

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN MODELO EN COMPUTADOR PARA SIMULAR EL GOLPE DE ARIETE EN REDES CERRADAS

Carlos Fernando Velásquez H.& Mauricio Toro B.

Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín
cfvelasq@unalmed.edu.co, fntoro@unalmed.edu.co

Recibido para evaluación: 16 de Marzo de 2006 / Aceptación: 30 de Junio de 2006 / Versión final: 04 de Julio de 2006

RESUMEN

El golpe de ariete, como fenómeno transitorio, ha sido un tema de estudio de la hidráulica, por sus efectos destructores en sistemas de alta presión como los conductos abastecedores de turbinas en centrales hidroeléctricas. Aunque el tema esté muy estudiado y analizado para conductos simples, comienza a aflorar la inquietud de simular este fenómeno en redes cerradas, las cuales están propensas a experimentar el golpe de ariete. Se presenta un modelo computacional para simular el Golpe de Ariete en tuberías simple, en serie, en paralelo y en redes cerradas abastecidas por gravedad, así como los resultados de la calibración y validación respectiva.

PALABRAS CLAVES: Golpe de Ariete, Transitorios Hidráulicos, Modelo para Computador, Calibración, Validación, Modelos Matemáticos.

ABSTRACT

Water Hammer has been studied in hydraulics due to its destructive effects on high pressure systems in simple conduits and hydroelectric power plants. However, this phenomenon has not been studied in detail for closed networks of water supply systems. In this paper, a computational model is applied to simulate Water Hammer in a laboratory system of pipes and include single pipes, a series of pipes, pipes connected in parallel and closed networks. The computational model is calibrated and validated using collected laboratory data.

KEY WORDS: Water Hammer, Hydraulic Transients, Computer Model Calibration, Validation, Mathematical Models.

1. INTRODUCCIÓN

Los comportamientos transitorios en tuberías a presión han sido fundamentados en las teorías de Newton (*Principia*, 1687), Euler (1759), Laplace (1848), Joukowsky (1898), Allievi (1913), Wood (1970), Chaudry (1987) y Wylie y Streeter (1993), entre otros, quienes han trascendido en la historia de la hidráulica.

Reconociendo la importancia del tema, en el año 2003 se realizó un simposio internacional sobre el golpe de ariete, organizado por la ASME (American Society of Mechanic Engineering), y a nivel nacional, el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico –Revisión 1. RAS 2000 en su artículo B.7.4.9.4 exige el análisis del Golpe de Ariete en redes de distribución. Aunque el reglamento lo estipule, el Golpe de Ariete por lo general no se simula en redes cerradas por parte de las empresas prestadoras de servicios públicos.

El objetivo de esta investigación es calibrar un modelo de computador que simule el Golpe de Ariete en diferentes sistemas de tuberías y validarla con un modelo físico de laboratorio. Para lograr este objetivo se inspeccionó el estado del arte en el tema, se analizó cada uno de los métodos numéricos que dan solución a las ecuaciones que describen el fenómeno en tuberías simples para seleccionar uno y adaptarlo a las redes cerradas.

Se presenta como resultado un software que permite la simulación del Golpe de Ariete en tubos simples, en serie, en paralelo y en redes cerradas sencillas, abastecidas por gravedad.

2. EL FENÓMENO DEL GOLPE DE ARIETE

“Fenómeno hidráulico de tipo dinámico oscilatorio, causado por la interrupción violenta del flujo en una tubería, bien por el cierre rápido de una válvula o apagado de un sistema de bombeo, que da lugar a la transformación de la energía cinética en energía elástica, tanto en el flujo como en la tubería, produciendo sobreelevación de la presión, subpresiones y cambios en el sentido de la velocidad del flujo”¹.

1. B.1.2 Definiciones. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento básico RAS-2000.

2.1. Conceptos generales

A continuación se presentan algunos conceptos generales sobre el fenómeno del Golpe de Ariete y su formulación matemática. Detalles sobre la solución numérica de las ecuaciones se pueden encontrar en Velásquez, 2006.

2.1.1. Celeridad (a)

Se define como la velocidad de propagación de la onda de presión en un medio elástico. Para el cálculo de la celeridad en tuberías (ver detalles en Velásquez, 2006) se tiene:

$$a = \left(\frac{K}{\rho} \right)^{1/2} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{K D}{E e} \theta \right)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

a : Celeridad

K : Módulo de elasticidad del fluido

E : Módulo de elasticidad de la tubería

D : Diámetro interno del tubo.

e : Espesor del tubo.

ρ : Densidad del fluido

θ : Parámetro adimensional que depende de las propiedades elásticas del conducto (Halliwell, 1963).

2.1.2. Ecuaciones del modelo computacional

Las ecuaciones que describen el fenómeno del golpe de ariete se basan en las leyes de conservación de masa y de momentum, las cuales se presentan a continuación:

Conservación de masa:

$$g \frac{\partial H}{\partial t} + a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

Conservación de Momentum

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (3)$$

Detalles de la deducción de estas ecuaciones se pueden encontrar en Velásquez, (2006).

La solución numérica de estas ecuaciones se realizó en este trabajo mediante la técnica de los elementos finitos. La aplicación de esta técnica a las Ecuaciones (2) y (3) lleva a un par de ecuaciones algebraicas de la forma:

$$g[K^1] \left\{ \frac{\partial H_j}{\partial t} \right\} + a^2 [K^2] \{V\} = 0 \quad (4)$$

y

$$[K^1] \left\{ \frac{\partial V_j}{\partial t} \right\} + g[K^2] \{H\} + \frac{f|V|}{2D} [K^1] \{V\} = 0 \quad (5)$$

Para la obtención de los resultados se implementó un programa de computador. A continuación se presentan los resultados mas importantes obtenidos durante la calibración y la validación de dicho modelo. Detalles sobre las ecuaciones del modelo de computador se encuentran en Velásquez, (2006).

3. MODELO DE LABORATORIO

En esta sección se presentan los equipos, tuberías, accesorios y elementos utilizados para la toma de datos necesarios para calibrar y validar el modelo computacional.

El modelo físico fue desarrollado en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica “Jairo Murillo” de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Este laboratorio cuenta con un sistema de abastecimiento de agua mediante bombeo de un tanque enterrado, de 150 m³ de capacidad, a un tanque elevado de 30 m³ de capacidad. La conducción del agua se realiza por medio de tuberías de hierro fundido de 12 pulgadas de diámetro, tanto para la impulsión hacia el tanque superior como para el abasto al laboratorio y el rebose de excesos.

El punto de toma para el modelo físico de esta investigación, se realizó de una tubería vertical de hierro fundido de 10 pulgadas de diámetro y de una longitud de 9 m, que tiene conexión directa con el tanque elevado, el cual a su vez tiene 1 m de altura. La cabeza estática sobre este punto de toma es de 10 m de columna de agua. La salida de la toma se realiza mediante una válvula de compuerta de 1 pulgada de diámetro.

Se adquirieron 500 m metros de tubería para riego en polietileno en diferentes diámetros (1 ½, 1, ½ pulgadas) para realizar calibraciones y validaciones en diferentes escenarios.

Dado que el fabricante de la tubería no garantizaba los valores de las propiedades mecánicas, a la tubería se le realizaron pruebas en el laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad EAFIT dando como resultado un módulo de elasticidad (E) de 656,57 MPa según informe número 5912-729830.

Para realizar los diferentes montajes y ensambles de tuberías simples, en serie, en paralelo y en red cerrada, así como la conexión de válvulas, y puntos de toma de presión, fue necesario contar con accesorios de acople rápido en el mismo material de la tubería (polietileno). Los accesorios adquiridos fueron: “Tees” rápidas, codos rápidos, collares sencillos, adaptadores macho y hembra rápidos, reducciones rápidas y uniones rápidas.

Los cierres rápidos de válvula (30 milisegundos) fueron realizados con una válvula solenoide con las siguientes especificaciones: Marca Parker Gold Ring Series 22, 23, 24, 26 Two-way, Pilot-operated Valves, normalmente cerrada (energizada se mantiene abierta), 1” NPT.

El transmisor de presiones que se utilizó es de marca WIKA, referencia 891.13.500, de rango 0-100 PSI, de un tiempo de respuesta de un mili-segundo y con salida de 4-20 miliamperios. Este transmisor fue facilitado por el Centro de Laboratorios de la Universidad EAFIT.

Uno de los equipos de mayor exigencia fue el sistema de adquisición de datos dada la resolución temporal requerida para una adecuada medición del fenómeno. Finalmente se pudo contar con un PLC de la marca Siemens referencia CPU 214 S7-200, suministrado en préstamo por la firma Hidromecánica Ltda.

4. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

Durante el desarrollo de esta sección se exponen los procedimientos seguidos en la calibración y validación de modelos computacionales a partir de datos experimentales.

Con el propósito de medir la calidad de las soluciones del modelo obtenidas para diferentes valores de los parámetros, se deben utilizar indicadores estadísticos que permitan medir dicha calidad. Para el análisis de las variaciones de los parámetros del modelo computacional, se utiliza como criterio de calidad el parámetro estadístico

“rms” (root mean square o desviación cuadrática media) de los residuos, definido como:

$$rms = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(Valor_{calculado} - Valor_{medido})]^2}{N}} \quad (6)$$

donde “N” es el número de datos.

El valor óptimo de este parámetro es cero 0, lo cual representa que lo calculado es “idéntico” a lo modelado. Un valor diferente de cero, representa la medida de la desviación cuadrática media referida a la diferencia de los valores calculados y medidos. Sin embargo, en nuestro caso, este valor del parámetro “rms” se estandarizó con respecto a la cabeza estática utilizada en los experimentos y la cual fue siempre la misma (14,2 psi). El parámetro β que cuantifica el error es,

$$\beta = \frac{rms}{H_{estática}} \quad (7)$$

5. VERIFICACIÓN CONCEPTUAL DEL MODELO COMPUTACIONAL

Para el análisis de sensibilidad del modelo se tomó el caso del tubo simple y se establecieron las propiedades hidráulicas pertinentes al caso, las cuales permanecieron constante mientras se modificaba el valor del coeficiente “ α ” de los esquemas de diferencias finitas (ver Velásquez, 2006), el intervalo temporal y el intervalo espacial. El criterio de calidad elegido es el coeficiente β , anteriormente explicado.

Para el caso del tubo simple, el modelo experimental consistió de un sistema abastecido por gravedad desde el tanque elevado del laboratorio, 100 m de tubería de polietileno horizontal (enrollada) de una pulgada (1") de diámetro y una válvula solenoide en el extremo aguas abajo. El caso simulado fue el cierre brusco y el punto de toma de los datos fue en la válvula en el extremo aguas abajo del tubo. En la Tabla 1 se presentan las características físicas y geométricas del sistema de tubo simple.

Tabla 1. Parámetros físicos del sistema de tubería simple

Módulo de Elasticidad de la Tubería	(GPa)	0,65652
Módulo de Elasticidad del Fluido	(GPa)	2,217
Densidad del Fluido	(kg/m ³)	997,8
Diámetro Interno de la Tubería	(m)	0,025
Aceleración de la Gravedad	(m/s ²)	9,8
Altura del nivel del agua en el tanque respecto la válvula	(m)	10
Coeficiente de fricción (f) de Darcy-Weisback		0,0296
Espesor de pared de Tubería	(m)	0,004
Longitud de Tubería	(m)	100
Tiempo de Cierre de la válvula	(s)	0,0461
Tiempo de Simulación	(s)	10
Celeridad de la Onda de presión Calculada por el modelo	(m/s)	217

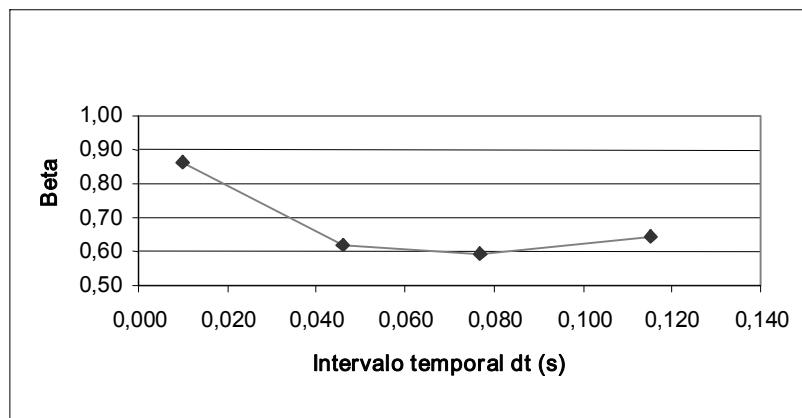
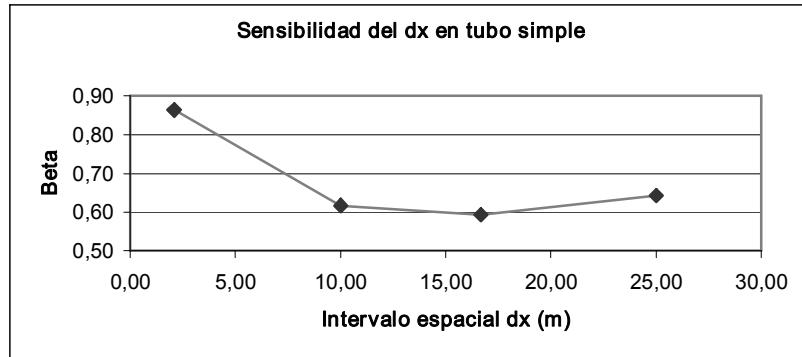
Los resultados del análisis de sensibilidad de los intervalos espacial y temporal, se presentan en la Tabla 2 y en la Figura 1.

En la Tabla 2, el número de Courant Calculado se refiere al obtenido a partir de la fórmula teórica de la celeridad

de la onda de presión, Ecuación (1). El valor de la celeridad corregida, valor utilizado en los cálculos de las presiones, se obtiene a partir de la condición de que el número de Courant Corregido es igual a la unidad.

Tabla 2. Resultados del análisis de sensibilidad a parámetros

rms	(psi)	8,36	8,76	10,35	11,82
coeficiente β		0,59	0,62	0,73	0,83
dt	(s)	0,0461	0,0461	0,0461	0,0500
dx	(m)	10,00	10,00	10,00	10,00
Coeficiente α		1,00	0,90	0,70	0,60
Celeridad Calculada	(m/s)	217,00	217,00	217,00	217,00
Celeridad Corregida	(m/s)	216,91	216,91	216,91	216,91
No. de Courant calculado		0,9996	0,9996	0,9996	0,9217
No. de Courant Corregido		1,0000	1,0000	1,0000	0,9220

**Figura 1a.** Parámetro β vs. Intervalo de cálculo**Figura 1b.** Parámetro β vs. Tamaño de la malla espacial

De las Figuras 1a y 1b se puede observar que el intervalo temporal cercano a 0,08 s (exactamente de 0,07681 s) obtiene el menor error, conserva el número de Courant igual a 1,0 y genera un intervalo espacial cercano a 17 m (exactamente igual a 16,667 metros).

Es de aclarar que la deducción del intervalo espacial es una consecuencia de la celeridad calculada y el intervalo de tiempo elegido. Observe que para un intervalo temporal de 0,0461 s, que conserva la condición de Courant-Lewy

igual a 1,0 se genera un intervalo espacial de 10 metros y su diferencia, en términos del coeficiente β con el intervalo temporal de 0,07681 no es significativa, pero si es una resolución más representativa en relación con los datos experimentales proporcionados por el transmisor que son cada 0,1 segundos. El concepto de celeridad corregida, corresponde a un ajuste que realiza el modelo para poder recorrer el intervalo espacial en el intervalo temporal elegido, además para poder fraccionar el tubo en un número definido de elementos iguales.

Una vez analizado el efecto de $dxy dt$, se pasa a analizar el efecto del coeficiente α definido para la discretización

en diferencias finitas. Los resultados del análisis de sensibilidad se presentan en la Figura 2.

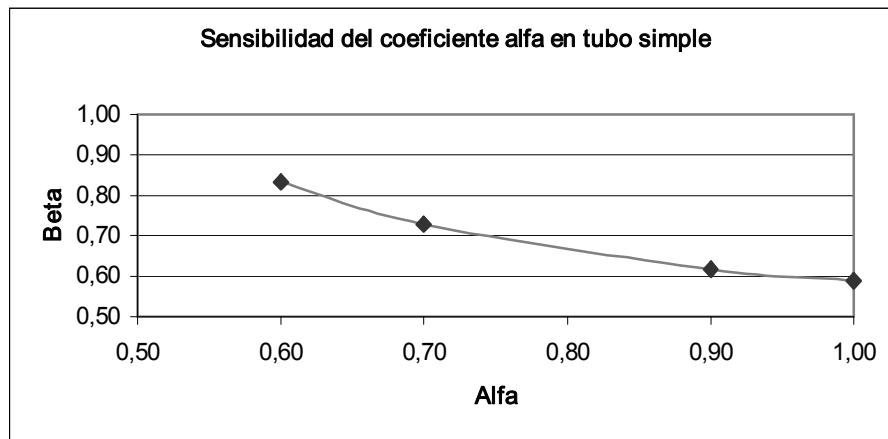


Figura 2. Sensibilidad al coeficiente α para tubo simple.

En este caso, se observa de la Figura 2 y de la Tabla 2 que el error disminuye a medida que aumenta el valor del coeficiente α . Valores de “ α ” inferiores o iguales a 0,5 producían inestabilidad en el modelo, por tanto no se muestran aquí. Se elige un valor de 0,9 para este coeficiente con el objeto de obtener un error mínimo y conservar el esquema de diferencias finitas implícito.

6. DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES INICIALES Y DE BORDE

Las condiciones iniciales y de borde que se trabajaron dentro del alcance de este trabajo son:

- Embalse aguas arriba con cabeza estática constante.
- Válvula aguas abajo de cierre lineal y brusco.
- En los nudos, se estimó igualdad de presiones para todos los tubos que entran o salen de él.
- Las condiciones iniciales son las características hidráulicas (Presión y caudal) que arroja la simulación del estado permanente antes de la operación de la válvula.
- Las condiciones finales son aquellas del estado estático (cuando el cierre de la válvula es total).

El anterior análisis de sensibilidad en tubo simple, sirvió para definir los valores del intervalo temporal, espacial

y el coeficiente α que tienen relación con el aspecto numérico del modelo. A continuación, en todos los montajes (simple, serie, paralelo y red) se asumen constantes los intervalos temporal, espacial y el coeficiente α y se pasa a calibrar el parámetro adimensional θ de Halliwell (Ecuación 1), introducido en la ecuación de la celeridad para ajustar la elasticidad del conducto a las condiciones externas a él como anclajes, presiones externas, entre otras.

7. CALIBRACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL CON RESPECTO A LAS VARIABLES FÍSICAS

La metodología elegida será la de calibrar el modelo con respecto al parámetro θ de Halliwell, para cada uno de los casos por simular. Este parámetro es la variable más representativa dentro del cálculo de la celeridad, la cual a su vez define la frecuencia de la onda de presión. Es de aclarar que los valores obtenidos de este parámetro, aún no están determinados empíricamente ni analíticamente, porque dichos valores obedecen a las circunstancias particulares aquí modeladas.

La rugosidad de la tubería se determinó experimentalmente a partir de datos tomados con el transductor y siguiendo la ecuación de Darcy-Weisbach. Pese a lo anterior se le realizó un análisis de sensibilidad a la rugosidad en tubo simple para determinar su incidencia dentro de la calibración.

7.1. Calibración del modelo computacional en tubo simple para parámetros físicos

Para el análisis de sensibilidad del modelo en tubo simple con respecto al parámetro de Halliwell, se tomaron constantes los resultados óptimos del análisis de sensibilidad de las variables numéricas (dt , dx y α) y se introdujeron los valores teóricos de las variables físicas del fluido, para luego introducir los valores experimentales de las variables de la tubería (módulo de elasticidad y rugosidad). La sensibilidad se practicó con base en el coeficiente β .

El modelo experimental se configuró como un sistema abastecido por gravedad desde el tanque elevado del laboratorio, 100 m de tubería de polietileno de 1 pulgada (1") de diámetro, horizontal y enrollada, y una válvula solenoide. El caso simulado fue el cierre brusco. El punto de toma de los datos fue en la válvula, extremo aguas abajo del sistema. La Tabla 1 muestra parámetros físicos utilizados en los experimentos numéricos y la Figura 3 muestra los resultados del análisis de sensibilidad para la calibración del parámetro de Halliwell en la tubería simple.

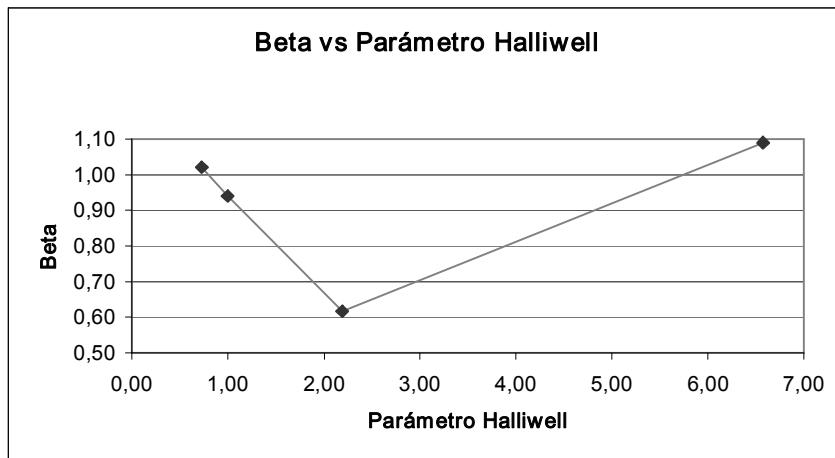


Figura 3. Sensibilidad al parámetro de Halliwell para tubo simple.

Del análisis de sensibilidad de los parámetros numéricos, se eligió un intervalo temporal de 0,0461 segundos y un valor de $\alpha = 0,9$. Ahora, al calibrar el parámetro θ de Halliwell en la tubería, se encuentra que el valor de este parámetro, modifica el valor de la celeridad calculada, el valor del intervalo espacial y por ende el valor de la celeridad corregida. Es claro que al variar la celeridad de la onda con este parámetro, la frecuencia de la misma se ve afectada directamente.

Si la frecuencia de la onda simulada varía y los valores experimentales son constantes, entonces el coeficiente de variación, mostrará un valor óptimo justo cuando haya coincidencia de fase entre la onda simulada y la experimental. Lo anterior ocurre cuando el parámetro de Halliwell adquiere un valor de 2,19. Todo lo anterior demuestra que el valor del módulo de elasticidad de la tubería de 0,65652 GPa, determinado experimentalmente,

no representa completamente las propiedades elásticas del material frente a la onda de presión. Con el valor óptimo del parámetro de Halliwell de la tubería (2,19), se realizó un análisis de sensibilidad de la rugosidad interna de la tubería y se observó que entre el valor experimental de $e = 0,0000592$ m y el óptimo de $e = 0,0002$ m no hay gran diferencia en cuanto al coeficiente β . Por lo anterior, se asume como real, el valor experimental de la rugosidad de 0,0000592 m.

La Figura 4 muestra la presión simulada en la válvula para un cierre brusco y con los valores óptimos del análisis de sensibilidad ($dt = 0,0461$ s, $dx = 10$ m, $\alpha = 0,9$) y de la calibración de los parámetros físicos en un tubo simple (Parámetro de Halliwell $\theta = 2,19$ y $e = 0,0000592$ m).

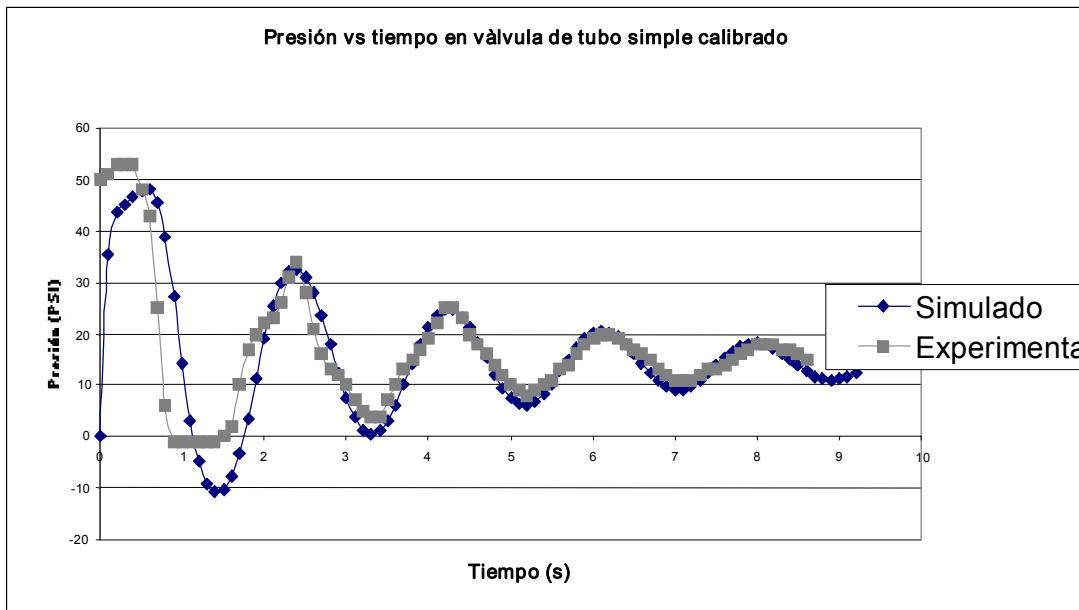


Figura 4. Distribución de presiones en la válvula para un cierre brusco, tubo simple

7.2. Calibración del modelo computacional en tubos en serie

Para el análisis de sensibilidad del modelo en tubo en serie con respecto al parámetro θ se tomaron constantes los resultados óptimos del análisis de sensibilidad de las variables numéricas (dt , dx y α ; además de la rugosidad interna) del modelo en tubo simple y se introdujeron los valores teóricos de las variables físicas del fluido y de la tubería, para luego introducir las variaciones del parámetro θ a las que a su vez se les practicó la sensibilidad frente al coeficiente β .

El modelo experimental se configuró como un sistema abastecido por gravedad desde el tanque elevado del laboratorio el cual alimenta dos tramos de tubería: uno de 50 m de tubería de polietileno horizontal, enrollada, de diámetro 1½", pulgada, el cual conecta mediante una

reducción de 1½" a 1", a un segundo tramo de 100 m de tubería de polietileno horizontal (enrollada), de diámetro de 1 pulgada y una válvula solenoide. El caso simulado fue el cierre brusco y el punto de toma de los datos fue en la válvula (extremo aguas abajo). En la Tabla 4 se presentan las características físicas y geométricas del sistema de tubos en serie, y las Figuras 5 y 6 muestran los resultados de la calibración.

Al igual que la tubería simple, la tubería en serie tiene un parámetro θ óptimo con valor de 1,64. Este valor hallado por calibración es el adecuado para cubrir varios factores: Las condiciones de anclaje o presión externa de la tubería enrollada, el efecto de la reducción y del material de la misma, y lo más notorio es el ajuste que debe realizar el modelo a la celeridad para lograr la misma fase de los valores experimentales y para poder discretizar espacialmente el sistema en serie en elementos finitos.

Tabla 4. Parámetros físicos para el sistema de tubos en serie

Módulo de elasticidad de las tuberías en (GPa)	0,65652
Módulo de elasticidad del fluido en (GPa)	2,217
Densidad del fluido en (Kg/m ³)	997,8
Diámetro interno de las tuberías en (m)	0,025 y 0,0375
Aceleración de la gravedad en (m/s ²)	9,8
Altura del nivel de agua con respecto a la válvula en (m)	10
Coeficiente de fricción (f) de Darcy-Weisbach	0,0296 y 0,035
Espesor de la pared de la tubería en (m)	0,004 y 0,006
Longitud de la tubería en (m)	100
Tiempo de cierre de la válvula en (s)	0,0461
Tiempo de simulación en (s)	10

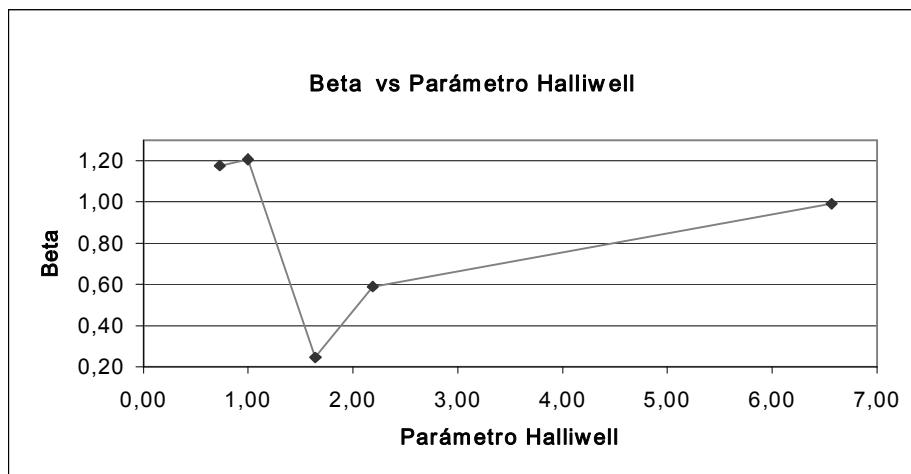


Figura 5. Coeficiente β vs. Parámetro de Halliwell para tubos en serie

La Figura 6 muestra el resultado del modelo en la válvula mediante un cierre brusco y con los valores óptimos del análisis de sensibilidad ($dt = 0,0461$ s, $\alpha = 0,9$) y de la

calibración de los parámetros físicos en un tubo en serie ($\theta = 1,64$ y $e = 0,0000592$ m)

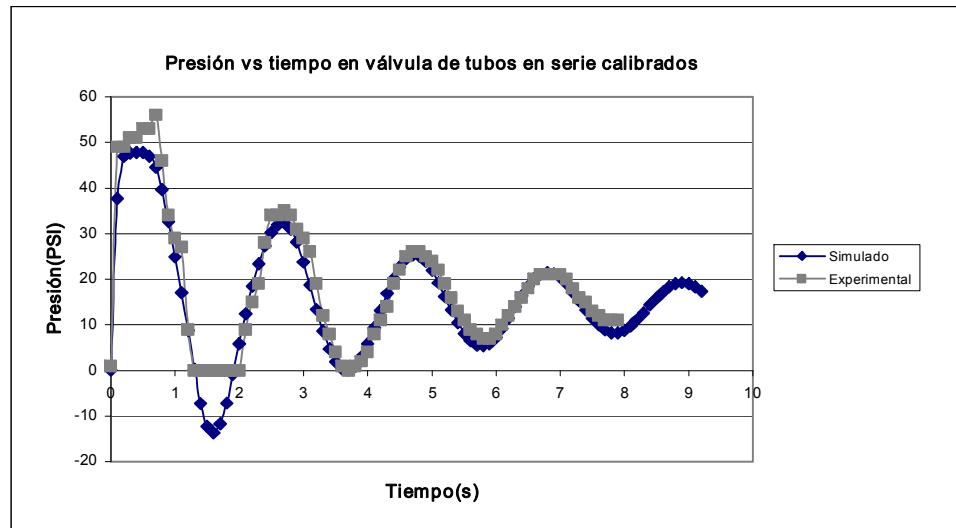


Figura 6. Distribución de presiones en la válvula para un cierre brusco sistema de tubos en serie

7.3. Calibración del modelo computacional en tubos en paralelo

Para el análisis de sensibilidad del modelo para un sistema de tubos en paralelo con respecto al parámetro θ se tomaron constantes los resultados óptimos del análisis de sensibilidad de las variables numéricas (dt , dx y α ,

además del coeficiente de rugosidad) del modelo en tubo simple, y se introdujeron los valores teóricos de las variables físicas del fluido y de la tubería, para luego introducir las variaciones del parámetro θ de la tubería, a los que, a su vez, se les practicó una sensibilidad frente a la variación del coeficiente β .

El modelo experimental se construyó como un sistema abastecido por gravedad desde el tanque elevado del laboratorio, con una tubería de 100 m de longitud (L1) de polietileno, horizontal, enrollada, de 1 pulgada de diámetro, una Tee de 1" a 1" y 100 m de tubería (L2) de polietileno horizontal, enrollada, de 1 pulgada de diámetro en paralelo con otra (L3) de las mismas características.

Finalmente otros 100 m de tubería (L4) de polietileno horizontal, enrollada, de 1 pulgada de diámetro y una válvula solenoide. El caso simulado fue el cierre brusco y el punto de toma de los datos fue en la válvula (extremo aguas abajo). En la Tabla 5 se presentan las características físicas y geométricas del sistema de tubos en paralelo.

Tabla 5. Parámetros físicos para el sistema de tubos en paralelo

Módulo de elasticidad de las tuberías en (GPa)	0,65652
Módulo de elasticidad del fluido en (GPa)	2
Densidad del fluido en (Kg/m ³)	997,8
Diámetro interno de las tuberías en (m)	0,025
Aceleración de la gravedad en (m/s ²)	9,8
Altura del nivel de agua con respecto a la válvula en (m)	10
Coeficientes de fricción (f) de Darcy-Weisbach	L2 y L3 = 0,035 L1 y L4 = 0,0296
Espesores de la pared de la tubería en (m)	0,004
Longitudes de la tubería en (m)	100
Tiempo de cierre de la válvula en (s)	0,0461
Tiempo de simulación en (s)	10

Las Figuras 7 y 8 muestran los resultados de la calibración del modelo en tubos en paralelo.

Al igual que las tuberías simple y en serie, el parámetro θ óptimo con valor de 1,46, es el adecuado para cubrir varios factores como las condiciones de anclaje o presión externa de la tubería enrollada, el efecto de las dos "tee"

que forman los nudos y del material de las mismas y, aunque en este caso no es muy notorio por la longitud uniforme de las tuberías, es el ajuste que debe realizar el modelo a la celeridad para lograr la misma fase de los valores experimentales y para poder discretizar espacialmente el sistema en paralelo en elementos finitos.

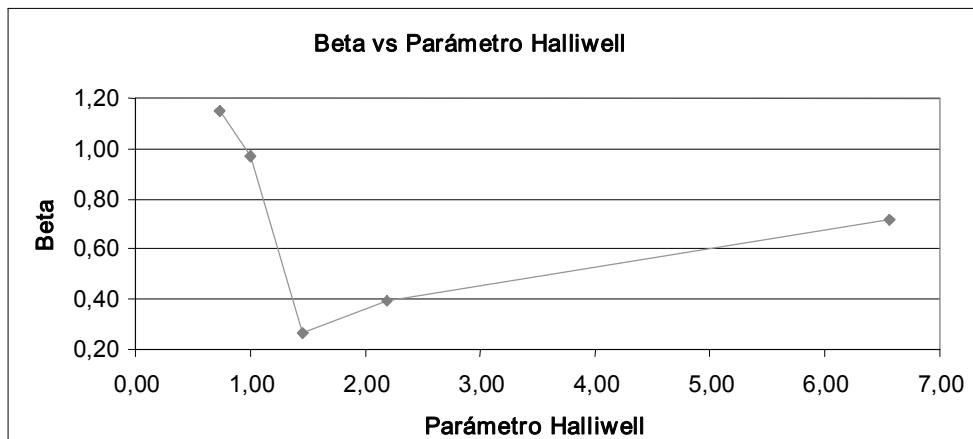


Figura 7. Coeficiente β vs. Parámetro de Halliwell para tubos en paralelo.

La Figura 8 presenta la presión simulada en la válvula mediante un cierre brusco y con los valores óptimos del análisis de sensibilidad ($dt = 0,0461\text{s}$, $\alpha = 0,9$) y de la

calibración de los parámetros físicos en un tubo en paralelo ($\theta = 1,46$ y $e = 0,0000592\text{m}$).

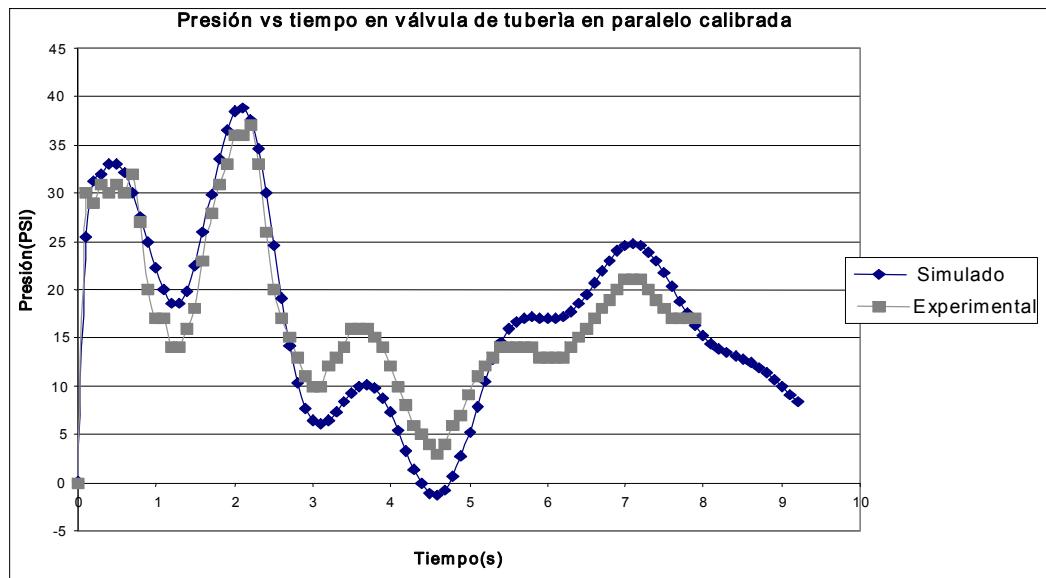


Figura 8. Distribución de presiones en la válvula para un cierre brusco sistema de tubos en paralelo

7.4. Calibración del modelo computacional en red cerrada

Para el análisis de sensibilidad del modelo con respecto al parámetro θ para una red cerrada, se tomaron constantes los resultados óptimos del análisis de sensibilidad de las variables numéricas (dt , dx y α , además del coeficiente de rugosidad) del modelo en tubo simple y se introdujeron los valores teóricos de las variables físicas del fluido y de la tubería, para luego introducir las variaciones del parámetro q a las que a su vez se les practicó una sensibilidad frente al coeficiente β .

El modelo experimental está configurado como un sistema abastecido por gravedad desde el tanque elevado del

laboratorio, 50 m de tubería simple (T1) de polietileno horizontal (pero enrollada) de 1 pulgada de diámetro, que conecta el tanque con los circuitos de la red; dos circuitos en red de tubería (T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8) de polietileno horizontal (pero enrollada) de 1 pulgada de diámetro, excepto el tubo central-común (T6) con un diámetro de 1 ½ pulgadas. Cada tubo tiene 50m de longitud. Finalmente, otros 50 m de tubería (T9) de polietileno horizontal (pero enrollada) de 1 pulgada de diámetro y una válvula solenoide. El caso simulado fue el cierre brusco y el punto de toma de los datos fue en la válvula (Extremo aguas abajo). En la Tabla 6 se presentan las características físicas y geométricas del sistema de tubos en redes cerradas.

Tabla 6. Parámetros físicos para el sistema de red cerrada de tubos

Módulo de elasticidad de las tuberías en (GPa)	0,65652
Módulo de elasticidad del fluido en (GPa)	2,217
Densidad del fluido en (Kg/m ³)	997,8
Diámetro interno de las tuberías en (m)	Todas 0,025 y Central 0,0375
Aceleración de la gravedad en (m/s ²)	9,8
Altura del nivel de agua con respecto a la válvula en (m)	10
Rugosidades internas (m)	0,0000596
Espesores de la pared de la tubería en (m)	Todas 0,004 y Central 0,006
Longitudes de la tubería en (m)	50
Tiempo de cierre de la válvula en (s)	0,0461
Tiempo de simulación en (s)	10

Las Figuras 9 y 10 muestran los resultados de la calibración del modelo para el caso de redes cerradas.

El caso de la red cerrada, a diferencia de los anteriores, no muestra un valor óptimo para el parámetro θ sino más bien una tendencia decreciente del coeficiente β

frente al aumento de dicho parámetro. El valor “óptimo” obtenido de las simulaciones fue de 2,63. En éste caso de la red cerrada, pese la búsqueda del óptimo valor para el parámetro θ , no se logra cubrir la complejidad del sistema sólo con este parámetro.

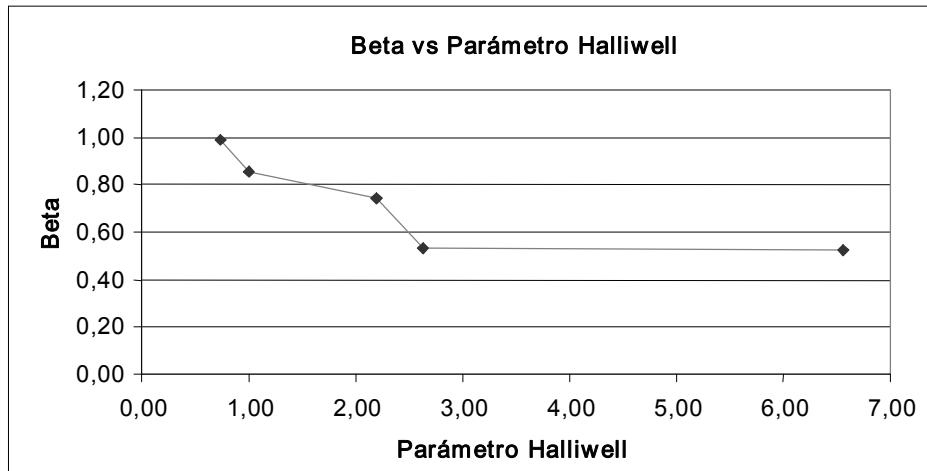


Figura 9. Coeficiente β vs. Parámetro de Halliwell para sistema de redes cerradas.

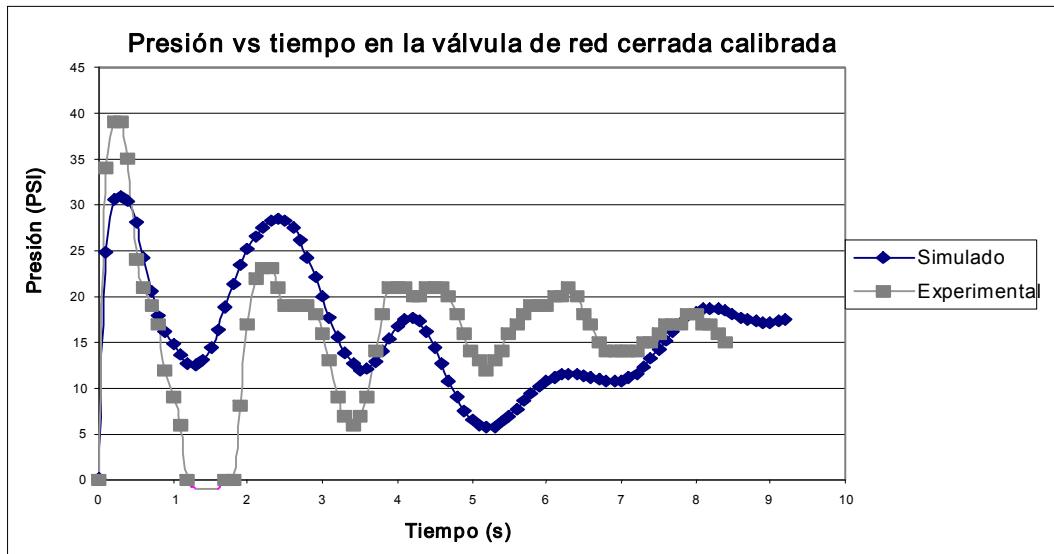


Figura 10. Distribución de presiones en la válvula para un cierre brusco, sistema de redes cerradas.

Adicional a los factores que cubre el parámetro θ en los casos de las tuberías simple, en serie y en paralelo, en un sistema de red cerrada se cuenta con más accesorios, con tuberías más cortas que exigen al modelo mayores redondeos a la celeridad, así como muchas más fuentes

de reflexión y refracción para la onda de presión. Pese a lo anterior, se observa un gran avance por el hecho de al menos lograr capturar la fase de la onda con argumentos lógicos.

8. VALIDACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

Para verificar la pertinencia de los resultados del modelo para otros conjuntos de datos diferentes a los utilizados en la calibración, y cumplir el principal objetivo de este trabajo, se validará el modelo computacional contra los datos experimentales en otro punto de la red, distinto al de la válvula.

Este caso se analizará con los parámetros físicos calibrados para el caso de la tubería en red cerrada. Así

mismo se trabajó con los parámetros numéricos óptimos obtenidos en el análisis de sensibilidad para el tubo simple. Lo anterior con el objeto de iniciar con las condiciones estudiadas y observar la validez de dichas condiciones asumidas en la calibración. Los valores de los parámetros introducidos son los mismos que aparecen en la Tabla 6 y los seleccionados en la descripción de la Figura 9. El punto en la red elegido para la validación es el primer nudo después del embalse, en dirección aguas abajo.

La Figura 11 presenta los resultados de la validación.

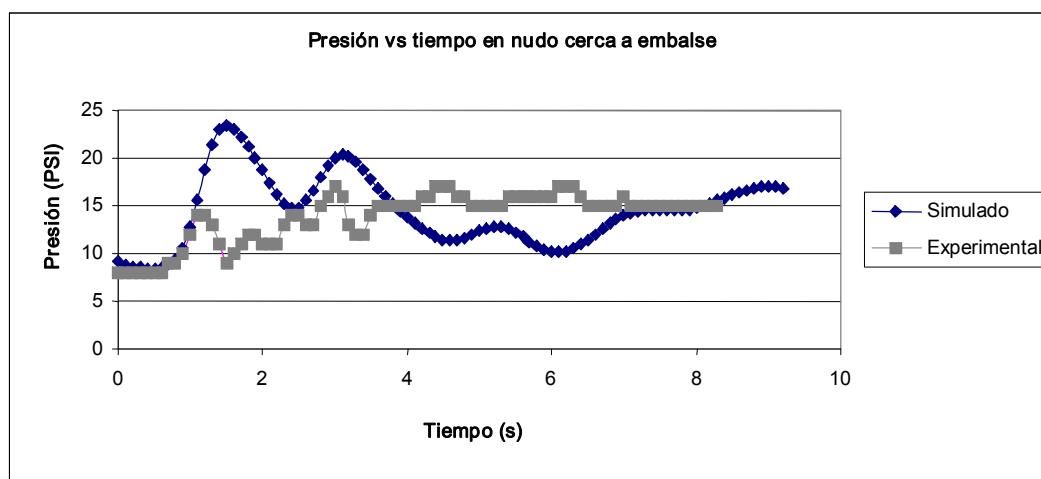


Figura 11. Distribución de presiones en la válvula para un cierre brusco, sistema de tubos en paralelo.

Teniendo presente los argumentos explicados en la calibración de la red, en la validación, se nota una sobrevaloración de los máximos y mínimos de la presión simulada con respecto a la experimental. Aunque la tendencia hacia los valores estáticos es similar, los valores de frecuencia (tiempos de ocurrencia de máximos o mínimos) no coinciden. Se considera que las oscilaciones irregulares en los valores experimentales son consecuencia de las reflexiones y refracciones de la onda, tanto en el embalse que es la condición de frontera más cercana, como la de los demás nudos de los dos circuitos siguientes al nudo en estudio. Lo anterior se podría solucionar introduciéndole al modelo un módulo que considere las reflexiones y refracciones de onda en los diferentes puntos de la red (siempre y cuando se conozca con certeza el comportamiento de dichas reflexiones y refracciones).

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La implementación del modelo computacional en los lenguajes de programación VISUAL FORTRAN 2000 y MATLAB 6.3, permitirán a las demás generaciones de investigadores en el tema, la utilización de una herramienta para la simulación de muchos más casos aplicados a este tema. El modelo computacional es efectivo y amigable con el usuario, posee una interfase gráfica de fácil uso y una compilación muy rápida (aproximadamente 2 minutos como máximo), incluso para mallas numéricas muy densas.

Se deben resaltar las simplificaciones e hipótesis asumidas en este trabajo, para que sirvan de base de aplicación a los comentarios o posibles trabajos futuros, que tomen como base los resultados que aporta este modelo: La utilización de la tubería horizontal, el

despreciar los términos convectivos y la linealización del cuadrado de la velocidad, el concepto de fricción en estado transitorio fue el mismo que para el estado permanente, el sistema de todos los escenarios de las tuberías fue abastecido por gravedad, la red cerrada simulada, no poseía nudos con ofertas.

Aún con estas suposiciones, la comparación de resultados entre las mediciones y las simulaciones fue muy promisoria pues se logró una buena coincidencia de estos valores para los casos estudiados, excepto para el caso de la red cerrada. El modelo captura adecuadamente el tiempo de ocurrencia de los valores máximos y mínimos dándose unas pequeñas diferencias entre los valores calculados y los valores medidos.

El valor de parámetro de Halliwell fue introducido con el objetivo de lograr el mejor ajuste entre los resultados simulados y los datos experimentales. Se deben definir valores concretos y justificados para este parámetro que reflejen las condiciones que se van a simular.

10. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su mas sincero agradecimiento al Centro de Laboratorios de la Universidad EAFIT por el préstamo del sensor de presiones utilizado para las mediciones. De igual manera agradecen a la firma Hidromecánica Ltda. por el préstamo del equipo de adquisición de datos utilizado en las mediciones. Finalmente, los autores agradecen al Laboratorio de Hidráulica “Jairo Murillo” por toda la colaboración prestada durante la experimentación.

11. BIBLIOGRAFÍA

Abreu, J M., Guarga, R. e Izquierdo, J., 1995, Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión, Unidad Docente Mecánica de Fluidos. Valencia (España). 761 P.

Barrios, A. y Pineda, L. F., 1981, Aplicación del método de las características al estudio del golpe de ariete. Tesis (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. Medellín, 147P.

Colombia. Ministerio de Desarrollo Económico, 2000, Reglamento técnico del sector de agua

potable y saneamiento básico, RAS-2000. 1 rev. Santa fe de Bogotá. 1400p.

Duque, A., 1998, Notas de clase. Acueductos y alcantarillados, Universidad de Medellín, 220 P.

Fox, J. A., 1977, Hydraulic analysis of unsteady flow in pipe networks, New York, John Wiley y Sons, 217 P.

Halliwell, A. R., 1963, Velocity of a water-hammer wave in an elastic pipe, Journal of Hydraulics Division. ASCE, Vol. 89, No 4, 1-21 pp.

Jovié, V., 1995, Finite elements and the method of characteristics applied to water hammer modelling, Engineering modelling, No 8, pp. 51-58.

Mancebo del Castillo, U., 1987, Teoría del golpe de ariete y sus aplicaciones, Limusa, México, 248 P.

Mcinnis, D. y Karney, B., 1995, Transients in distribution networks: Field test and demand models, Journal of Hydraulics, Vol 121, No 3; pp. 218-231.

Palacio, C. A. y Toro, F. M., 2002, Metodología para la validación de un modelo hidrodinámico específico en áreas intermareales. Avances en Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Número 9, pp 37-46.

Reddy, J.N., 1993. An introduction to the finite element method, New York, McGraw Hill, Second edition. 684 P.

Saldarriaga, J. G., 1998, Hidráulica de tuberías, Santa fe de Bogotá, Mc Graw Hill, 564 P.

Salgado, R., 1992, Revisión de los métodos numéricos para el análisis del escurrimiento impermanente en redes de tuberías a presión, X Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología: Memorias 2. Sociedad Colombiana de Ingenieros Cartagena, pp. 471-482.

Streeter, V. L.; Wylie, B. y Bedfor K. W., 2000, Mecánica de fluidos, 9 Ed. Mc Graw Hill, 720 P.

Velásquez, C., 2006, Diseño y Validación de un modelo en computador para simular el golpe de ariete en redes cerradas, Tesis de Maestría, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.