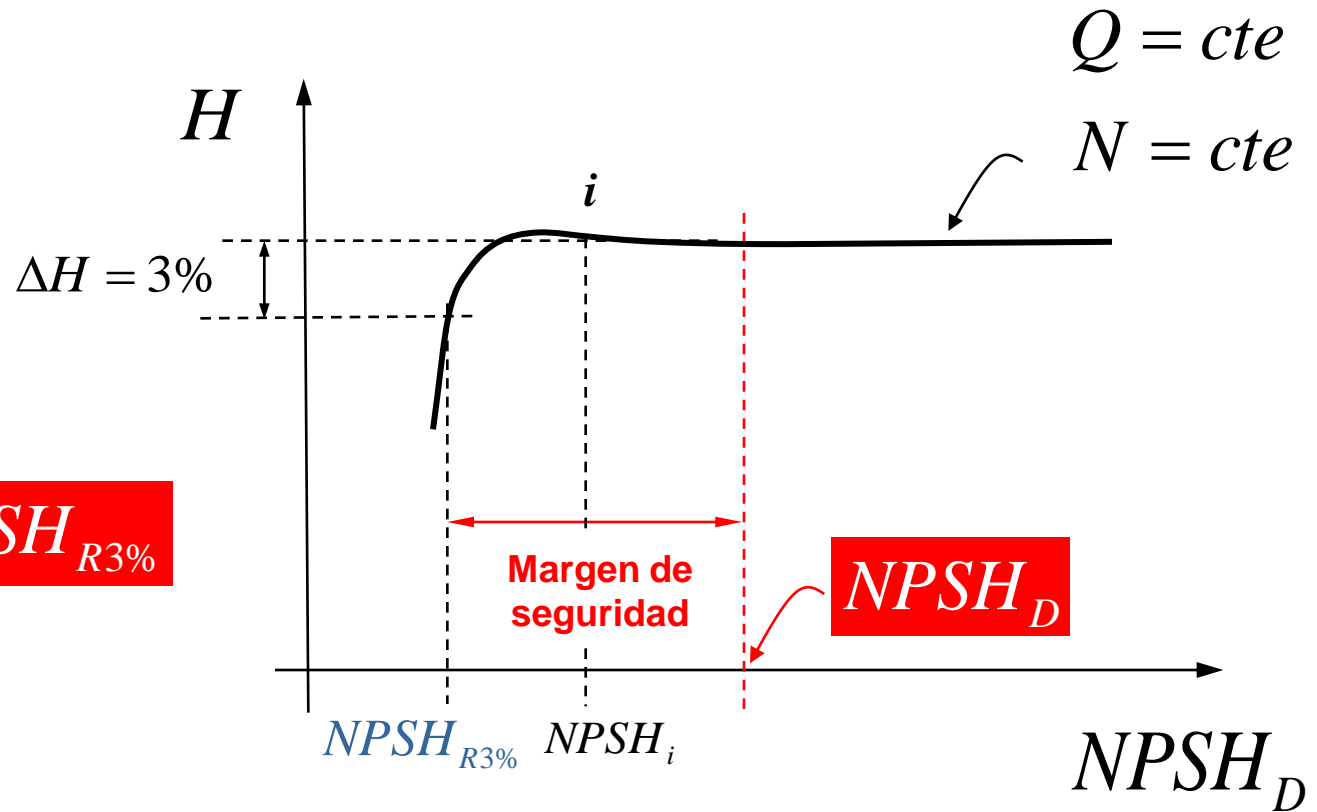
Fluide Design



$$NPSH_d = \frac{P_1}{\gamma} + H_s - \frac{P_v}{\gamma} - \sum hf_{1s}$$

Ensayo de Cavitación

Definición del $NPSH_{R3\%}$ de la bomba

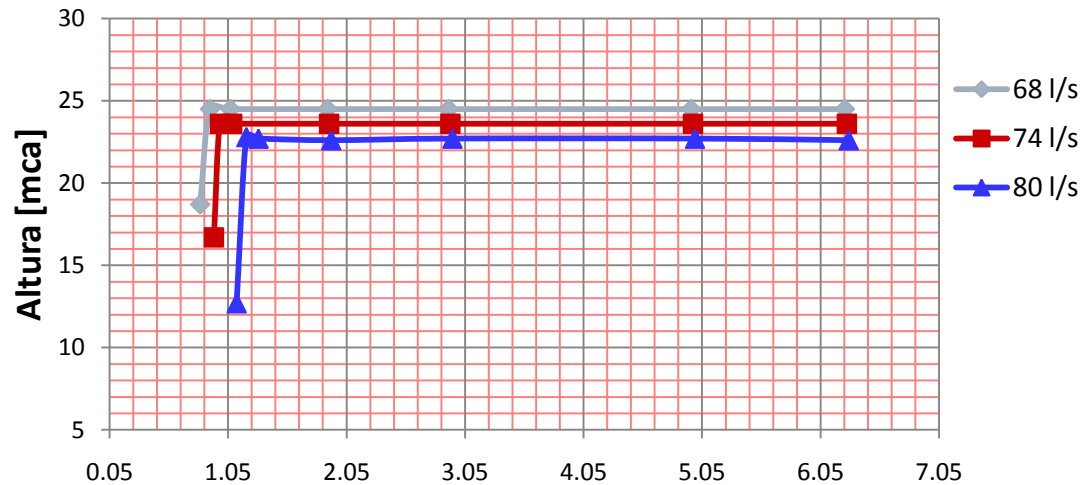


$$NPSH_D = F_S \cdot NPSH_{R3\%}$$

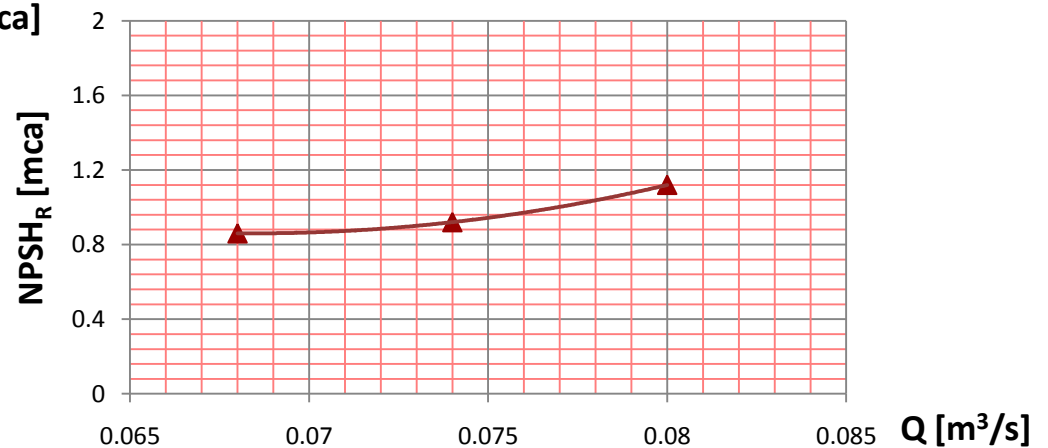
Factor de seguridad:
 $F_S = 1,3 \dots 1,5$

Ensayo de Cavitación

■ ALTURA VS NPSH_D

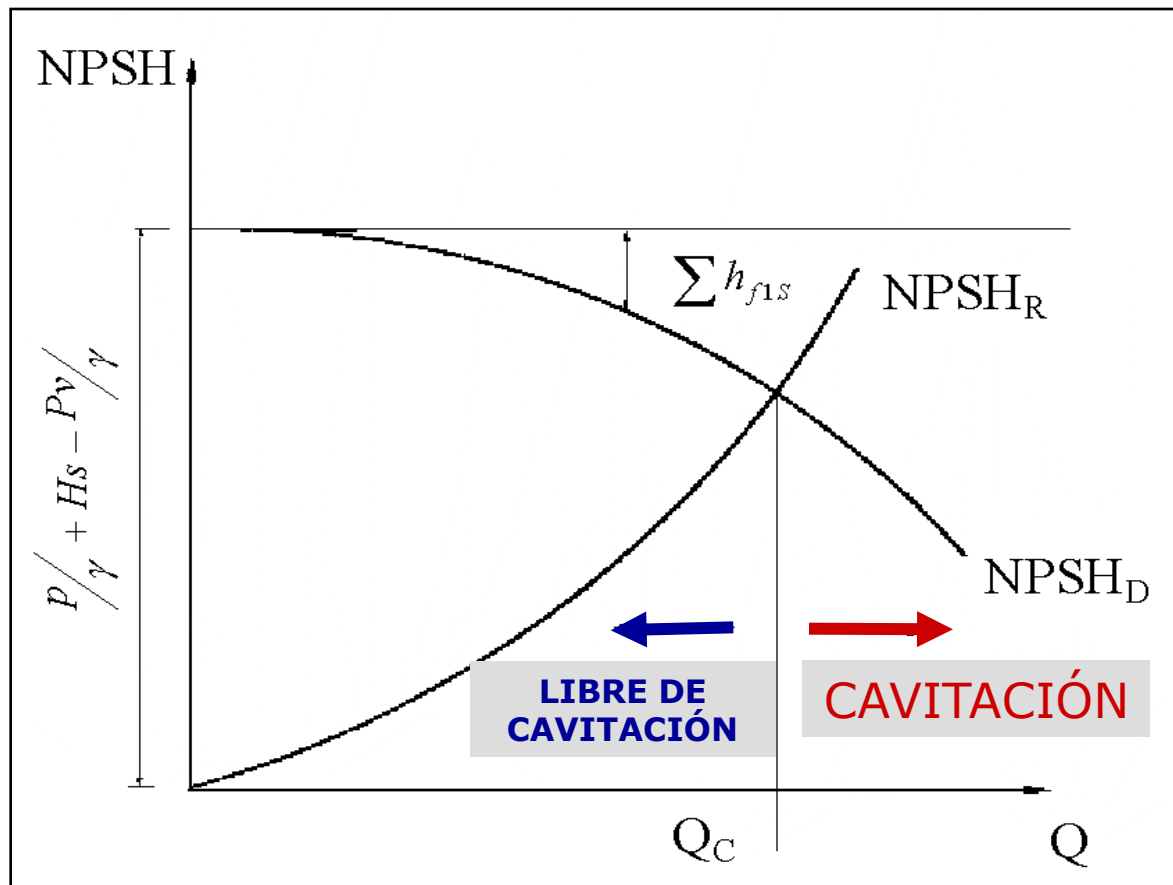


■ NPSH_R VS CAUDAL



Se obtiene

Curvas Características en el Análisis de Reg. Cavitacional

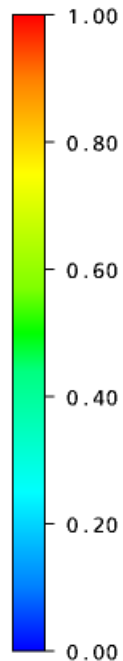
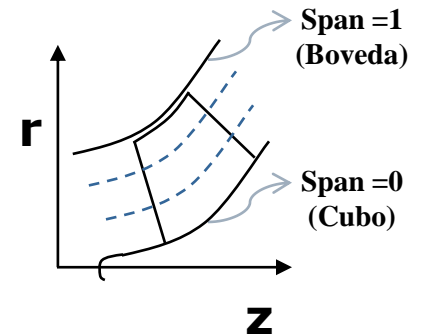


Evaluación vía DFC

Régimen Cavitacional

■ DISTRIBUCIÓN DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DEL VAPOR

Fracción Vol. Vapor de Agua
(Plano Rotacional)



Span 0.1



Span 0.5



Span 0.9



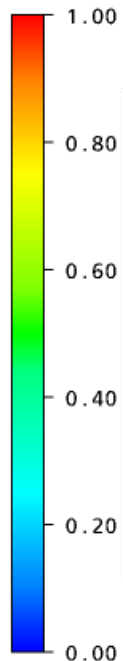
$P_s = 30,0 \text{ kPa}$
($NPSH_d = 2,8 \text{ m}$)

$Q = 80 \text{ l/s}$
 $n = 1000 \text{ rpm}$

Evaluación vía DFC Régimen Cavitacional

- DISTRIBUCIÓN DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DEL VAPOR

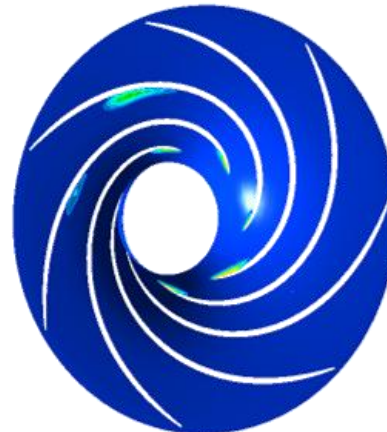
Fracción Vol. Vapor de Agua
(Plano Rotacional)



Span 0.1

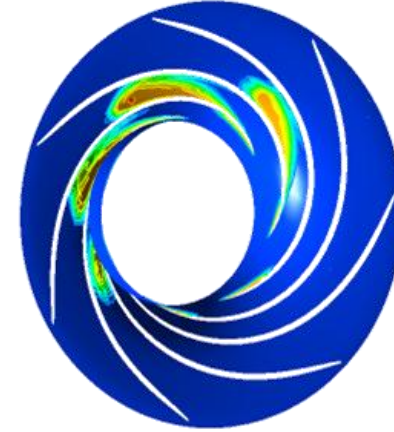


Span 0.5

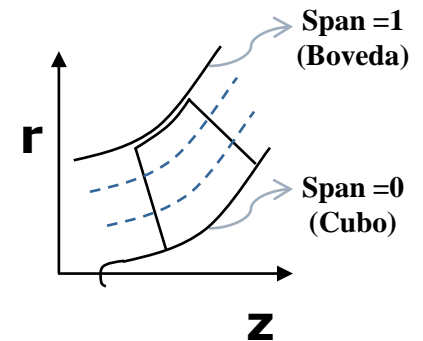


$P_s = 20,0$ kPa
($NPSH_d = 1,8$ m)

Span 0.9



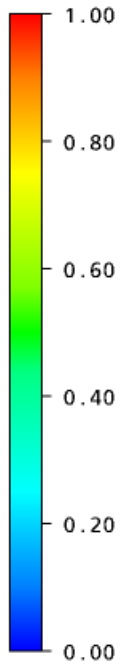
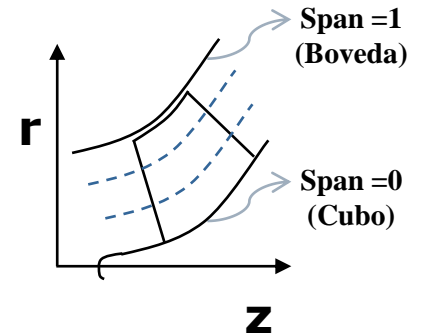
$Q = 80$ l/s
 $n = 1000$ rpm



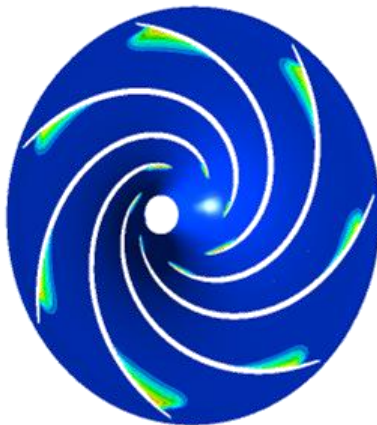
Evaluación vía DFC Régimen Cavitacional

- DISTRIBUCIÓN DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DEL VAPOR

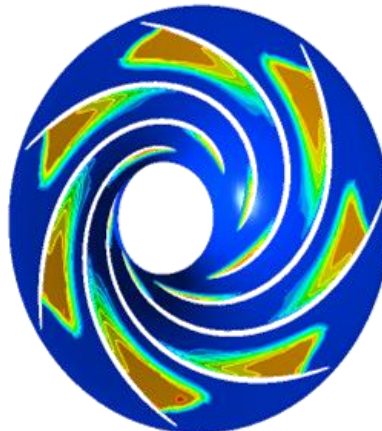
Fracción Vol. Vapor de Agua
(Plano Rotacional)



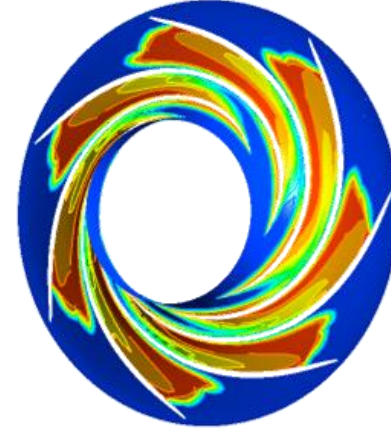
Span 0.1



Span 0.5



Span 0.9



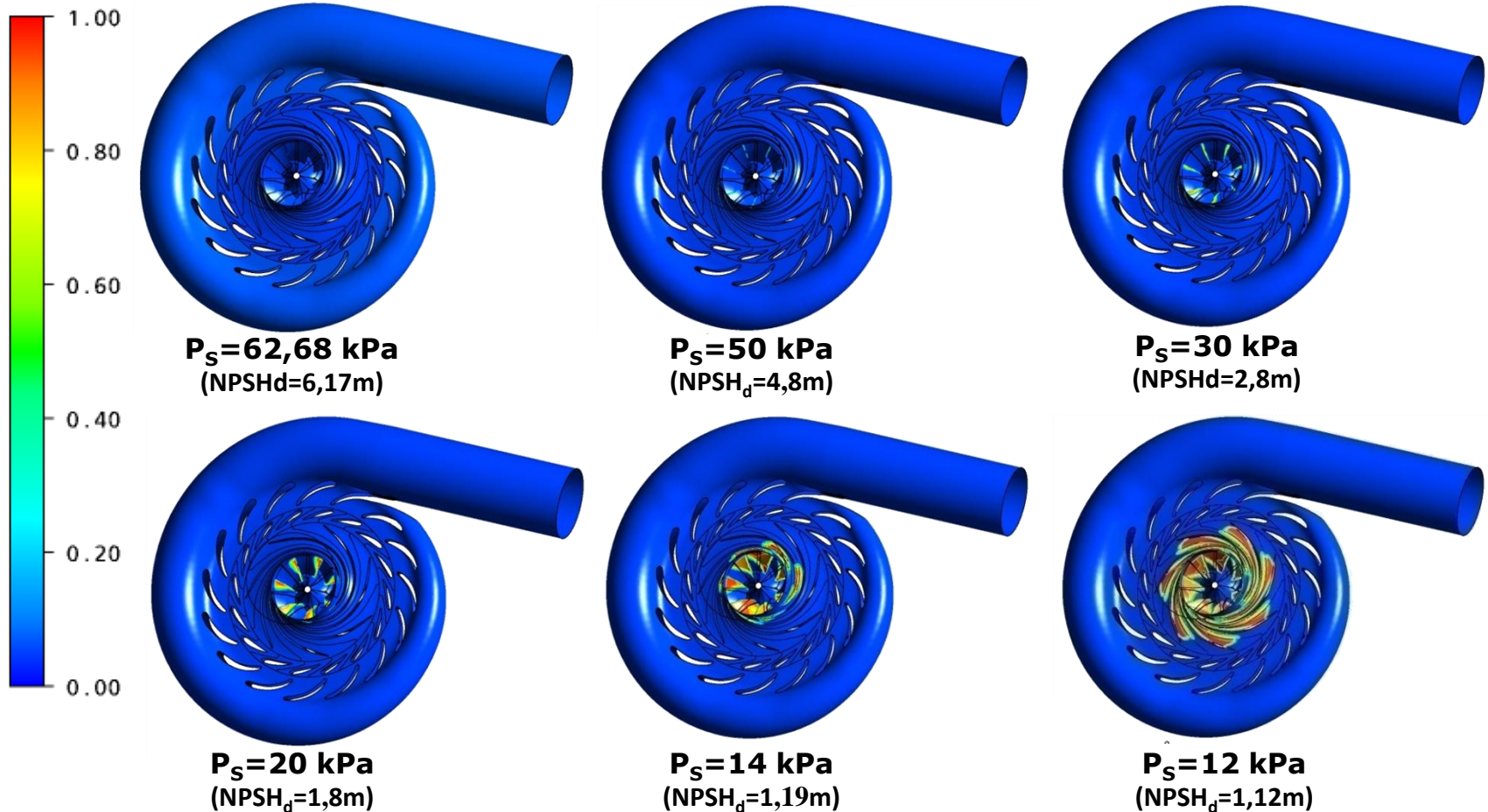
$P_s = 12,2 \text{ kPa}$
($NPSH_d = 1,12 \text{ m}$)

$Q = 80 \text{ l/s}$
 $n = 1000 \text{ rpm}$

Evaluación vía DFC Régimen Cavitacional

Q= 80 l/s
n=1000 rpm

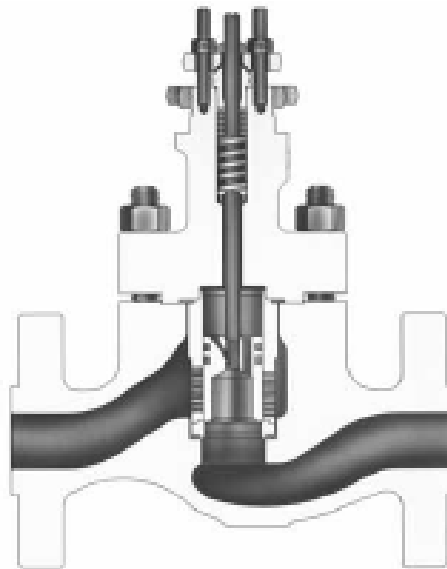
Fracción Vol. Vapor de Agua



Cavitación en Válvulas



Cavitación



Flashing