

**TWY
MAN**
INGENIEROS
CIVILES
CONSULTORES
M B A

POR
JOHN A. TWYMAN,
CEDRIC J. TWYMAN

El fenómeno del golpe de ariete puede generar presiones extremas en las redes de distribución, lo cual puede llevar a fallas en la red y artefactos hidráulicos, e inclusive rupturas en las tuberías, con el consiguiente riesgo de corte del servicio, pérdidas de agua, intrusión de contaminantes al sistema, etc. Un golpe de ariete severo puede generar la separación de la columna de agua, con consecuencias desastrosas para la integridad de las tuberías. Debido a esto la simulación del flujo no-permanente y del golpe de ariete se ha convertido en un requisito esencial para asegurar el correcto diseño y operación de los sistemas de distribución de agua. En este artículo se presentan las ecuaciones básicas que rigen el fenómeno del flujo no-permanente considerando un punto de vista numérico, junto con la presentación del método de las características aplicado a un caso clásico de la literatura. Finalmente, aspectos relativos con una visión estratégica del problema son abordados.

Golpe de Ariete

EN REDES DE TUBERÍAS

1 - INTRODUCCIÓN

El estudio de los fenómenos de flujo no-permanente (golpe de ariete, conocido en inglés como “waterhammer”) ha sido tema de interés de connotados físicos y matemáticos desde hace mucho tiempo (CHAUDHRY, 1987). El golpe de ariete aparece en las redes de tuberías cuando el estado de flujo permanente es perturbado mediante la modificación de la velocidad del flujo. En general, el cambio en la velocidad del flujo puede ser causado por la apertura o cierre de válvulas, falla de mecanismos hidráulicos, partida / parada de bombas, etc. El nombre ‘golpe de ariete’ proviene del sonido que generalmente acompaña al fenómeno, similar al ruido del martillo golpeando una tubería. Sin embargo, la magnitud del ruido no es equivalente a la magnitud de la onda de choque, ya que el sonido puede ser amortiguado mientras la onda de presión daña las instalaciones. El efecto más severo del golpe de ariete se produce generalmente cuando las bombas detienen su funcionamiento, dando lugar a presiones excesivas que pueden causar daños serios a tuberías y mecanismos hidráulicos, tales como rupturas, colapsos por vacío, etc., sin considerar otros efectos que también podrían generar costos humanos, materiales y financieros, incluyendo problemas sanitarios (Le CHEVALLIER et al., 2003).

Por tratarse de fenómenos donde las propiedades del flujo (presiones, velocidades, etc.) cambian rápidamente –tanto temporal como espacialmente– la descripción matemática del problema se complica, ya que deben resolverse ecuaciones diferenciales parciales del tipo hiperbólico casi – lineal.

Sin embargo, a diferencia de otras ramas de la ingeniería civil, como el análisis estructural, el análisis dinámico de sistemas de distribución de agua a presión está lejos de ser un aspecto rutinario en los estudios conducentes al diseño y operación de estos sistemas.

Esto puede deberse a la dificultad inherente al problema y al menor costo en vidas humanas frente a eventuales fallas. También puede ser una causa la existencia de ciertos mitos relativos al golpe de ariete (como la creencia de que su comportamiento depende de la configuración topológica de la red -mientras más ramificada, mayor disipación de sobre-presiones). Hay casos donde las ondas reflejadas desde diferentes partes de una red pueden superponerse y producir presiones (positivas o negativas) catastróficas para un sistema.

Dependiendo de la importancia de una red, la rotura de matrices o impulsiones debido a un golpe de ariete puede incrementar tanto los costos económicos (reparaciones, reemplazo de material, etc.) como los sociales (escasez de agua por cortes del servicio), convirtiendo el problema en un asunto estratégico.

Es por esto que cualquier fenómeno de flujo no-permanente (tanto en redes como impulsiones) debiera requerir siempre de un análisis numérico detallado.

2 - ECUACIONES QUE RIGEN EL FENÓMENO NO-PERMANENTE

Las leyes fundamentales que describen el flujo no-permanente en tuberías están representadas por la ecuación de la dinámica y la ecuación de conservación de la materia, las que acopladas forman un sistema de ecuaciones diferenciales parciales del tipo hiperbólico casi – lineal (CHAUDHRY, 1987). Para el caso del escurrimiento no-permanente rápido, dichas ecuaciones pueden expresarse como (CHAUDHRY, 1987):

$$\begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} 0 & gA \\ \frac{a^2}{gA} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix}_s + \begin{bmatrix} \frac{fQ |Q|}{2DA} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

- Q : caudal
- H : cota piezométrica
- g : constante de gravedad
- a : velocidad de traslación de la onda de presión
- f : factor de fricción de DARCY – WEISBACH
- D : diámetro
- A : sección transversal
- t y s : indican derivada parcial con respecto al tiempo y espacio

La parte superior del sistema (1) representa a la ecuación de la dinámica, mientras que la inferior a la de continuidad.

Supuestos

La ecuación (1) puede ser derivada usando los siguientes supuestos (BERGANT y TIJSSELING, 2001; SIMPSON y WU, 1997):

- El flujo en la tubería es unidimensional, considerando un valor promedio para la velocidad y una distribución uniforme de la presión en la sección transversal del tramo.
- Las pérdidas de carga por fricción son aproximadas a los valores de fricción permanente o casi permanente.
- Tanto el material constituyente de la tubería como el agua tienen un comportamiento lineal y elástico.
- Los cambios de presión inducidos por la interacción fluido - estructura son pequeños comparados con la onda de presión que se propaga en el líquido.

2.1 - Velocidad de traslación de la onda de presión

Según WATTERS (1984), la ecuación más general para calcular la onda de presión es:

$$a^2 = \frac{K_l / \rho_{mix}}{1 + \frac{K_l D}{E e} \varphi + \theta \frac{K_l}{K_{air}}} \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

- K_l = módulo de elasticidad del líquido.
- ρ_{mix} = $(1 - \theta)\rho_l$, con θ = porción de aire en el líquido.
- ρ_l = densidad del líquido.
- E = modulo de elasticidad del material de la tubería.
- D = diámetro interior de la tubería.
- e = espesor de la pared de la tubería.
- φ = factor de anclaje de la tubería.
- K_{air} = modulo de elasticidad del aire.

Supuestos

En relación con el cálculo de la velocidad de la onda (a), es necesario considerar los siguientes supuestos (BERGANT y TIJSSELING, 2001; SIMPSON y WU, 1997):

- La tubería permanece llena de agua durante el evento no-permanente.
- No se genera la separación de la columna de agua durante el evento no-permanente, es decir, en todo momento la presión es mayor que la presión de vapor.
- El contenido de aire en el líquido es pequeño ($\theta \rightarrow 0$), de tal forma que la magnitud de la velocidad de la onda puede asumirse como constante.

El problema matemático representado por el sistema (1) no tiene solución analítica directa, debiendo resolverse numéricamente, siendo lo más recomendable, dada la complejidad de algunos sistemas, hacerlo mediante programas computacionales (BOULOS et al., 2005; WOOD et al., 2005).

3 - MÉTODOS NUMÉRICOS DE SOLUCIÓN EXISTENTES

Los métodos numéricos que se han propuesto para resolver el problema del flujo no-permanente en redes se pueden agrupar en:

- Método de las Características (MC).
- Métodos de Diferencias Finitas (MDF's)
- Método de Elementos Finitos (MEF)
- Métodos Híbridos (MH's)

Todos los métodos numéricos subdividen (discretizan) el espacio posición / tiempo en intervalos finitos y calculan las variables de estado Q y H en dichos puntos. En general, cada método posee distintas propiedades numéricas que afectan su exactitud, estabilidad (convergencia) y tiempo de ejecución, lo cual acota también su campo de acción y define sus ventajas y desventajas relativas.

En el análisis del flujo no-permanente se aplicará el MC, debido a que corresponde al método más usado en la práctica. A continuación el MC será descrito brevemente.

3.1 - Método de las Características (MC)

El Método de las Características ha sido el método explícito más usado en el flujo no-permanente en tuberías, debido principalmente a la facilidad para introducir diferentes dispositivos y condiciones de borde (bombas, válvulas, estanques hidroneumáticos, etc.). Sin embargo, como todo método explícito, adolece de restricciones desde el punto de vista de su estabilidad numérica (condición basada en el número de COURANT ó C_r).

Debido a su mayor predominio, aquí se utilizará la modalidad del MC con intervalos de tiempo pre-especificados (KARNEY, 1984), el cual calcula explícitamente los valores de las variables de estado en secciones intermedias de la discretización, mediante la intersección de las ecuaciones características positiva y negativa, lo que lleva a:

$$H_p = (C_p + C_m)/2 \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_p = (C_p - C_m)/2B \dots\dots\dots (4)$$

Los coeficientes B, C_p y C_m son constantes y dependen de las características físicas del tramo o del valor de las variables de estado en el tiempo previo (valor conocido).

En las secciones de los extremos se requiere de una ecuación de borde adicional, la que debe resolverse conjuntamente con la ecuación característica negativa o positiva, según se trate de la primera o última sección de la subdivisión, respectivamente. El cálculo se inicia a partir de una situación inicial conocida, generalmente flujo permanente.

KARNEY (1984) presenta un sistema generalizado de condiciones de borde, apto para ser usado en sistemas complejos de tuberías, con dispositivos de control de golpe de ariete, conectados a nodos (estanques principalmente) y en línea (tramos, válvulas, bombas, etc.).

Suponiendo que no hay pérdida de carga singular ni almacenamiento en el nudo, la ecuación de compatibilidad que liga a todos los tramos, consumos o estanques conectados al nudo es

$$H_p = C_C - B_C \cdot Q_{ext} \dots\dots\dots (5)$$

Donde C_C , B_C son constantes conocidas y Q_{ext} , el caudal externo que sale del nodo.

La ecuación (5) implica que una red muy compleja puede ser ‘desacoplada’ o ‘desarticulada’ en cada nodo, siempre y cuando se agregue como condición de borde una ecuación de compatibilidad (la ecuación 5) que restituya la continuidad de caudales y la unicidad de la cota piezométrica en cada nodo. Esta propiedad permite simplificar notablemente el tratamiento de las redes de conectividad compleja.

4 - EJEMPLO DE ANÁLISIS DEL GOLPE DE ARIETE

Se analiza el fenómeno del golpe de ariete en un sistema como el mostrado en la Figura 1 (BOULOS et al., 2005), el cual consta de 8 tramos, 9 nudos, 3 bucles, un estanque (H = 191 m) y una válvula de cierre rápido ubicada aguas abajo del sistema. La numeración de las tuberías y nudos es mostrado en la Figura 1. Los datos del sistema se muestran en la Tabla 1. Las velocidades de la onda de las tuberías oscilan entre 914.4 y 1.219,2 (m/s).

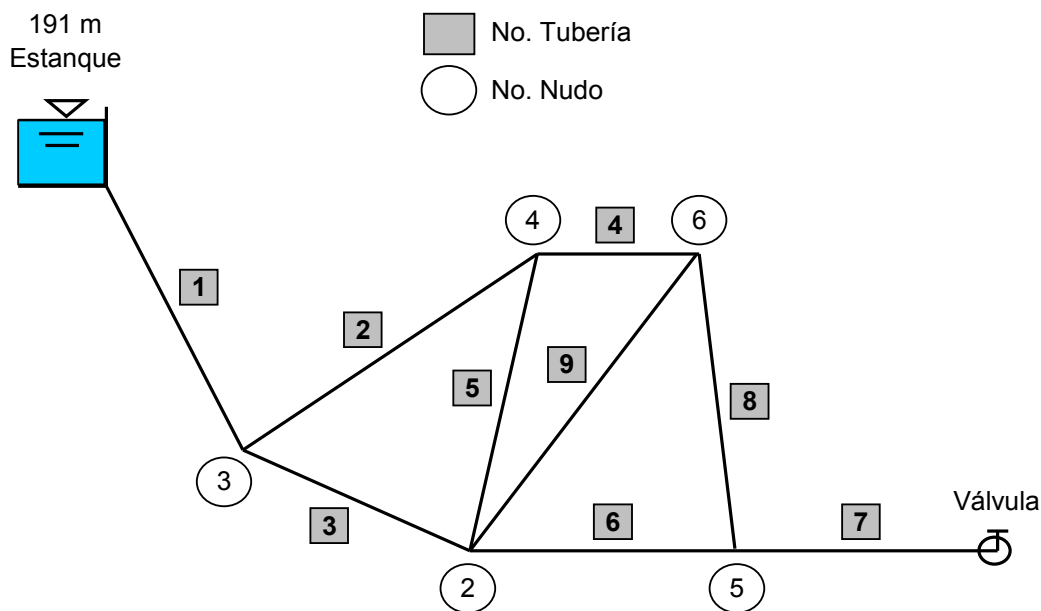


Figura 1. Esquema de la red ejemplo.

Tabla 1. Datos de las tuberías.

TUBO	DIAM mm	LONG m	FRICC
1	914.4	609.6	0.030
2	762.0	914.4	0.028
3	609.6	609.6	0.024
4	457.2	548.6	0.020
5	457.2	457.2	0.020
6	457.2	487.7	0.025
7	762.0	670.6	0.040
8	609.6	457.2	0.030
9	914.4	609.6	0.024

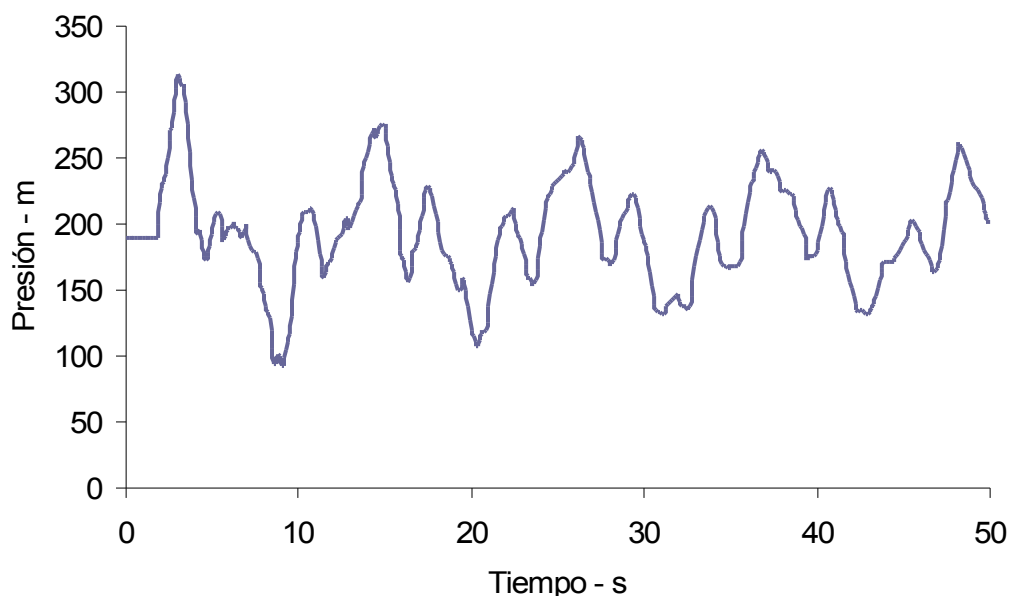


Figura 2. Evolución temporal de la presión en el nudo 3.

Al aplicar el programa computacional llamado GOLPAR+ (desarrollado por TWYMAN Ingenieros Consultores Ltda.) se registran las presiones mostradas por la Figura 2 (nudo 3) cuando la válvula es cerrada súbitamente. Se puede observar que el cierre de la válvula genera altas presiones en el nudo 3, el que está relativamente alejado, a 3 bucles de “distancia”, de la fuente de la perturbación. Queda de manifiesto que la presencia de bucles en los sistemas no garantiza la disipación de las ondas de presión a medida que se propagan por el sistema, ya que estas eventualmente podrían superponerse y sumarse, generando con ello presiones extremas que podrían ser catastróficas para el sistema.

5 - GOLPE DE ARIETE DENTRO DE UN CONTEXTO ESTRATÉGICO

Los efectos no deseados del Golpe de Ariete (fallas en las tuberías y pérdidas de agua) impactan negativamente en la estrategia organizacional reflejada en la Visión, Misión, Análisis del Entorno, Análisis Interno y Focos Estratégicos. La estrategia se ve afectada en:

Recursos humanos, SI / TI

Los empleados operativos desconocen las causas y los efectos del fenómeno de Golpe de Ariete y carecen de sistemas de información y tecnologías de apoyo para la prevención y el control de gestión.

Procesos y estructura

La empresa no cuenta con procesos y procedimientos para prevenir y controlar el Golpe de Ariete. No se cuenta con áreas o departamentos dedicados al tema.

Clientes, proveedores y medioambiente

Los efectos del fenómeno de Golpe de Ariete impactan en forma importante a los clientes, proveedores y medioambiente (pérdidas de agua, inundaciones, contaminación, daños a la propiedad, mala calidad de servicio, reclamos). Estos problemas afectan gravemente la imagen de la Compañía.

Finanzas y accionistas

Los problemas financieros para la empresa y sus accionistas provocadas por los efectos del Golpe de Ariete se reflejan en elevadas multas (en el caso de las empresas reguladas por interrupción no programada del servicio) y aumento de los costos operacionales y no operacionales (daños a la propiedad, demandas civiles, indemnizaciones).

Si la empresa no considera el fenómeno del Golpe de Ariete (causas y efectos) dentro de su plan estratégico, el cumplimiento de la Visión futura a alcanzar puede verse seriamente afectada en aspectos estratégicos relevantes.

6 - BIBLIOGRAFÍA

1. BERGANT A., TIJSSELING A. (2001) - "Parameters affecting water hammer wave attenuation, shape and timing", 10th International Meeting of the Work Group on The Behavior of Hydraulic Machinery under Steady Oscillatory Conditions, IAHR, June 26 - 28, Trondheim, Norway, pp. 12.
2. BOULOS P., KARNEY B., WOOD D., LINGIREDDY S. (2005), "Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems", Journal AWWA, May 2005, pp. 111 – 124.
3. CHAUDHRY M.H. (1987) – Applied Hydraulic Transients, Van Nostrand Reinhold Co., NY, USA.
4. KARNEY B.W. (1984) – Analysis of Fluid Transients in Large Distribution Networks, Ph.D. Thesis, U. of British Columbia, Canada, Sept. 1984.
5. Le CHEVALLIER M., GULLICK R., KARIM M., FRIEDMAN M., FUNK J. (2003) "The potential for health risks from intrusion of contaminants into the distribution system from pressure transients", Journal of Water and Health, 01.1, pp. 1 – 14.
6. SIMPSON A.R., WU Z.Y. (1997) - "Computer modeling of hydraulic transients in pipe networks and the associated design criteria", MODSIM 97, International Congress on Modeling and Simulations, Modeling and Simulations Society of Australia, Hobart, Tasmania, Australia, December.
7. TWYMAN J. (2004) - Decoupled Hybrid Methods for Unsteady Flow Analysis in Complex Pipe Networks, ISBN 956-8142-17-7, pp. 185.
8. WATTERS G.Z. (1984) - Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipelines, 2nd Edition, Butterworths, Boston, 1984.
9. WOOD D., LINGIREDDY S., BOULOS P., KARNEY B., Mc PHERSON D. (2005), "Numerical methods for modeling transient flow in distribution systems", Journal AWWA, July 2005, pp. 104 – 115.

Referenciar como:

TWYMAN J., TWYMAN C. (2009), "Golpe de Ariete en Redes de Tuberías", TWYMAN Ingenieros Consultores Ltda., en sitio Web www.twyman.cl, pp. 7