

MODELACIÓN MEDIANTE CFD DE FUGAS EN TUBERÍAS DE REDES DE ABASTECIMIENTO

P. Amparo López Jiménez¹, Vicente Fuertes Miquel¹, Pedro L. Iglesias Rey¹, F. Javier Martínez Solano¹.

Resumen – Los sistemas de distribución de agua no son completamente estancos, sino que conviven con un cierto nivel de fugas. Estas fugas son producidas por causas diversas, entre otras por situaciones transitorias en las que la presión sube por encima de los niveles de resistencia de la estructura de tuberías. A su vez, estos mismos niveles de presión bajan a continuación y permiten la entrada de agentes contaminantes que se encuentran alrededor de la misma: otras fugas, alcantarillados, aljibes...etc, que se transportan y alteran los niveles de calidad del agua. En el presente artículo se desea representar los fenómenos acaecidos en una subida y bajada de presión mediante un modelo CFD (Computational Fluid Dynamics), que permitirá visualizar los campos de velocidades y presiones de forma simulada. De esta manera pueden compararse las expresiones teóricas de las magnitudes más representativas en el fenómeno de la fuga con los resultados de la modelación y visualizarse aspectos que no pueden ser medidos en los modelos físicos.

Abstract – Water distribution system are not completely watertight, but they presents losses throughout the network. These leaks are produced by transient situations in which pressure increases considerably, damaging mains. This levels can even rise to values lower than outer pressure, letting the entrance of pollutant intrusion agents: other leaks, sewerage systems, etc., changing the levels of water quality. In this article we will study the phenomena occurring during these changes of pressure levels by means of a CFD model (Computational Fluid Dynamics) to visualize the velocity and pressure fields. In this way, we can compare the theoretical expressions for the more representative aspects in modelization of leaks with the results provided by the modelization and we can visualize some aspects that can not be analyzed by any other methodology.

Palabras clave. Modelo CFD, fugas en redes de abastecimiento

Keywords: DFC Model, leaks in water distributions systems

¹ Universidad Politécnica de Valencia – Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente – Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos – Camino de Vera S/N – CP E46022 – Valencia (España) – Tel: (+34) 96 3879890 – Fax: (+34) 96 3877981 E-mail: palopez@gmmf.upv.es, vfuertes@gmmf.upv.es, piglesia@gmmf.upv.es, jmsolano@gmmf.upv.es.

INTRODUCCIÓN

En las redes de distribución de agua, todo el volumen de agua que entra, no coincide exactamente con la cantidad de agua suministrada a los usuarios. La relación entre esta agua que entra en la red y la consumida es lo que constituye el rendimiento hidráulico de la red. A este respecto, la bibliografía es profusa en estudios sobre los fenómenos de las fugas haciendo hincapié en las pérdidas volumétricas y de presión que van a suponer en la red y en fin, en la estanqueidad y estado de conservación de la misma (Fuentes et al, 2002, 2003), pero encontramos pocos estudios en los que se haga hincapié en simulaciones computacionales de los mismos, especialmente relacionando la fuga con el tema de la calidad del agua que acaece después del fenómeno de la misma.

Uno de los más recientes y reconocidos estudios del fenómeno lo proporciona May (1994) desarrolló la teoría FAVAD (*Fixed And Variable Area Discharge paths*) sobre los “trayectos de descarga de área fija y variable” y demostró que el área transversal de algunos tipos de fugas (agujeros, desgarros o roturas en tubos, juntas o accesorios) podría variar también con la presión, mientras la velocidad del flujo seguía variando con la raíz cuadrada de la presión. Esto puede dar lugar a diferentes tipos de fugas en las cuales la relación entre caudal y presión era $Q_f = K_f \Delta p^x$, donde x era un exponente que podría variar entre 0,5 y 2,5. En definitiva, se concluye que el caudal de fuga es función del material de la tubería y del tipo de defecto. Es, por lo tanto, conveniente establecer esta correlación de forma determinística según los casos, y observar las posibilidades que la modelación computacional proporciona a este respecto.

De esta misma forma: al igual que una rotura supone una posible salida del agua de la red y disminución del rendimiento hidráulico, como consecuencia de la bajada posterior de la presión, puede suponer una posible entrada de las sustancias circundantes a la fuga y la posible mezcla y transporte, representando así un problema de calidad del agua que posteriormente va a circular por el interior de la misma. Varios son los estudios considerando la misma (AWWA, 2001), incluso en nuestro propio país (Cabrera et al., 1999). De otro lado, el aspecto de detección de fugas está teniendo gran interés en este momento y la creciente evolución de la tecnología de detección de fugas (Eiswirth, 2001) y medición de la calidad, comienza a permitir realizar este tipo de correlaciones con datos de la medición en las propias redes.

Los niveles de calidad del agua que circula por las redes de abastecimiento dependen de dos circunstancias fundamentales: en primer lugar de la calidad del agua que sale de la planta de potabilización, en la que los niveles suelen estar controlados y, en la mayoría de casos en nuestro entorno desarrollado, dentro de unos niveles aceptables. Por otro lado, también va a depender de lo que ocurra con el agua en el tiempo en que se encuentra dentro de la red, tanto como consecuencia del estado de las tuberías (corrosión, biopelículas, deposición de sustancias transportadas...) como por las posibles entradas al suministro de elementos circundantes en la propia conducción (intrusión patógena y posterior transporte de los contaminantes en el medio fluido (López, 2001)). Este último aspecto debe ser el que marque la correlación entre calidad del agua y rendimiento hidráulico, puesto que cada vez que hay una rotura, es una potencial entrada de sustancias no deseadas en la red.

En este trabajo se desea estudiar el fenómeno de la fuga como consecuencia de una rotura de la red con unos ciertos niveles de presión utilizando un modelo computacional de la mecánica de fluidos (CFD) que represente el comportamiento hidrodinámico de lo que ocurre dentro de la red bajo estas circunstancias. Veamos en primer lugar la utilidad de estos modelos computacionales en el campo de la hidráulica aplicada.

LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS HIDRODINÁMICOS MEDIANTE CFDs.

El uso de programas de solución computacional de las ecuaciones de la mecánica de fluidos (CFD) para predecir flujos internos y externos ha crecido y crece de forma exponencial en la última década.

En los años 80 la solución de los problemas de flujo de mediante esta técnica era del dominio de eruditos en la materia con mucha experiencia. Sin embargo, la disponibilidad de estaciones de trabajo junto con el desarrollo de algoritmos eficientes para la resolución del sistema de ecuaciones resultante, ha acercado estas técnicas a los modeladores de todos los campos de aplicación. Esto favorece el desarrollo de paquetes informáticos completos que, junto a las facilidades de *pre-* y *post-* tratamiento de los resultados facilitan el uso de los mismos sin necesidad de ser muy docto en el conocimiento del problema interno. Es más, en la actualidad la aplicación del *CFD* para la resolución del problema hidrodinámico se comporta para el modelador casi como un sistema impermeable.

Los códigos que hay actualmente en el mercado son extraordinariamente potentes en lo que se refiere al tratamiento que se hace del flujo a presión, incorporando todos los posibles tratamientos de la turbulencia y condiciones de contorno. A pesar de ello, su uso y posterior paso a la realidad todavía requiere una serie de aptitudes por parte del modelador que no pueden ser desarrolladas por la máquina.

Los primeros códigos CFD desarrollados en la década de los 80 (ANSYS FLOTTRAN, por ejemplo) estaban definidos en elementos finitos, aunque tienen grandes limitaciones, especialmente en lo que al tratamiento del régimen transitorio y la lámina libre se refiere. Actualmente, el mercado está dominado por cuatro códigos comerciales: PHOENICS, FLUENT, FLOW3D y STAR-CD, todos ellos basados en el método de los volúmenes finitos.

Un código CFD puede ser definido como la herramienta para analizar sistemas en los que intervienen los fenómenos de la mecánica de fluidos mediante simulación computacional (Versterg y Malalasekera, 1998). En este sentido tan amplio todo el modelo que estamos presentando es un gran CFD, sin embargo, en nuestros días, este nombre está reservado a una serie de códigos cerrados que representan programas para soluciones de las ecuaciones del movimiento de fluidos.

La solución para un problema de flujo (velocidades, presiones, temperaturas), se calcula en los nodos dentro de la celda. La precisión del resultado depende de la propia definición de los nodos. En general, a mayor número de nodos, mayor precisión en los resultados, pero también mayores las necesidades en coste y tiempo de computación. Hay que encontrar un equilibrio entre ambos conceptos para estar en el punto óptimo de gestión de recursos.

La mayoría de las veces las mallas que proporcionan estos resultados óptimos no son uniformes: deben ser más finas en las regiones en las que se requiere mayor precisión y solo en esas, y ello lo permite el método de volúmenes finitos. Los sistemas más modernos realizan mallas que se autoafinan en las regiones en las que las magnitudes a estudiar tienen mayor variación y toman elementos más grandes en regiones en la que la variación es menos considerable. A su vez, los elementos no pueden tener geometrías cualesquiera, a pesar de que el código en volúmenes finitos (no así las diferencias finitas) puede trabajar con mallas no estructuradas. Los elementos no podrán ser especialmente amorfos: los ángulos de sus vértices y las relaciones longitudinales entre los lados son automáticamente refinados por el código mallador de manera que no podremos tener elementos excesivamente irregulares. Esto obligará a definir una gran cantidad de elementos cuando se quiera definir estructuras con una de sus dimensiones muy desarrollada.

La mayor parte del tiempo que se requiere para esta modelación se invierte en definir la malla, con las regiones definidas para la aplicación de las ecuaciones de contorno, que mejor representa la realidad del problema físico que se quiere modelar.

La casi totalidad de los paquetes CFD que han sobrevivido a estos veinte años de desarrollo solucionan las ecuaciones mediante el método de los volúmenes finitos y lo hacen en estas tres fases:

- Planteamiento formal de las ecuaciones de gobierno del flujo de fluidos sobre todos los volúmenes en que ha sido definida la malla.
- Discretización de estas ecuaciones, lo cual implica la sustitución de aproximaciones de diferencias finitas para los términos que están siendo integrados en el interior de los volúmenes de control. En este momento se tiene un sistema de ecuaciones algebraico.
- Solución de las ecuaciones algebraicas mediante un método iterativo.
- Tratamiento de los datos de salida mediante procesos de calibración y validación de las experiencias realizadas.

En estos casos, la metodología del modelador a la hora de resolver el problema hidrodinámico es la presentada en la Figura 1.

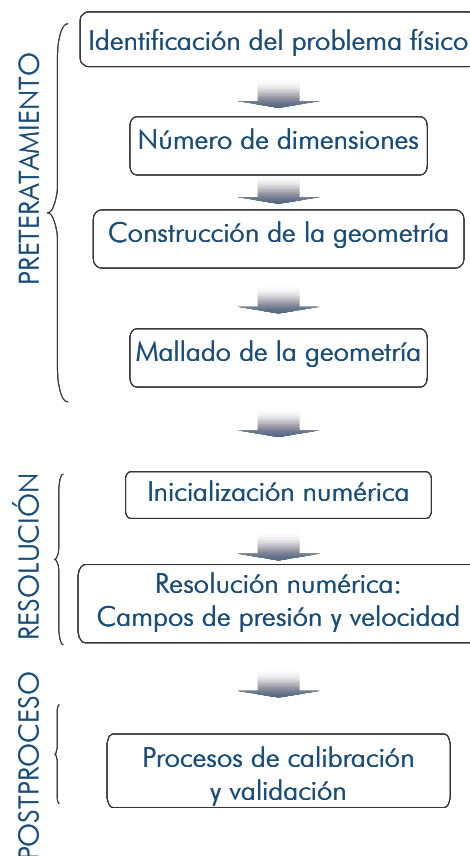


Figura 1. Metodología para el modelado con CFD.

MODELACIÓN DE LA FUGA EN UNA TUBERÍA.

El proceso acaecido en la rotura de una conducción va a ser representado en este caso mediante el código computacional FLUENT para estudiar los fenómenos hidrodinámicos que acompañan a la salida del agua como consecuencia de la variación de presión.

Es este un modelo en régimen permanente que utiliza un método numérico basado en la discretización del espacio mediante volúmenes finitos. El procedimiento consiste en dividir el espacio de integración en dominios discretos de volumen. En ellos, las caras de los volúmenes de control se posicionan a medio camino entre los nodos adyacentes. Así, cada nodo está rodeado de un volumen o celda.

El siguiente paso es la integración de las ecuaciones de gobierno en el volumen de control, uniendo una ecuación discretizada a cada nodo. Así, el flujo de una propiedad que deja el volumen por la superficie de salida de una celda, menos el que entra por la superficie de entrada es el que permanece en su interior. En realidad se resuelve una ecuación de balance de la propiedad en un volumen de control tan pequeño como se quiera, de manera que las magnitudes pueden considerarse con variaciones pequeñas, la mayoría de las veces, con una evolución lineal, transformando una ecuación integral en otra algebraica.

A continuación se realiza la resolución de las ecuaciones que han sido discretizadas en cada uno de los puntos nodales. Para los volúmenes de control adyacentes a los dominios de contorno, hay que incorporar las condiciones de contorno. El consiguiente sistema de ecuaciones deberá ser resuelto para obtener la distribución de la propiedad en todos los puntos definidos como nodos del dominio, mediante una solución que suele ser matricial. De esta manera vamos a conocer los campos de presiones y velocidades en régimen turbulento así como las magnitudes derivadas de la resolución de las ecuaciones.

Definición de la geometría y las condiciones de contorno.

Para la consideración de los efectos hidrodinámicos que ocurren alrededor de una situación en la que se ha producido una rotura en la tubería, se propone la geometría que se presenta en la Figura 2.

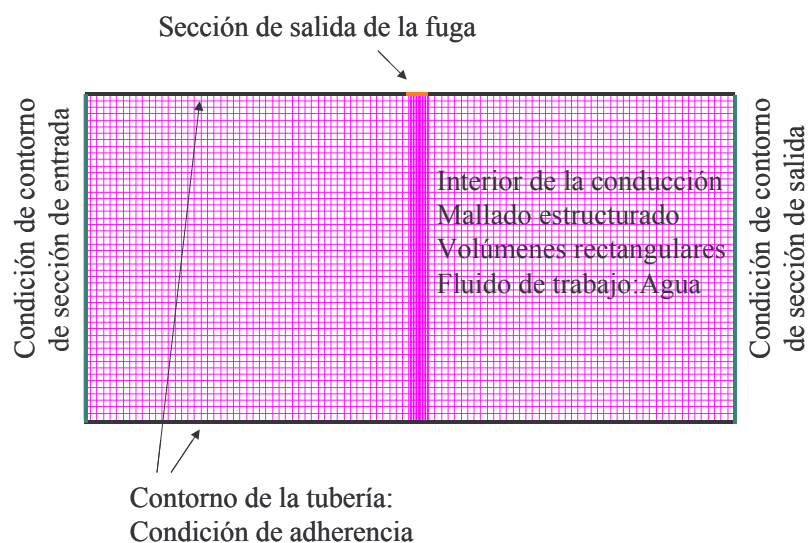


Figura 2. Discretización y mallado de la región de estudio

En este caso se trata de una simulación muy sencilla, bidimensional, en la que, modelando el flujo de agua en régimen turbulento, se espera conocer los niveles de presión, campos de velocidades y trayectorias que no pueden ser visualizadas de otra forma.

Se ha considerado lo que se llama una malla estructurada, con volúmenes finitos rectangulares para el análisis del problema numérico. Estas mallas son las más convenientes, sin embargo no todas las geometrías se adaptan bien a este tipo de mallado, en este caso es una malla muy adecuada y el problema encuentra convergencia matemática en régimen turbulento y permanente en un conjunto pequeño de iteraciones. Sin embargo, para el estudio detallado de la región de la fuga en cuestión, hay que afinar la malla en toda una región longitudinal, lo que aumenta considerablemente el número de nodos. Es el precio que hay que pagar en este tipo de mallados con análisis detallados mediante mallas estructuradas.

Resultados de la modelación.

Una vez han sido definidas las condiciones de contorno físicas y los materiales, tanto de la conducción como del fluido de trabajo, se inicializan las condiciones de contorno de presión y velocidad de manera que se fuerza el caudal de entrada y la presión en los puntos de contorno. De esta manera se obtienen los campos de presiones y velocidades que se muestran en la Figura 3 y las líneas de corriente y turbulencia que se presentan en la Figura 4.

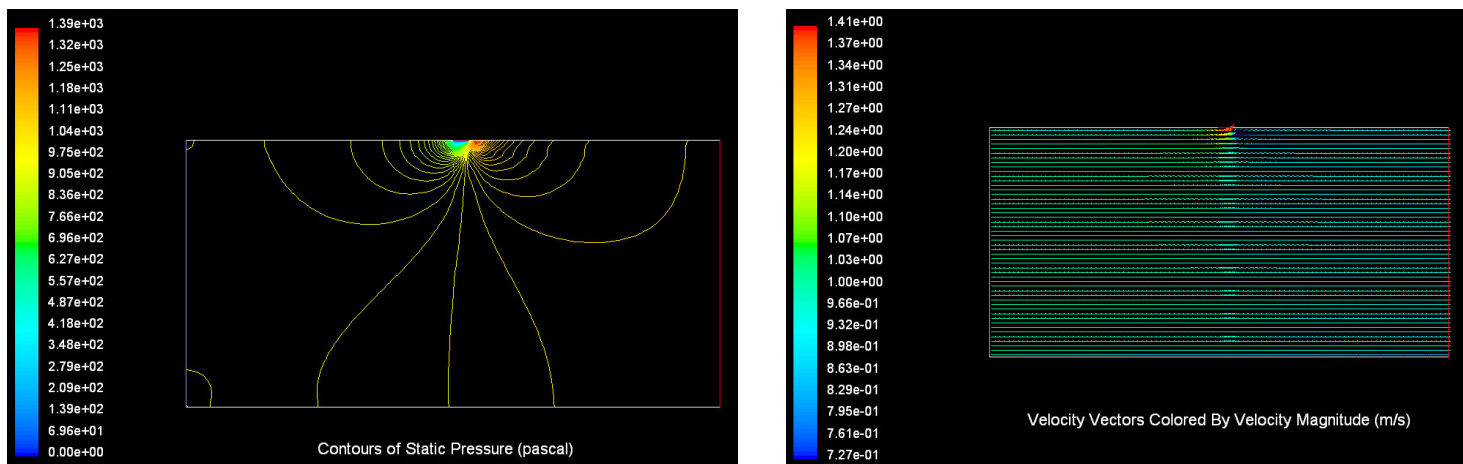


Figura 3. Campo de presiones y velocidades en el espacio de integración

En ella puede observarse el campo de velocidades que se genera a través de la fuga y la distorsión en el campo de presiones que genera la misma.

La caída de presión ocurre, por otro lado, justo en la zona cercana a la rotura, sin embargo, el efecto en el campo de presiones se traslada en menor medida a todo el conjunto del volumen de control que estará siendo considerado para la integración.

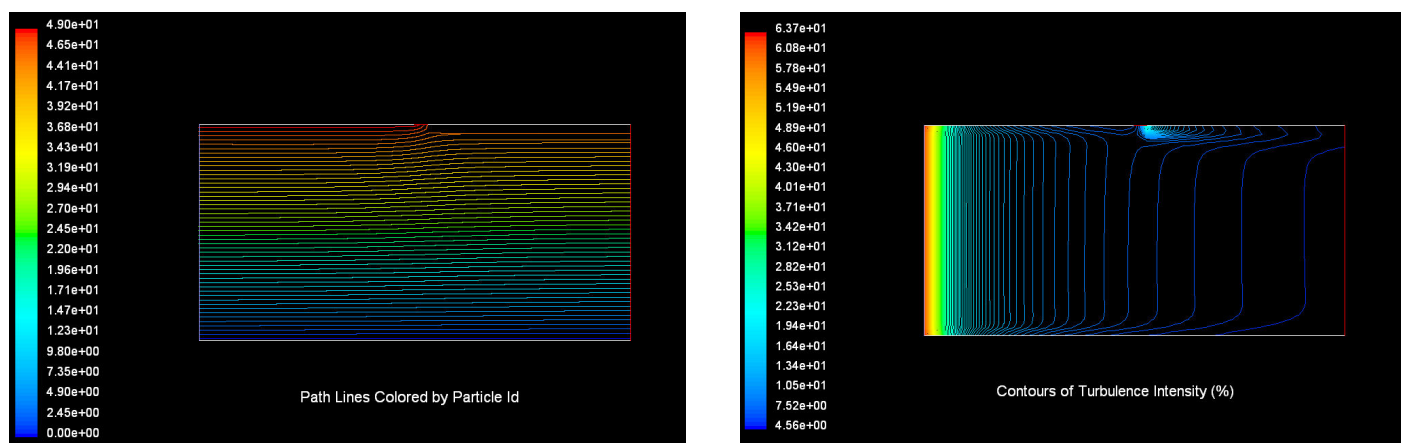


Figura 4. Líneas de corriente y turbulencia en el espacio de integración

Se puede visualizar en la Figura 4 las líneas de corriente y la distorsión de las mismas debida a la presencia de la fuga, así como la turbulencia que introduce en el medio la presencia de la misma. Estas magnitudes no pueden ser visualizadas mediante modelo físico alguno.

De esta manera, la relación entre la velocidad de salida por este orificio, y la diferencia de presión que se establece en el mismo viene a representarse en la Figura 5.

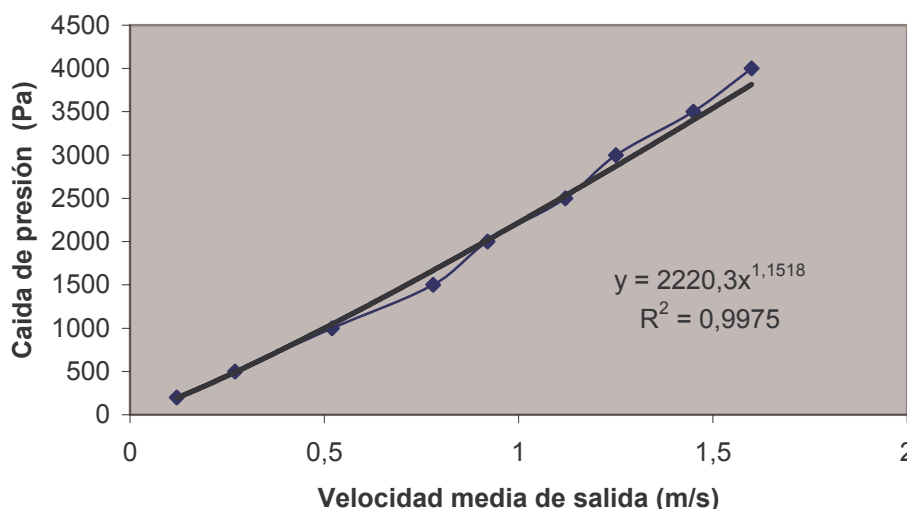


Figura 5. Ajuste de la velocidad de salida de fluido por la fuga en función de la caída de presión.

Observando la convergencia de la expresión para el ajuste con la propuesta por May (May, 1994) en el caso de este ajuste, resulta: $V = 2220,3 \Delta p^{1,1518}$, con el exponente completamente centrado en el intervalo propuesto y el coeficiente en un rango dependiente de las condiciones de contorno. El valor de ambos coeficientes (que, por otra parte presentan un buen ajuste, tal como muestra el índice R^2 que representa el error cuadrático medio), depende de la modelación específica de la rotura y la consideración de la misma por el modelo computacional.

MODELACIÓN DE FUGA EN UNA TUBERÍA CON CAÍDA DE PRESIÓN. INTRUSIÓN DE FLUIDO EXTERNO.

En este caso se considera una rotura en una tubería inmersa en el seno de otro fluido que se encuentra en reposo. Es de esperar en esta modelación que cuando se produzca una sobrepresión, como en el caso anteriormente considerado, aparezca una fuga en el sentido de una salida de caudal desde la tubería principal. Sin embargo, cuando se produzca una depresión, se espera que sea el fluido circundante el que se vea forzado a entrar en la conducción, considerando así un fenómeno de intrusión dentro del flujo de la misma.

Esta puede ser la consideración de una tubería en un terreno inundado o rodeada de fluido por otras causas. Para simplificar, se han variado las condiciones de contorno y se ha considerado solamente la región cercana a la rotura con un fluido de características similares al agua y completamente lleno de la misma en el instante inicial.

Definición de la geometría de trabajo

En este caso, la geometría de trabajo se ha ampliado como muestra la Figura 6 para observar lo que pasa también en la región circundante, en la que se va a ver generado un campo de velocidades en lo que inicialmente es reposo como consecuencia de la existencia de la rotura.

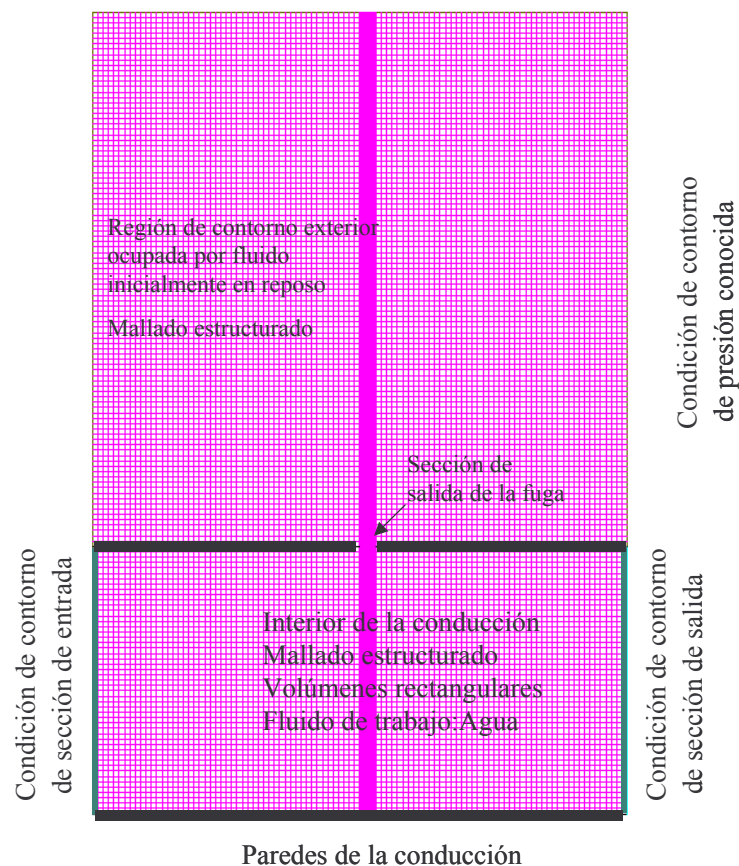


Figura 6. Geometría para el caso de estudio de fuga con intrusión

La necesidad de una malla estructurada hace que la consideración de un mallado más fino alrededor de la fuga haga aparecer gran cantidad de nudos que, por otra parte, con las actuales capacidades computacionales, no suponen gran problema para el modelado y sí ayudan en gran manera a visualizar y calcular con detalle lo que ocurre en la región de interés.

Resultados de la modelación.

En este caso, se ha modelado una variación de presión desde rangos positivos hasta rangos simétricamente negativos. Esto puede darse en la realidad, por ejemplo en una situación transitoria debida a un arranque de bomba o cierre rápido de válvula, que ocurre con normalidad en nuestras redes. Así, pues, se ha modelado un amplio rango de presiones y se muestran a continuación, en las Figuras 7 y 8.

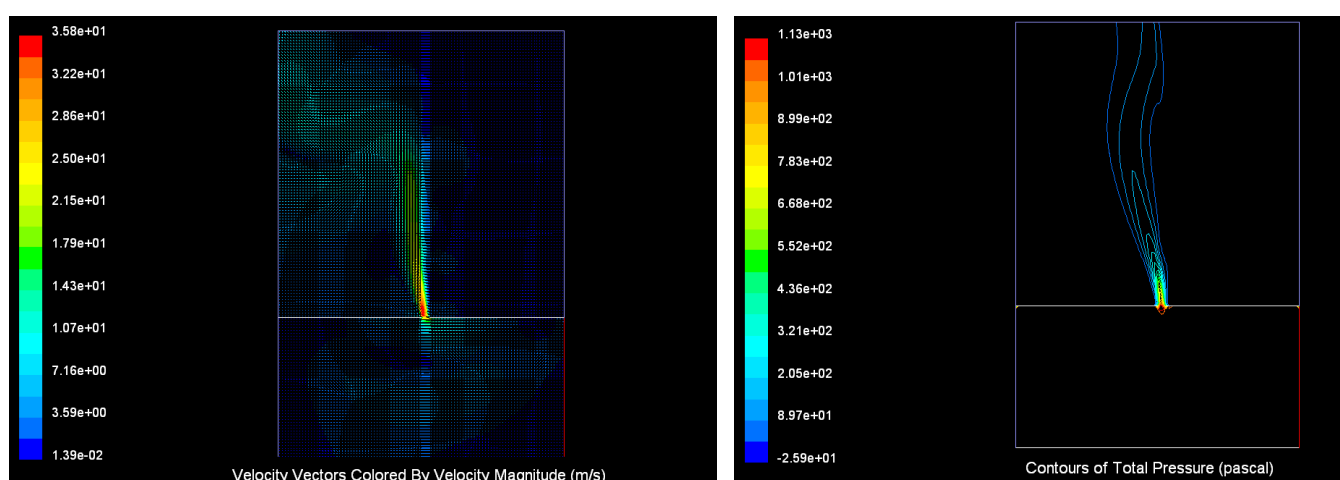


Figura 7. Campo de velocidades y presiones cuando la presión en la conducción es mayor que en el exterior. Salida de caudal.

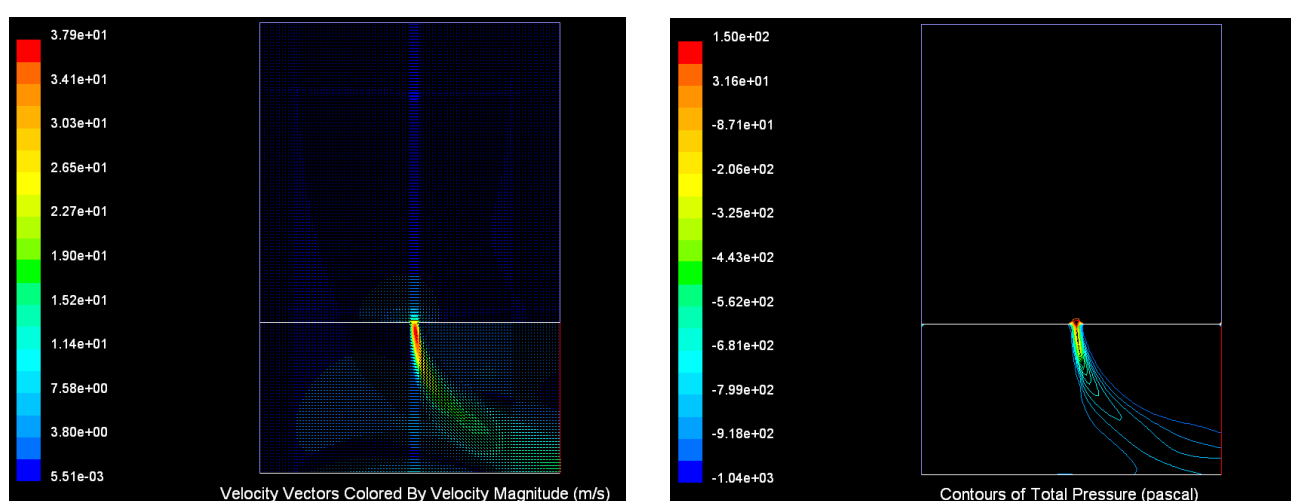


Figura 8. Campo de velocidades y presiones cuando la presión en la conducción es menor que en el exterior. Entrada de caudal. Intrusión.

En estas figuras pueden observarse los resultados más representativos de esta modelación en cuanto a los campos de presiones y velocidades en cada caso. Por un lado, cuando la presión dentro de la conducción es mayor que en el fluido exterior, de forma que hay una salida del agua limpia por la rotura. Por otro lado cuando la presión es menor que en el exterior, en cuyo caso va a ocurrir una entrada de fluido desde el exterior, originándose una intrusión que contaminará el agua circulante, produciendo una alteración en las condiciones de calidad del agua suministrada a partir de este momento.

Podemos observar el caudal, o la velocidad que se habrá generado a través de la superficie de la rotura en estas condiciones de variación de presión. Esta es la que se muestra en la Figura 9.

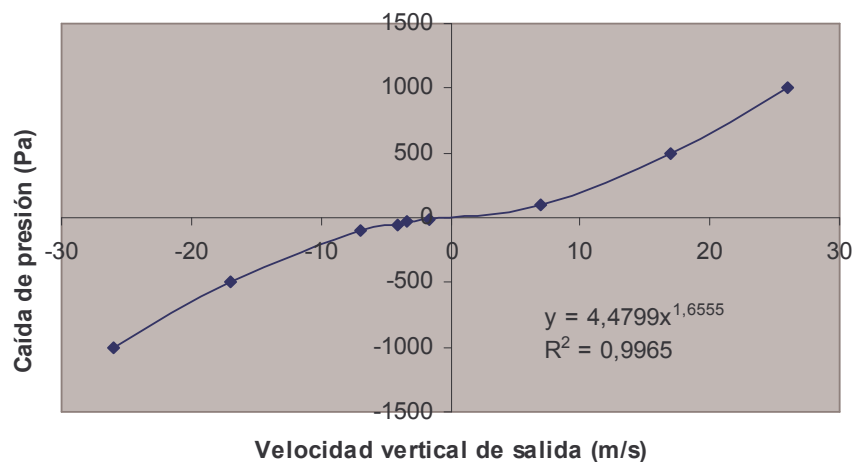


Figura 9. Velocidad de paso por la fuga en diferentes condiciones de presión.

Como puede observarse en esta figura, el caudal que entra o sale por la rotura puede interpolarse de la misma forma que la propuesta por May (1994), en este caso, con otras condiciones de contorno, se ajusta a una expresión distinta.

Sin embargo, hay en este caso algunos aspectos a tener en cuenta en cuanto a los resultados de la modelación. En primer lugar, esta modelación ha sido realizada en régimen permanente. Cada una de las situaciones de presión se considera de forma independiente, sin tener en cuenta estados anteriores. Si la consideración hubiera sido en régimen transitorio, es posible que los campos de velocidades se vieran afectados por la consideración numérica de estados anteriores.

De otro lado, de la observación de los resultados de la modelación y debido a la consideración de las condiciones de contorno concretas, la forma de la velocidad del flujo a través de la superficie de la fuga resulta simétrica para caídas de presión positivas o negativa. Esto puede ser debido a dos razones: por un lado a la representación bidimensional del problema que no tiene en cuenta la consideración de la forma tridimensional de la superficie de salida de la región de rotura (al haber bidimensionalizado el problema se ha ganado simplificación pero se pierde precisión en este sentido). De otro lado, por la característica propia del programa de simulación, no puede tenerse en cuenta el hecho del coeficiente de

descarga particular del orificio que va a ser la región de rotura y que es probable que no sea simétrico en una dirección o en otra de salida del caudal. Con estas salvedades, los resultados de la modelación no dejan de ser la única manera de visualizar los campos más representativos de la hidrodinámica del problema que va a surgir alrededor de la rotura en diversas condiciones de funcionamiento.

CONCLUSIONES

Se ha presentado en esta comunicación, los resultados y pormenores de la modelación matemática de los fenómenos hidrodinámicos que ocurren alrededor de una rotura en una conducción. Para ello se ha utilizado un software comercial del tipo CFD que permite el cálculo y visualización de los campos de presiones y velocidades que resultan de la resolución numérica de las ecuaciones de conservación de la masa y cantidad de movimiento en volúmenes de control definidos. De esta manera, puede conocerse mediante la modelación computacional, la cantidad de fluido que irá a salir por la fuga o a entrar por la misma cuando las condiciones de presión bajen.

Esta modelación computacional es la única manera de visualizar los campos de velocidades y presiones, así como las líneas de corriente y magnitudes derivadas de la turbulencia que ocurren en el movimiento de los fluidos. Sin embargo, como consecuencia de las simplificaciones realizadas para el análisis numérico, se pierde precisión en la modelación. Aun así, los resultados del ajuste de las pérdidas de carga con respecto al caudal de entrada o salida por la fuga, concuerdan con los resultados predichos en la bibliografía y serán más precisos, en tanto la sección de la región de rotura sea conocida. Esto no puede ser representado mediante un análisis bidimensional como el aquí descrito y nos hace concluir que debe realizarse un estudio tridimensional si desea conocerse este ajuste con precisión.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo ha sido posible gracias al Ministerio de Ciencia y Tecnología de España, quien ha financiado el proyecto de investigación nº DPI2003-02676, titulado *MAGIAS: Desarrollo de una herramienta para modelación de sistemas de abastecimiento de agua utilizando sistemas de información geográfica y algoritmos genéticos*.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AWWA (2001), *Pathogen intrusion into the distribution system*, American Water Works Association, Denver, Colorado, USA.
- Cabrera, E., Espert, V., López, P.A. (1999), “*Water supply systems in drought periods. The case of Spain*”, Drought management planning in water supply systems, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda, pág. 1-21.
- Eiswirth, M.; Burn, L.S. (2001) *New Methods for Defect Diagnosis of Water Pipelines*. 4. Int. Con. On Water Pipelines Systems, 28-30 March. York, UK.

- Fuertes, V.S., García-Serra, J., Iglesias, P.L., López, G., Martínez, F.J., Pérez, R. (Ed.) (2002), *Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua*, Grupo Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Fuertes, V.S., Iglesias, P.L., Izquierdo, J., López, P.A., López, G., Martínez, F.J., Pérez, R. (Ed.) (2003), *Ingeniería hidráulica en los abastecimientos de agua*, Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- May, J. (1994), "*Pressure-dependent leakage*", World Water and Environmental Engineering, Octubre 1994.
- López, Jiménez, P.A. (2001). "*Metodología para la calibración de modelos matemáticos de dispersión de contaminantes incluyendo regímenes no permanente*". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Versteeg, H.K., Malasekera, W. (1998). An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Ed. Longman. Essex UK.