

Proyecto	Conducción por gravedad La Esperanza	Fecha	16/10/2026
Elemento	Tubería de acero, cierre de la válvula de llegada	Autor	Ing. Ana Pérez

1 · Objeto y alcance

Mediante la fórmula de Michaud se determinan la sobrepresión por golpe de ariete y las envolventes de presión de la tubería de acero de la Conducción por gravedad La Esperanza ante el cierre de la válvula situada al final de una aducción alimentada desde un depósito, con un tiempo de cierre de 30 s, comprobadas frente a las presiones nominal y de vapor. Los datos proceden del proyecto, del Autor y de valores típicos del material, según se detalla en los datos de entrada.

2 · Datos de entrada

Parámetro	Símb.	Valor	Unidad	Origen
Longitud de la conducción	L	2 000	m	Perfil longitudinal del proyecto
Diámetro interior	D	300	mm	Dato del Autor
Espesor de pared	e	8	mm	Dato del Autor
Módulo de elasticidad del material	E	206	GPa	Valor típico para acero
Velocidad de régimen	v ₀	1,5	m/s	Caudal de diseño de la conducción
Tiempo de cierre de la válvula	T	30	s	Tiempo de cierre efectivo de la válvula (ajuste del actuador)
Nivel estático (cota del agua en el depósito más alto)	Z _s	100	m	Nivel máximo del depósito de cabecera
Presión nominal de la tubería	PN	25	bar	Clase de la tubería

Perfil del eje de la conducción:

Punto	Progresiva	Cota
Inicio (depósito)	0+000,00	95 m
Punto intermedio	0+800,00	60 m
Final (válvula)	2+000,00	20 m

3 · Hipótesis

- Celeridad de la onda de presión por la fórmula de Korteweg para una tubería elástica de pared delgada con juntas de dilatación a lo largo de su longitud (sin coacción axial, c₁ = 1).
- Aducción de características uniformes (diámetro, espesor y material constantes) entre el depósito de aguas arriba, de nivel constante, donde se refleja la onda, y la válvula, situada a la distancia L.
- No se consideran la fricción durante el transitorio ni elementos de protección (calderines, chimeneas de equilibrio, válvulas de alivio).
- Maniobra lenta (T > t_c): fórmula de Michaud, que supone una reducción lineal de la velocidad durante la maniobra.
- Fluido: agua, con densidad ρ = 1 000 kg/m³ y módulo de compresibilidad K = 2,1 GPa.
- Envolventes a lo largo de la conducción sobre la línea estática, a la cota Z_s = 100 m: la sobrepresión es máxima en la válvula y nula en el depósito. La longitud crítica L_c = a·T/2, medida desde el depósito, separa el tramo con la sobrepresión plena del tramo con reparto lineal hasta el depósito (triángulo si L ≤ L_c, trapecio si L > L_c).

- Presiones relativas (manométricas) en cada punto: cota piezométrica menos cota del eje.
- Las cotas piezométricas máxima y mínima corresponden a la envolvente de las fórmulas clásicas, por superposición de la sobrepresión a la línea estática, sin modelización de la cavitación; la representatividad física de la presión mínima queda acotada por la comprobación frente a la presión de vapor.
- Criterios adoptados: presión máxima no superior a la presión nominal de la tubería, PN = 25 bar; presión mínima no inferior a -0,98 bar, presión de vapor del agua (separación de columna).
- Aceleración de la gravedad $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

4 · Metodología

Celeridad de la onda de presión (Korteweg) y tiempo crítico de la conducción:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{KD}{Ee}}} \quad t_c = \frac{2L}{a}$$

La sobrepresión depende de la duración de la maniobra frente al tiempo crítico: maniobra rápida ($T \leq t_c$), fórmula de Joukowsky; maniobra lenta ($T > t_c$), fórmula de Michaud:

$$\Delta H = \frac{a v_0}{g} \quad \Delta H = \frac{2L v_0}{g T}$$

Reparto de la sobrepresión a lo largo de la conducción, con d la distancia al depósito, y envolventes sobre la línea estática en cada progresiva x :

$$L_c = \frac{a T}{2} \quad \Delta H(d) = \frac{a v_0}{g} \min\left(1; \frac{d}{L_c}\right)$$

$$H_{\max}(x) = Z_s + \Delta H(x) \quad H_{\min}(x) = Z_s - \Delta H(x)$$

5 · Desarrollo del cálculo

Con los datos expresados en SI: $D = 300 \text{ mm} = 0,300 \text{ m}$; $e = 8 \text{ mm} = 0,0080 \text{ m}$; $E = 206 \text{ GPa} = 2,06 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$; $PN = 25 \text{ bar} = 254,929 \text{ mH}_2\text{O}$.

Celeridad de la onda de presión y tiempo crítico:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^9}{1\,000}}}{\sqrt{1 + \frac{2,1 \cdot 10^9 \cdot 0,300}{2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,0080}}} = 1\,232,57 \text{ m/s}$$

$$t_c = \frac{2 \cdot 2\,000}{1\,232,57} = 3,245 \text{ s}$$

Como $T = 30 \text{ s} > t_c = 3,245 \text{ s}$, la maniobra es lenta y se aplica la fórmula de Michaud:

$$\Delta H = \frac{2 \cdot 2\,000 \cdot 1,5}{9,81 \cdot 30} = 20,39 \text{ m}$$

Longitud crítica, medida desde el depósito:

$$L_c = \frac{1\,232,57 \cdot 30}{2} = 18\,488,5 \text{ m}$$

$L \leq L_c$: reparto en triángulo, de la sobrepresión en la válvula a cero en el depósito.

6 · Resultados

Magnitud	Valor	Magnitud	Valor
Tipo de maniobra	Lenta (Michaud)	Longitud crítica, $L_c = a \cdot T/2$	18 488,5 m
Celeridad de la onda, a	1 232,57 m/s	Presión máxima en la conducción	9,84 bar (progresiva 2+000,00)
Tiempo crítico, $t_c = 2L/a$	3,245 s	Presión mínima en la conducción	0,49 bar (progresiva 0+000,00)
Sobrepresión, ΔH	20,39 mH2O		

Envolventes en los puntos del perfil:

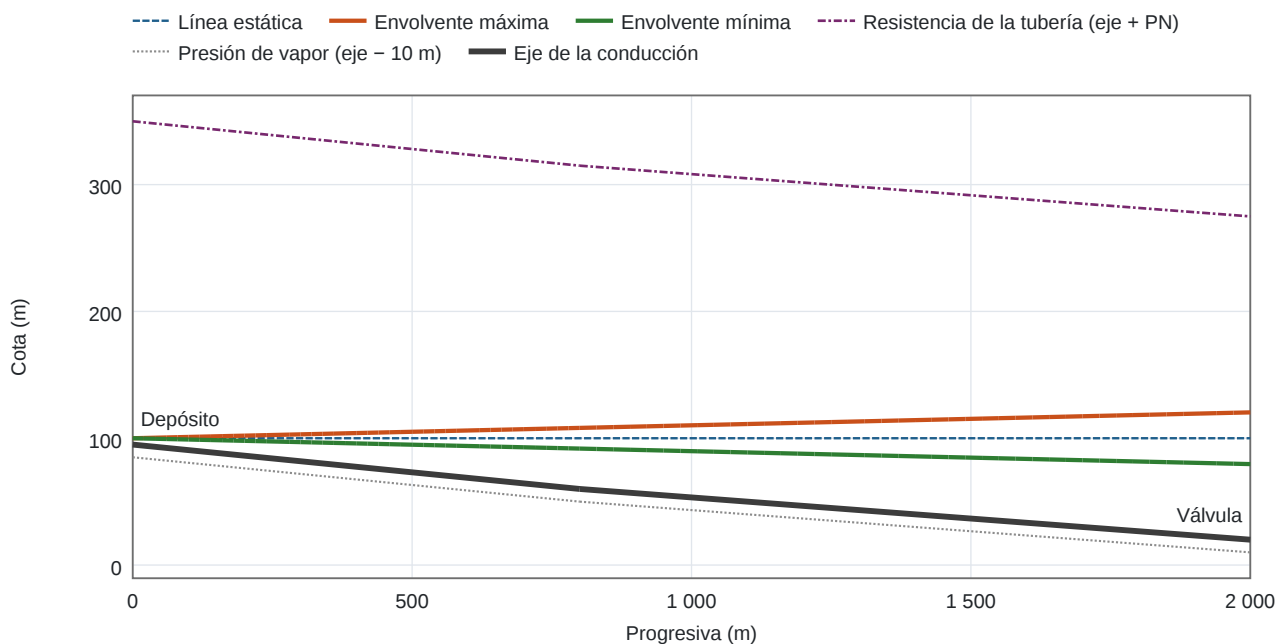
Progresiva (m)	Cota del eje (m)	ΔH (mH2O)	Cota máx. (m)	Cota mín. (m)	Presión máx. (bar)	Presión mín. (bar)
0+000,00	95,00	0,00	100,00	100,00	0,49	0,49
0+800,00	60,00	8,15	108,15	91,85	4,72	3,12
2+000,00	20,00	20,39	120,39	79,61	9,84	5,85

7 · Verificaciones de presión

Criterio	Límite	Valor obtenido	Resultado
Presión máxima frente a la presión nominal	≤ 25 bar	9,84 bar (progresiva 2+000,00)	✓ CUMPLE
Depresión frente a la presión de vapor del agua	$\geq -0,98$ bar	0,49 bar (progresiva 0+000,00)	✓ CUMPLE

La celeridad de 1 232,57 m/s responde a la rigidez de la tubería de acero con el diámetro y el espesor adoptados, y fija un tiempo crítico de 3,245 s, correspondiente al recorrido de ida y vuelta de la onda. El tiempo de cierre dado por el Autor supera ese valor, por lo que la maniobra es lenta y la sobrepresión, atenuada por la duración del cierre, resulta de 20,39 mH2O. La longitud crítica, de 18 488,5 m, excede la de la conducción, de modo que todo el trazado queda en el tramo atenuado. La presión máxima, de 9,84 bar en la válvula (progresiva 2+000,00), cumple el criterio de presión nominal con un margen del 60,6 %; la mínima, de 0,49 bar en el depósito (progresiva 0+000,00), queda por encima del límite de -0,98 bar y cumple el criterio de presión de vapor.

8 · Perfil de la conducción y envolventes



Cotas reales; escala vertical exagerada respecto a la horizontal. En rojo, los tramos en que la envolvente máxima supera la resistencia de la tubería o la mínima queda por debajo de la presión de vapor.

9 · Conclusión

Para el cierre de la válvula de llegada en 30 s se obtuvo una sobrepresión de 20,39 mH₂O, con una presión máxima de 9,84 bar en la progresiva 2+000,00 y una presión mínima de 0,49 bar en la progresiva 0+000,00. Ambos extremos satisfacen los criterios de presión nominal y de presión de vapor, por lo que la conducción resiste la maniobra considerada bajo las hipótesis adoptadas. Los valores corresponden a las fórmulas clásicas del golpe de ariete para la maniobra considerada.

10 · Referencias

- Chaudhry, M. H. (2014). *Applied Hydraulic Transients* (3.ª ed.). Springer. — Celeridad de la onda de presión, ecuación de Joukowski y tiempo crítico de la conducción.
- Wylie, E. B. y Streeter, V. L. (1993). *Fluid Transients in Systems*. Prentice Hall. — Fórmula de Korteweg, coeficiente de coacción c_1 y módulos de elasticidad de los materiales.
- Mendiluce Rosich, E. (1987). *El golpe de ariete en impulsiones* (2.ª ed.). Bellisco. — Tiempo de parada de los bombeos, fórmula de Michaud para maniobras lentas y representación de las envolventes en impulsiones cortas y largas.

Cálculos, verificaciones y redacción del informe elaborados con Calculadoras HidraSoftware, a partir de los datos y criterios definidos por el Autor, bajo cuya responsabilidad profesional se emite este documento.