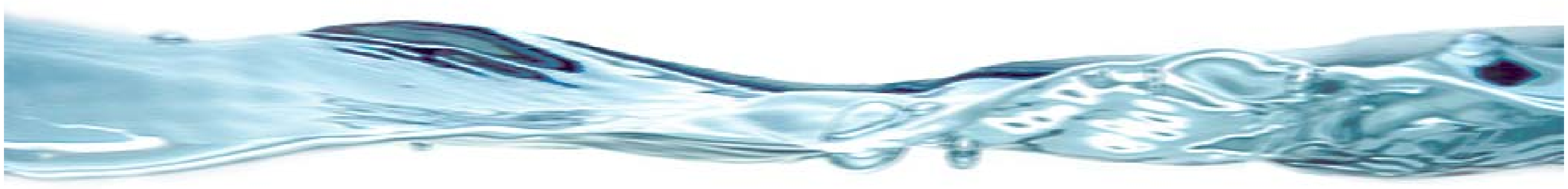
INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL AGUA

www.ita.upv.es



FLUJO TRANSITORIO EN SISTEMAS A PRESIÓN
DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO

Jorge García-Serra García
Instituto Tecnológico del Agua
Universidad Politécnica de Valencia

Interés del estudio de los TRANSITORIOS

Las decisiones sobre:

materiales
timbrajes
componentes

se toman considerando el **ESTADO ESTACIONARIO**

Pero existen otras circunstancias a tener en cuenta originadas por variaciones del flujo (**FLUJOS NO ESTACIONARIOS)**

que provocan operación bajo condiciones que pueden ser **INACEPTABLES**

- Presiones demasiado altas
- Presiones demasiado bajas
- Flujo inverso
- Movimientos y vibraciones de tuberías

Los transitorios se originan por variaciones del caudal con el tiempo

Variaciones de la demanda: Normalmente suaves

Maniobras en Estaciones de Bombeo

Arranque/Parada programado (Control usuario)

Fallo de Energía eléctrica (Externa → Proteger)

Maniobras Válvulas: (Velocidad controlada por el usuario)

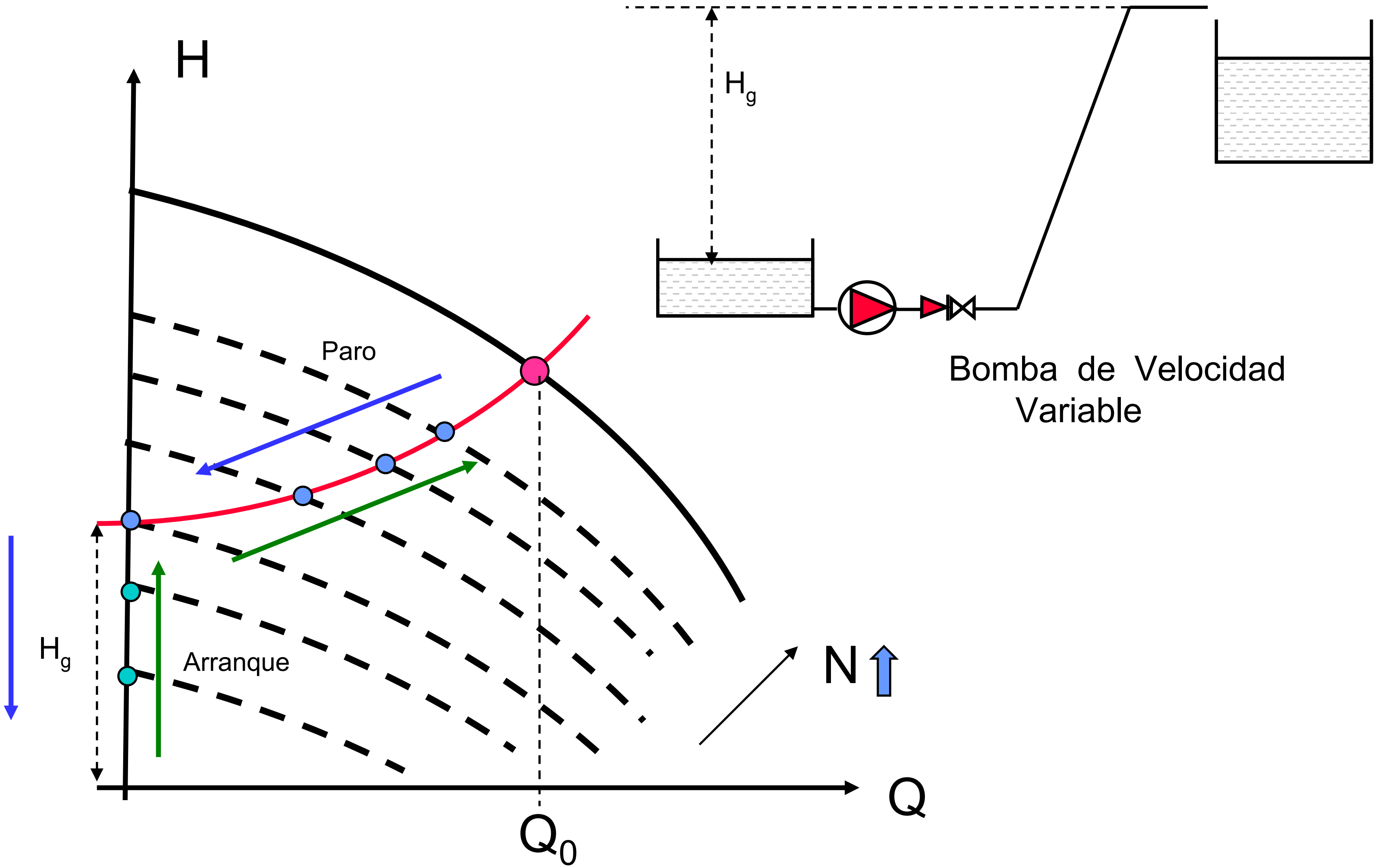
Acciones no adecuadas de dispositivos (p.e. válvulas automáticas). (Ajuste de la velocidad de respuesta por el usuario)

Roturas en conducciones (accidentales). (Buena ejecución y protección). Fase de diseño y construcción. Generan vaciado y depresiones

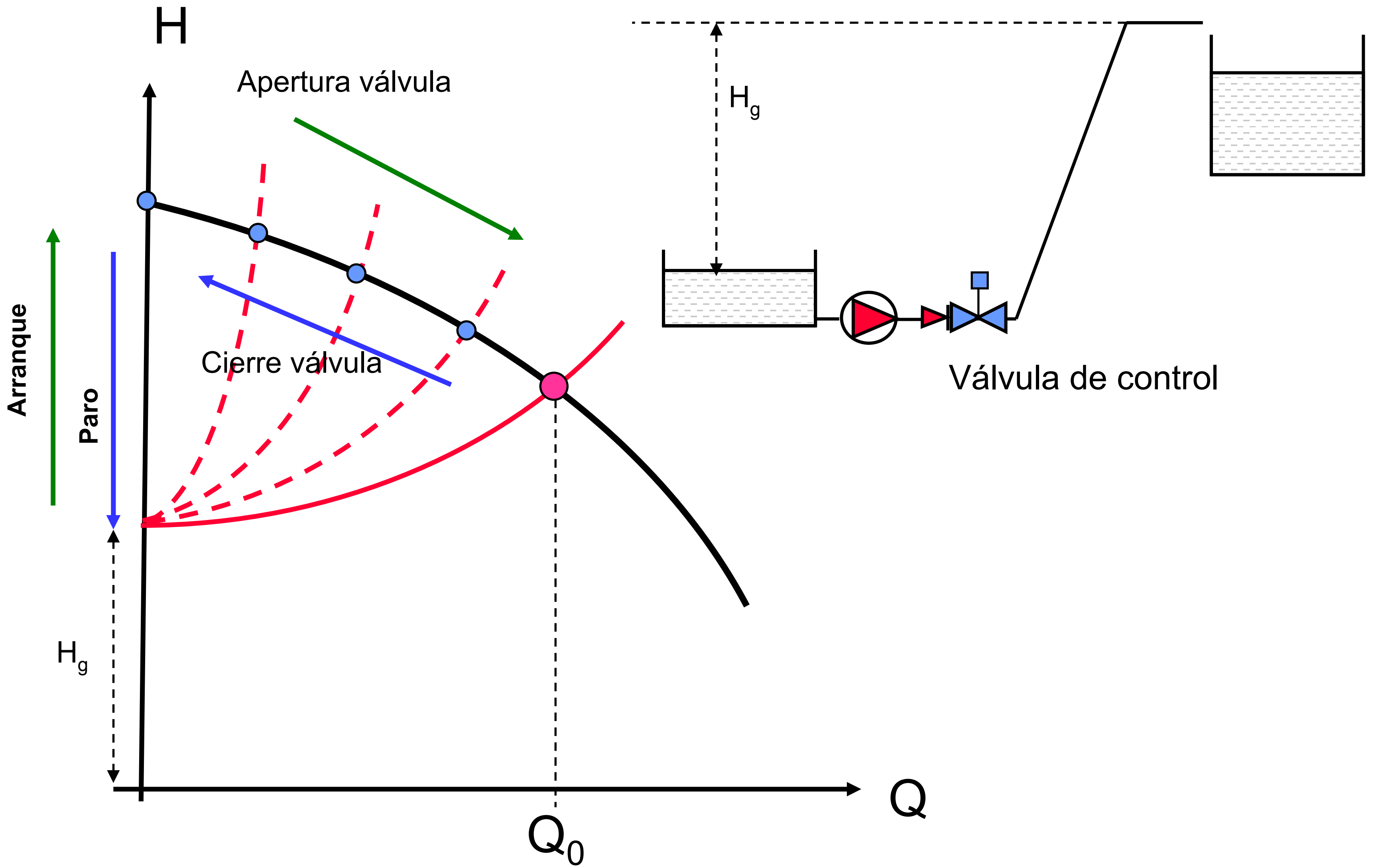
Si estas variaciones son lentas $\frac{dQ}{dt} \downarrow$

las consecuencias no son graves

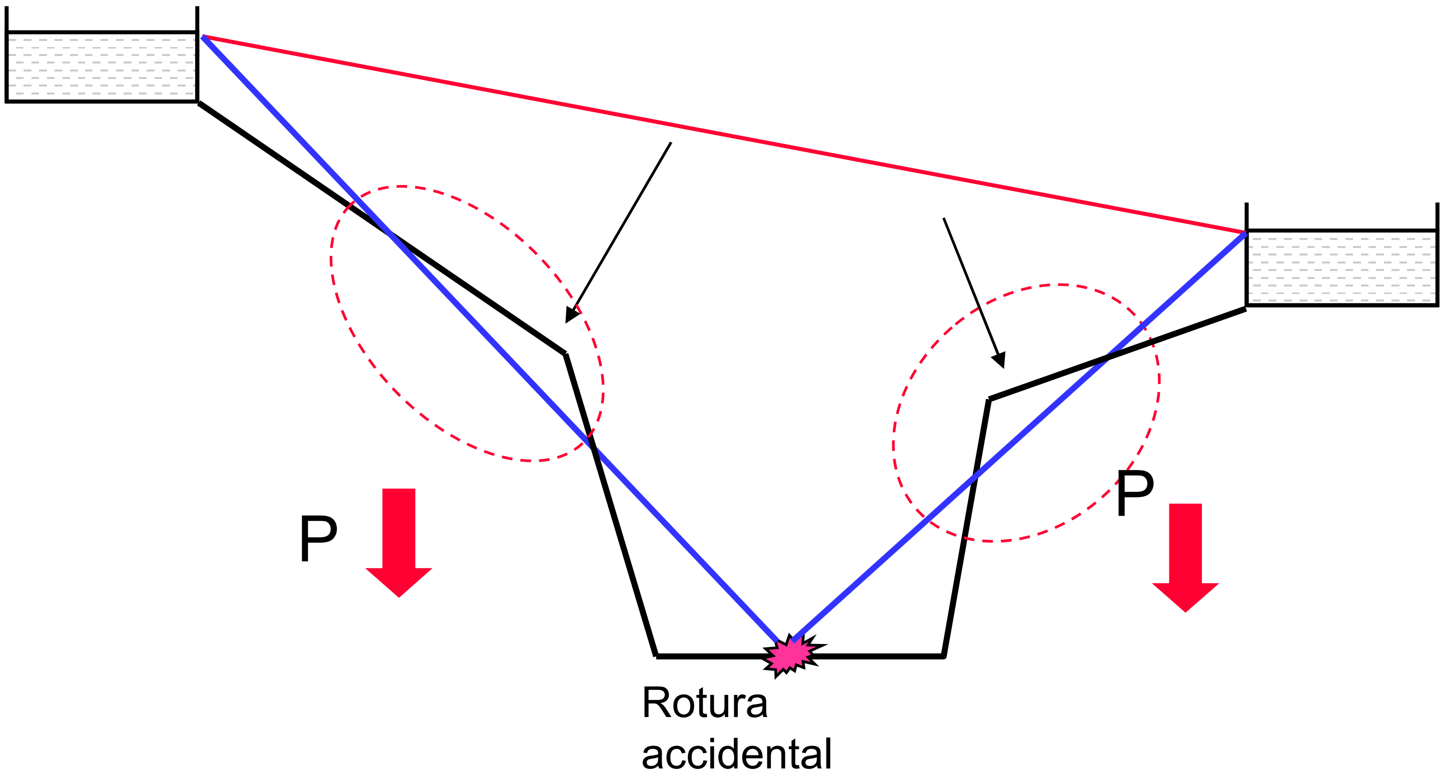
Arranque/Paro controlado por BVV



Arranque/Paro a Válvula cerrada



Rotura accidental



Descripción del fenómeno

¿Qué ocurre cuando se inicia, modifica, interrumpe un flujo?

Equilibrio 1 → Perturbación → Equilibrio 2

¿Dónde se inicia?

¿Cómo se propaga?

¿Cómo actúa?

¿Cómo es modificada por los elementos de la conducción?

¿Cuáles son sus efectos?

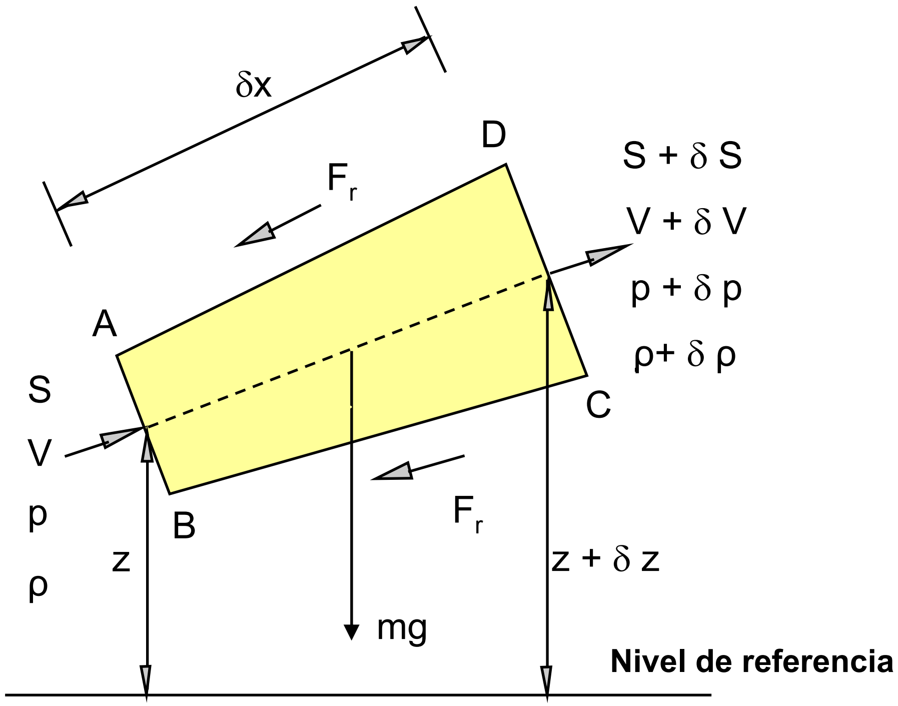
¿Cuál es la sensibilidad del sistema a estos efectos?

¿Cómo pueden ser mitigados estos efectos si es necesario?

ANALISIS DE TRANSITORIOS

MAGNITUDES

Presión o Altura piezométrica	p(x,t) o H(x,t)
Velocidad o Caudal	V(x,t) o Q(x,t)
Sección tubería	S(x,t)
Densidad fluido	ρ(x,t)



Ecuación de continuidad

$$\frac{1}{S}\frac{dS}{dt} + \frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

Ecuación de movimiento

$$\frac{1}{g}\frac{dV}{dt} + F_r + \frac{\partial H}{\partial x} = 0$$

¿Cómo se propaga la perturbación?

MODELOS	**RIGIDO** oscilación en masa Caso particular del modelo elástico	**ELASTICO** golpe de ariete Tiene en cuenta la elasticidad del Fluido y de la tubería
Transmisión de la Perturbación	**instantánea**	**velocidad finita** **(a) celeridad**

Celeridad de las ondas generadas por la perturbación

Korteweg (1878)

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho\left(\frac{1}{K} + \frac{1}{A}\frac{\delta A}{\Delta p}\right)}} = \frac{\sqrt{K/\rho}}{\sqrt{1 + \frac{K}{E}\frac{D}{e}}}$$

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + k\frac{D}{e}}}$$

MATERIAL	k
Acero	0.5
Fundición	1.0
Fibrocemento	5-6
PVC	20-25

E: Módulo de Young del material de la tubería

K: Módulo de elasticidad volumétrico del agua

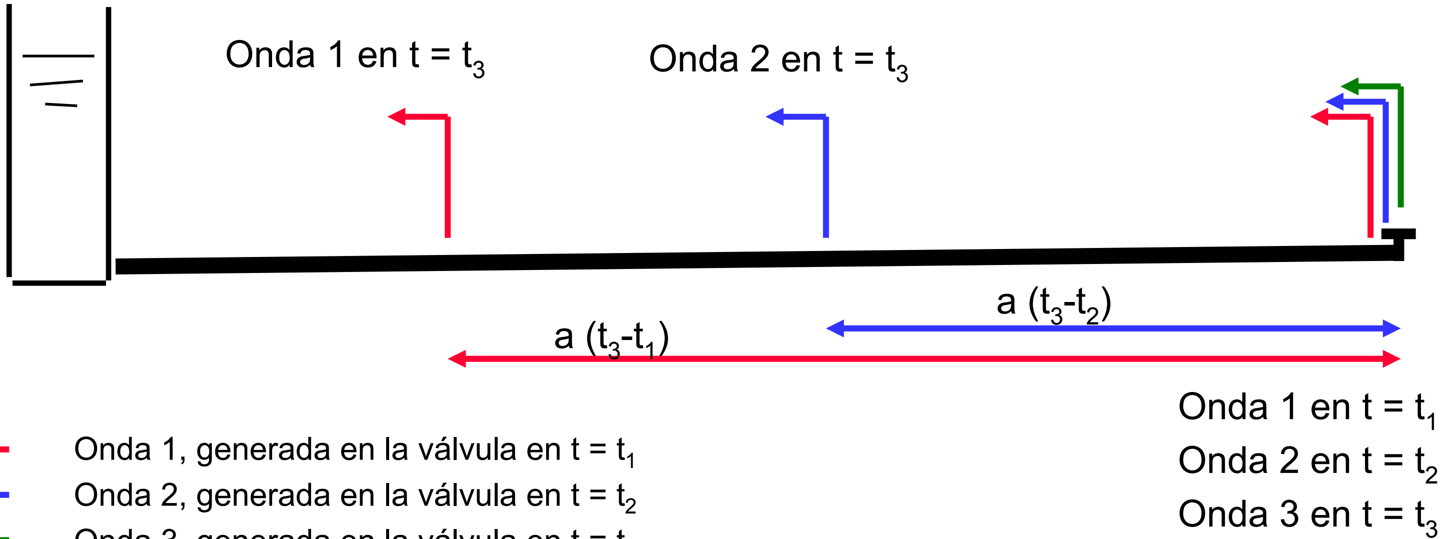
D: Diámetro interior tubería

e: Espesor tubería

Orden de magnitud celeridad "a":

Materiales metálicos: 1000 m/s

Materiales plásticos: 300 a 500 m/s



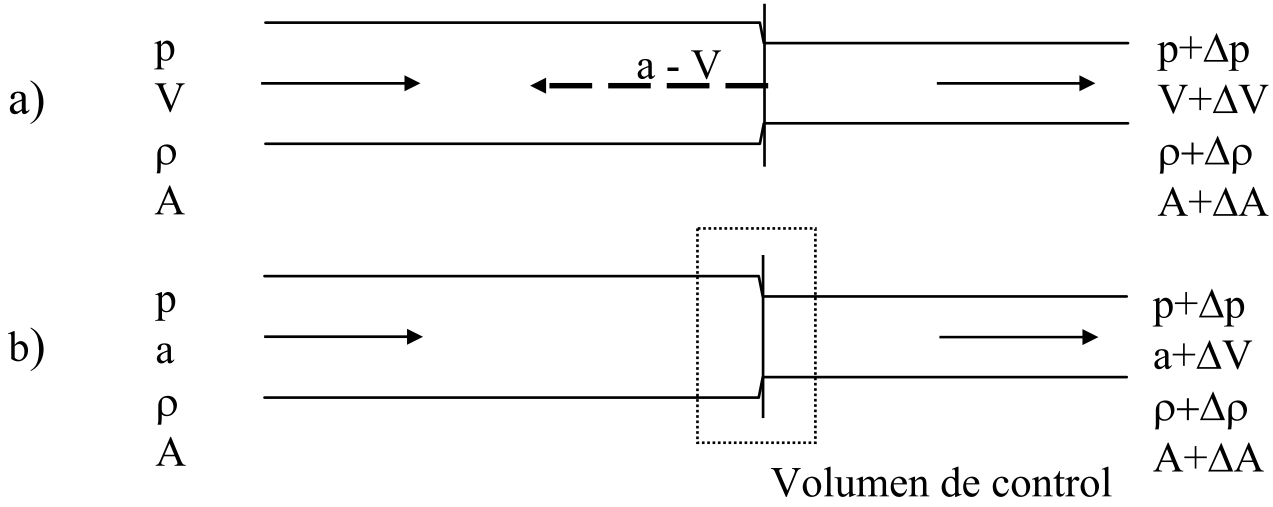
Onda 1, generada en la válvula en t = t_1

Onda 2, generada en la válvula en t = t_2

Onda 3, generada en la válvula en t = t_3

Intensidad de la onda de presión

Pulso de Joukowsky o de Allievi



Aplicando la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

$$\Delta p = -\rho a \Delta V$$

$$\boxed{\Delta H = -\frac{a\Delta V}{g}}$$

Para cierre instantáneo de válvula

$$\Delta V = 0 - V_0 = -V_0 \quad \rightarrow \quad \Delta H = \frac{aV_0}{g}$$

Para a = 1000 m/s, con g= 10 m/s^2

$$\Delta H\ (mca) = \frac{1000\,V_0}{10} = 100\,V_0$$

MODELO ELÁSTICO

Ec. de continuidad

$$\frac{a^2}{g}\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{\partial H}{\partial t}=0$$

Ec. Conservación cantidad de movimiento

$$\frac{\partial V}{\partial t}+g\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{f}{2D}V\left|V\right|=0$$

Sistema
- de ecuaciones en derivadas parciales
- acoplado
- no lineal
- de tipo hiperbólico

¿Dónde se inicia y cómo es modificada la perturbación?

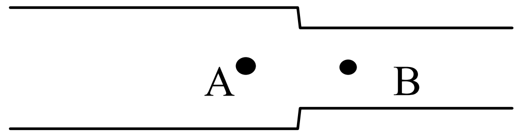
- Los modelos llevan la contabilidad de las ondas.
- Las perturbaciones son
  - generadas (bombas, válvulas...)
  - modificadas
    - amortiguadas (calderines, fricción tuberías...)
    - reflejadas (extremos ciegos, conexiones...)
    - absorbidas (depósitos, grandes tuberías...)
    - amplificadas (resonancia...)
    - ...
  - ¿Cómo se modelizan estos elementos?

    CONDICIONES DE CONTORNO

Ejemplos sencillos de condiciones de contorno

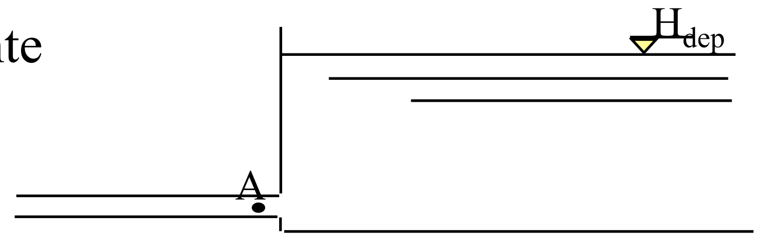
a) Conexión simple.

$$H_A = H_B$$



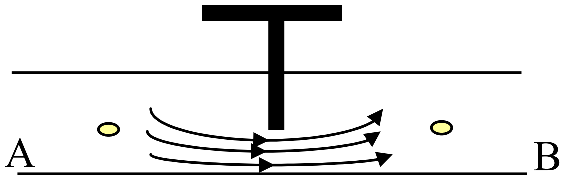
b) Elemento de altura constante

$$H_A = H_{dep}$$



c) Válvula.

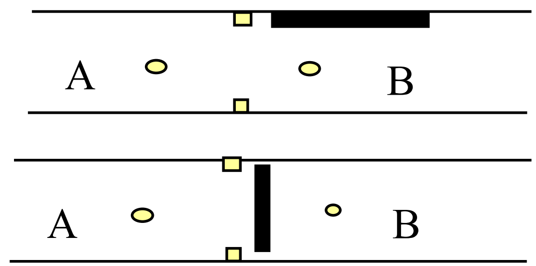
$$\Delta H = K(t)\, Q|Q|$$



d) Válvula de retención.

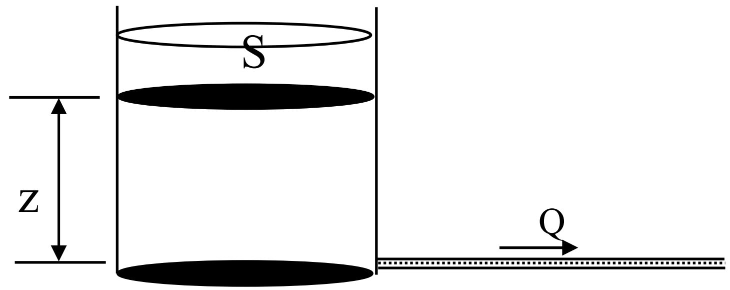
$$H_A = H_B \; ; \; Q_A = Q_B$$

$$Q_A = 0 \; ; \; Q_B = 0$$



Ejemplos sencillos de condiciones de contorno

e) Depósito de altura variable.



$$\frac{dz}{dt} = -\frac{Q}{S}$$

f) Bomba parando.

Altura-Caudal: $H_b = AQ^2 + B\alpha Q + C\alpha^2$

Potencia : $P = \dfrac{\gamma\, Q\, H_b}{\eta}$

Par: $M = \dfrac{\text{Pot.}}{\omega} = \dfrac{\gamma\, Q\, H_b}{\eta . \omega}$

Inercia : $M = -I\,\dfrac{dw}{dt}$

w: vel. giro rad/s

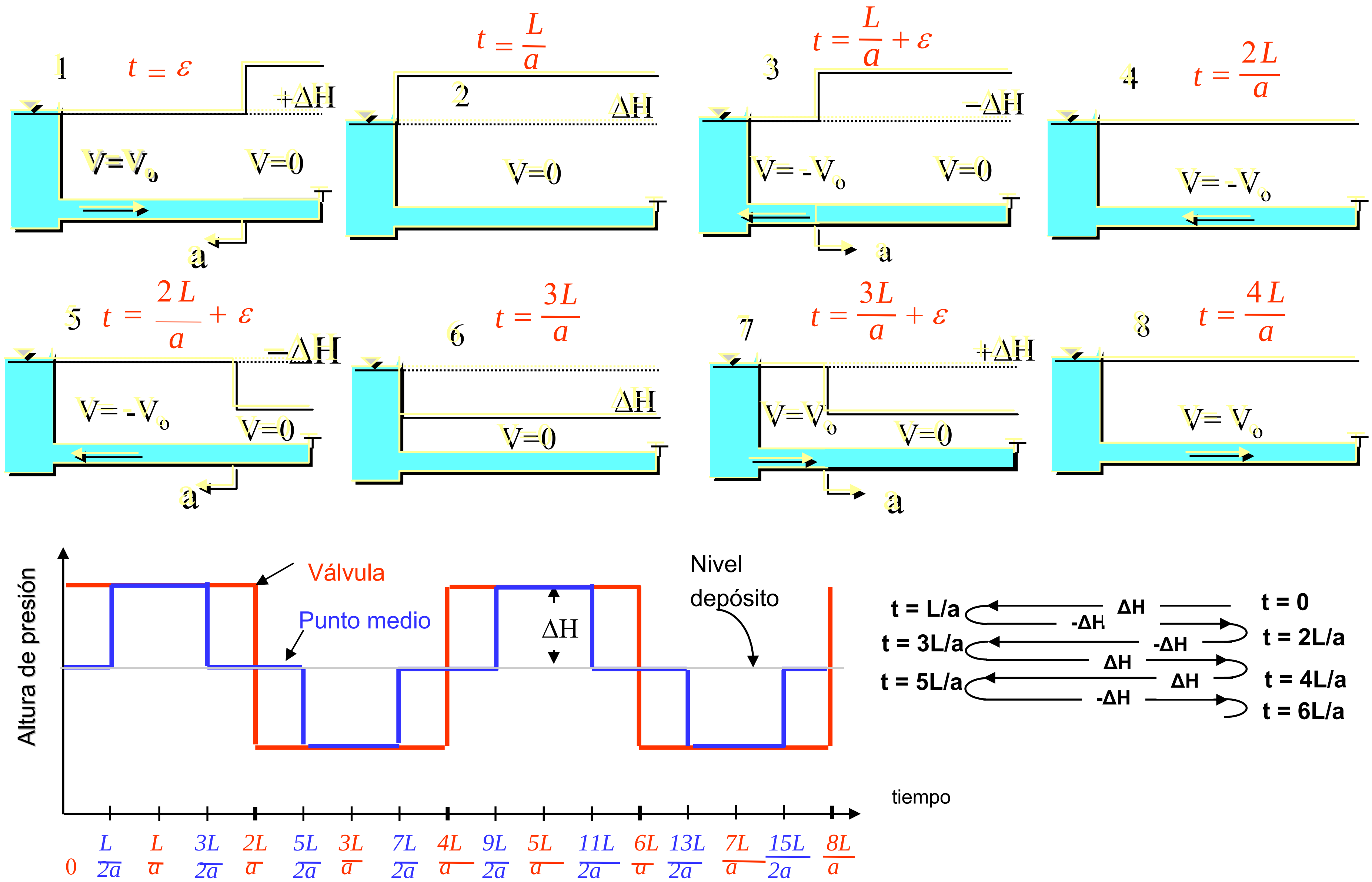
I: Momento Inercia (bomba+motor)

ANALISIS DE TRANSITORIOS HIDRAULICOS

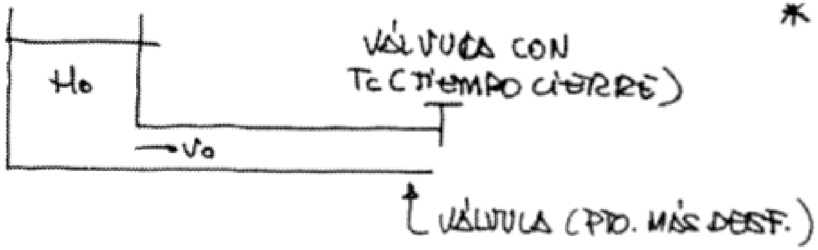
Objetivo: Hallar
$H(t,x)$ o $p(t,x)$ y $Q(t,x)$ o $V(t,x)$ para $t > 0$

ECUACION(ES)	Integración
+	
CONDICIONES DE CONTORNO	Complementan información
+	
CONDICION INICIAL	Punto de partida: condición de régimen

Descripción: Cierre instantáneo de válvula sin considerar la fricción



CIERRES RÁPIDOS Y LENTOS



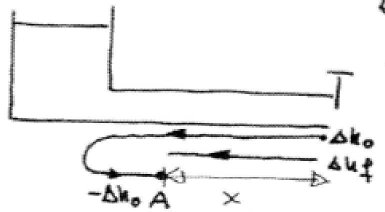
* $T_c = 0$ (CIERRE INST.)

EN $t = L/a$ TODA LA TUBERÍA SOMETIDA A LA SOB. DE ALLIEVI $\Delta H = \frac{aV_0}{g}$

Cierre rápido

* $0 < T_c < \frac{2L}{a}$ EXISTEN PUNTOS DE LA TUB. CON SOB. DE ALLIEVI PERO NO TODOS (EMPEZANDO POR LA VÁLVULA)

EXISTE UN TRAMO DE LA TUBERÍA POR EL QUE PASAN TODAS LAS ONDAS POSITIVAS GENERADAS ANTES DE QUE VUELVA LA PRIMERA DEPRESIÓN $-\Delta h$ DEL DEPÓSITO $\longrightarrow$ ESE TRAMO AGUANTA LA SOB. DE ALLIEVI.



PORCIÓN DE TUB. POR LA QUE PASAN TODAS LAS ONDAS + SIN QUE HAYA LLEGADO NINGUNA NEGATIVA

Δh_0 : PRIMERA ONDA (EMPIEZO A CERRAR)

Δh_f : ÚLTIMA ONDA ANTES DE ESTAR TOTALM. CERRADA

Δh_0 HASTA EL PUNTO A $\quad \frac{L}{a} + \frac{L-x}{a}$

Δh_f " " " A $\quad T_c + \frac{x}{a}$

$$\frac{L}{a} + \frac{L-x}{a} = T_c + \frac{x}{a} \rightarrow \boxed{x = L - \frac{a T_c}{2}}$$

$T_c = 0 \rightarrow x = L$

$T_c = \frac{2L}{a} \rightarrow x = 0$

SI $\uparrow T_c \rightarrow x \downarrow$ (MENOS PORCIÓN DE TUB. AGUANTARÁ LA MÁX. SOBR.)

Cierre lento

* $T_c > \frac{2L}{a}$ NO SE ALCANZA LA SOB. ALLIEVI EN NINGÚN PUNTO.

CIERRE LINEAL. F$^{\underline{a}}$ MICHAUD

LA LEY DE VELOCIDADES EN LA TUB (INMEDIATAMENTE AGUAS ARRIBA DE LA VÁLVULA) ES: $V = V_0(1 - t/T_c)$

PARA UN CIERRE PARCIAL, LAS SOB. PRODUCIDAS:

$$\Delta H = -\frac{a\,\Delta V}{g} \qquad \left(\text{Si C. TOTAL } \Delta V = \underset{V_{final}}{0} - \underset{V_{inic}}{V_0} = -V_0 \rightarrow \Delta H = \frac{a V_0}{g}\right)$$

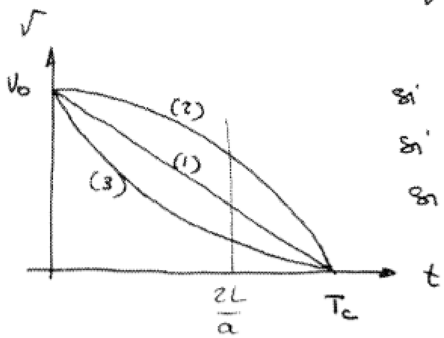
Si $T_c < \frac{2L}{a}$ C. RÁP $\rightarrow \exists$ S. ALLIEVI

Si $T_c > \frac{2L}{a}$ C. LENTO

PARA CALCULAR $\Delta H_{máx}$ HAY QUE TENER EN CUENTA QUE ÉSTA SE PRODUCE EN LA VÁLVULA EN $t = \frac{2L}{a}$ (CUANDO EMPIEZAN A LLEGAR ONDAS NEGATIVAS)

PARA $\Delta V_{máx} = V(t = \frac{2L}{a}) - V_0 = V_0\left(1 - \frac{2L}{a T_c}\right) - V_0 = -\frac{V_0 2L}{a T_c}$

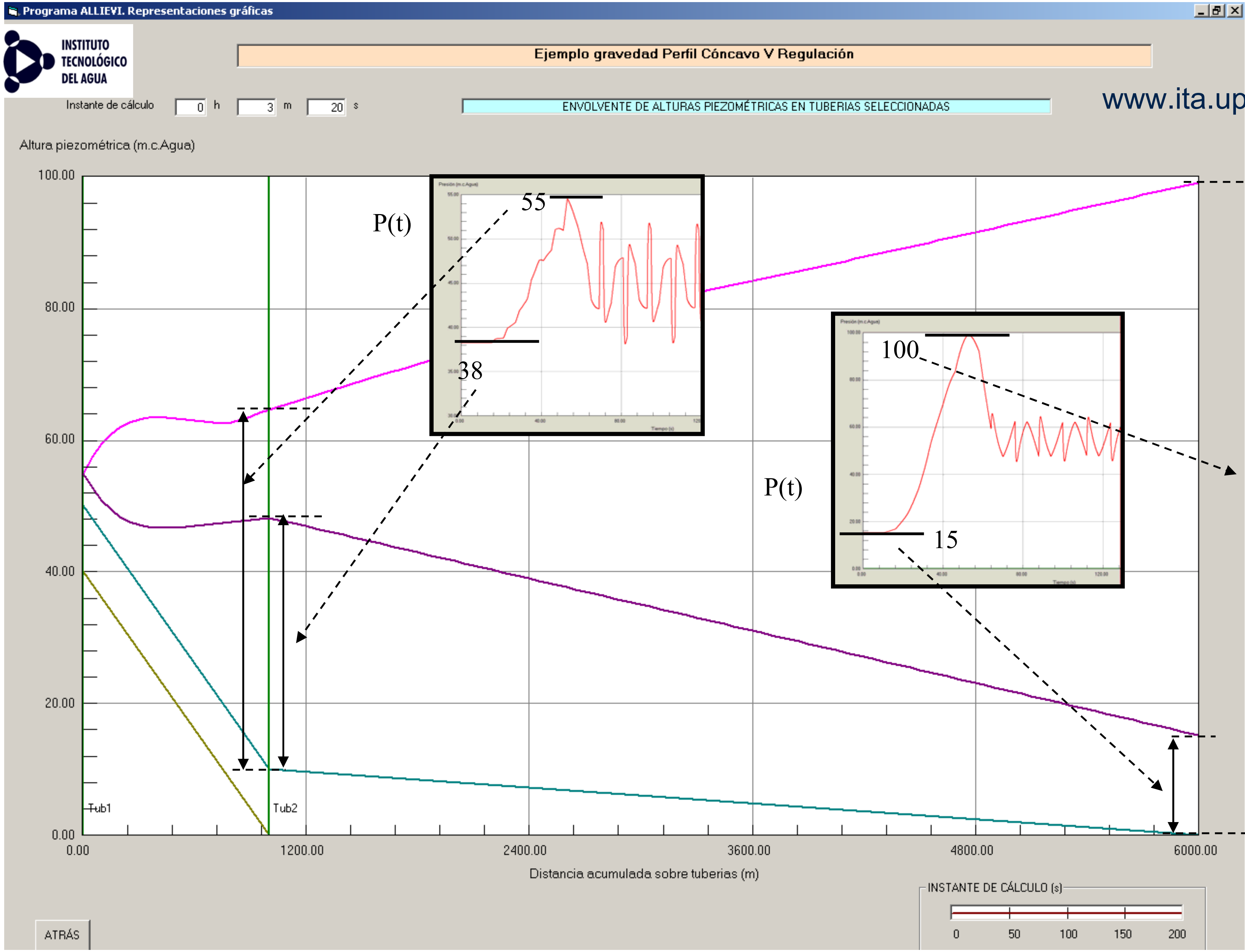
$$\Delta H_{máx} = \frac{-a \Delta V_{máx}}{g} = \frac{\cancel{a} V_0 2L}{\cancel{a} g T_c} \longrightarrow \boxed{\Delta H_{máx} = \frac{2 L V_0}{g T_c}} \text{ F}^{\underline{a}} \text{ MICHAUD}$$



Si LEY CIERRE LINEAL (1) $\rightarrow$ F$^{\underline{a}}$ MICHAUD CORRECTA.

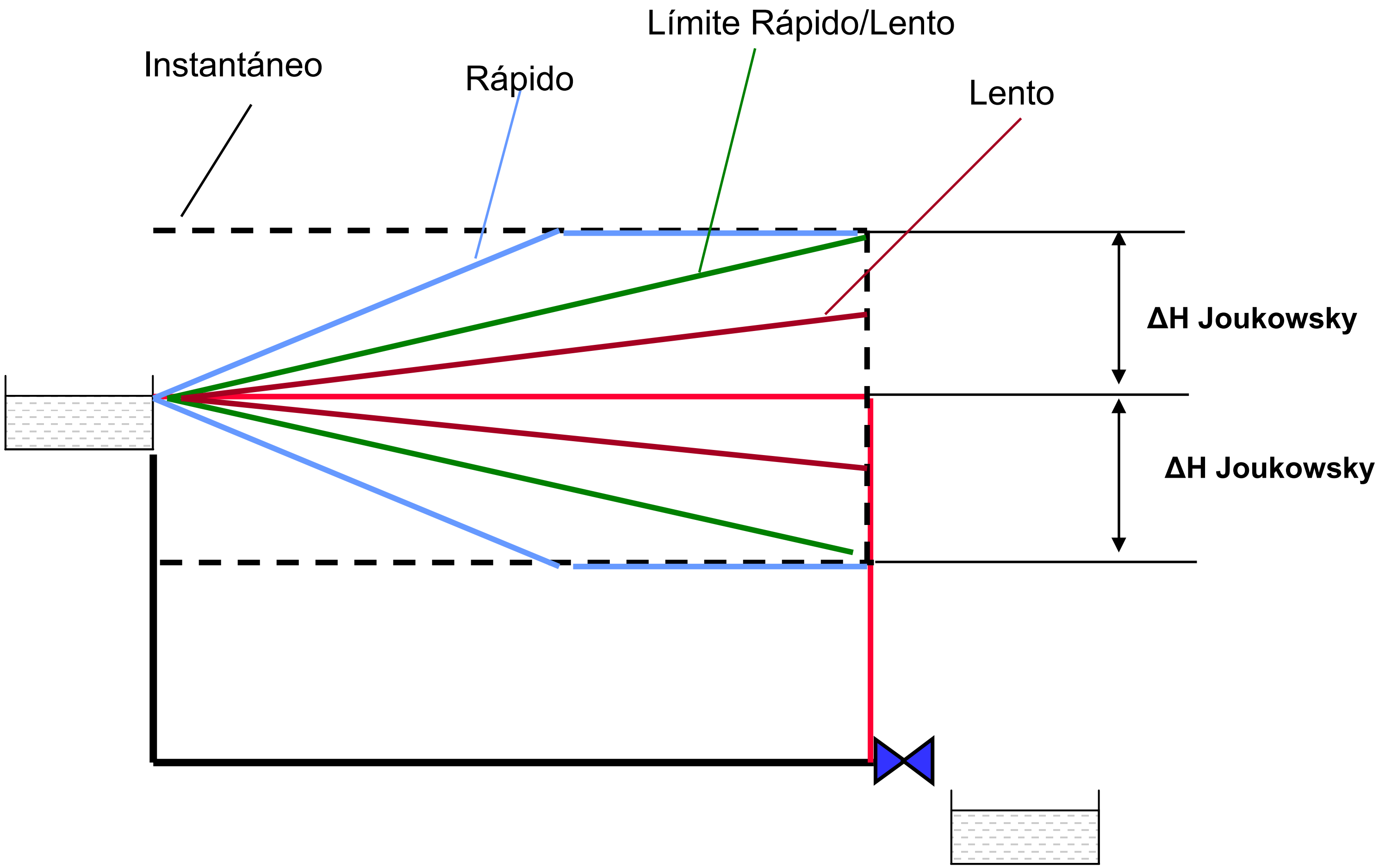
Si " " (2) $\rightarrow$ SOB. MICHAUD > SOB. REAL

Si " " (3) $\rightarrow$ SOB. MICHAUD < SOB. REAL



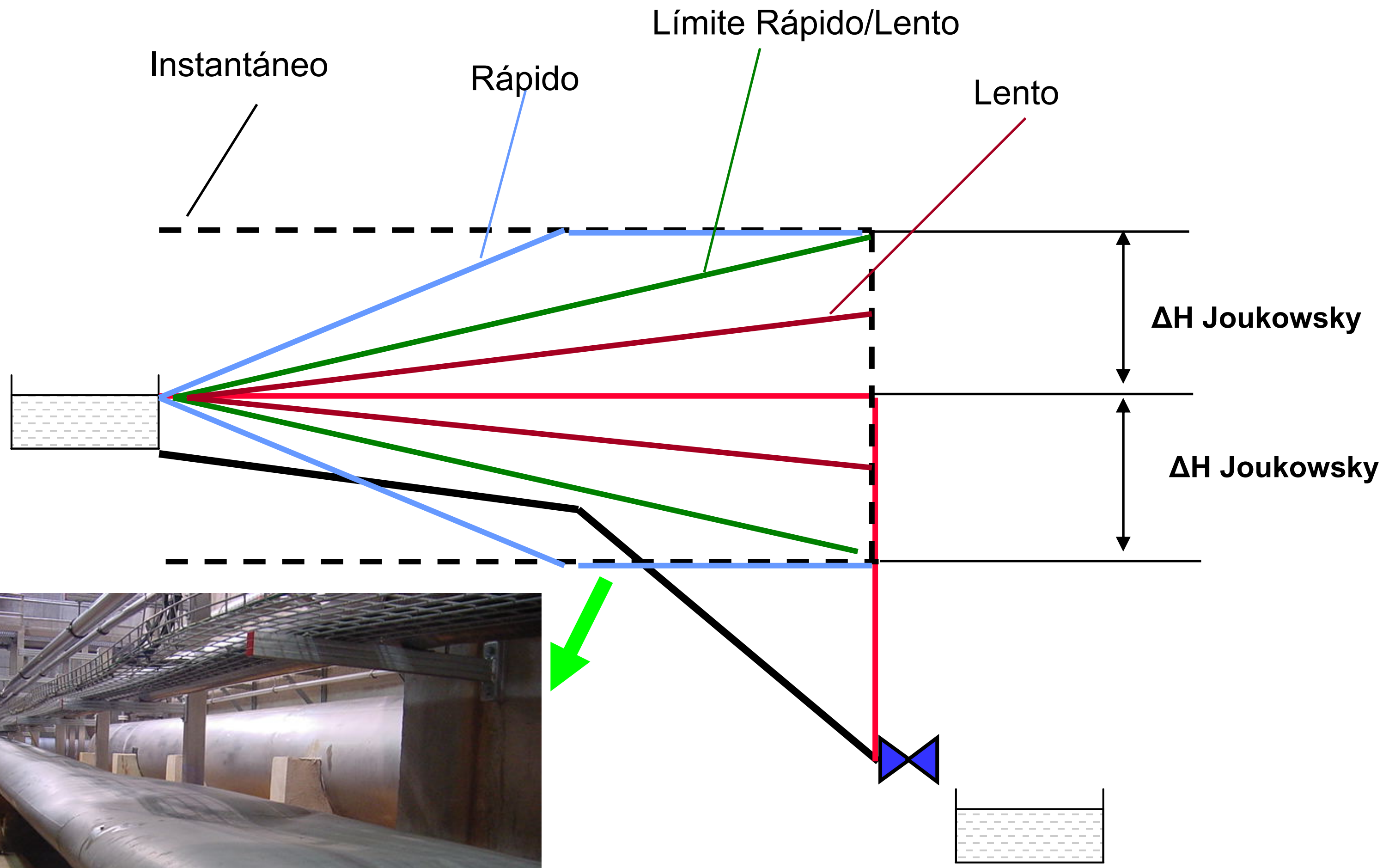
www.ita.upv.es

Envolvente de H piezométrica



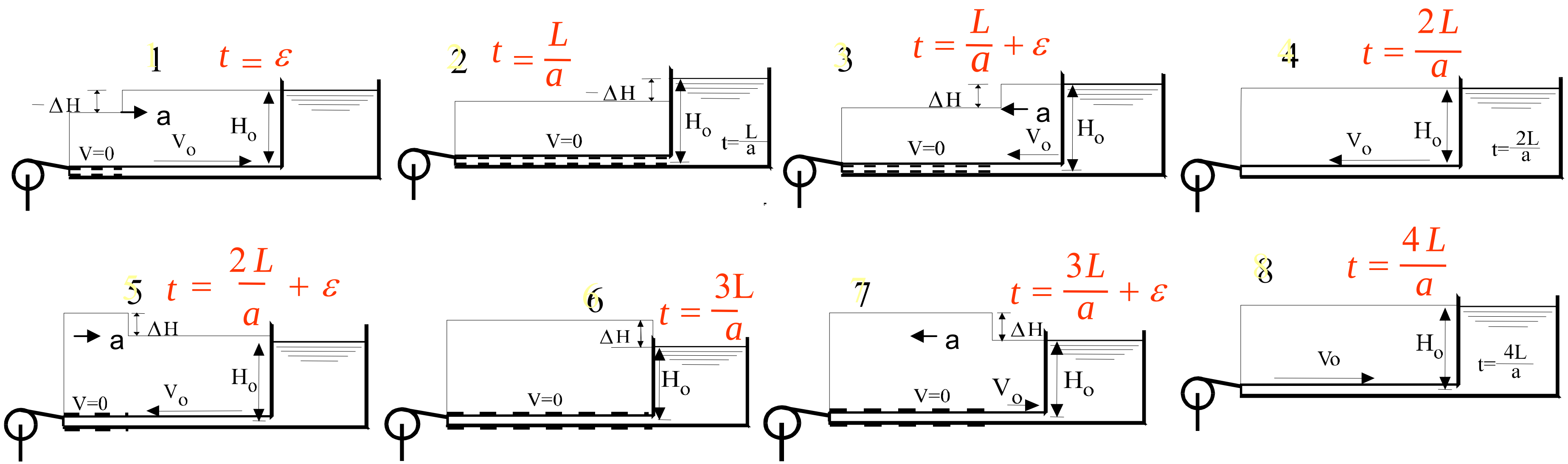
Caso ideal: No hay pérdidas de carga en la tubería

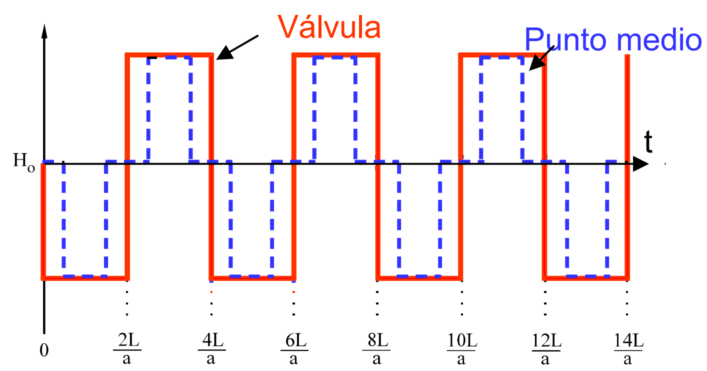
Envolvente de H piezométrica

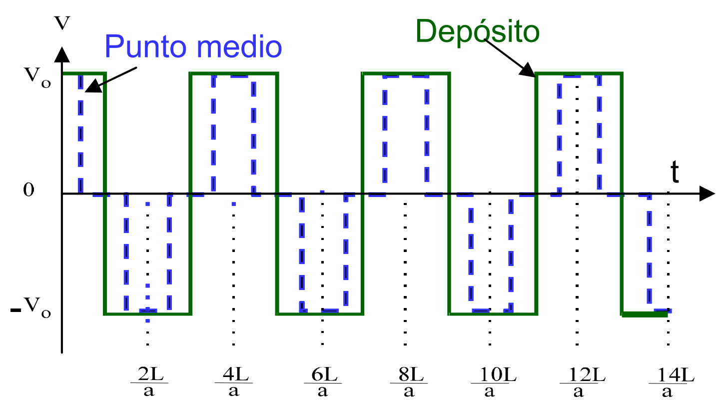


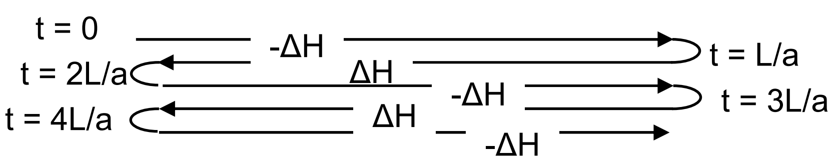
Caso ideal: No hay pérdidas de carga en la tubería

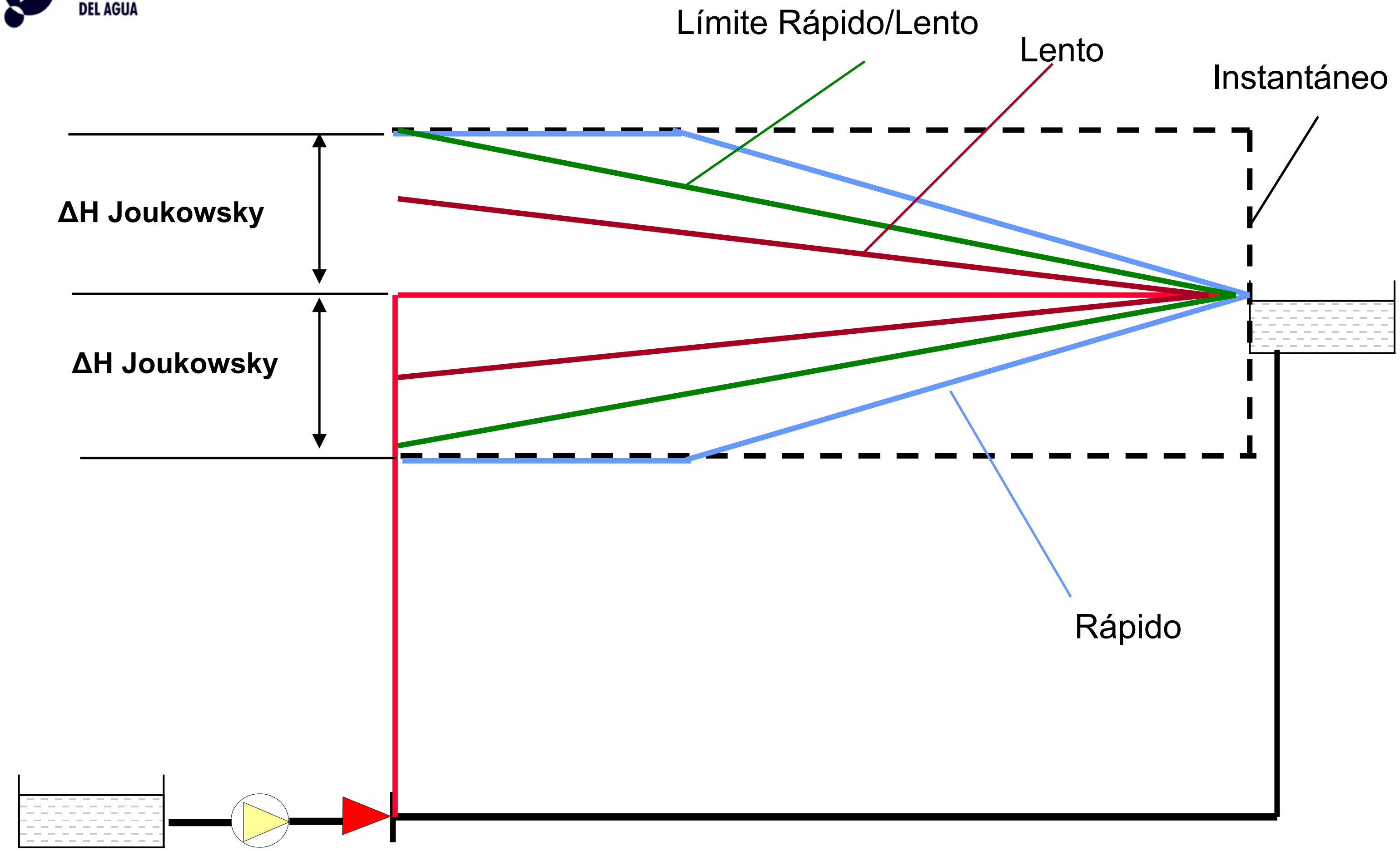
Cierre instantáneo de las válvulas de descarga en un grupo de bombeo



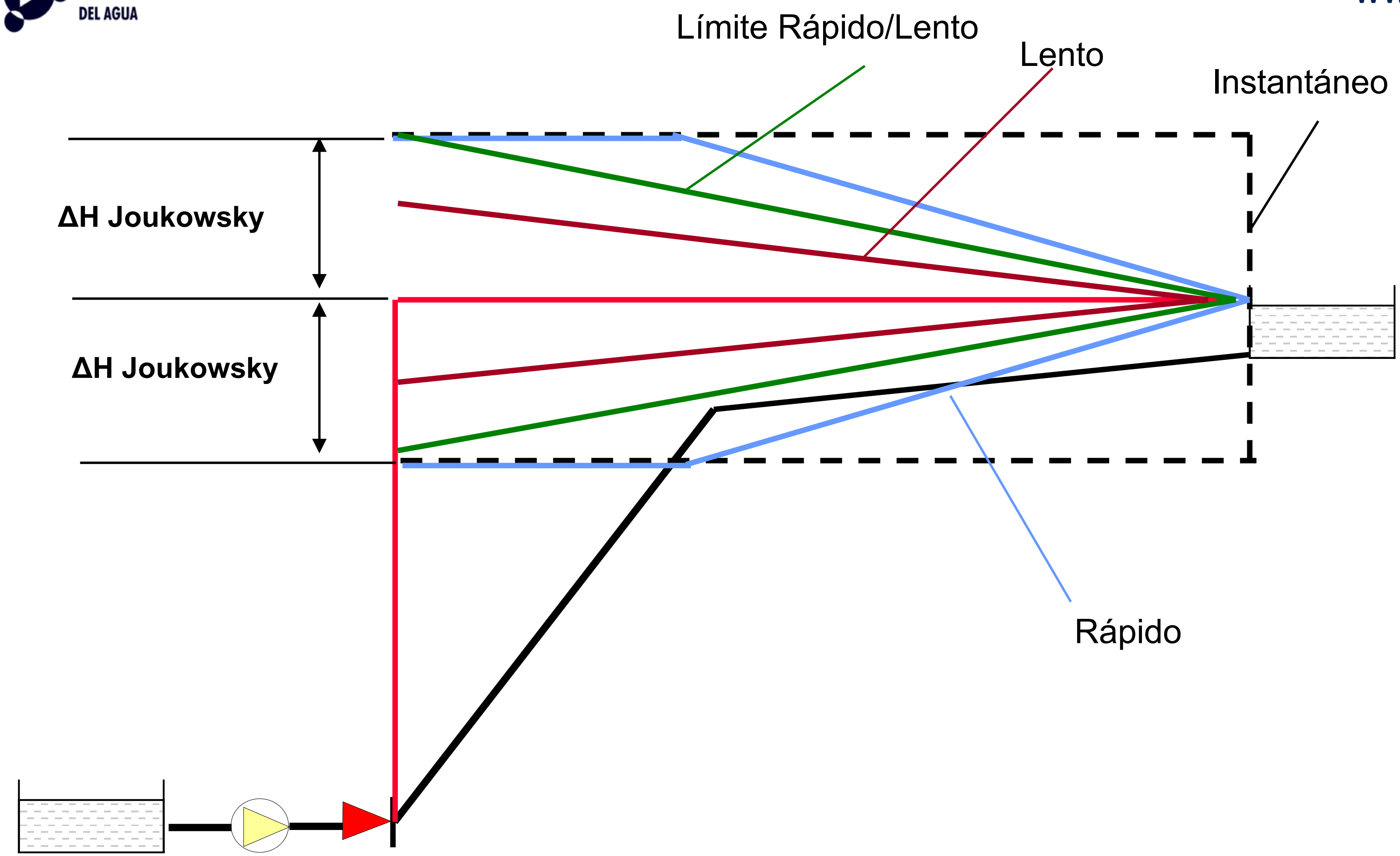








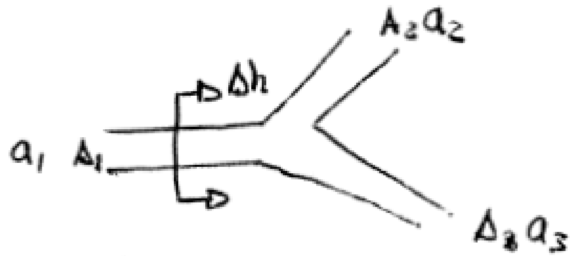
Caso ideal: No hay pérdidas de carga en la tubería



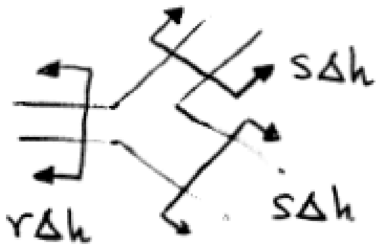
Caso ideal: No hay pérdidas de carga en la tubería

TRANSMISIÓN Y REFLEXIÓN (1)

ANTES



DESPUES



COEFICIENTE TRANSMISIÓN

$$S = \frac{2A_1/a_1}{A_1/a_1 + A_2/a_2 + A_3/a_3} \begin{array}{l} < 2 \\ > 0 \end{array}$$

en general

$$S = \frac{2\, A_e/a_e}{\sum A_i/a_i}$$

COEFICIENTE REFLEXIÓN $r = S - 1$

SIMPLIFICACIÓN

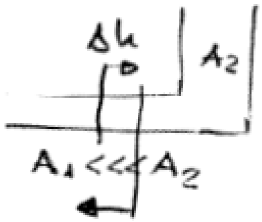
$$a_1 = a_2 = a_3 = \text{—} = a_n$$

$$S = \frac{2A_e}{\sum A_i} \qquad r = S - 1$$

TRANSMISIÓN Y REFLEXIÓN (2)

$$s = \frac{2A_e}{\sum A_i} \qquad r = s - 1$$

DEPÓSITO / SALIDA LIBRE



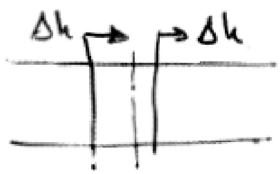
$-\Delta h = r\Delta h$

$$s = \frac{2A_1}{A_1 + A_2} \rightarrow 0$$

$$r = s - 1 = 0 - 1 = -1$$

SE REFLEJA TODA CON SIGNO ⊖

TUBERÍA A CTE



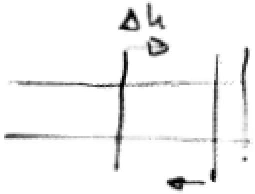
$A_1 = A_2$

$$s = \frac{2A_1}{A_1 + A_2} = \frac{2A_1}{2A_1} = 1$$

$$r = s - 1 = 0$$

SE TRANSMITE TODA

EXTREMO CERRADO



$r\Delta h = \Delta h$

$A_2 = 0$

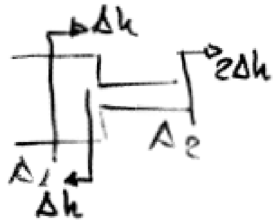
$$s = \frac{2A_1}{A_1 + 0} = 2$$

$$r = 2 - 1 = 1$$

SE REFLEJA LA MISMA

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = 2\Delta h$$

ESTRECHAMIENTO



$A_1 >> A_2$

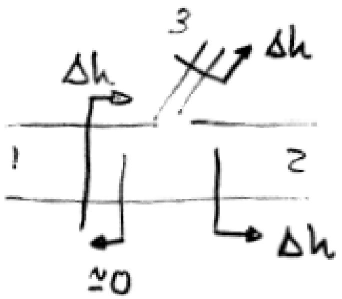
$$s = \frac{2A_1}{A_1 + A_2} \rightarrow 2$$

$$r = s - 1 \rightarrow 1$$

TRANSMISIÓN Y REFLEXIÓN (3)

$$s = \frac{2\Delta e}{\sum \Delta i} \qquad r = s - 1$$

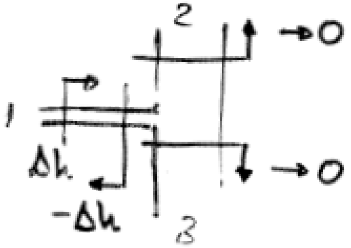
BIFURCACIONES



$$s = \frac{2A_1}{A_1 + A_2 + A_3} \simeq 1$$

$r \simeq 0 \quad (s-1)$

OJO MEDICIÓN



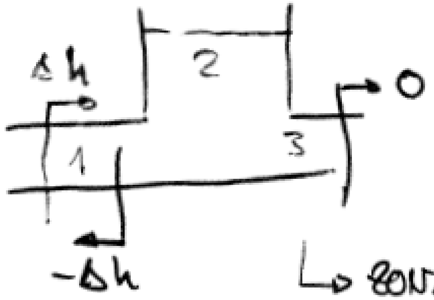
$$s = \frac{2A_1}{A_1 + A_2 + A_3} \rightarrow 0$$

$r = s - 1 \Rightarrow -1$

ONDA ENCERRADA

CALDERÍN

$A_2 \gg A_1, A_3$

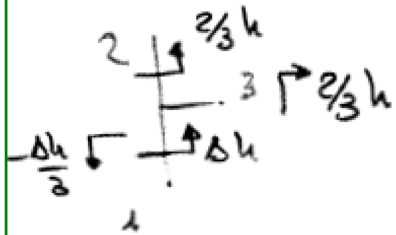


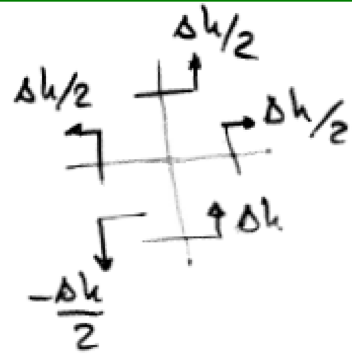
$$s = \frac{2A_1}{A_1 + A_2 + A_3} \rightarrow 0$$

$r \Rightarrow -1 \quad (s-1)$

↳ ZONA PROTEGIDA

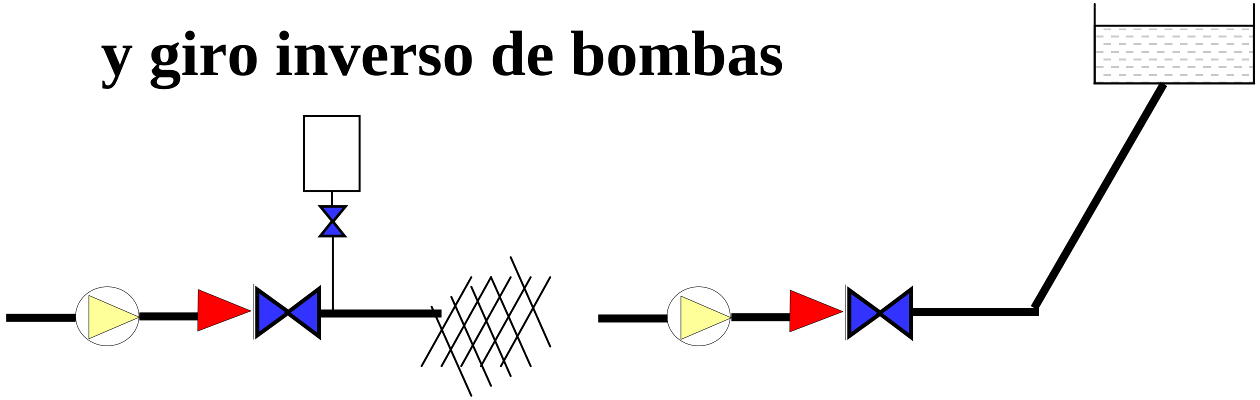
TUB. IGUALES





INSTALACIÓN DE VÁLVULAS DE RETENCIÓN

Evitar vaciado conducciones y giro inverso de bombas

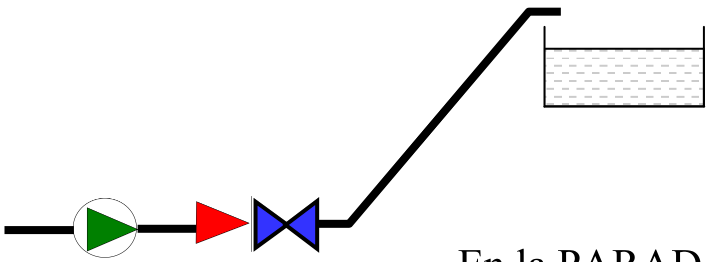


EFECTOS DE LAS VÁLVULAS DE RETENCIÓN

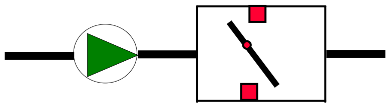
GENERACIÓN DE G.D.A.

El cierre o apertura brusca de la válvula de retención genera sobrepresiones en el sistema.

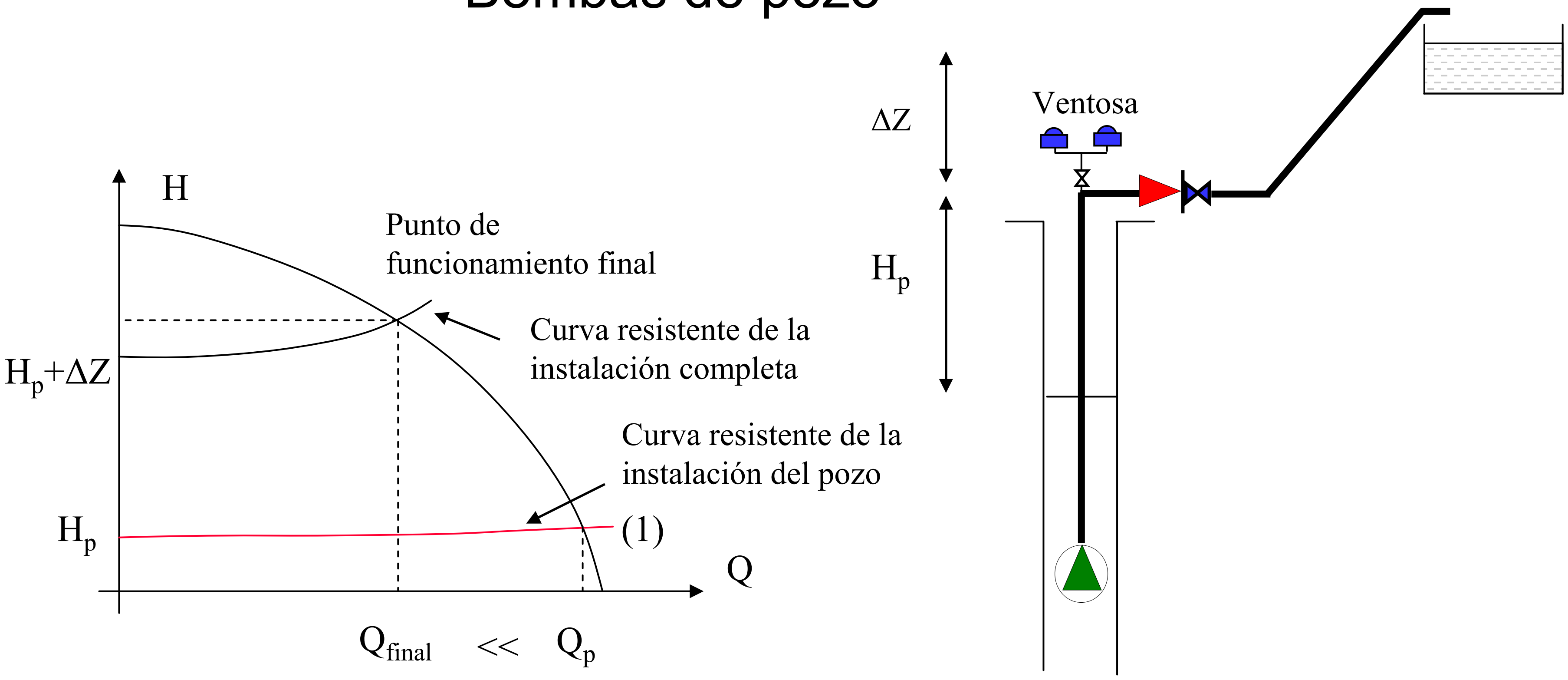
En el ARRANQUE, interesa apertura lenta de la VR para acelerar la columna de agua situada aguas abajo de manera lenta



En la PARADA, un cierre lento de la VR frena poco a poco el flujo inverso. Actúa a modo de válvula de alivio. SI CIERRE CONTROLADO Atención posibilidad de giro inverso de la bomba.



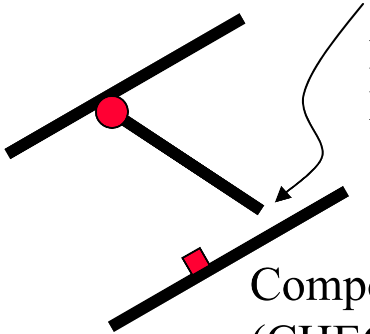
Bombas de pozo



El agua llega a las ventosas con un caudal superior al de régimen (punto 1) y se encuentra la VR cerrada y una columna quieta aguas abajo de la VR con presión ΔZ.

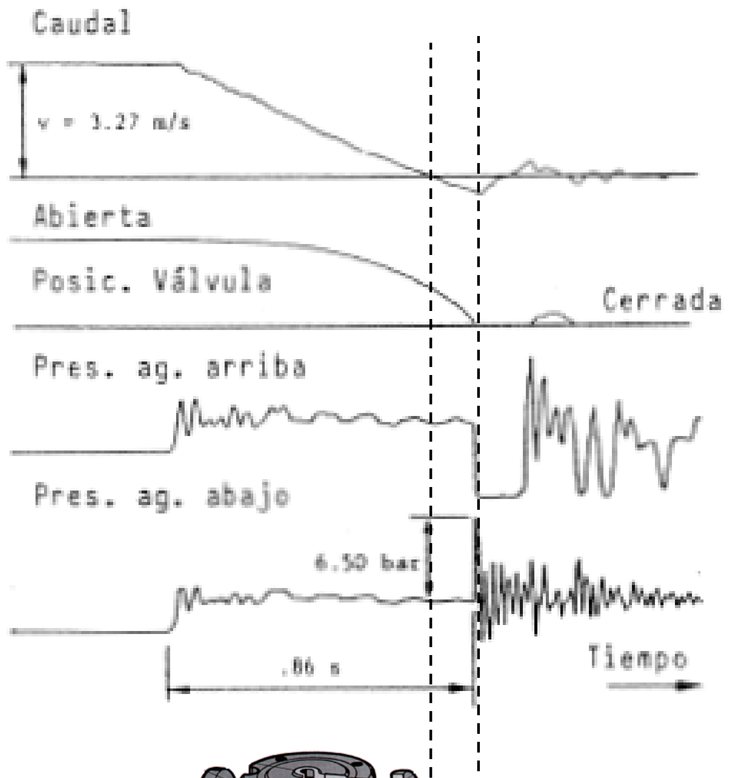
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA VR

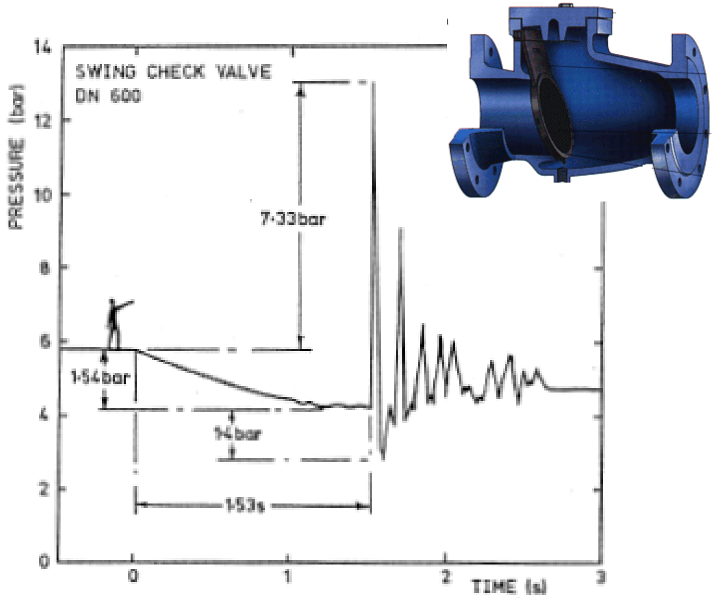
VR ideal: Cierra cuando V=0

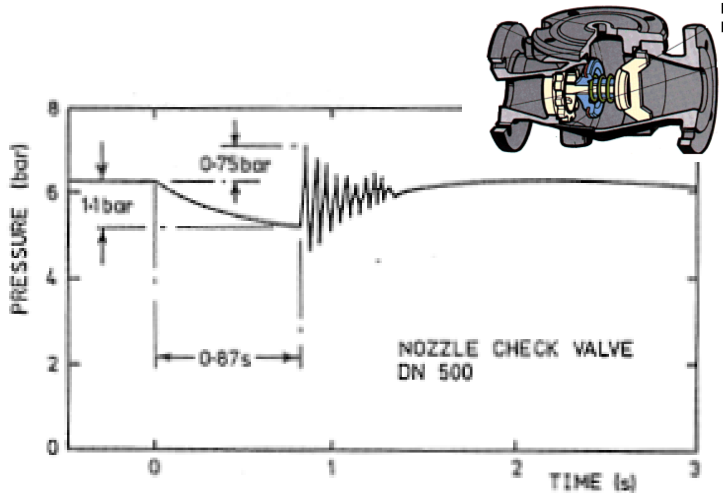


Flujo de
Retorno V_r

Comportamiento “no ideal” de la V.R.
(CHECK VALVE SLAM)



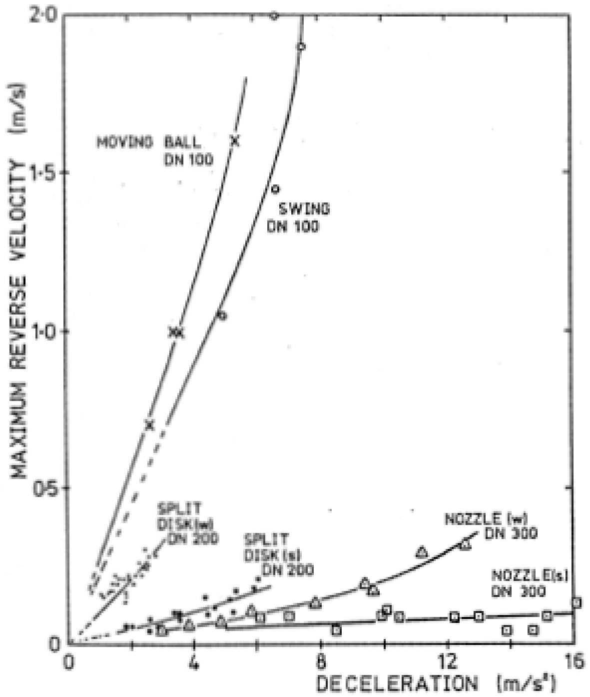




COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA VR

Datos experimentales

V_r

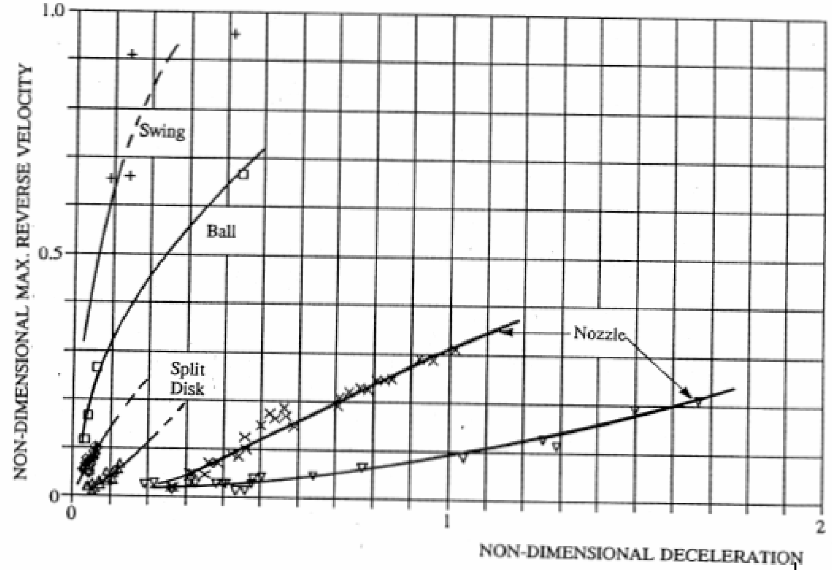


$$\frac{dV}{dt} \cong \frac{V_0}{T}$$

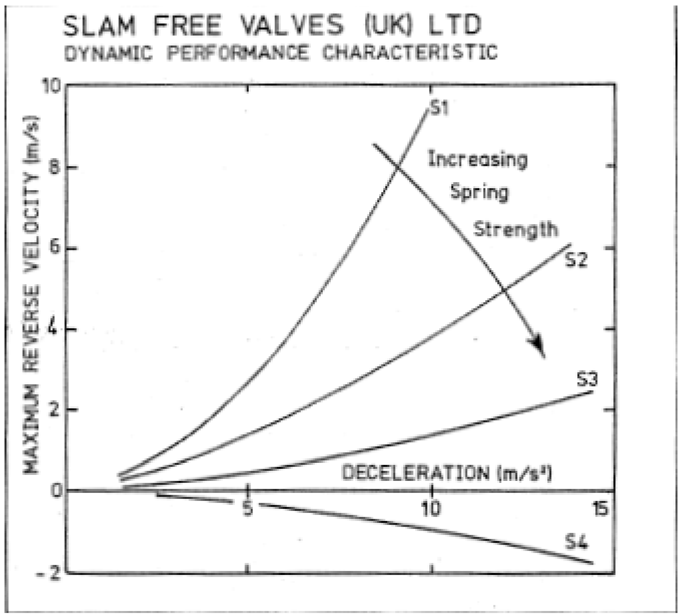
V_0= velocidad directa

T = Tiempo que tarda en anularse
la velocidad directa

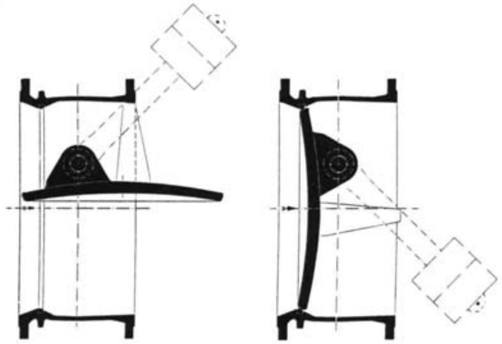
$\frac{V_r}{V_0}$

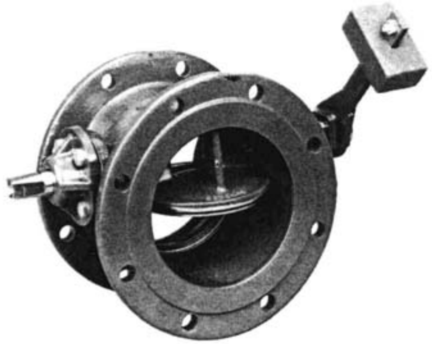


$$\frac{D}{V_0^2} \cdot \left|\frac{dV}{dt}\right|$$



Válvula de mariposa con contrapeso

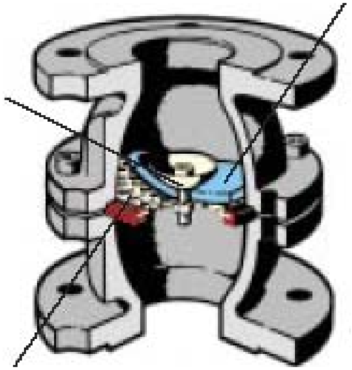


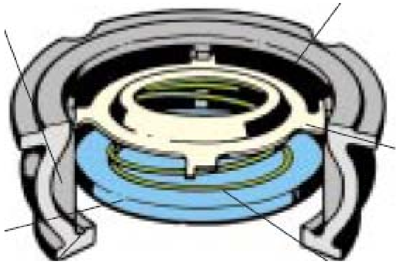


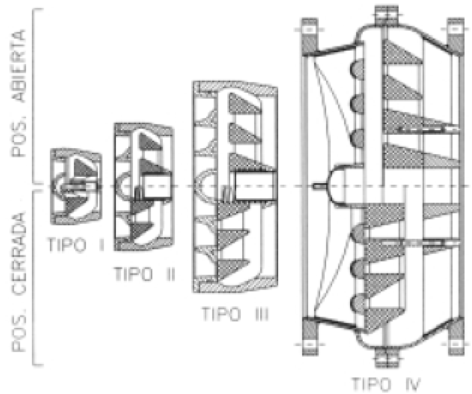
Acelerar el cierra para que este se produzca cuando V=0 (no veloc. Retorno)

Válvula de mariposa con Contrapeso y amortiguador

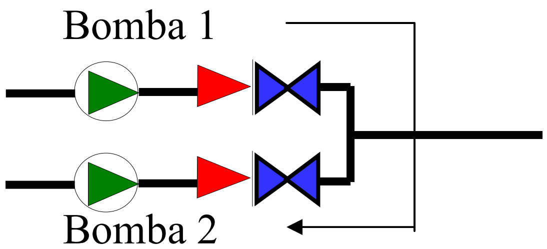
Si hay veloc. retorno, cerrar la VR lentamente







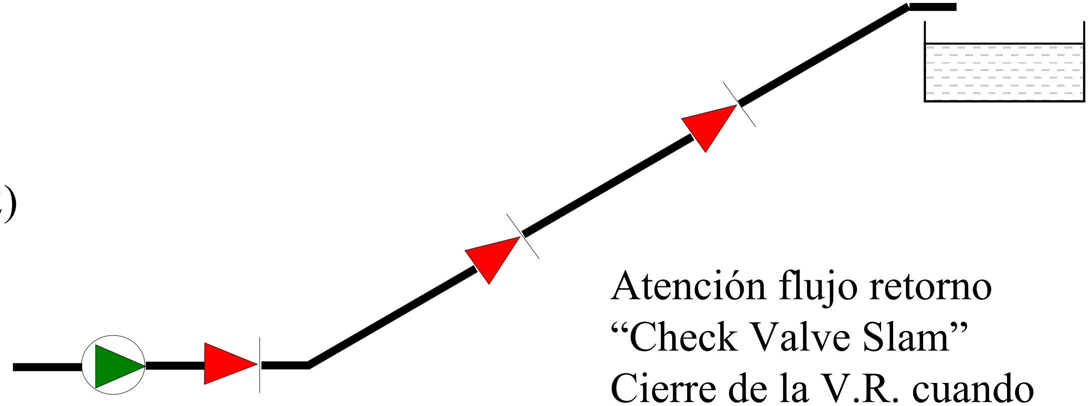
Bombas en paralelo



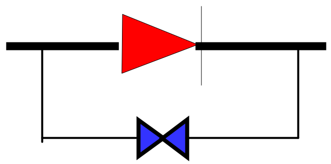
Evitar recirculación cuando una bomba en funcionamiento (B.1) y otra parada (B.2)

VR con cierre controlado, evitando que, al parar una bomba se produzca "clapetazo", que da origen a P altas a.arriba y a.abajo.

Dispositivo de protección contra golpe de ariete (G.D.A.)

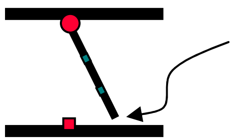


Atención flujo retorno "Check Valve Slam" Cierre de la V.R. cuando existe Flujo de retorno, lo que genera G.D.A.



By-pass

Válvula de menor diámetro para dejar paso a pequeño flujo retorno (actúa como una V. de alivio)

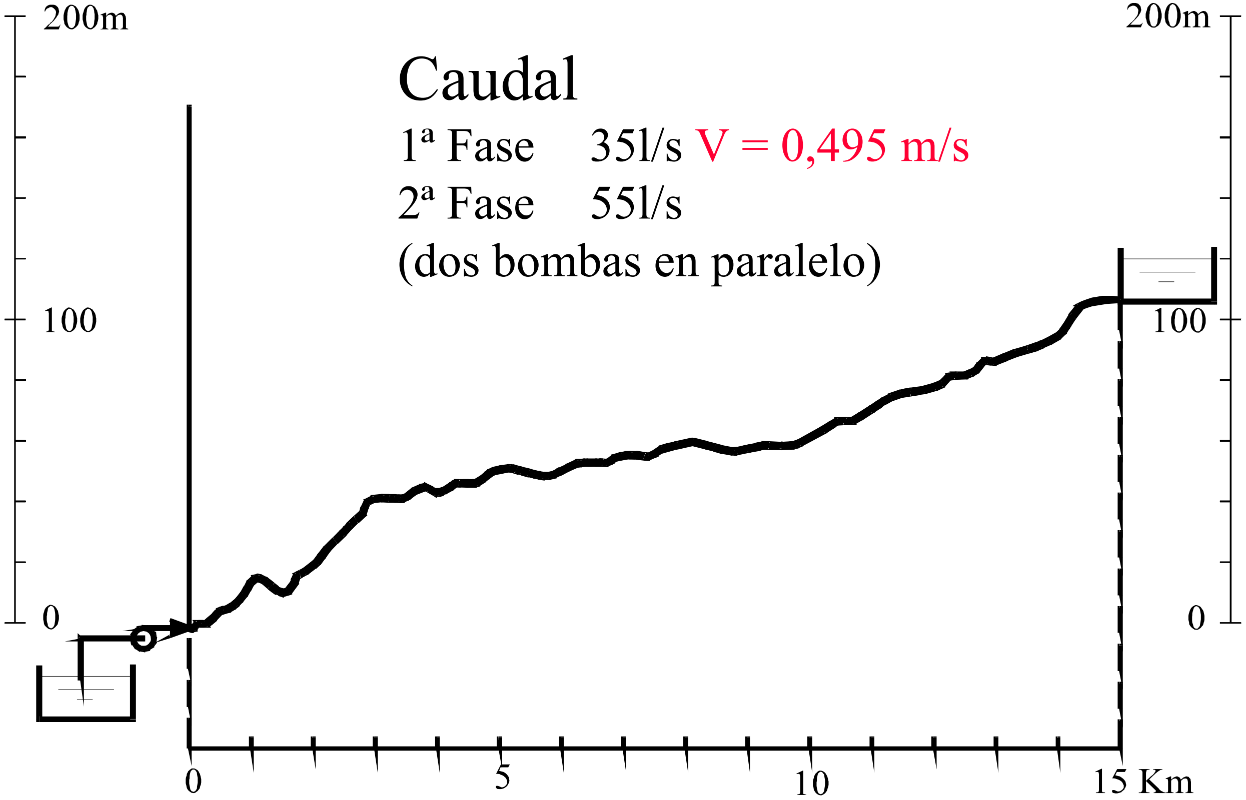


Perforar la clapeta

Procedimiento para la evaluación de riesgos

1. Definir sistema, límites seguridad y condiciones aceptables o no.
2. Listar posibles causas e identificar los peores casos.
3. Obtener datos fundamentales (celeridad, pulso de Joukowski,...)
4. Caracterizar tramos y simplificar.
5. Esbozar línea alturas piezométricas e identificar problemas principales.
6. Identificar estrategias de protección y/o supresión y diseñar dispositivos de protección.
7. Preparar especificaciones para el análisis por ordenador.

Ejemplo. Sistema y límites.



Caudal

1ª Fase 35l/s V = 0,495 m/s

2ª Fase 55l/s

(dos bombas en paralelo)

Conducción

Material acero

Diámetro 300mm

Espesor 12mm - 7 Km

10mm - 5 Km

8mm - 3 Km

Límites aceptables

a) No cavitación. Presión mínima -6mca

b) Máximas limitadas.

c) Evitar cargas de choque (VR adecuadas)

Listado de causas. Datos fundamentales

Lista de causas

a) Arranque de bombas (aumento de presión)
b) Parada con cierre previo (caída de presión)
c) Fallo de energía eléctrica (caída de presión)
d) Parada de una bomba (caída de presión)

Orden de gravedad

1) Fallo de energía eléctrica
2) Parada de una bomba
3) Parada con cierre previo

Datos fundamentales

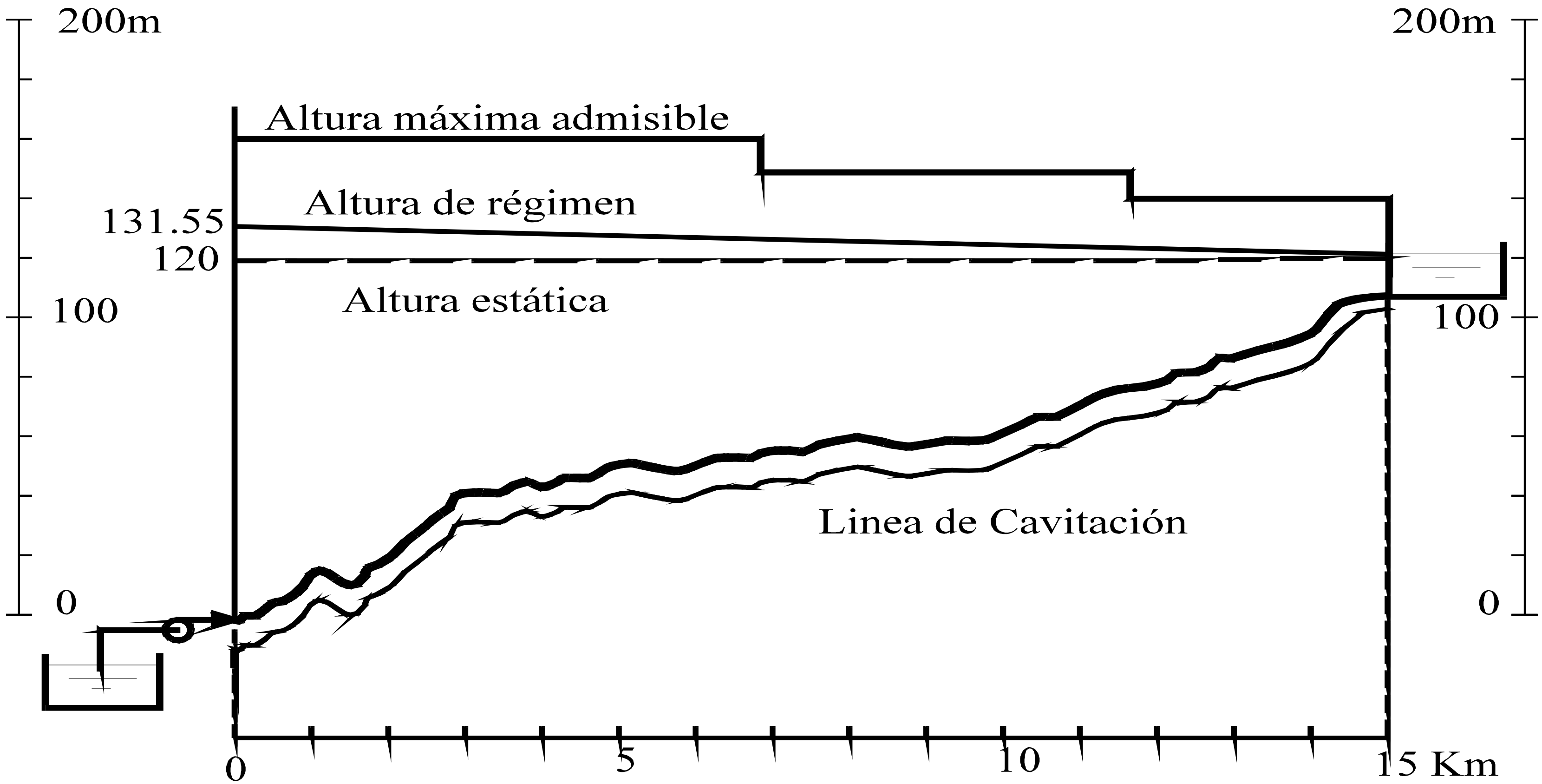
$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + k\dfrac{D}{e}}} = \begin{cases} \xrightarrow{D/e=25} 1269\text{m/s} \\ \xrightarrow[D/e=37.5]{} 1207\text{m/s} \end{cases} \quad a=1250\text{m/s}$$

$$\Delta H = H_j = -\frac{a\,\Delta V}{g} = -\frac{1250 \text{ x } 0.495}{9.81} = 63.07\text{m}$$

$$T = 2L/a = 24\text{s}$$

$$t_B = 7\text{s}$$

Idealizaciones



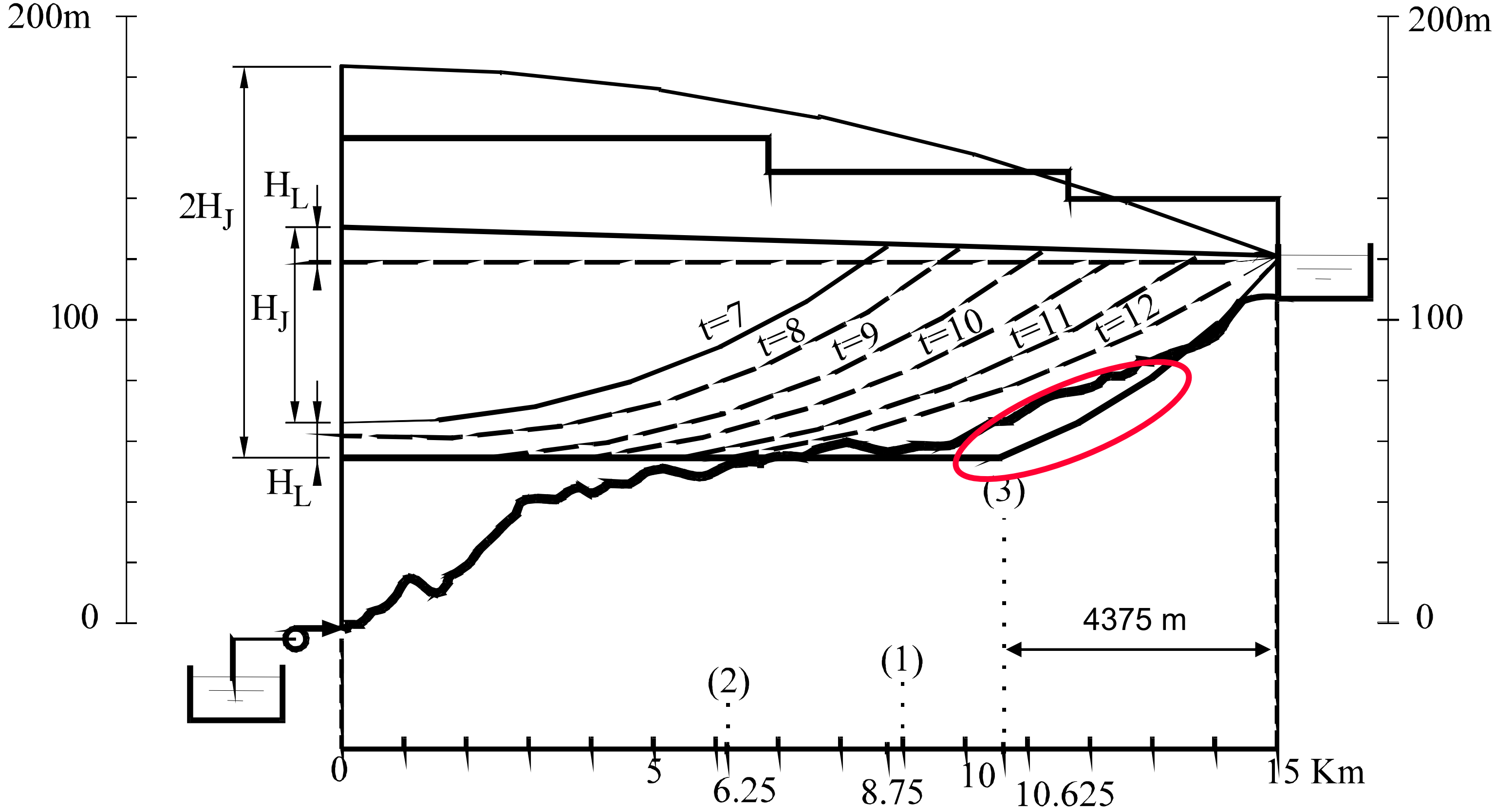
Bomba equiv. a 2 en paralelo

Sumar Inercia

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.035}{\pi \frac{0.3^2}{4}} = 0.495 \text{ m/seg}$$

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = 0{,}0185 \frac{15000}{0{,}3} \frac{0{,}495^2}{2g} = 11{,}55 \; mca$$

Esbozo de líneas e identificación de problemas



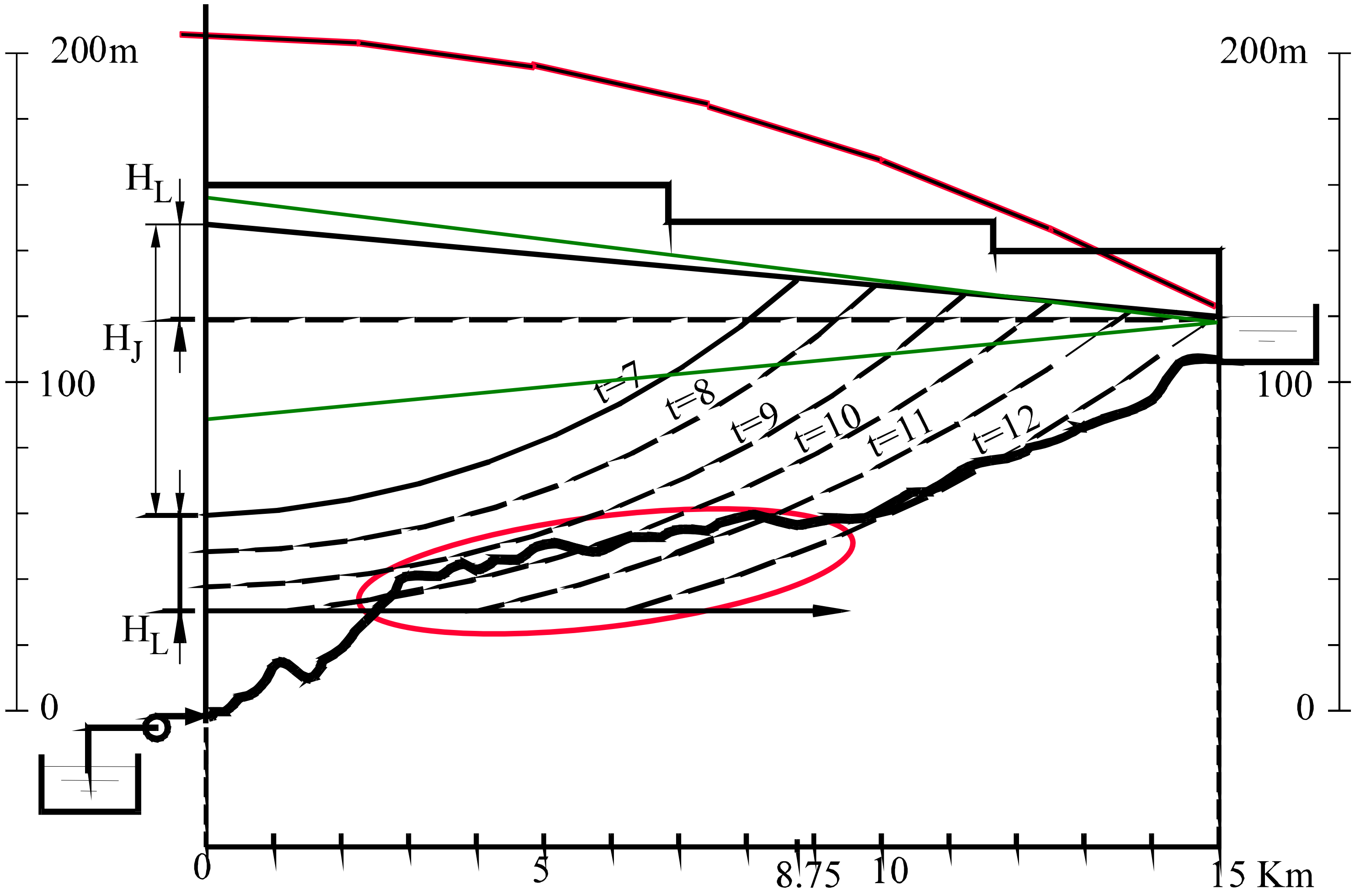
(1) $H_B = h_E - \Delta H_J = 131.55 - 63.07 = 68.55$ mca
frente de la onda 7 x 1250 = 8750 m
cola de la onda en la VR = 0

longitud onda 8750m

(2) frente de la onda 12 x 1250 = 15000 m
cola de la onda 15000 - 8750 = 6250 m

(3) frente de la onda de vuelta 15.5 x 1250 = 15000 + 4375
cola de la onda de ida 15000 + 4375 - 8750 = 15000- 4375 = 10625 m

Incremento de caudal a 55 l/s



- V_0 = 0.778 m/seg.
- h_L = 27.2 m.c.a.
- Pulso de Joukowski: H_J = 99 m.c.a.

Envolvente con protección de calderín