

EVENTOS DE INTRUSIÓN PATÓGENA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

• Jesús Mora-Rodríguez* •
Universidad de Guanajuato, México

*Autor de correspondencia

• Helena M. Ramos •
Instituto Superior Técnico, Portugal

• P. Amparo López-Jiménez •
Universitat Politècnica de València, España

Resumen

La intrusión patógena es un fenómeno que se presenta en los sistemas de distribución de agua potable, provocando la disminución de la calidad del agua distribuida cuando los fluidos (contaminados) circundantes a las conducciones entran en las mismas a través de defectos en condiciones de depresión. La contaminación en condiciones más desfavorables puede provocar enfermedades epidémicas debido al consumo de agua contaminada. Es por ello que tener mayor conocimiento de este tipo de fenómenos es de interés primordial para considerar que las operaciones llevadas a cabo en la red —ya sea producto de un ejercicio de gestión o por eventos extraordinarios— pueden provocar la intrusión de volúmenes contaminantes a través de los fallos físicos en la red de distribución de agua; con ello se tendrán argumentos para evitar en mayor medida este tipo de acontecimientos. El objetivo de este trabajo es obtener los volúmenes de intrusión de contaminantes que se pueden generar en eventos específicos presentes en las redes de distribución de agua. Se realizaron modelos físicos y numéricos para obtener escenarios que representen la intrusión durante eventos transitorios de presión, a través de fallos en las conducciones, considerando un medio poroso exterior en el entorno del fallo.

Palabras clave: intrusión patógena, fallos en tuberías, transitorios de presión, modelos físicos y en CFD.

Introducción

Antecedentes

La Comunidad Internacional, a través de la Organización Económica y el Desarrollo (OECD), reconoce en 1996 la necesidad de tener mayor entendimiento de la relación entre el agua y la transmisión de enfermedades epidémicas (Hunter *et al.*, 2003). Desde mediados de la década de 1990, la intrusión patógena ha sido un fenómeno que se ha estado estudiando con mayor detenimiento, principalmente en países como Estados Unidos y Canadá, en donde se ha corroborado que una de las fuentes potenciales

de enfermedades epidémicas está relacionada con el consumo de agua contaminada (Kirmeyer *et al.*, 2001; Karim *et al.*, 2003; Le Chevallier *et al.*, 2003; Friedman *et al.*, 2004; AWWARE, 2005). En diversos estudios se han analizado los principales casos de intrusión patógena, los cuales pueden ser generados por una serie de mecanismos y vías de entrada de los patógenos. Se han identificado diversas rutas con base en la frecuencia de intrusión, el volumen contaminado, la gravedad de la enfermedad y la probabilidad de generar un brote epidémico (Kirmeyer *et al.*, 2001). Entre los eventos de intrusión que han sido catalogados como de alto riesgo se presentan los eventos transitorios

de presión y en las zonas de roturas. Durante los últimos años, la contaminación de enfermedades epidémicas relacionadas con el consumo de agua ha presentado un incremento de los casos donde la fuente de contaminación está en la red de distribución; en cambio, han disminuido los casos donde la fuente de contaminación estaba en el tratamiento del agua. Los estudios realizados en cuanto a la intrusión presentan un enfoque desde el punto de vista de calidad del agua, en los cuales se hace una evaluación del riesgo microbiológico a lo largo de la distribución del agua potable (Pedley *et al.*, 2004; Van Lieverloo *et al.*, 2006; Zloczower y Charuv, 2009; Ramalingam *et al.*, 2009).

Motivación

En el presente artículo se presenta un análisis enfocado a obtener una cuantificación de la intrusión patógena durante eventos transitorios, considerando el medio poroso exterior en el entorno de la conducción. Se presenta una metodología en la que se obtienen los volúmenes de intrusión, con los cuales se puede determinar la capacidad de contaminación dentro de la red. Para lograr el presente objetivo se han realizado escenarios en modelos físicos, para validar modelos numéricos basados en el Método de las Características (MOC, por sus siglas en inglés) y en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés). El uso de los modelos en CFD se establece para analizar diversos casos que pueden presentarse en la red de distribución de agua.

Metodología

Prototipo de intrusión

Las redes de distribución de agua se presentan de manera principal en instalaciones enterradas, esto hace que el fenómeno de intrusión se genere con medios fluidos de características hidrodinámicas particulares.

Por un lado, el régimen turbulento dentro de la tubería y, por otro, el régimen gobernado por el flujo en el medio poroso exterior. Para modelar la intrusión se ha realizado un prototipo en que se consideran los siguientes aspectos: (1) un fallo en la conducción de agua, generado por corrosión y que puede ser representado como un orificio circular; (2) un régimen de presiones negativas en el interior de la tubería, provocado durante las oscilaciones de bajada de presión durante eventos transitorios; (3) en el exterior se tiene un medio saturado por encima de la cota de la tubería, con el cual se representa la fuente contaminante (figura 1).

Con estas premisas se realiza un modelo hidráulico para obtener la capacidad de intrusión durante los transitorios de presión. El medio poroso exterior saturado en el entorno de la conducción se simula con un modelo en estado permanente para obtener el grado de retención del fluido exterior que genera la presión de poro. De esta forma se tienen considerados los factores para caracterizar el evento de intrusión que puede presentarse durante transitorios de presión, tomando en cuenta el suelo exterior de la tubería enterrada, con lo cual se procede a la descripción de los modelos físicos.

Modelo físico del evento transitorio

El modelo para el evento transitorio se simula en las instalaciones del laboratorio del Centro de Estudios de Hidrosistemas (CEHIDRO) del Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal. El modelo experimental está compuesto por un circuito cerrado (figura 2). Se tiene un tanque presurizado con el que se genera la carga inicial de los ensayos. Conectado al tanque, se presenta una tubería de polietileno de alta densidad de 200 m de longitud, diámetro exterior de 0.05 m y espesor nominal de 0.003 m. Al final de la conducción se tiene descarga libre a un depósito.

En la instalación original se hizo una modificación para generar la intrusión. El accesorio de intrusión se instaló aguas arriba

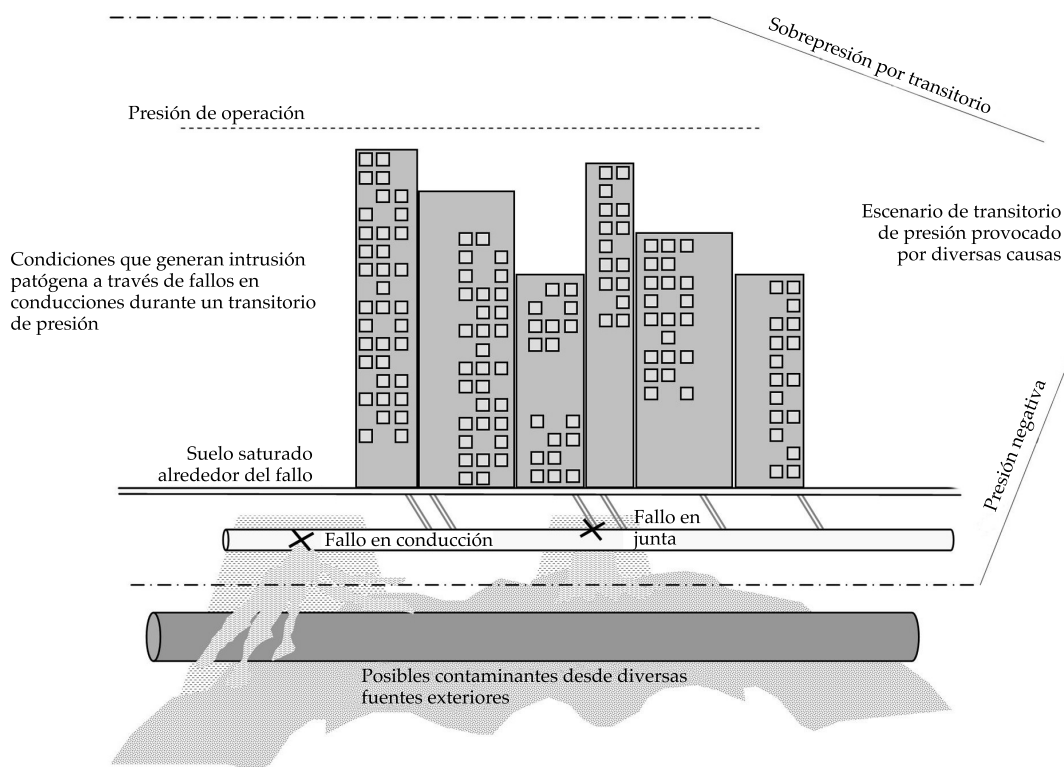


Figura 1. Esquema de la intrusión en estado transitorio.

de la válvula al inicio de la conducción (figura 2, recuadro).

La presión durante la simulación se mide con un transductor en la zona del fallo. Las lecturas de presión se captan mediante el programa *Pico Scope*TM. El caudal se mide con un vertedor en el depósito de la descarga libre.

Para la elección del tamaño del fallo se hace un análisis de la clasificación del caudal fugado y de la forma de detección de las fugas (cuadro 1, adaptado de McKenzie, 1999). De esta clasificación se considera el rango de caudal equivalente a las fugas reportadas y de fácil detección. Este tipo de fugas genera un medio saturado en mayores proporciones alrededor del fallo, con mayor capacidad de saturación alrededor del fallo, generando un ambiente propicio de mezcla y transporte de contaminantes.

A partir de la ecuación de descarga a través de orificios, se calcula un rango de caudales para diversos diámetros, en un rango de

presión relativa de 0 a -10 mca (0 a -98 000 pa). El coeficiente de descarga 0.75 está basado en los resultados obtenidos por Lambert (2001). Por último, el diámetro del orificio calculado en el rango de fuga reportada y de fácil detección para el rango de presiones establecido es de 4 mm.

En la instalación física descrita, los transitorios que generan intrusión de mayor proporción son los que ocurren provocando el cierre de la válvula aguas arriba de la conducción. La presión inicial antes del transitorio es de 15.0 mca, con un caudal de circulación de 2.54 l/s. Después de las condiciones iniciales estacionarias, se genera el transitorio de presión, el cual se capta con un video en alta definición, con el fin de obtener los volúmenes de intrusión y fuga, y con ello la validación del modelo numérico CFD.

En la figura 3 (izquierda) se muestra el registro de la presión en la zona del fallo y a 100 m de la instalación se observa la presión

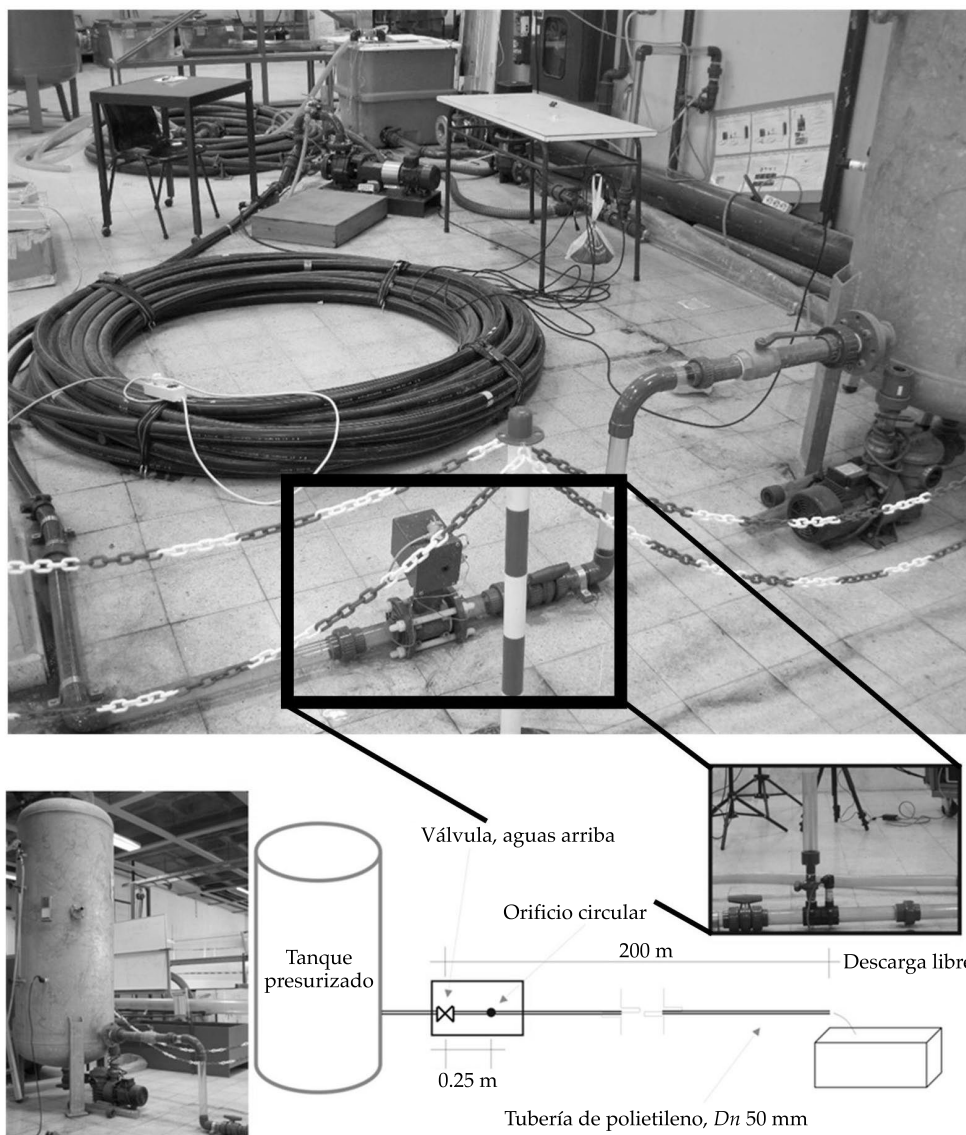


Figura 2. Modelo para transitorios de presión de CEHIDRO.

Cuadro 1. Clasificación de las fugas.

Tipo de fuga	qf (m ³ /s)
Fuga evidente	$1.5 \times 10^{-4} < qf$
Fuga reportada y de fácil detección	$5 \times 10^{-5} < qf < 1.5 \times 10^{-4}$
Fuga reportada y de difícil detección	$3 \times 10^{-6} < qf < 5 \times 10^{-5}$
Fuga indetectable	$qf < 3 \times 10^{-6}$

negativa hasta el punto de cavitación, y las oscilaciones de presión durante 12.5 s. En la figura 3 (derecha) se tiene una comparación

entre un transitorio sin orificio y el transitorio con el orificio de 4 mm; se observa el efecto de amortiguamiento provocado por el fallo;

cuando no se tiene el fallo, se presentan más oscilaciones de presión y la duración del transitorio es mayor.

Finalmente, el transitorio experimental fue captado con un video de alta definición. La figura 4 muestra los niveles máximos y mínimos con los que se obtienen los volúmenes de intrusión y de fuga durante el evento transitorio.

Modelo físico de intrusión, incluyendo medio poroso exterior

El modelo de intrusión con medio poroso exterior en el entorno del fallo de la conducción se hace para adaptar de mejor manera la representación de la intrusión en redes de distribución. En esta etapa se trabaja con un modelo físico en régimen permanente que se

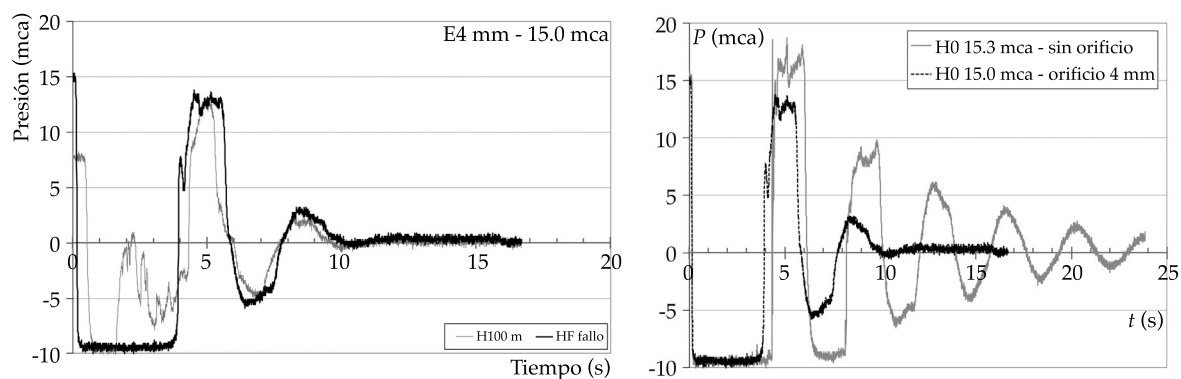


Figura 3. Escenario de la simulación transitoria con carga inicial de 15.0 mca y comparación con un transitorio sin fallo.

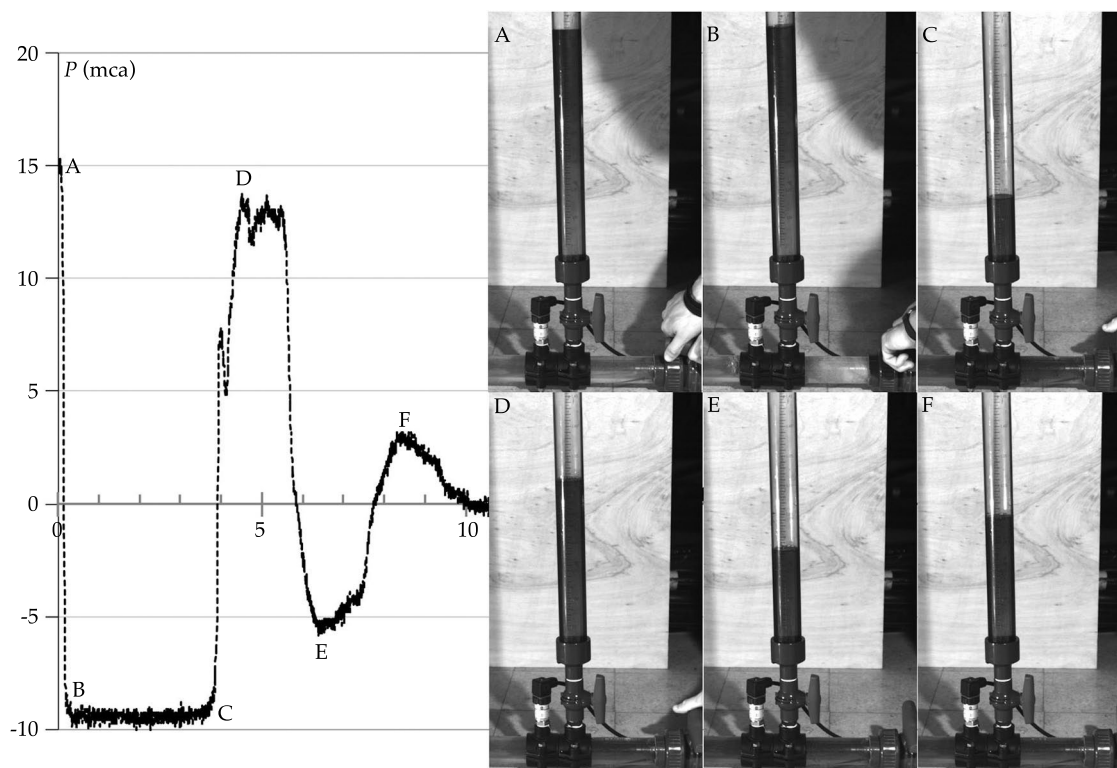


Figura 4. Instantes del video de alta definición para los picos de presión registrados.

encuentra en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia. En esta instalación se simula el efecto del flujo del medio poroso saturado en el exterior de la conducción. La relación de la intrusión con el medio poroso es un tema en el que se muestran pocas aportaciones de forma experimental (Collins *et al.*, 2010). Para este modelo en específico se utiliza un orificio circular de 1 mm de diámetro y el medio poroso se representa con un material granular con diámetro de partícula mayor a 1 mm (figura 5). La dimensión del fallo de 1 mm de diámetro se realiza en este ensayo con el objetivo de no tener arrastre de material granular al interior de la instalación.

El esquema del modelo físico en estado permanente se muestra en la figura 6. Se tiene un sistema de recirculación en la instalación de la conducción; la conducción es de PVC, con un diámetro nominal de 32 mm y espesor de 2.4 mm; la carga exterior sobre el fallo permanece constante. El mecanismo para que se genere presión negativa y, en consecuencia,

la intrusión, se realiza mediante la combinación del equipo de bombeo y la apertura parcial de la válvula que se encuentran aguas abajo y aguas arriba del fallo, respectivamente. El fluido que se introduce a la conducción a través del fallo es un excedente del sistema; se vierte para cuantificar el caudal de forma volumétrica. Las presiones negativas se registran con un transductor aguas abajo del fallo. El caudal total de circulación después de la intrusión se contabiliza con un caudalímetro. Las mediciones de presión y caudal se registran con *Labview*TM.

Se hace una comparación de la intrusión que se genera con y sin suelo en el exterior de la conducción. Los resultados de la simulación experimental se obtienen mediante la relación de la presión negativa y el caudal de intrusión análogo a la cuantificación del caudal de fuga con la teoría FAVAD (May, 1994).

Se generan cinco escenarios de presión, en un rango de -1.3 a -5.3 mca; se tiene una carga exterior de 0.37 m. Con la relación potencial entre el caudal (Q) y el diferencial de la presión (P), se valida el modelo numérico. En la figura

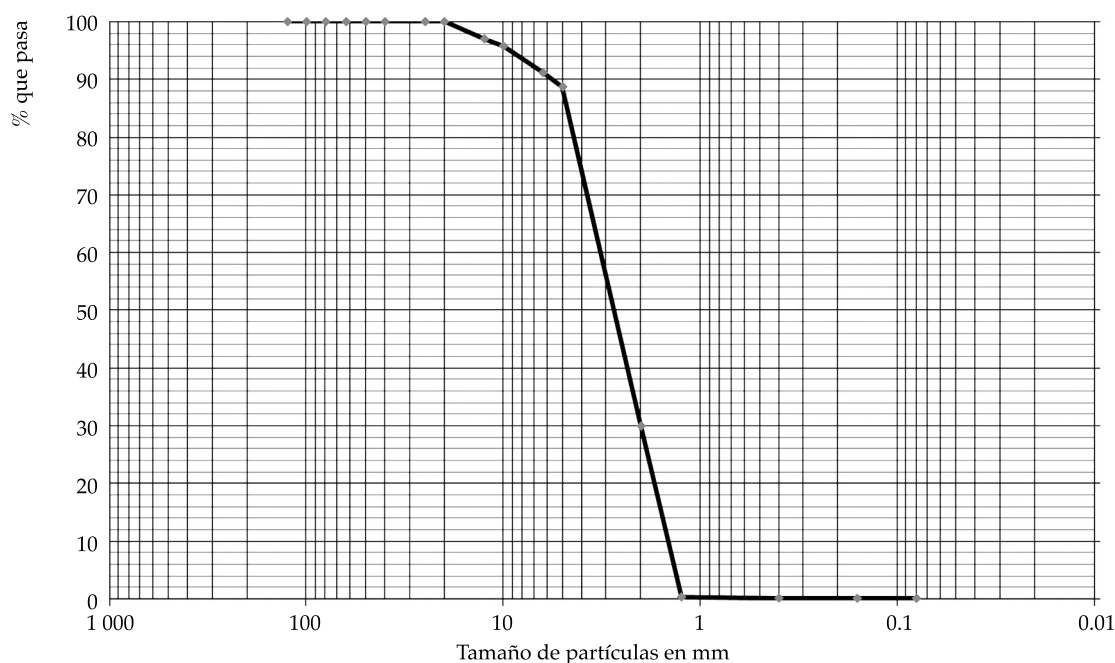


Figura 5. Granulometría del medio poroso.

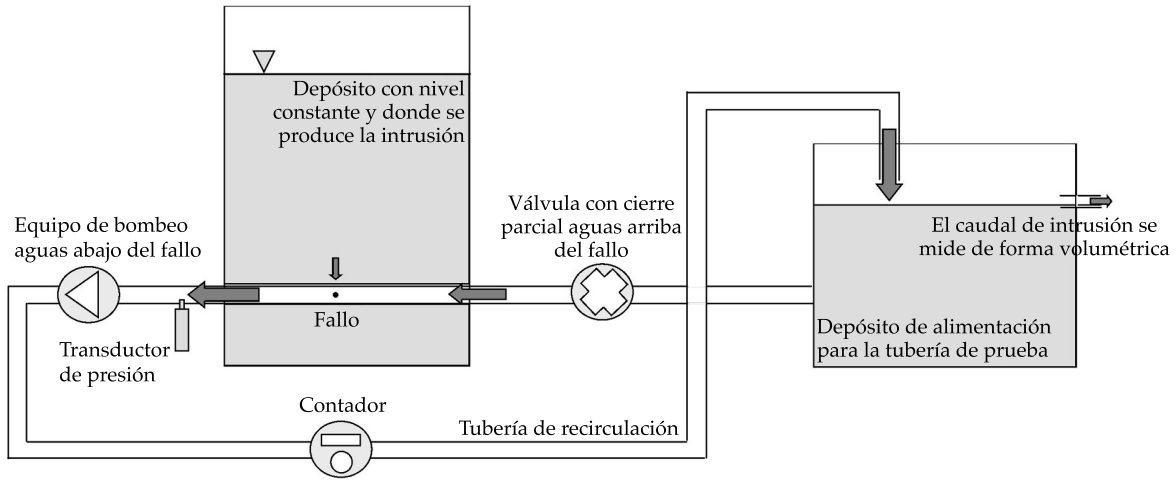


Figura 6. Diseño del modelo físico de la intrusión en estado permanente.

7 se muestran los resultados del potencial de intrusión con y sin suelo en el medio exterior.

Se presentan caudales de intrusión en un rango de entre 13 y 26 l/h sin medio poroso; el caudal de intrusión se presenta en un rango de entre 8 y 12 l/h cuando se tiene el medio poroso. El medio exterior poroso genera una disminución de la intrusión en un 52%.

Teniendo los resultados de los modelos físicos se realizan los modelos numéricos, trabajando en dos etapas: en la primera se simula el evento transitorio con el MOC y en la segunda se simula el fenómeno de intrusión con el modelo CFD.

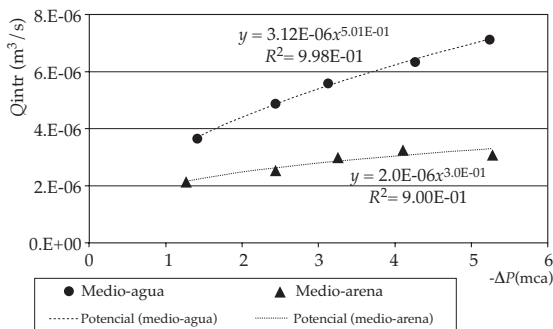


Figura 7. Relación potencial de la intrusión con y sin material poroso.

Método de las características con cavitación localizada y fallo incluido

En la representación del evento físico del transitorio de presión con el MOC se incluye la cavitación para eventos generados aguas arriba de la conducción y el amortiguamiento debido al fallo circular.

Los transitorios de presión en las tuberías se simulan a partir de las ecuaciones de golpe de ariete (Chaudhry, 1987; Wylie y Streeter, 1993; Ramos, 1995). La combinación de los modelos hidráulico y estructural se soluciona con el método de las características (Wiggert et al., 1987); se integra en el plano $x-t$. El esquema de diferencias finitas se puede presentar por la expresión (1):

$$C^+ : H_P - H_A + \frac{c}{gA}(Q_P - Q_A) + I^+ = 0$$

$$C^- : H_P - H_B - \frac{c}{gA}(Q_P - Q_B) + I^- = 0 \quad (1)$$

donde H representa la carga de la siguiente forma: en el instante i para P , en un instante y espacio anterior de i para B , y en un instante anterior y un espacio posterior de i para A ; Q representa el caudal en el instante i para P , en

un instante anterior y espacio posterior a i para A , y en un instante y un espacio anterior a i para B ; I representa las pérdidas por fricción; c , la celeridad; g , la aceleración de la gravedad; A , el área de la sección transversal de la conducción.

En el trabajo de Ramos *et al.* (2004) se presenta una aproximación del efecto de amortiguamiento en los picos de presión a lo largo del tiempo. Este efecto dinámico puede estar influenciado por el comportamiento no elástico de la tubería y por el efecto de fricción. Se estiman dos coeficientes de decaimiento simples basados en las ecuaciones de disipación de energía, y se incluyen como parámetros de disipación (2) en las ecuaciones del MOC:

$$\Delta H = KH \frac{c}{gA} \Delta Q - J \quad \text{y} \quad \Delta Q = KQ \frac{\Delta H - J}{c/(gA)} \quad (2)$$

siendo J el término de pérdida de carga; KH , la variación de la carga, y KQ , la variación en el flujo.

El modelo de cavitación localizada desarrollada por Ramos *et al.* (2005) genera un cambio en la respuesta del sistema transitorio y hace que se ajuste de mejor manera a los eventos que son generados aguas arriba de la conducción. Debido a que la presión durante el transitorio puede tomar valores por debajo de la presión atmosférica, se puede generar presión de vapor y, con ello, la formación de burbujas de vapor. El gas libre (isotérmico e ideal) genera una variación en la velocidad de onda entre el 40 y el 70% de su valor inicial (Ramos *et al.*, 2005). El modelo convencional vapor-líquido asume que la cavitación se forma en una sección de tubería y se considera como una frontera interna en los puntos donde se genera la cavitación. Aunque para propósitos del modelo, el efecto de la cavitación puntual se puede representar en todas las secciones de la tubería, la cavitación se representa con el volumen V_{ij} (3) en la sección i de la tubería y para el tiempo j :

$$V_{i,j} = V_{i,j-1} + (Q_{Ri,j} + Q_{Ri,j-1} - Q_{Li,j} - Q_{Li,j-1}) \Delta t / 2 \quad (3)$$

donde Q_R y Q_L son el caudal hacia la derecha y la izquierda de la cavitación, respectivamente. Esta condición será para presiones menores que la presión de vapor.

Por otro lado, el modelo del fallo que genera la intrusión y la fuga puede ser descrito con el análisis del flujo a través de orificios, incluyendo situaciones de presión negativa (Covas *et al.*, 2005; López *et al.*, 2008). En el caso de la modelación numérica, el análisis se realiza con el fallo circular de 4 mm. De acuerdo con Bergant *et al.* (2003), el fallo se puede implementar en el MOC como una condición de frontera interna. La fuga es simulada mediante la ecuación que relaciona a la carga y el flujo de aguas arriba con la carga y el flujo hacia aguas abajo (4):

$$Q_p^+ - Q_p^- - C_d A_0 \sqrt{2g(H_p - H_{XT})} = 0$$

$$\text{donde } H_p = H_p^+ = H_p^- \quad (4)$$

donde H_{XT} es la carga en el exterior del fallo.

La frontera interna del modelo numérico está entonces representada por el modelo de cavitación y el modelo del fallo. Para aplicar el modelo numérico se obtienen las variables de la simulación experimental, entre las cuales se tiene el tiempo de cierre de válvula y la carga exterior media, que se obtienen a partir del video de alta definición. La tensión de vapor se obtiene del valor medio medido con el transductor (cuadro 2).

La celeridad se obtiene de diversos ensayos en la instalación en condiciones originales; el valor medio de la celeridad es de 240 m/s. La

Cuadro 2. Descripción de las características físicas de los transitorios con fallo de 4 mm.

Parámetro	E4 15.0
Carga inicial aguas arriba (mca)	15.0
Caudal de descarga (m ³ /s)	0.0025
Tensión de vapor media (mca)	-9.4
Tiempo de cierre de válvula (s)	0.17
Carga exterior media (mca)	0.43

simulación del MOC se hace con un paso de tiempo de 0.417 s. En la figura 8 se muestra el ajuste del modelo numérico al resultado experimental; con el resultado de la simulación se obtiene una relación entre la presión y la velocidad para cada paso de tiempo en la sección de tubería donde se encuentra el fallo. Con estos resultados se termina la primera etapa del modelo numérico y así se tienen las condiciones de frontera en cada paso de tiempo para la etapa del modelo numérico CFD.

Modelo de dinámica de fluidos computacional

En esta segunda etapa se representa el evento de intrusión con un modelo CFD. El objetivo es obtener los volúmenes acumulados de intrusión después del evento transitorio. La simulación CFD se hizo en dos partes: en la primera se valida el evento transitorio y, en la segunda, se valida la intrusión con medio poroso exterior.

El modelo matemático de CFD está basado en la solución de las ecuaciones de la mecánica de fluidos (5) y (6), considerando fenómenos turbulentos. Los flujos turbulentos requieren de un tratamiento específico en las ecuaciones de la mecánica de fluidos; la predicción de las características del flujo se realiza mediante diversas aproximaciones. En el presente trabajo

se utiliza uno de los modelos basados en las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes (RANS, por sus siglas en inglés) en cortos intervalos de tiempo; este tipo de modelos es el adecuado para las aplicaciones en hidráulica con flujos incompresibles a presión, donde se buscan obtener resultados basados en el balance de masa y en campos de velocidades (Gualtieri et al., 2009):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \end{aligned} \quad (6)$$

Para considerar la turbulencia, los valores de la velocidad se aplican como la adición de un valor medio y una componente fluctuante denominada descomposición de Reynolds (7), en la dirección i :

$$u_i = \bar{U}_i + u_i' \quad (7)$$

El producto promediado de las velocidades fluctuantes se conoce como tensiones de Rey-

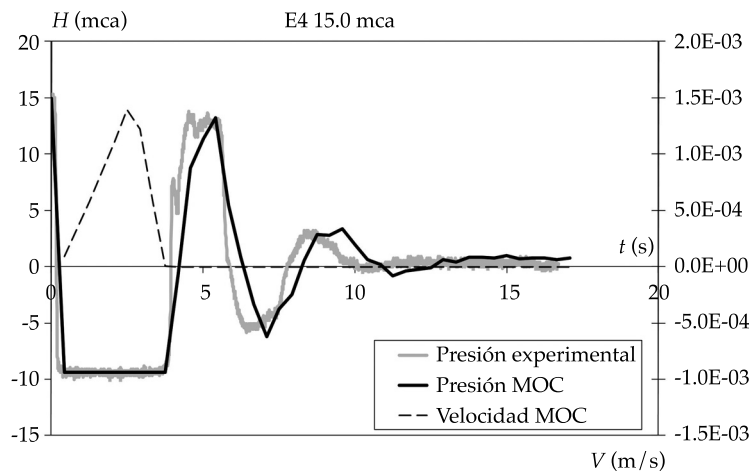


Figura 8. Ajuste del MOC al modelo experimental.

nolds y representa el transporte de cantidad de movimiento provocado por las fluctuaciones turbulentas de la velocidad. Las ecuaciones se expresan en términos de variables promediadas, ignorando las componentes fluctuantes de los campos de velocidad instantáneos. Se han desarrollado dos formas básicas de modelos de turbulencia basados en el concepto de viscosidad turbulenta; se pueden distinguir modelos de una o de dos ecuaciones (Wilcox, 2002). Entre los modelos de dos ecuaciones se tiene el modelo κ - ϵ (Launder y Spalding, 1972).

La presente simulación se realiza con el modelo "Realizable κ - ϵ ", el cual es una variante del genérico que proporciona el programa STAR-CCM+ (2008). El modelo "Realizable κ - ϵ " fue desarrollado por Shih *et al.* (1994), contiene una propuesta en la ecuación de transporte para la tasa de disipación turbulenta ϵ . Además, propone que los coeficientes que intervienen en la ecuación de definición de κ y ϵ estén en función del caudal medio y de las propiedades de la turbulencia, lo cual mejora las predicciones del modelo en el caso que nos ocupa.

La representación numérica del medio poroso en el modelo CFD se hace con la relación denominada "Porous Source" (STAR-CCM+, 2008), donde las propiedades de la porosidad se especifican a partir de la ecuación (8):

$$F_p = -P \cdot v \quad (8)$$

donde P es el tensor de la resistencia porosa y v es la velocidad a través del medio. El tensor P se expresa con la ecuación (9):

$$P = P_v + P_i |v| \quad (9)$$

donde P_v es el tensor de resistencia debida a la viscosidad lineal y P_i es el tensor de resistencia inercial (cuadrático), por lo que se deben definir estos dos parámetros con base en las características del medio poroso.

La metodología a seguir por los códigos CFD presenta tres etapas principales (López *et al.*, 2008):

1. El pretratamiento: se identifica el evento físico, número y tipo de dimensiones; se construye el volumen de control y la malla en volúmenes finitos.
2. La resolución: se tiene una inicialización numérica y se resuelven las variables del medio fluido.
3. El pos-proceso: está determinado para calibrar y validar el modelo, así como para simular nuevos escenarios. En este caso, el *software* utilizado que calcula con la técnica numérica de volúmenes finitos es *Cd-Adapco*TM (STAR-CCM+, 2008).

La aplicación del modelo CFD se lleva a cabo con las características físicas del agua a temperatura media, similar a la de los ensayos experimentales; se trabajó con densidad de 997.56 kg/m³, viscosidad dinámica de 0.89 × 10⁻³ N·s/m² y viscosidad cinemática de 0.89 × 10⁻⁶ m²/s.

El volumen de control está formado por un tramo de tubería en donde se presenta el fallo y una zona exterior de donde proviene la intrusión (figura 9). Para establecer las extensiones del volumen de control se hicieron diversas pruebas de las que se obtuvieron las dimensiones óptimas en relación con la malla definitiva. Se trabaja con cinco tipos de condiciones de contorno: una entrada de velocidad normal en la frontera de la tubería; una entrada de carga hidráulica constante en el exterior de la conducción; una salida de caudal establecida, la carga de presión a la salida de la tubería; una frontera de pared, y una cara simétrica a lo largo de la conducción. En la pared de la tubería y del fallo se especifica un método de esfuerzo cortante de no deslizamiento con flujo laminar cercano a la pared.

La turbulencia en las fronteras de entrada y salida se especifican con la intensidad y la longitud de escala de la propia turbulencia. En flujos totalmente desarrollados, la intensidad toma valores de entre 1 y 10%, representando flujos poco o muy turbulentos, respectivamente. La intensidad y la longitud de la turbulencia

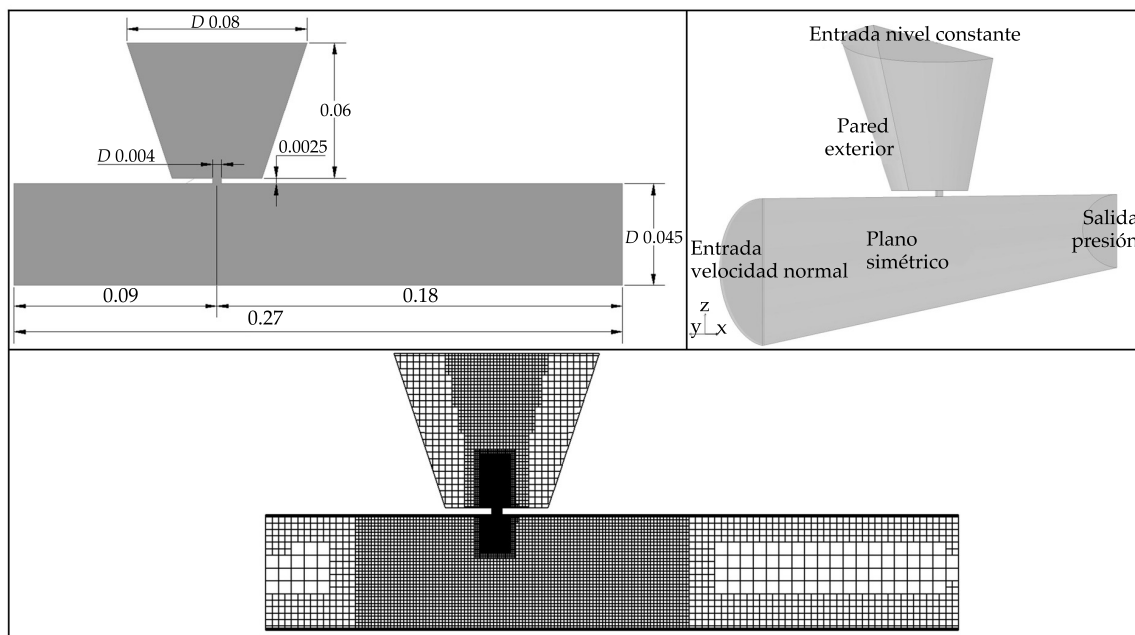


Figura 9. Geometría, condiciones de frontera y mallado del volumen de control.

(10) pueden obtenerse a partir del número de Reynolds y de la longitud característica de la sección transversal del flujo, respectivamente. (Fluent, 2005; Multiphysics, 2008):

$$I_T = 0.16 Re^{-1/8} \quad \text{y} \quad L_T = 0.07 D_H \quad (10)$$

Con base en el número de Reynolds, la intensidad toma valores en torno a 4% y la longitud de escala de 0.0032 m. La malla se genera con elementos de tipo hexaédrico. El mallado se ha optimizado con base en diversos ensayos, haciendo variar la densidad de malla y evaluando la independencia de los resultados, así como el tiempo de cálculo. La malla definitiva para el volumen de control contiene 109 113 elementos, con 322 197 caras interiores y 121 559 vértices. En la pared de la tubería y del fallo se malla para simular la capa límite.

La simulación se realiza para cada paso de tiempo resultante del MOC; se resuelve el flujo de forma segregada en segundo orden; se incluye un modelo que simula un trazador (*Passive scalar*), con el cual se le da seguimiento

al fluido exterior durante la simulación. La condición de pared es "All $y+$ Wall Treatment", una aproximación híbrida para los valores $y+$.

Las condiciones iniciales del modelo CFD se presentan en la frontera de entrada, una velocidad normal de 1.6 m/s en la conducción y en la frontera de salida una carga de presión de 146 843 pa en la conducción; la carga exterior inicial fue de 4 250 pa. El programa de CFD permite capturar las condiciones de frontera que varían con el tiempo a partir de un registro de datos. Se genera así una solución análoga a los denominados modelos de análisis dinámico cuasi-estáticos o de simulación en periodo extendido. La simulación transitoria se realiza en un tiempo de 15 s, en el que se incluyen 37 pasos de tiempo de 0.42 s. Los pasos de tiempo presentaron convergencia después de realizar entre 300 y 5 000 iteraciones, dependiendo de la variación de la presión en el paso de tiempo. La simulación numérica se considera solucionada bajo los siguientes criterios:

1. Criterio de convergencia mediante el balance de masa. Éste debe ser menor de

1×10^{-6} kg/s en las últimas cien iteraciones o al menos estable en sus valores más próximos a cero.

2. Criterio de estabilidad en los residuos de las variables, éstos tienen que mantener un comportamiento asintótico al eje x al menos en las últimas doscientas iteraciones.
3. Además, los residuos de las variables de continuidad y de turbulencia inferiores a 1×10^{-3} .

Cumpliendo estas condiciones (figura 10), las simulaciones del modelo se dan por finalizadas con una convergencia estable. Al terminar las simulaciones numéricas se tienen los resultados de los modelos en los que se podrá hacer una evaluación de la interacción entre el medio exterior y el flujo de la conducción, para evaluar el potencial de intrusión durante el evento.

A partir del balance de masa se obtiene el caudal de intrusión, el cual es el objetivo principal de la modelación. Estos caudales de intrusión se validan con los datos experimentales.

Ajuste del modelo numérico con las mediciones experimentales

El ajuste del modelo CFD para la simulación transitoria se hace con los caudales que

atravesan el fallo y mediante la intrusión acumulada al final del transitorio. Se hace la validación con cinco instantes a partir de las imágenes captadas con el video de alta definición. Los volúmenes experimentales se obtienen de los niveles máximos y mínimos alcanzados durante las oscilaciones de presión, y se calculan los valores de intrusión y de fuga. En la figura 11 (izquierda) se observa la relación del caudal a través del fallo y su velocidad con respecto al tiempo de simulación. En la figura 11 (derecha) se presenta el volumen de intrusión, de fuga y el acumulado durante el transitorio. Los valores negativos representan el flujo de intrusión y, los positivos, el de fuga.

Una forma de evaluar la convergencia es con el criterio de eficiencia (E) propuesto por Nash-Sutcliffe en 1970 (Krause *et al.*, 2005) se define como la unidad menos la suma de la diferencia entre los valores físicos (F) y numéricos (N) al cuadrado, normalizados por la varianza de los valores físicos durante el periodo de investigación (11):

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (F_i - N_i)^2}{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2} \quad (11)$$

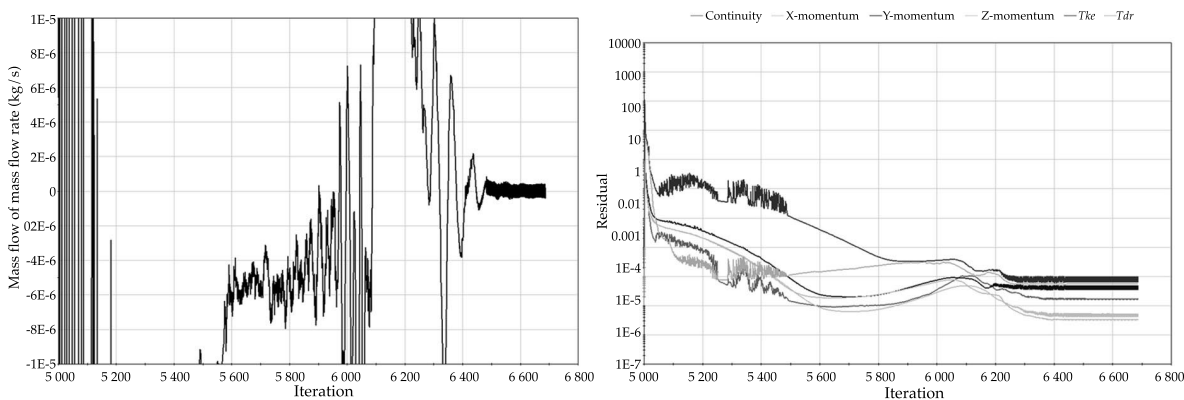


Figura 10. Criterios de convergencia para el balance de masa y los residuos de las variables.

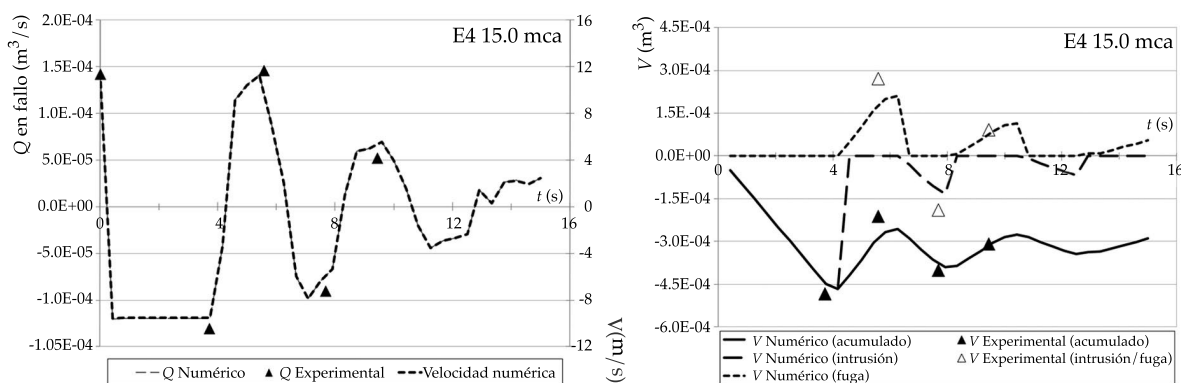


Figura 11. Ajuste del flujo de intrusión y fuga durante la simulación transitoria.

La eficiencia (E) presenta valores en un rango de $-\infty$ y 1; básicamente, cuanto más cerca el modelo de eficiencia es a 1, más exacto es el modelo. Cuando la eficiencia es menor a cero ($-\infty < E < 0$), la media experimental es una mejor predicción que el modelo numérico. Aplicando este criterio a caudales y volúmenes de intrusión, se obtienen los resultados descritos en el cuadro 3.

Con base en el criterio de Nash-Sutcliffe, el modelo numérico representa de manera satisfactoria el evento de intrusión durante un transitorio de presión. El volumen de intrusión acumulado es de 0.00034 m^3 . Si se toma en cuenta este volumen acumulado durante el tiempo del transitorio, se genera un caudal de intrusión al final del transitorio de $2.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, el cual representa el 1.1% del caudal de circulación en condiciones de operación para la carga inicial de 15 mca. Este volumen de intrusión, a pesar de ser pequeño, puede ser

considerablemente contaminante cuando la intrusión presenta cargas patógenas. La figura 12 muestra la configuración del trazador en los picos de presión durante el evento transitorio mediante el modelo CFD.

Con la metodología presentada se dispone de una relación cuantitativa de la afectación de la intrusión y que además ha sido validada de forma experimental. Se observa así la afectación que se produce con base en las dimensiones del fallo equivalente a una fuga de fácil detección.

Modelo CFD, incluyendo el medio exterior poroso

Para aplicar el medio poroso en el modelo CFD, se genera un volumen exterior independiente de la conducción, por medio de una interface en el fallo. Además, se incluyen las variables derivadas del tensor de resistencia porosa con base en las características del material utilizado en el modelo experimental.

Con respecto a los tensores de resistencia, a lo largo del tiempo se ha desarrollado una serie de correlaciones para su representación (McDonald *et al.*, 1979). La correlación básica que se utiliza es la ecuación de Ahmed y Sunada, y se puede representar con la ecuación (12):

Cuadro 3. Resultados de eficiencia N-S para la intrusión durante el evento transitorio.

Q fuga	Q intrusión	Q transitorio*
0.941	0.769	0.920
V fuga	V intrusión	V acumulado
0.726	0.922	0.920

*Suma en valores absolutos del caudal de fuga y de intrusión.

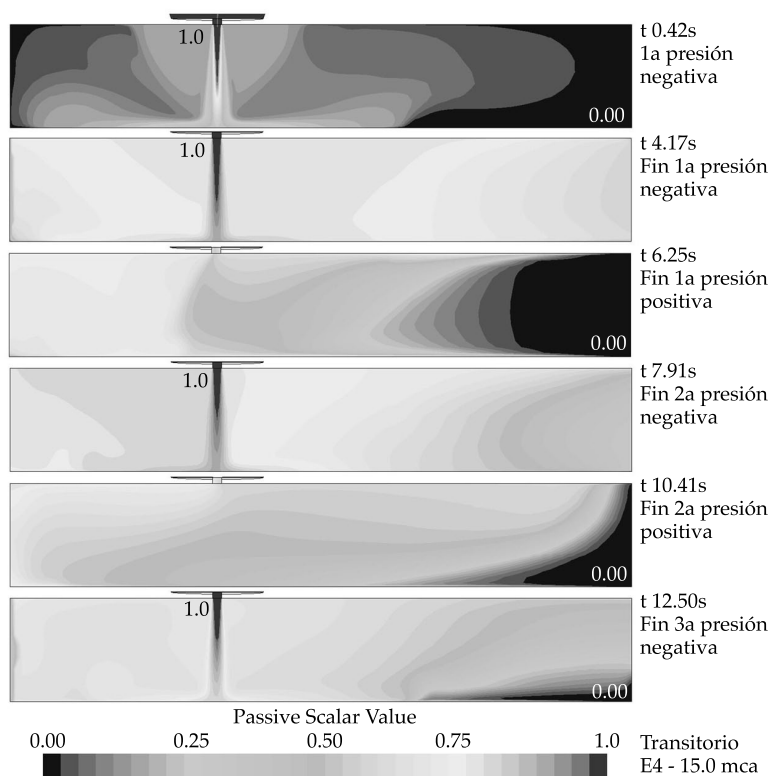


Figura 12. Trazador durante el transitorio de 15 mca (4 mm).

$$-\frac{GradP}{\mu V_0} = \alpha + \beta \frac{\rho V_0}{\mu} \quad (12)$$

donde $GradP$ es el gradiente de presión a través del espesor poroso; μ , la viscosidad cinemática; ρ , la densidad del fluido; V_0 , la velocidad del flujo en la dirección perpendicular a la sección del medio exterior; α y β , parámetros en función del medio poroso y se obtienen de forma empírica. Se utiliza la ecuación modificada de Ergun, en la que se considera la fracción de vacío del medio y la longitud característica del medio basada en el diámetro de la esfera media. Los parámetros a determinar, considerando la ecuación modificada de Ergun, son los que se presentan en las siguientes relaciones (13):

$$P_i = \beta \cdot \rho = \frac{1.75(1-\varepsilon)}{\varepsilon^2 \cdot D_{eq}} \cdot \rho$$

$$y \quad P_v = \alpha \cdot \mu = \frac{150(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 \cdot D_{eq}^2} \cdot \mu \quad (13)$$

Con los valores del D_{eq} de 1.8 mm, con base en la granulometría medida de la arena y con la porosidad obtenida de forma indirecta de muestras representativas, se obtiene un valor medio de 0.38, con estos datos se realiza la simulación CFD con los tensores de resistencia inercial (P_i) y viscosidad lineal (P_v).

Para observar la validación de los resultados obtenidos para el evento de intrusión, considerando el medio poroso exterior, se muestran los ajustes con las simulaciones experimentales (figura 13). En la gráfica se observan los valores de presión y caudal de intrusión para cada escenario; los valores puntuales son los medidos físicamente y las líneas son los resultados del modelo CFD.

De igual forma se cuantifica el ajuste del modelo CFD al modelo físico mediante el coeficiente de Nash-Sutcliffe para los cinco escenarios de presión negativa que se simularon. Para el caudal de intrusión, el coeficiente presenta un valor de 0.30, suficien-

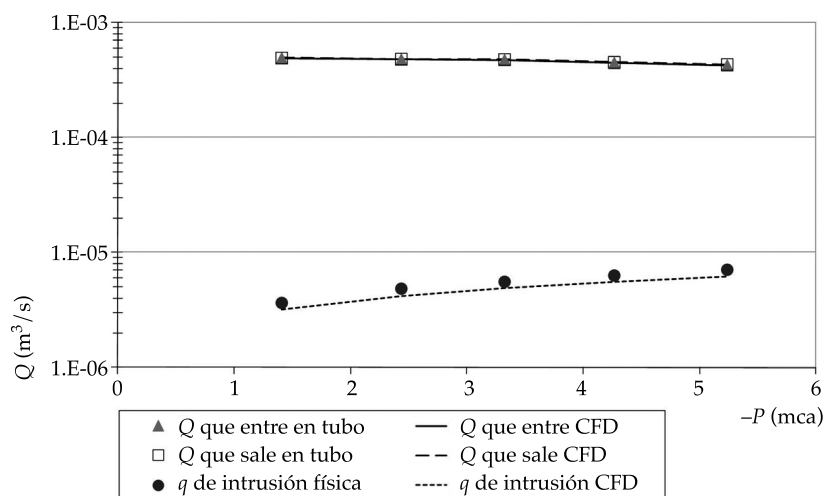


Figura 13. Resultados CFD para el fallo circular de 1 mm con medio poroso.

temente ajustado. La simulación que se realiza con el medio poroso exterior genera una reducción del caudal de intrusión de alrededor del 50% respecto a la intrusión cuando no se tiene el medio poroso. En la figura 14 se muestran las plumas de intrusión para la carga mínima de intrusión y la carga máxima con el medio exterior poroso.

Finalmente, al tener los modelos numéricos validados se presentan los resultados.

Resultados

Como resultados de la metodología mostrada se presenta una simulación numérica con los modelos MOC y CFD validados para reunir el evento de intrusión durante transitorios de

presión, considerando medio exterior poroso en el entorno del fallo de la conducción, siendo así una representación adecuada en diversas situaciones de intrusión en campo. Se hacen dos escenarios numéricos tomando como base la simulación que se realiza en estado transitorio para el fallo circular de 4 mm. Cada escenario presenta un tipo de suelo diferente. El primero de ellos tiene los parámetros óptimos para el mayor ajuste de los resultados experimentales, mientras que el segundo suelo tiene las características del material de relleno llamado zahorra, que se usa en las redes urbanas de agua de Valencia (cuadro 4).

De esta forma se tienen tres escenarios con los cuales se puede obtener la capacidad de

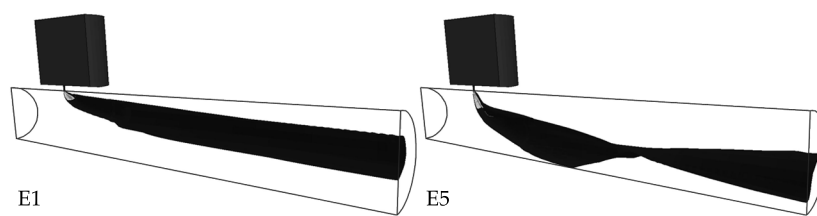


Figura 14. Trazador de las plumas de intrusión para las cargas mínima y máxima con medio poroso.

Cuadro 4. Escenario de transitorios con medio poroso exterior.

Escenario	Carga inicial (mca)	D_{eq} medio (mm)	Porosidad
IT-A-4 mm	15.0	2.00	0.40
IT-B-4 mm	15.0	0.42	0.25

intrusión con diversas representaciones del suelo en cuanto a compactación y estado del material afectado por la fuga que provoca el fallo. En el caso del escenario validado, se puede considerar como un ambiente socavado en el entorno del fallo; en los escenarios a simular se tiene un suelo poco compactado (IT-A- 4 mm) y un suelo compacto (IT-B- 4 mm) en el entorno del fallo.

Al término de las simulaciones, los resultados se muestran con base en los volúmenes de intrusión, fuga y acumulados (figura 15) para cada escenario. Se puede observar la variación

de la intrusión cuando las condiciones del suelo son diversas.

En el cuadro 5 se muestra el volumen acumulado medio de intrusión para los escenarios del medio exterior poroso.

Dependiendo de las características del suelo exterior, la variación de la intrusión se presenta hasta en un 93%. Aun con el suelo más compacto (zahorra), el volumen de intrusión puede ser un problema de calidad, dependiendo de la concentración del contaminante. En la figura 16 se muestra la configuración de la intrusión por medio de un trazador durante el transitorio.

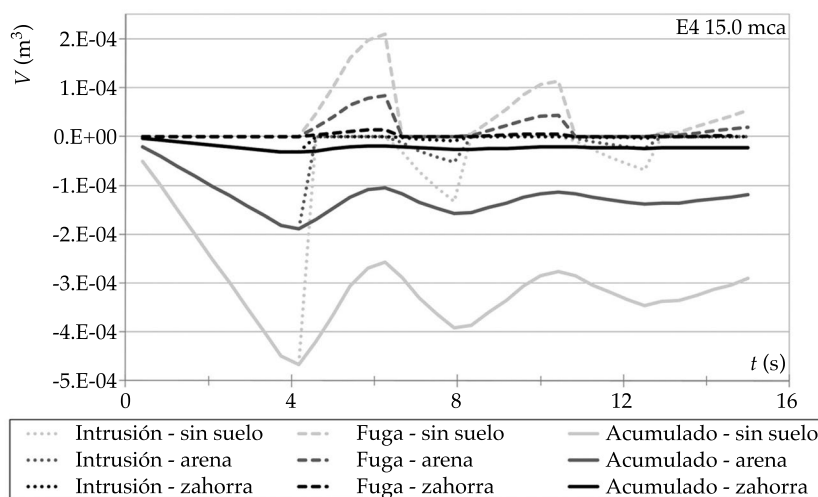


Figura 15. Volúmenes a través del fallo de 4 mm durante transitorios con suelos.

Cuadro 5. Volumen acumulado después del evento transitorio para los diversos suelos.

Escenario	Volumen de intrusión final (m^3)	Reducción (%)
E4-15 mca sin suelo	3.5×10^{-4}	-
E4-15 mca con arena	1.4×10^{-4}	60
E4-15 mca con zahorra	2.4×10^{-5}	93

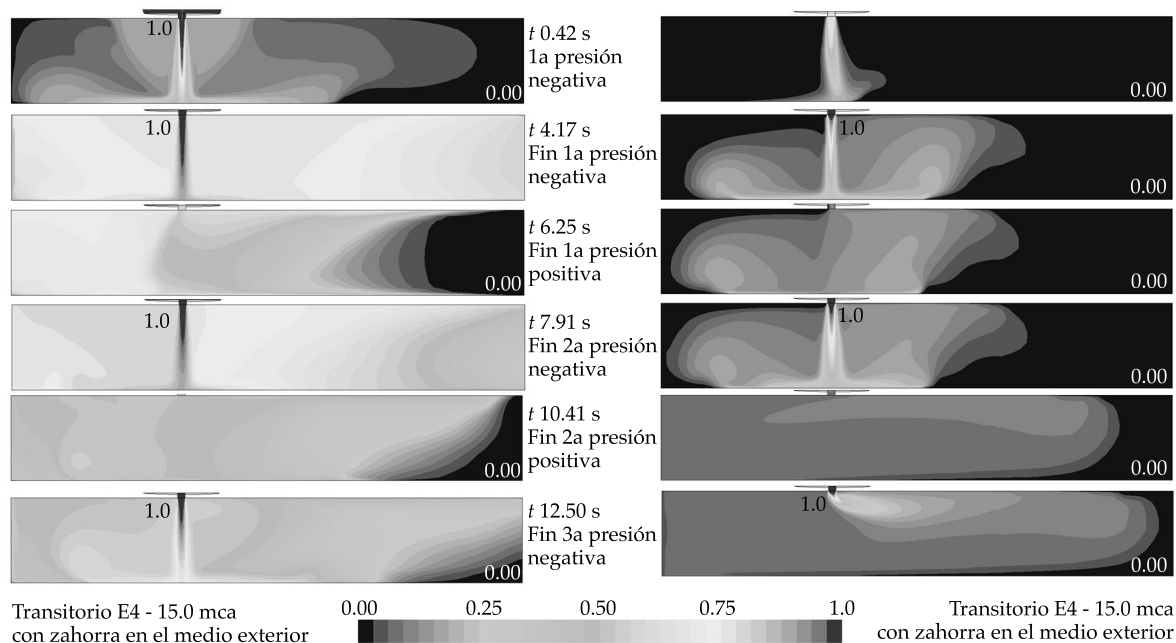


Figura 16. Trazador para los momentos de presión máximos y mínimos durante el transitorio, incluyendo suelos.

Discusión

Con la presente metodología se ha determinado una forma de cuantificar los volúmenes de intrusión que pueden generarse en diversas condiciones en el entorno del fallo. Se han obtenido los volúmenes de intrusión acumulados al final del evento transitorio, si se considerase una carga contaminante en el exterior, se puede entonces cuantificar el grado de contaminación debida al evento transitorio ligado a los fallos en conducciones y tomando en cuenta el medio exterior poroso. Fuentes de contaminación, como son los encharcamientos en zonas verdes en el entorno urbano y en zonas de riego aledañas a la ciudad, pueden

presentar concentraciones de bacterias en torno a 1.4×10^5 UFC/100 ml de salmonella (Kirmeyer et al., 2001; Mora, 2011). En este caso, para los volúmenes resultantes, la contaminación en la conducción de agua se muestra en el cuadro 6.

La carga microbiológica al final del transitorio es 15 veces menor cuando se tienen características del suelo como la zahorra propuesta, en comparación con el evento de intrusión sin suelo. Mientras que con la arena, la carga en el volumen final es de 2.5 veces respecto a la carga cuando no se presenta suelo. De forma general, el volumen de intrusión medio durante el tiempo transitorio puede presentarse en un amplio rango, dependiendo de las condiciones del suelo en el entorno a la

Cuadro 6. Contaminación durante transitorio del fallo de 4 mm con suelos.

Escenario	Volumen de intrusión (m ³)	Salmonella (UFC)
E4-15 mca sin suelo	3.5×10^{-4}	4.8×10^5
E4-15 mca con arena	1.4×10^{-4}	1.9×10^5
E4-15 mca con zahorra	2.4×10^{-5}	3.3×10^4

conducción y con ello la carga contaminante, por lo que es un factor que debe considerarse como primordial en esta línea de investigación.

Conclusiones

En el presente artículo se ha presentado un análisis físico y numérico de uno de los fenómenos que provoca la disminución de la calidad del agua potable debido al fenómeno de la intrusión patógena en redes de distribución del agua. El evento de intrusión patógena en el que se basa la presente investigación ocurre durante eventos transitorios, aunado a los fallos en las conducciones, lo cual puede dar lugar a una contaminación de carácter microbiano y causar enfermedades epidémicas; el análisis realizado de esta forma global es una novedad en el campo de la hidráulica urbana.

Se han aplicado una serie de técnicas, en las cuales se ha mostrado la intrusión en los casos más adversos en una conducción de agua, cuidando características esenciales de situaciones particulares de fallos, eventos extraordinarios en las conducciones y condiciones de los suelos en el entorno de las tuberías. Los escenarios físicos simulados se han reproducido de forma numérica, los modelos se han diseñado y validado, pudiéndose emplear en la construcción de escenarios donde la vulnerabilidad de la calidad del agua esté en riesgo en zonas del abastecimiento de agua.

Con el uso del modelo CFD se permite incluir condiciones hidrodinámicas en diferentes medios. En este sentido se ha validado el modelo y se conoce el rango en el cual se podrían ajustar los resultados con base en las condiciones numéricas planteadas. Con respecto al modelo numérico para medios porosos, se requiere de los parámetros particulares para cada tipo de suelo, los cuales se deben evaluar dependiendo de sus características físicas y de acomodo en campo. Se corroboró que este modelo para medios porosos es adecuado para este tipo de representaciones.

La consideración del tipo de fallo que sea análogo a una fuga de fácil detección presenta

consideraciones importantes tanto para la respuesta del transitorio en la zona del fallo como para el potencial de intrusión que pueda generarse durante los eventos transitorios en condiciones adversas de operación de la red.

Mediante esta metodología se tiene una alternativa para realizar una estimación de contaminación en las zonas vulnerables a eventos de intrusión a través de fallos en la red. Se han presentado escenarios en donde pueden compararse eventos con diversos escenarios relacionados con la analogía de un tipo específico de fuga y variando el medio poroso exterior. La problemática de los transitorios de presión se presenta cuando los picos mínimos de presión caen por debajo de la presión en el interior de la conducción en la zona del fallo. La vulnerabilidad dependerá de las concentraciones de las fuentes contaminantes que sean transportados hacia el interior de la instalación. A partir de ahí se deben plantear modelos en los cuales se analice la capacidad de actuación de los desinfectantes en el seno del agua.

Se ha considerado que el uso de las técnicas numéricas en las que se implican las bases de la mecánica de fluidos y de la hidráulica aplicadas en el entorno de la hidráulica urbana permiten aprovechar de mejor manera estos instrumentos, para una mayor comprensión de eventos y fenómenos que acontecen en los sistemas de abastecimiento de agua durante su operación. El objetivo de mostrar una forma de cuantificar la intrusión patógena en eventos complejos y de forma novedosa se ha logrado de manera satisfactoria, sembrando así la semilla que nos permita estimar estos volúmenes de intrusión en partes más complejas de las redes de distribución.

Recibido: 16/11/11
Aceptado: 07/09/12

Referencias

AWWARF. *Distribution System Security Primer for Water Utilities*. Project 2931. Denver, USA: HDR Research Project, 2005.

- BERGANT, A., TIJSELING, A., VÍTKOVSKÝ, J., COVAS, D., SIMPSON, A., and LAMBERT, M. Further investigation of parameters affecting water hammer wave attenuation, shape and timing part 1: mathematical tools. *Proceedings of the 11th International Meeting of the IAHR Work Group on the Behavior of Hydraulic Machinery under Steady Oscillatory Conditions*, Stuttgart, Germany, 2003, p. 12.
- CHAUDHRY, M.H. Applied Hydraulic Transients. *Litton Educational Publishing Inc.* New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1987.
- COLLINS, R., BESNER, M.C., BECK, S., KARNEY, B., and BOXALL, J. Intrusion modeling and the effect of ground water conditions. *Water Distribution System Analysis Conference*. Tucson, 2010.
- COVAS, D., RAMOS, H., YOUNG, A., and JON, D. Transient pressure in water pipe systems. *Edicao especial, special issue in pressure Recursos Hidricos*. APRH. Vol. 26, No. 2, 2005, pp. 69-79.
- FLUENT. *User's Guide, Fluent 6.2*©. Lebanon, USA: Fluent Inc., 2005.
- GUALTIERI, C., LÓPEZ, J.A., and MORA, R.J. A Comparison among turbulence modeling approaches in the simulation of a square dead zone. *Proceedings of the 33rd IAHR 2009 Congress-Water Engineering for a Sustainable Environment*, Vancouver, Canada, 2009.
- HUNTER, P.R., WAITE, M., and RONCHI, E. *Drinking water and infectious disease, establishing the links*. Boca Raton, USA: CRC Press, IWA Publishing, 2003.
- KARIM, M.R., ABBASZADEGAN, M., and LECHEVALLIER, M., Potential for pathogen intrusion during pressure transients. *Journal AWWA*. Vol. 95, No. 5, American Water Works Association, 2003, pp. 134-146.
- KIRMEYER, G.J., FRIEDMAN, M., MARTEL, K., HOWIE, D., LECHEVALIER, M., ABBASZADEGAN, M., KARIM, M., FUNK, J., and HARBOUR, J. *Pathogen intrusion into distribution systems*. Washington, D.C.: American Water Works Association Research Foundation (AWWARF), USA y United States Environmental Protection Agency. AWWA Research Foundation y la American Water Works Association, 2001.
- KRAUSE, P., BOYLE, D.P., and BÄSE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*. Vol. 5, 2005, pp. 89-97.
- LAMBERT, A. What do we know about pressure: Leakage relationships in distribution systems? *IWA Conference System Approach to Leakage Control and Water Distribution System Management*, Brno, República Checa, 2001.
- LAUNDER, B.E. and SPALDING, D.B. *Mathematical models of turbulence*. London: Academic Press, 1972.
- LE CHEVALLIER, M.W., GULLICK, R.W., KARIM, M.R., FRIEDMAN, M. and FUNK, J.E. The potential for health risks from intrusion of contaminants into the distribution systems from pressure transients. *Journal of Water and Health*. Vol. 1, No. 1. International Water Association, IWA Publishing, 2003, pp. 3-14.
- LÓPEZ, P.A., MORA, J.J., PÉREZ, R. y MARTÍNEZ, J. Modelación hidrodinámica del fenómeno de intrusión en tubería de abastecimiento. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. 23, núm. 4, 2008. pp. 103-110.
- MAY, J., Pressure dependent leakage. *World Water and Environmental Engineering*. Vol. 17, No. 8, October, 1994, p. 10.
- MCDONALD, I.F., EL-SAYED, M.S., MOW, K., and DULLIEN, F.A.L. Flow through porous media—the ergun equation revisited. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* Vol. 18, No. 3, 1979, pp. 199-208.
- McKENZIE, R., Development of a standardized approach to evaluate burst and background losses in water distribution systems in South Africa. *WRC Report No. TT 109/99*. Johannesburg, South Africa: South African Water Research Commission, 1999.
- MORA, R.J.J. *Modelación de la intrusión patógena a través de fallos y su implicación en la red de distribución de agua*. Tesis doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2011.
- MULTIPHYSICS 3.5 User's Guide. Stockholm: ComSol AB, 2008.
- PEDLEY, S., BARTRAM, J., REES, G., DUFOUR, A., COTRUVO, J.A. *Pathogenic mycobacteria in water: a guide to public health consequences, monitoring and management*. London: World Health Organization, International Water Association (IWA) Publishing, 2004.
- RAMALINGAM, D., LINGIREDDY, S., and WOOD, D.J. Using the WCM for transient modeling of water distribution networks. *Journal American Water Works Association (AWWA)*. Vol. 101, No. 2, 2009, pp. 75-89.
- RAMOS, H. *Simulation and control of hydrotransients at small hydroelectric power plants*. PhD thesis. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 1995.
- RAMOS, H., BORG, A., COVAS, D., and LOUREIRO, D. Surge damping analysis in pipe systems: modeling and experiments. *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 42, No. 4, 2004, pp. 413-425.
- RAMOS, H., BORG, A., BERGANT, A., COVAS, D., and ALMEIDA, A.B. Analysis of surge effects in pipe systems by air release/venting. *Edicao especial (special issue in pressure transients) da revista Recursos Hidricos*. APRH. Vol. 26, No. 2, 2005, pp. 45-55.
- SHIH, T.-H., LIOU, W.W., SHABBIR, A., YANG, Z., and ZHU, J. *A New Eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows -- model development and validation*. NASA TM 106721, 1994.
- STAR-CCM+ 3.04.009, *User's Guide, CD-Adapco*, 2008.
- VAN LIEVERLOO, J.H., MIRJAM-BLOKKER, E.J., and MEDEMA, G., *Contamination during distribution, microbial risk assessment: a scientific basis for managing drinking water safety from source to tap*. [en línea]. Microrisk, Holanda, marzo de 2003 [citado en abril de 2006]. *World Wide*

Web: http://www.microrisk.com/uploads/microrisk_distribution_assessment.pdf.

WIGGERT, D.C., HATFIELD, F.J., and STUCKENBRUCK, S. Analysis of liquid and structural transients by the method of characteristics. *Journal of Fluids Engineering*. ASME. Vol. 109, No. 2, 1987, pp. 161-165.

WILCOX, D.C. *Turbulence modeling for CFD*, DCW Industries, 2002.

WYLIE, E.B. and STREETER, V.L. *Fluid Transients in Systems*. New Jersey: Prentice Hall, 1993.

ZLOCZOWER, N. and CHARUV, K.K. *Control of transient induced contaminant leakage and infiltration by implementation of air valves*. Alexandria, USA: Water Environment Federation, Collection Systems, 2009.

Abstract

MORA-RODRÍGUEZ, J., RAMOS, H.M. & LÓPEZ-JIMÉNEZ, P.A. Pathogen intrusion events in drinking water distribution systems. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 3, July-August, 2013, pp. 5-25.

Pathogen intrusion is a phenomenon that occurs in drinking water distribution systems, resulting in decreased water quality within the network as a result of fluids (contaminants) around the piping that enter through depression-related defects. Under the least favorable conditions, contamination can cause epidemic diseases due to consumption of contaminated water. Therefore, knowledge about this phenomenon is of primary interest to the management of a network's operations since certain operations - albeit management actions or extraordinary events - can cause the intrusion of volumes of contaminants through physical failures in water distribution networks. This suggests the need to avoid this type of event to whatever extent possible. The objective of this work is to determine the volume of intrusion of contaminants that can be generated by specific events present in water distribution networks. Physical and numerical models were developed to obtain scenarios for intrusion through faults in lines during transient pressure events, considering a porous medium outside the failure area.

Keywords: pathogen intrusion, pipe failures, pressure transients, physical and CFD models.

Dirección institucional de los autores

Dr. Jesús Mora-Rodríguez

Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica
Universidad de Guanajuato
Av. Juárez 77, Centro
36000 Guanajuato, Guanajuato, MÉXICO
Teléfono: +52 (473) 1020 100, extensión 2272
Fax: +52 (473) 1020 100, extensión 2230
jesusmora@ugto.mx

Dra. Helena M. Ramos

Departamento de Ingeniería Civil
Centro de Estudios de Hidrosistemas
Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais 1049-001
Lisboa, PORTUGAL
Teléfono: +35 (121) 8418 151
Fax: +35 (121) 8418 150
hr@civil.ist.utl.pt

Dra. Amparo López-Jiménez

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Universidad Politécnica de Valencia
Av. Camino de Vera s/n
46020 Valencia, ESPAÑA
Teléfono: +34 (96) 3877 007, extensión 86106
Fax: +34 (96) 3877 981
palopez@gmmf.upv.es