

Golpe de ariete

Por qué se rompe la cañería después de una parada, cómo calcular el pico de presión y cómo proteger la impulsión

Se corta la energía, la bomba para y a los pocos segundos se escucha un golpe seco en la cañería. Una semana después aparece una junta abierta o un caño fisurado, siempre en el mismo tramo. No es mala suerte ni material defectuoso: es una onda de presión que recorre la línea cada vez que el caudal cambia de golpe. Se puede calcular, medir y controlar.

Ideas clave

- Frenar 1 m/s de agua en una cañería de acero genera del orden de 10 a 13 bar de sobrepresión.
- Si la rotura se repite en el mismo lugar después de cada parada, el problema es el transitorio, no el caño.
- La rampa de parada del variador no protege ante un corte de energía: hace falta una protección hidráulica.

Qué pasa en la cañería cuando el caudal cambia de golpe

El agua en movimiento dentro de una impulsión tiene mucha inercia. Si el caudal se frena en forma brusca (una válvula que cierra rápido, una clapeta que golpea, una bomba que para), esa energía se convierte en presión. La perturbación viaja por la cañería a la **velocidad de onda a**, que depende del líquido, del material y de la relación diámetro/espesor del caño.

$$\Delta P = \rho \cdot a \cdot \Delta v$$

ΔP sobrepresión (o depresión) en Pa; 100.000 Pa = 1 bar

ρ densidad del líquido, 1.000 kg/m³ para agua

a velocidad de onda en la cañería, m/s

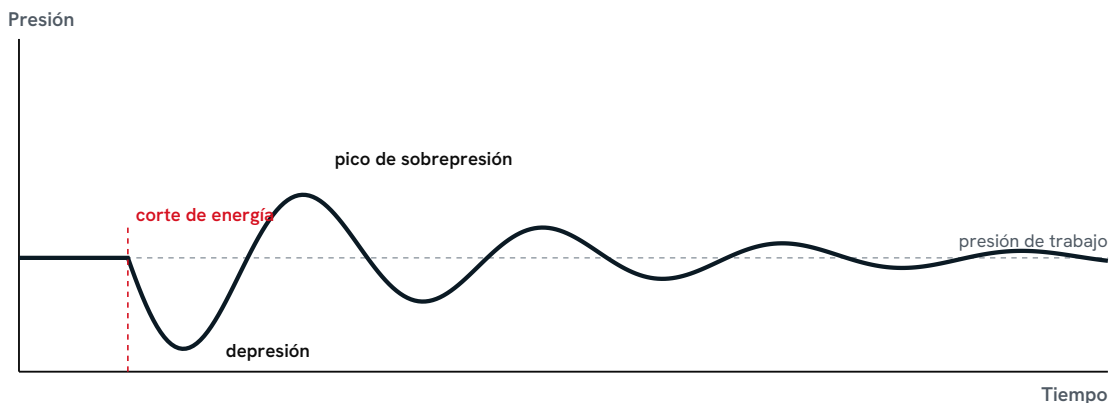
Δv cambio de velocidad del flujo, m/s

Es la ecuación de Joukowsky y da el pico teórico cuando el cambio de velocidad ocurre en un tiempo menor que $2L/a$ (L es el largo de la cañería entre la bomba y el punto de reflexión, por ejemplo un tanque). En ese tiempo la onda va hasta el extremo y vuelve. Si la maniobra es más lenta que $2L/a$, la onda reflejada llega a tiempo para descontar parte del pico.

Material de la cañería	Velocidad de onda a (agua)	Sobrepresión por cada 1 m/s frenado
Acero	1.000 a 1.300 m/s	10 a 13 bar
Hierro dúctil	1.000 a 1.300 m/s	10 a 13 bar
PVC	300 a 500 m/s	3 a 5 bar
PEAD	250 a 400 m/s	2,5 a 4 bar

Valores orientativos. La velocidad de onda real depende del diámetro, el espesor (SDR en plásticos), el anclaje y el aire disuelto o atrapado; calculala con los datos del caño.

Que el plástico tenga una velocidad de onda más baja no lo hace inmune: su presión nominal también es más baja, envejece por fatiga con cada ciclo y una depresión fuerte puede aplastar caños de pared delgada.



Qué lo provoca

- **Corte de energía o disparo del motor** con retención a clapeta en una impulsión larga o con mucho desnivel. Es el caso más severo, porque nadie controla la desaceleración.
- **Cierre rápido de una válvula:** mariposa o esférica de un cuarto de vuelta, válvula automática sin regulación de velocidad de cierre.
- **Arranque con aire en la línea:** la columna de agua se acelera contra una bolsa de aire que se comprime o escapa de golpe por una ventosa, y el agua impacta contra la válvula o el codo siguiente.
- **Separación de columna:** tras la parada, la presión en un punto alto cae hasta la presión de vapor, se forma una cavidad y, cuando las dos columnas vuelven a juntarse, el choque puede superar el pico de Joukowski.
- **Arranque o parada de una bomba en paralelo** con otras en marcha, sin retención adecuada.

Cómo se reconoce y qué rompe

Las señales son un golpe seco o una serie de golpes al parar la bomba, vibración de cañerías y soportes, manómetros con la aguja que salta o que quedan dañados, y fallas que se repiten en el mismo tramo, casi siempre después de un corte de energía o una maniobra.

Un manómetro de aguja, y más uno con glicerina, no muestra el pico real: el transitorio dura décimas de segundo. Para medirlo hace falta un transmisor de presión con un registrador de respuesta rápida (del orden de cientos de muestras por segundo o más), instalado cerca de la bomba y, si se puede, en el punto alto de la traza.

- Juntas, bridas y uniones a enchufe que se abren o pierden.
- Caños fisurados, sobre todo en codos, puntos altos y tramos con corrosión o espesor reducido.
- Clapetas de retención con ejes, bisagras o asientos rotos.
- Soportes y anclajes arrancados, carcasas de bomba fisuradas y sellos mecánicos dañados.
- Si la retención no cierra, el flujo se invierte y la bomba gira al revés: un re arranque en esas condiciones castiga eje, acople y motor.

Un caso típico, segundo a segundo

Ejemplo: impulsión de acero de 3.000 m hacia un tanque elevado, velocidad del agua 1,5 m/s, velocidad de onda estimada 1.100 m/s, presión de trabajo en la descarga de 9 bar, cañería PN 16 y retención a clapeta a la salida de la bomba.

- 01 $t = 0$ s.** Se corta la energía. La bomba pierde velocidad en pocos segundos; cuánto tarda depende de la inercia del conjunto y de la altura contra la que trabaja.
- 02 Primeros segundos.** El caudal cae y sale desde la bomba una onda de depresión. En los puntos altos la presión puede bajar hasta la presión de vapor y separarse la columna.
- 03 Después.** La columna se detiene y empieza a volver hacia la bomba. La clapeta, lenta, cierra cuando el flujo ya se invirtió y golpea contra el asiento.
- 04 Pico.** Como orden de magnitud, si los 1,5 m/s se frenan de golpe, la cuenta de Joukowsky da $1.000 \times 1.100 \times 1,5 = 1.650.000$ Pa, unos 16,5 bar (168 m de columna) sobre la presión de trabajo. Sumado a los 9 bar de trabajo, el pico teórico ronda los 25,5 bar en una cañería de 16 bar nominales.
- 05 Cada 2L/a $\approx 5,5$ s.** La onda llega al tanque, se refleja y vuelve. La presión oscila entre sobrepresión y depresión, amortiguándose por fricción durante varios ciclos.
- 06 Resultado.** La junta más débil del tramo cede, hoy o en la próxima parada. Cambiarla sin tocar la protección es esperar la siguiente rotura.

REGLA PRÁCTICA

Antes de poner un caño más grueso, calculá $\rho \cdot a \cdot \Delta v$ y compará el pico con la presión nominal de la línea. Si la presión de trabajo más ese pico supera la presión nominal, la solución es controlar el transitorio.

Cómo se evita

Para maniobras de válvula, la sobrepresión baja si el cierre efectivo dura más que 2L/a. Una primera aproximación es la fórmula de Michaud.

$$\Delta H \approx 2 \cdot L \cdot v / (g \cdot t_c)$$

ΔH sobrepresión en metros de columna de agua, válida para $t_c > 2L/a$

L largo de la cañería, m

v velocidad inicial del flujo, m/s

g 9,81 m/s²

t_c tiempo de cierre, s

En el mismo ejemplo, cerrar la válvula en 30 s deja la sobrepresión en unos 31 m (3 bar), contra 16,5 bar de un cierre brusco. Ojo: la fórmula supone un frenado parejo del caudal. Una mariposa o una esclusa cortan casi todo el caudal en el último tramo de la carrera, así que lo que tiene que ser lento es el final del cierre.

Medida	Qué hace	Cuándo conviene
Retención de cierre rápido (a resorte o tipo tobera)	Cierra antes de que el flujo se invierta y evita el golpe de la clapeta	Impulsiones con mucho desnivel y bombas en paralelo
Válvula con cierre lento controlado	Frena el caudal en un tiempo mayor que 2L/a	Paradas programadas; ante un corte solo si el actuador tiene energía de reserva

Medida	Qué hace	Cuándo conviene
Variador o arrancador suave con rampa	Acelera y desacelera el caudal de forma gradual	Arranques y paradas normales; no actúa en un corte de energía
Tanque hidroneumático o cámara de aire	Entrega agua durante la depresión y absorbe la sobrepresión	Impulsiones largas; se dimensiona con un cálculo de transitorios
Válvula de alivio o anticipadora de onda	Descarga ante sobrepresión o abre al detectar la caída inicial de presión	Como complemento, con descarga a un lugar seguro
Ventosas de triple efecto con cierre controlado	Purgan el aire al llenar y admiten aire en los puntos altos para evitar vacío	Trazas con puntos altos y llenado frecuente de la línea

OJO CON LA RAMPA DEL VARIADOR

La rampa de parada solo funciona si hay energía. En un corte o un disparo, la bomba para por inercia y la única protección es la hidráulica: retención adecuada, tanque o válvulas de alivio.

Llená la línea despacio, con la descarga parcialmente cerrada y las ventosas funcionando. En impulsiones largas o con varios puntos altos, el dimensionado de las protecciones requiere un cálculo de transitorios hecho con los datos reales de la traza.

Checklist para planta

- ☐ Registrá dónde y cuándo se repiten las roturas, y si coinciden con cortes o paradas.
- ☐ Relevá largo, diámetro, material, espesor y perfil de la impulsión, incluidos los puntos altos.
- ☐ Calculá el pico de Joukowski y comparalo con la presión nominal de cañería, bridas y válvulas.
- ☐ Revisá el tipo y el estado de las retenciones: eje, bisagra, asiento y tiempo de cierre.
- ☐ Verificá que las ventosas existan en los puntos altos y que funcionen.
- ☐ Medí el transitorio con un transmisor y registrador rápido, no con el manómetro de aguja.
- ☐ Definí un procedimiento de llenado lento de la línea después de cada vaciado.
- ☐ Ajustá las rampas de arranque y parada del variador o arrancador suave.

Cómo te ayuda WPM

Relevamos la instalación de bombeo: perfil y material de la impulsión, caudal con ultrasonido y espesores de cañería. Revisamos las válvulas de retención, las ventosas y cómo para la bomba, y con esos datos te recomendamos las protecciones que conviene evaluar para tu impulsión.

WhatsApp +54 9 299 455-3106 · ventas@wpmweb.com.ar

www.wpmweb.com.ar/contacto

Taller y oficinas: Tita Merello 3200, Neuquén Capital. Más de 25 años en bombas y motores.

Referencias. Joukowski, N. Über den hydraulischen Stoss in Wasserleitungsröhren (1900). · Wylie, E. B., Streeter, V. L. y Suo, L. Fluid Transients in Systems. Prentice Hall. · AWWA Manual M11, Steel Pipe: A Guide for Design and Installation (capítulo de golpe de ariete y transitorios).

Contenido orientativo. Los valores de referencia no reemplazan las indicaciones del fabricante del equipo ni la evaluación en sitio.