XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SEPTIEMBRE DE 2012

MODELACIÓN FÍSICA DE CAMBIOS OPERATIVOS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE: MODELACIONES EN PERÍODO EXTENDIDO Y MODELACIÓN DE FLUJO NO PERMANENTE

Juan Saldarriaga Valderrama¹, Iván Camilo Viveros Góngora²

Profesor Titular de la Universidad de Los Andes, Colombia, jsaldarr@uniandes.edu.co¹ Estudiante de Pregrado de la Universidad de Los Andes, Colombia, ic.viveros317@uniandes.edu.co²

RESUMEN:

En la red elevada del Laboratorio de Hidráulica y Recursos Hídricos de la Universidad de los Andes se construyeron cuatro configuraciones hidráulicas (escenario 5 inicial, escenario 5 final, escenario 6 inicial y escenario 6 final), se midieron presiones en nueve puntos y caudales en tres puntos. Los programas EPANET y REDES en modelación de estado estable representaron la variabilidad con índices de r² superiores a 0.90 y errores cuadráticos medios inferiores a 0.12.

Con el fin de analizar los perfiles de presión y caudal, producto de una variación brusca que indujera transientes, los escenarios se agruparon en pares de tal manera que la transición de un escenario a otro requiriera únicamente del cierre súbito de una válvula de bola. A partir de los datos de campo se calcularon patrones de demanda en los nodos de extracción de caudal y de energía disponible al inicio de la red.

El modelo en período extendido del escenario 5 representó la variabilidad y la magnitud de los datos satisfactoriamente ($r^2 = 0.95$ y error cuadrático medio=0.07). Por otro lado, el escenario 6 presentó indicadores estadísticos poco satisfactorios ($r^2 = 0.95$ y error cuadrático medio=1.09). Una vez se retiraron del análisis los datos relacionados con el punto de presión aislado y desabastecido después del cierre de la válvula, se obtuvieron indicadores representativos ($r^2 = 0.95$ y error cuadrático medio=0.08).

ABSTRACT:

In the drinking water pipe network located in the Laboratory of Hydraulics and Water Resources at Los Andes University were set four hydraulic configurations (escenario 5 inicial, escenario 5 final, escenario 6 inicial y escenario 6 final). Pressure (in 9 points) and caudal (in 3 different points) were measured. EPANET and REDES steady simulations had satisfactory statistical indexes (r^2 over 0.90 and root mean square error RMS under 0.12).

In order to analyze pressure and caudal profiles after a sudden variation that led transients, configurations were clustered in pairs. Abrupt change from initial to final arrangements consisted of closing a ball valve in a short period of time. Based on laboratory data, caudal and initial energy patterns were calculated.

Simulations in extended period proved to represent adequately laboratory data related to "escenario 5" configuration ($r^2 = 0.95$ and RMS=0.07). Second configuration had unsatisfactory statistical outputs ($r^2 = 0.95$ and RMS=1.09). When data from isolated area was retired, statistical proficiency of model became representative ($r^2 = 0.95$ and RMS=0.08).

PALABRAS CLAVES: transiente de presión; representatividad

INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos de este estudio estaba enfocado en analizar las variaciones de presión y demanda en puntos distribuidos en una red de distribución de agua potable antes, durante y después de un cambio operativo súbito que indujera un transiente de presión. Otro objetivo consistía en analizar la representatividad de EPANET y REDES en estado estable y período extendido, con respecto a los datos experimentales.

En los sistemas de distribución de agua, el control del caudal es esencial para su adecuada operación. Rápidos cambios operativos pueden inducir transientes de presión. Éstos pueden afectar de manera negativa el sistema de distribución si no son controlados (Magzoub Elbashir & Kwame Amoah, 2007).

Los transientes están clasificados como flujo variado no permanente, es decir, sus características hidráulicas varían con respecto al espacio y al tiempo (Saldarriaga, 2007). Los rápidos tránsitos de presión ocurren cuando el estado estable del flujo es alterado (Bosserman II & Hunt, 2006). La ocurrencia del fenómeno está relacionada con cierres súbitos de válvulas, fallas del sistema de control, pérdida de potencia, pérdida de telemetría, interacción de servicios múltiples, inadecuada selección de equipos, cambios en la demanda, intrusión de aire, fallas en los sistemas de regulación de presión y ruptura de tubos (Stone, 2006) (Bosserman II & Hunt, 2006).

Una vez ocurre un cambio operativo súbito los segmentos del fluido más alejados del evento tienden a conservar el *momentum* mientras que los más cercanos son influenciados rápidamente por la variación. Esto implica una disminución de la presión. El cambio repentino insta al sistema a buscar el equilibrio, lo cual resulta en fluctuaciones que pueden verse modificadas por la presencia de aire o gases, la superposición de ondas y la propagación de las ondas de tensión en el material de la tubería (Thorley, 1991).

La magnitud de las variaciones de presión (ΔH) ha sido relacionada con la celeridad de la onda (α), la diferencia entre las velocidades en estado estable (Δv) y la gravedad (g) [1] (Joukowsky, 1900). La celeridad de la onda ha sido explicada a través del módulo de compresibilidad (K) y la densidad (ρ) del fluido, el módulo de elasticidad del material (E), el diámetro (D) y la rugosidad (e) de la tubería [2] (Korteweg, 1878). Se asume que por cada $0.3 \frac{m}{s}$ que sea forzado a detenerse de manera súbita, hay variaciones entre 345kPa y 414 kPa (Kirmeyer, y otros, 2001).

$$\Delta H = \frac{\alpha * \Delta v}{g}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \left(\frac{K}{E}\right) * \left(\frac{D}{e}\right)}}$$
[1]
[2]

Debido a la superposición de ondas se han reportado transientes que superan los valores pronosticados por la ecuación [1] (Simpson & Wylie, 1991) (Thorley, 1991).

La importancia de los estudios relacionados con los transientes de presión en redes de distribución de agua potable radica parcialmente en sus consecuencias. El fenómeno puede implicar resuspensión de partículas sedimentadas, desprendimiento de biopelículas, intrusión de elementos externos, desmejoramiento de la calidad del agua, cavitación, vibraciones, ruptura, desplazamiento y deformación de las tuberías (Wood, 2005) (Bosserman II & Hunt, 2006).

En el suelo y el agua al exterior del sistema de distribución de agua potable se han detectado indicadores fecales y virus humanos; sin embargo, no hay suficiente información para afirmar que los transientes representan un riesgo significativo para la salud humana, en parte porque los sistemas de monitoreo no consideran las zonas vulnerables a presiones bajas y no cuentan con equipos de medición de alta frecuencia (LeChevallier, Gullick, Karim, Friedman, & Funk, 2003).

El estudio descrito en este texto evaluó 4 escenarios en estado estable, los cuales presentaron resultados satisfactorios de representatividad. La modelación en período extendido se realizó con

datos de una variación operativa brusca desde un escenario inicial a un escenario final; a excepción de las zonas aisladas se obtuvo una representatividad satisfactoria.

MODELOS COMPUTACIONALES

EPANET y REDES fueron los programas computacionales que fueron utilizados para llevar a cabo las simulaciones. EPANET modela el comportamiento del agua en sistemas de tuberías presurizadas a través del método del gradiente y permite la introducción de accesorios como válvulas y tanques. El programa REDES fue desarrollado en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) del departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Los Andes. REDES está programado bajo el paradigma orientado por objetos, su lenguaje computacional es Delphi, usa el método de cálculo del gradiente y resuelve el sistema matricial a través de la factorización de Cholesky (Saldarriaga, 2007).

Para las simulaciones se utilizó un modelo de la red elevada del Laboratorio de Hidráulica y Recursos Hídricos de la Universidad de Los Andes, el cual en su proceso de construcción contó con levantamientos topológicos y topográficos. Adicionalmente, sus coeficientes de pérdidas menores fueron calibrados y validados (Prieto Gamboa, 2011).

MODELACIÓN EN ESTADO ESTABLE

Es relevante especificar qué parámetros fueron introducidos en los modelos en estado estable. La energía de entrada o altura del embalse correspondió al valor promedio de las mediciones en el punto de presión A. Las demandas base en los puntos de extracción de caudal fueron determinadas por medio de métodos volumétricos en la red. El material de los tubos es PVC, por ende todos los segmentos de la red en el modelo cuentan con rugosidades de 0.0015mm. La longitud de los segmentos, coordenadas de los puntos y coeficientes de pérdidas menores fueron retomados de modelos previos (Prieto Gamboa, 2011).

La red elevada utilizada para el procedimiento experimental cuenta con tuberías de 4 pulgadas, 3 pulgadas y 2 pulgadas. El sistema posee válvulas de bola de 2 pulgadas las cuales permiten extraer caudal y cuya nomenclatura puede ser consultada en la figura 2. La red dispone de 13 puntos con disponibilidad para instalar sensores de presión (ver figura 3) en este estudio únicamente se utilizaron 9 (A, B, C, D, E, F, G, H, I). Para modificar la dirección del flujo o determinar una nueva configuración hidráulica la red cuenta con válvulas de 2, 3 y 4 pulgadas. El material de las tuberías es PVC.



Figura 1.- Nodos de Extracción de Caudal



Figura 2.- Sensores de Presión



Figura 3.- Escenario 5 Inicial



Figura 5.- Escenario 6 Inicial



Figura 4.- Escenario 5 Final



Figura 6.- Escenario 6 Final

Los escenarios sometidos a procesos de medición son el escenario 5 inicial (figura 4), el escenario 5 final (figura 5), el escenario 6 inicial (figura6) y el escenario 6 final (figura 7). La diferencia entre los escenarios iniciales y finales radica en el cierre súbito de una válvula.

Para calcular las demandas en los nodos se usaron baldes de 10.90L y 10.94L. Con un cronómetro se contabilizaba el tiempo de llenado. El volumen de agua dividido sobre el tiempo, permitía determinar el caudal. El procedimiento se repitió 10 veces y con base en los valores se determinaron promedios. La mayor desviación estándar de caudales se obtuvo en el Escenario 5 Final, en el nodo Q15 con una magnitud de $0.07\frac{L}{c}$.

Los promedios de los caudales calculados fueron introducidos en los nodos de extracción de caudal del modelo como demandas base. Por ejemplo, el escenario 6 inicial en las uniones Q23, Q21, Q10 y Q17, tuvo demandas base con valores de $1.69 \frac{L}{s}$, $1.28 \frac{L}{s}$, $0.56 \frac{L}{s}$ y $1.82 \frac{L}{s}$ respectivamente.

Tabla 1.-Promedios de las Demandas de los Escenarios

Promedios de las demandas de los escenarios

Caudal [L/s]	Q15	Q23	Q26	Q3	Q21	Q10	Q17	Total
Escenario 5 Inicial	1.52	1.68	1.92	1.7	1.23	0.56	1.87	10.48
Escenario 5 final	1.15	1.73	1.47	2.11	1.62	0.79	1.68	10.54
Escenario 6 inicial	-	1.69	-	-	1.28	0.56	1.82	5.35
Escenario 6 final	-	1.69	-	-	1.70	0.00	1.87	5.26

Las presiones fueron medidas a través de sensores de presión: 5 instrumentos contaban con rangos de medición de 0 a 1 bar (MAN-SD2S B2 de Kobold y Vegabar 52) y 4 instrumentos tenían rangos de medición de -1 a 5 bar (MAN LD3S de Kobold). Los últimos, fueron adquiridos para instalarlos en los puntos de mayor variabilidad de presión. Los 9 sensores estaban conectados a una red que conduce a un *fieldpoint* (FP-1601) el cual transmitía los datos a un programa computacional del laboratorio. El programa sincronizaba y reportaba los valores medidos.

El procedimiento para medir consistía en cerrar las válvulas y abrir los nodos para construir alguno de los escenarios a medir. Se permitía durante 15 minutos que el sistema estabilizara las condiciones hidráulicas. Posteriormente se medía durante 10 minutos la presión en los 9 puntos correspondientes.

MODELACIÓN EN PERÍODO EXTENDIDO

La modelación en período extendido tenía como finalidad simular el cambio súbito de un escenario a otro y compararla con los datos de laboratorio. Las variaciones consistían en construir el escenario inicial y a través del cierre súbito de una válvula cuya clausura duraba aproximadamente 0.64 milésimas de segundo, se construía el escenario final.

La rugosidad, las coordenadas de las uniones, las longitudes de las tuberías, la rugosidad y las pérdidas menores en la modelación en período extendido tenían las mismas características que en estado estable. Sin embargo, la energía de entrada (o altura del embalse) y las demandas de los nodos de extracción de caudal poseían patrones calculados a partir de las mediciones.

El primer paso en el proceso de medición consistía en configurar los relojes de los equipos que iban a ser utilizados y construir alguno de los escenarios iniciales. Se instalaba el caudalímetro en alguna de las tres ubicaciones. Se le permitía a la red estabilizarse durante 15 minutos, después se medía el caudal y las presiones en alguno de los escenarios iniciales durante 15 minutos, se cerraba la válvula de manera súbita y se registraba el tiempo en el cual esto ocurría. Después de la variación se medían los parámetros 15 minutos como mínimo. Desde que inicia la medición en el escenario inicial hasta que se estabiliza el escenario final, la medición no tuvo pausas.

La presión fue medida a través de los 9 sensores y los datos fueron registrados en el programa computacional mencionado previamente. El caudal se midió con un caudalímetro no intrusivo Ultraflux UF-801-P. Éste fue ubicado en tres diferentes tuberías que alimentaban nodos de extracción de caudal. La ubicación 1 corresponde a una tubería que alimentaba el nodo de extracción de caudal Q17, la ubicación 2 correspondía a Q21 y la ubicación 3 estaba relacionada con Q10 (ver figura 7). Los demás puntos desde donde se extraía caudal, difícilmente podían ser medidos debido a las distancias mínimas requeridas por equipo. Puesto que se contaba con tres ubicaciones, las variaciones de los escenarios 5 y los escenarios 6 se realizaron tres veces cada una.



Figura 7.- Ubicaciones del Caudalímetro

Se poseía información sobre variaciones de la presión en 9 puntos y del caudal en 3 puntos de la red, suficiente para calcular patrones de energía de entrada y de demanda en Q17, Q10 y Q21. Sin embargo, era necesario realizar suposiciones para aquellas uniones que no fueron sometidas a medición (Q15, Q23, Q3 y Q26). Los patrones de Q17 fueron aplicados a Q15 y Q23. Los patrones de Q21 fueron aplicados a Q3 y a Q26. Los patrones para la altura del embalse o la energía inicial fueron determinados a partir de los datos del punto de presión A.

En la altura base del embalse y la demanda base se introdujeron los valores promedio de las mediciones de variación, excepto para los nodos Q15, Q23, Q3 y Q26, los cuales mantuvieron los valores de demanda base de los escenarios iniciales en estado estacionario. El intervalo temporal de medición fue de 1 segundo mientras que en los programas es de 1 minuto. Por este motivo, se calcularon los promedios de todos los segundos de cada minuto y se asumió ese valor.

La demanda base correspondía al promedio de los datos de caudal y la altura base del embalse a los promedios de la presión A. Sin embargo, era necesario adicionar factores multiplicadores que permitieran la variación en el tiempo [3].

Factor de Multiplicación del Minuto
$$i = \frac{Valor del minuto i}{promedio de valores i}$$
 [3]

RESULTADOS

Se puede afirmar que los modelos computacionales sometidos a análisis en estado estable representaron la variabilidad y se desviaron de manera leve con respecto a los valores de laboratorio. Obsérvense los coeficientes de determinación, todos poseen magnitudes superiores a 0.94. Los errores cuadráticos medios en todos los casos presentaron valores inferiores a 0.11 (tabla2).

Los resultados de la modelación en período extendido para la variación del escenario 5 inicial al escenario al escenario 5 final sugirieron representatividad y poca desviación con respecto a los valores de laboratorio (tabla 3, fila 1). Por el contrario, la variación del escenario 6 inicial al escenario 6 final presentó poca representatividad de la variabilidad y una significativa desviación con respecto a las mediciones experimentales (tabla 3, fila 2).

El escenario 6 final debido a sus características, aislaba e impedía el flujo hacia una de las zonas donde se realizaban mediciones de presión (el punto H). Por este motivo, se decidió remover

del análisis los datos del punto H. Tanto el coeficiente de determinación como el error cuadrático medio (tabla 3, fila 3) presentaron magnitudes satisfactorias en las nuevas circunstancias.

Tabla 2 Indicadores	s Estadísticos de M	Tabla 3 Indicadores Estadísticos de			
	Estable		Modelació	n en Período E	xtendido
Inc	licadores Estadístic	os			
[m.c.a]	R2	R.M.S		\mathbf{R}^2	R.M.S
Escenario 5 inicial	0.96	0.11	Escenario 5	0.95	0.07
Escenario 5 final	0.96	0.11	Escenario 6	0.15	1.00
Escenario 6 inicial	0.97	0.07	Escenario o	0.15	1.09
Escenario 6 final	0.94	0.08	Escenario 6 [*]	0.95	0.08

Las tablas 4 y 5 presentan los resultados de las mediciones de caudal en las diferentes ubicaciones. Las asíntotas horizontales representan los promedios de los escenarios iniciales y finales. Las asíntotas de color rojo indican el momento en el que se efectuó el cierre súbito de la válvula. La variación del escenario 5 inicial al escenario 5 final presenta perfiles de caudal cuyas medias difieren muy poco antes y después del cambio; inclusive las variaciones entre las medias se mantienen dentro del rango de dispersión de los datos. En las variaciones del escenario 6 inicial al escenario 6 final, en las ubicaciones 1 y 2, la diferencia entre las medias se encuentra dentro del rango de variación, sin embargo se puede apreciar un período de transición del escenario inicial al escenario final de 3 a 5 minutos. En la ubicación 3, debido a que el caudalímetro se localizaba en una zona que después de la variación quedaba desabastecida, el cambio de tendencias es inmediato.



Tabla 5.- Perfiles de Caudales de las Variaciones del Escenario 6



Una vez fueron obtenidos los valores de presión, el escenario 5 no presentó máximos o mínimos notablemente fuera del rango de dispersión y/o temporalmente relacionados con la variación. La variación del escenario 6 inicial, al 6 final presentó máximos temporalmente cercanos al cierre de válvula; la diferencia entre el máximo y el escenario final superaba en todos los casos la dispersión de los escenarios iniciales y finales (tablas 6,7 y 8).

Tabla 6.- Máximos Valores de Presión Escenario 6 ubicación 1

	Valores máximos (M.C.A)	Hora	Diferencia Absoluta entre el Tiempo del Valor máximo y el Tiempo de Cierre de la Válvula (s)	Diferencia entre el Valor Máximo y el Promedio del Escenario 6 Final (M.C.A)	Desviación Estándar Escenario 6 Inicial(M.C.A)	Desviación Estándas Escenario 6 Final (M.C.A)
Presión A	4.4153	09:37:37 a.m.	636	0.0051	0.0011	0.0010
Presión B	4.4456	09:27:01 a.m.	3	0.1130	0.0011	0.0010
Presión C	4.6761	09:27:01 a.m.	3	0.2204	0.0094	0.0076
Presión D	4.1131	09:27:01 a.m.	3	0.1867	0.0071	0.0091
Presión E	4.5371	09:27:01 a.m.	3	0.2509	0.0069	0.0056
Presión F	3.9468	09:27:01 a.m.	3	0.0453	0.0083	0.0070
Presión G	3.8982	09:27:01 a.m.	3	0.1408	0.0052	0.0057
Presión H	3.8072	09:26:58 a.m.	1	3.9342	0.0009	0.0000
Presión I	3.8184	09:27:01 a.m.	3	0.1628	0.0120	0.0043

Tabla 7.- Máximos Valores de Presión Escenario 6 ubicación 2

	Valor Máximo(M.C.A)	Hora	Diferencia Absoluta entre el Tiempo del Valor máximo y el Tiempo de Cierre de la Válvula (s)	Diferencia entre el Valor Máximo y el Promedio del Escenario 6 Final (M.C.A)	Desviación Estándar Escenario 6 Inicial (M.C.A)	Desviación Estándas Escenario 6 Final (M.C.A)
Presión A	4.346	08:58:28 a.m.	4	0.056	0.001	0.001
Presión B	4.289	08:58:28 a.m.	4	0.080	0.001	0.001
Presión C	2.658	08:58:28 a.m.	4	0.046	0.004	0.005
Presión D	4.323	08:58:27 a.m.	3	0.153	0.006	0.005
Presión E	3.853	08:58:27 a.m.	3	0.119	0.008	0.014
Presión F	3.929	08:58:30 a.m.	6	0.106	0.011	0.017
Presión G	3.772	08:58:28 a.m.	4	0.122	0.007	0.006
Presión H		08:51:08 a.m.	412	0.003	0.001	0.000
2 700	2 700	08:51:28 a.m.	392			
	3.700	08:51:29 a.m.	391			
		08:52:02 a.m.	358			
Presión I	3.711	08:58:29 a.m.	5	0.132	0.005	0.003

Tabla 8.- Máximos Valores de Presión Escenario 6 ubicación 3

	Valores Máximos (M.C.A)	Hora	Diferencia Absoluta entre el Tiempo del Valor máximo y el Tiempo de Cierre de la Válvula (s)	Diferencia Absoluta entre el Valor Máximo y el Promedio del Escenario 6 Final (M.C.A)	Desviación Estándar Escenario 6 Inicial (M.C.A)	Desviación Estándar Escenario 6 Final (M.C.A)
Presión A	4.335	08:34:24 a.m.	5	0.010	0.001	0.001
Presión B	4.277	08:34:24 a.m.	5	0.028	0.001	0.001
Presión C	4.416	08:35:27 a.m.	68	0.039	0.009	0.009
Presión D	4.223	08:40:58 a.m.	399	0.012	0.006	0.006
		08:41:26 a.m.	427			
		08:42:05 a.m.	466			
		08:42:49 a.m.	510			
		08:42:50 a.m.	511			
		08:55:44 a.m.	1285			
		09:04:03 a.m.	1784			
Presión E	3.838	08:35:49 a.m.	90	0.045	0.016	0.013
Presión F	3.949	08:36:28 a.m.	129	0.112	0.012	0.017
Presión G	3.706	08:34:24 a.m.	5	0.026	0.007	0.005
Presión H	3.749	08:19:36 a.m.	883	3.874	0.001	0.000
Presión I	3,605	>40 registros	-	0.021	0.006	0.004

CONCLUSIONES

EPANET y REDES contaron con una representatividad satisfactoria de los escenarios hidráulicos propuestos en estado estable. La modelación en período extendido simuló con representatividad satisfactoria las variaciones bruscas de escenarios que consistían en el cierre súbito de una válvula. Sin embargo, aquéllas zonas aisladas y sometidas a desabastecimiento no fueron adecuadamente representadas en los modelos.

Los perfiles de presión de la variación del escenario 5 no presentaron en la mayoría de los casos aumentos o disminuciones significativos, posteriores al cambio del escenario inicial y final. Por otro lado, los perfiles de la variación del escenario 6 permiten contemplar máximos temporalmente relacionados con el cierre súbito de la válvula. Los máximos se presentaron fuera de los rangos de dispersión de datos.

Los perfiles de caudal del escenario 5 presentaron variaciones entre las medias del escenario inicial y final de poca magnitud y no diferenciables del rango de variación de los datos. Esto dificulta la identificación de un período de estabilización. En el escenario 6 aunque la diferencia entre los promedios del escenario inicial y el escenario final también se encontraba dentro del rango

de variación de los datos, se puede apreciar una transición que toma de 3 a 5 minutos. En las zonas sin abastecimiento de agua en el escenario final, la estabilización es inmediata.

Se podría estudiar a futuro la precisión de los modelos computacionales en período extendido para zonas desabastecidas, la influencia de los nodos afectados por cambios operativos súbitos y de las ramificaciones de las configuraciones hidráulicas sobre las magnitudes de los transientes en las redes de distribución de agua potable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bergant, A., Simpson, A. and Tijsseling, A. (2006). "Water hammer with column separation: A historical review". *Journal of Fluids and Structures*. Journal of Fluids and Structures, Vol. 22, pp 135-171.

Bosserman II, B. and Hunt, W. (2006). *Pumping Station Design*. G. Jones, Ed, Estados Unidos de América.

Giustolizi, O., Kapelan, Z. and Savic, D. (2008). "Extended Period Simulation Analysis Considering Valve Shutdowns". *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol.134, No.7, pp. 527-537.

Joukowsky, N. (1900). "Über den hydraulischen Stoss in Wasserleitungsröhren". Mémoires de l'Académie Impériale des Sciences de St.-Pétersbourg, pp. 1-71.

Kirmeyer, G. J., Friedman, M., Martel, K., Howie, D., LeChevallier, M., Abbaszadegan, M., Karim, M., Funk, J. and Harbour, J.(2001). *Pathogen Intrusion into the Distribution System*. AWWA Research Foundation and American Water Works Association, Estados Unidos de América.

Korteweg, D. (1878). "Ueber die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in elastischen Röhren". Annalen der Physik und Chemie, New Series 5, pp.525–542.

LeChevallier, M. W., Gullick, R. W., Karim, M. R., Friedman, M., & Funk, J. E. (2003). "The Potential Risk from Intrusion of Contaminants into the Distribution System from Pressure Transients". *Journal of Water Health*, Vol.1, No.1, pp.3-14.

Magzoub Elbashir, M. A. and Kwame Amoah, S. O. (2007). *Hydraulic Transient in a Pipeline*. Lund University, Lund, Suecia.

Prieto Gamboa, C. M. (2011). *Modelación física y calibración de sustancias en redes de distribución de agua potable*. Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.

Saldarriaga, J. (2007). Hidráulica de Tuberías. Alfaomega-Uniandes, Colombia.

Simpson, A. and Wylie, B. (1991). "Large Water-Hammer Pressure for Column Separation in Pipelines". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.117, No.10, pp.1310-1316.

Stone, G. (2006). "Contractual and Physical Risks from Waterhammer". *World Pumps*, Vol.2006, No.473, pp.34, 37.38.

Thorley, A. (1991). Fluid Transients in Pipeline Systems. D. & L. George, Inglaterra.

Wood, D. (2005). "Waterhammer Analysis—Essential and Easy (and Efficient)". *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol.131, No.8, pp.1123–1131.