

EFFECTO DE LA PRESIÓN SOBRE LAS FUGAS DE AGUA EN UN SISTEMA DE TUBERÍA SIMPLE

Luis Javier Montoya*
Rubén Darío Montoya**

Recibido: 25/08/2010

Aceptado: 17/05/2012

RESUMEN

Este artículo es un resultado del proyecto de investigación “Estudio del efecto de la presión en una red de distribución sobre las fugas de agua, utilizando una red de experimentación en laboratorio” y en él se analizan las relaciones entre la sobrepresión generada por el transiente hidráulico originado por el cierre rápido de una válvula y las fugas inducidas mediante orificios en un sistema experimental de tuberías. El presente artículo se concentra en describir las alteraciones en la onda de presión cuando se presentan fugas de agua en un sistema de tuberías simple. Para ello, se analizan los resultados obtenidos en un montaje experimental y se comparan las ondas obtenidas con y sin fuga, en condiciones similares de caudal. Se observó que existe un decaimiento en las presiones máximas en el sistema al comparar las presiones en los sistemas con fuga y sin fuga. Comparando los resultados obtenidos para el ensayo con fugas y sin fugas se observa una mayor atenuación de la onda ante la presencia de fugas.

Palabras clave: fugas de agua, pérdidas de agua, ondas de presión en tuberías.

* Ingeniero Civil, Doctor en Ingeniería, Magíster en aprovechamiento de recursos hidráulicos. Profesor Asociado, Grupo de Investigación y mediciones ambientales GEMA, Universidad de Medellín. E-mail: lmontoya@udem.edu.co.

** Ingeniero Civil, Magíster en aprovechamiento de recursos hidráulicos. Profesor Asociado, Grupo de Investigación en Ingeniería Civil GICI, Universidad de Medellín. E-mail: rmontoya@udem.edu.co.

EFFECT OF PRESSURE OVER LEAKS IN A SIMPLE PIPELINE SYSTEM

ABSTRACT

This paper is a result of the research project “Experimental study of leaks at water pipeline systems” and it anal Experimental results obtained from a laboratory experiment are employed to study the relationship between the pressure-wave generated by the hydraulic transient phenomenon generated by the sudden closure of a valve and a artificial leak generated in a simple pipeline system. This paper focuses in the alteration of the pressure wave description in a simple pipe. For this, experimental pressure waves data with and without leak were analyzed and compared. It shows alterations in the maxima pressure at system compared with and without leak conditions. Also, the imposition of leaks in the system causes an apparent acceleration in the decay of transient signal in the condition with leaks.

Key words: leaks, water losses, pipelines pressure wave.

INTRODUCCIÓN

Diferentes autores se han concentrado en estudiar las fugas de agua en sistemas de tuberías. La diferencia entre la cantidad de agua que sale de una planta de tratamiento al sistema de distribución y el agua que es registrada por los sistemas de medición en los usuarios es conocida como pérdidas de agua. El control de dichas pérdidas es parte importante de un programa de uso eficiente del agua, pues ellas pueden constituir un sobre costo importante para las empresas prestadoras del servicio de suministro de agua.

Además, muchos sistemas viejos en mal estado hacen que sea necesario tratar gran cantidad de agua, siendo muy poca la que finalmente es utilizada por el usuario final. El impacto económico y ambiental que tienen estas pérdidas ha obligado la imposición de penalizaciones y regulaciones por parte de las autoridades competentes para el control de las mismas.

Estas pérdidas son originadas por diferentes causas, entre las que se pueden mencionar: la imprecisión de los medidores de caudal, el subregistro de los medidores, los contrabandos o conexiones fraudulentas, los consumos no contabilizados, las fugas en las uniones, juntas de las tuberías, accesorios, conexiones y acometidas, la falta de mantenimiento y reposición en las redes, los escapes en caudales bajos por fugas o goteras, fugas propias del desgaste o avería de la tubería, fugas por fisuras o poros originadas por el debilitamiento de las tuberías facilitado por la corrosión, fugas por roturas originadas el movimiento o asentamiento del suelo, tráfico, o mala calidad de los materiales, fugas originadas por instalaciones inadecuadas y las fugas originadas por fluctuaciones de presión en la red, transciendes de presión o presiones excesivas.

Las pérdidas debidas a la instalación y desgaste de las tuberías son conocidas con el nombre de pérdidas reales o técnicas, y son las pérdidas físicas de agua, pues las otras son debidas a problemas en la medición o gestión del sistema. Cuando una

tubería es sometida a altas presiones en la red, estas pérdidas técnicas tienden a aumentar. Un adecuado manejo de estas fugas es importante pues: (a) se evita tratar y bombear volúmenes suplementarios de agua, (b) las fugas introducen aire al sistema haciendo que los medidores de caudal no sean totalmente confiables y que se aumenta la oxidación en el sistema por la presencia de aire, (c) se originen daños a los cimientos de edificaciones, (d) se produzca una sobrecarga a las redes de alcantarillado, (e) se produzca una disminución de la presión de servicio y (f) se aumente la probabilidad de contaminación del agua transportada. Un programa de control de fugas debe incluir una adecuada comprensión de los fenómenos involucrados en la generación y detección de las mismas.

Hay una gran cantidad de técnicas y metodologías para la detección de fugas en sistemas de distribución de agua, entre las que se pueden mencionar: (a) técnicas visuales en las que se pueden identificar de encharcamientos en la superficie del suelo, o el crecimiento anómalo de la vegetación para tuberías enterradas [1] (b) la auscultación directa con aparatos de amplificación de ruido micrófonos a tierra o geófonos y correladores [2], (c) procedimientos acústicos o electro-acústicos [1], (d) técnicas de radar mediante las cuales se detectan los puntos a lo largo de la tubería con baja impedancia eléctrica o (e) técnicas electromagnéticas para identificar roturas en tuberías metálicas, (f) inyección de gases trazadores [3], (g) monitoreo de las presiones mientras un tapón de espuma es forzado a lo largo de la tubería principal [1], (h) Análisis de fotografías aéreas infrarrojas para detección de zonas húmedas [1], (i) auditorías al sistema de distribución de agua, realizando balances de masa en diferentes puntos de la red [4], o realizando análisis estadístico de los registros, particularmente de las horas de bajo consumo [5], (j) Analizando la respuesta de un sistema a la apertura y el cerrado de una válvula [6], (k) también se utiliza para la detección de fugas, el método de impulso-respuesta [7-9] y el método de frecuencia-respuesta [10].

En el presente trabajo se presentan resultados experimentales iniciales donde se analizan los efectos de la presión sobre las fugas de agua en un sistema de tuberías simple. Para ello se realizó un montaje experimental en un laboratorio y se generaron ondas de presión en el sistema por medio de la operación de una válvula de cierre rápido. Se compararon las ondas de presión obtenidas en diferentes condiciones de operación del sistema (diferentes caudales), y se compararon las ondas obtenidas en la condición con y sin fuga. Los resultados obtenidos contribuirán a la comprensión de los efectos de las fugas en la tubería y se espera aporten elementos importantes en la utilización de nuevas técnicas para el control de fugas.

1 MODELO MATEMÁTICO

Diferentes factores afectan la fuga. Entre los principales se puede mencionar el efecto de las altas presiones pues al aumentar la presión aumenta la velocidad de salida a través del orificio por el que se causa la fuga y con ello el caudal de la misma. Algunos autores abstraen el efecto del orificio a un orificio circular, en el que existe una relación entre el caudal de fuga y la presión en la tubería [11]. En [12] se presenta una serie de ecuaciones para el caudal de fuga, que presenta una relación de tipo potencial tal como la mostrada en (1) para presiones continuas en el sistema y diferentes tipos de falla, donde tanto el coeficiente como el exponente de la relación presentada en (1) son dependientes de la presión, pues la presión puede originar cambios elásticos y en la forma del orificio.

$$Q_f = cP^b \quad (1)$$

Un caso de particular interés para las fugas puede darse cuando se presenten sobrepresiones por fenómenos como el golpe de ariete. El golpe de ariete es un fenómeno oscilatorio dinámico originado por el cierre súbito de una válvula. Se producen sobre-elevaciones de la presión y una onda de presión que viaja a lo largo de la tubería.

Las ecuaciones que gobiernan el flujo de un segmento de tubería se pueden representar mediante las ecuaciones de continuidad y de momentum:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fQ|Q|}{gDA^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

Donde, H cabeza, Q caudal, A el área de la sección transversal de la tubería, f el factor de fricción de Darcy, a la celeridad, x la distancia, t el tiempo y g la aceleración de la gravedad. En [13] se muestra cómo las diferentes aproximaciones empleadas para resolver (2) y (3) como los volúmenes finitos (FV), el método de las características (MOC) y las diferencias finitas (FD) a pesar de representar de forma diferente la física del fenómeno, pueden resultar en esquemas que pueden ser similares e inclusive idénticos. En el método de las características (2) y (3), pueden ser transformadas en:

$$\frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} + a \frac{fQ|Q|}{gDA^2} = 0$$

a lo largo de $\frac{dx}{dt} = a \quad (4)$

$$\frac{dH}{dt} - \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} - a \frac{fQ|Q|}{gDA^2} = 0$$

a lo largo de $\frac{dx}{dt} = -a \quad (5)$

Las anteriores ecuaciones se pueden resolver en el plano x-t en tramos que seguirían las líneas características siempre que no se produzcan cambios en los caudales. Si en el tramo aparecen fugas, las pendientes de dichas características deberían cambiar. Diferentes autores utilizan este principio para la detección de fugas, utilizando el método de impulso-respuesta [7-9] y el método de frecuencia-respuesta [10].

Algunos autores como [6] y [8], utilizan las alteraciones que generaría una fuga en el patrón de oscilación del sistema para determinar la presencia de fugas en la tubería al comparar el patrón generado en el caso con y sin fugas. Además, si hacen uso de las características de las ondas de presión, [6] reportan que si una onda se mueve a una velocidad a , la ubicación de la fuga se puede encontrar con los tiempos de la producción del gradiente de presiones t_1 y el tiempo la onda reflejada t_2 [6].

2 MONTAJE EXPERIMENTAL

Para el montaje experimental se utilizó un sistema tanque orificio con un tramo típico de tubería PEAD Acuaflex de PAVCO de 90 metros de longitud y un diámetro nominal de 63 mm, con un RDE 17, una velocidad de onda de 299 m/s (valor sugerido por el fabricante de la tubería) y un coeficiente de rugosidad $K_s=0.007$ mm (también sugerido por el fabricante). El sistema cuenta con un pequeño tramo de aproximadamente 1 m para la instalación de los diferentes esquemas de pérdidas (orificios, ranuras, tuberías defectuosas, etc.), el cual se acopla al sistema a través de un sistema de bridas para su fácil instalación.

Para la generación de flujo transitorio se emplea una válvula solenoide accionada por un

sistema electrónico de cierre rápido, la onda de sobrepresión es monitoreada a partir de un transductor de presión con un rango de 0 a 100 psi; precisión de 0.5%; tiempo de respuesta inferior a 5 ms y salida análoga de 4-20 mA que lleva la señal a través sistema electrónico de adquisición de datos, con comunicación serial RS232. La información es descargada en tiempo real a un computador personal para su posterior análisis y procesamiento con una resolución temporal de 6 milisegundos. La figura 1 muestra un esquema explicativo del montaje implementado. La unión al sistema tanque orificio se realiza a través de una reducción brusca como se muestra en la figura 1. El sistema de alimentación consiste en un tanque elevado para el control de cabeza de presión constante y una tubería de alimentación de 8 pulgadas, que es alimentada por tres bombas en paralelo con una capacidad de 30 l/s por cada una. La descarga es realizada directamente a un tanque que comunica a través de un canal rectangular al tanque de alimentación de las bombas.

Se realizaron 15 ensayos iniciales para calibrar el sistema y determinar su sensibilidad ante diferentes caudales. Para analizar la influencia de las características del sistema en el comportamiento de las fugas, y las posibles variaciones en la ondas

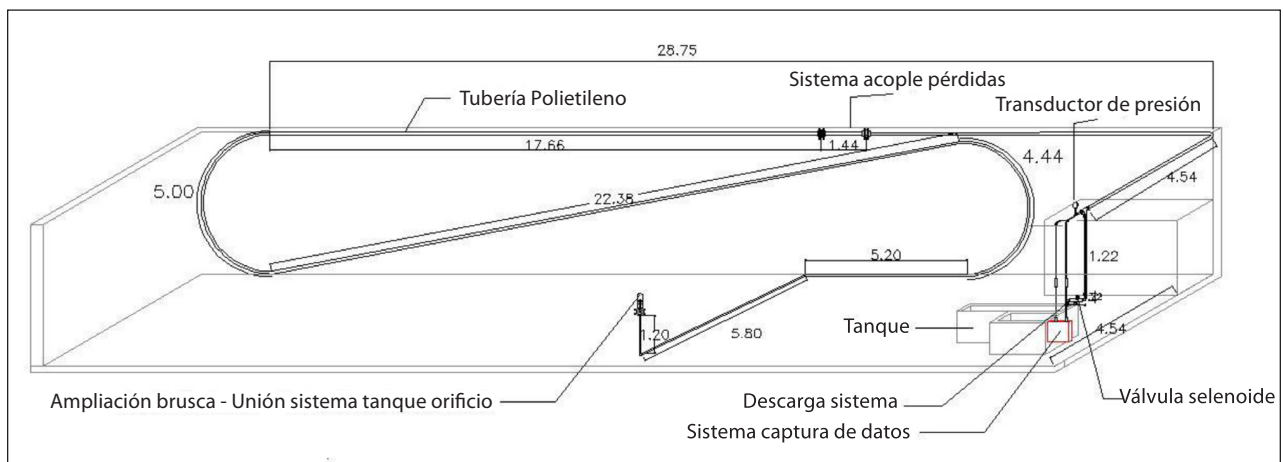


Figura 1. Esquema del modelo implementado.

Fuente: los autores

de presión generadas por dichas fugas, se efectuaron 15 ensayos con fugas generadas a partir de un orificio circular con un diámetro aproximado de 4.76 mm y 15 ensayos con un diámetro de 3.18 mm. Para los ensayos con fugas simuladas se midió cómo las variables principales, el caudal del sistema, el caudal de fuga promedio durante un período aproximadamente igual al tiempo de disipación de la onda de presión a partir del cual se tiene la condición hidrostática y la onda de presión, se atenúan completamente, así como las presiones iniciales en el sistema en el punto de fuga y en el punto de ubicación del transductor de presiones. En esta investigación se analizó el efecto de las fugas sobre la forma de las ondas de presión durante el transiente hidráulico.

3 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

La tabla 1 presenta las características de 3 de los ensayos realizados para la calibración del sistema (sin fugas). Las ondas de presión generadas en estos ensayos se presentan en la figura 2. En estas figuras las presiones están expresadas en metros columna de agua.

Las mediciones permitieron observar variaciones en las ondas de presión. Se encontraron diferencias en las presiones máximas de más del 48% entre los tres ensayos presentados ($P_{\max}=57.50$ m c.a. -en metros columna de agua- para el ensayo 1, 47.60 m c.a para el ensayo 2, y de 30.15 m c.a. para el ensayo 3) ante cambios porcentuales del caudal del orden del 56% para el ensayo 1 y de 44% para el ensayo 2. Los dos primeros ensayos con caudales más altos alcanzaron valores de presión de vacío -8.13 m c.a. y -7.90 m c.a. durante la primera oscilación. Se observó, (figura 2), que los caudales más altos presentaron presiones de vacío en el sistema, lo que podría aumentar los problemas relacionados con el atrapamiento de aire a través del orificio de fuga y otros problemas como la reducción de la sección efectiva de la tubería, la posibilidad de vaporización y cavitación, el aumento de pérdidas

de carga, aumento de imprecisión en errores en los elementos de medición y daños de la tubería por sobre-presión o succión. Ante la aparición de presiones de vacío durante los ensayos de calibración, se encontró la necesidad de considerar en los análisis los efectos por posibles cambios de fase de la columna de agua, si se alcanza la presión de vapor. Al respecto [14] indican la presencia de dos efectos asociados con la cavitación plenamente distinguibles dependiendo de la magnitud y configuración de los vacíos: (1) cavidades locales con altos porcentajes de vacíos que a menudo producen el fenómeno de separación de columna (2) y/o cavitación distribuida de vapor caracterizada por bajos porcentajes de vacíos, adicionalmente [14] indica la presencia de otros tipos de cavitación como la cavitación gaseosa. Estas bajas presiones súbitas que pueden generar daños importantes a las tuberías se producen al formarse una gran cavidad de aire en la tubería que cambia las condiciones de flujo

Tabla 1. Características de cada uno de los ensayos

Ensayo No.	Caudal (L/s)	Presión máxima (m c.a)	Presión mínima (m c.a)
1	4.10	57.50	-8.13
2	3.22	47.60	-7.98
3	1.81	30.16	-2.81

Fuente: los autores

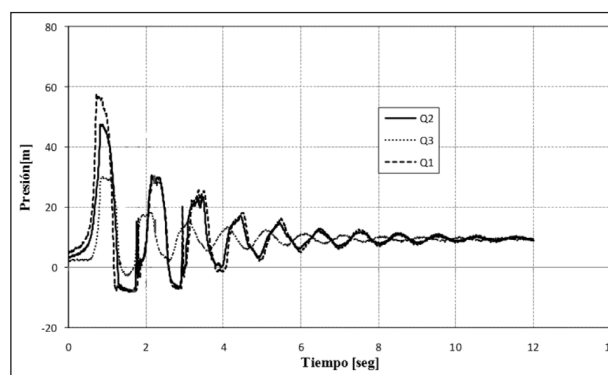


Figura 2. Variación de la presión del sistema para diferentes caudales sin fugas en el sistema

Fuente: los autores

aguas arriba y aguas abajo de la cavidad, cuando la onda de presión regresa genera la implosión de la cavidad y origina la sobrepresión súbita.

En la figura 2 se observa el decaimiento de la onda de presión. Al analizar la forma en que decaen los picos de máxima presión se observa que el ensayo 1 presenta una tasa de decaimiento mayor a la obtenida en los ensayos 2 y 3, por lo que en este ensayo se producen mayores tasas de disipación de energía. Los datos experimentales presentan un comportamiento consistente con los modelos teóricos mencionados en las expresiones (1) a (9). Estos han sido corroborados numéricamente por muchos autores [3, 13, 15-20].

La atenuación, la forma y el tiempo de las ondas generadas están afectados por diferentes factores como la fricción, las propiedades elásticas de la tubería y la presencia de fugas en la misma, tal como lo han reportado [7-9, 21, 22]. Según [3], cualquier cambio en la estructura física o de propagación del flujo en un sistema a presión tal como uniones, contracciones, expansiones, cambios de rugosidad a fugas en el sistema pueden causar una reflexión en la señal de presiones durante el transiente hidráulico, alterando de alguna forma la respuesta de presión (onda de presión). Estas altera-

ciones en un punto dado de la red pueden transferirse a diferentes puntos de la misma, permitiendo así su identificación. Al paso de la onda de presión por el sitio de la fuga esta causa una atenuación en presión debida al escape del fluido presurizado causando de esta forma una disipación de la onda de presión. Esto significa que la señal de la presión en el sistema con fugas decae más rápidamente que en el mismo sistema sin la presencia de fugas. La figura 3 muestra los resultados obtenidos para dos caudales del sistema para un mismo diámetro de orificio ($f=4.76\text{mm}$). En ella puede observarse cómo al comparar ambos ensayos el caso con presencia de la fuga, se presenta un decaimiento más rápido (línea punteada), corroborando los resultados presentados por [3]. Comparando los porcentajes de disipación de las primeras 5 sobrepresiones de la onda de presión (tabla 2) se observa cómo para el mayor caudal se presentan porcentajes de disipación mayores.

En la figura 4 se presentan los resultados obtenidos para dos ensayos con el mismo caudal y diferente diámetro de orificio. Los porcentajes de disipación para los primeros 5 picos de valores máximos de presión se presentan en la tabla 3. Los porcentajes de disipación aumentan al aumentar el

Tabla 2. Porcentajes de disipación de la onda de presión para diferentes caudales

	1	2	3	4	5	Presión mínima (m c. a.)
Caudal 2.6 L/s						
Presión máxima caso sin fuga (m c. a.)	37.69	22.32	19.51	15.66	14.19	-6.5
Presión máxima caso con fuga (m c. a.)	36.81	19.37	15.22	11.38	11.38	-4.4
% de Disipación	2.33%	13.22%	21.99%	27.30%	19.80%	
Caudal 1.18 L/s						
	1	2	3	4	5	Presión mínima (m c. a.)
Presión máxima caso sin fuga (m c. a.)	19.81	14.19	12.42	11.53	10.94	4.14
Presión máxima caso con fuga (m c. a.)	19.07	13.01	11.38	10.34	10.34	5.32
% de disipación	3.74%	8.30%	8.38%	10.32%	5.48%	

Fuente: los autores

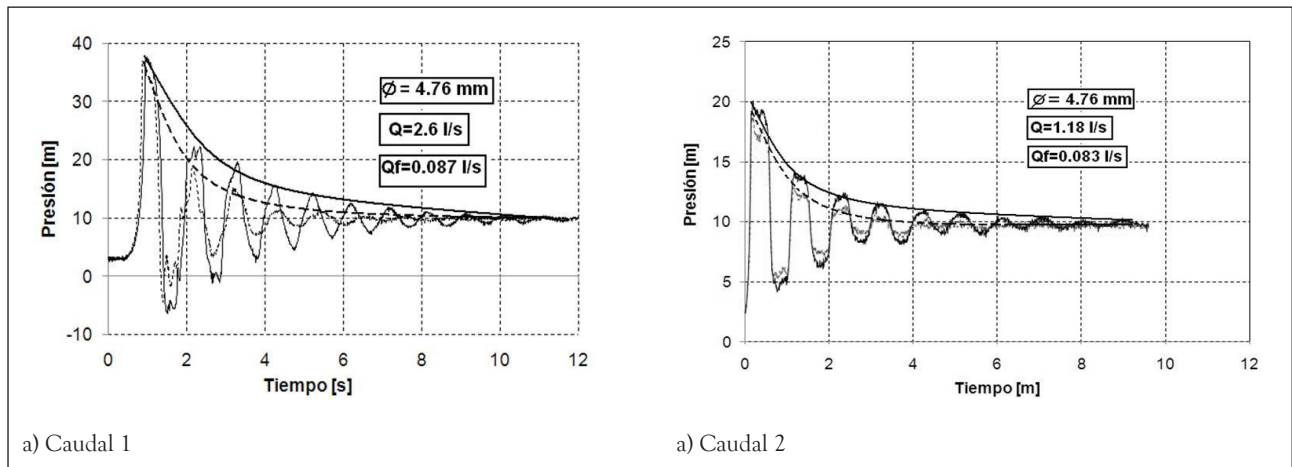


Figura 3. Comparación experimental de ondas de presión para un sistema con y sin fugas para diferentes caudales
Fuente: los autores

diámetro del orificio de 3.18 mm a 4.76 mm. Para el segundo máximo de presión se presenta la máxima diferencia entre ambos ensayos, con una disipación de 46.10% para el ensayo con el diámetro de 4.76 mm y una disipación de 31.15% para el ensayo con un diámetro de 3.18mm (tabla 3).

La sobrepresión máxima y mínima en sistemas de tuberías, como se mencionó anteriormente, genera problemas en los sistemas a presión; de ahí la importancia de analizar su comportamiento experimental para diferentes condiciones de funcionamiento del sistema. En la figura 5 se muestran los resultados obtenidos para los diferentes ensayos y se observa una clara relación con altos valores de R^2 (0.97 y 0.96) entre la sobrepresión máxima y mínima con el caudal del sistema.

Los valores de caudal más altos presentan mayor dispersión de los datos alrededor de la línea de ajuste para las sobrepresiones positivas del sistema y una tendencia creciente. Para las presiones mínimas los valores más bajos de caudal no presentan presiones de vacío, situación en la que no se presentaría entonces el fenómeno de captura de aire en el sistema a través del orificio de la fuga. Para valores superiores a los 1.5 L/s aproximadamente se presentan las presiones de vacío que llegaron en los ensayos hasta los -8

m c.a. Esta relación puede ser útil para analizar el adecuado funcionamiento del sistema, pues permite establecer las reglas de operación del sistema de forma eficiente y confiable.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Ante el cierre rápido de una válvula se verificó experimentalmente el aumento sustancial de las sobrepresiones en un sistema y la atenuación de la onda en un tiempo de aproximadamente 10 a 12 segundos para todos los ensayos realizados (con fugas y sin fugas). Los resultados generales son acordes con los resultados experimentales y numéricos presentados por múltiples autores, indicando la veracidad del experimento implementado.

Se observa el incremento sustancial de la presión máxima ante aumentos del caudal del sistema; sin embargo, los resultados obtenidos dependen fuertemente de las características del sistema implementado (caudal, configuración de la red, nivel máximo del tanque de alimentación, etc.) y, por ende, las ecuaciones obtenidas deben ser determinadas para cada condición particular.

La inclusión de fugas de agua en el sistema indujo decaimiento más rápido de la onda de presión, así como una alteración en la forma de esta debida

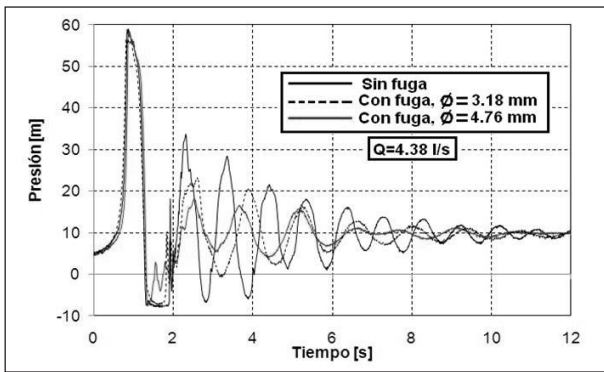


Figura 4. Ondas de presión para diferentes diámetros de orificio

Fuente: los autores

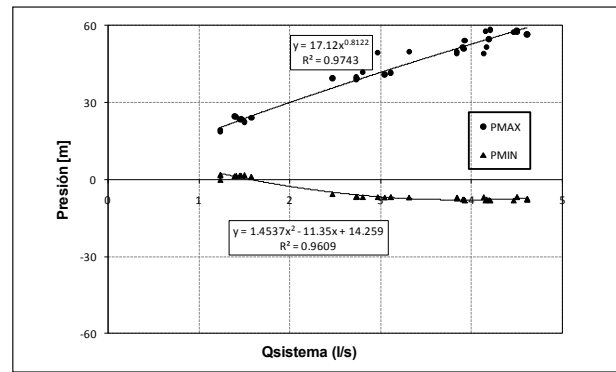


Figura 5. Relación entre la presión máxima y mínima en la onda de presión y el caudal del sistema

Fuente: los autores.

Tabla 3. Porcentajes de disipación de la onda de presión ante cambios en el diámetro y caudal constante

	1	2	3	4	5	Presión mínima
Presión máxima caso sin fugas (m c. a.)	58.98	33.71	28.38	21.58	18.03	-7.98
Presión máxima caso con fugas (m c. a.) y orificio de $f = 3.18$ mm	56.77	23.21	20.55	16.41	12.86	-7.39
% de disipación	3.74%	31.15%	27.59%	23.95%	28.67%	
Presión máxima caso con fugas (m c. a.) y orificio de $f = 4.76$ mm	58.10	18.18	16.55	15.67	11.09	-7.69
% de disipación	1.49%	46.10%	41.68%	27.39%	38.50%	

Fuente: los autores.

a reflexiones adicionales. Esto corrobora los resultados numéricos presentados por diferentes autores y la utilidad como técnica para la identificación de fugas y para el control de los efectos nocivos propios del fenómeno. Para caudales mayores y un diámetro dado se presentaron mayores porcentajes de disipación de la onda.

Se observó una influencia importante en el porcentaje de disipación de la onda de presión al aumentar el diámetro del orificio y con ello la magnitud del caudal de fuga. Este efecto de disipación de la onda de presiones puede ser útil para la identificación y cuantificación de la magnitud de fugas en sistemas a presión, así como para la

implementación de sistemas de fugas controladas para la disipación de presiones. La disipación de la onda ante la presencia de fugas está relacionada con el caudal del sistema para un orificio de fuga determinado.

El caudal de fuga varía durante la ocurrencia del golpe de ariete en respuesta a los cambios en la presión en la tubería. Dicho efecto hace difícil estimar el caudal de fuga durante este fenómeno.

5 AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Medellín por la financiación recibida para la realización del proyecto de investigación del que se deriva este artículo.

REFERENCIAS

- [1] American Water Works Association, *Leaks in Water Distribution Systems: A Technical/Economic Overview*, Denver: AWWA, 1987, 512 p.
- [2] S. Madruga, *Localización de fugas. Las soluciones del mañana, hoy*, Madrid: Montajes e instalaciones, 1996, 296 p.
- [3] A. Colombo et al., "A selective literature review of transient-based leak detection methods," *Journal of Hydro-environment Research*, vol. 2, no. 4, pp. 212-227, 2009.
- [4] Texas Water Development Board, *Water Loss Manual*, Austin: TWDB, 2005, 38 p.
- [5] S. G. Buchberger, y G. Nadimpalli, "Leak estimation in Water Distribution System by Statical Analysis of Flow Readings," *Water Resources Planning and Management*, vol. 130, no. 4, pp. 321-329, 2004.
- [6] B. Brunote, y M. Ferrante, "Detecting leaks in pressurised pipes by means of transients," *Journal of hydraulic research*, vol. 39, no. 4, pp. 1-9, 2001.
- [7] C. P. Liou, "Pipeline Leak Detection by Impulse Response Extraction," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 120, no. 4, pp. 833-838, 1998.
- [8] P. Lee et al., "Leak location in pipelines using the impulse response function," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 45, no. 5, pp. 643-652, 2007.
- [9] A. Satar, y M. H. Chaundry, "Leak detection in pipelines by frequency response method," *Journal of hydraulic research*, vol. 46, no. Extra Issue 1, pp. 138-151, 2008.
- [10] M. Witness et al., "Leak detection in pipes by frequency response method using a step excitation," *Journal of hydraulic research*, vol. 40, no. 1, pp. 55-62, 2002.
- [11] A. Lambert, "What do we know about pressure: leakage relationships in distribution systems?," presentado en IWA Conference "System Approach to Leakage Control and Water Distribution System Management", Czech Republic, 2001.
- [12] H. Avila, y J. Saldarriaga, *Determinación de parámetros de fuga para fallas longitudinales y en conexiones domiciliarias en tuberías de PVC*, Bogotá Universidad de los Andes, 2003, 112 p.
- [13] M. Zhao, y M. S. Ghidaoui, "Efficient Quasi-Two-Dimensional Model for Water Hammer Problems," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 129, no. 12, pp. 1007-1013, 2003.
- [14] A. Bergant et al., "Water hammer with column separation: A historical review," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 22, pp. 135-171, 2005.
- [15] M. Ferrante, y B. Brunone, "Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests. 1 Harmonic analysis," *Advances in Water Resources*, vol. 26, pp. 95-105, 2003.
- [16] A. S. Tijsseling, y A. Bergant, "Meshless Computation Of Water Hammer.," presentado en 2nd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitations and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems Timisoara, Romania, 2007.
- [17] M. H. Afshar, y M. Rohani, "Water hammer simulation by implicit method of characteristic," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 85, pp. 851-859, 2008.
- [18] A. Kepler et al., "Analysis of PVC Pipe-Wall Viscoelasticity during Water Hammer," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 134, no. 9, pp. 1389-1394, 2008.
- [19] J. Marcinkiewicz et al., "Experimental evaluation of ability of Relap5, Drako®, Flowmaster2® and program using unsteady wall friction model to calculate," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 238, pp. 2084-2093, 2008.
- [20] E. M. Wahba, "Modelling the attenuation of laminar fluid transients in piping systems," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 32, pp. 2863-2871, 2008.
- [21] A. Bergant et al., "Parameters affecting water-hammer wave attenuation, shape and timing-Part 1: Mathematical tools," *Journal of Hydraulic Research Journal of Hydraulic Research*, vol. 46, no. 3, pp. 373-381, 2008.
- [22] A. Bergant et al., "Parameters affecting water-hammer wave attenuation, shape and timing-Part 2: Case studies," *Journal of Hydraulic Research Journal of Hydraulic Research*, vol. 46, no. 3, pp. 382-391, 2008.