

Transitorios Hidráulicos en Tuberías a Presión

Curso posgrado y educación permanente
2023

Docentes: Dr. Ing. Rodolfo Pienika rpienika@fing.edu.uy
MSc. Ing. Laura Rovira lrovira@ose.com.uy

Objetivos



Presentar la base conceptual para el estudio de fenómenos transitorios en tuberías a presión, incluyendo:

- el problema del aire atrapado,
- el fenómeno de check slam en las válvulas de retención,
- el diseño y operación de los diferentes dispositivos de control antiarriete

Temario

- Estudio de Transitorios Hidráulicos en Tuberías a Presión
 - Comprensión del fenómeno / repaso conceptos generales.
 - Modelo no estacionario - tubería rígida – fluido incompresible.
 - Modelo no estacionario - tubería elástica - fluido compresible.
 - Modelo sin fricción y modelo con fricción: Método de las características.
 - Ecuación de Joukowski (Allievi).
 - Modelación numérica.
 - Modelación condiciones de frontera.
 - Orígenes del transitorio hidráulico: cierre de válvula, paro de equipos de bombeo, fenómenos rápidos y lentos.

Temario

- ❑ Problemas Originados por Transitorios Hidráulicos
 - Sobrepresiones
 - Depresiones, cavitación y separación de columna líquida
 - Sobrevelocidad de las bombas
 - Clapetazo de las válvulas de retención (check slam)
- ❑ Dispositivos de Protección Anti-Ariete
 - Chimenea de equilibrio
 - Tanque unidireccional
 - Cámaras de aire
 - Válvulas de alivio
 - Volantes de inercia
 - Válvulas de retención / tipos
- ❑ Aire en la Tubería
 - Análisis de sobrepresiones por aire atrapado – Martin – Modelo elástico

Bibliografía

- Fascículos del texto “Transitorios Hidráulicos y su Control” UNAM, 1990, R. Guarga et.al.
- “Transitorios y Oscilaciones en Sistemas Hidráulicos a Presión”, 1^ª ed. 1995, J. M. Abreu, R. Guarga, J. Izquierdo.
- “Fluid Transients in Pipeline Systems”, 2^ª ed. 2004, A.R.D. Thorley.
- “Applied Hydraulic Transients”, 3^ª ed. 2014, M.H. Chaudhry (acceso Timbo).
- Otros artículos.

Evaluación del curso

Trabajo práctico

- Grupo de hasta 2 personas

- Requisitos del sistema de estudio:
 - Tubería a presión, al menos un equipo de bombeo.
 - Largo de tuberías $\geq 1500\text{m}$
 - Diámetro $\geq 250\text{mm}$

Evaluación del curso

Contenido del trabajo (mínimo)

□ Objetivo

- Estudiar los efectos causados por un transitorio hidráulico sobre el sistema.
- Seleccionar y dimensionar los dispositivos de protección anti ariete requeridos.

□ Descripción del sistema de estudio y sus condiciones de operación

1ra ENTREGA...

Evaluación del curso

Contenido del trabajo (mínimo)

- ❑ Causas de Origen de Transitorios Hidráulicos

- ❑ Estudio de Transitorios Hidráulicos
 - Modelación del sistema de estudio.
 - Identificación de los problemas originados por el transitorio hidráulico

2da ENTREGA...

Evaluación del curso

Contenido del trabajo

- ❑ Estudio de diferentes dispositivos de protección antiarriete
- ❑ Selección del dispositivo de protección más adecuado

Pre Entrega Final...

Evaluación del curso

Contenido del trabajo

❑ **Entrega Final:**

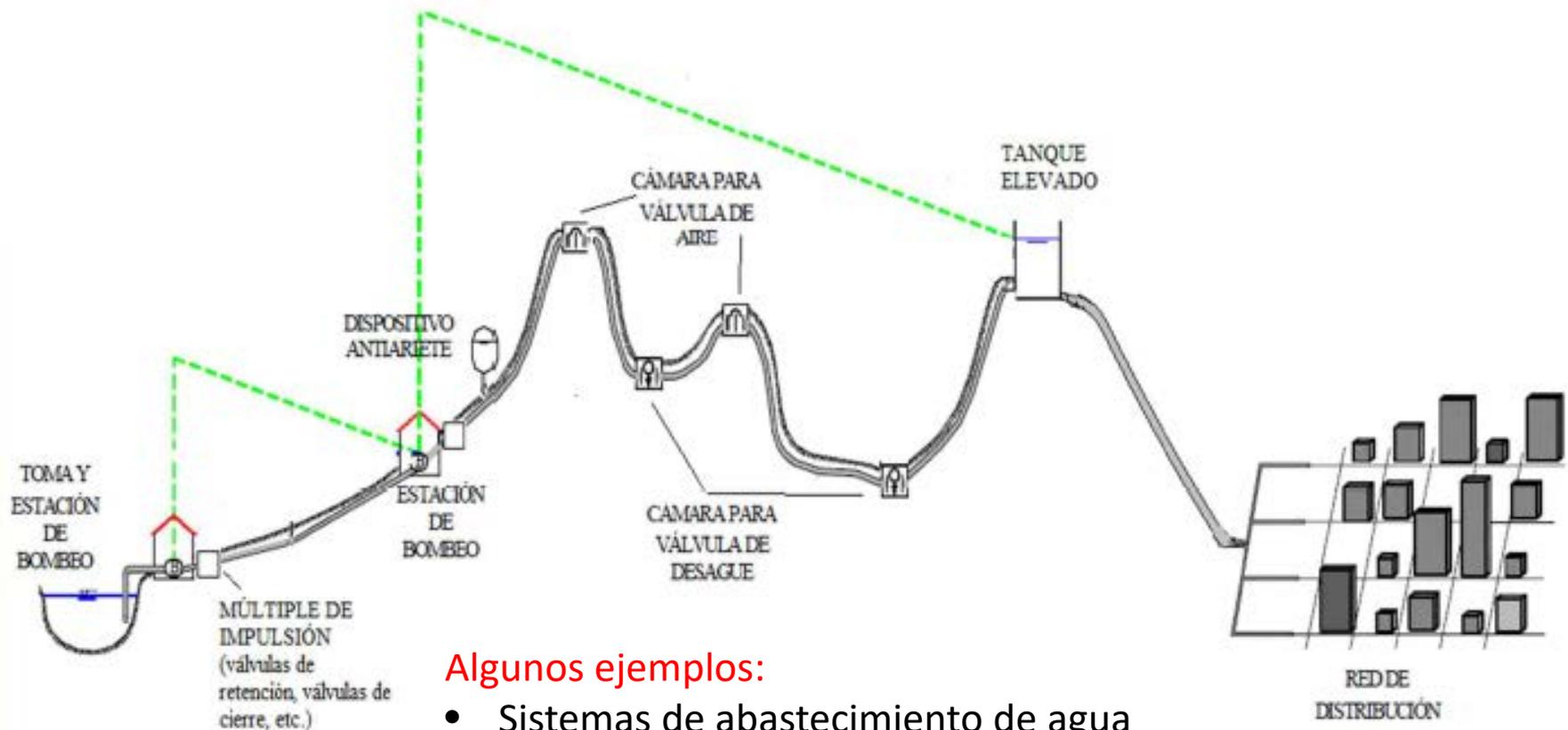
- Informe con el contenido de todo el trabajo en que se describa detalladamente todos los cálculos realizados y se justifiquen los resultados.

Todas las entregas deberán contener las planillas y/o modelos realizados por el estudiante.



Conceptos generales sobre sistemas hidráulicos a presión

Sistemas hidráulicos a presión



Algunos ejemplos:

- Sistemas de abastecimiento de agua
- Sistemas de riego
- Sistemas de conducción de líquidos residuales (siempre que sean a través de tuberías a presión)

Estaciones de bombeo



Flujo estacionario

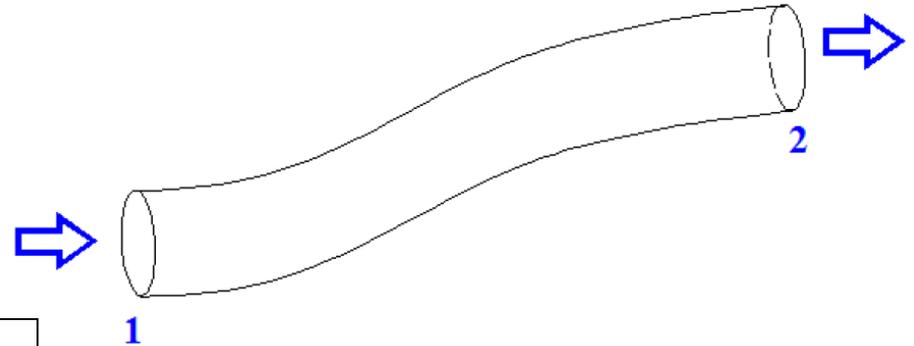
- **Flujo Estacionario:** Las magnitudes no cambian en el tiempo (como presión o velocidad).
- **Diseño de sistemas hidráulicos a presión:** operación en régimen estacionario o cuasi-estacionario

Flujo estacionario

Ecuación de Bernoulli

- Flujo estacionario
- Fluido incompresible y viscoso
- Tubería con paredes rígidas

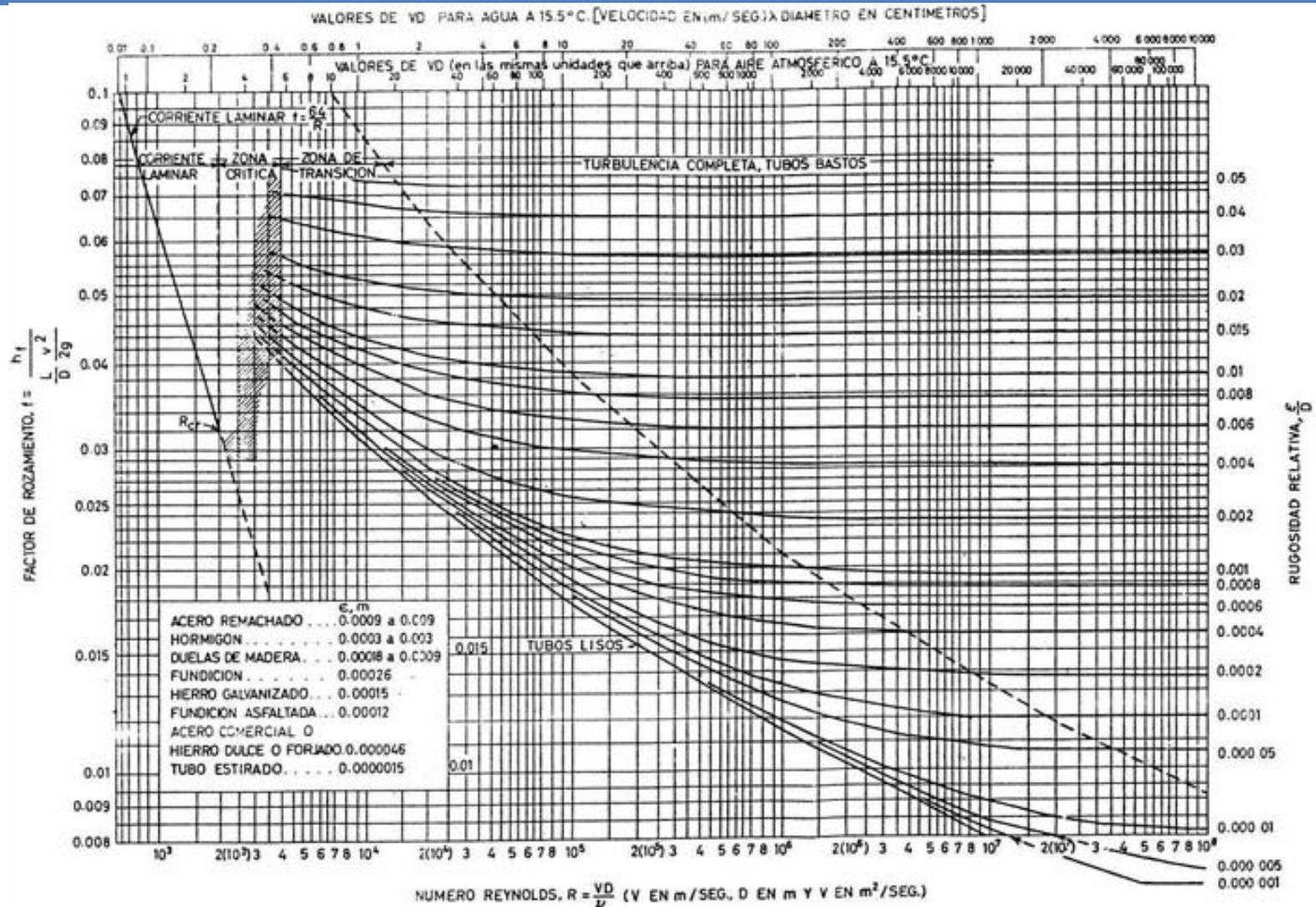
$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} - h_2 - \frac{v_2^2}{2g} = \int_1^2 \frac{f}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} ds$$



- Carga piezométrica: $h = z + \frac{p}{\gamma}$

Flujo estacionario

Pérdidas de carga distribuidas - Ábaco de Moody



Flujo estacionario

Pérdidas de carga distribuidas - ecuaciones

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 D} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Swamee & Jain, 1976

$$f = \frac{1}{3,24 \left[\log \left(\left(\frac{\varepsilon}{3,7 D} \right)^{10/9} + \frac{6,9}{\text{Re}} \right) \right]^2}$$

$\pm 1,5 \%$ para $4000 < \text{Re} < 10^8$, $0 \leq \varepsilon / D \leq 0,05$

Haaland, J. of Fluids Eng., March 1983

Iterativa:

1°)
$$f^{(i)} = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,71 D} + \frac{13}{\text{Re}} \right) \right]^2}$$

($\pm 0,75 \%$ para $\text{Re} > 30000$, $\varepsilon / D > 0,004$)

2°)

$$f^{(ii)} = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 D} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f^{(i)}}} \right) \right]^2}$$

($\pm 0,8 \%$)

Chem. Eng., Apr. 29, 1985

Flujo estacionario

Pérdidas de carga distribuidas - ecuaciones

Hazen – Williams (1933)

con **Q** en lt/s, **ΔH**, **L** y **D** en m:

$$\frac{\Delta H}{L} = 3,01 \times 10^{-5} \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}}$$

Valores típicos:

C = 130, caño de fundición, nuevo

C = 120, caños de acero soldados

C = 90, caños de fundición chicos, 20 años de uso

Equivale a Darcy si

$$f = \frac{133,5}{C^{1,85} v^{0,15} D^{0,17}} \approx k \left(\frac{v_{agua}}{v D} \right)^{0,15} = \frac{k}{Re^{0,15}}$$

- adecuada si la pendiente de las curvas del ábaco de Moody es $\approx -0,15$ (régimen de transición)
- no es dimensionalmente homogénea
- sólo para agua fría
- Sólo para $200 \text{ mm} < D < 915 \text{ mm}$
- no considera variaciones en viscosidad y temperatura

Flujo Estacionario

Pérdidas de carga localizadas

$$H_1 - H_2 = k(\text{Re}, \text{geometría}) \cdot \frac{v^2}{2g}$$

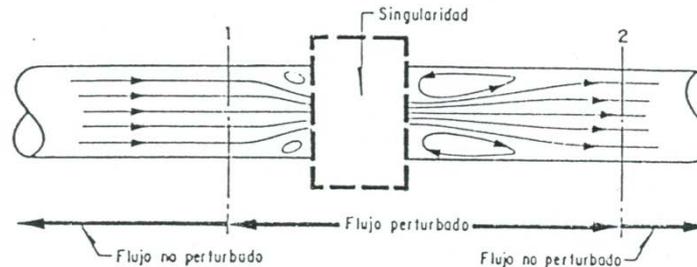


Fig 2.9.1. Efecto de una singularidad sobre el flujo.

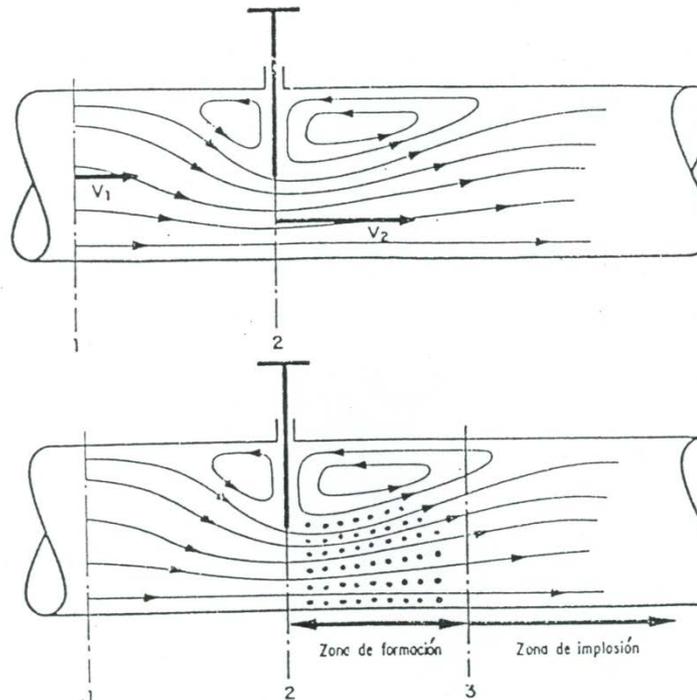


Fig 2.9.2. Incremento de la velocidad en el interior de una singularidad.

Fig 2.9.3. Aparición de burbujas de vapor en el seno del flujo.

Flujo Estacionario

Cavitación

Def: Formación de cavidades de vapor dentro del seno de un líquido como consecuencia del descenso local o parcial de la presión absoluta en una zona hasta la presión de vapor correspondiente a la temperatura del líquido en esa zona

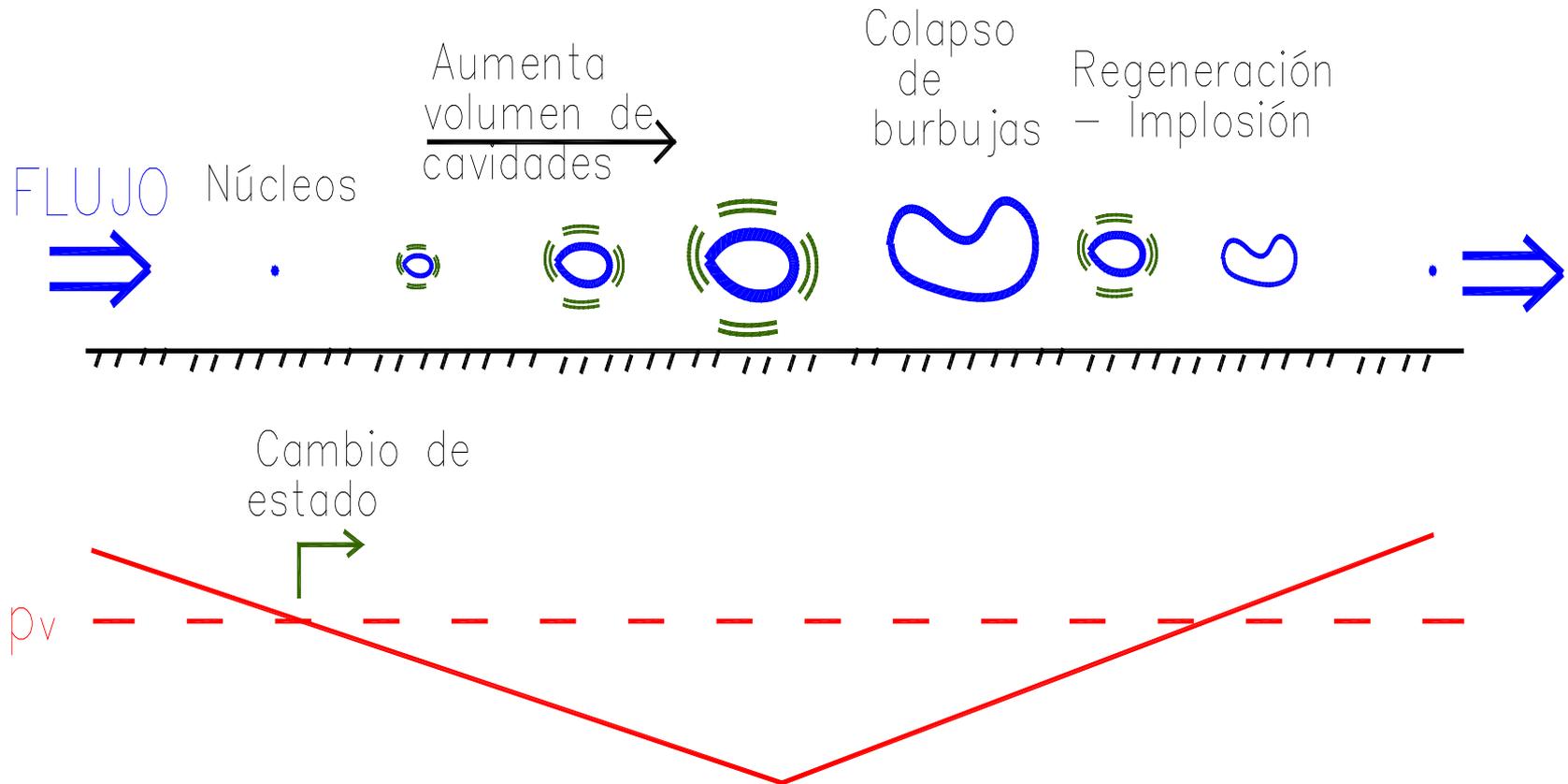
Características

- **Sólo en líquidos**
- **Descenso de presión**
- **Dinámico: cavidades aparecen y desaparecen**
- **Reposo o movimiento**
- **Cualquier punto del fluido**
- **Impurezas lo favorecen**

Flujo Estacionario

Cavitación

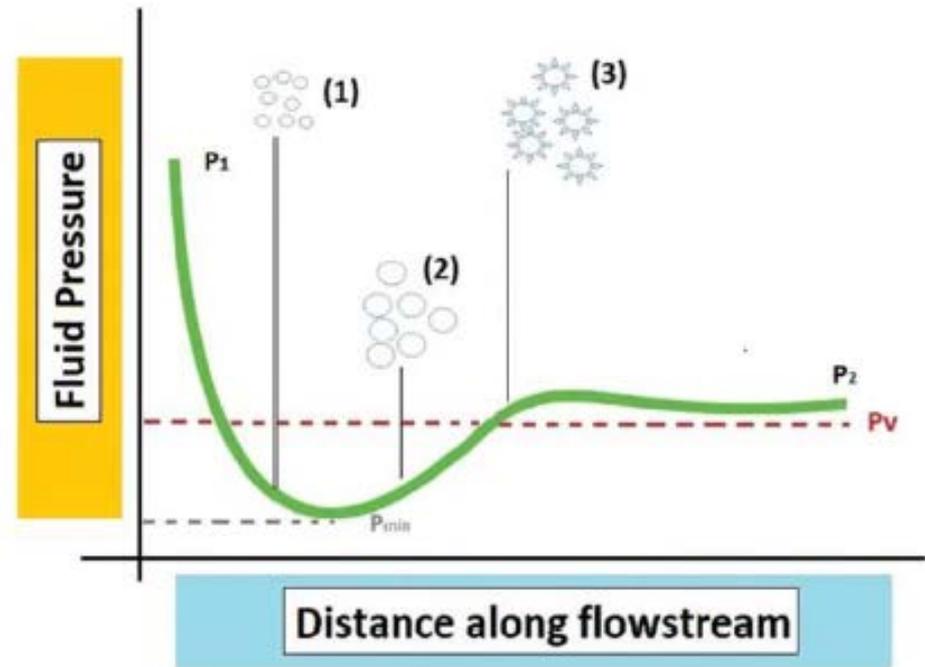
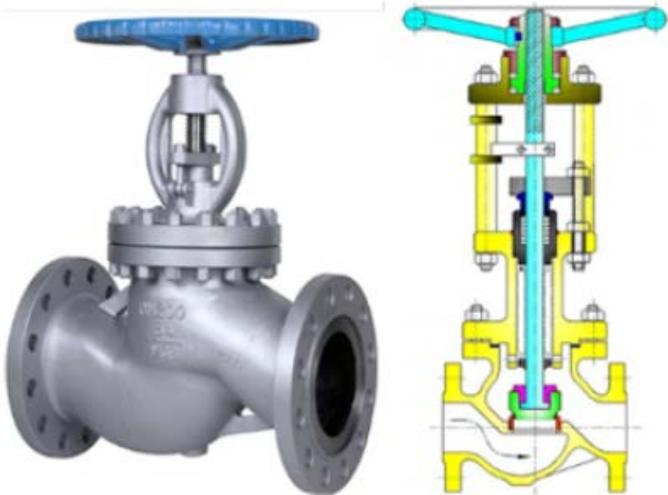
Formación y colapso de las cavidades



Flujo Estacionario

Cavitación

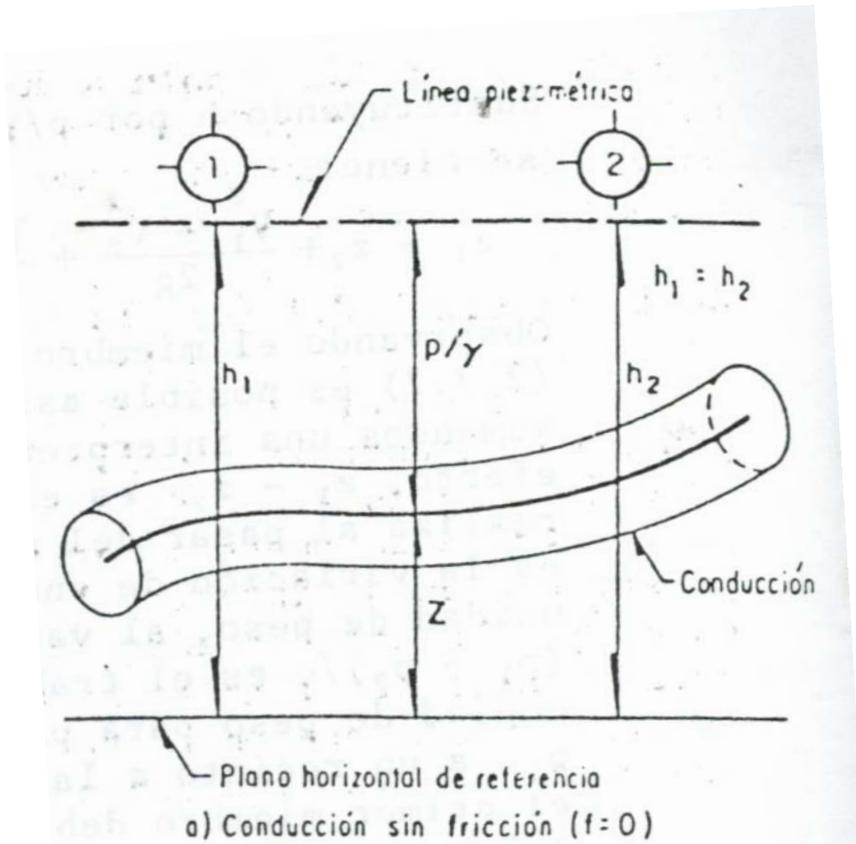
Cavitación en una válvula



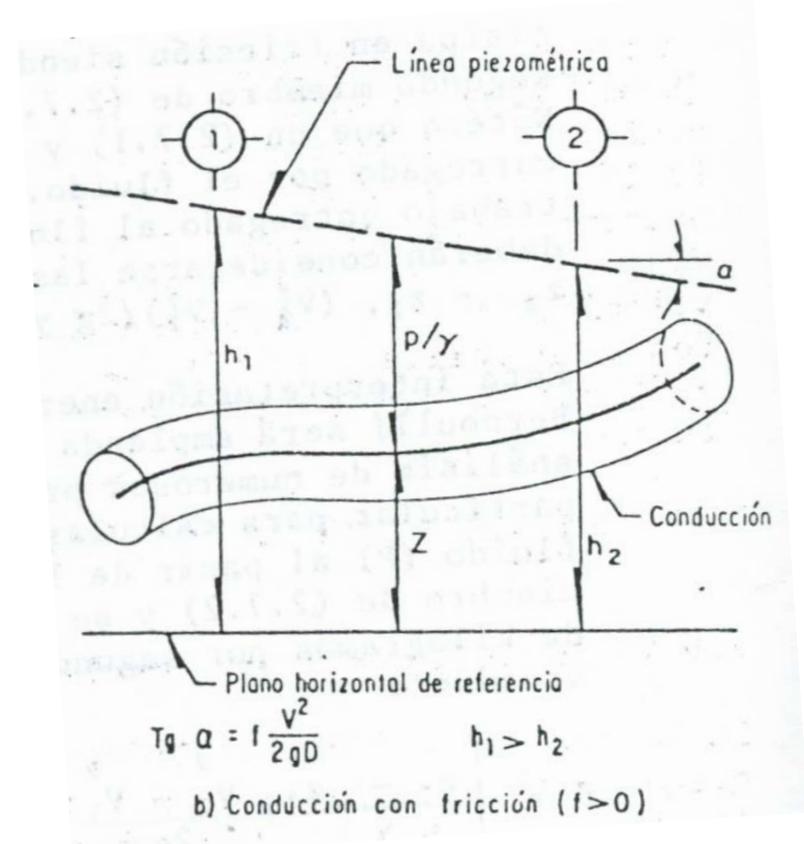
Flujo estacionario

Representación gráfica de la carga piezométrica

Acueducto sin fricción:



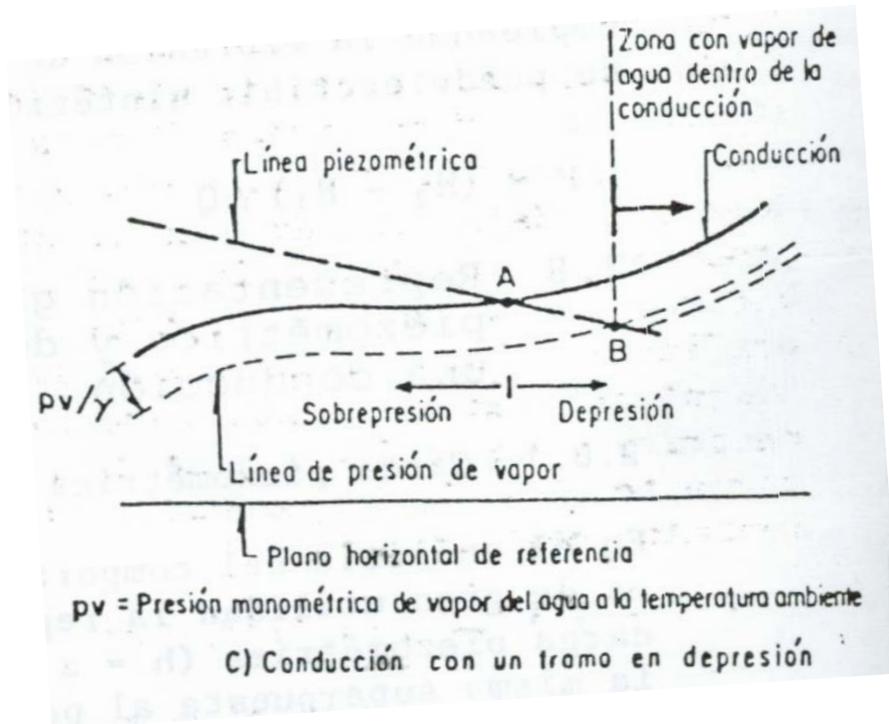
Acueducto con fricción:



Flujo estacionario

Representación gráfica de la carga piezométrica

Acueducto con un tramo en depresión



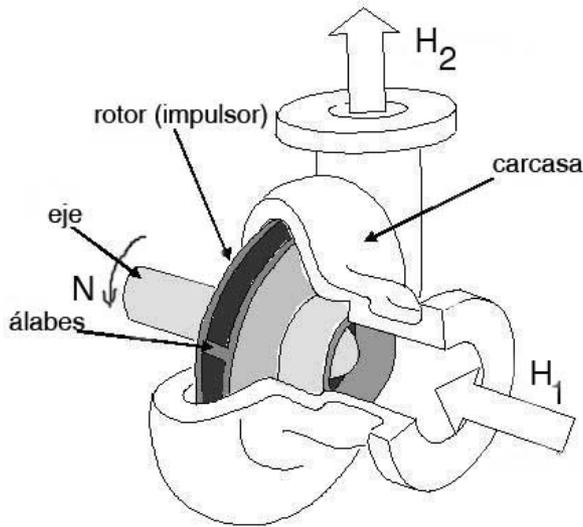
Temperatura (°C)	Presión absoluta de vapor del agua (mca)
0	0,06
10	0,12
20	0,25
30	0,44
40	0,76
50	1,26
60	2,03
70	3,20
80	4,86
90	7,18
100	10,33

Tabla 2.8.1 Presión absoluta del vapor de agua a diferentes temperaturas

Flujo estacionario

Bombas

- Máquina que recibe energía de un motor y la entrega a un líquido

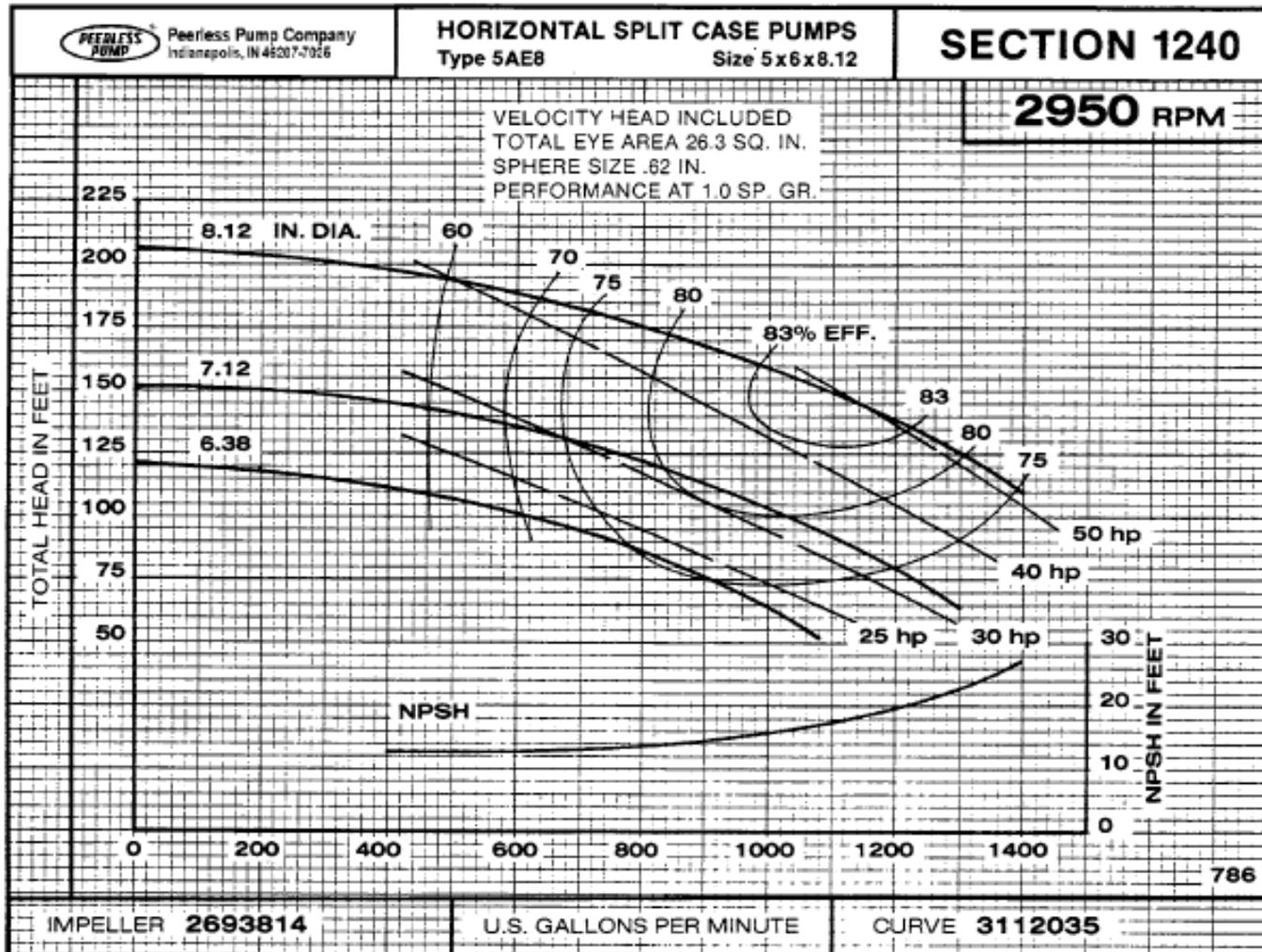


$$H_2 > H_1$$

$$H_B = \left(\frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right) - \left(\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right)$$

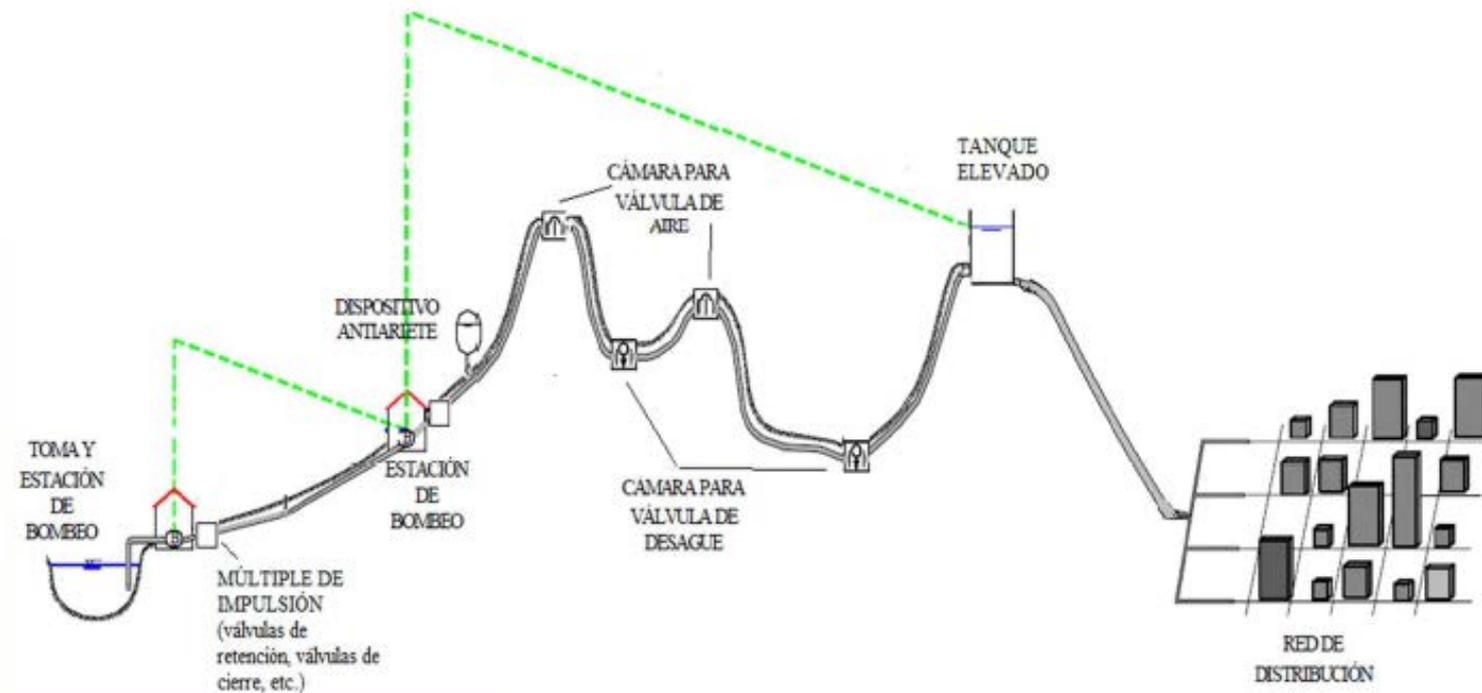
Flujo estacionario

Bombas: Curva H-Q, rendimiento y NPSH



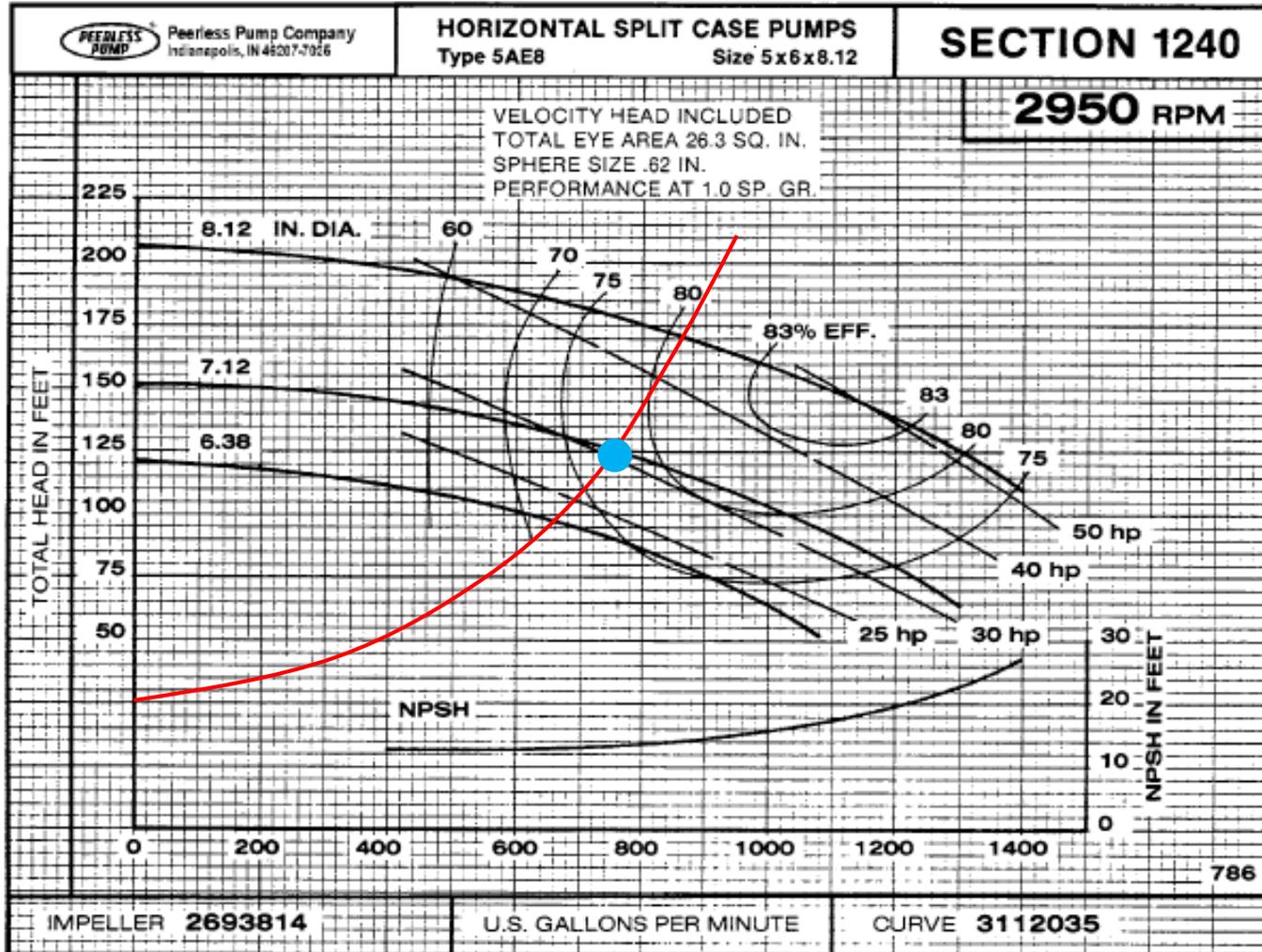
Flujo estacionario

Bombas en sistema hidráulico a presión



Flujo estacionario

Bombas: Punto de operación



Transitorios



Sin embargo... eventos transitorios

- Regulación de caudales: maniobras de cierre o apertura de válvulas
- Arranque o parada de los equipos de bombeo, accidental o programada
- Llenado o vaciado de una tubería
- Etc..

Transitorios

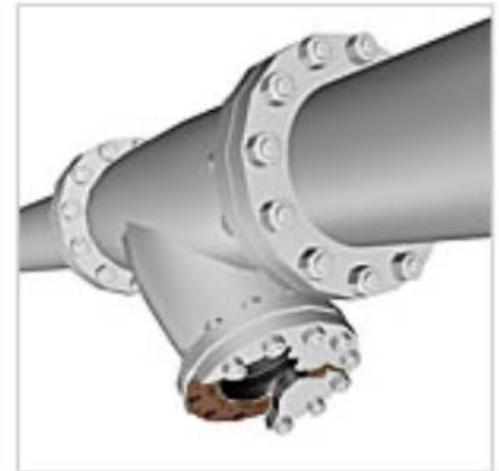
Golpe de Ariete (“water hammer”): fenómeno transitorio, asociado a variaciones bruscas del caudal



Consecuencias

- **Presiones muy altas:** deformaciones, roturas.
- **Presiones muy bajas:** colapso de la tubería, intrusión de contaminantes.
- **Flujo inverso a través de las bombas:** daños en los equipos
- **Movimiento o vibraciones de las tuberías**

Consecuencias



Consecuencias



Consecuencias

Los Ángeles, California (USA), julio de 2014. La rotura se produjo bajo la calzada de una avenida y originó un gran socavón, perdiéndose miles de litros de agua.

<https://www.youtube.com/watch?v=E4lh-UI7Xoc>

Benalmádena, Málaga (España), octubre de 2016. El suceso fue conocido popularmente como el “tsunami de Benalmádena”.

<https://www.youtube.com/watch?v=QQPhciBcrw>