

# OPERACIÓN DE VÁLVULAS EN EL DESARROLLO DEL GOLPE DE ARIETE

Provenzano, P. G., Baroni, F.J. y Aguerre, R. J.\*

\* Departamento de Tecnología, Universidad Nacional de Luján  
Int. Ruta 5 y 7, 6700 Luján, Argentina. TE: 54-(02323)-423171  
e-mail: rjaguerre@gmail.com

## Resumen

El golpe de ariete es un fenómeno transitorio que se produce en fluidos confinados en movimiento variado. La forma en que se produce la variación de movimiento del fluido, se asocia a la operación de cierre parcial o total de una válvula. La ley de cierre de válvula describe la reducción de velocidad del fluido conforme se va cerrando aquella. Esta reducción determina la forma en se opera la transferencia de la energía cinética del flujo en energía potencial. Se ha desarrollado una expresión analítica que permite incluir la función de cierre. La ecuación obtenida y ha permitido calcular la amplitud, forma y fase de la onda de presión para diferentes dunciones de cierre. Se ha encontrado que un cierre lineal es el que produce la menor amplitud de la variación de presión.

## Introducción

La bibliografía relativa al Golpe de Ariete, es amplia, y cubre los últimos 150 años. El primer trabajo sobre el Golpe de Ariete se atribuye a Ménabréa (1858, 1862). Weber (1865) y Michaud (1878) han realizado los primeros desarrollos relativos al fenómeno, observando la naturaleza oscilatoria del transitorio.

Los experimentos realizados por Joukowsky (1900, 1904) sobre el sistema de distribución de agua de Moscú, han sido la base de todos los estudios del siglo XX sobre este tema.

Allievi (1903) ha extendido los resultados de Joukowsky, analizando los casos de cierre no instantáneo de válvulas.

Wood (1938) introdujo el cálculo operacional de Heaviside y presentó una solución para una tubería simple con cierre instantáneo de válvula. Rich (1945) propuso el uso de la transformada de Laplace-Mellin para el mismo caso, y también estudió un cierre lineal.

En el caso de transitorios rápidos, el uso de modelos de estado estacionario para considerar las pérdidas por fricción, conduce a grandes discrepancias en atenuación y forma de la onda de presión cuando se comparan con los resultados experimentales (Golia, 1990; Bergant y Simpson, 1994).

*Kerr* (1929), *Angus* (1935), *Wood* (1938) y *Rich* (1945) avanzaron en el análisis de Golpe de Ariete y su relación con el cierre de válvulas. El trabajo de *Kerr* (1929) es un antecedente significativo en esta línea de investigación pues centró su atención en la posibilidad de lograr una determinada forma de onda

de presión transitoria mediante la variación de la velocidad de fluido en el cierre (Wood,1938)

Algunos autores han observado la influencia de la ley de cierre en la forma de la onda de presión, sin embargo el conjunto de funciones de cierre que han sido incluidos en sucesivos trabajos en modelos del Golpe de Ariete se reducen al cierre instantáneo, la función lineal y la función cosenoidal.

## Objetivos

El objetivo del presente trabajo es a) analizar la influencia de la función de cierre de la válvula en el desarrollo del Golpe de Ariete, su influencia en la forma, magnitud y fase de las ondas de presión para variaciones rápidas y lentas del caudal, b) desarrollar una solución analítica generalizada que describa el desarrollo de la onda de presión desde el inicio de la perturbación del caudal.

## Metodología

El sistema de ecuaciones que definen el modelo analítico de Golpe de Ariete, unidimensional sin fricción es:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \delta \frac{\partial V}{\partial t} \quad (1.a)$$

$$-\frac{1}{a^2} \frac{\partial p}{\partial t} = \delta \frac{\partial V}{\partial x} \quad (1.b)$$

Donde V es la velocidad del fluido, p es la presión,  $\delta$  es la densidad del fluido, x es la posición axial y t es el tiempo.

La solución en el campo de la Transformada de Laplace de las ecuaciones (1.a) y (1.b) tiene la siguiente forma:

$$\bar{P} = A \cdot \cosh\left(\frac{sx}{a}\right) + B \cdot \sinh\left(\frac{sx}{a}\right) + \frac{P_0}{s} \quad (2)$$

Para determinar las expresiones de A y B se deben conocer las condiciones de contorno. Una de ellas es la que define la ley de cierre.

Se propuso la siguiente función para modelizar distintas leyes de cierre, total o parcial, y reemplazar la curva continua por una poligonal que la aproxime:

$$V(t) = (V_0 - V_\tau) \left[ 1 - \left( \frac{t}{\tau} \right)^m \right] + V_\tau \quad (3)$$

donde  $0 \leq m < \infty$  y  $V_0$  y  $V_\tau$ : velocidad inicial y final del fluido durante el cierre, y  $\tau$  es el tiempo de las operación de cierre.

La reducción de la velocidad del fluido es lineal por tramos, y queda descrita por rectas de pendiente negativa que corresponden a segmentos de tiempo ( $\beta$ ) iguales. Las condiciones de contorno para resolver la ecuación (1.a y 1.b) son entonces:

$$\text{Para } t \geq 0, \quad p = p_0 \quad \text{en } x = 0 \quad (4.a)$$

$$\text{Para } 0 \leq t \leq \tau, \quad V = V(t) \quad \text{en } x = L, \quad (4.b)$$

$$\text{Para } t > \tau, \quad V = V_\tau \quad \text{en } x = L, \quad (4.c)$$

Se resolvió mediante la Transformada de Laplace, obteniéndose la siguiente expresión:

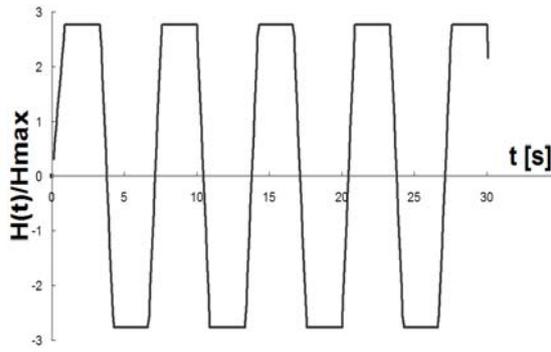
$$p(x,t) = \frac{8L\rho}{\pi^2} \sum_{i=1}^k \left( \frac{V_i - V_{i-1}}{\beta} \right) \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\cos\left( (2n-1)\pi \cdot \frac{a}{2L} \cdot (t - (i-1)\beta) \right) \cdot \sin\left( (2n-1)\pi \frac{x}{2L} \right)}{(2n-1)^2} - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\cos\left( (2n-1)\pi \cdot \frac{a}{2L} \cdot (t - i\beta) \right) \cdot \sin\left( (2n-1)\pi \frac{x}{2L} \right)}{(2n-1)^2} \right\} \quad (5)$$

## Resultados

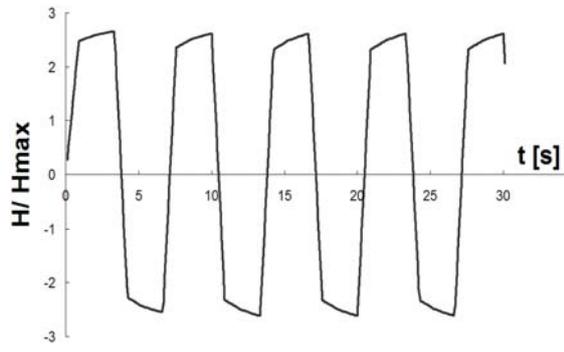
La ecuación (5) permite el modelado del transitorio de presión para el rango de funciones de cierre dadas por el intervalo  $0 \leq m < \infty$ .

Las soluciones desarrolladas mediante poligonalización de la función de cierre, aportan información sobre la forma de onda en función de la ley de cierre. Se observan cuatro conjuntos bien definidos de función de cierre (Figura 1):

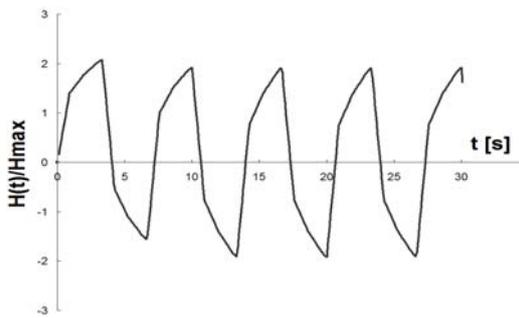
- Ley de cierre cuasi-instantánea: disminución prácticamente instantánea de la velocidad del fluido. ( $m \rightarrow 0$ )
- Funciones cóncavas: caracterizadas por una disminución más o menos abrupta de la velocidad del fluido en una primera etapa. ( $m < 1$ ).
- Función lineal: presenta un decrecimiento uniforme (lineal) de la velocidad del fluido durante todo el tiempo de cierre de válvula. ( $m = 1$ ).
- Funciones convexas: caracterizadas por una disminución inicial moderada que posteriormente se hace abrupta en los últimos instantes del cierre. ( $m > 1$ ).
- Ley de cierre cuasi-instantánea con retardo: disminución prácticamente instantánea de la velocidad del fluido para  $t = \tau$ . ( $m \rightarrow \infty$ )



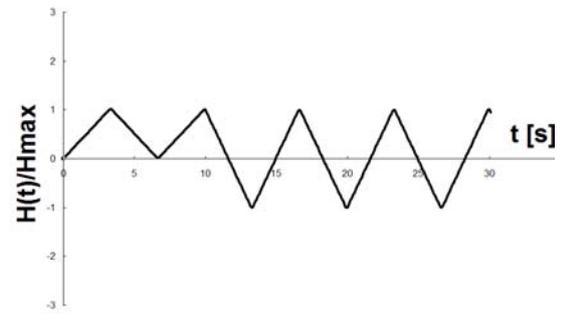
a)  $m = 0,001$



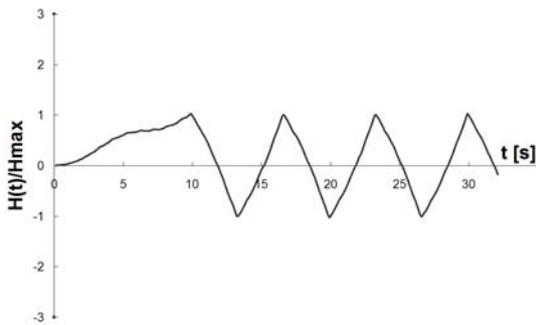
b)  $m = 0,05$



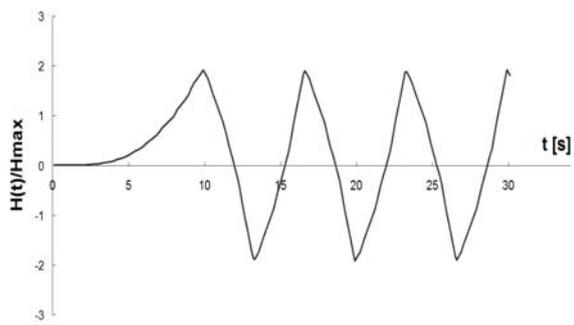
c)  $m = 0,3$



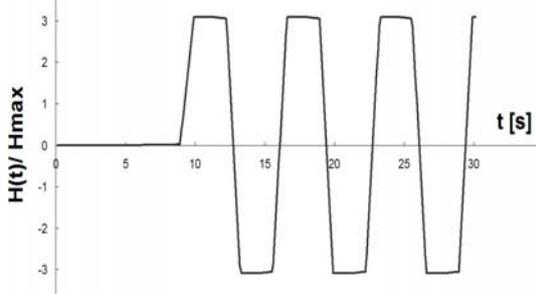
d)  $m = 1$



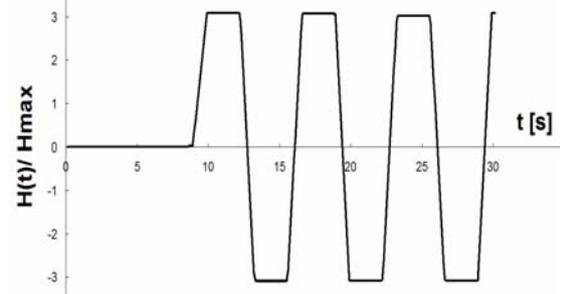
e)  $m = 2$



f)  $m = 4$



g)  $m = 48$



h)  $m = 1000$

**FIGURA 1.** : Onda de presión transiente en función de la ley de cierre, ecuación (2) para  $k = 32$ .

Los cierres con  $m \ll 1$  han generado formas de onda trapezoidales con la base menor como pico de sobrepresión pendiente creciente hacia la derecha. Su

amplitud ha sido del orden del 93% de la máxima registrada. En el rango de valores de  $0,05 \leq m \leq 0,3$  la onda se ha ido triangularizando y se observa que los picos y valles son ahora forma de v.

Para  $m = 1$  la onda observó forma estrictamente triangular y la amplitud ha sido del orden del 36% de la máxima, constituyendo el mínimo registro de amplitud de toda la serie.

Los cierres con  $2 \leq m \leq 4$  han dado formas de onda que van progresando a formas triangulares con sesgo a la izquierda. Para  $m = 48$  volvió a aparecer la forma trapezoidal con picos formados por mesetas de pendiente negativa. La fase de la onda en cada caso se ha mantenido inalterable, sin observar corrimientos.

## Conclusiones

El modelizado poligonal de ley de cierre ha permitido estudiar una extensa variedad de funciones. Ha aportado un caudal de información en cuanto a la forma de la onda generada, la amplitud y la fase. Se ha verificado la existencia de una relación entre la ley de cierre y la forma que adopta la onda y se ha cuantificado esa relación. Estas relaciones resultan relevantes en la descripción del transitorio puesto que las funciones de cierre con valores muy alejados de la unidad generan formas trapezoidales tendientes a la onda cuadrada donde los picos y valles de presión tienen forma amesetada implicando su permanencia en esos valores durante una fracción de tiempo mientras que en leyes de tipo lineal ( $m = 1$ ) o cercanas a esta forma se generan ondas de tipo triangular.

El modelo propuesto ha permitido también explorar el comportamiento de la presión durante el cierre mismo extendiendo el análisis al instante de inicio de la perturbación.

Se ha encontrado que la ley de cierre afecta la amplitud de la onda. Se encontró que, en el mismo sistema, la amplitud en el cierre lineal ha sido del orden de 0,36 de la amplitud para un cuasi instantáneo ( $m < 0,05$ ). En base a lo expuesto se sugiere emplear leyes de cierre lineal o cuasilineales como medida de prevención de averías. Así se logra:

- Mínima expresión de la amplitud de la onda de presión transitoria.
- Forma de la onda de presión triangular con menor contenido de armónicos reduciendo así la fatiga de los materiales.

Los resultados obtenidos muestran que es posible determinar la función de cierre a partir de la observación de la forma de la onda transiente.

El modelado realizado muestra que los casos donde  $m \leq 1$  el pico máximo se da en 1° tercio del intervalo de cierre aproximadamente. Este resultado muestra la importancia de la evaluación del transitorio desde el inicio de la operación de cierre. Sin embargo en la mayoría de los modelos y también numerosos registros experimentales se omite la descripción del transitorio durante este intervalo.

La consideración de la función de cierre como condición de contorno y su inclusión en el algoritmo operada en el campo de la Transformada de Laplace

ha resultado un mecanismo conveniente dada la relativa sencillez y versatilidad que confiere el desarrollo de una única ecuación que puede incorporar distintas leyes de cierre para analizar las características del fenómeno en cada caso.

## **Bibliografía**

- Allievi, L. (1903), 'Notes I-IV', en 'Theory of Waterhammer' by E. E. Holmes, R. Garoni, Rome, 1925.
- Angus, R.W. (1935), 'Simple graphical solution for pressure rise in pipes and pump discharge lines', Journal Eng. Inst. Canada, Vol 18.
- Bergant, A., Simpson, A.R. y Vitkovsky, J.P. (1999). 'Review of unsteady friction models in transient pipe flow.' 9th International Meeting on the Behaviour of Hydraulic Machinery Under Steady Oscillatory Conditions, International Association of Hydraulic Research, Brno, Czech Republic, 7-9 Sept.
- Bergant, A., y Simpson, A.R. (1994). 'Estimating unsteady friction in transient cavitating pipe flow'. Proc., 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on WaterPipeline Systems, BHR Group, Edinburg, Scotland, 333-342.
- Bergant, A., y Tijsseling, A. (2001) 'Parameters affecting water hammer wave attenuation, shape and timing'. Proc. 10<sup>th</sup> Int Meeting of the Work Group on The Behaviour of Hydraulic Machinery Under Steady Oscillatory Conditions, Trondheim, Norway
- Brunone, B., Golia, U.M., y Greco, M. (1991). 'Some remarks on the momentum equation for fast transients. Int. Meeting on Hydraulic Transients with Column Separation', 9th Round Table, IAHR, Valencia, Spain, 140- 148.
- Brunone, B., y Greco, M. (1990). 'Un modello per la ricostruzione di fenomeni di colpo d'ariete anche in presenza di cavitazione. Riconcontro sperimentale'. Proc., 22nd Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Cosenza, Italy, Vol. 4, 147-160 (in Italian).
- Constantinesco, G.(1922), 'Theory of wave transmission - A treatise on transmission of power by vibrations' (Walter Haddon, London).
- Dailey, J.W., Hankey, W.L., Olive, R.W. y Jordaan, J.M. (1956). 'Resistance coefficients for accelerated and decelerated flows through smooth tubes and orifices'. J. Basic Engrg., Ser. D, Vol 78, pp. 1071-10777
- Evangelisti, G. (1969), 'Waterhammer analysis by the method of characteristics', L'Energia Elettrica Vol 10, no. 10-12.
- Fox, J.A. (1968), 'The use of the digital computer in the solution of waterhammer problems', Proc. I.C.E., Vol 39.
- Golia, U.M. (1990). 'Sulla valutazione delle forze resistenti nel colpo d'ariete'. Report n. 639, Dept. of Hydr. and Envir. Engrg., University of Naples, Naples, Italy (in Italian).
- Harding, D.A. (1966), 'A method of programming graphical surge analysis for medium speed computers', Proc. I.Mech.E., Vol 180, Part 3E, 1965- 1966, pp88-103.
- Joukowsky, N. (1900), 'Über den hydraulischer Stoss in Wasserleitungsröhren', Memoirs de l'Academie Imperiale des Sciences de St Petersburg, 1900 translated as Waterhammer by O Simin, Procs. AWWA., Vol 24, 1904.

- Joukowsky, N. (1904), 'Waterhammer', Translated by O. Simin., Procs. American Water Works Assoc., Vol 24, pp341-424.
- Kerr, S.L. (1929), 'New aspects of maximum pressure rise in closed conduits', Trans. ASME., Vol 51, 21.
- Kranenberg, C. (1974), 'Gas release during transient cavitation in pipes', Jour. of Hyd. Div., ASCE., 100, HY10, pp1383-1398, October.
- Ménabréa, L. -F. (1858) 'Note sur les effets du choc de l'eau dans les conduites'. (Note on effects of water shock in conduits.) *Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de l' Academie des Sciences ( Paris )* **47**, 221 – 224 (In French). [English translation by A. Anderson (1976)].
- Ménabréa, L. -F.(1862) 'Note sur l'effet du choc de l'eau dans les conduites'. (Note on the effect of water shock in conduits.) *Annales du Genie Ci y il ( Paris )* **1**, 269 – 275 (in French).
- Michaud, J. (1878), 'Coup de bellier dans les conduites. Etude des moyens pour en attenuer les effets', Bull. Soc. Vaudoise Eng. Arch., Lausanne.
- Rich, G.R. (1945), 'Waterhammer analysis by the Laplace-Mellin transformation', Trans. ASME.
- Safwat, H.H., y van der Polder, J. (1973). 'Friction frequency dependence for oscillatory flows in circular pipes'. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 99(HY11), 1933-1945.
- Swaffield, J.A. (1970), 'A study of column separation following valve closure in a pipeline carrying aviation kerosene', Thermodynamics and Fluid Mechanics Convention, Steady and Unsteady flows, 57, Procs. I.Mech.E., Vol 184.
- Swaffield, J.A. y Bridge, S. (1983), 'Applicability of the Colebrook White formula to represent frictional losses in partially filled unsteady pipeflow', Journal of Research, National Bureau of Standards, Washington DC, Vol 88, No 6, Nov-Dec.
- Vardy AE, Fan D, y Tijsseling AS (1996), 'Fluid/structure interaction in a T-piece pipe', *Journal of Fluids and Structures*, **10**, 763-786
- Vardy, A. E. y FAN, D. (1989) 'Flexural waves in a closed tube'. In *Proceedings of the 6 th International Conference on Pressure Surges*, BHRA, Cambridge, U. K., October 1989, pp. 43 – 57.
- Vardy, A.E., Hwang, K.L., y Brown, J.M.B. (1993). 'A weighting function model of transient turbulent pipe flow'. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 31(4), 533-548.
- Vardy, A.E., y Brown, J.M.B. (1995). 'Transient, turbulent, smooth pipe flow'. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 33(4), 435-456.
- Weber, E.H. (1865), 'Theorie der durch wasser oder andere incompressible Flussig-Kieten in elastischen Rohren fortgepflanzten Wellen', Leipzig.
- Wood, F.M. (1938), 'Application of Heaviside's operational calculus to the solution of waterhammer problems', Trans. ASME., Vol 59, pp703-713, Nov.