

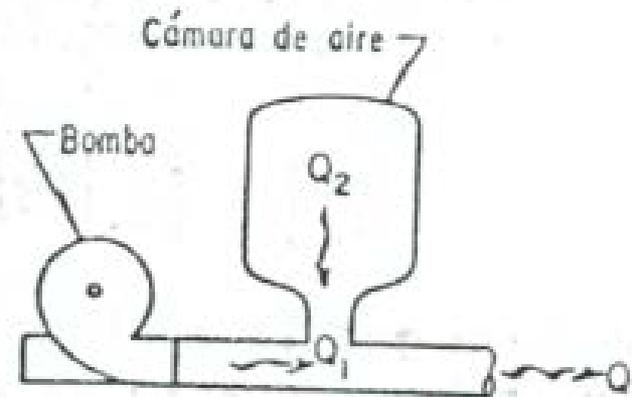
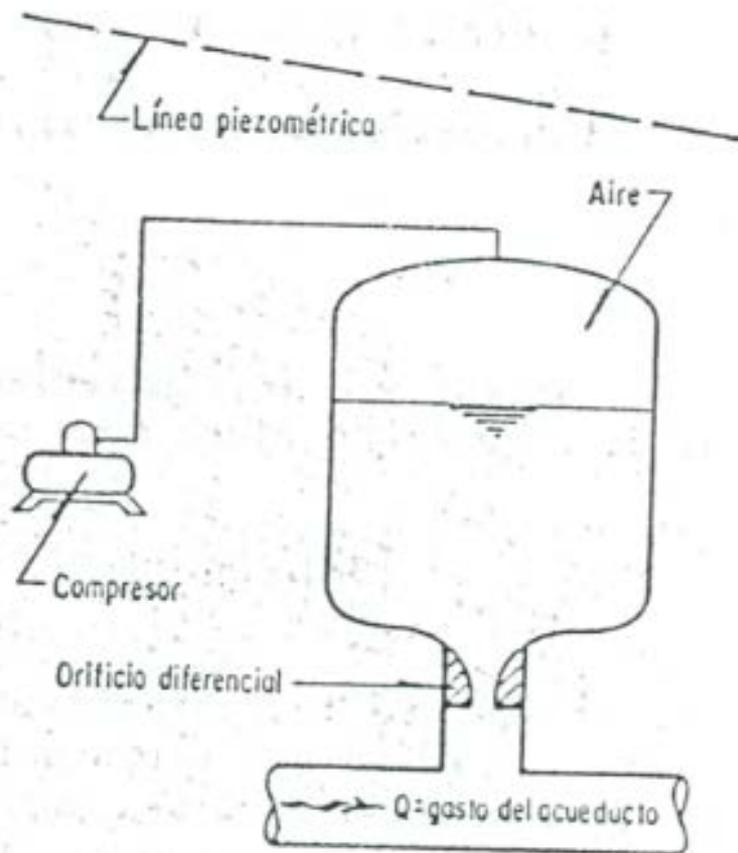
Transitorios Hidráulicos en Tuberías a Presión

Curso posgrado y educación permanente
2023

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

DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN - CÁMARAS DE AIRE

Cámaras de Aire

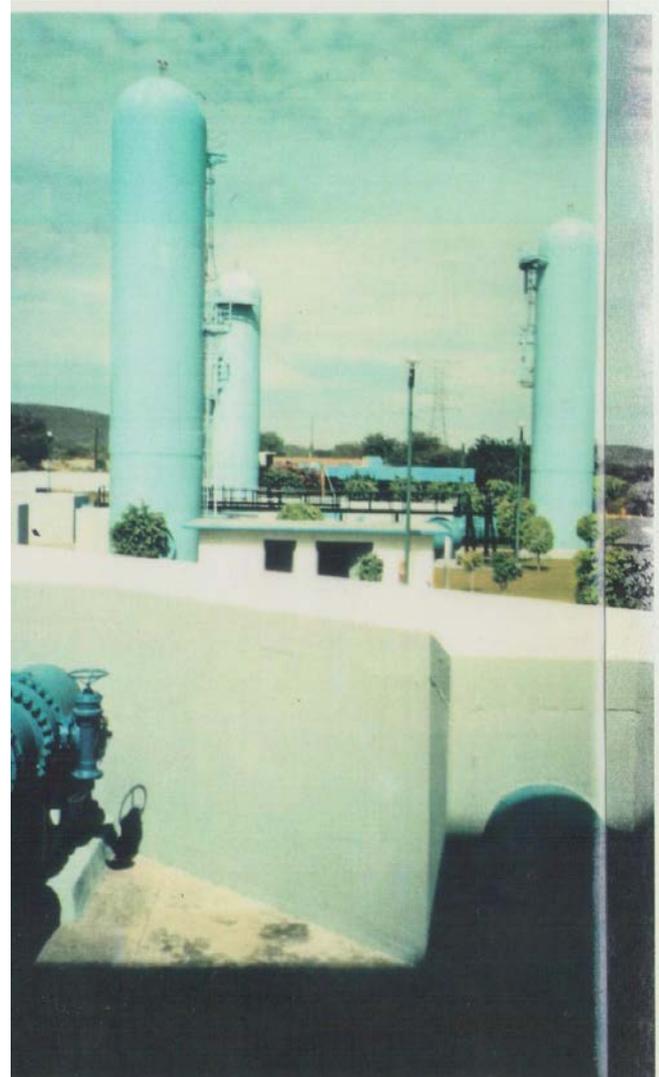
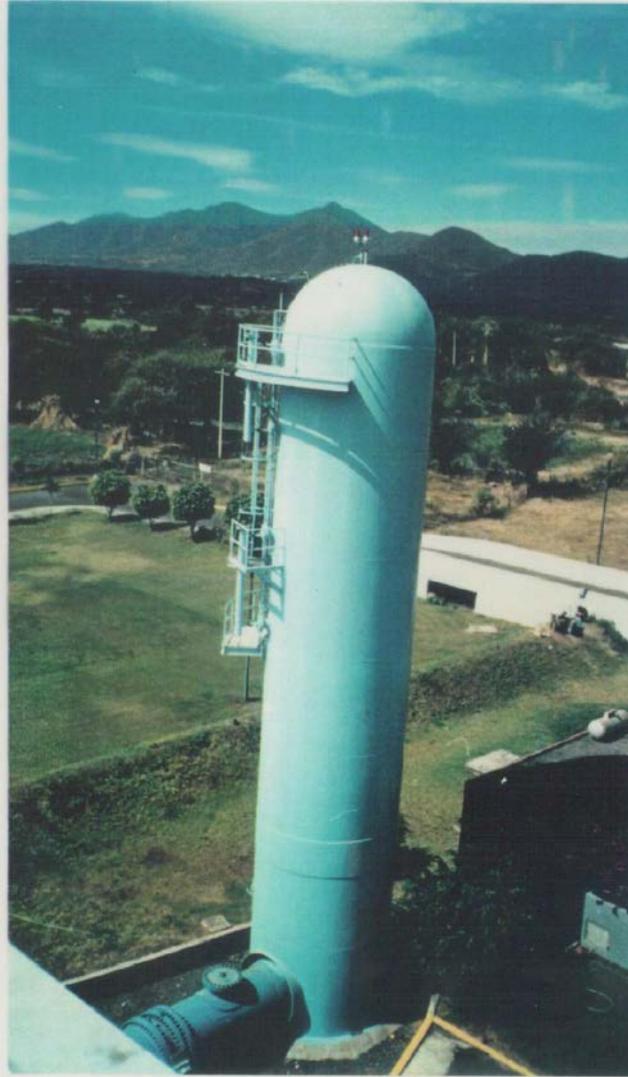


Ubicación de la cámara de aire en el sistema de bombeo

Cámaras de Aire



Cámaras de Aire



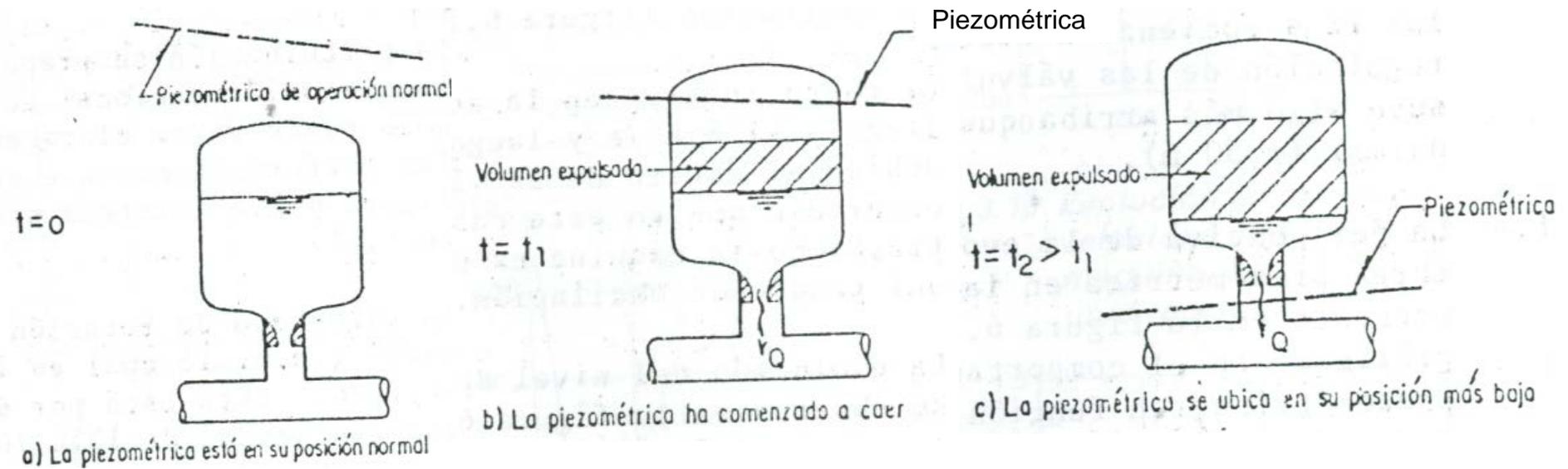
Cámaras de Aire



Cámaras de Aire



Cámaras de Aire: operación ideal



Cámaras de Aire: operación ideal

- Como controla un transitorio hidráulico una Cámara de Aire:

Reduce la variación de $Q(t)$ luego del paro del bombeo, lo cual genera reducciones en la amplitud de la onda.

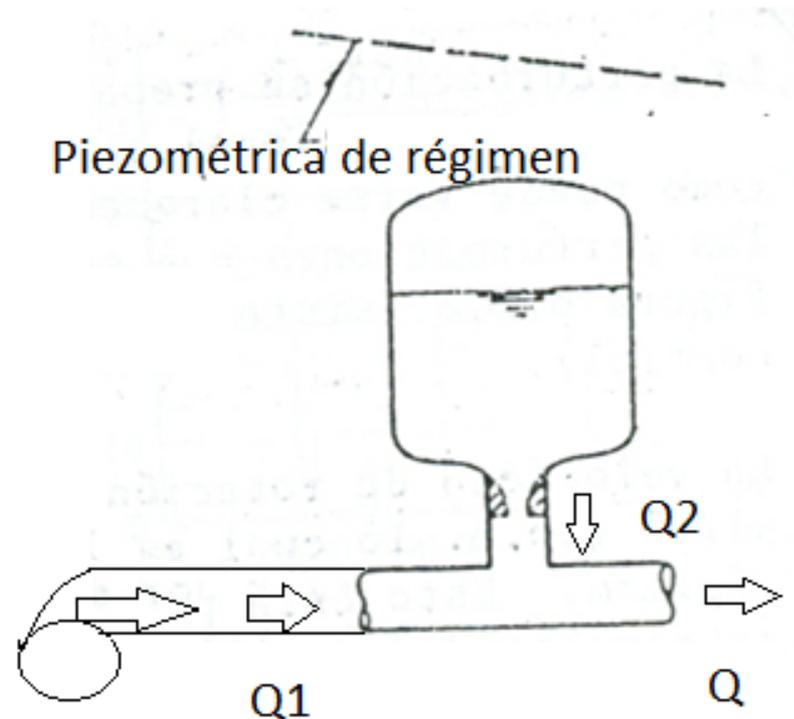
Antes del paro: $Q_1 = Q$

Después del paro: $Q(t) = Q_1(t) + Q_2(t)$

$$\Rightarrow \frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_1}{dt} + \frac{dQ_2}{dt}$$

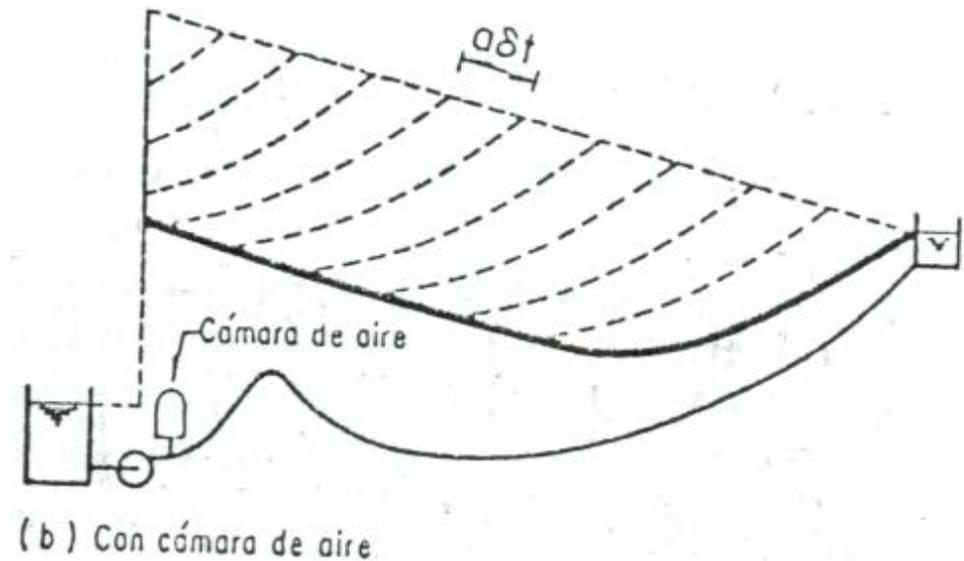
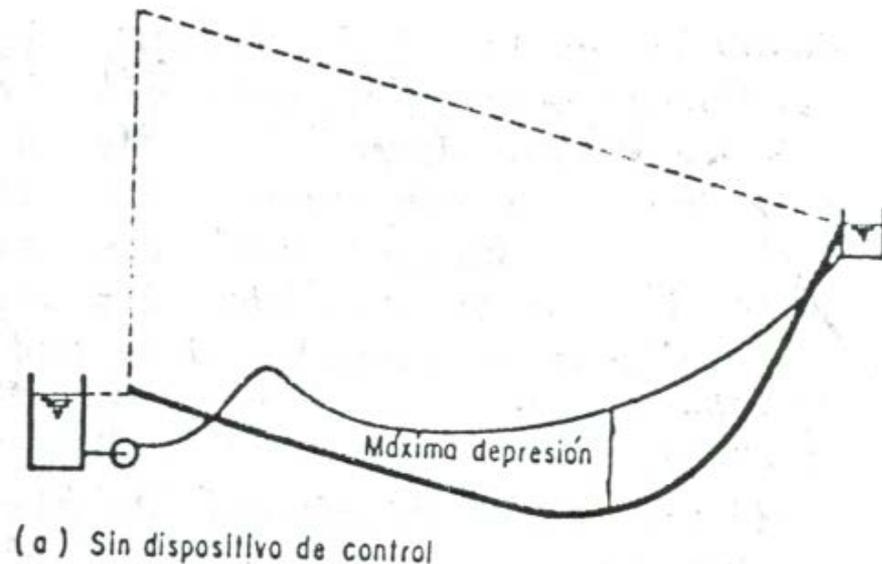
$$\left. \begin{array}{l} \frac{dQ_1}{dt} < 0 \\ \frac{dQ_2}{dt} > 0 \end{array} \right\} \left| \frac{dQ}{dt} \right| < \left| \frac{dQ_1}{dt} \right|$$

Acción de la CA: reducir dQ para reducir dh .



Cámaras de Aire: operación ideal

- Efectos de la Cámara de Aire ante la onda de depresión en el paro de un equipo de bombeo:



Cámaras de Aire

□ Ventajas:

- Reduce la magnitud de la onda durante un transitorio.
- No es necesario topografías con puntos altos para su instalación, a diferencia que con los Tanques de Oscilación y los Tanque Unidireccionales.
- Puede colocarse próxima a la planta de bombeo, lo que facilita su mantenimiento, alimentación de aire comprimido, etc.

□ Desventajas:

- Requiere disponer de compresores, a menos que sea con membrana.
- Orificio diferencial puede requerir mínimo mantenimiento para asegurar su operación correcta.
- Reduce pero no suprime la onda de depresión, pudiéndose requerir otros dispositivos de protección adicionales.

Cámaras de Aire: ejemplo 1

$L=6000$ m

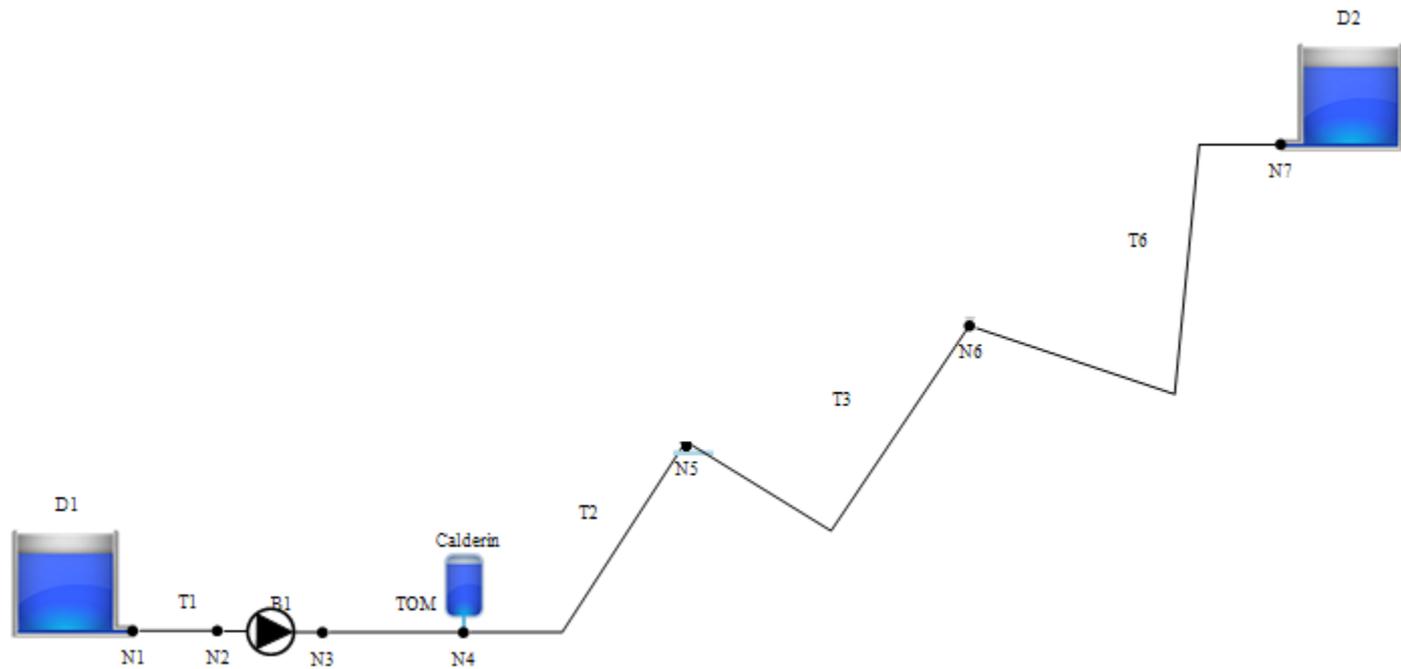
$D=350$ mm

$Q=125.6$ l/s

$a=606.6$ m/s

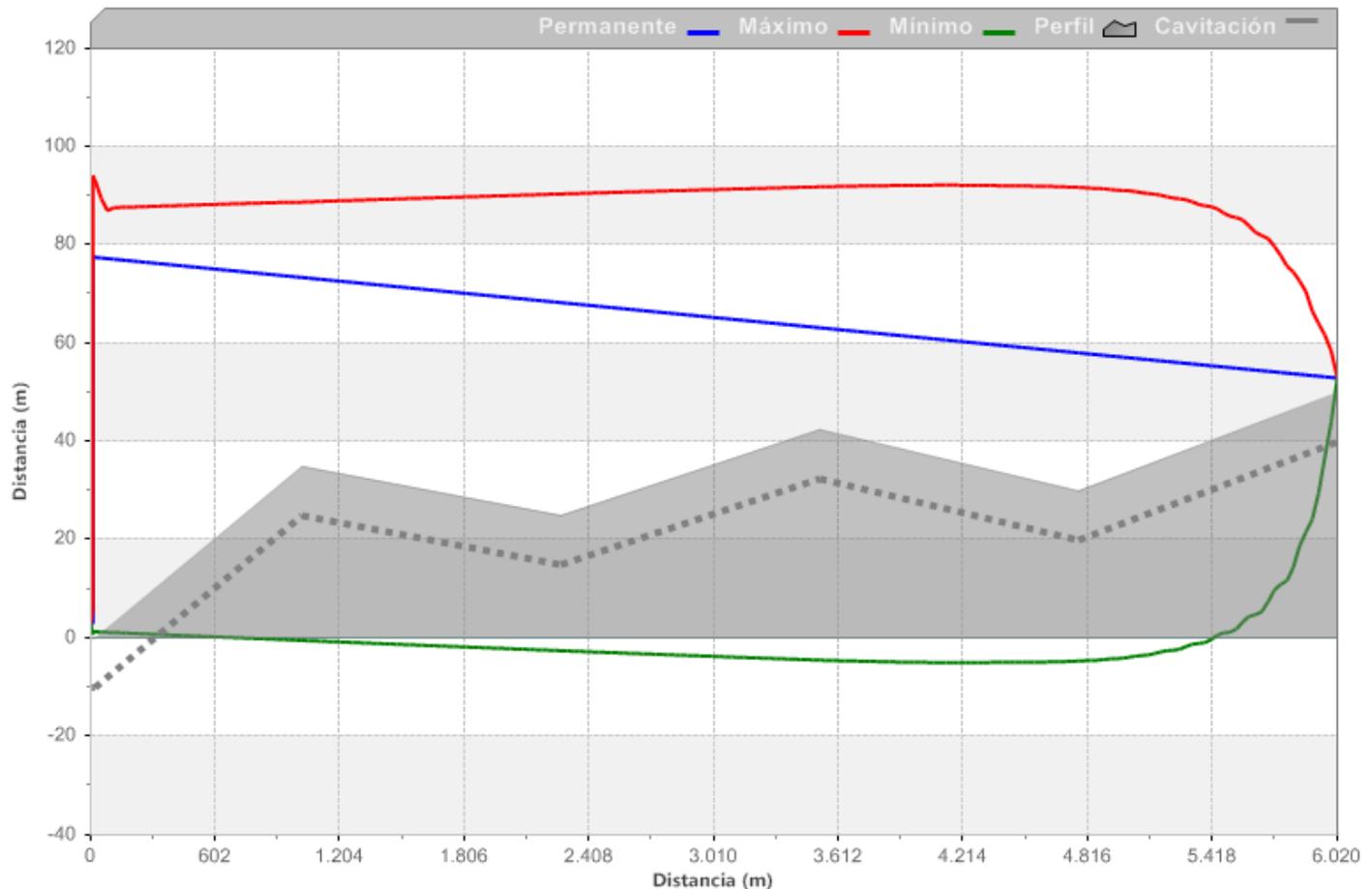
$T=2L/a=19.8$ s

$T_{\text{simulación}}=100$ s



Cámaras de Aire: ejemplo 1

- Líneas de cargas piezométricas extremas sin protección



Cámaras de Aire: ejemplo 1

□ Con Cámara de Aire

$$D_{CA}=2 \text{ m}$$

$$\text{Altura}_{CA}=4 \text{ m}$$

$$\text{Vol}_{CA}=12.57 \text{ m}^3$$

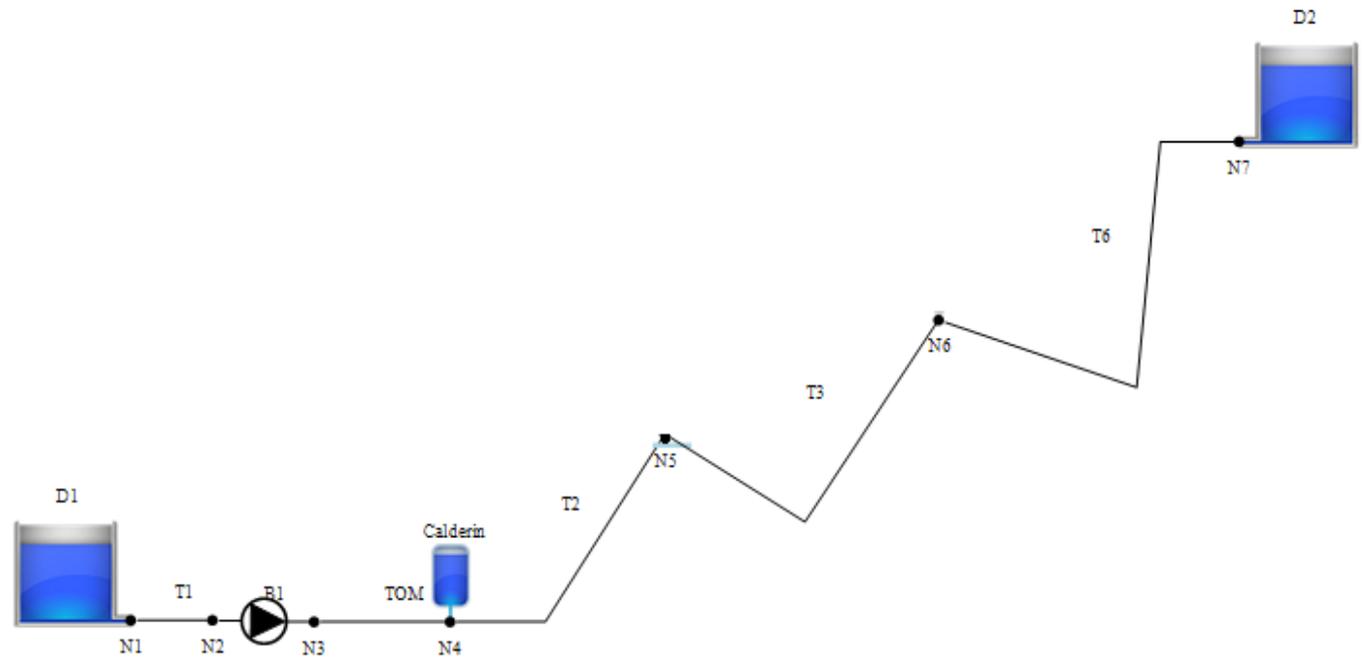
$$\text{presión}_{CA}=20 \text{ m.c.a}$$

$$D_{\text{conex}}=0.25 \text{ m}$$

$$L_{\text{conex}}=3 \text{ m}$$

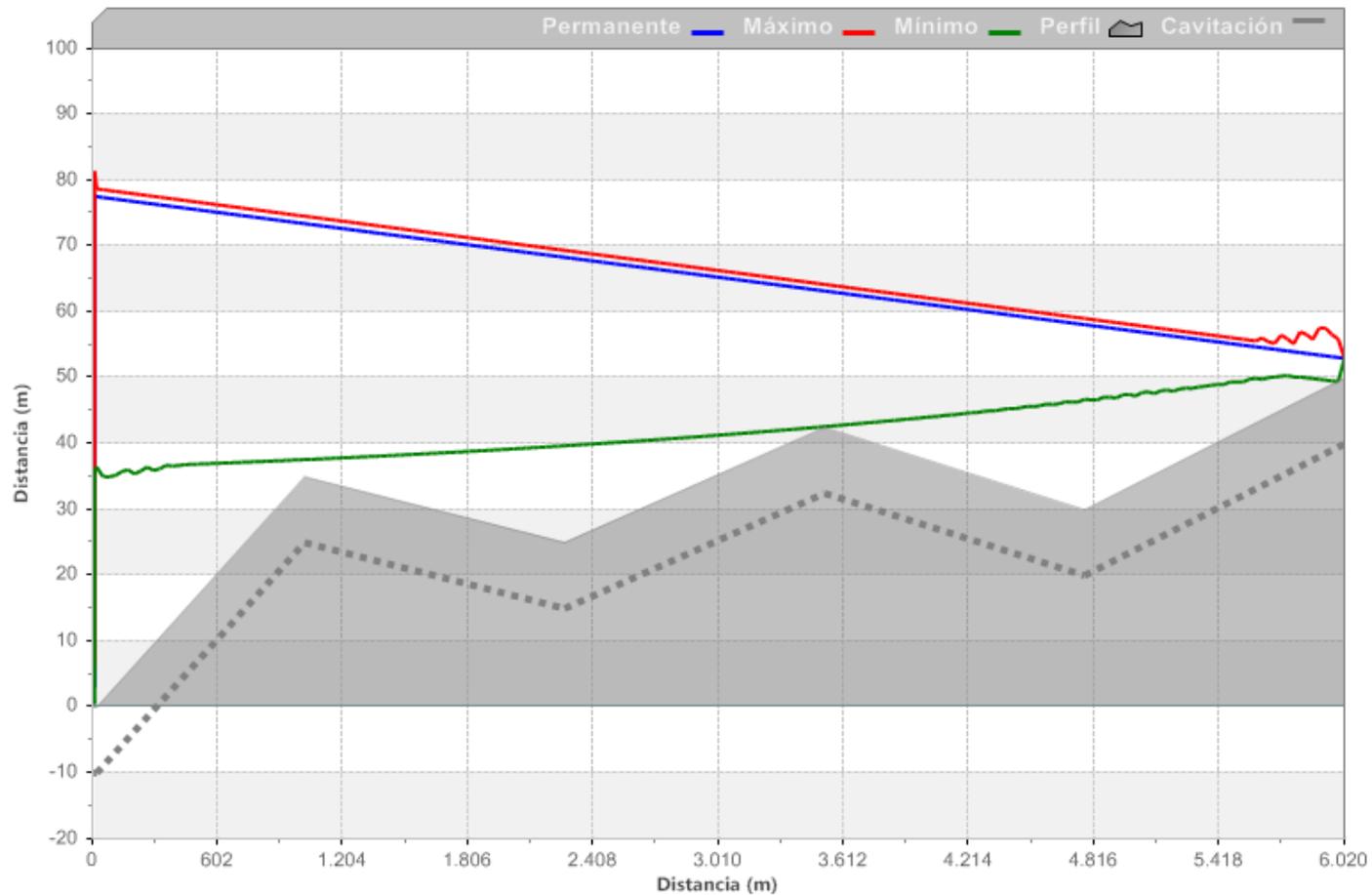
$$K_V=6.61 \text{ s}^2/\text{m}^5$$

$$K_{LL}=10.5 \text{ s}^2/\text{m}^5$$



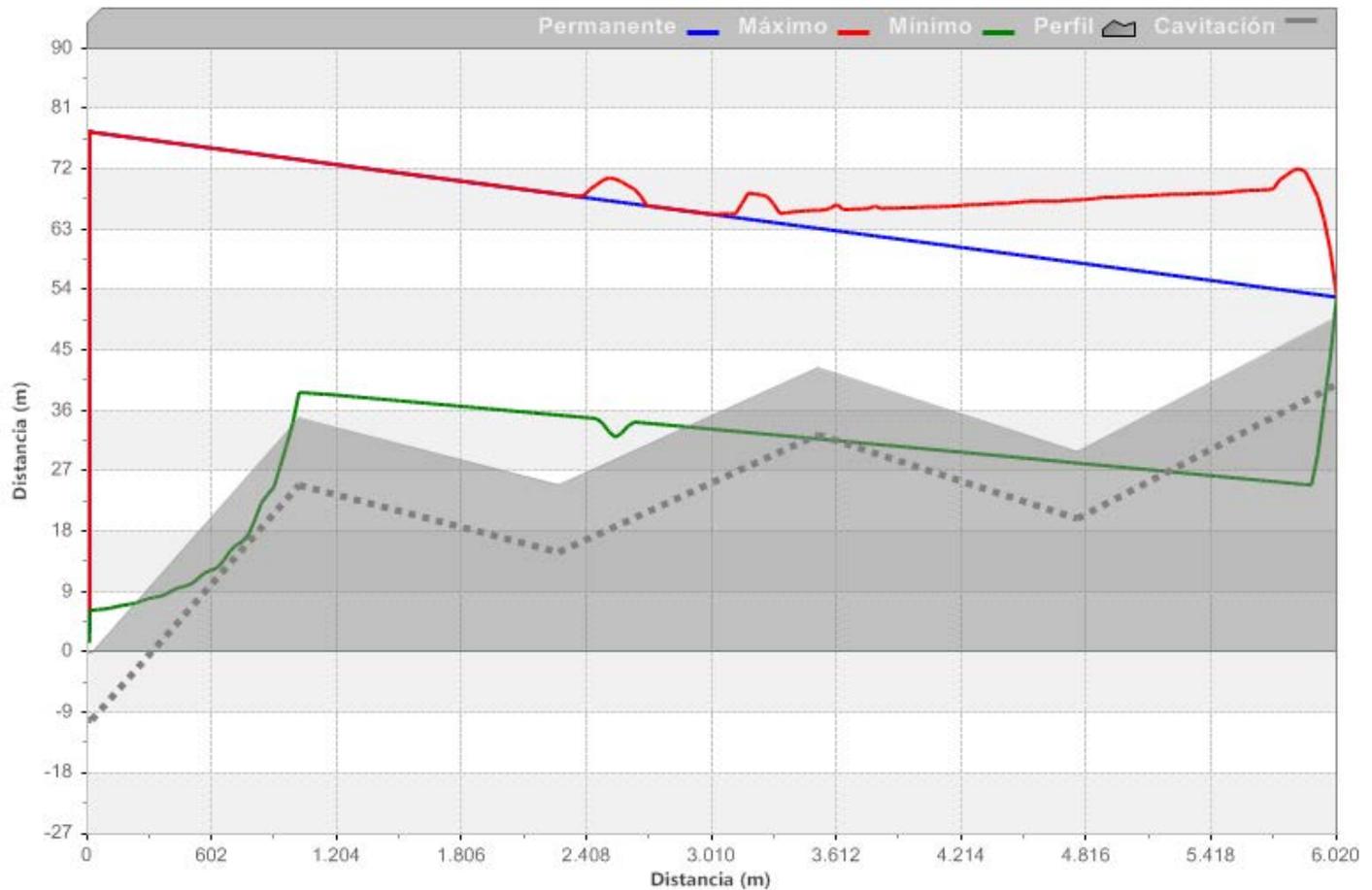
Cámaras de Aire: ejemplo 1

- Líneas de cargas piezométricas extremas con CA



Cámaras de Aire: ejemplo

- Líneas de cargas piezométricas extremas con TU



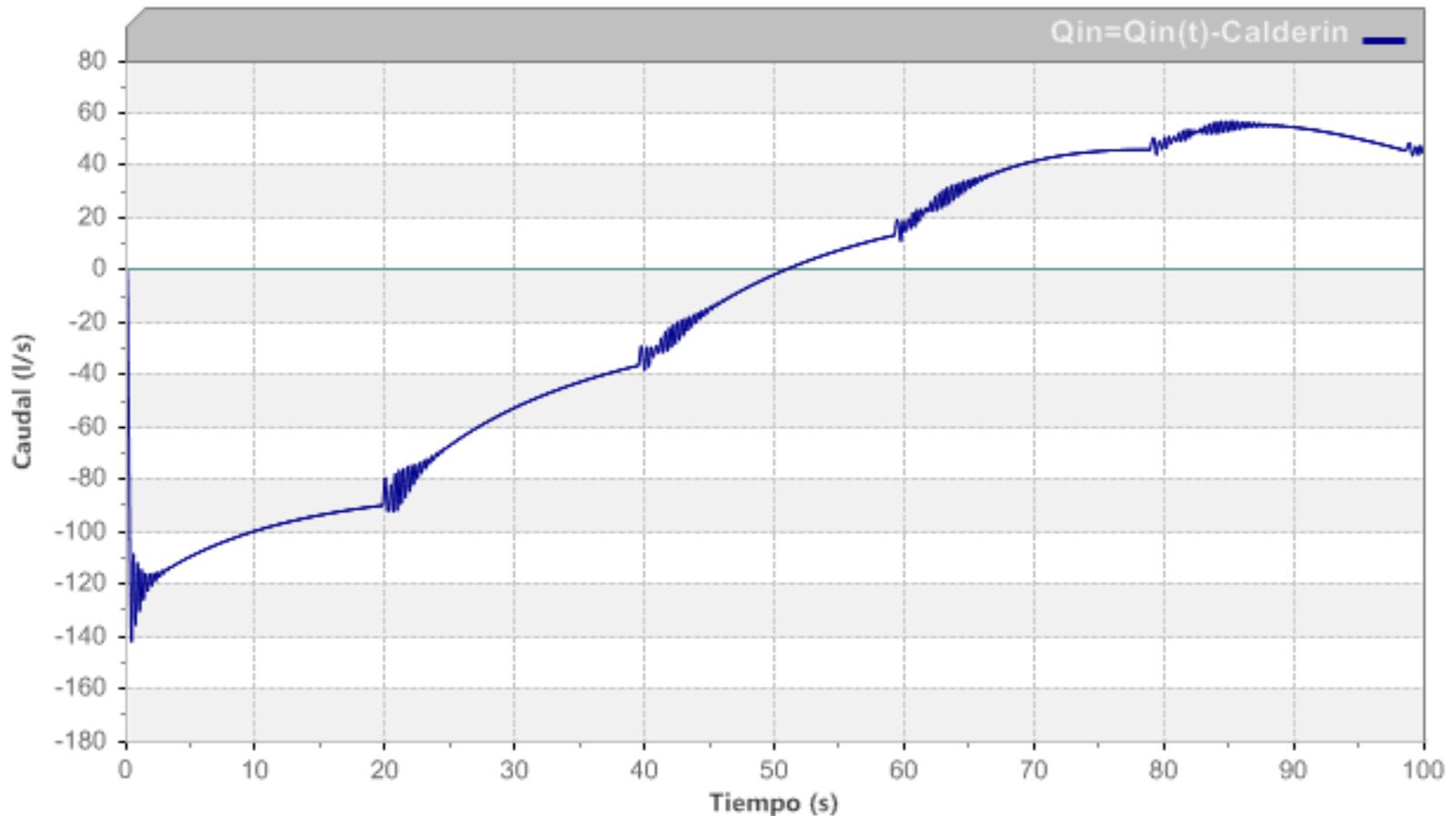
Cámaras de Aire: ejemplo

- ❑ Líneas de cargas piezométricas extremas con CHIMENEA EQUILIBRIO



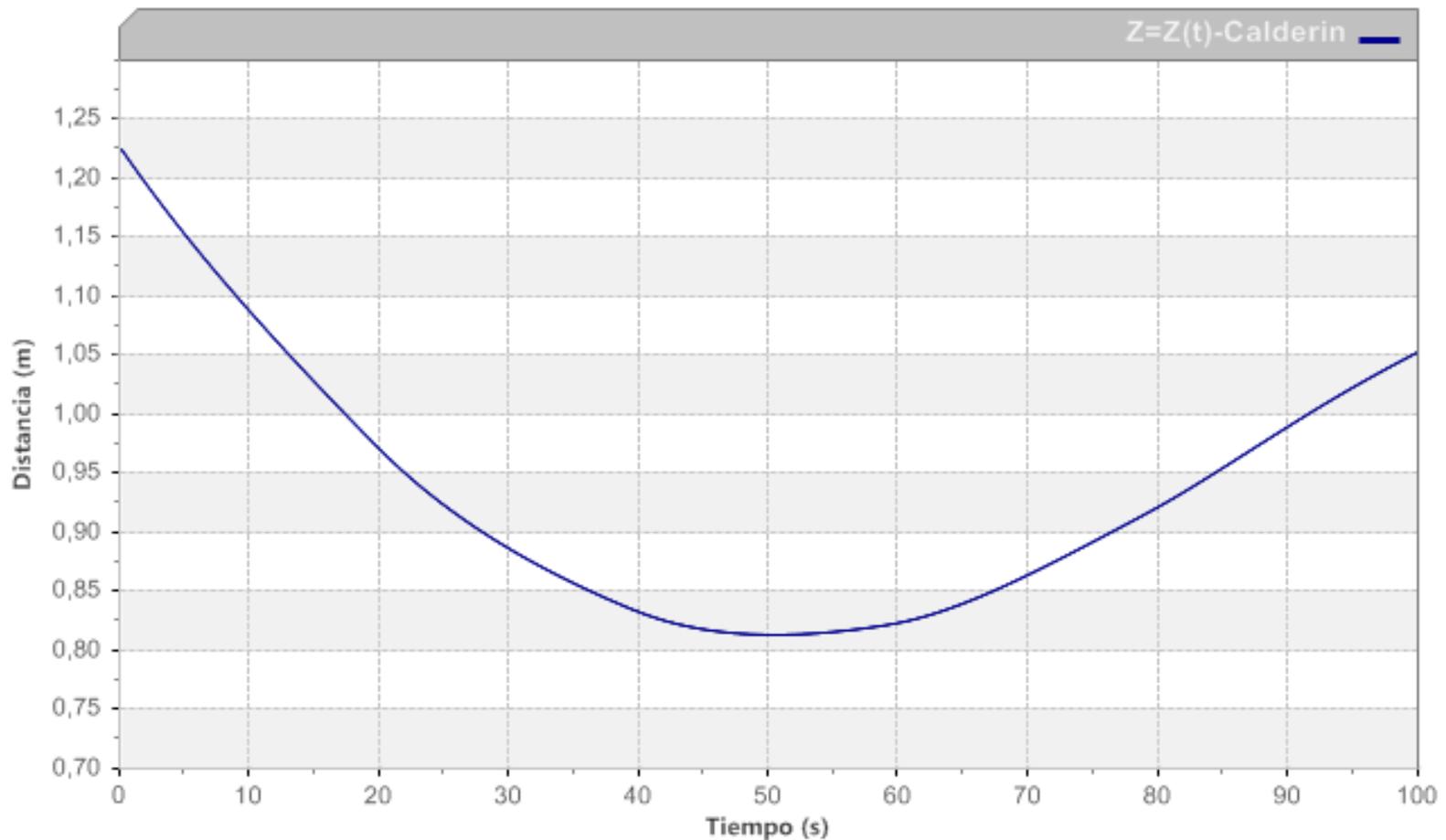
Cámaras de Aire: ejemplo 1

- Caudal de descarga de la Cámara de Aire



Cámaras de Aire: ejemplo 1

- Nivel de agua en la CA



Cámaras de Aire: ejemplo 2

□ Con Cámara de Aire

$$D_{CA} = 1 \text{ m}$$

$$\text{Altura}_{CA} = 4 \text{ m}$$

$$\text{Vol}_{CA} = 3.14 \text{ m}^3$$

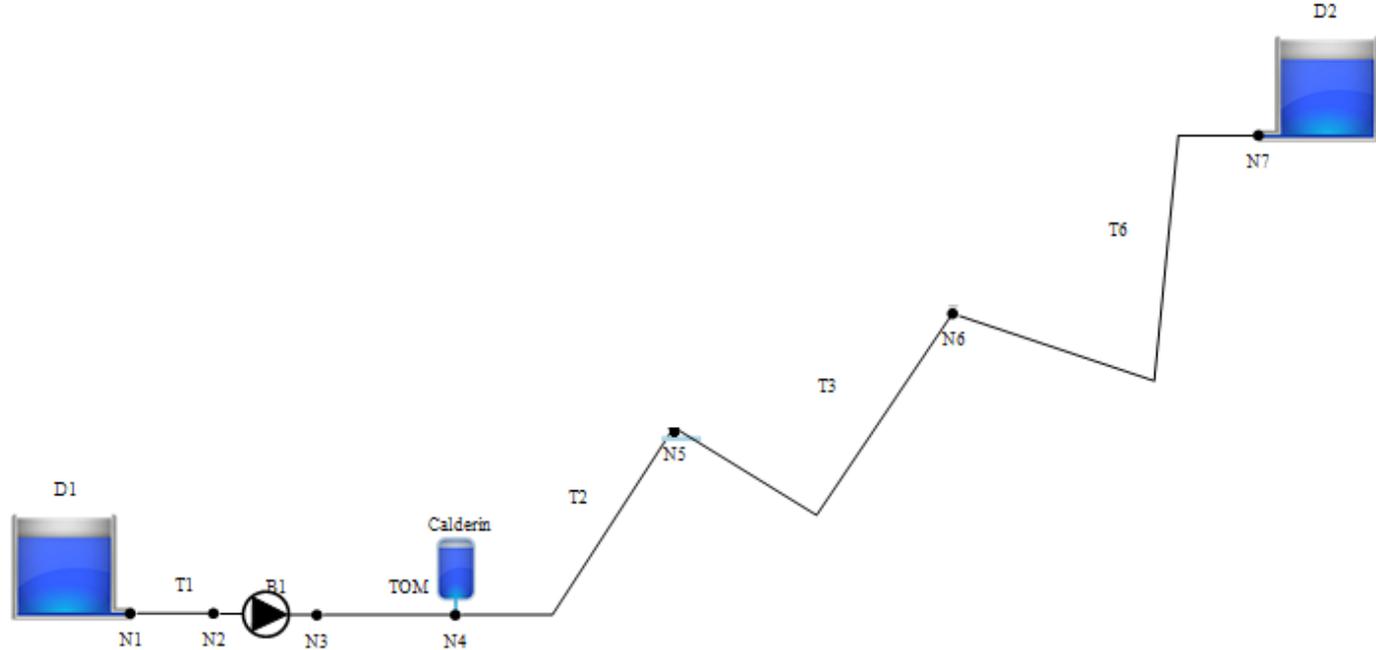
$$\text{presión}_{CA} = 20 \text{ m.c.a}$$

$$D_{conex} = 0.25 \text{ m}$$

$$L_{conex} = 3 \text{ m}$$

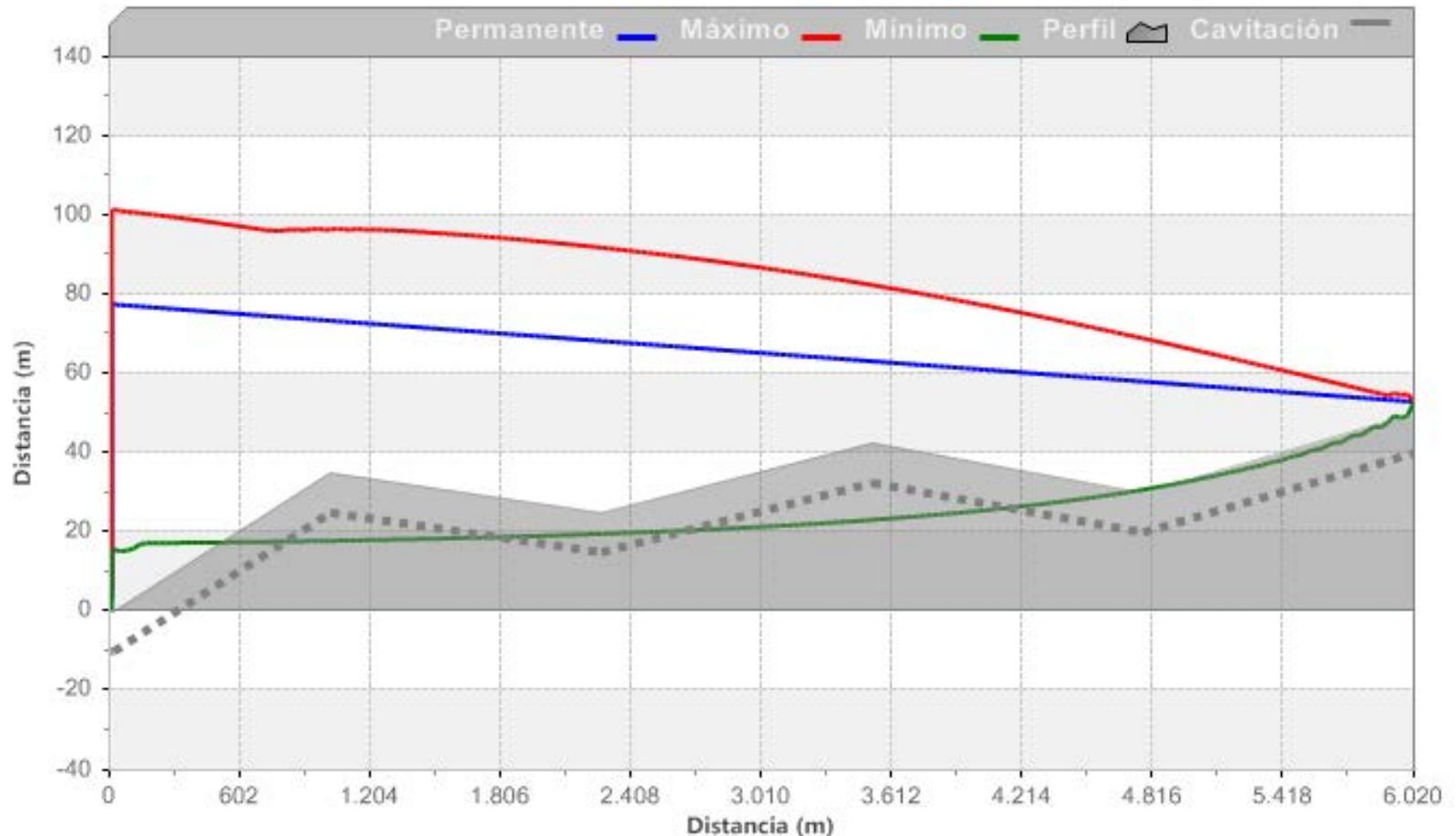
$$K_V = 6.61 \text{ s}^2/\text{m}^5$$

$$K_{LL} = 10.5 \text{ s}^2/\text{m}^5$$



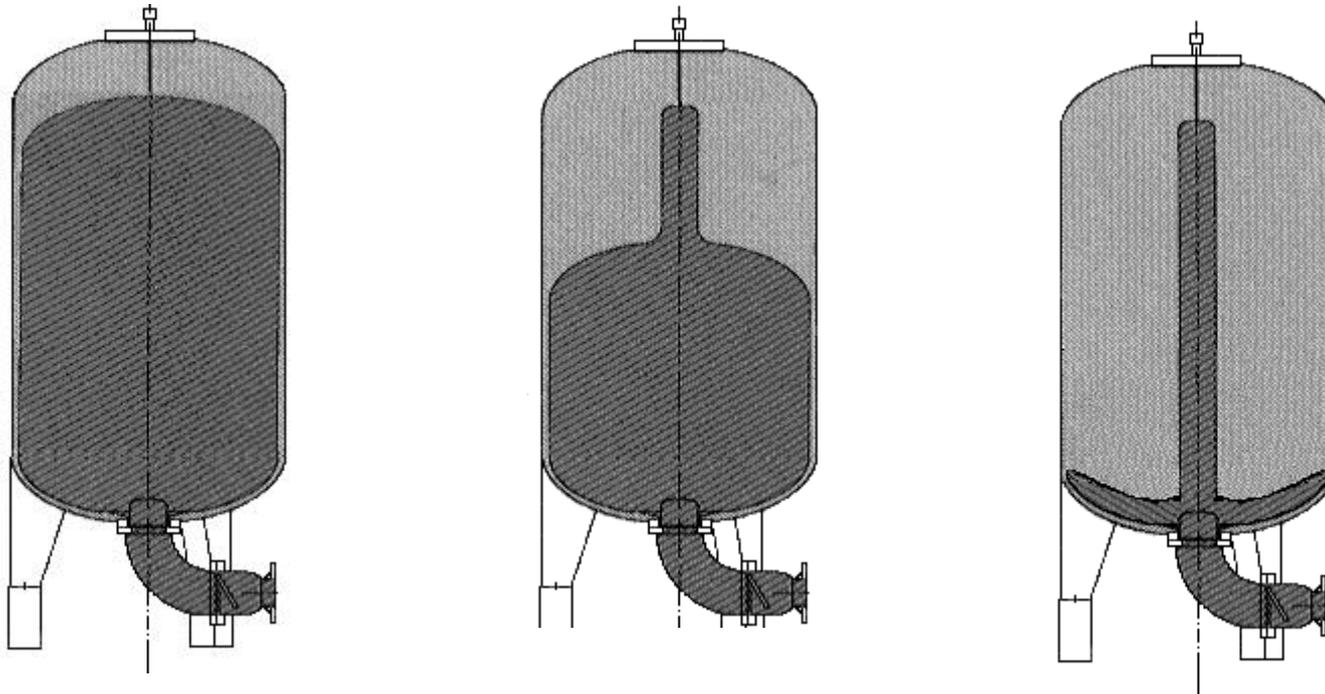
Cámaras de Aire: ejemplo 2

- Líneas de cargas piezométricas extremas con Cámara de Aire

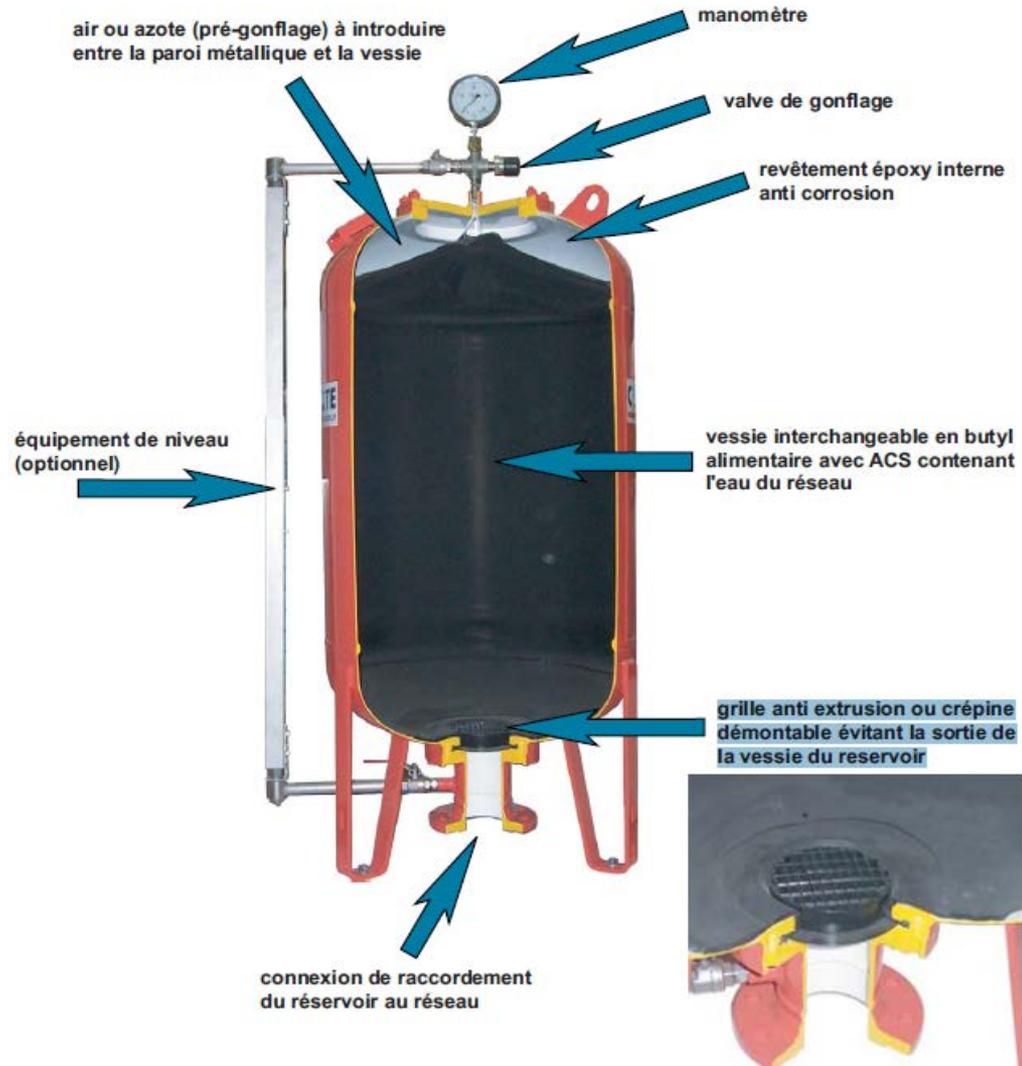


Cámaras de Aire con membrana

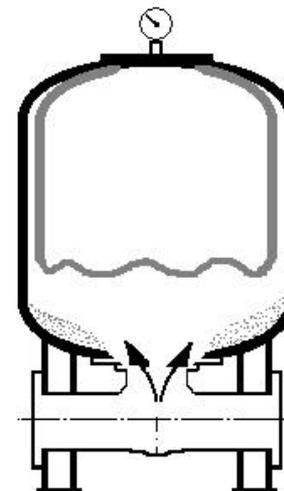
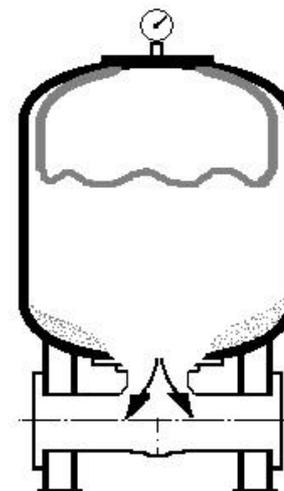
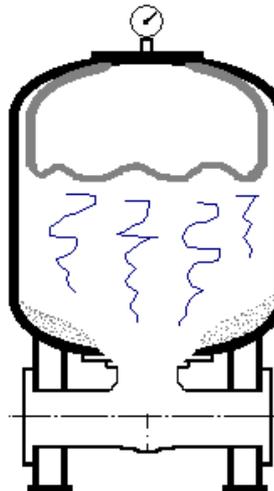
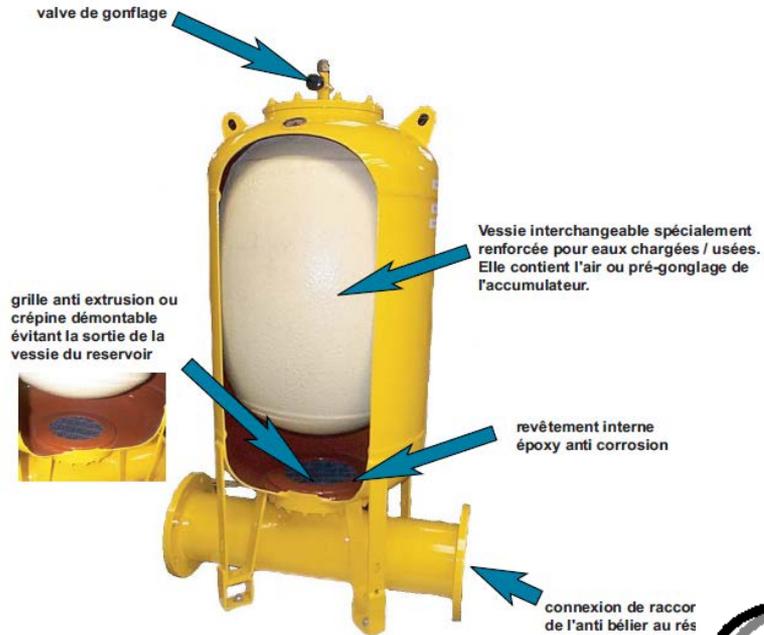
- Membrana flexible separa gas del agua.
- No requiere compresor.



Cámaras de Aire con membrana

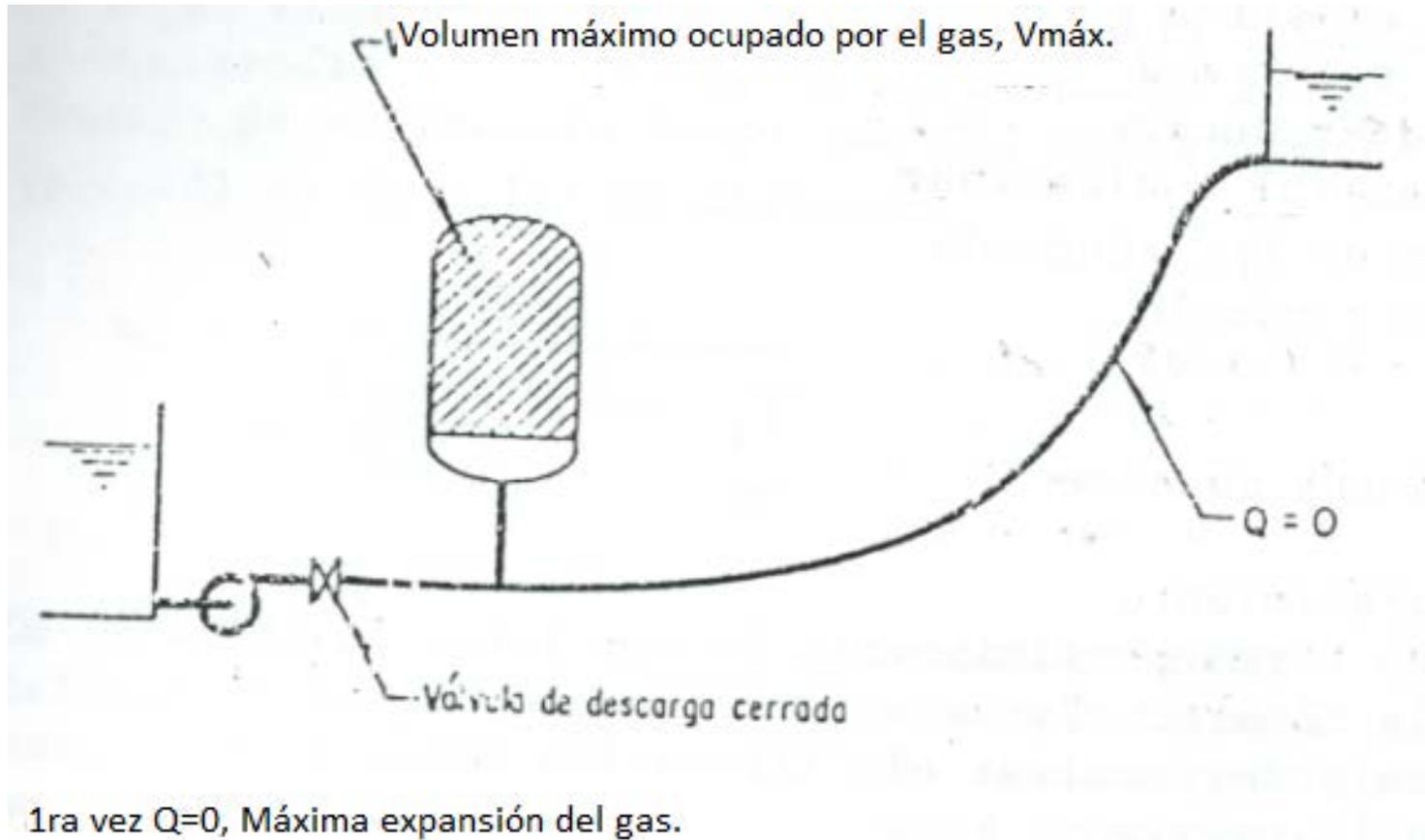


Cámaras de Aire con membrana



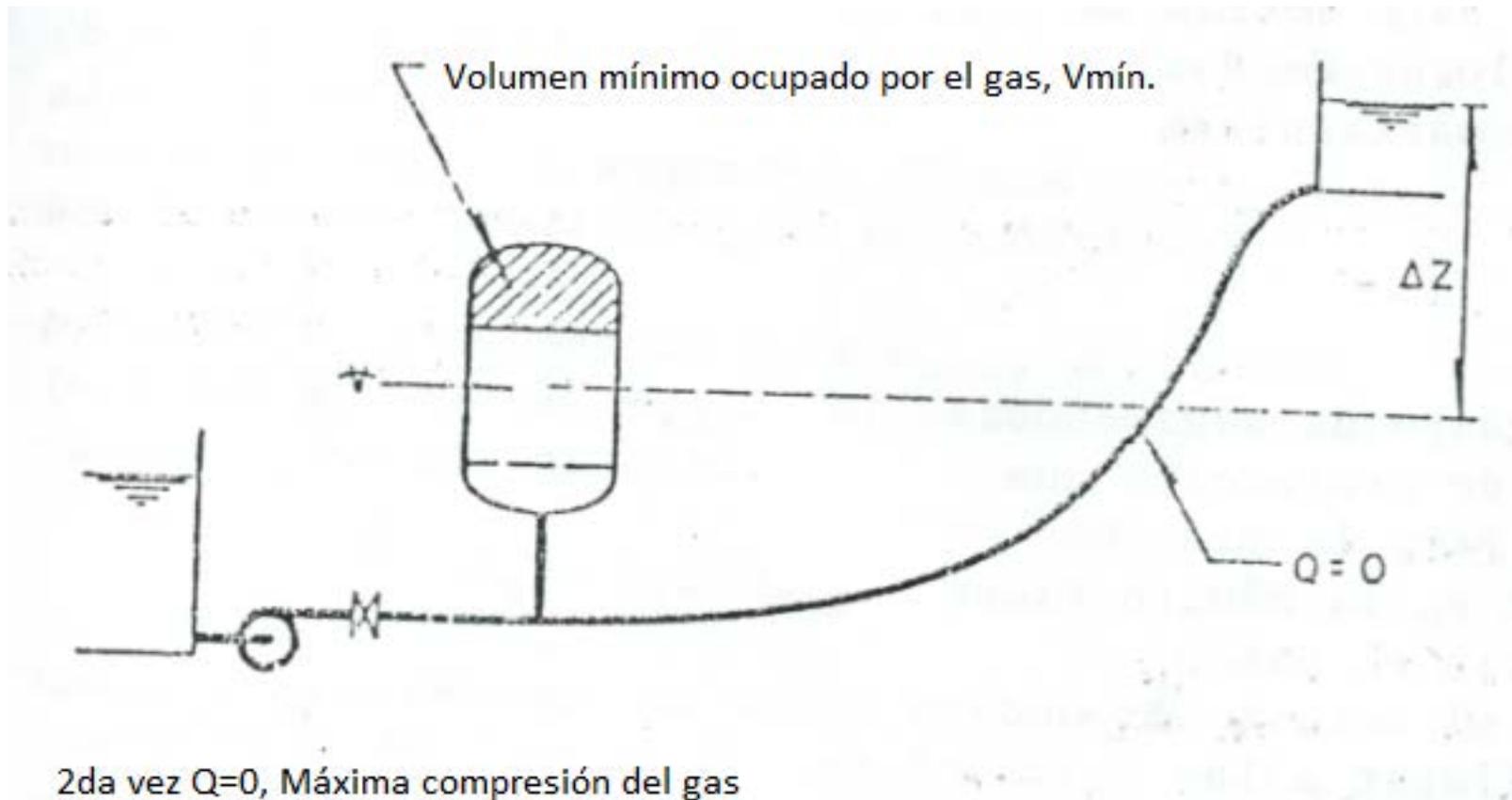
Cámaras de Aire: orificio diferencial

Máximo volumen de aire en la CA durante un transitorio:



Cámaras de Aire: orificio diferencial

Instantes durante el transitorio con mínimo volumen de aire en la CA:



Cámaras de Aire: orificio diferencial

Energía Potencial Elástica (o trabajo de compresión del gas): $E_{pe} = - \int_i^f p dV$

$$p_i = p_{min} \quad V_i = V_{max}$$

$$p_f = p_{max} \quad V_f = V_{min}$$

Proceso isoterma ($T = cte \rightarrow pV = cte$): $E_{pe} = p_i V_i \ln \left(\frac{V_i}{V_f} \right)$

Proceso politrópico ($pV^n = cte$): $E_{pe} = \frac{p_i V_i}{n-1} \left[\left(\frac{V_i}{V_f} \right)^{n-1} - 1 \right]$

Energía potencial Gravitacional (del volumen de agua): $E_{pg} = \rho (V_i - V_f) g \Delta z$

Cámaras de Aire: orificio diferencial

Transferencia de Energía potencial Gravitacional a Energía Potencial Elástica (proc. isoterma), resulta:

$$\frac{p_{m\acute{a}x}}{p_{m\acute{i}n}} = e^{\frac{\gamma}{p_{m\acute{i}n}} \left(1 - \frac{V_{m\acute{i}n}}{V_{m\acute{a}x}}\right) \Delta z}$$

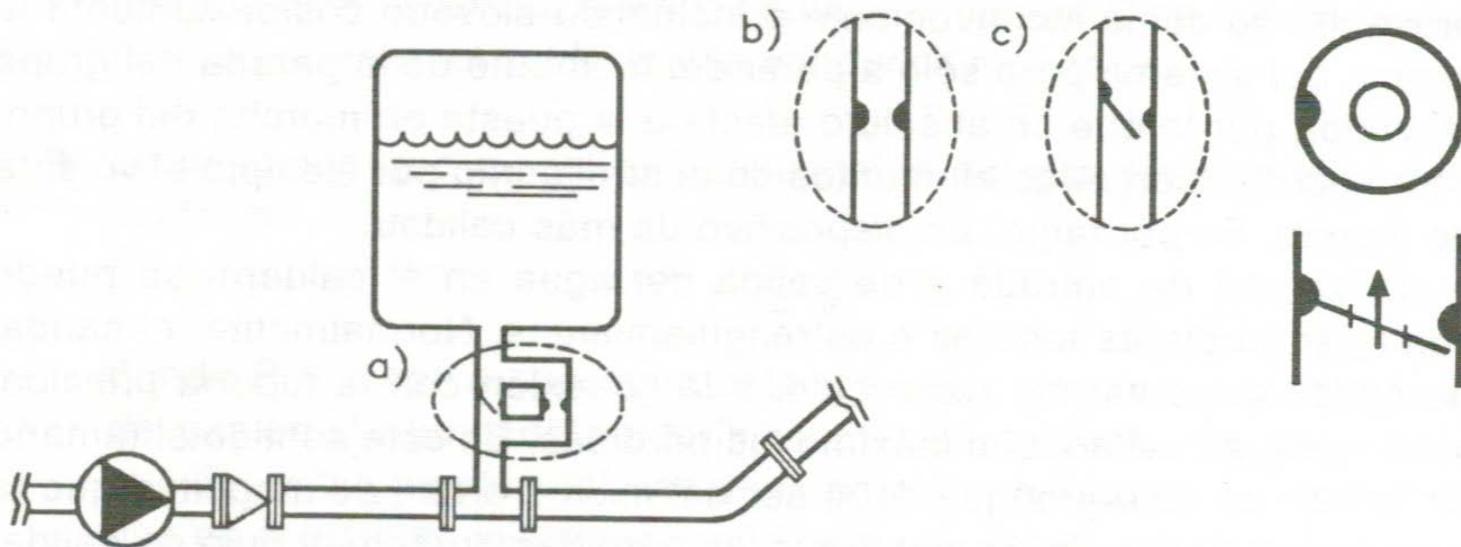
Sí $V_{m\acute{i}n} \ll V_{m\acute{a}x}$ y $g\Delta z \gg p_{m\acute{i}n}$ \rightarrow $p_{m\acute{a}x}/p_{m\acute{i}n} \gg 1$

Se busca que la transferencia de energía potencial gravitacional a potencial elástica sea inferior, disipándola en forma de calor (por ejemplo en un orificio): $k_{LL} > k_V$

Cámaras de Aire: orificio diferencial

Propósito: disipar energía potencial gravitatoria para reducir la energía almacenada en el gas.

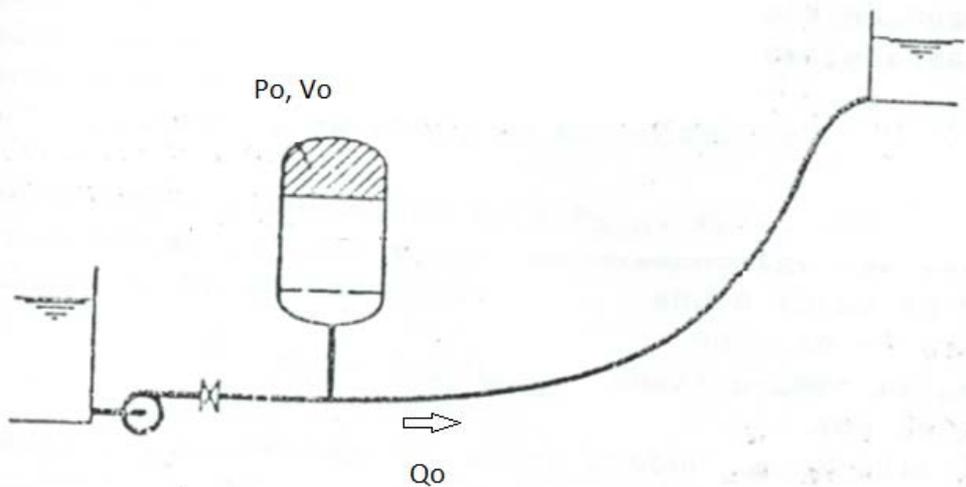
Válvula de retención con bypass que contiene placa orificio o válvula de retención con orificio.



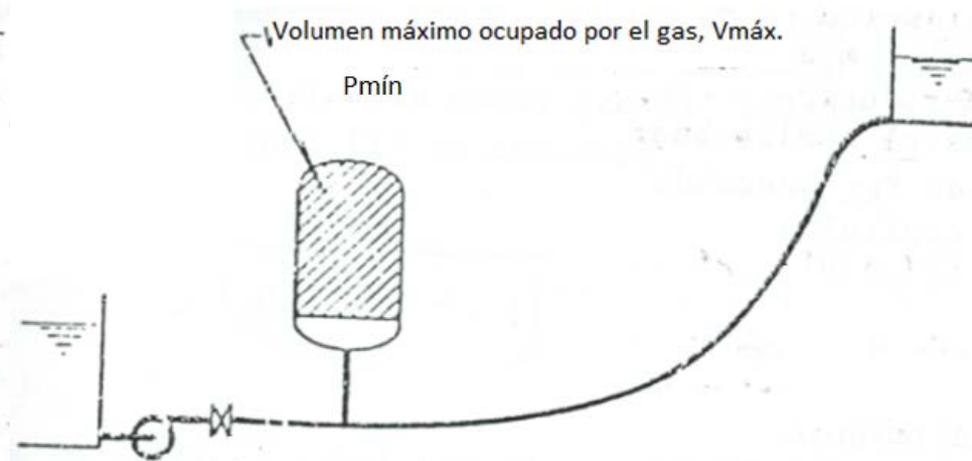
Cámaras de Aire: diseño preliminar

Volumen de la cámara de aire (V_{CA}) y coef. de pérdida de carga de llenado (K_{LL})

En régimen:



Luego del paro de una bomba:



V_e : volumen de agua entregado al acueducto: $V_{máx} - V_o = V_e$

Cámaras de Aire: diseño preliminar

Volumen de la cámara de aire: V_{CA}

Se asumirá evolución politrópica del aire:

$$p_o V_o^{1.2} = p_{min} V_{max}^{1.2} = p_{min} (V_e + V_o)^{1.2}$$

(P_o y P_{min} son presiones absolutas)

$$V_o p_o^{1/1.2} = (V_e + V_o) p_{min}^{1/1.2}$$

$$V_o \left(\frac{p_o}{p_{min}} \right)^{1/1.2} = (V_e + V_o)$$

$$V_o \cdot \left[\left(\frac{P_o}{P_{min}} \right)^{1/1.2} - 1 \right] = V_e$$

El volumen entregado puede estimarse aproximadamente como:

$$V_e = Q_o \cdot T$$

$$T = \frac{2L}{a}$$

Cámaras de Aire: diseño preliminar

Volumen de la cámara de aire: V_{CA}

$$V_o \cdot \left[\left(\frac{P_o}{P_{mín}} \right)^{1/1.2} - 1 \right] = Q_o \cdot \frac{2L}{a} \quad \rightarrow \quad V_o = \frac{Q_o \cdot 2L}{a \left[\left(\frac{P_o}{P_{mín}} \right)^{1/1.2} - 1 \right]}$$

P_o : presión inicial en la CA, absoluta, se obtiene de la piezométrica de régimen y la cota de nivel de agua en la CA.

$P_{mín}$: presión mínima en la CA, absoluta, debe definirse considerando el perfil del acueducto para que la línea de cargas piezométricas mínimas no corte al perfil.

El volumen máximo del gas se obtiene de la ecuación: $V_{max} = V_o + V_e$

$$V_{CA} > 1.2 V_{max}$$

Cámaras de Aire: diseño preliminar

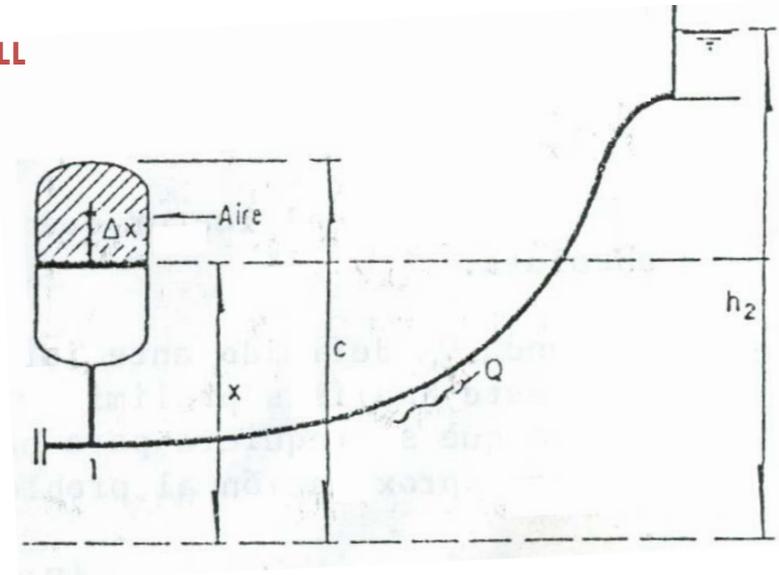
Coeficiente de pérdida de carga de llenado: K_{LL}

- Ec. dinámica entre (1) y (2) en régimen (sin pérdidas de carga):

$$x_0 + \frac{p_0}{\gamma} = h_2 + \frac{p_{atm}}{\gamma}$$

- Ec. dinámica luego de perturbación Δx :

$$x_0 + \Delta x + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{\Delta p}{\gamma} = h_2 + \frac{p_{atm}}{\gamma} - \frac{L}{gA} A_c \Delta \ddot{x} \quad \frac{dv}{dt}$$



- Proc. isoterma en el gas dentro de la cámara:

$$\Delta p = -p_0 \frac{\Delta x}{(c-x_0)} = -p_0 \frac{\Delta x}{V_0} \cdot A_c$$

Ec. de sistema masa resorte: $\ddot{x} + (k/m)x = 0$

- Sustituyendo: $\Delta x \left[1 - \frac{p_0}{\gamma} \cdot \frac{A_c}{V_0} \right] = -\frac{L}{gA} A_c \Delta \ddot{x} \rightarrow \Delta \ddot{x} + \frac{gA}{LA_c} \left[1 - \frac{p_0}{\gamma} \cdot \frac{A_c}{V_0} \right] \Delta x = 0$

El período de las oscilaciones es: $T_{CCA} = 2\pi \left\{ \frac{gA}{LA_c} \left[1 - \frac{p_0}{\gamma} \cdot \frac{A_c}{V_0} \right] \right\}^{-1/2}$

Cámaras de Aire: diseño preliminar

Coeficiente de pérdida de carga de llenado: K_{LL}

- Conocidos p_o , A_{CA} , V_o y A es posible hallar $T_{C_{CA}}$.
- El diseño del orificio diferencial debe contemplar que la energía potencial sea disipada en el mismo, para que las presiones en la CA no adquieran valores excesivos.

$$E_{pg} = (V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n})\gamma\Delta z$$

- La disipación ocurre cuando la columna líquida desciende desde el tanque de descarga a la CA: en $T_{C_{CA}}/2$
- Energía disipada en el orificio:

$$E_d \cong \int_0^{T_{c_CA}/2} \gamma\Delta h_{orif} Q dt = \int_0^{T_{c_CA}/2} \gamma k_{LL} Q^2 Q dt = \gamma k_{LL} \int_0^{T_{c_CA}/2} Q^3 dt$$

Cámaras de Aire: diseño preliminar

Coeficiente de pérdida de carga de llenado: K_{LL}

- Se considera caudal estacionario, tal que $K_{LL} Q^{*2} = \left(\Delta Z + \frac{p_{atm}}{\gamma} \right) - \frac{p_{min}}{\gamma}$
- Entonces queda: $E_d = \gamma \left(\Delta Z + \frac{p_{atm}}{\gamma} - \frac{p_{min}}{\gamma} \right)^{3/2} \cdot \frac{T_{CCA}}{2} \cdot K_{LL}^{-1/2}$
- Y haciendo $E_d = E_{pg}$ se obtiene: $K_{LL} = \left(\Delta Z + \frac{p_{atm}}{\gamma} - \frac{p_{min}}{\gamma} \right)^3 \left[\frac{T_{CCA}}{2 \Delta Z (V_{max} - V_{min})} \right]^2$
- Asumiendo politrópico: $V_{max} - V_{min} = V_{min} \left[\left(\frac{p_{max}}{p_{min}} \right)^{1/1.2} - 1 \right] = V_o \left[\left(\frac{p_o}{p_{min}} \right)^{1/1.2} - 1 \right]$
- Resulta:

$$K_{LL} = \left(\Delta Z + \frac{p_{atm}}{\gamma} - \frac{p_{min}}{\gamma} \right)^3 \left[\frac{T_{CCA}}{2 \Delta Z V_o \left[\left(\frac{p_o}{p_{min}} \right)^{1/1.2} - 1 \right]} \right]^2$$

Cámaras de Aire: diseño preliminar

Volumen de la cámara de aire (V_{CA}) y coef. de pérdida de carga de llenado (K_{LL})

$$V_o = \frac{Q_o \cdot 2L}{a \left[\left(\frac{p_o}{p_{mín}} \right)^{1/1.2} - 1 \right]}$$

$$K_{LL} = \left(\Delta z + \frac{p_{atm}}{\gamma} - \frac{p_{min}}{\gamma} \right)^3 \left[\frac{T_{CCA}}{2 \Delta z V_o \left[\left(\frac{p_o}{p_{min}} \right)^{1/1.2} - 1 \right]} \right]^2$$

Procedimiento:

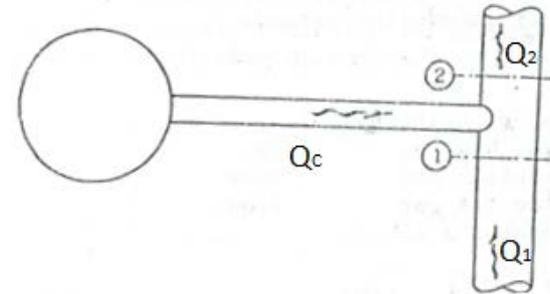
- Estimar V_o y K_{LL} a partir del mecanismo expuesto.
- Aplicar el modelo analítico y precisar los valores de V_o y K_{LL} para el caso de estudio.

Cámaras de Aire: modelo analítico

- En la unión de la cámara con la tubería:

Conservación de la masa: $Q_1 + Q_C = Q_2$

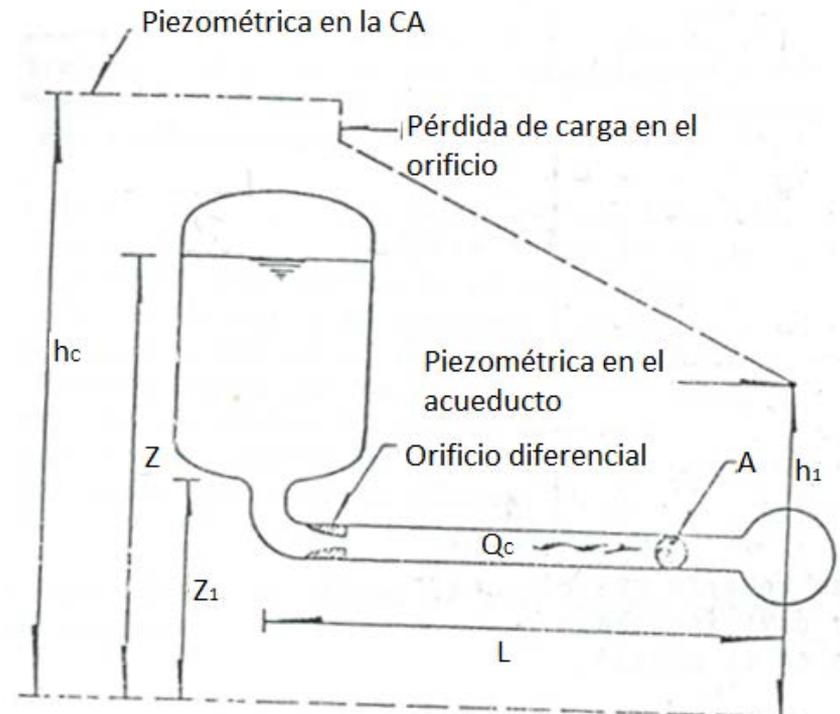
Ec. Dinámica: $h_1 = h_2$



- En la conexión CA-acueducto:

Ec. Dinámica

$$h_c - h_1 = \frac{L}{gA} \frac{dQ_C}{dt} + \frac{fL}{D} \frac{Q_C |Q_C|}{2gA^2} + K_o Q_C |Q_C|$$



Cámaras de Aire: modelo analítico

- K_0 es el coeficiente de pérdida de carga del orificio diferencial:

$$Q_C \geq 0 \quad K_o = K_V$$

$$Q_C < 0 \quad K_o = K_{LL}$$

- Dentro de la CA:

$$-A_C \frac{dZ}{dt} = Q_C$$

$$h_C = Z + \frac{P - P_{atm}}{\gamma}$$

$$(V_g)^{1.2} \frac{P}{\gamma} = (V_o)^{1.2} \frac{P_o}{\gamma}$$

$$V_g = V_o + (Z_o - Z)A_C$$

Cámaras de Aire: modelo analítico

- El sistema de ecuaciones anterior en diferencias finitas:

$$Q_{1p} + Q_{Cp} = Q_{2p}$$

$$h_{1p} = h_{2p}$$

$$h_{Cp} - h_{1p} = \frac{L}{gA} \dot{Q}_{Cp} + \frac{fL}{D} \frac{Q_{Cp} |Q_{Cp}|}{2gA^2} + K_o Q_{Cp} |Q_{Cp}|$$

$$h_{Cp} = Z_p + \frac{P_p - P_{atm}}{\gamma}$$

$$\dot{Q}_{Cp} = \frac{Q_{Cp} - Q}{\Delta t}$$

$$-2A_C \dot{Z}_p = Q_{Cp} + Q_C$$

$$\dot{Z}_p = \frac{Z_p - Z}{\Delta t}$$

9 ecuaciones y 11 incógnitas

$$\left(V_g\right)^{1.2} \frac{P}{\gamma} = \left(V_o\right)^{1.2} \frac{P_o}{\gamma}$$

$$V_g = V_o + (Z_o - Z)A_C$$

Cámaras de Aire: modelo analítico

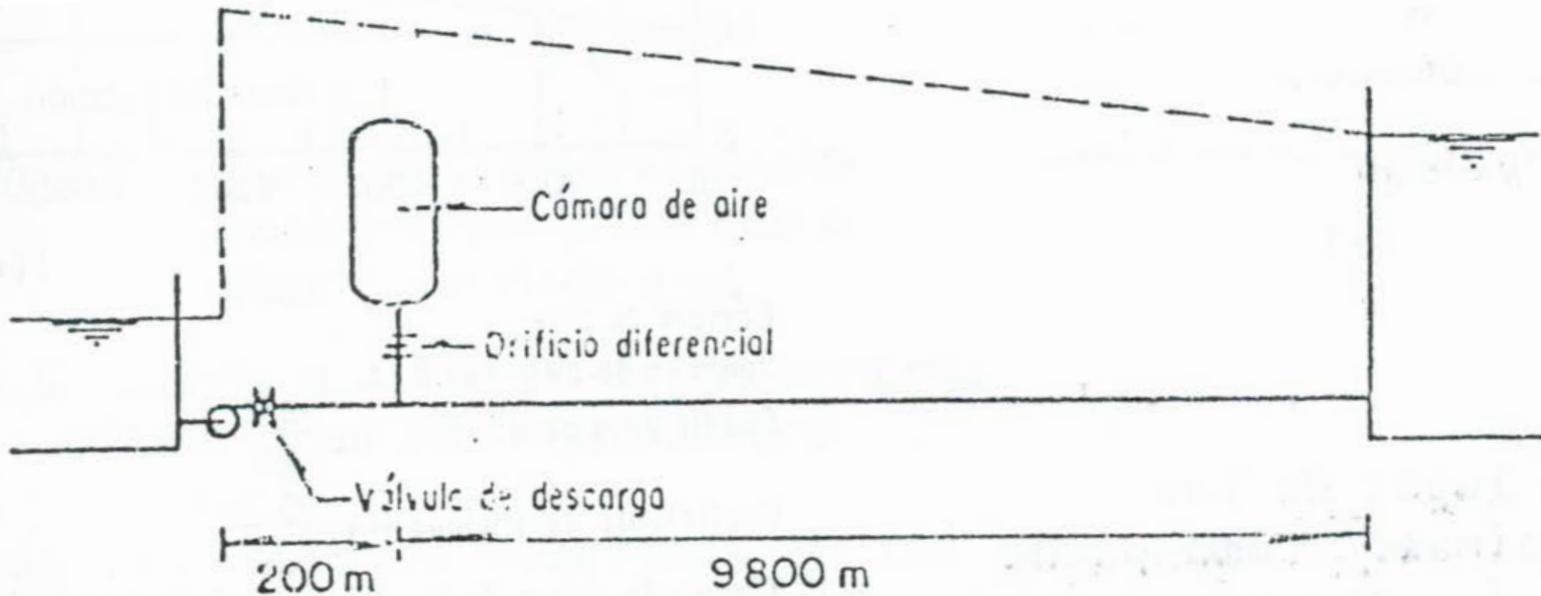
- Ecuaciones características:

$$Q_{1p} = C_p - C_a h_{1p}$$

$$Q_{2p} = C_n + C_a h_{2p}$$

- El sistema de 11 ecuaciones y 11 incógnitas puede resolverse para un instante t a partir de conocer los valores de las incógnitas para un instante $t-\Delta t$.
- Si al resolver resulta $Q_c > 0 \rightarrow K_o = K_v$
si $Q_c \leq 0 \rightarrow K_o = K_{LL}$

Cámaras de Aire: ejemplo 3



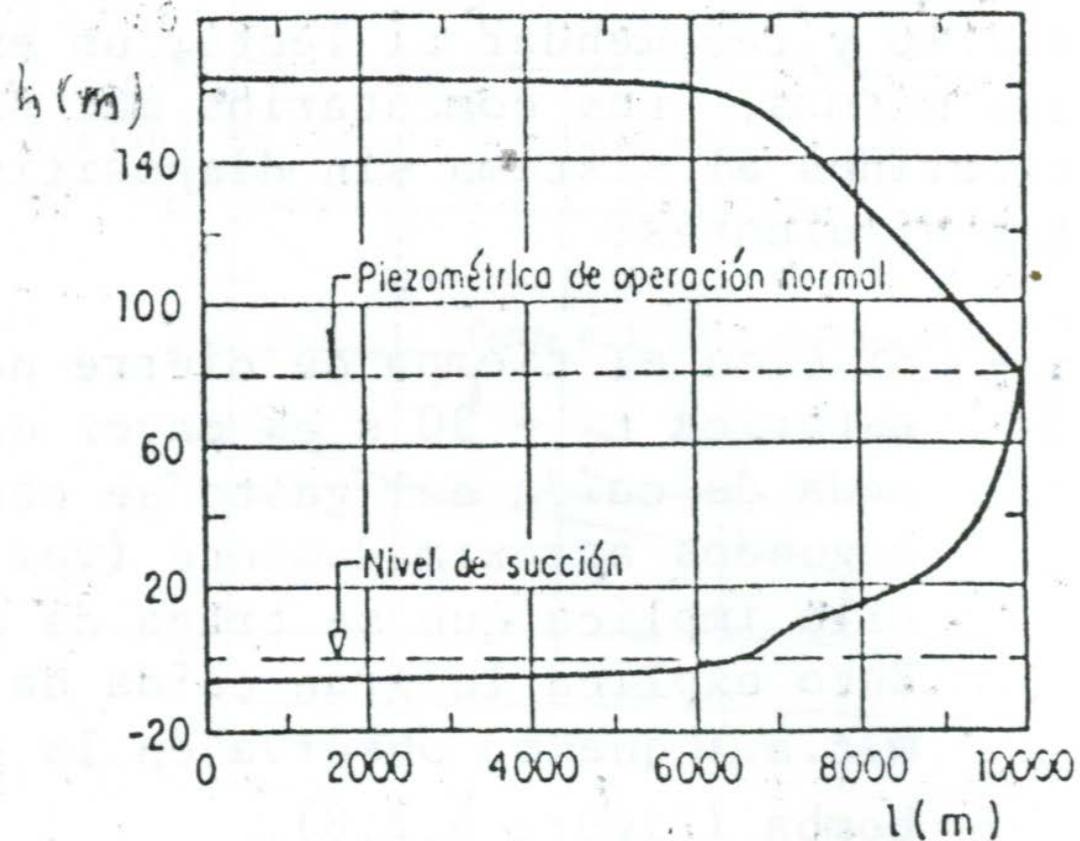
$$A_c / A = 2.04, Q_R = 2 \pi^3 / s, H_R = 80 \text{ m c a}, N_S = 62.81, a = 1000 \text{ m/s}$$

Válvula en la descarga de la bomba, $T_c = 30 \text{ s} > T = 2L/a = 20 \text{ s}$.

Ley de cierre de la válvula igual a la de ejemplos para TO y TU.

Cámaras de Aire: ejemplo 3

- Piezométricas extremas para el sistema sin protección



Tiempo de cierre de la válvula de descarga $t_c = 30$ s

Cámaras de Aire: ejemplo 3

- Estimación de V_o :

Adoptando :

$$p_{\text{mín_manométrica}} = 20 \text{ m.c.a.}$$

$$Z_o = 0 \text{ m (cota del tanque de succión)} \Rightarrow p_{0_manométrica} = 80 \text{ m.c.a.}$$

$$V_o = \frac{Q_o \cdot 2L}{a \left[\left(\frac{p_o}{p_{\text{mín}}} \right)^{1/1.2} - 1 \right]} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10000}{1000 \left[\left(\frac{90}{30} \right)^{1/1.2} - 1 \right]}$$

$$V_o = 26.7 \text{ m}^3$$

Cámaras de Aire: ejemplo 3

- Estimación de T_c :
$$T_c = 2\pi \left(\frac{g \cdot A_{Tubería}}{L \cdot A_{CA}} \left[1 + \frac{p_o}{\gamma} \frac{A_{CA}}{V_o} \right] \right)^{-1/2}$$

Para el A_{CA} se puede asumir la siguiente geometría para el volumen de aire en la CA:

$$V_o = \frac{\pi \cdot D_{CA}^2}{4} \cdot D_{CA} \rightarrow D_{CA} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_o}{\pi}}$$

$$A_{CA} = \frac{\pi \cdot D_{CA}^2}{4}$$

$$D_{CA} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 26.7}{\pi}} = 3.24m$$

$$A_{CA} = \frac{\pi \cdot 3.24^2}{4} = 8.24m^2$$



$$T_c = 2\pi \left(\frac{g \cdot 3.46}{10000 \cdot 8.24} \left[1 + 90 \cdot \frac{8.24}{26.7} \right] \right)^{-1/2} = 57.71s$$

Cámaras de Aire: ejemplo 3

- Estimación de K_{LL} :

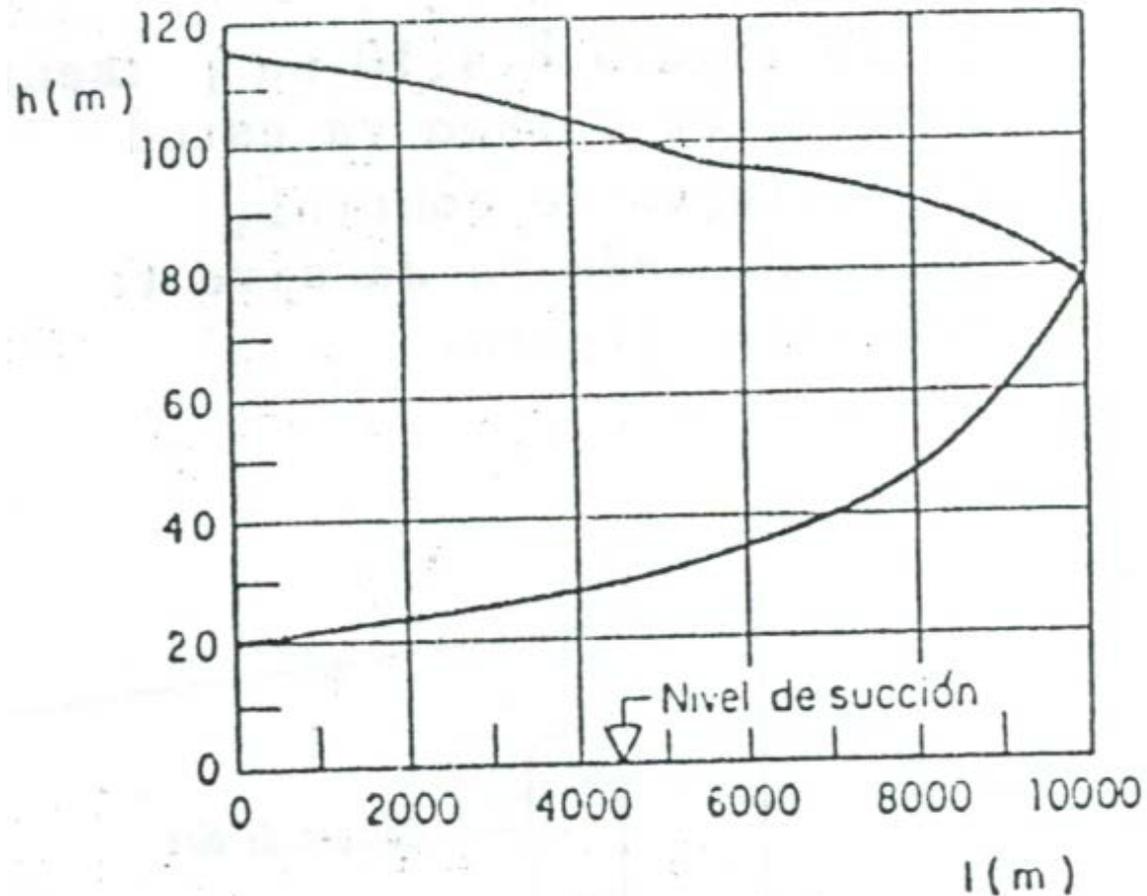
$$K_{LL} = \left(\Delta z + \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_{mín}}{\gamma} \right)^3 \cdot \left(\frac{T_{c_CA}}{2\Delta z V_o \left(\left(\frac{P_o}{P_{mín}} \right)^{1/1.2} - 1 \right)} \right)^2$$

$$K_{LL} = (90 - 30)^3 \cdot \left(\frac{57.71}{2 \cdot 80 \cdot 26.7 \left(\left(\frac{90}{30} \right)^{1/1.2} - 1 \right)} \right)^2 = 17.56 \text{ s}^2/\text{m}^5$$

➔ Se adoptará como diseño preliminar para la simulación $V_o = 27 \text{ m}^3$, $K_{LL} = 18 \text{ s}^2/\text{m}^5$
 $D_{CA} = 3 \text{ m}$, $K_v = 0.01 \text{ s}^2/\text{m}^5$, $L = 0$ (se desprecia la inercia de la conexión)

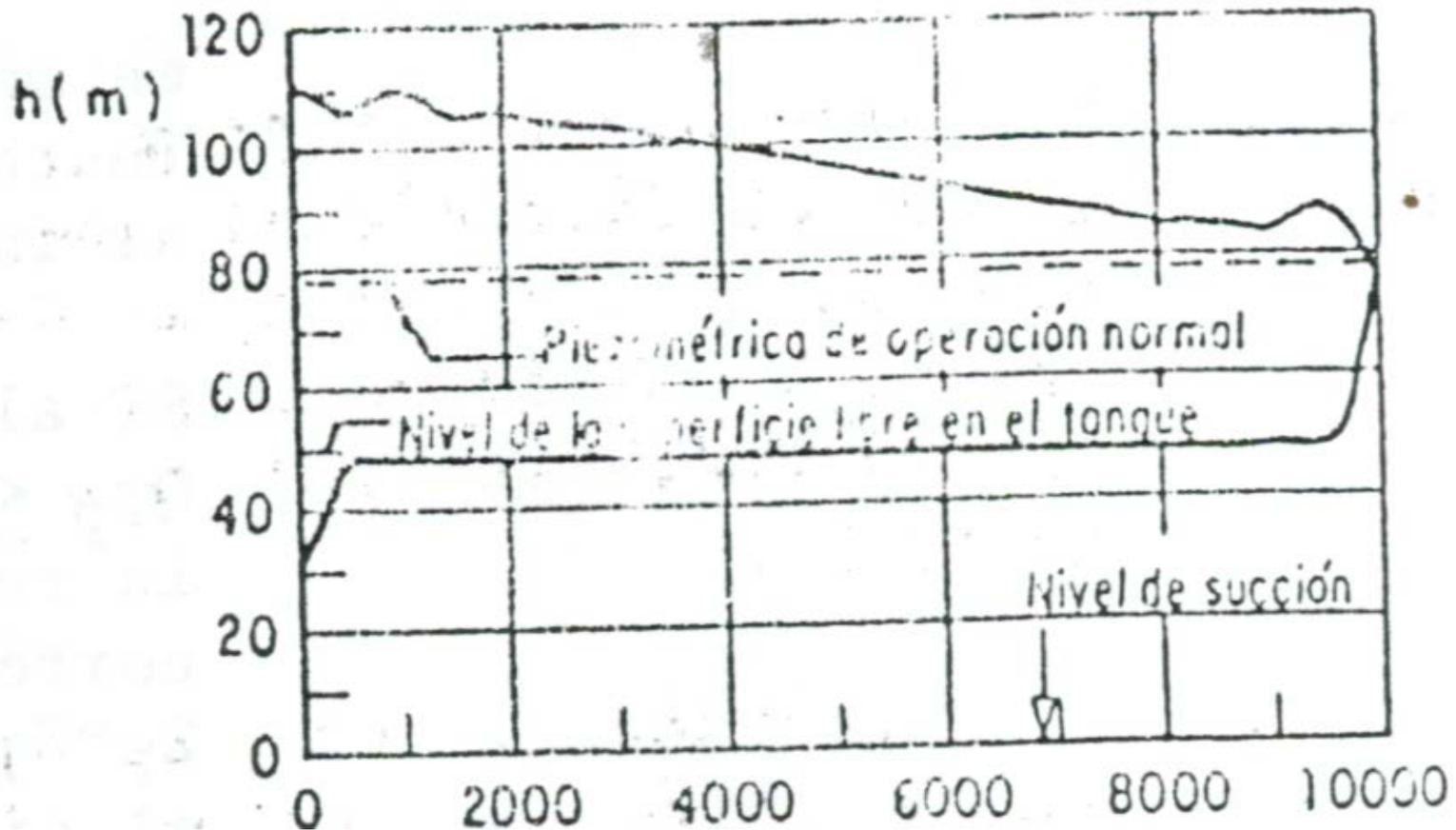
Cámaras de Aire: ejemplo 3

- Piezométricas extremas para el sistema CON CÁMARAS DE AIRE



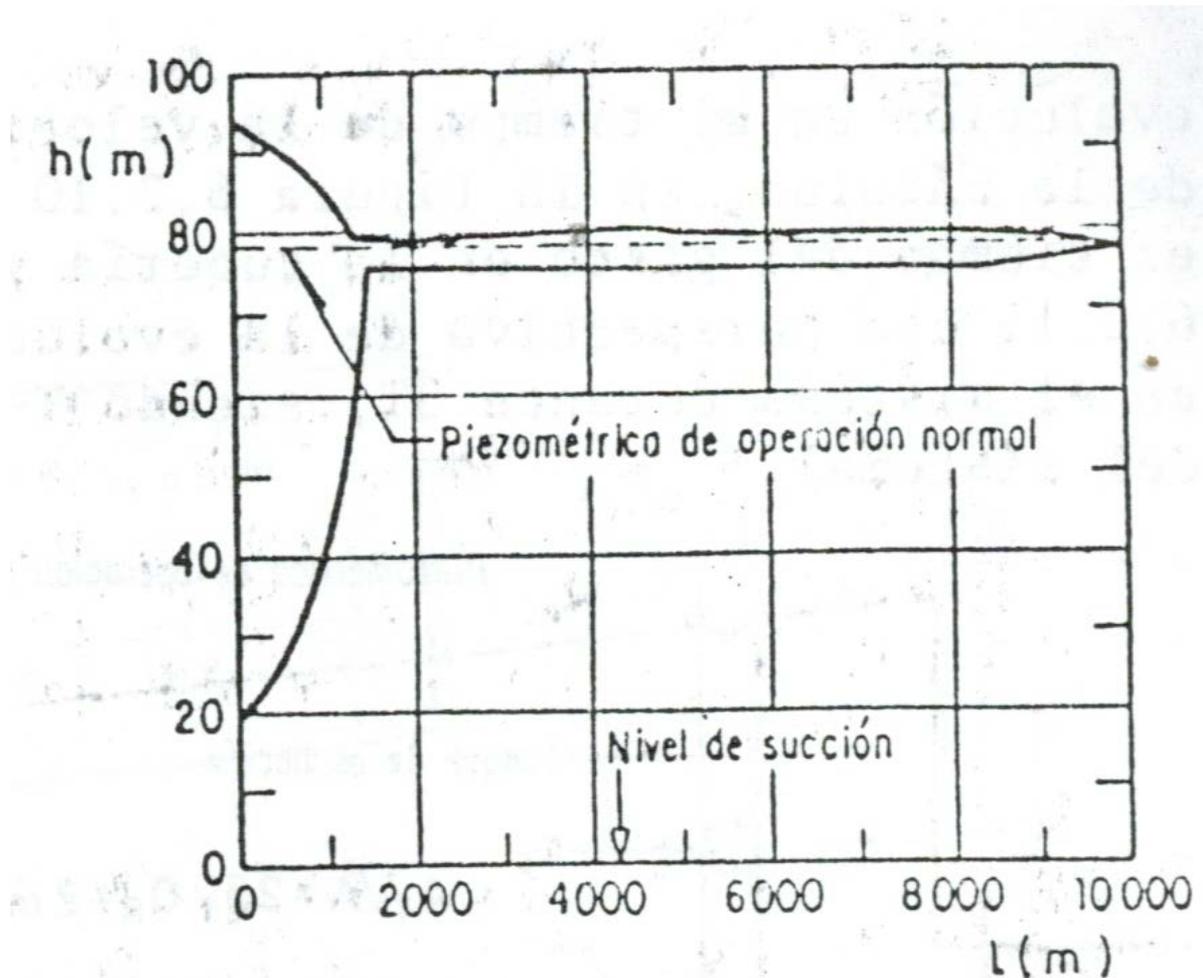
Cámaras de Aire: ejemplo 3

- Piezométricas extremas para el sistema CON TANQUE UNIDIRECCIONAL



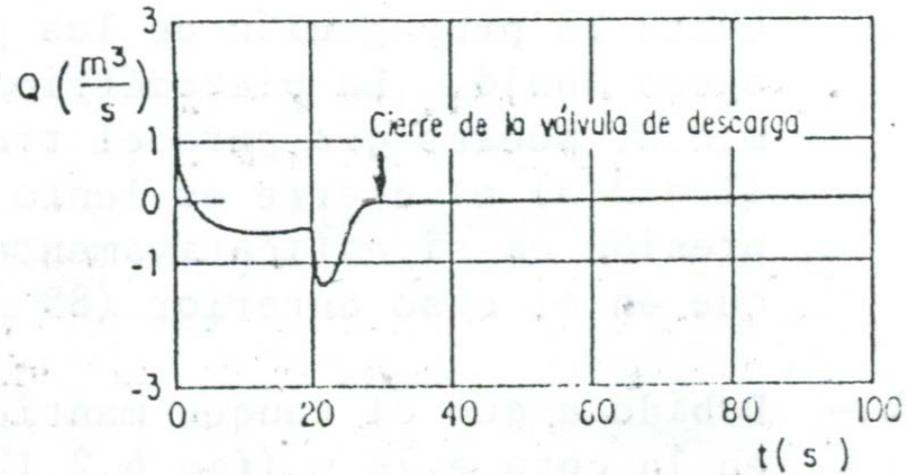
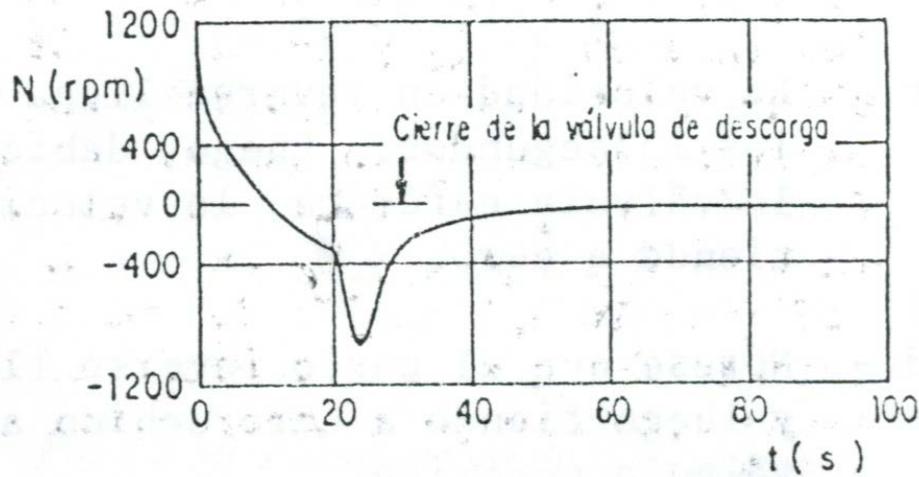
Cámaras de Aire: ejemplo 3

- Piezométricas extremas para el sistema CON TANQUE DE OSCILACIÓN



Cámaras de Aire: ejemplo 3

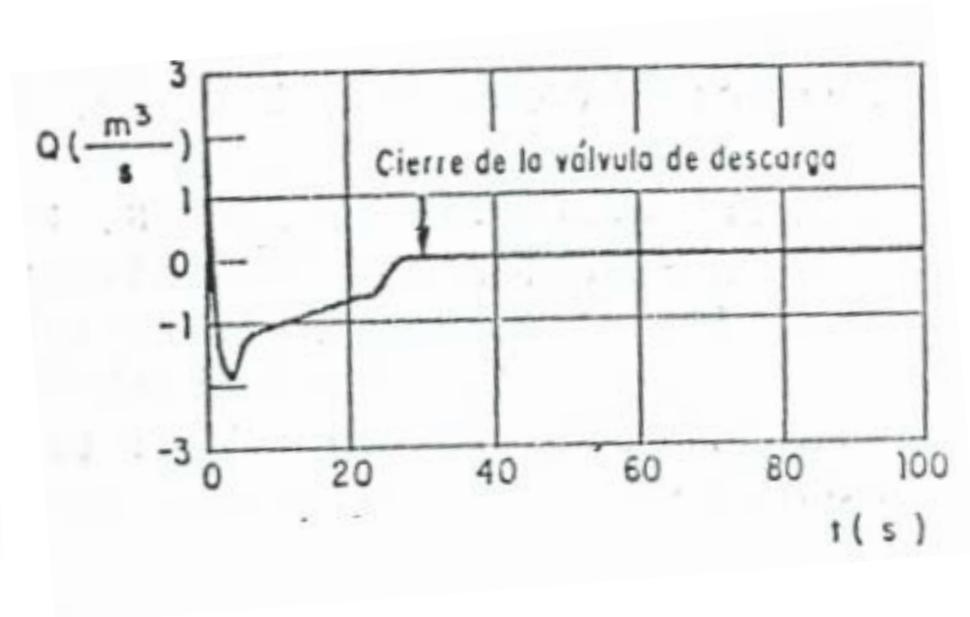
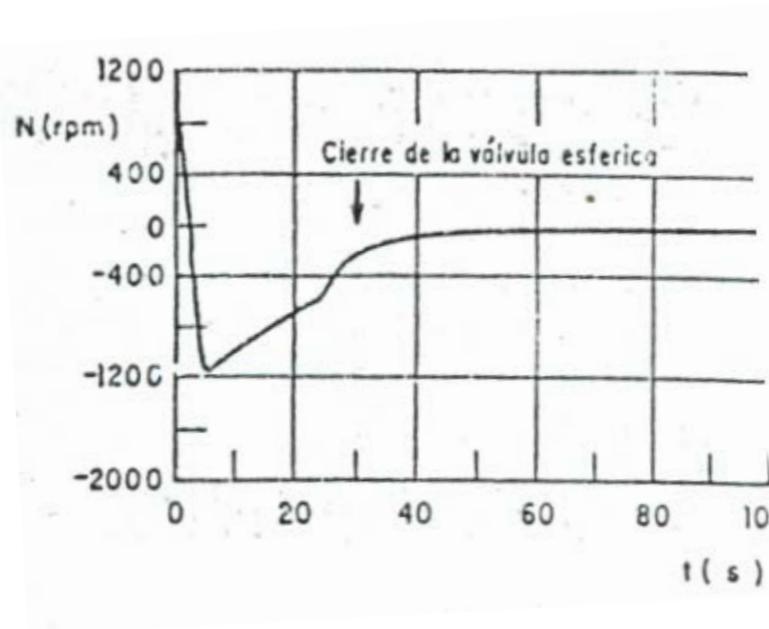
- Evolución de la velocidad de giro y del caudal para el sistema sin protección



La velocidad de reversa llega a 870rpm a los 23s.

Cámaras de Aire: ejemplo 3

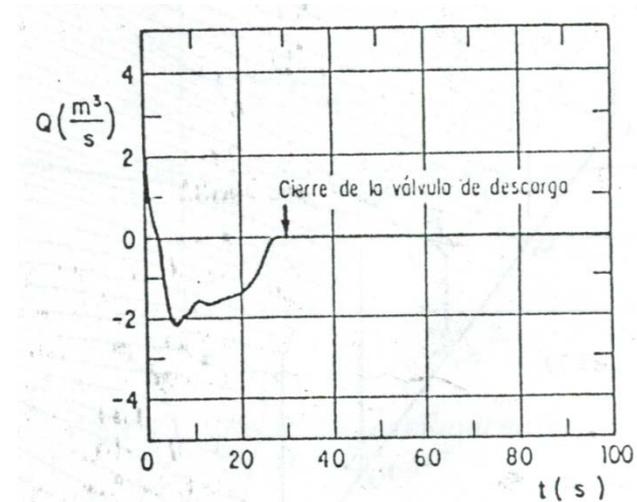
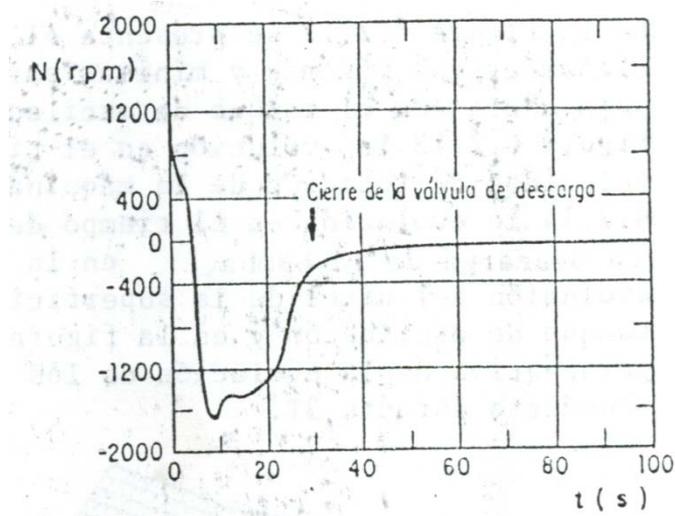
- Evolución de la velocidad de giro y del caudal para el sistema CON CA



La velocidad de reversa llega a 1150rpm.

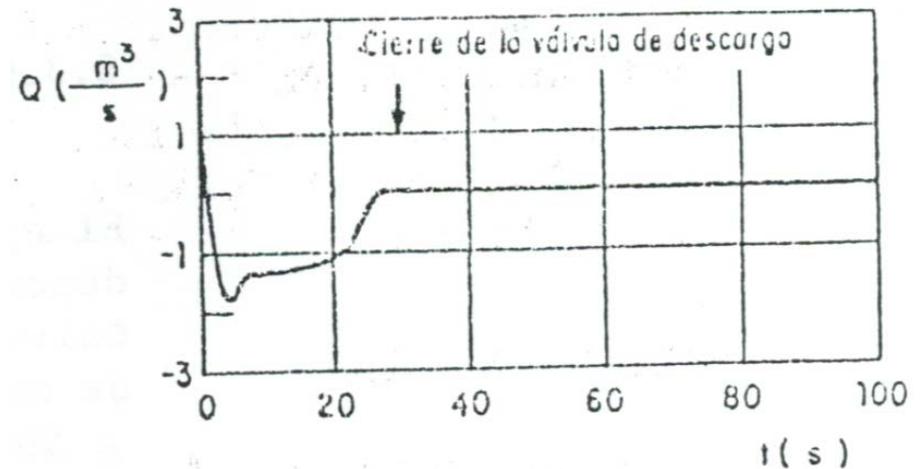
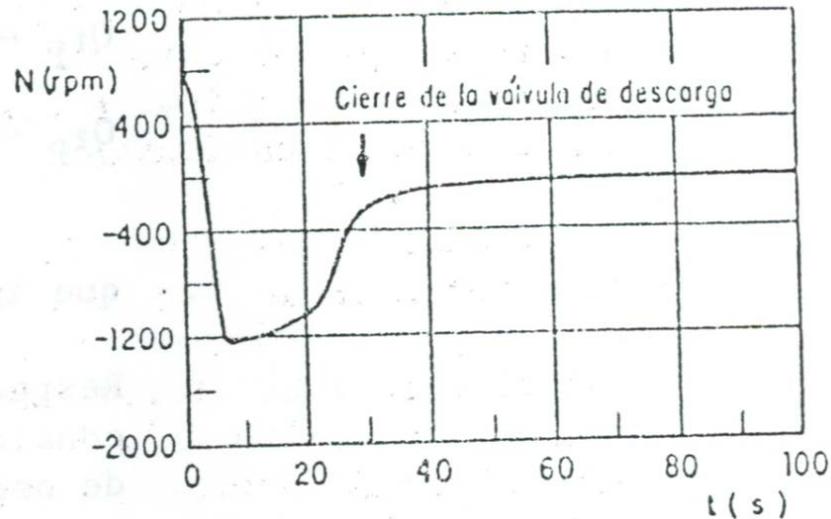
Cámaras de Aire: ejemplo 3

- Evolución de la velocidad de giro y del caudal para el sistema CON TANQUE DE OSCILACIÓN



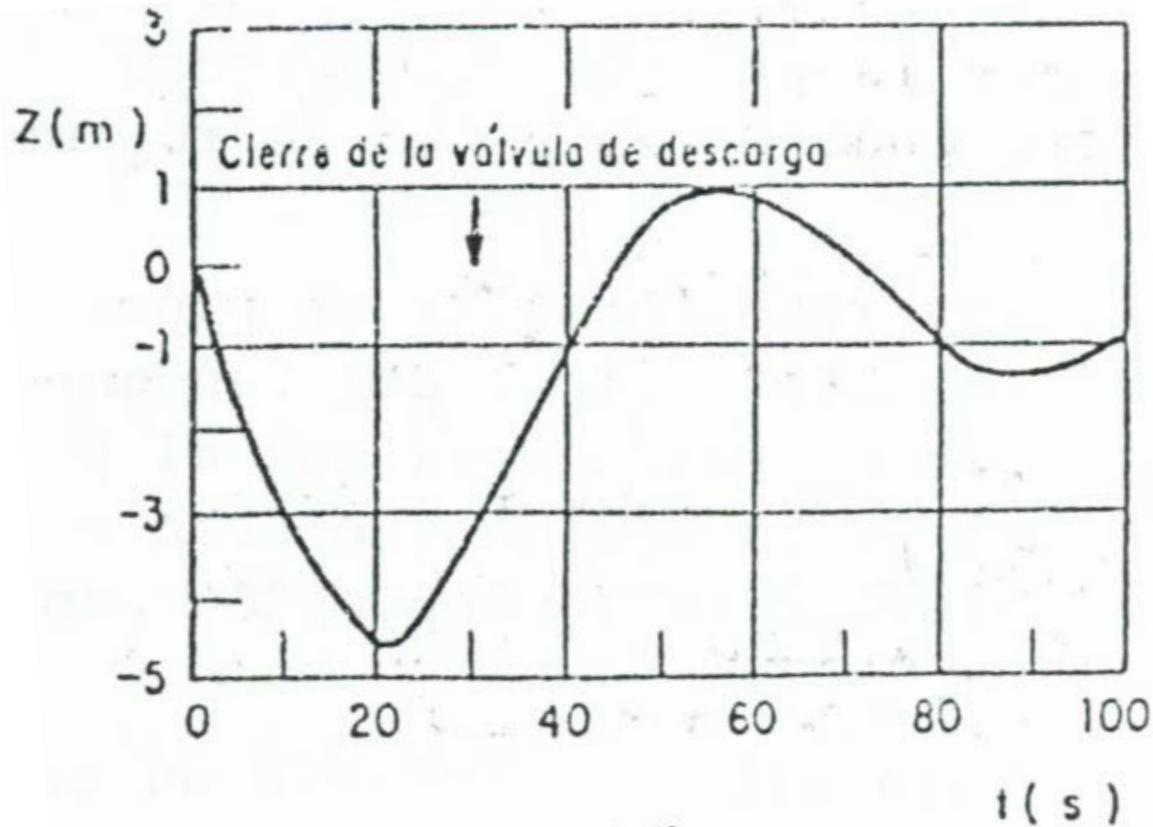
Cámaras de Aire: ejemplo 3

- Evolución de la velocidad de giro y del caudal para el sistema CON TANQUE DE UNIDIRECCIONAL



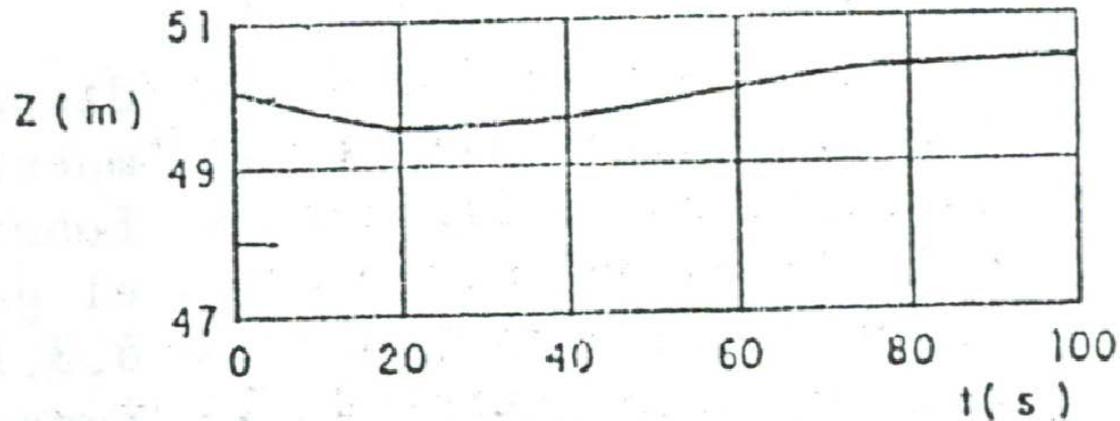
Cámaras de Aire: ejemplo 3

- Evolución del nivel de agua en la CA



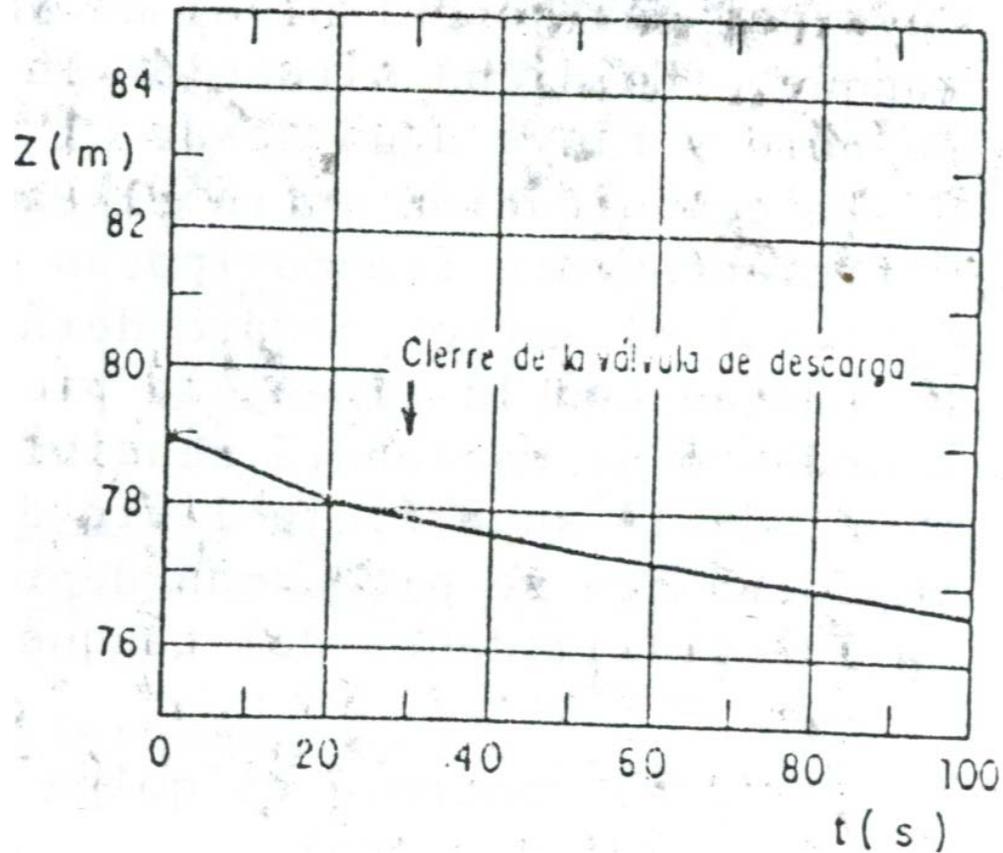
Cámaras de Aire: ejemplo 3

- Evolución del nivel de la superficie libre en el TANQUE UNIDIRECCIONAL



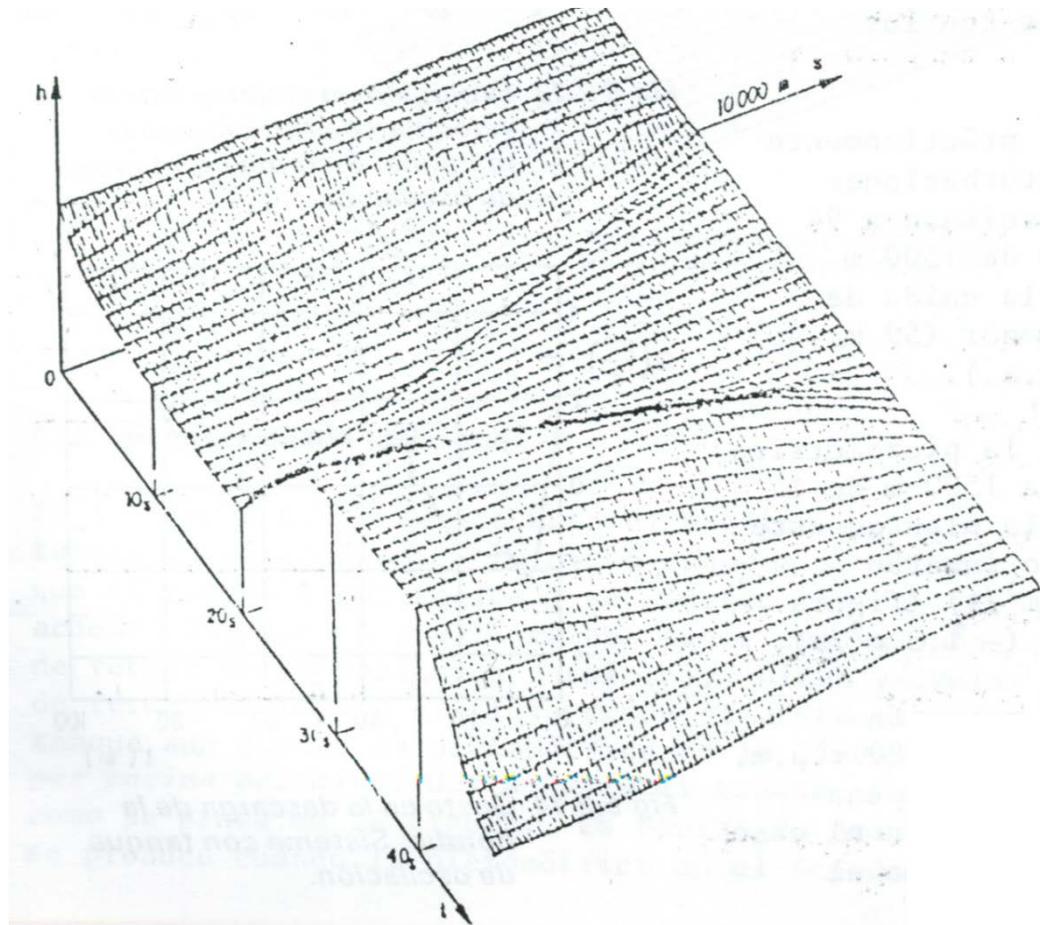
Cámaras de Aire: ejemplo 3

- Evolución en el tiempo del nivel del TANQUE DE OSCILACIÓN



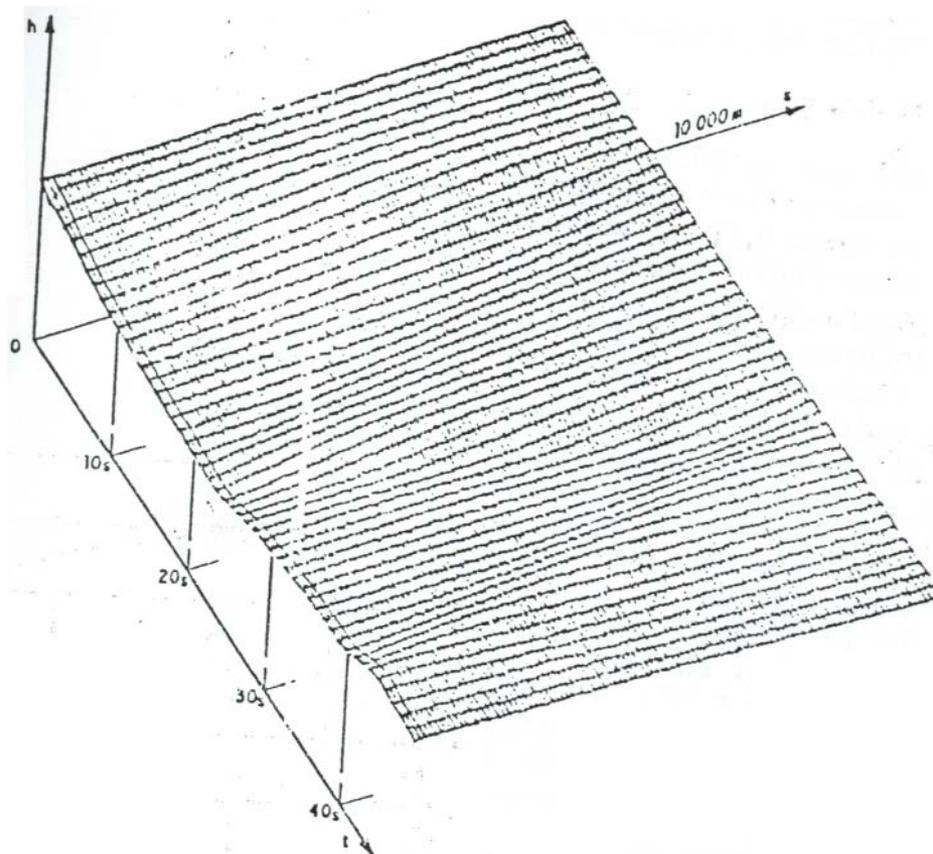
Cámaras de Aire: ejemplo 3

- Perspectiva de la evolución de la onda de piezométrica en el sistema durante $3T$, SIN PROTECCIÓN



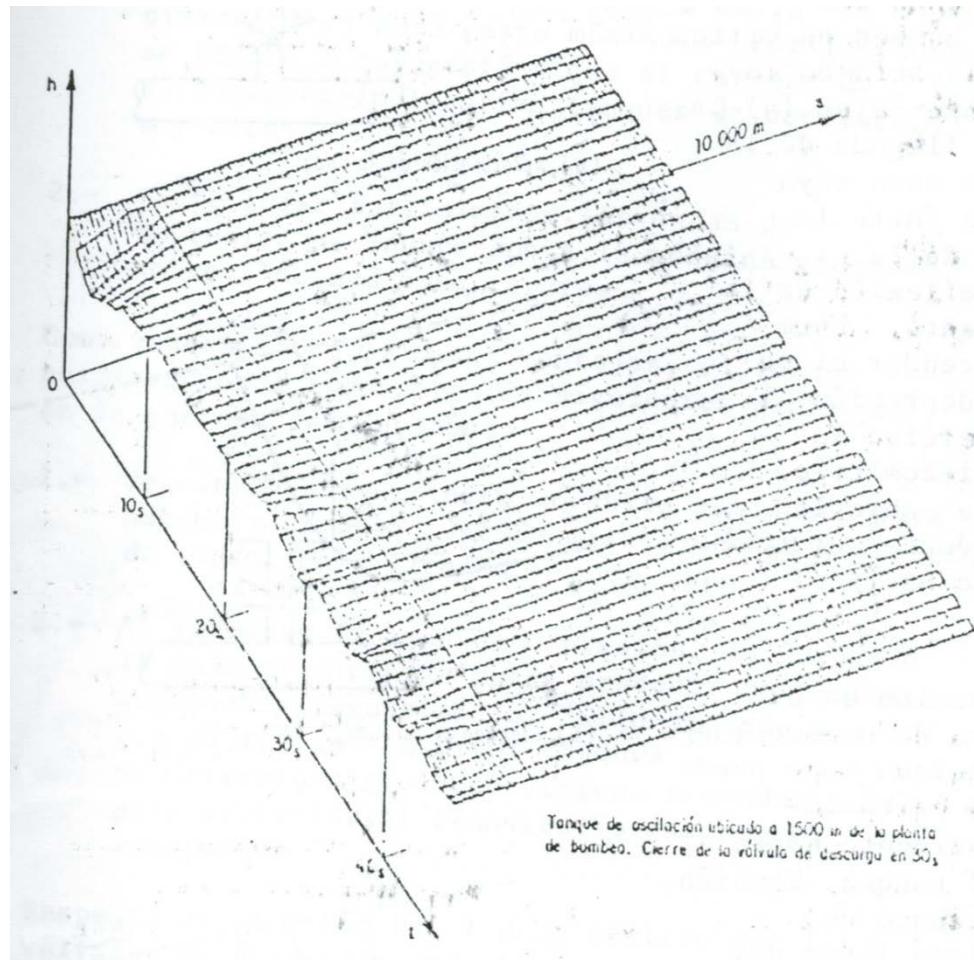
Cámaras de Aire: ejemplo 3

- Perspectiva de la evolución de la onda de piezométrica en el sistema durante $3T$, CON CA



Cámaras de Aire: ejemplo 3

- Perspectiva de la evolución de la onda en el sistema CON TANQUE DE OSCILACIÓN



Cámaras de Aire: ejemplo 4

- Perspectiva de la evolución de la onda en el sistema CON TANQUE UNIDIRECCIONAL

