

# AUDITORÍA DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Enrique Cabrera<sup>1</sup>, Jabier Almandoz<sup>2</sup>, Francisco Arregui<sup>1</sup>, Jorge García-Serra<sup>1</sup>

**RESUMEN:** Se presenta una metodología, apoyada en bases de datos disponibles en aquellos suministros de agua urbanos cuya gestión técnica sea correcta, que sistematiza el establecimiento de auditorías hídricas. El balance propuesto es ligeramente distinto al que recomienda la International Water Supply Association (IWSA).

Se clasifican, de manera ordenada y en diversos niveles, los diferentes destinos del agua inyectada al sistema, y se definen hasta tres rendimientos distintos que evalúan su eficiencia. El primero de ellos, el global, queda como síntesis de los otros dos que valoran el estado de la red de distribución y la gestión técnico-administrativa, respectivamente. El criterio establecido contribuye, pensamos, a paliar la falta de uniformidad de criterios que, a la hora de definir tan importantes indicadores de gestión, existe en la literatura técnica. Se señalan algunos inconvenientes derivados del uso de estos rendimientos porcentuales, obtenidos a partir de la relación de volúmenes del balance, frente a otros indicadores relativos que, por posibilitar una comparación objetiva entre abastecimientos, son los que recomiendan las organizaciones internacionales.

El trabajo concluye con un análisis detallado de los sumandos del balance hídrico propuesto y propone metodologías concretas para la evaluación de cada uno de ellos.

## INTRODUCCIÓN

Afirmar que el agua es un recurso escaso y, al tiempo, no tener un conocimiento preciso de cómo se utiliza, así como de las posibilidades de ahorro que ofrece, constituye la principal paradoja que envuelve el complejo mundo del agua. Si en la práctica se inventaría todo cuanto tiene valor, el agua, y sobre todo la de mayor calidad, la destinada al consumo humano, por ser bienpreciado y escaso, debe ser, asimismo, objeto de preciso inventario.

Por ello, la correcta gestión técnica de una red de distribución de agua, comporta conocer con exactitud el destino final de toda el agua introducida en el sistema a través de los distintos puntos de suministro. El conjunto de actuaciones requeridas para establecer con precisión el balance hídrico acostumbra a denominarse *auditoría volumétrica del abastecimiento urbano*.

El presente trabajo presenta una panorámica completa de cómo llevar a cabo en estos sistemas una auditoría completa y precisa. Para ello, y en primer lugar, se ordenan los destinos que puede tener el agua inyectada en la red. Tal ordenación, según se desprende de una atenta lectura la literatura técnica, admite formas muy diversas dependientes de la perspectiva de enfoque. Entre otras muchas referencias, podemos citar las siguientes: AWWA (1990), Male y Noss (1985), Arregui-Cortés y Ochoa-Alejo (1997), Ochoa y Bourgett (1998), Hirner

(1998) y Lambert y col. (1998). La que aquí presentamos posibilita, se verá, llevar a cabo la auditoría de manera sistemática. Por tener forma arbórea es, creemos, la más adecuada para alcanzar los objetivos que aquí se persiguen, por cuanto cada uno de los niveles de clasificación responde a un criterio claro, bien diferenciado de los restantes.

A partir de la estructura arbórea que configura el balance hídrico del sistema de distribución de agua, la definición de los rendimientos que posibilitan evaluar su eficiencia es inmediata. Y tal es la razón por la que se formula una propuesta concreta que, pensamos, puede contribuir a unificar los criterios de utilización de estos parámetros. A destacar que en la literatura técnica, y al objeto de poder comparar de manera razonable abastecimientos, y dada la actual disparidad de criterios existente, se comienza, las más de las veces, definiendo con precisión estos términos (OFWAT, 1996). De ahí que la propuesta que el presente trabajo formula constituye, a nuestro parecer, una de las aportaciones más relevantes.

Con el balance hídrico establecido, y los rendimientos definidos, se procede a la evaluación de los elementos que lo integran. Su conocimiento posibilitará el diagnóstico preciso del sistema a partir del cual se podrá delinear un plan de acción que, en base a criterios de rentabilidad económica y a las expectativas de mejora del balance hídrico, ordene las distintas actuaciones a llevar a cabo.

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico del Agua. Grupo Mecánica de Fluidos. Valencia

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Nuclear y Mecánica de Fluidos. Universidad del País Vasco.

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua* Vol.6 Num.4 (diciembre 1999), páginas 291-303, recibido el 18 de noviembre de 1998 y aceptado para su publicación el 13 de octubre de 1999. 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.

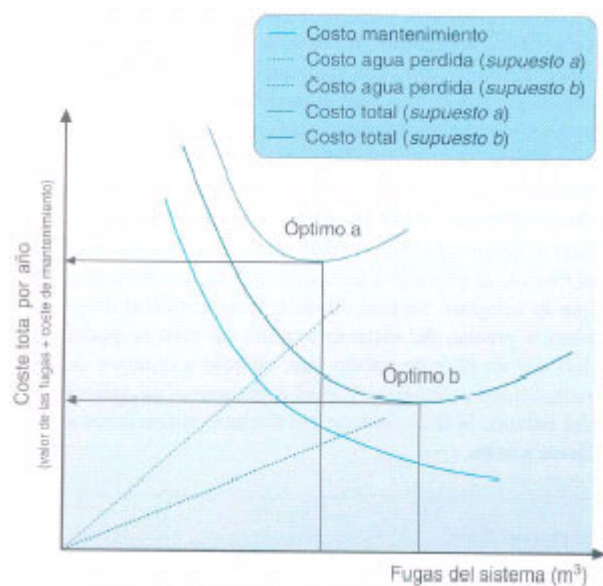
Llegados a este punto del proceso resulta fundamental, a nuestro entender, ponderar la enorme importancia que tiene el precio de venta del agua. Cualquier plan de actuación demanda trabajo, medición de presiones y caudales circulantes y, en definitiva, dinero para financiar tales acciones. Si el precio de venta del agua no justifica, desde una perspectiva económica, las medidas adoptadas, es claro que aquellas solo se acometerán de manera ocasional, y se deberán más al entusiasmo del gestor que a razones objetivas. Y, ciertamente, si no son económicamente autosostenibles, no tendrán continuidad en el tiempo.

Es bien sabido que a un precio de venta del agua le corresponde un volumen óptimo de fugas. Y ello es así por cuanto alcanzado un determinado nivel de eficacia, llevar a cabo una mejora supone una inversión económica superior al nivel de ingresos que el gestor deja de percibir por el agua perdida. De acuerdo con Conrey y Hall (1995), precios políticos equivalen a despilfarro y mala gestión. En efecto, todo director técnico de un abastecimiento sabe cuál es el nivel de fugas óptimo de su red de distribución. Y sabe perfectamente que tal nivel depende del precio de venta del agua.

La *Figura 1* clarifica este concepto. Presenta el valor económico de los metros cúbicos de agua perdidos en concepto de volumen no registrado (fugas, etc.) en la red en un año, para dos precios de venta del agua diferentes. Sumando a cada una de estas rectas el costo de mantenimiento propio de la red, que lógicamente es función del nivel de pérdidas que presenta (utilizado tal término en su más amplia acepción), se evidencia la existencia de un rendimiento óptimo.

De su análisis se concluye fácilmente que:

- Si el precio de venta del agua es cero, el rendimiento de la red tiende a cero.



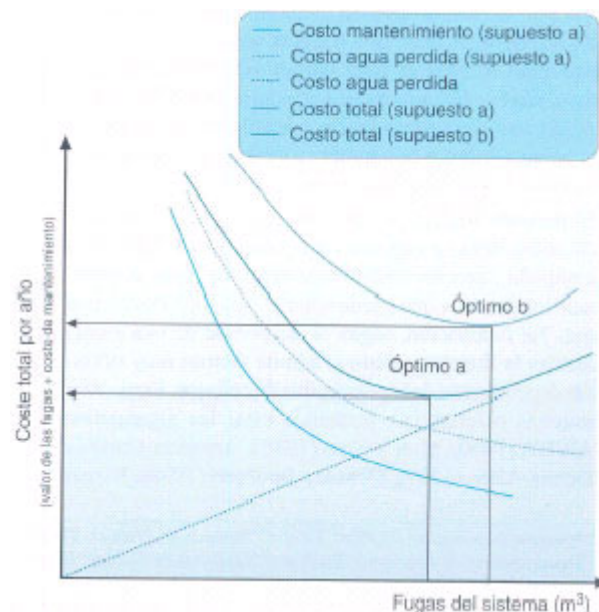
**Figura 1.** Rendimiento óptimo de una red y su relación con el precio del agua

- A medida que su precio de venta aumente, el rendimiento óptimo de la red se aproximará, de manera natural, a la unidad. Por ello algunos países, Inglaterra a través del OFWAT, o Italia a través de la denominada Ley Galli, (Gazzetta Ufficiale, 19.1.1994), permiten aumentar el precio de venta del agua si también lo hace el rendimiento de la red de distribución que la transporta.

En otras palabras, cuanto más fielmente se repercutan en el recibo que paga el abonado los costos reales de gestión (amortización de instalaciones, gestión técnico-económica, gastos energéticos y de explotación, mantenimiento, rehabilitación, etc.), el abastecimiento tenderá, de manera natural, a mejorar su gestión.

De acuerdo con Villesot (1997) el actual precio de venta del agua en Francia sitúa el valor del rendimiento óptimo de las redes de distribución de este país en el 80%. Esta cifra representa un orden de magnitud válido, por cuanto es evidente que no solo el precio de venta del agua influye en el valor óptimo del rendimiento de la red. Éste también se ve afectado, de manera significativa, por las características de la red de distribución. Y así en poblaciones residenciales o rurales, la curva de mantenimiento del sistema, para la misma cantidad porcentual de agua fugada, demanda un mayor gasto, por cuanto sus sistemas de distribución presentan, para el indicador longitud de la red de distribución con relación al número de abonados suministrados, un valor elevado. Ello equivale a trasladar verticalmente la curva que representa el costo de mantenimiento, por lo que, a igualdad de precio de venta del agua, el rendimiento óptimo del sistema será inferior.

Cuanto antecede lo evidencia la *Figura 2*. Para mantener el rendimiento hay que aumentar el precio de venta



**Figura 2.** Variación del rendimiento óptimo con las características de la red

del agua, lo que, a nuestro parecer, está justificado toda vez que los abonados deben de contribuir a financiar un sistema que, por sus características, tiene un coste unitario mayor. De hecho son estas singularidades las que aconsejan la utilización de indicadores de rendimiento relativos, tal y cual se discutirá en el epígrafe *Indicadores de gestión relativos* del presente trabajo.

Y dicho cuanto antecede, es necesario proclamar que en absoluto se está a favor de una elevación injustificada del precio del agua. Pero se tiene el convencimiento, y ello se puede demostrar de manera clara, que los sistemas con un precio que no alcance a cubrir los costos de mantenimiento, rehabilitación y/o renovación de la red, acaban siendo ineficientes y obsoletos. Los países de la antigua Europa Comunista tenían, a finales de la década de los 80, unos sistemas prácticamente fuera de control, siendo Alemania Oriental, por el gran contraste que presenta frente a la Occidental en el momento de la caída del muro de Berlín, allá por 1989, el ejemplo más claro. Por desgracia ello es también válido en no pocos abastecimientos urbanos españoles (Cabrera y García-Serra, 1997) en los que aún prevalecen precios políticos.

Se debe subrayar que una red de rendimiento elevado tiene tres ventajas tan incuestionables como concluyentes:

- a. La óptica de la calidad del suministro evidencia la primera y más importante de las ventajas. Un sistema que presente un elevado porcentaje de pérdidas no es estanco y, en consecuencia, en cuanto aparezcan de presiones en determinados puntos de la red, ésta es capaz de aspirar el agua contaminada que hay en el entorno exterior, agua procedente bien de las propias fugas de la red, bien de otro tipo de filtraciones (alcantarillado, aljibes, etc.). Una estimación de estas intrusiones patógenas ha sido desarrollada recientemente (Funk y col., 1.999). Ciertamente el disponer de redes estancas es, sobre todo, una cuestión de garantía de calidad de servicio (Beecher y col., 1.998)
- b. Un elevado rendimiento equivale a tener, por parte del gestor, el control del sistema. De hecho no deberá recurrir, en modo alguno, a cortar el agua en periodos de sequía, lo que es práctica inconveniente e insalubre (Cabrera y col., 1998). Inconveniente por estar el abonado sin el servicio máspreciado durante muchas horas diarias e insalubre porque los cortes generan depresiones y estas, a su vez, intrusiones patógenas.
- c. Ahorra agua. Resulta ciertamente grotesco plantear, en determinadas poblaciones, plantas desaladoras con una capacidad de producción inferior al volumen de pérdidas del sistema.

#### **BALANCE HÍDRICO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA**

El caudal inyectado al sistema lo es para ser consumido por los diferentes abonados. Sin embargo una parte, cuya cantidad depende fundamentalmente del estado de conservación de la red y de sus acometidas domiciliarias,

no alcanza su objetivo final, perdiéndose durante el proceso de distribución y dando origen a las fugas.

Con todo, un balance que sólo diferencie el agua consumida de las fugas, no contemplando todos los términos potenciales que caben en el mismo, es, además de simple, incorrecto.

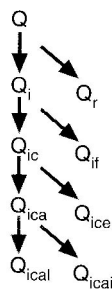
La estructura arbórea que seguidamente se propone, pese a su sencillez, incluye de algún modo a todos y cada uno de los términos que aparecen en la literatura técnica. Los cuatro criterios definidos son cada vez más restrictivos, de manera que un nivel superior siempre es más general que el inferior, lo que genera la estructura arbórea, ya aludida, que muestra el diagrama de la *Figura 1*. Por ello, cualquier volumen de un nivel inferior está incluido en uno de los dos volúmenes del nivel superior.

A significar, ya de entrada, la correspondencia entre caudales y volúmenes de agua. Un balance por unidad de tiempo debe ser expresado en términos de caudales, en tanto que ese mismo balance extendido sobre un periodo de tiempo definido, por lo general un día, equivale a hablar en términos de volúmenes. Ambas formulaciones son útiles y la conveniencia de referirse a una u otra depende del tipo de análisis a realizar. Siendo los rendimientos porcentuales el cociente de dos magnitudes homogéneas su valor final es independiente de las variables (caudales o volúmenes) que el balance hídrico utilice.

Tal cual hemos dicho, los diferentes caudales que forman parte del balance hídrico del sistema pueden ser agrupados atendiendo a diferentes criterios. Comenzando por el más general, la clasificación que se propone es:

- 1º. Caudales consumidos por parte de los abonados, y que son debidamente registrados, frente a caudales, consumidos o perdidos en fugas, y que por falta de medición denominaremos incontrolados, ya que no existe constancia final de su utilización, ponderando este criterio, en cierto modo, la eficacia global de la gestión.
- 2º. A su vez, los caudales incontrolados del precedente apartado corresponden bien a caudales consumidos no medidos, bien a caudales realmente perdidos, o sea, a fugas. Este criterio contempla el estado de la red y de sus acometidas.
- 3º. Los caudales consumidos pueden merecer el calificativo de incontrolados bien por falta de medición, o bien porque esta sea incorrecta. De este modo este criterio contempla las características, en cantidad y calidad, del parque de contadores.
- 4º. Finalmente los caudales incontrolados consumidos y no medidos, pueden ser solicitados bien por abonados perfectamente autorizados que no tienen instalado un contador, por lo que los volúmenes son consumidos de manera legal, bien a través de tomas ilegales o fraudulentas, lo que les hace merecer el calificativo de agua robada al sistema. Este cuarto criterio contempla el control de las acometidas de los usuarios.

El diagrama arbóreo al que nos venimos refiriendo queda, pues, establecido, de acuerdo con estos cuatro criterios, del modo siguiente:



**Figura 3.** Balance hídrico completo de un sistema de distribución de agua

La notación seguida en el adjunto diagrama es la que sigue:

**Nivel 0.** Caudal total del sistema.

$Q$  Caudal inyectado, medido por contadores dispuestos en los puntos de entrada del agua en la red.

**Nivel 1.** Criterio que contempla la eficacia de la gestión.

$Q_r$  Caudal registrado, esto es, medido por los contadores de los abonados del sistema.

$Q_i$  Caudal incontrolado, o sea, sin conocimiento de su uso o destino final.

**Nivel 2.** Criterio que contempla el estado de la red y de sus acometidas.

$Q_{ic}$  Caudal aunque incontrolado, consumido por los diferentes abonados o usuarios.

$Q_{if}$  Caudal incontrolado y perdido en fugas del sistema.

**Nivel 3.** Criterio que contempla la eficiencia de la medida.

$Q_{ica}$  Caudal incontrolado, consumido y no medido por la ausencia de contadores.

$Q_{ice}$  Caudal incontrolado, consumido y no registrado debido a un error de medida en el contador (normalmente subcontaje, alguna vez sobrecontaje).

**Nivel 4.** Criterio que contempla el control de acometidas.

$Q_{ical}$  Caudal incontrolado, consumido y no medido dada la ausencia de contadores, por acometida autorizada legal. Muy frecuente en Inglaterra.

$Q_{icaí}$  Caudal incontrolado, consumido y no medido por la ausencia de contadores por acometida subrepticia ilegal.

Hay que definir, finalmente, un último caudal, combinación de dos de los términos incluidos en el árbol. Es el caudal suministrado a los abonados, que denominaremos  $Q_s$ , análogo al definido por OFWAT, 1996. Es, por lógica, la suma del caudal registrado y del caudal incontrolado consumido. Y, tal como se comprueba a partir del diagrama de la Figura 1, se cumple:

$$Q_s = Q_r + Q_{ic} = Q - Q_{if} \quad (1)$$

La presente clasificación de los diez caudales circulantes por una red de distribución, el caudal suministrado más los nueve incluidos en el árbol, es, de acuerdo con los objetivos que se persiguen, adecuada por cuanto en todo balance hídrico, necesario para efectuar la auditoría del sistema, a todo volumen le corresponde un lugar concreto en el árbol del diagrama de la Figura 3. Forma, pues, parte de un término específico, y sólo de uno. Así por ejemplo, el riego no medido de un jardín público o el consumo de una escuela pública sin contador, solo puede ser incluido en el término  $Q_{ical}$ . No cabe en otro lugar.

Como se ha dicho los criterios que definen el árbol están ordenados en el sentido de mayor a menor eficacia en la gestión. Por eso todo criterio inferior queda incluido en el superior. De este modo, la mayor dejadez que cabe en un abastecimiento, la falta de conocimiento de las acometidas reales del sistema es la que configura el cuarto y último nivel. Una deficiencia de menor gravedad nos la da el tercer nivel que viene definido por el estado del parque de contadores. Puede haber bien una falta de medición, por la ausencia de contadores o bien, este hecho resulta inevitable, una medición incorrecta. Mayor esfuerzo comporta tener la red en buen estado, circunstancia a la que se refiere el segundo nivel. Finalmente el primer criterio lo constituye la eficacia global en la gestión del sistema de distribución ya que, si esta es buena, los criterios siguientes dejan de tener sentido, por cuanto estos ya están incluidos en aquel.

No podía ser de otro modo, ya que el desglose progresivo de términos no hubiera sido posible de no haberse llevado a cabo de acuerdo con la progresión que demanda la lógica del sistema. Todo ello resulta fundamental para definir de manera conveniente los diferentes rendimientos del sistema a los que nos referiremos en el siguiente apartado.

Las precedentes reflexiones relativas a los niveles de exigencia no son de aplicación en países con escasa cultura de medición de los consumos y redes de distribución en aceptable estado de conservación. Tal es el caso, por ejemplo, de Inglaterra. Sin embargo las directrices actuales, incluso en Inglaterra, no admiten discusión: todos los caudales deben ser medidos, por lo que la valoración que se ha efectuado acabará siendo, en unos años, universalmente válida. Se insiste en esta cuestión en el último párrafo del presente epígrafe.

Para concluir, es conveniente comparar este balance con los que hasta ahora más se han venido utilizando, elaborados por grupos de trabajo de las dos asociaciones profesionales de mayor relieve mundial en los temas relativos a abastecimientos urbanos: la American Water Works Association (AWWA, 1.990), y la IWSA, a partir del mes de septiembre de 1999 convertida en IWA. La propuesta de la IWSA aún no ha visto de manera formal la luz, aunque sus directrices básicas ya han sido publicadas por Hirner y Lambert, dos activos componentes del grupo de trabajo correspondiente (Hirner, 1998; Lambert y col., 1998).

Las propuestas son bastante similares, si bien podemos destacar algunas diferencias relevantes. En primer lugar la auditoría que aquí se propone se centra, de manera exclusiva, en la red de distribución, no contemplándose las potenciales pérdidas de agua en aducciones, depósitos de cabecera, en las plantas potabilizadoras, etc. Estas deberían tratarse de manera independiente. Los balances de la IWSA (Hirner, 1998; Alegre, 1999) y de AWWA (AWWA, 1990), si los contemplan, integrándolos en el balance general del sistema.

Una segunda diferencia es la relativa a los criterios a partir de los cuales el balance queda establecido. En la propuesta aquí efectuada es la medición de los caudales el criterio básico, por entenderse que desde un punto de vista estrictamente técnico es el más adecuado. Sin embargo para la IWSA (Hirner, 1998) el primer criterio atiende al consumo de agua autorizado (con independencia de que sea o no medido), frente a las pérdidas totales en el sistema. Lógico por cuanto la IWSA es una organización de carácter internacional que debe representar a todos los países que la integran y son muchos los que no miden el agua que consumen los abonados, no teniendo sentido alguno, en estos casos, el plantear en primer lugar el criterio de medición pese a que la lógica de una buena gestión así lo demanda. De hecho, incluso en los EEUU e Inglaterra, países de escasa tradición en la medición del consumo, la situación está cambiando con rapidez (Dickinson, 1999; OF WAT, 1996).

### RENDIMIENTOS HÍDRICOS PORCENTUALES DE UNA RED DE AGUA

Se procede a definir los rendimientos porcentuales que caracterizan la eficiencia hídrica de un abastecimiento de agua potable. Son:

- Rendimiento global del sistema  $\eta_s$ . Es la relación entre el caudal registrado y el caudal total inyectado, o sea:

$$\eta_s = \frac{Q_r}{Q} \quad (2)$$

- Rendimiento de la red,  $\eta_r$ , cociente entre el caudal suministrado a los abonados y el caudal total inyectado:

$$\eta_r = \frac{Q_s}{Q} \quad (3)$$

- Rendimiento de la gestión técnico-administrativa efectuada,  $\eta_g$ , que relaciona el caudal registrado y el caudal suministrado:

$$\eta_g = \frac{Q_r}{Q_s} \quad (4)$$

Fácil es comprobar que se cumple:

$$\eta_s = \frac{Q_r}{Q} = \frac{Q_r \cdot Q_s}{Q_s \cdot Q} = \eta_g \cdot \eta_r \quad (5)$$

La significación que cada uno de los rendimientos tiene es clara. El rendimiento de la red cuantifica su estado físico y su modo de operación (control del nivel de presiones, etc.). El rendimiento de la gestión técnico-admini-

nistrativa, representa hasta qué punto se registra el caudal suministrado al conjunto de abonados. Y, finalmente, el rendimiento del sistema representa la síntesis del abastecimiento como conjunto. Contempla, por tanto, el rendimiento de la propia red de distribución así como el de la misma gestión.

### El problema de la escala de tiempos

Estos tres rendimientos definidos a partir de los caudales, representan valores instantáneos y pueden, por tanto, ser variables en un corto plazo de tiempo (horas). Habida cuenta la práctica habitual de simular el comportamiento dinámico de las redes de distribución de agua mediante los denominados modelos cuasi - estáticos (Cabrera y col. 1995), que utilizan caudales medios horarios, los rendimientos obtenidos a partir de estos caudales representan asimismo valores medios referidos a esta unidad temporal.

Lógicamente, cuando se presenta el balance anual de la gestión de un abastecimiento, siendo el rendimiento uno de los datos más relevantes de tal gestión técnica, su valor se entiende extendido a un plazo de tiempo muy superior que, como mínimo, puede ser el periodo de lectura de los contadores de los abonados, a partir del cual se determina el valor de  $V_r$ . De hecho, a partir de  $V_r$ , suma de los registros correspondientes a una lectura, digamos bimensual, el rendimiento medio del sistema calculado sobre este periodo de tiempo vendría dado por:

$$\bar{\eta}_s = \frac{V_r}{V} = \frac{\int Q_r \cdot dt}{\int Q \cdot dt} = \frac{\sum Q_r \cdot \Delta t}{\sum Q \cdot \Delta t} \quad (6)$$

integral que es necesario discretizar por cuanto el cálculo final del rendimiento medio global del sistema se efectúa a partir de los valores horarios correspondientes a la simulación en periodo extendido.

El rendimiento medio del sistema será el resultado de dividir el volumen registrado  $V_r$  correspondiente a la diferencia entre dos lecturas consecutivas de los contadores de los abonados por, de acuerdo con (6), el valor suma de los caudales inyectados al sistema durante el tiempo transcurrido entre tales lecturas.

Sin embargo, y como ya hemos dicho, desde una perspectiva operacional, el rendimiento instantáneo de la red, — o mejor su valor medio horario—, tiene un importante significado físico, toda vez que depende en gran medida del nivel de presiones y éste, en algunos casos, puede ser muy variable con el tiempo. Su determinación pasa por la evaluación de las fugas medias horarias del sistema que son sensibles a las variaciones de presión. Ello exige, a su vez, el conocimiento de la modulación diaria de los consumos a fin de poder resolver el problema de la escala de tiempos que se presenta para, a partir de los volúmenes registrados en el periodo de lectura de los contadores  $V_r$ , obtener los caudales registrados instantáneos  $Q_r$ . Y dado este valor y conocido  $Q$ , también lo es  $Q_r$ .

La posterior subdivisión de  $Q_r$  en sus dos sumandos, proporciona  $Q_{if}$ , valor que finalmente nos da el rendi-

miento de la red  $\eta_r$ . Ello será abordado en epígrafes posteriores.

Nos referiremos, para concluir, al tercero de los rendimientos  $\eta_g$ , o rendimiento de gestión técnico-administrativa. Se define como el cociente entre el valor del caudal registrado,  $Q_r$ , calculado a partir del volumen de agua que consta se ha puesto a disposición de un abonado, y el valor del caudal suministrado  $Q_s$ , o sea el caudal total real entregado a los usuarios, haya o no constancia registrada de ello. La diferencia entre ambas cantidades es, en cierto modo, un indicador de la capacidad de gestión técnico-administrativa de la empresa de suministro, por cuanto representa la cantidad de agua que, sin que se pierda a través de fugas, no existe conocimiento sobre su destino final. Le llamaremos  $Q_{gd}$ , sea, caudal de gestión deficiente, cuyo valor coincide, como es lógico, con  $Q_{ic}$ , ya que:

$$Q_{gd} = Q_s - Q_r = (Q_r + Q_{ic}) - Q_r = Q_{ic} \quad (7)$$

por lo que el rendimiento de gestión  $\eta^*$ , se puede expresar como:

$$\eta_g = \frac{Q_r}{Q_s} = \frac{Q_s - Q_{ic}}{Q_s} = 1 - \frac{Q_{ic}}{Q_s} = 1 - \frac{Q_{gd}}{Q_s} \quad (8)$$

En definitiva, el valor de  $Q_{ic}$ , o el de su equivalente  $Q_{gd}$ , constituye un indicador de la bondad de la gestión. Valores significativos de este caudal indican "déficit importante" de gestión. De otra parte, y tal cual se desprende del diagrama de la *Figura 1*,  $Q_{gd}$  es la suma de hasta tres sumandos diferentes, toda vez que se verifica:

$$Q_{ic} = Q_{ice} + Q_{ical} + Q_{icai} = Q_{gd} \quad (9)$$

Tratar de eliminar completamente el primero de los sumandos del segundo miembro, o sea el error de los contadores por subcontaje, o, en alguna rara ocasión, sobrecontaje (Hirner, 1998), resulta en la práctica tarea prácticamente imposible y la aspiración que debe tener todo gestor es limitar su magnitud hasta un valor razonable, digamos un (3-4) %. Como quiera que a ello nos referiremos más adelante, no adelantamos otros comentarios al respecto. En síntesis, su presencia hay que aceptarla como *normal* ya que estará presente en cualquier gestión, por eficaz que esta sea.

Sin embargo, los otros dos sumandos pueden ser perfectamente eliminados. De hecho la presencia del primero de ellos  $Q_{ical}$  es sinónimo de gestión *mediocre*. El calificativo puede endurecerse hasta *ineficaz* cuando se tenga una contribución significativa en forma de  $Q_{icai}$ , por cuanto ello equivale a decir que robos y tomas de agua fraudulentas dejan de ser una simple anécdota. Los diferentes sumandos que configuran  $Q_{ic}$ , de acuerdo con (9), permite establecer los siguientes rendimientos técnico-administrativos:

- Rendimiento de gestión normal,  $\eta_{gn}$

$$\eta_{gn} = \frac{Q_r}{Q_s} = 1 - \frac{Q_{ic}}{Q_s} = 1 - \frac{Q_{ice}}{Q_s} \quad (10)$$

$$\text{con } Q_{ic} = Q_{ice} \text{ y } Q_{ical} = Q_{ical} + Q_{icai} = 0$$

- Rendimiento de gestión mediocre,  $\eta_{gm}$

$$\eta_{gm} = \frac{Q_r}{Q_s} = 1 - \frac{Q_{ic}}{Q_s} = 1 - \frac{Q_{ice} + Q_{ical}}{Q_s} \quad (11)$$

con  $Q_{icai} = 0$

- Rendimiento de gestión ineficaz,  $\eta_{gi}$

$$\eta_{gi} = \frac{Q_r}{Q_s} = 1 - \frac{Q_{ic}}{Q_s} = 1 - \frac{Q_{ice} + Q_{ical} + Q_{icai}}{Q_s} \quad (12)$$

Los rendimientos definidos de este modo verifican:

$$\eta_{ng} > \eta_{gm} > \eta_{gi} \quad (13)$$

Las precedentes definiciones presentan un carácter más cualitativo que cuantitativo, ya que una cuestión es la presencia de un determinado sumando y otra, bien diferente, el orden de magnitud del rendimiento final. Para ilustrar cuanto acabamos de exponer, y dar contenido real a estos rendimientos, vamos a referirnos al abastecimiento de Zurich (Skarda, 1997), donde figuran, al objeto que nos ocupa, los siguientes valores significativos:

Agua registrada (f $Q_r$ dt, referida al periodo correspondiente)		90.7 %
Agua facturada y, por tanto, cobrada		85.0 %
Agua consumida en usos públicos		3.2 %
Agua utilizada por la propia compañía		2.5 %
Total de agua registrada		90.7 %
Agua incontrolada (f $Q_i$ dt, referida al periodo correspondiente)		9.3 %
Fugas (f $Q_{if}$ dt, en el periodo)		5.3 %
Subcontaje (f $Q_{ice}$ dt, en el periodo)		4.0 %
Total de agua incontrolada		9.3 %
Agua suministrada (suma de la registrada + el subcontaje)		94.7 %

**Tabla 1.** Valores significativos del abastecimiento de Zurich (Skarda, 1997)

Son estos unos valores excelentes que proporcionan los siguientes rendimientos:

- Rendimiento global del sistema,  $\eta_s = 90,7 \%$ .
- Rendimiento de la red,  $\eta_r = 94,7 \%$
- Rendimiento de gestión, que calificamos de normal, toda vez que no hay constancia de consumo no medido. Se tiene  $\eta_{gn} = V_r / V_s = 0,907/0,947 = 95,8 \%$ . Lógicamente se cumple la igualdad :

$$\eta_s = \eta_r \cdot \eta_g \quad (14)$$

los resultados, con un rendimiento del sistema por encima del 90% implican, de manera automática, que tanto el rendimiento de la red como el de la gestión serán aún superiores. Pueden, por tanto, ser calificado de excelentes (ver más adelante la *Tabla 2*).



Es importante destacar que en el trabajo de Skarda, 1997 no figura el período sobre el cual han sido calculados estos valores. En cualquier caso ello no tiene relevancia alguna, toda vez que son valores cambiantes en función de la mejora o el deterioro de la gestión. Lo normal, sin embargo, es que estén referidos a un plazo de tiempo razonablemente amplio y que bien pudiera coincidir con el período de tiempo comprendido entre dos lecturas consecutivas de los contadores o, bien, estar referidos a un ejercicio anual.

Se es consciente de que la propuesta precedente equivale a calificar de mediocre, entre otras muchas, las gestiones de un buen número de abastecimientos de los EEUU así como de la mayor parte de los sistemas ingleses. Pero, tal cual se ha comentado, en estos países ya se están arbitrando las medias oportunas para ir corrigiendo esta situación. Con todo, es de justicia destacarlo, en los EEUU los esfuerzos por ahorrar agua son notables (Dickinson, 1999), en tanto que Inglaterra, y desde la última sequía en 1995, se vienen realizando importantes actuaciones dirigidas a mejorar el rendimiento de sus redes de distribución (Lambert y col., 1998), de manera que constituye un buen ejemplo para países que, como España, tienen sequías más frecuentes y agudas, y no arbitran medidas institucionales claras y precisas tendientes a fomentar el ahorro de agua urbano ni a mejorar el rendimiento de las redes. Posiblemente se echa en falta un organismo similar al OFWAT.

Concluiremos este apartado con una propuesta de calificación de la gestión de los sistemas de distribución de agua en función de sus rendimientos (Tabla 2). Para la elaboración de la misma se han considerado los órdenes de magnitud que aparecen en recientes publicaciones. En una de ellas, la del Grupo de trabajo de detección de fugas y agua registrada del AWWA, (AWWA Leak Detection and Water Accountability Committee, 1996), se manifiesta que un rendimiento global del sistema superior al 90 % es hoy posible gracias a los avances tecnológicos y a las nuevas estrategias de gestión, mientras que un valor del 85% puede considerarse satisfactorio.

De otra parte en OFWAT, 1996, se dan los rendimientos de las redes de distribución de todas las compañías que operan en Inglaterra y Gales. Hay que hacer constar que debido a que un buen número de abonados de estas compañías carecen de contador, los valores del rendimiento que se detallan se refieren exclusivamente a las tuberías de la compañía y no incluyen las fugas de las acometidas de los abonados que, en muchos casos, pueden tener gran importancia. Por ello los valores que allí figuran pudieran parecer elevados. En particular, y para el año 1995 aparecen comprendidos entre el 87% (Anglian Water Utility) y el 70% (Yorkshire Utility). Insistimos en que son valores del  $\eta_r$  que no incluyen las fugas en las acometidas, por lo que haciendo uso de la definición que hemos establecido, los valores finales de  $\eta_s$  deberían ser revisados a la baja.

En Van der Willigen, 1997 se relacionan los rendimientos globales  $\eta_s$  de los principales abastecimientos de agua potable en Holanda, correspondientes a 1994.

Son excelentes toda vez que se sitúan en una horquilla tan estrecha como laudable (92-97 %).

Finalmente en AEAS, 1996, y a través de una encuesta a los abastecimientos, se afirma que, en media, el rendimiento de los sistemas de distribución de agua en España,  $\eta_s$ , durante 1994 fue del 71%, resultado que debe ser manejado, cuanto menos, con prudencia toda vez que es obtenido a partir de los datos suministrados por las propias compañías de suministro. Bueno será recordar que en Inglaterra el OFWAT verifica los resultados de las compañías. Otras cuestiones relativas a las características del suministro de agua potable en España se encuentran en Cabrera y García-Serra, 1997.

En síntesis, a partir del valor del rendimiento global porcentual,  $\eta_s$ , de un abastecimiento, su gestión podría ser calificada como sigue:

Rango	Calificación
$\eta_s > 0.9$	Excelente
$0.8 < \eta_s < 0.9$	Muy bueno
$0.7 < \eta_s < 0.8$	Bueno
$0.6 < \eta_s < 0.7$	Regular
$0.5 < \eta_s < 0.6$	Malo
$0.5 < \eta_s$	Inaceptable

**Tabla 2.** Calificación de la gestión de un abastecimiento en función de  $\eta_s$

Observar que para alcanzar estos rendimientos del sistema, los rendimientos parciales deben ser muy superiores. Y hay que insistir, una vez más, en que estos valores, en si mismos, pueden no representar con precisión la gestión que se lleva a cabo. Y es a esta cuestión a la que ya nos referimos.

### INDICADORES DE GESTION RELATIVOS

Son muchos los autores contrarios a la utilización de rendimientos porcentuales porque, en determinadas ocasiones, no son aptos para establecer comparaciones entre abastecimientos. Y ello por cuanto no relacionan la causa con su efecto (OFWAT, 1997). En el caso que nos ocupa, las fugas de una red, la pérdida de volumen del sistema depende, fundamentalmente, de cuatro factores: longitud y presión de la red, tiempo de servicio y número de acometidas. Son ejemplos de indicadores relativos para expresar el nivel de fugas de un sistema los siguientes:

- Volumen fugado por unidad de tiempo (por ejemplo  $\text{m}^3/\text{h}$ ).
- Volumen fugado por unidad de longitud y de tiempo (por ejemplo  $\text{m}^3/\text{km}$  y  $\text{h}$ ).
- Fugas por unidad de longitud, tiempo y presión (por ejemplo  $\text{m}^3/\text{km}$  h y mca).
- Fugas por unidad de longitud, tiempo y acometida (por ejemplo  $\text{m}^3/\text{km}$  h y acometida).

Cualquiera de estos indicadores reduce a un denominador común el problema, de manera que las comparacio-

nes ya van a resultar correctas. Para verlo con claridad, tan solo debemos cambiar los tiempos de suministro. Supongamos, por ejemplo, un abastecimiento que, dada su limitación de recursos y el elevado nivel de fugas de su red, interrumpe el servicio un determinado número de horas al día. Para resolver el problema se lleva a cabo un activo plan de mejora de su rendimiento que permite ir aumentando las horas de funcionamiento del sistema, al tiempo que los abonados pueden ir disponiendo de una mayor dotación de agua diaria. El ejemplo numérico que se detalla se ha obtenido de Lambert y col. (1998). Es el siguiente:

*A través de un distrito hidrométrico se suministra agua a 5.000 personas, inicialmente durante diez horas al día ya que solo se dispone de un volumen de suministro constante e igual a 1.000 m<sup>3</sup>/día. Las fugas del sistema son, inicialmente, iguales a 50 m<sup>3</sup>/h y, en cuatro etapas sucesivas y a intervalos de 10 m<sup>3</sup>/h, este valor es reducido hasta alcanzar a los 10 m<sup>3</sup>/h.*

Tal reducción de las fugas permite aumentar los tiempos de suministro así como las dotaciones diarias, todo ello de acuerdo con la *Tabla 3*.

La conclusión que se extrae a partir del indicador global porcentual es que el nivel de fugas en el sistema ha mejorado de manera importante, pasando del 50% al 24 %. Esto es, el volumen fugado se ha reducido a la mitad del valor inicial, aunque las condiciones no son las mismas, dado que se ha cambiado el número de horas de servicio. Sin duda, representando un avance notable, no se corresponde con la realidad de los hechos, toda vez que, en igualdad de condiciones, o sea relacionando efecto con causa, o lo que es lo mismo, expresando las fugas con el indicador relativo m<sup>3</sup>/h, las pérdidas se han reducido a la quinta parte de las inicialmente existentes. En otras palabras, la mejora del valor porcentual, o absoluto, del rendimiento no refleja correctamente la importancia del esfuerzo realizado. Obviamente el uso de estos valores puede inducir a errores conceptuales notables. Por ello, se puede recurrir a ellos en técnicas benchmarking, que demandan condiciones similares.

La *Tabla 3*, además, nos sirve para mostrar con toda claridad lo perniciosas que son las interrupciones temporales de servicio, o cortes de agua, cuya única justificación es disimular la ineficiencia de las redes. Nada tienen que ver con la escasez de agua salvo, como acabamos de ver, en el caso de que el nivel de fugas sea elevado (Cabrera y col., 1998).

Pero los rendimientos porcentuales no solo pueden inducir a equívocos si las condiciones de servicio son diferentes. Pueden, en sí mismos, originar problemas de interpretación debido a su carácter porcentual. De hecho es bien sabido que el rendimiento de una red, expresado de este modo, mejora a medida que el consumo aumenta. Para evidenciarlo recurrimos a un ejemplo de Hirner, (1998). Se trata de un abastecimiento que está suministrando agua las 24 horas al día en el que se contemplan disminuciones en la dotación de los abonados generadas por campañas de ahorro de agua. Constatar que, a igualdad de rendimiento relativo (m<sup>3</sup>/km y hora), el rendimiento porcentual depende de la dotación, generando, por tanto, una nueva y notable confusión. Para centrarnos en lo que nos ocupa, y como en el caso precedente, se simplifica el balance admitiendo que el agua inyectada al sistema solo consta de dos sumandos: agua registrada y agua perdida en fugas. Los datos soporte son:

*Una población tiene 500.000 habitantes y una red de 1000 km. La presión es constante a lo largo del día. Determinar el rendimiento porcentual,  $\eta_r$ , para diferentes dotaciones  $q_s$  (litros por habitante y hora).*

Por suponer que la presión se mantiene constante, con independencia de los caudales que circulan, el volumen de agua perdido en fugas es invariable. Tal volumen viene dado por el indicador relativo  $q_L$  (metros cúbicos por hora y kilómetro de red) igual a 24 m<sup>3</sup>/día/km equivalente a 1 m<sup>3</sup>/h/km. Para una red de 1000 km, el volumen total perdido es 24000 m<sup>3</sup>/h. En estas condiciones la *Tabla 4* muestra los valores del  $\eta_r$  en función de la dotación.

Se constata, pues, que cuando el volumen registrado (que coincide con el consumido) aumenta, el rendimiento volumétrico también crece, pese a que el volumen perdido en fugas en la red sigue siendo el mismo.

Esto mismo se puede ver de forma clara en la *Figura 4*. En el eje y se representa el indicador de rendimiento relativo,  $q_{if}$ , o caudal de fugas por kilómetro, mientras que en el eje x se muestra el complementario del rendimiento porcentual del sistema 1-  $\eta_r$ , o sea, el valor complementario, en tanto por uno, de la última columna de la *Tabla 4*. Cada una de las curvas representa una dotación. A la más baja, 96 l/hab/día le corresponde un  $q_s=2\text{m}^3/\text{h}/\text{km}$ . La figura evidencia que, a igualdad de  $q_{if}$  se obtienen, para distintas dotaciones diferentes rendimientos.

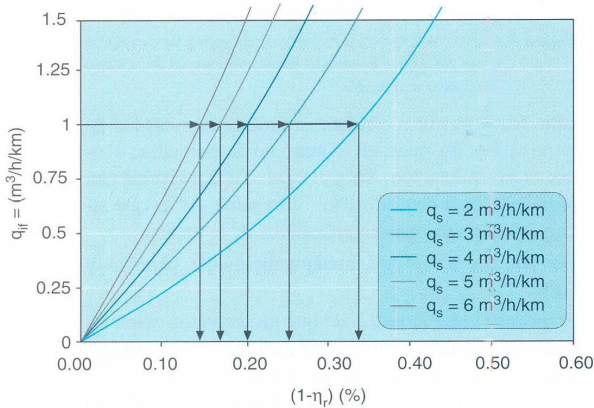
	Caudal inyect.	Fugas	Horas de	Consumo		Fugas	
	Q (m <sup>3</sup> /día)	m <sup>3</sup> /hora	servicio	I/hab y día	m <sup>3</sup> /día	m <sup>3</sup> /día	%
<b>Inicial</b>	1.000	50.0	10	100	500	500	50
<b>Etapas 1</b>	1.000	40.0	11	112	560	440	44
<b>Etapas 2</b>	1.000	30.0	13.3	120	600	400	40
<b>Etapas 3</b>	1.000	20.0	17.5	130	650	350	35
<b>Final</b>	1.000	10.0	24	140	760	240	24

*Tabla 3. Tabla comparativa de rendimientos absolutos y relativos*



Dotación (1/hab/día)	Caudal registrado (m <sup>3</sup> /día)	Caudal de fuga (m <sup>3</sup> /día)	Caudal total (m <sup>3</sup> /día)	Rendimiento Red (r)
96	48000	24000	72000	66,67
144	72000	24000	96000	75,00
192	96000	24000	120000	80,00
240	120000	24000	144000	83,33
288	144000	24000	168000	85,71

**Tabla 4.** Variación del rendimiento de la red con la dotación de agua



**Figura 4.** Variación del rendimiento porcentual con la dotación

Sin embargo, y aún con todas sus ventajas, hay que concluir que los indicadores relativos del rendimiento son más propios de especialistas en tanto que los porcentuales resultan más intuitivos y cuando se analiza la evolución en el tiempo de la mejora de un mismo abastecimiento son, ciertamente, adecuados. Cumplen, pues, cada uno su misión.

#### AUDITORÍA DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

La auditoría que se propone consiste en determinar todos y cada uno de los rendimientos definidos en el tercer apartado. Se parte de la base de que el sistema cuenta con caudalímetros registradores en los puntos de inyección de agua al sistema y que, la gran mayoría de los usos, si son todos aún mejor, cuentan con contadores individuales. Si este no es el caso, la facturación a los abonados que no disponen de contador es estimada atendiendo a diversos criterios (superficie de la vivienda, de la parcela, número de baños, etc.) Esta situación, como se ha dicho, no es nada infrecuente, si bien con el paso del tiempo tiende a remitir. De otra parte, y en ello hay que insistir, la ausencia de medida del agua entregada a los abonados no presupone que el rendimiento de la red sea malo. De hecho en Inglaterra, a base de medir caudales nocturnos se tiene, en no pocos casos, la convicción de que el nivel de fugas es razonablemente bajo. Pero, sin embargo, la ausencia de medidores de caudal obvia una información básica para evaluar con precisión el rendimiento del sistema.

Los caudalímetros de entrada proporcionan  $Q$  mientras que  $V_r$  se obtiene a partir de la lectura de los contadores instalados en los puntos de consumo. El conocimiento de  $Q_r$ , a partir de  $V_r$ , requiere la curva de modulación de los caudales de consumo que, a su vez, depende del uso. Precisar la modulación de consumos en función de los diferentes usos (doméstico, industrial, oficial, etc.), supone registrar en el tiempo los caudales de consumo o sea, medir. En cualquier caso siempre se puede recurrir a la literatura (Yanov y col., 1987; Bowen y col., 1993; Arregui, 1999).

La auditoría no contempla errores de medida en los puntos de inyección, lo que no es del todo cierto, toda vez que desde una perspectiva metrológica el error garantizado en un contador nuevo se sitúa, en el mejor de los casos, en la horquilla del  $\pm 2\%$ . Tratándose de una población muy reducida deben articularse programas específicos de mantenimiento (Van der Linden, 1998) que impidan una ampliación en el margen de error que pudiera cuestionar la validez de un dato de partida básico en el cálculo de los rendimientos. Conocido, pues,  $Q$  y obtenido un valor de  $Q_r$ , su diferencia proporciona  $Q_i$  que, de acuerdo con el Figura 1, consta de cuatro términos:

$$Q_i = Q_{if} + Q_{ice} + Q_{ical} + Q_{icai} \quad (15)$$

El proceso de análisis se estructura, siguiendo el Figura 1, en orden descendente. Por ello se aborda, en primer lugar, el cálculo de  $Q_{if}$ .

#### Primer sumando $Q_{if}$

Tal cual se ha comentado, son conocidos tanto el caudal inyectado en la red, a través de los diferentes puntos de suministro  $Q$ , como el caudal  $Q_r$ , a partir de los volúmenes registrados por los diferentes contadores de los usuarios y de las curvas de modulación de su consumo. El caudal incontrolado  $Q_i$ , es la resta de ambos (ver el diagrama de Figura 1). Este caudal está compuesto, a su vez, por dos sumandos  $Q_{ic}$  y  $Q_{if}$ . Conocemos, pues, el resultado que proporciona la suma de ambos pero no el valor de cada uno de ellos. Se dan, a continuación, las ideas básicas en las que se apoya una metodología, desarrollada por los autores para determinarlos (Almandoz y col., 1999). Es importante significar, de entrada, que tal discriminación sólo es posible con un buen conocimiento hidráulico de la red, equivalente a disponer de su modelo matemático.

Conocido, pues, el caudal incontrolado  $Q_i$  y disponiendo de su modelo, las hipótesis en las que se apoya esta metodología de discriminación de  $Q_{if}$  y  $Q_{ic}$ , son las siguientes:

- Se admite que el término de fugas  $Q_{if}$  es proporcional a la raíz cuadrada de los niveles de presión de la red de distribución aunque, de acuerdo con Lambert y col (1998), otras hipótesis se contemplan en Almandoz y col. (1999). En general en las horas valle, con un nivel de presiones superior, el término de fugas será mayor que en horas punta. El método contempla estados de conservación no homogéneos.

- El término  $Q_{ie}$  sigue una evolución similar a la de las curvas de demanda de la red de distribución. No hay duda de que tal supuesto es aceptable, sobre todo cuando el término  $Q_{ica}$  es relevante, o sea, los abonados con un consumo estimado representan un número significativo.

La primera de las hipótesis solo será de utilidad si disponemos para nuestra red de un modelo matemático fiable y suficientemente preciso. La segunda se apoya en un buen conocimiento de las curvas de modulación de los distintos usos. En definitiva, y en ello insistimos, se necesita, además de medir bien, buena información para poder dividir analíticamente el término  $Q_i$  en sus respectivos sumandos  $Q_{if}$  y  $Q_{ic}$ .

El método, en esencia, consiste en explorar todos los posibles valores que puede representar el término de fugas  $Q_{if}$  frente a  $Q_i$ , a través de la variable  $x$ , que representa su cociente  $Q_{if}/Q_i$ . Para ello se estudia la respuesta de la red, con una simulación en período extendido (Grupo Mecánica de Fluidos, 1996) para valores diferentes de  $x$  ( $0 < x < 1$ ).

En otras palabras, a cada  $x$  le corresponde un valor único de la constante que evalúa el nivel de fugas en cada nudo, impuesta la condición de que la suma de los caudales fugados en los diferentes nudos coincide con el valor  $Q_{if}$ . Este queda definido una vez se ha supuesto el valor de  $x$ , por cuanto su denominador  $Q_i$  es conocido, al tiempo que  $Q_{ic}$  y  $Q_{if}$  son complementarios.

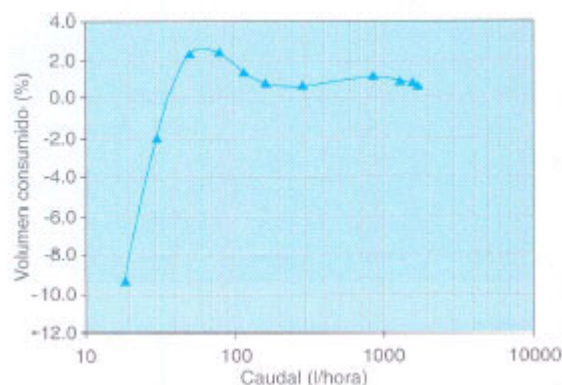
Las numerosas simulaciones llevadas a cabo, evidencian una relación directa entre el valor de  $x$  y la desviación tipo del caudal inyectado de entrada, desviación calculada a partir de sus valores horarios. Como quiera que los caudalímetros de entrada proporcionan el valor exacto de  $Q$ , el valor de  $x$  se identifica a partir de la simulación que más se aproxime a la medición efectuada. En otras palabras, se "calibra" el valor de  $x$ , y a partir del cual se identifica  $Q_{if}$  y, cubierta esta etapa, se pueden evaluar los rendimientos  $\eta_s$ ,  $\eta_f$  y  $\eta_g$  definidos.

Tradicionalmente  $Q_{if}$  ha venido estimándose midiendo los caudales nocturnos. Este enfoque es, sin duda, más simple pero tiene una fuerte limitación por cuanto no puede ser aplicado en abastecimientos con consumos nocturnos elevados, originados por industrias o locales de ocio. Y, además, por ser una estimación, carece de precisión. Ambos presentan una notable similitud: resultan insolventes ante la presencia de aljibes domiciliarios en la red.

### Segundo sumando $Q_{ice}$

Determinado, a partir de la precedente etapa, el valor de  $Q_{ic}$ , el valor de  $Q_{ice}$  proporciona  $Q_{ica}$  (ver Figura 1). En lo que sigue, se resume una propuesta de metodología de cálculo de este sumando que no puede ignorarse en el marco de una auditoría general.

En efecto, se trata de un término que puede llegar a alcanzar valores significativos. Se ha visto como un abastecimiento bien gestionado como el de Zurich (Skarda, 1997), admite un subcuenta del 4% del volumen inyec-



**Figura 5.** Curva característica de error de un contador de chorro único de 15mm ensayado en el laboratorio del Grupo Mecánica de Fluidos

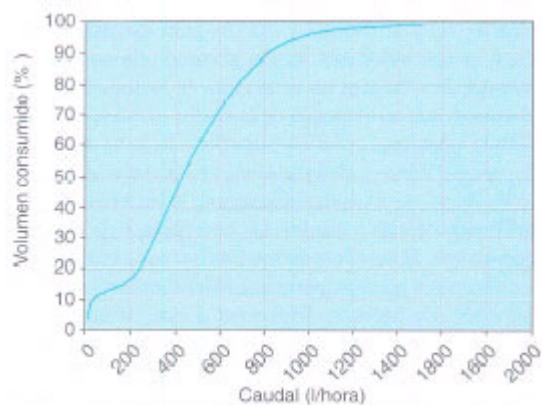
tado. Otros gestores estiman, sin más, una cantidad en torno al 5%. Es, pues, un término no despreciable, a tomar en consideración. Arregui y col., 1998, efectúan una propuesta para determinarlo. Se resume, en lo que sigue, los aspectos más significativos de la misma.

Dos son las causas que, fundamentalmente, generan el error:

En primer lugar el hecho de que no en pocos casos las fugas que aparecen en las instalaciones de los abonados, y que pueden suponer un porcentaje no despreciable de su consumo, no alcancen el umbral de arranque del contador. Esta circunstancia se agrava con el envejecimiento del contador, que retrasa tal umbral. De este modo gran número de fugas, como las debidas a válvulas de cisterna deterioradas o goteos en grifos pasan a ser consumos incontrolados.

En segundo lugar por el propio error de medida del parque de contadores, cuya característica evidencia imprecisiones notables a bajos caudales y una alta fiabilidad dentro de un amplio rango de valores (Figura 5).

Estas curvas características de error de los contadores deben enfrentarse a las de consumos agregados de los abonados, en las que los caudales de demanda de los usuarios aparecen ordenados porcentualmente. La Figura 6 muestra un perfil típico de un usuario doméstico.



**Figura 6.** Curva de demanda agregada media de 18 abonados (medición Agosto-1998)

De este modo, si se dispone de las curvas características del error de medida del parque de contadores, y se tienen ordenados, con su peso porcentual, los caudales consumidos por los diferentes usuarios, puede determinarse el error global de medida.

Atendiendo a su edad y características, el parque de contadores se estructura en diferentes grupos o poblaciones. Seguidamente se ensayan muestras de cada grupo y, para determinar la precisión global de la muestra, se procesan los resultados con técnicas estadísticas.

La curva agregada de demanda debe obtenerse, asimismo a partir de una muestra de los usuarios del abastecimiento, por medición directa. Estas medidas, por efectuarse in situ, comportan mayor laboriosidad que las precedentes por lo que, las más de las veces, se obtienen directamente de la literatura (Yanov y col., 1987; Bowen y col., 1993, Arregui, 1999). Un buen indicador de la importancia que tiene, para la buena gestión de los abastecimientos, la evaluación de  $Q_{ice}$  son los numerosos autores que han dedicado esfuerzos al tema (Allen, Judd, 1993, DeOreo, 1996, Arregui y col., 1998, Male y col., 1985 y Arreguín-Cortés y Ochoa-Alejo, 1997, entre otros muchos).

### Tercer sumando $Q_{ical}$

Cubierta la etapa precedente, a partir de  $Q_{ic}$  y  $Q_{ice}$  se puede determinar  $Q_{ica}$  (Figura 1) por lo que la auditoría estará completa determinado  $Q_{ical}$  puesto que, de inmediato, proporciona su valor complementario  $Q_{ical}$ .

Tal cual se ha comentado, en abastecimientos con abonados sin contador, este término alcanza gran relevancia. Se les factura estimando sus consumos lo cual, a medida que los precios son significativos, genera importantes problemas. Sin duda están en franca recesión. No es este el caso de los usos que no son objeto de facturación, el grupo que con mayor frecuencia contribuye al valor  $Q_{ical}$ . Son, por lo general, consumos públicos tales como baldeos de calles, limpieza de alcantarillados, fuentes, riego de parques y jardines, consumo de la propia compañía distribuidora y/o de sus empleados, bocas de incendio, edificios públicos y oficiales (ayuntamiento, administraciones, hospitales, escuelas, campos de deporte municipales, universidades públicas, etc.). En la actualidad no es frecuente medir lo que no va a cobrarse, si bien también esta situación va cambiando con lentitud porque la inversión que comporta es mínima si se compara con la relevante información que proporciona.

Resulta complejo, es evidente, precisar el valor de  $Q_{ical}$ . Sin embargo, y debido a la frecuencia con que en muchos países se presenta esta circunstancia, son abundantes las referencias con propuestas para estimar los sumandos que componen  $Q_{ical}$ . Entre otros AWWA, 1990 y Ochoa y Bourguett, 1998.

### Cuarto sumando: $Q_{ical}$

Estimado  $Q_{ical}$ , se conoce el orden de magnitud del caudal robado al abastecimiento. Este término que, a sim-

ple vista, pudiera parecer irrelevante, es en algunos casos de países en vías de desarrollo un término de notable entidad y de difícil corrección por la problemática social que lleva implícito. En España, por desgracia, aún existe algún municipio con picaresca de este tipo, sobre todo en áreas rurales.

## ETAPAS A CUBRIR PARA IMPLANTAR LA AUDITORÍA PROPUESTA

De lo expuesto se infiere que no es factible realizar la auditoría propuesta en un sistema que no se gestione con un determinado nivel de profesionalidad.

Según lo expuesto se requiere:

- Para conocer  $Q$ , caudalímetros en los puntos de inyección de agua a la red.
- Para determinar  $V_r$ , todos los usos deben disponer de contadores.
- Curva de modulación de los consumos para determinar  $Q_r$  a partir de  $V_r$ .
- Curva de consumos agregados para calcular  $Q_{ica}$ .
- Tener operativo un modelo matemático de la red (Fuentes y col., 1998), debidamente soportado por un programa de análisis de redes.
- Medidores de caudal y presión en los puntos más representativos de la red. Son necesarios para verificar y actualizar el calibrado del modelo.
- Base de datos de abonados, con las características de sus contadores (tipo, antigüedad y curva característica) así como los datos de sus consumos.

Si el abastecimiento dispone de esta información y de las herramientas necesarias, realizar la auditoría es tarea sencilla, si se programan los cálculos de manera adecuada. Por ello, en la actualidad, se está implementando esta auditoría en el marco del programa SARA (Grupo Mecánica de Fluidos, 1996). Un ejemplo completo de detalla en Balmaseda y col. (1999).

La auditoría, al proporcionar los datos más relevantes, es punto inicial de toda planificación de actuaciones. Esta fase demanda un estudio de sensibilidad que relacione costos de la acción con los resultados de mejora que cabe obtener a partir de la misma, lo que coloquialmente denominamos impacto económico del ahorro del agua (AWWA, 1987). En definitiva, decidir si conviene renovar elementos (tuberías, válvulas, contadores, etc.) o bien repararlos (plan de detección de fugas mediante correlador, etc.) o, incluso, no actuar, requiere un análisis económico en el que el precio del agua es, como se ha dicho, el factor más influyente.

Conviene decir que este proceso de auditoría puede ser aplicado a un determinado sector de la red (Vela y col., 1994), también denominado distrito hidrométrico, si se dispone de la información ordenada espacialmente. La ventaja de auditorías sectoriales es obvia: permiten conocer el estado de los diferentes sectores, o sea dirigir las estrategias de actuación allá donde son más necesarias.

Significar, ya para concluir, que esta auditoría permite conocer, a través de los rendimientos definidos, el estado del sistema. Cuestión distinta es un control del funcionamiento en tiempo real que detecte, de manera inmediata, posibles incidencias, tal cual la rotura de una tubería importante. Las modernas técnicas de monitorización (Girodet, 1998 y Abu Judeh y Tooke, 1998) son realmente eficaces en tal menester. Teniendo en cuenta que auditoría y control en tiempo real requieren, prácticamente, los mismos medios e idéntica información y, dado el carácter complementario de su diagnóstico, hay que apuntar en la gestión del sistema hacia la implantación simultánea de ambas actuaciones, para, de este modo, tener un control total.

### CONCLUSIONES

Se han definido una serie de rendimientos, sobre cuya formulación existe escasa uniformidad en la literatura técnica, y en los que se ha basado una nueva metodología para auditar, de manera exhaustiva, redes de distribución de agua. Tal auditoría se apoya en una serie de hipótesis, a priori coherentes, que, además, pueden ser confirmadas a partir de los resultados obtenidos, en un proceso de aproximaciones sucesivas ("trial and error").

Los rendimientos porcentuales, o absolutos, definidos, son de gran utilidad para analizar la evolución en el tiempo del estado de salud del abastecimiento, si bien se llama la atención acerca de las limitaciones que presentan cuando se comparan entre sí diferentes sistemas, o incluso al comparar abastecimientos en condiciones de trabajo diferentes. En estos casos son más útiles y representativos los indicadores de estanqueidad relativos del sistema.

La auditoría propuesta refleja tanto el estado de salud media del abastecimiento, como su evolución, permitiendo programar actuaciones de mejora de rendimiento en el corto y medio plazo. Sin embargo, no permite detectar situaciones puntuales que sí pueden ser rápidamente captadas por las modernas técnicas de monitorización que comienzan a implantar las compañías de distribución de agua más avanzadas.

El hecho de que la auditoría que aquí se propone utilice, prácticamente, los mismo datos que se requieren para la elaboración de un modelo matemático, hace atractiva la posibilidad de incorporar esta utilidad a los modernos paquetes informáticos de cálculo y simulación de redes.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la CICYT, proyecto de investigación "Monitorización de redes de distribución de agua y su aplicación a la detección de fugas" AMB95 - 0869.

### REFERENCIAS

- Abu Judeh W., Tooke M. (1998) *A real programme of leakage management for a large water network IIR Conference*, July 1998. United Kingdom.
- AEAS. Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento. (1996) *El Suministro de Agua Potable y Saneamiento en España. 1994. V Encuesta de Abastecimiento Saneamiento y Depuración*. AEAS. Orense nº 4. Madrid
- Alegre H. (1999) *Performance Indicators for Water Supply Systems*. Documento elaborado por la Task Force Indicadores de Gestión de la IWSA. Versión Junio 1999
- Allen D. (1996) *Analysing water use to increase utility efficiency*. *Environmental Science and Engineering Magazine* (<http://www.esemag.com/0796>) July, 1996
- Almandoz J., Balmaseda C., Cabrera E., Iglesias P. (1999) *Unaccounted for water discrimination: leakage and unregistered water*. Remitido al *Journal of Water Resources Planning and Management*. ASCE para su revisión y posible publicación.
- Arregui F.J. (1999) *Propuesta de una metodología para el análisis y gestión del parque de contadores de agua en un abastecimiento*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Arregui F.J., García Serra J., López G., Martínez J. (1998) *Metodología para la evaluación del error de medición de un parque de contadores*. *Revista Ingeniería del Agua*. Diciembre 1998. Volumen 5, nº 4 pp. 55-66.
- Arreguín-Cortés, F.I., Ochoa-Alejo L.H. (1997) *Evaluation of water losses in distribution networks*. *Journal of Water Resources Planning and Management*. ASCE. September 1997 pp. 284-291
- AWWA, American Water Works Association, (1987) *Leaks in water distribution systems. A technical and economic overview*. Ed.: American Water Works Association. Denver. Colorado. USA.
- AWWA, American Water Works Association, (1990) *Water audits and leak detection*. Ed.: American Water Works Association. Denver. Colorado. USA
- AWWA Leak Detection and Water Accountability Committee, (1996). *Committee report: water accountability*. *Journal of the American Water Works Association*, JAWWA. July 1996., pp. 108 - 111
- Balmaseda C., Cabrera E., Iglesias P., Cabrera E. Jr., Ribelles J.V. *Adapting models and databases for water network audits*. *International Conference on Computing and Control for the Water Industry*. University of Exeter. United Kingdom. September 1999.
- Beecher J.A., Flowers J.E., Matzke C.S., (1998) *Water conservation guidelines and the DWSRF*. *Journal of the AWWA*. Mayo 1998, pp. 60-67

- Bowen P.T., Harp J.F., Baxter J.W., Shull R.D. (1993) Residencial water use patterns. Ed. American Water Works Association Research Foundation. Denver. Colorado. USA.
- Cabrera E., García Serra J., Iglesias P. (1995) Modelling water distribution networks: from steady flow to water hammer. Improving Efficiency and Reliability in Water Distribution Systems. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht The Netherlands pp. 3-32
- Cabrera E., García-Serra J. (1997). Problemática de los abastecimientos urbanos. Necesidad de su modernización. Edita Grupo Mecánica de Fluidos. Universidad Politécnica. Valencia.
- Cabrera E., Espert V., López A. (1998). Water supply systems in drought periods. The case of Spain. Drought Management Planning in Water Supply Systems. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht The Netherlands pp. 1 -21
- Conrey P.J.; Hall M.J. (1995). Rehabilitation and Leakage. A Joint Approach. Journal Aqua. Vol 44. Nº 4. pp. 196-201
- DeOreo W.B., Heaney J.P., Mayer P.W. ( 1996) Flow trace analysis to assess water use. Journal of the American Water Works Association. January 1996., pp. 79-90
- Dickinson, M.A. ( 1999) Water conservation in the United States: A decade of progress. Conferencia Internacional Water Efficiency in Cities. Enero 1.999. Fundación Ecología y Desarrollo. Zaragoza. España.
- FuertesV., García Serra J., Pérez R. (1998) Modelación de los sistemas de distribución de agua. Gestión de Sequías en Abastecimientos Urbanos. Ed. Grupo Mecánica de Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia. 1998 pp. 61 - 105
- Funk J.E., Van Vuuren S.J., Wood D.J., LeChevallier M., (1999) Pathogen Intrusion Into Water Distribution Systems Due to Transients. ASME & JSME Joint Fluids Engineering International Conference. San Francisco (USA), 19-22 julio 1.999. S - 290 Symposium on Water Hammer. FEDSM99-6889.
- Gazzetta Ufficiale ( 1994) Disposizioni in materia di risorse idriche Boletín Oficial del Estado Italiano de 19.1.1994. pp. 5-20. Legge 5 gennaio, n 36.
- Girodet L. (1998) The forecast of water consumption applied to leaks management. The experience of Paris 1993 1997. Documento interno. Eau et Force. Parisienne des Eaux. Paris.
- Grupo Mecánica de Fluidos (1996). Ingeniería hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua. Tomos I y II. Ed. Grupo Mecánica de Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia. 1996
- Grupo Mecánica de Fluidos ( 1997) SARA: Software de Análisis de Redes Hidráulicas. Manual del Usuario. Ed. Grupo Mecánica de Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia. 1997
- Hirner W. (1.998) Definition of performance indicators: the example of water losses. Simposium on the application of performance indicators for water and sewerage services in Europe. Montpellier. France, 4-5 June, 1.998
- Judd H.P. (1993) How much is enough?. Controlling water demand in apartment buildings. Ed.: American Water Works Association. Denver. Colorado. USA.
- Lambert A., Myers S. Trow S. ( 1.998) Managing water leakage. Ed. Financial Times Energy, London, 1.998
- Male J.W., Noss R.R., Moore I.C. (1985) Identifying and reducing losses in water distribution systems. Ed. Noyes Publications. New Jersey.USA. 1985
- Ochoa A.L., Bourguett O.V. (1998) Reducción integral de pérdidas de agua potable. Ed. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. IMTA. México.
- OFWAT, Office of Water Services, (1996) Leakage of water in England and Wales OFWAT. Office of Water Services, May 1996. Birmingham. England.
- OFWAT, Office of Water Services, (1997) Report on leakage and water efficiency. OFWAT, Office of Water Services, 1997. Birmingham. England.
- Skarda, B.C. (1997) The Swiss experience with performance indicators and special viewpoints on water networks IWSA Workshop on performance indicators and distribution systems. LNEC. Lisboa. Mayo 1997.
- Vela A., Martínez F., García Serra J., Pérez R. (1994) Estrategias óptimas para la reducción de pérdidas de agua en abastecimientos. Revista Ingeniería del Agua. Volumen 1, número 1. pp. 35- 44.
- Villesot D. ( 1997) Methods and tools necessary to conduct a leakage survey. Aquatech Europe Spring. Water Supply, pp. 16-17.
- Van der Linden, M.J. (1998) Implementing a large-meter replacement program. Journal of the American Water Works Association. August 1998, pp. 50-56
- Van der Willigen F.C. (1997) Dutch experience and viewpoints on performance indicators. IWSA Workshop on performance indicators and distribution systems. LNEC. Lisboa, mayo
- Yanov, D.A., Koch R.N. (1987) A modern residential flow demand study. AWWA Annual Conference. Session 27. Kansas City. USA.