

ANÁLISIS DE SEGURIDAD EN ABASTECIMIENTOS Y SU APLICACIÓN A LA DETECCIÓN DE FUGAS

Petra A. López ¹, Antonio F. Vela ², Pedro L. Iglesias ¹

¹ Unidad Docente Mecánica de Fluidos.
Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
Universidad Politécnica de Valencia.

² Departamento de Tecnología. Universitat Jaume I. Castellón.

RESUMEN: La fiabilidad del sistema hidráulico es un tema de capital importancia en la situación actual donde la sociedad cada vez es más exigente, la tecnología debe adaptarse a las necesidades y el ahorro adquiere mayor interés.

En la línea de mejorar la calidad de todo cuanto nos rodea, este artículo pretende introducir al lector en los conceptos de fiabilidad y calidad de servicio a la vez que presenta un estudio del defecto más usual en las redes urbanas que es la fuga. Se presenta un estudio general de los conceptos que conciernen a la fiabilidad y seguridad del servicio ilustrándolo con ejemplos aplicados a nivel teórico y práctico, demostrando la conveniencia de una buena monitorización y una medición en régimen nocturno para la rápida detección del defecto, como complemento a las técnicas de auscultación.

El interés de la detección y localización rápida de la fuga es notable y en este artículo se presenta un análisis de presión y caudal como parámetros indicadores de la magnitud y localización del defecto tanto desde un punto de vista teórico, (modelización analítica); como experimental, en la red del Panel Hidráulico situado en el laboratorio de la U. D. Mecánica de Fluidos.

INTRODUCCIÓN

El agua es un bien escaso y tiene un gran valor. En particular la que va a ser utilizada para suministro urbano lleva un valor añadido considerable debido tanto al gasto energético, como al del tratamiento químico que la hace útil para los diferentes usos requeridos de ella, humanos e industriales.

En nuestro país son muchos los sistemas de distribución de agua que no cumplen los estándares de calidad que cabe exigir a un moderno abastecimiento: las redes son insuficientes, los niveles de presión no alcanzan los valores adecuados, el agua no contabilizada (bien sea por falta de medición, bien debido a las fugas), representa porcentajes importantes, los tiempos de residencia no están adecuadamente controlados fundamentalmente

Artículo recibido el **15 de febrero 1995** y aceptado para su publicación el **5 de septiembre de 1995**. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

debido a los depósitos domiciliarios o aljibes, etc. Sin duda, la modernización de nuestros abastecimientos es una de las principales asignaturas pendientes que tiene España en lo que a infraestructuras urbanas se refiere.

El presente artículo se enmarca en un nivel superior al detallado en el párrafo precedente. Damos por hecho que el abastecimiento cumple los estándares de calidad y nos preocupamos por el mantenimiento en el tiempo de los mismos, por su fiabilidad. De hecho, sistemas hidráulicos que funcionan correctamente están expuestos a fallos que pueden suponer una interrupción de suministro en zonas de alta densidad de población durante horas. Sin embargo, en nuestro país, la cuantificación de los niveles de calidad y seguridad del servicio y el estudio último de la naturaleza del fallo del sistema hidráulico están poco desarrollados. Las cada vez más frecuentes interrupciones del servicio de suministro de aguas, sobre todo en ciudades del Sur de España dan, si cabe, mayor actualidad al tema.

Este estudio de seguridad tiene su origen principalmente en las centrales hidroeléctricas y en las presas, sistemas que entrañan altos riesgos, no ya porque la probabilidad de ocurrencia de fallos sea alta sino por la importancia del daño que se puede generar. El estudio de fiabilidad en estos sistemas se ha centrado sobre todo en la correcta regulación apoyado en la instalación de elementos de control, (Wayne, 1989).

La aplicación de estos estudios a redes urbanas es muy reciente y son pocas las investigaciones llevadas a cabo en nuestro país, a pesar de que es uno de los que más se ve afectado por fallos en situaciones críticas, hecho reconocido por los expertos y mostrado en numerosas publicaciones en las que se hace especial hincapié en la naturaleza del fallo y su repercusión en el funcionamiento del conjunto de la red, así como los posibles modos de cuantificación de la fiabilidad del sistema. Se han desarrollado estudios completos de análisis de riesgos, considerando árboles de fallo del sistema hidráulico conjunto, mediante las teorías de microflujos y análisis por grafos, etc (Mays ,1989, Jowitt, 1995, O'Connor, 1991) incluso enfocado hacia la fiabilidad de la propia maquinaria y accesorios hidráulicos, (Heinz y Geitner, 1992, Tullis 1995).

La cuantificación de la seguridad de un sistema concreto es difícil y en el momento actual se acaba llegando a la conclusión de que no hay una medida para el análisis de fiabilidad de redes de distribución que reúna una interpretación global de la fiabilidad y una simplicidad desde el punto de vista del cálculo, aunque con el uso de los potentes ordenadores actuales se empieza a reducir el problema (Goulter, 1995). La cuantificación de los riesgos que entraña un fallo pasa por una consideración

caso-por-caso y observando el fallo de un solo componente cada vez (Goulter, 1995) o sucesos cuya dependencia sea marcadamente conocida. La mayoría de las veces la decisión de las combinaciones de fallos que pueden tener simultaneidad y los riesgos que estos fallos entrañan, se basan en la experiencia del diseñador, quizás guiado por normas o reglamentos municipales (Goulter, 1995, Creus, 1991).

Siempre una mejora de la calidad del servicio conlleva un gasto económico que debe ser, en cualquier caso, justificable respecto al beneficio que supone, y ello determina un proceso de optimización de estrategias absolutamente necesario para la eficacia de las medidas aplicadas (Ben Chie y Kung Tung ,1991, Vela, 1995, López, 1994). En cualquier caso siempre debemos estar cumpliendo de unos mínimos de calidad no sujetos a restricciones económicas.

FIABILIDAD, RIESGO Y SEGURIDAD

La fiabilidad se define como la probabilidad de que la capacidad del sistema sea igual o superior a los requerimientos que de él se solicitan. A su vez, la seguridad de suministro de un servicio es el producto de la garantía (probabilidad de que funcione aceptablemente cubriendo adecuadamente las necesidades de los potenciales usuarios) multiplicado por el valor del beneficio económico-social aportado y por la duración del suministro ininterrumpido (Vela,1995).

Definimos el riesgo como una medida combinada de la probabilidad de ocurrencia y de las consecuencias de un suceso-fallo (riesgo y seguridad son conceptos complementarios), proponiendo como expresión analítica:

$$dR = P(t)D(t)dt. \quad (1)$$

donde:

P (t) representa la probabilidad de fallo

D (t) representa la cuantificación de las consecuencias perjudiciales o daños.

dR es el riesgo diferencial que representa un fallo de las características estudiado para este diferencial de tiempo.

El riesgo total será la suma a lo largo del tiempo en el que el sistema en su conjunto se encuentre en exposición al fallo (T_{exp}), esto es: que en el caso más simple en que probabilidad como

$$R = \int_0^{T_{exp}} P(t)D(t)dt \quad (2)$$

a daño sean independientes del tiempo, se convierte en:

$$R = P.D.T_{exp} \quad (3)$$

Entre riesgo y fiabilidad se puede establecer la siguiente relación (Vela, 1995):

$$\begin{aligned} \text{Riesgo} &= (1 - \text{Fiabilidad}) \times \text{daño} \times \text{duración} \\ R &= (1 - F) \times D \times T \end{aligned} \quad (4)$$

Así un sistema será tanto más seguro y dará mejor calidad de servicio cuantos menos riesgos asuma.

Frente a una concepción tradicional de los casos posibles en los que se puede encontrar el sistema con los esquemas clásicos de Markov (solo son posibles los estados correcto y fallo), con consideración de Monte-Carlo para la estimación de la probabilidad de paso de un estado a otro, (Bao y May s, 1990), se propone que los estados posibles en los que se puede encontrar el sistema se pueden desglosar en el esquema representado en la Figura 1 (López, 1994) en el que el estado no correcto se descompone en las lases en las que se supone que puede hallarse.

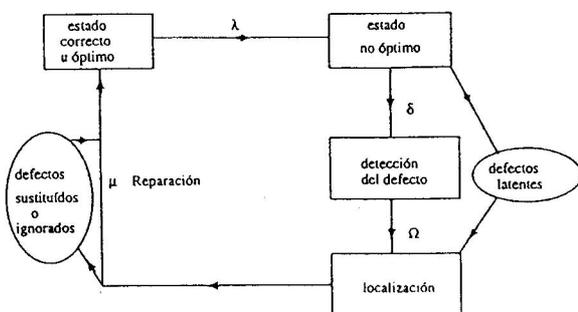
Para ejemplificar lo expuesto, supongamos que en una tubería de un suministro urbano se produce un fallo y aparece una rotura que provoca una fuga. El sistema que se encontraba cumpliendo perfectamente con sus estándares de calidad y en su estado óptimo, deja de hacerlo, por lo que pasa a un estado de fallo. Mientras no da señales de ello no se procede a su detección, por lo que transcurre un cierto tiempo hasta que se observa una señal que indica que el sistema es defectuoso, por ejemplo, una disminución en el conjunto de las presiones del sistema circundante. Se procede entonces a su localización en el conjunto de la red, lo que se acelerará si la red está debidamente sectorizada y cuando la fuga se localiza se repara la misma, tras haber aislado debidamente el sector que corresponda, restituyendo el conjunto de nuevo al estado óptimo.

Es importante este concepto de estado óptimo puesto que va a determinar si el sistema está en correcto funcionamiento o no. El estado óptimo está marcado por un intervalo de valores limitados por unos umbrales estándares referidos a calidad de suministro, interrupción de servicio, calidad del agua, tiempo de respuesta del sistema, etc (Wagner et al, 1988), dentro de los cuales es deseable que se encuentre el sistema hidráulico que se está considerando.

De acuerdo con 2) y 4) el riesgo, y en definitiva la fiabilidad, dependen de tres parámetros: tiempo de exposición, daño y probabilidad de fallo. Términos que se analizan seguidamente.

-Tiempo de exposición. Es el período en que, debido a un fallo, el sistema ha perdido alguno de los estándares de calidad que definen el estado óptimo. De acuerdo con la Figura 1 es la suma de los tiempos invertidos en detectar: T_{det} , localizar: T_{loc} , y reparar: T_{rep} ; esto es:

$$T_{exp} = T_{det} + T_{loc} + T_{rep} \quad (5)$$



λ = Probabilidad de que un defecto haga salirse del estado óptimo a un sistema.

δ = Probabilidad de que un defecto presente en un sistema se detecte.

Ω = Probabilidad de que un defecto detectado se localice.

μ = Probabilidad de que un defecto localizado se repare satisfactoriamente, restableciéndose el óptimo.

-Daño: Cuantificación en cada caso de los efectos que el accidente tiene en el sistema. Se pueden considerar varios órdenes del daño:

Daños a primeros. Se refiere a la propia empresa suministradora y concesionaria del sistema hidráulico a presión. Un ejemplo de este tipo sería el caso de una red funcionando de manera correcta y cierto accidente hace que se produzca una fuga en un punto que no llega a ser detectada por los sistemas que tenemos

Figura 1. Los estados posibles del sistema.

para ello. La fuga es de pequeñas dimensiones de manera que la única repercusión en el sistema es la disminución parcial de las presiones, sin llegar a dejar sin suministro a ningún usuario. El perjuicio en este caso es únicamente de la empresa distribuidora, que inyecta agua en la red que después no va a poder facturar.

Daños a segundos. En este caso, la repercusión del accidente llega a afectar a los usuarios del sistema que sufren el incorrecto suministro. Pueden darse dos situaciones:

-El accidente conlleva interrupción completa del suministro normal.

-El accidente conlleva interrupción parcial del suministro, de forma que existe un servicio pero de manera defectuosa.

El daño a segundos puede ser muy variado y es el más difícil de cuantificar. Puesto que un mismo accidente, puede causar efectos muy diferentes dependiendo del tipo de usuario abastecido. De hecho, no es lo mismo una interrupción que afecte a un hospital que a unos grandes almacenes o que a unas piscinas municipales. Podemos tener sistemas idénticos con averías análogas y daños completamente distintos.

Daños a terceros. Se refieren a las consecuencias que causa el daño a personas o cosas completamente ajenas al sistema de abastecimiento.

En esta línea podría estar una rotura de una tubería a presión en un sistema urbano que provoca la inundación de una zanja en la que se están instalando unas líneas de suministro eléctrico y se producen daños a la empresa suministradora de electricidad y a los usuarios del sistema eléctrico que deja sin servicio

-Probabilidad de permanencia en cada uno de los estados incorrectos: análisis mediante métodos probabilísticos de árboles de fallo, microflujos, etc (Mays, 1989, Goulter, 1995). Para conocer la probabilidad de ocurrencia de los fallos más comunes, habrá que analizar caso-por-caso y utilizar valores recopilados mediante series temporales o bancos de datos de probabilidades (Goulter, 1995), Creus 1991).

EL FALLO

La aplicación de estos conceptos a la ocurrencia de un fallo ilustrará la estimación de 1 riesgo que entraña un caso de los que pueden darse en un abastecimiento. El estudio de la propia naturaleza del fallo es una herramienta útil para la actuar sobre la seguridad y calidad del servicio y es de gran importancia (Goulter, 1995), porque nos hace conocer la causa del defecto incluso antes de que éste se produzca.

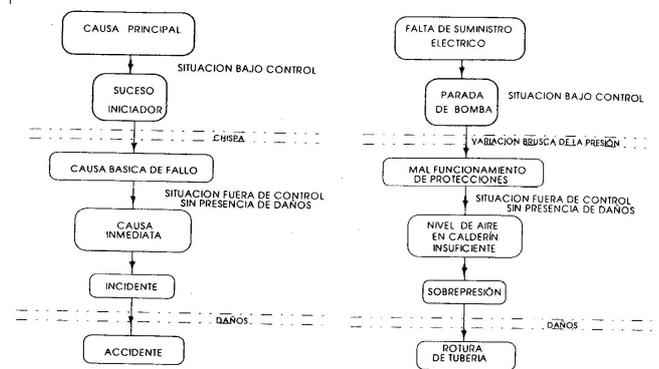


Figura 2. La cadena de fallo.

La Figura 2 muestra la secuencia de acontecimientos que acompañan a la ocurrencia del defecto y lo particulariza en un fallo concreto como es la rotura de una importante tubería de aducción (López, 1994).

Puede hacerse una estimación del riesgo que conlleva este suceso concreto recurriendo a los parámetros que estamos definiendo.

-*El tiempo* al que puede estar sometido el defecto, si la aducción es importante y tiene un control continuo de presión y caudal, se compondrá de un corto tiempo de detección y localización (supongamos instantáneo) y de un tiempo de reparación de aproximadamente 6 horas.

-*El daño* que puede causar este fallo al sistema de abastecimiento puede desglosarse en los siguientes términos:

-daño a primeros, que puede ser la sustitución del calderín que ha dejado de funcionar correc-

tamente como causa del fallo y del tramo de tubería en que se ha producido la rotura. Si la tubería es una aducción principal, este daño puede estimarse en 750.000 pesetas/rotura (gastos que en este caso serán fijos y no dependerán del tiempo de exposición). El gasto de la mano de obra de instalación y la maquinaria para la construcción de la zanja podemos cifrarlo en 80.000 ptas/hora, dependiendo del número de hombres que se necesiten y el momento del día en que ocurra.

-daño a segundos que en este caso puede ser el valor del agua que se pierde, suponiendo un caudal medio de un abastecimiento medio, de 100 l/s a 50 ptas/m³ se hace la estimación de 18.000 ptas/rotura/hora de exposición.

-La probabilidad de ocurrencia, para tuberías de diámetros importantes se puede estimar en 0.3 roturas/Km /año (Vela, 1995).

En este caso, y con una tubería de 10 Km, el riesgo anual será aproximadamente de 1.600.000 ptas. De la observación de este esquema, se puede inferir que una actuación preventiva, como la observación periódica del nivel de aire del calderín o la correcta formación del operario, puede actuar sobre el accidente de manera más eficiente que una reparación a posteriori, correctiva, cuando los daños ya han aparecido. A su vez, observamos que una investigación en los estados primeros del fallo, en el período de detección y localización, siempre lleva a unos niveles de calidad del suministro mejores, puesto que se disminuye el tiempo de exposición al fallo y el consumidor está mejor servido durante más tiempo, incluso con gastos económicos menores.

Del estudio de este ejemplo y de la observación de los sistemas de abastecimiento actuales, un estudio de los defectos caso-por-caso demuestra que el fallo más usual es la fuga. Autores como Goulter, 1995, Jowitt, 1995 y otros, plantean que éste, junto con el fallo de origen humano (Creus, 1991) son los fallos que producen más pérdidas en el sistema.

La fuga siempre implica una disminución de rendimiento volumétrico del sistema por cuanto supone un aumento del volumen perdido o no controlado junto con una disminución de presión en todos los puntos del sector de la red en la que se encuentra el defecto. A su vez, la combinación de la disminución de ambos parámetros (presión y caudal) siempre supone un decrecimiento de rendimiento puesto que para mantener el mismo nivel se debe suministrar más caudal y más presión con lo que el rendimiento energético disminuye más rápidamente

incluso que el volumétrico.

Esta disminución de rendimiento y Habilidad del sistema (por la ocurrencia del fallo), trae como consecuencia última la disminución en la calidad del servicio que va a observar el usuario por lo que tiene un gran interés estudiar cómo las fugas, fallo más común, afectan al suministro con el objeto de establecer conclusiones que sirvan para mejorar esta calidad.

A continuación se exponen algunos estudios enfocados a conocer el comportamiento del sistema con la presencia de fugas, en tuberías simples o en redes maleadas, tanto a partir de modelos de simulación teóricos, como tomando medidas en una red experimental real.

ESTUDIO DEL FALLO.

Según se ve, la mejor vía para aumentar la Habilidad en los abastecimientos es tratar de detectar el fallo en su mismo origen, en consecuencia, el análisis de la sensibilidad de los parámetros hidráulicos con la presencia del fallo presenta un notable interés.

Análisis de fuga en tubería simple.

De hecho se puede conocer, de forma teórica y para una tubería en general, cómo se verá afectada la presión en sus extremos como consecuencia de una fuga. Consideremos un tramo de conducción equivalente entre dos nudos 1 y 2 cualesquiera, Figura 3.

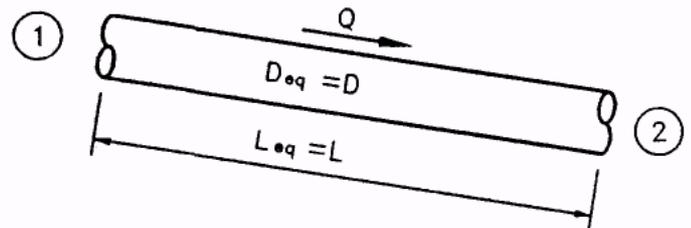


Figura 3. Tramo de conducción de una red.

La pérdida de carga h_{f12} (de acuerdo con la ecuación de Darcy-Weisbach) entre los nudos, es:

$$h_{f12} = \frac{8fL}{\pi^2 g D^5} Q^2 = r_{12} Q^2 \quad (6)$$

Donde Q es el caudal circulante por la línea; g es la aceleración de la gravedad, f es el factor de fricción, L la longitud del tramo y r_{12} es la resistencia hidráulica de la tubería situada entre el nudo 1 y el 2.

Si se produce una variación de caudal por la línea (que generará una variación de caudal circulante de q l/s), la nueva pérdida de carga que posibilitará la percepción de la fuga será:

$$h'_{f12} = r'_{12}(Q+q)^2 \quad (7)$$

Como hipótesis de partida se asume que si bien existe cierta variación de la resistencia hidráulica de la línea con el caudal, esta resulta de escasa relevancia cuando las variaciones de caudal son pequeñas, por lo que asumiremos que el coeficiente de fricción no experimenta variación ($r'_{12} = r_{12}$), por lo que:

$$h_{f12} - h'_{f12} = r_{12}(Q^2 + 2Qq + q^2 - Q^2) \quad (8)$$

simplificando esta expresión y despreciando términos cuadráticos, resulta:

$$\Delta h_{f12} = 2 Q q r_{12} \quad (9)$$

La ecuación (9) representa el cambio absoluto de presión como consecuencia de la pérdida de caudal que genera la fuga. El cambio en el caudal puede expresarse como una variación relativa: $q/Q=k$, por lo que la variación de la pérdida de carga en la conducción vendrá dada por :

$$\Delta h_{f12} \approx 2 k Q^2 r_{12} = 2k h_{f12} \quad (10)$$

Por otra parte, el cambio experimentado por la pérdida de carga:

$$\frac{\Delta h_{f12}}{h_{f12}} = 2k = 2 \frac{q}{Q} = S \quad (11)$$

En definitiva; la caída relativa de presión a lo largo de la tubería es dos veces la relación entre el caudal que se fuga y el total trasegado en la conducción. Este resultado posibilita determinar la sensibilidad (S) en la medida de presión de una red monitorizada, a partir del caudal umbral de fuga que se quiere detectar. Es importante, también recordar que un aumento brusco de caudal no es

necesariamente debido a la súbita aparición de una fuga; pueden darse consumos puntuales importantes como bocas de incendios o similares. Las señales, pues, deben analizarse cuidadosamente.

Hagamos un análisis de la repercusión que la fuga tiene sobre los parámetros hidráulicos, que son presión y caudal (indicadores del defecto): caudal mínimo a detectar y variación en la presión como consecuencia de la pérdida de caudal. Podemos encontrarlos en los casos siguientes:

a) Si nos encontramos en la fase de diseño en una red nueva en la que se han escogido los parámetros de las tuberías, el caudal mínimo de fuga que es posible detectar en el caso de que aparezca una fuga en el sistema viene dado por

$$q_{\min} = (\Delta h_{f_{\min}}) \cdot \frac{\pi^2 g D^5}{16 f L} \frac{1}{Q} \quad (12)$$

b) Por el contrario, si la red no es de nueva creación y nos planteamos cual será el caudal mínimo de fuga que podrán detectar unos medidores diferenciales con una cierta sensibilidad (La definición de sensibilidad que da el (MOPTMA, 1994) es el cociente entre el incremento de la respuesta de un instante de medida y el incremento correspondiente de la señal de entrada , por lo que el caudal mínimo que se puede detectar, obtenido a partir de (12) será:

$$q_{\min} = \frac{S}{2} \times Q \quad (13)$$

c) En la misma red del supuesto anterior queremos detectar un caudal mínimo de fuga. Atendiendo a la definición realizada del cambio porcentual de caída de presión S experimentado (11), dicho caudal se podrá expresar como:

$$q_{\min} = \frac{\Delta h_{f12} \times Q}{2 h_{f12}(Q)} \quad (14)$$

En definitiva, es posible conocer así el valor de la pérdida mínima de caudal (q_{\min}) que se podrá detectar con los medidores si se conoce la pérdida mínima de presión que pueden registrar los manómetros en régimen absoluto (Δh_{f12}), o su sensibilidad ($\Delta h_{f12}/h_{f12}(Q)$), en términos relativos. Nótese que dicho valor q_{\min} depende de directamente del valor del caudal Q que circula por la línea.

Ejemplo de aplicación.

Dada una conducción concreta cuyas características principales son:

L = 500 m
 Rugosidad = 0.1 mm
 Diámetro = 1000 mm
 Caudal Q= 1000 l/s
 $f = 0.0137$

La pérdida de carga ocasionada será, de acuerdo con Darcy-Weisbach, de 0.567 mca. Si se produjese una fuga grande aguas abajo, por ejemplo de 100 l/s, los medidores de presión experimentarán una variación de 0.12 mca, esto es, 12 cmca, si esta fuera de 50 l/s el incremento que leerían los manómetros sería de 5.8 cmca lo cual implica una sensibilidad considerable de los manómetros y por supuesto si la fuga es de menores dimensiones, por ejemplo de 10 l/s, la variación que estos experimentan es de 1.1 cmca, (siempre en régimen estacionario). Podríamos, según las características de nuestra conducción, decidir la sensibilidad de un medidor que tuviera que detectar variaciones de presión de este calibre para un cierto régimen de caudales.

Estudio de fugas en la red de Xirivella (Valencia) mediante modelo de simulación EPANET.

En el apartado anterior se ha analizado uno de los procedimientos más sencillos y eficaces para la detección de fuga en tubería simple. Sin embargo, en una red mallada, como son las de los abastecimientos, no hay una línea simple en la cual se va a producir la rotura sino que la fuga aparecerá en cualquier punto de la topología de la red. En este caso, determinar una formulación matemática que defina a priori el caudal de fuga según las mediciones leídas no es tan inmediato y hay que ayudarse de modelos de simulación. Para ilustrar cómo las fugas suponen un defecto usual e importante en los sistemas de abastecimiento urbanos reales y cómo estas pueden detectarse y localizarse en régimen estacionario, se propone el estudio de la red de una población, mediante simulación matemática con el programa EPANET (Rossman, 1993, UDMF, 1995).

Algunos autores (Ligget, 1994, 1995) proponen una detección del defecto en base al análisis transitorio utilizando el método inverso. Ligget se basa, y con razón, en que el método aquí considerado requiere un

conocimiento completo de la red, lo que equivale a tenerla permanentemente ajustada ya que es bien sabido que rugosidades y diámetros en instalaciones reales cambian con el tiempo y son difíciles de conocer en la práctica. Sin embargo, el método inverso propone la detección del defecto basándose en la variación de la celeridad, mucho menos susceptible del conocimiento de los datos propios de la tubería y del paso del tiempo, por lo que en redes menos conocidas es adecuado el estudio mediante transitorios propuesto por Ligget.

En este caso, sin embargo, al tener la red modelizada y por tanto conocida, un estudio teniendo en cuenta la serie temporal y la evolución del sistema es más eficaz y conveniente para la detección de fugas. Es, por tanto, el estudio en período extendido (Rao y Bree, 1988) el más conveniente para el caso tratado.

El modelo matemático de una red va a permitir realizar sobre ella la simulación caso-por-caso a la que se hacía referencia anteriormente y que va a servir para establecer el grado de fiabilidad o de asunción de riesgos que tiene un sistema determinado al menos desde un punto de vista teórico. La modelización de una red puede realizarse mediante modelo estático, cuasi-estático o rígido (Cabrera et al. 1994). El programa EPANET realiza una simulación en período extendido (cuasi-estático), el más conveniente para la observación del régimen estacionario, incluso para pequeños niveles de presión. Dicho modelo proporciona valores de presión en cada nudo y caudal en cada línea, permitiendo una salida gráfica, (Rossman, 1993).

Sin embargo, tampoco es el modelo un reflejo exacto de la realidad puesto que aunque puede mostrar un análisis de la evolución de presión y caudal en cada punto, las medidas que se realizan en la realidad presentarían una fluctuación debido a errores de los aparatos y consumos instantáneos que el modelo no puede reproducir. Estas variaciones son muy importantes y pueden conseguir que el efecto en descenso de presión que conlleva una fuga no sea observable en el conjunto de fluctuaciones de la red, por lo que se hace más conveniente medir en regímenes nocturnos cuando las fluctuaciones instantáneas serán menores. Tampoco puede el modelo registrar las variaciones que se producirán en los consumos puesto que para éste son datos fijos de entrada.

Teniendo presentes estas limitaciones, nos centramos en Xirivella, población de la Comunidad Valenciana de 25000 habitantes, elegida para realizar en su red principal un análisis dinámico que servirá para ilustrar este estudio de defectos (UDMF, 1993). En la Figura 4 se muestra su red principal de tuberías de abastecimiento.

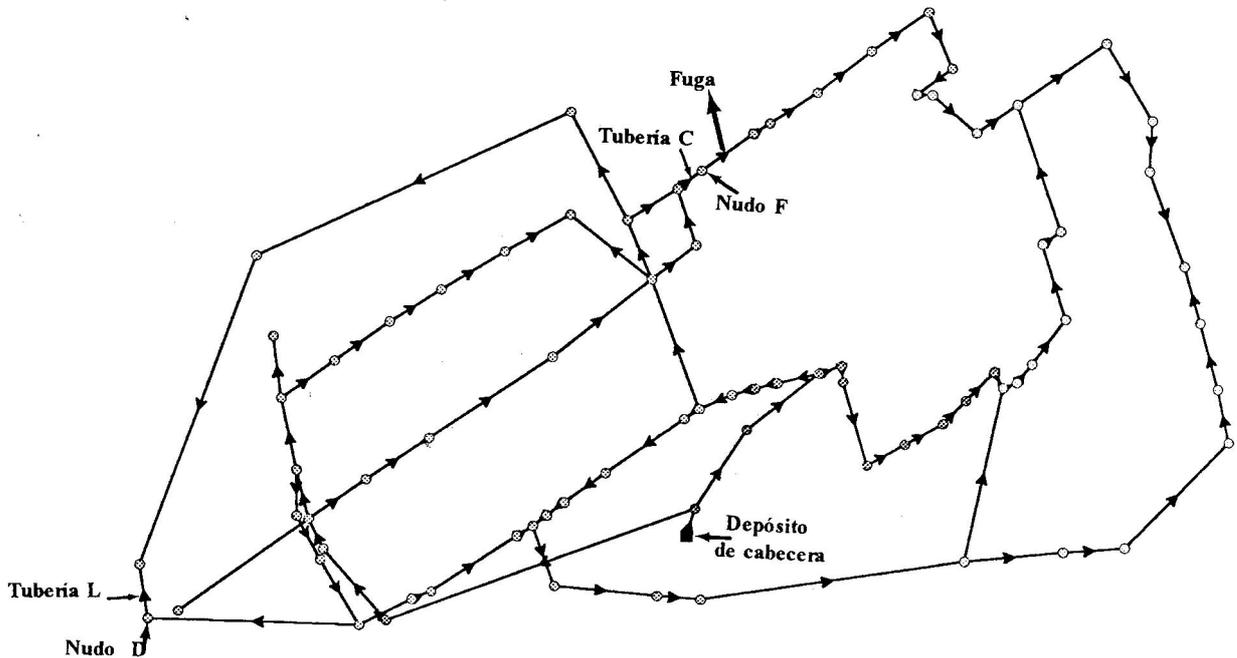


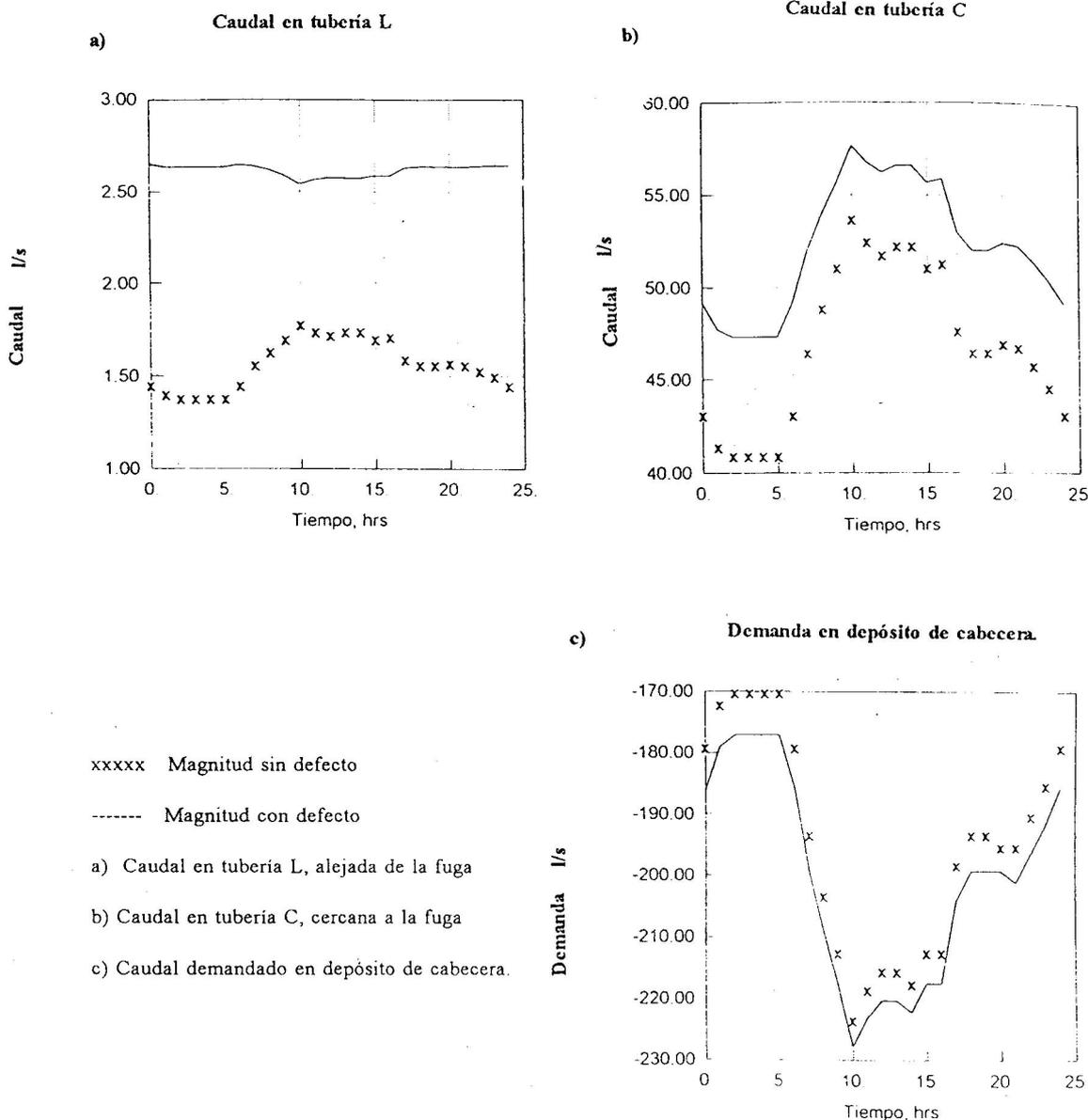
Figura 4. Red principal de Xirivella.

La simulación de una fuga en dicho sistema se realiza mediante la aplicación de una válvula que vierte a presión atmosférica de modo que variando la constante de dicha válvula se varía el defecto. Forzando, por tanto, a que salga un caudal de fuga por dicho nudo ficticio, en la Figura 5 se modelizan los valores de las lecturas de los caudalímetros. Esta figura refleja un aumento en el caudal circulante por las conducciones cuando se presenta el defecto: en el depósito de cabecera hay una demanda mayor con la presencia de la fuga y en el resto de tuberías también se observa este aumento de caudal circulante, con mayor intensidad en el sector afectado. En las lecturas de los caudalímetros se observa que las mayores fugas son por la noche, cuando el régimen de presiones es mayor. Se hace así necesaria la medida nocturna, puesto que en caudalímetros poco sensibles será la que haga registrar medidas más fiables del defecto.

A su vez, se advierte un decrecimiento de la presión en los nudos conforme la fuga crece. Esta fluctuación se observa de manera absoluta y con más importancia en los puntos en los que hay mayor velocidad y más

cercanos a la fuga, aunque aparece en todos los puntos de la red por ser ésta mallada. Hay que destacar en el estudio realizado que los niveles de presión recogidos por el modelo EPANET son muy bajos. La red analizada presenta un rendimiento volumétrico en torno al 60% (UDMF, 1993) por lo que la presencia de fugas es notable. Esto queda de manifiesto por el elevado consumo nocturno que presenta. Así se ha realizado el análisis de la red en base a suponer una presión de inyección baja, a fin de que las fugas en régimen nocturno en el conjunto de la red sean despreciables frente a la fuga localizada que se está provocando. De esta forma se observa la diferencia de sensibilidad a la fuga entre los valores nocturnos y diurnos en la lectura de medidores.

Por tanto, va muy ligado el régimen de caudales con el de presiones y no son comparables las pérdidas que genera un régimen con las que genera otro, por lo que una medida conjunta de ambas para la magnitud del defecto puede aportar más información, sobre todo a la hora de realizar un análisis comparativo de los datos disponibles.



a 5. Observación del aumento de caudal circulante en varias tuberías por efecto de la fuga.

Figur

Se propone una medida de la resistencia hidráulica equivalente de la red representando el ratio entre la presión de cabecera y el caudal de inyección. Es en este ratio en el que, al combinar las fluctuaciones de caudal y presión para el defecto dado, se observa una mayor variación del parámetro registrado al comparar el régimen nocturno del diurno, lo que nos asegura la presencia de la fuga con mas certeza en régimen nocturno al variar el parámetro hasta tres veces más, pero sin localizar la misma en el conjunto del sector cuya inyección estemos analizando, (en este caso, toda la red al no estar ésta sectorizada).

Analicemos con más detalle los resultados obtenidos. Si, tras una lectura continua de presiones y caudales en la

red, y después de haber filtrado las medidas, obtenemos las lecturas de presión y caudal para los puntos indicados en las Figuras 5 y 6 podemos concluir, respecto a los estados posibles de fallo:

-Detección: En horario nocturno hay un incremento de caudal registrado en cabecera de 7.5 l/s, lo cual genera una caída en la lectura de presión (respecto a la lectura si en el sistema no hubiera fuga) de 1 mca en un nudo del sector afectado y de 0.8 mca en nudo de sector no afectado. En horario diurno, el caudalímetro situado en cabecera señala una pérdida de caudal de 3 l/s y una variación de presión de 0.6 mca en sector afectado y de 0.5 mca en sector no afectado.

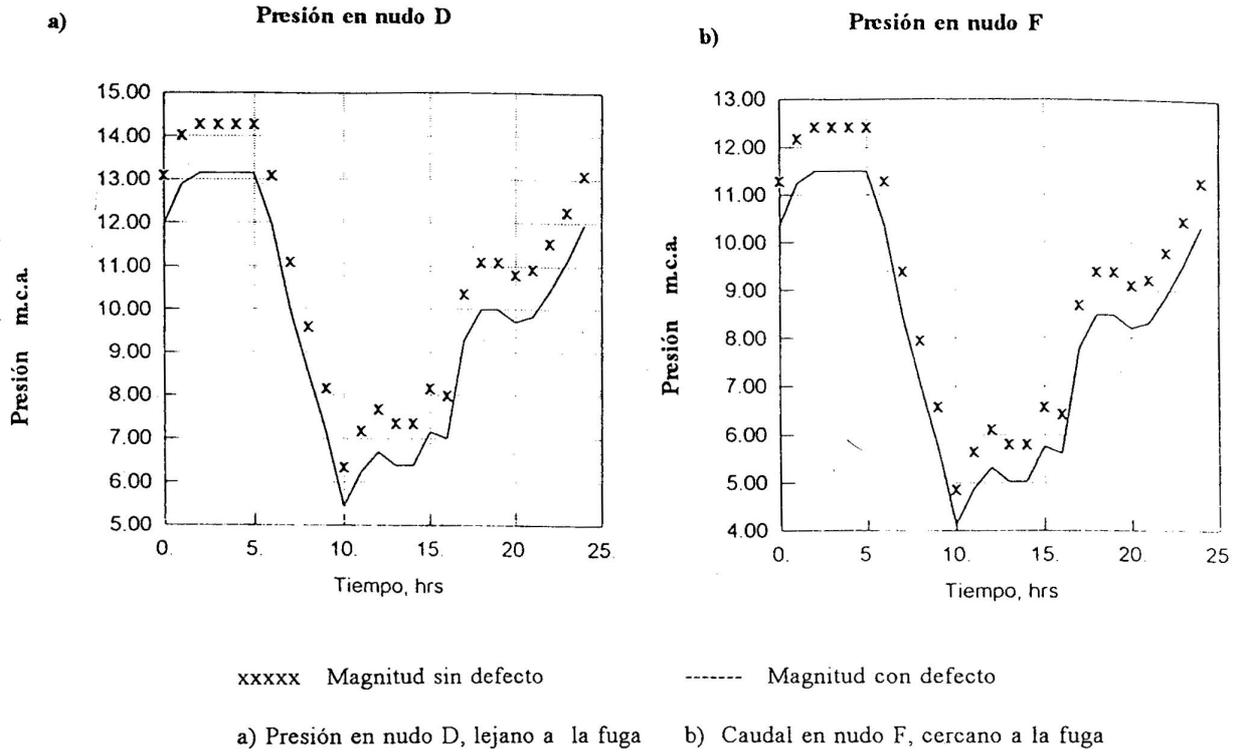


Figura 6. Comparación de regímenes de presiones.

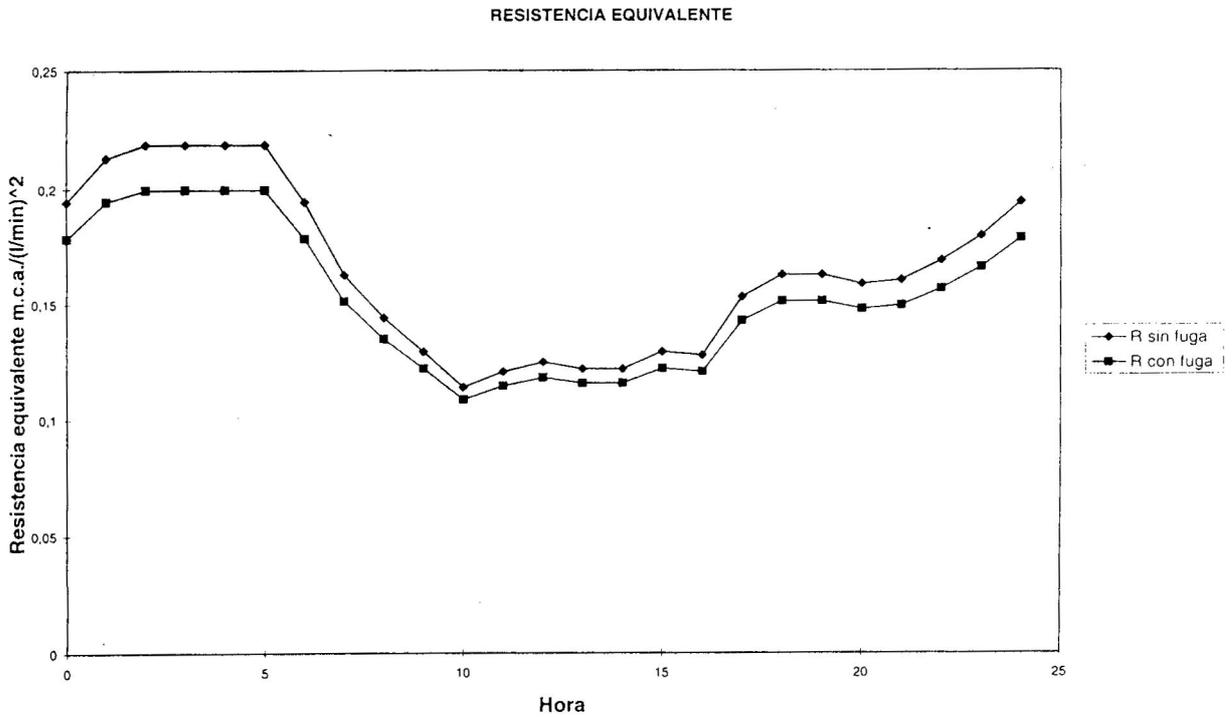


Figura 7. Evolución de la resistencia de la red equivalente.

De estas observaciones concluimos que una lectura en régimen nocturno revela, para un mismo nivel de caudales la presencia de la fuga (incluso en un único caudalímetro de cabecera) con gran intensidad, por tanto, necesitaremos un caudalímetro de menor precisión para la detección en este horario. Pero también en estas horas la medición de presión registra un incremento mayor. Curiosamente, y dado lo mallado de la red, en medidores alejados escogidos aleatoriamente se registran variaciones similares, de lo que deducimos que la lectura de presión, si bien asegura la presencia de la fuga (la detecta sin duda), no sirve para localizar.

-Localización. En la Figura 5 podemos ver una comparación de las lecturas de los caudalímetros situados en sendas tuberías representativas de dos sectores, uno en el que se sitúa la fuga y otro sano. Se observa que en el sector no afectado, la variación de caudal es de 0.7 l/s como media y en la tubería afectada, esta variación es de 6.5 l/s, resultado que concluye, sin duda, que la localización (al menos por sectores) se puede realizar mediante caudalímetros.

Un conjunto de manómetros no muy grande distribuido por toda la red y caudalímetros en cabecera y en cada sector detectarán la fuga y la localizarán (con más facilidad en horario nocturno) si la red está bien sectorizada y la lectura es continua (monitorización).

La sectorización es posible si la red es de nueva creación. En el caso más frecuente de red en funcionamiento el problema se puede obviar si se dispone de suficiente valvulería ya que puede conseguirse una división en sectores aunque sea de forma experimental en régimen nocturno. A favor de la opinión de medir en régimen nocturno se puede argumentar el hecho de que en este momento la fluctuación instantánea de los consumos es menor y un defecto permanente se define con mayor facilidad. Incluso un estudio del caudal mínimo durante varios días puede ser suficientemente significativo de la presencia del defecto. En contra de esta práctica existe un factor económico importante que es el coste de la mano de obra en este horario. Dependiendo de la técnica que se esté utilizando y en función del grado de automatización del sistema, se podrá o no podrá tener un control continuo de presiones y caudales.

Una simulación como la que aquí se ha realizado, observando los casos posibles de fuga, dará una estimación de cómo las variaciones de presión y caudal que se registran en los diversos puntos y en cada momento responden a estados mayores o menores de defecto, lo que ayudará a tomar la decisión de la sensibilidad o precisión de manómetros o caudalímetros a instalar en función del caudal mínimo de fuga que se

quiera detectar, como se hacía analíticamente en el caso más sencillo de la tubería simple del apartado anterior.

Finalmente debe cuantificarse económicamente el interés del estudio aquí expuesto comparando la inversión que requiere el ajuste y la monitorización de la red para una pronta detección del defecto frente a la totalidad de daños que pueden derivar desde el mismo momento en que se produce la fuga y el instante en que puede detectarse en un proceso de mantenimiento más convencional. Sin duda que el cada vez mayor valor del agua irá aconsejando la implantación de estas nuevas técnicas.

La red del Panel Hidráulico Experimental de la Universidad Politécnica de Valencia.

Los modelos matemáticos, como hemos visto, son herramientas útiles para la observación del comportamiento simulado de una red. Sin embargo, no hay que olvidar la importancia que tiene la medición en campo (y lo difícil que puede resultar a veces, sobre todo en redes antiguas y poco instrumentalizadas), puesto que es la validación de los resultados teóricos.

En este caso se han provocado unas fugas en la red del Panel Hidráulico Experimental de la Universidad Politécnica de Valencia y se ha observado su repercusión en las lecturas observadas de presión y caudal en régimen estacionario. El Panel Hidráulico Experimental es una instalación hidráulica que simula una red de abastecimiento real con los elementos comunes en las redes existentes en cualquier instalación. Esta red está debidamente instrumentada y monitorizada. Su particularidad es la gran cantidad de medidores de presión (transductores) y caudal, su gran precisión, y la monitorización centralizada y en tiempo real que de ellos se tiene.

La distribución de la red y de los medidores de presión (2,3,4,5,6,7,8) y caudal (C1,C3,C4,C6,C7,C9), son los mostrados en la Figura 8

La distribución topológica de la red, de los medidores de presión (2 al 8), los medidores de caudal en línea (C18 y C19) y los medidores de consumo en los nudos del sistema (C1 a C9) se recogen en las Figuras 8 a) y b). La Figura 9 muestra algunos detalles de la instalación.

Las experiencias realizadas siempre han sido simulaciones de fugas mediante apertura brusca de alguno de los puntos de consumo, observando la repercusión que este defecto genera en el conjunto de las medidas registradas por los transductores de presión y caudalímetros adyacentes. Siempre se ha considerado régimen estacionario para el defecto generado, suponiendo

do así un caudal de fuga fijo, sin considerar el daño generado por el propio transitorio asociado al defecto.

Hay que tener en cuenta que al ser esta una red experimental perfectamente conocida está plenamente ajustada y monitorizada. Los aparatos de medida son extraordinariamente precisos y responde a un pequeño sector de una red que podría ser real por lo que los valores de presión y caudal observados, aunque muy pequeños, podrían extrapolarse a la realidad.

Se ha simulado una curva de modulación y se ha observado la variación de caudal fugado por un mismo defecto conforme el régimen de consumo varía. A su vez, se ha simulado un cierto régimen de funcionamiento y se han provocado fugas de mayores dimensiones con el objeto de observar el efecto de defectos crecientes en la red.

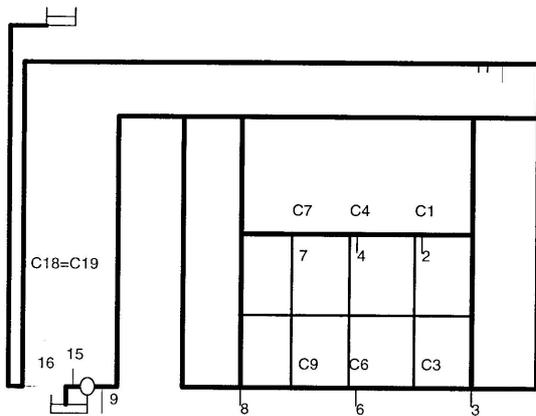


Figura 8 a). Distribución del Panel Hidráulico Experimental.

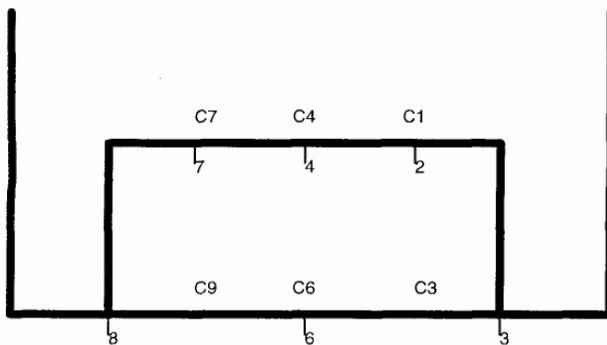


Figura 8 b). Distribución de la malla para la realización de las experiencias.

Tal y como se observaba en el estudio de la red de Xirivella, dado lo mallado de la red, el defecto genera caídas de presión similares en todos los puntos de la malla, lo que hace imposible el uso de los manómetros para la localización, que no para la detección. En la Figura 10 se muestra como, para una cierta evolución del defecto todos los manómetros de la malla registran disminuciones de presión similares.

De la simulación de un estado de funcionamiento de la red, con una curva de modulación, en la que se han introducido defectos, se observa en la Figura 11 que en régimen nocturno, la repercusión de un mismo defecto es hasta de un 30% más que en régimen diurno, lo que reitera la conveniencia de la detección en horario nocturno.

En las Figuras 12 y 13 se muestra, para simulación de fugas de diferente volumen de pérdidas, cómo avanza la presión en el punto de inyección a la malla conforme aumenta el rendimiento volumétrico, definido mediante la expresión:

$$\eta_{vol} = \frac{V_{reg}}{V_{Total}} \quad (15)$$

Donde V_{reg} es el volumen medido mediante aparatos insertados en las conducciones de acometida a los diferentes consumidores y V_{tot} es el volumen de agua suministrado a la red en su punto de inyección.

En este caso conoceremos con gran exactitud todos los volúmenes, con lo que el rendimiento es perfectamente cuantificable, obteniendo así la evolución que se muestra en la Figura 12, evolución que es marcadamente parabólica, como cabía esperar a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach que modeliza el comportamiento de tuberías.

Si esta evolución la expresamos frente a la caída relativa de presión obtendremos lo expresado en la Figura 13.

En este caso, si asumimos la caída relativa de presión en este punto con la sensibilidad aproximada del aparato podremos conocer, para esta red, hasta qué nivel de rendimiento podremos tener controlado con un medidor de presión de una cierta sensibilidad. La evolución parabólica que se muestra indica que llega un momento en que la caída de presión ya no avanza aunque el caudal fugado sea mayor, pudiendo definir en este valor la sensibilidad del manómetro que detecta ya todas las fugas posibles.

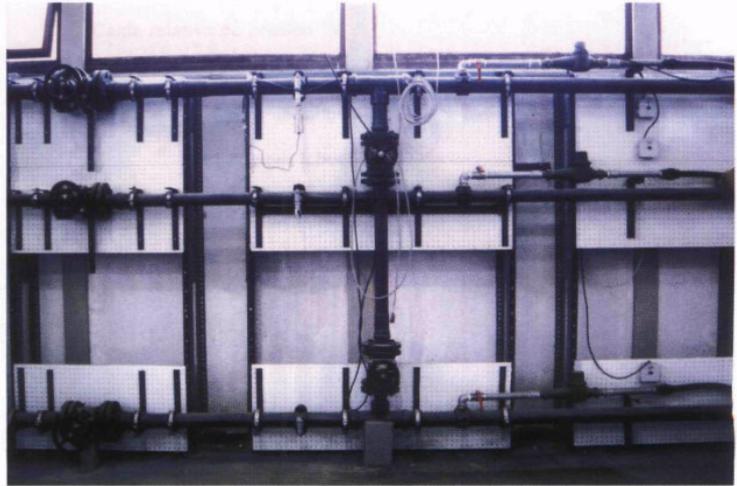


Figura 9. Detalles del Panel Hidráulico Experimental.

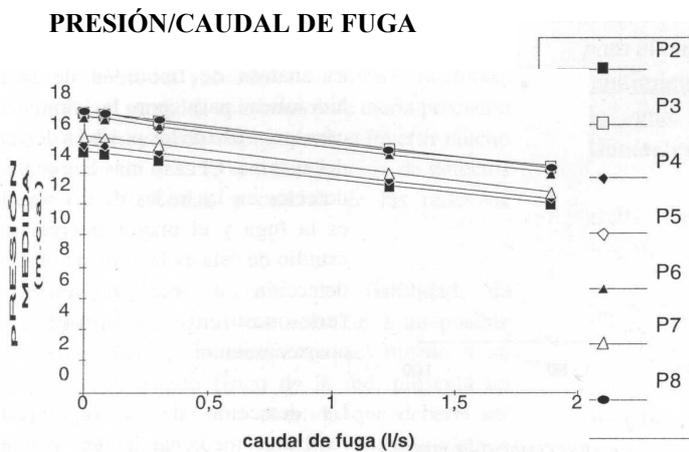


Figura 10 . Observación de la caída de presión en nudos.

Conclusiones de la experimentación.

De los resultados de la experimentación expuestos, podemos afirmar:

-la detección de la fuga, dado lo mallada de la red y puesto que ésta no está sectorizada, se puede realizar con **cualquiera** de los medidores, puesto que todos ellos y en cualquier punto registran un incremento similar en sus medidas, por lo tanto cualquiera de ellos proporciona medidas con un grado de fiabilidad aceptable y no cabe tomar decisiones sobre su ubicación óptima.

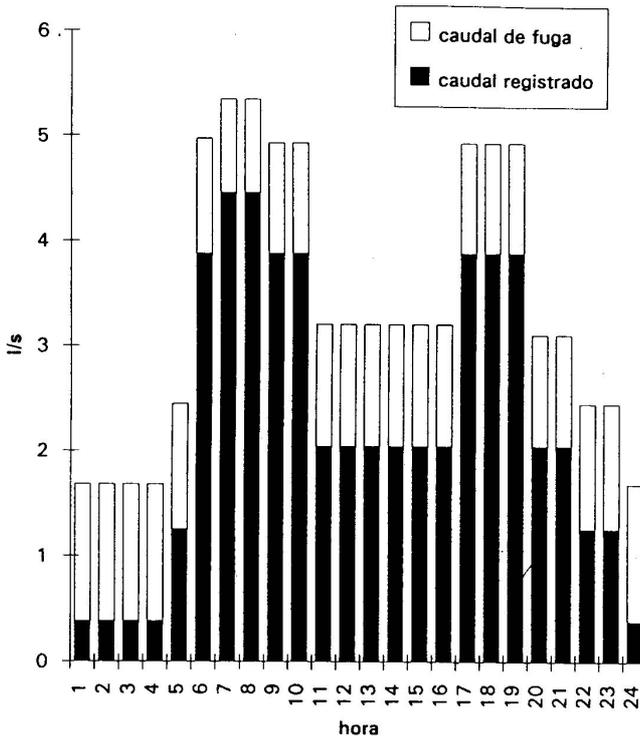


Figura 11. Simulación de régimen de funcionamiento en la red.

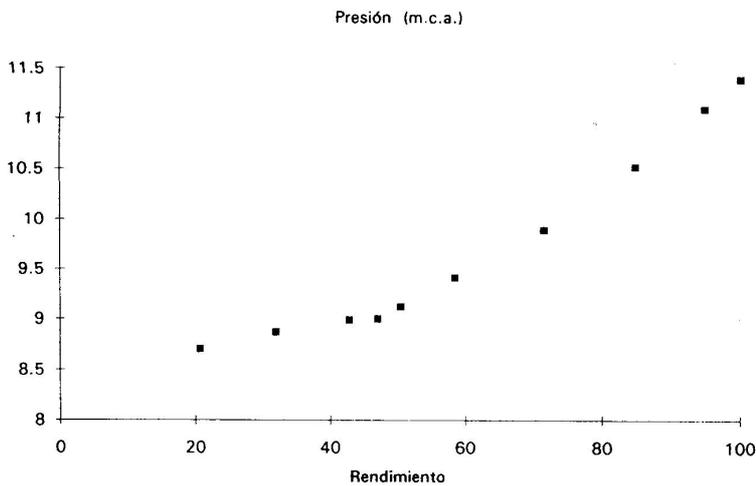


Figura 12. Evolución de la presión en el punto de inyección a la malla frente a rendimiento.

-no podemos localizar de esta manera la fuga.

Extrapolando a una red real, se vería que la presión en los puntos de la red decae de manera similar en todo el sector, como ya se observa en la red de Xirivella, pudiendo no llegar a niveles mínimos en algún punto crítico si el caudal que se pierde es suficientemente grande.

Se deduce que la detección será más fácil en régimen nocturno, no solamente porque el consumo que supone la fuga será más significativo respecto a los caudales circulantes por la tubería que en cualquier régimen diurno, sino porque el mismo defecto producirá variaciones mayores en las medidas de presión que nos ayudarán a detectar la presencia de la fuga.

Por tanto, las ventajas que tiene el régimen nocturno es la facilidad de detección, lo que se traduce en posibilidad de disponer de medidores de menor precisión, o reducir la necesidad de aumentar la precisión de los mismos, como habíamos visto con la modelización teórica.

A su vez, se observa que la evolución de la caída de presión con la disminución de rendimiento es parabólica según muestran los resultados de las experiencias.

CONCLUSIONES

El análisis de fiabilidad de la red hidráulica pasa por la simulación caso-por-caso de los posibles defectos del sistema. El caso más frecuente de defectos en las redes de distribución es la fuga y el mayor interés en el estudio de ésta es la agilización de su detección y localización en el funcionamiento conjunto del abastecimiento.

La detección de la fuga puede realizarse mediante lectura continua de los valores de presión y caudal, para lo cual hay que

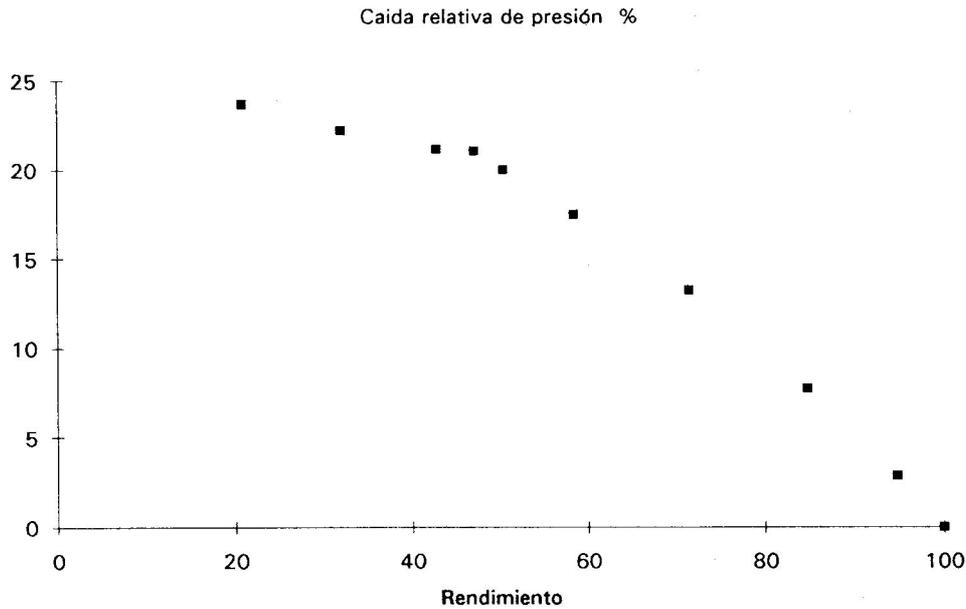


Figura 13. Evolución de la caída de presión en el punto de inyección frente a rendimiento.

tener unos medidores suficientemente precisos, más sensibles cuanto menor sea el caudal de fuga que se quiere detectar y una red sectorizada para que el número de medidores instalados en ella sea el mínimo posible.

Un aumento en los caudales circulantes junto con una disminución en la presión, si se compara con un modelo de la red debidamente calibrado, siempre implica la presencia de un defecto. Las variaciones en las lecturas, sobre todo de presión, son pequeñas y se hacen más visibles en las líneas de mayores velocidades, lo que las hace más convenientes para la instalación de los manómetros.

Estas variaciones, en general, siempre son mayores en régimen nocturno; unido esto al hecho de que en este régimen las fluctuaciones instantáneas son menores se hace necesaria para la mayor eficacia del método un estudio de presiones y caudales en horario nocturno. Esto, junto con medidas continuas y de cierta precisión en una red bien sectorizada, ayudarán a invertir mucho menos tiempo de detección y localización de defectos y mejorar la fiabilidad y calidad de las redes de abastecimiento.

La extensión del análisis de fiabilidad de abastecimientos de aguas con relación a un posible fallo de las fuentes de suministro del mismo y su relación con el estado físico de la red, presenta un indudable interés y es una cuestión que debería ser abordada de inmediato por los abastecimientos expuestos a restricciones de suministro, tan castigados en nuestros días.

REFERENCIAS.

- Bao, Mays, L. (1990) *Model for water distribution systems reliability*. Journal of Hydraulic Engineering ASCE, 1(619) 1119-1137.
- Ben Chie Yen y Yeou Kung Tung. (1991). Reliability Analysis in Hydraulic Design.
- Cabrera, E. Iglesias, P. Abreu J..(1994). *Modelos de Análisis Dinámico*. Cap. 5. Curso de Análisis. Diseño y Operación de redes hidráulicas a presión. Universidad Politécnica de Valencia.
- Creus Solé, A. (1991). Fiabilidad y Seguridad en Procesos Industriales.
- Goulter, I.(1995) *Modelos analíticos y de simulación para el análisis de fiabilidad de una red*. Mejora de rendimiento y fiabilidad en sistemas de distribución de agua. Curso de la Universidad Internacional Menéndez Pelayo. Valencia.
- Heinz, P. Geitner F.K. (1992). An introduction to machinery reliability assesment.
- Jowitt, P. (1995). *Análisis del impacto de las roturas de tubería en redes de distribución*. Mejora de rendimiento y fiabilidad en sistemas de distribución de agua. Curso UIMP.

- Liggel, J. and Cheng L.C.(1994). *inverse transient analysis in pipe networks*. Journal Hydraulic División ASCE Vol. 8. Pag 934-956.
- Liggel, J. and Cheng L.C. (1995). *Monitoring water distribution systems. The inverse method as a tool for calibration and leak detection*. Mejora de rendimiento y fiabilidad en sistemas de distribución de agua. Curso de la Universidad Internacional Menéndez Pelayo. Valencia.
- López, P.A. (1994) Análisis de Fiabilidad y Rendimiento de Sistemas de Agua a Presión. Aplicación al Panel Hidráulico Experimental de la Universidad Politécnica de Valencia. Proyecto Final de Carrera.
- Mays, L.W. (1989). Reliability Analysis of Water Distribution Systems.
- Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, (1994). Vocabulario Internacional de Términos Fundamentales y Generales de Metrología. Centro Español de Metrología.
- O'Connor, P.D.T. (1991) Practical Reliability Engineering.
- Rao, H.S. and Bree, D.W. (1987). *Extended Period Simulation of Water Systems. Part A*. Journal Hydraulic División. ASCE. Vol 102.
- Rossman, L.A. (1993). EPANET Users Manual.
- Tullís, T. (1994) *Fiabilidad y vida útil de elementos de una red de distribución*. Mejora de rendimiento y fiabilidad en sistema de distribución de agua. Curso de la Universidad Internacional Menéndez Pelayo. Valencia.
- Unidad Docente de Mecánica de Fluidos. (1993) Asistencia técnica al Consell Metropolita de L'Horta respecto de la red de distribución de agua de Xirivella y su conexión al sistema básico metropolitano. Universidad Politécnica de Valencia.
- Unidad Docente de Mecánica de Fluidos. (1995) EPANET, Manual del usuario. versión castellana.
- Vela A. (1995). *Panorámica general de identificación y reducción de agua no contabilizada en sistemas de distribución de agua*. Mejora de rendimiento y fiabilidad en sistemas de distribución de agua. Curso de la Universidad Internacional Menéndez Pelayo. Valencia
- Wagner, T. Shamir, U. Marks, D. (1988) *Water distribution reliability :I. Analytical Methods; II. Simulation Methods*. Journal of water resources and planning and managing. ASCE 114(3) 253-293.
- Wayne, R. (1989) Controlling electrodynamic systems