

Modelo de análisis de pérdidas de agua en redes de distribución

Jose Manuel García¹, Jesús Racero¹, Ignacio Eguia¹, Ricardo Galán de Vega²

¹ Dpto. de Organización. Industrial y Gestión de Empresas. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Avda. de los descubrimientos, s/n. 41092. Sevilla. jmgs@esi.us.es, jrm@esi.us.es, ies@esi.us.es

² Aguas y Estructuras, S.A.. Isla de la Cartuja s/n, 41092, Sevilla. rgalan@ayesa.es

Resumen

En este trabajo presentamos un modelo funcional para la detección y localización de fugas en una red de aguas. Nuestro modelo utiliza la división sectorial de consumo descrita en el sistema BABE (Burst and Background Estimates). A partir de características del sistema BABE se incorporan en nuestro modelo estrategias de elección de contadores para el muestreo del consumo y procedimientos para el diseño de rutas de medición, las cuales poseen restricciones adicionales a las de un problema clásico en el diseño de rutas.

Palabras clave: Detección de fugas, Redes de distribución, Diseño de Rutas

1. Introducción

Casi la mitad de la población actual del planeta vive en ciudades y se calcula que a mediados del siglo XXI cerca del 90% de 10.000 millones de habitantes lo harán. El incremento de sistemas para el desarrollo de la planificación urbana representa un reto permanente para la gestión de recursos de diversa índole, entre los que destaca el agua.

Con el incremento de la demanda de agua, se requieren nuevos métodos para buscar eficiencia en la distribución y el uso del agua a nivel local, considerándose como un parámetro importante la reducción de pérdidas de agua.

Las tecnologías en la industria del agua involucran a una gran variedad de disciplinas: mecánica, electricidad, comunicaciones, matemáticas, hardware y software. En la mayoría de los métodos de detección de fugas descritos en la bibliografía, se trabaja de manera determinista, conociéndose datos de capacidad, presión y flujo en el conjunto de tuberías de la red de aguas. Sin embargo, es posible el estudio de pérdidas de agua en áreas urbanas, mediante técnicas de previsión de la demanda y estratificación de consumos.

En este trabajo presentamos un modelo funcional para la detección y localización de fugas en una red de aguas. Nuestro modelo utiliza una división sectorial de consumo que permite gestionar y planificar el control, localización y reparación de pérdidas de agua en una ciudad, fundamentadas en el sistema BABE (Burst and Background Estimates). El sistema BABE (Allan Lambert, 1996) es un sistema para la localización de pérdidas de fondo y fugas. El sistema BABE ha sido implementado en software y utilizado en Inglaterra y Gales con gran éxito, así como en otros muchos países (Reynolds y Preston, 2001). Nuestro modelo también incorpora estrategias de elección de contadores para el muestreo del consumo y

procedimientos para el diseño de rutas de medición, las cuales poseen restricciones adicionales a las de un problema clásico en el diseño de rutas. En este trabajo se describe un escenario concreto en el diseño de rutas de medición.

2. Diseño y Planificación de DMAs (Water Loss Task Force, 2007)

Para una detección y localización de fugas en una red de aguas es necesario dividir previamente la red de aguas en sectores o áreas con no mucha extensión geográfica y/o consumo, de forma que se facilite tanto la detección de pérdidas como la posterior localización de la fuga. La gestión de cada una de estas zonas sería el primer paso.

Para el uso de estas técnicas se parte del concepto de DMA, *district metered areas*, introducido por primera vez por la UK Water Authorities Association (1980). Una DMA se define como un área de un sistema de distribución de agua creada por el cierre de válvulas que aísla y desconecta del resto de la red dicho área de forma que pueda ser medida la cantidad de agua que entra y sale de esa área. El flujo de agua puede ser analizado a partir de ese aislamiento para medir los niveles de pérdidas. La clave para la división de una red en áreas consiste en que el cierre de válvulas para medir el flujo de entrada de un área no afecte a la provisión de agua de ninguna otra área. Para ello es necesario que ninguna arteria principal de la red de aguas forme parte de ningún área.

Los enfoques tradicionales para el control de pérdidas eran de carácter pasivo, es decir, una fuga de agua era reparada sólo cuando llegaba a ser visible. El desarrollo de instrumentos acústicos y eléctricos ha mejorado significativamente esta situación, permitiendo localizar pérdidas invisibles. Pero la aplicación de tales instrumentos sobre una red global sin un estudio previo, resultaría muy cara y consumiría mucho tiempo. Por ello, la solución que se propone consiste en un sistema de control de pérdidas donde la red se divida en áreas DMA sobre las que se instalen los medidores de flujo en sus llaves de entrada y salida. De esta forma es posible regular el nivel de pérdida en cada DMA para que la actividad de localización concreta de la pérdida se dirija a las peores zonas de la red.

Las redes de distribución de aguas gestionadas sin el uso de DMAs que han alcanzado bajos niveles de pérdida de agua se fundamentan en una buena infraestructura de control y en presiones de agua bajas y estables.

Las pérdidas reales son la diferencia entre la entrada de agua en el área y el consumo de los clientes. Las pérdidas se determinan más correctamente cuando el consumo de clientes es mínimo, lo cual ocurre normalmente por la noche. Esto se debe fundamentalmente a que la presión en las tuberías es mayor y por tanto cualquier rotura en una tubería produce una fuga más significativa, por lo que se detectaría mejor. El tamaño de la DMA influirá en el nivel de pérdidas por fugas que pueden ser identificadas. Un área extensa tenderá a tener más pérdida y mayor consumo nocturno, lo cual significará que una fuga represente un porcentaje menor del flujo nocturno, lo cual reduce su identificación.

El consumo nocturno varía estacionalmente en la mayoría de las DMAs, por lo que es necesario tener en cuenta este hecho en la interpretación que se haga de los flujos de agua nocturnos.

Puesto que en la mayoría de los países el consumo de agua se mide en contadores, es posible estimar el uso nocturno de agua de los clientes, aplicando un factor de consumo nocturno al

promedio de consumo medio medido en la zona. En los sitios en los que no existen contadores de medición de consumo, es necesario aplicar un valor estimado de uso nocturno.

El enfoque más simple para obtener el consumo nocturno es expresar el mismo como un porcentaje del promedio del flujo diario. Este porcentaje varía mucho de unos países a otros. Por ejemplo, en Alemania se utiliza un 5% mientras que en USA el valor equivale a un 35%.

El tamaño de la DMA tiene un impacto directo en el coste del diseño. A menores tamaños de DMAs, mayor es el coste. Esto se debe al aumento en el número de válvulas y medidores de flujo que se requieren. El mantenimiento también será más costoso. Sin embargo, el beneficio fundamental de pequeñas DMAs es que las pérdidas se localizan antes dentro del área, reduciéndose por tanto el volumen de agua perdida.

Generalmente el parámetro principal para la definición de DMAs es el número de clientes, o más bien, el número de contadores, y suelen variar entre 500 y 3000 contadores.

Se ha demostrado que si una DMA es superior a 5000 contadores, llega a ser difícil discriminar pequeñas fugas del flujo nocturno y la localización de las fugas lleva más tiempo. También es posible subdividir una DMA grande en DMAs temporales más pequeñas, añadiendo válvulas de cierre.

Alternativamente las DMAs pueden ser creadas atendiendo al número de kilómetros de tuberías, en regiones que contienen muchos bloques de pisos, lo cual tiende a tener una baja densidad de conexiones. Esto además tiene la ventaja de ser fácilmente localizadas las fugas.

Es necesario identificar sobre el mapa, a la hora de diseñar la división en áreas, los siguientes aspectos:

- Edificios que requieran un suministro de agua a una presión por encima de la presión planificada para el área.
- Clientes especiales en relación al consumo
- Niveles del suelo

En Farley y Trow (2003) se establecen una clasificación de los tipos de pérdidas de agua. Las pérdidas de agua son de dos tipos:

- **Pérdidas de Fondo:** Son la agregación de todas las pequeñas fugas de la red que no pueden ser detectadas por métodos de inspección visuales o acústicos. Una buena gestión de la presión del agua influye positivamente en la gestión de estas pérdidas.
- **Pérdidas por fugas:** Es la pérdida de agua resultado de la rotura de alguna tubería. Las pérdidas por fugas se clasifican a su vez en:
 - **Fugas notificadas:** Son las fugas visibles o fugas detectadas por falta de suministro a clientes.
 - **Fugas no notificadas:** Son las roturas de tuberías que no se detectan sin el uso de medidas de detección de fugas. Son las fugas que provocan el mayor volumen anual de pérdida de agua.

El tiempo de fuga o tiempo de existencia de una fuga se divide en tres periodos:

- **Tiempo de Detección:** Tiempo desde que se produce la fuga hasta que se detecta en el área.
- **Tiempo de Localización:** Tiempo de localización exacta de la fuga dentro del área.
- **Tiempo de Reparación:** Tiempo de planificación de la reparación de la fuga hasta que queda arreglada la tubería.

Los efectos de la presión del agua pueden influir en el volumen de pérdidas. Así si se define P_0 como la presión inicial, L_0 el flujo de pérdida inicial y P_1 un nuevo valor de presión, entonces el nuevo flujo de pérdidas se define como:

$$L_1 = L_0 (P_1/P_0)^N$$

Donde N varía de 0.5 a 1.5, dependiendo del tipo de fuga y de la rigidez de los materiales que componen la tubería. Se suele asumir como 1 en sistemas grandes, por lo que la relación entre presión y fugas es lineal.

3. Estimación del consumo nocturno

En las ciudades en las que se mide el consumo de agua de los habitantes, es posible aplicar un factor estándar nocturno al consumo histórico para estimar el uso nocturno. En los casos en los que no es posible encontrar factores fiables es aconsejable medir el consumo en intervalos horarios nocturnos de un conjunto o muestra de clientes. Alternativamente, la muestra de contadores puede ser leída manualmente en intervalos regulares a lo largo del día para obtener el perfil de consumo medio.

Se recomienda que el uso nocturno se divida en al menos tres categorías, en relación al tipo de consumo en la red:

- Doméstico
- No doméstico: Establecimientos y colegios que no suelen tener consumo nocturno.
- Clientes especiales: Industria, provenientes de la agricultura, hospitales,...

Cualquier esfuerzo debe ser realizado para cuantificar lo más correctamente posible el consumo de clientes para obtener un valor lo más real posible del nivel de pérdidas.

El cálculo del consumo nocturno doméstico se ve afectado de forma significativa por la ocupación de la vivienda. Generalmente, el uso nocturno se ha obtenido mediante:

Consumo nocturno Doméstico = Número de viviendas × Ratio de uso nocturno

Donde en el ratio de uso nocturno se utiliza el ratio de ocupación por vivienda.

Consumo nocturno No Doméstico = Número de establecimientos × 10 litros/hora

El dato de 10 litros/hora es el que se emplea en Inglaterra.

También se propone un método más complejo, en el que se divide el consumo no doméstico en categorías y se asigna un ratio de consumo a cada categoría:

Consumo nocturno No Doméstico = Σ (Número de establecimientos de Categoría i \times Ratio de Consumo de i)

Las categorías y ratios definidos aparecen recogidos en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación en categorías según consumos y clientes

Categoría	Tipo de Clientes	Ratio de Consumo
A	Bancos, Iglesias, jardines	0.7
B	Tiendas, Oficinas, Propiedades domésticas grandes	6.3
C	Hoteles, Colegios, Restaurantes, Cuadras	10.4
D	Hospitales, Fábricas, Aseos públicos, sitios de trabajo	20.7
E	Residencias de ancianos, minas, canteras	60.6

Para el caso de Clientes especiales, que son los que poseen un mayor consumo, éste debe calcularse directamente de la medición en contadores en intervalos de una hora entre la 1 a.m. y las 5 a.m.

4. Modelos de Selección de contadores y rutas para medición de consumo nocturno

Tras la fase de análisis estadístico de la red de contadores, se obtienen un número de contadores que tienen que ser leídos según la categoría correspondiente (Clientes Domésticos, Clientes No Domésticos, Clientes Especiales). Como ya se ha expuesto, el consumo de clientes Domésticos y No Domésticos puede calcularse mediante un ratio de consumo medio y no es necesaria la selección de contadores. Pero en el caso de realizar un estudio estadístico del número de contadores que deben ser leídos en cada una de las categorías, Doméstico y No Doméstico, es necesario entonces la selección de los contadores que tienen que ser leídos. Por otro lado, y debido a su importancia, todos los contadores de Clientes Especiales deben ser medidos siempre.

En base a los estudios anteriores, se pueden plantear dos escenarios que sostienen las opciones de análisis:

- **Escenario I:** Sólo se necesita medir el consumo nocturno de los clientes Especiales, puesto que el consumo nocturno de clientes Domésticos y No Domésticos se estima por ratios.
- **Escenario II:** Es necesario seleccionar y medir un subconjunto de contadores de la categoría Doméstico y No Doméstico así como todos los contadores de clientes Especiales. Recordemos que el análisis estadístico devuelve el número de contadores que tiene que ser leído por categoría. La tarea en esta fase es seleccionar que

contadores concretos tienen que leerse, utilizando como criterio de selección las distancias entre contadores.

Puesto que en este trabajo no se describe el estudio estadístico de cálculo del número de contadores, presentamos únicamente el Escenario I del modelo.

Es necesario medir el contador en varias ocasiones y la franja horaria de lectura se limita a un intervalo de tiempo de duración t , que suele estar entre 15 y 20 minutos a lo sumo. Para la medición de contadores se cuenta con una plantilla de técnicos, que deben realizar el trabajo dentro de una franja de horario nocturno, normalmente entre la 1 y las 3 de la madrugada. Imponer una franja horaria para la lectura de contadores implica que pueda ser necesario más de un día para la lectura de los mismos.

Todos los contadores de la red de aguas están identificados por una posición en el mapa de la ciudad, de forma que es posible identificarlos dentro del viario. Por tanto, podemos trasladar la posición de los contadores a un grafo en el que los nodos se identifiquen como contadores y cruces del viario y los arcos como segmentos de vías con una distancia dada (Figura 1), la cual puede traducirse directamente a tiempo si se establece el tiempo medio en recorrer una distancia dada.

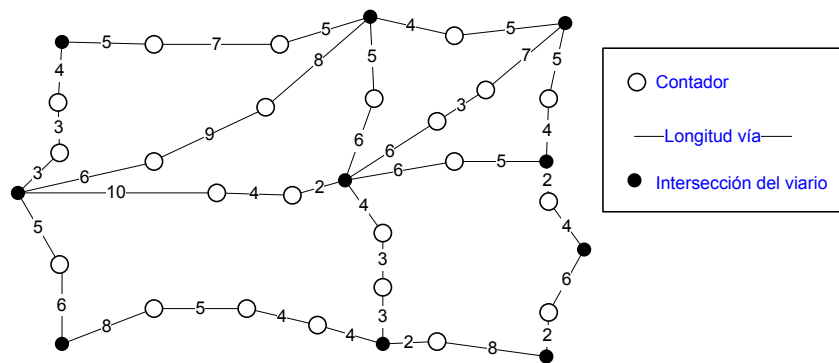


Figura 1. Red de contadores

Incluso sería también necesario diferenciar el sentido de las vías, en caso de que el desplazamiento de los técnicos de un contador a otro se hiciera en vehículo.

5.1 Escenario I

Sea un grafo de nodos (contadores de clientes especiales y cruces de vías) y arcos (tramos de vía). Se dispone de m técnicos para la medición de un total de N_E contadores de la categoría E (Especiales). Por ello en el grafo sólo se representan los contadores de clientes especiales.

Notación:

$$G(N,A), N=\{N_E \cup N_C\}$$

N_E : Conjunto de contadores de clientes Especiales.

N_C : Conjunto de nodos cruces del viario

$$A=\{(i,j) / i,j \in N\}$$

El tiempo total que puede invertir cada técnico para la lectura de contadores es t . En el análisis, el tiempo de lectura de cada contador es $t_i, i \in N_E$

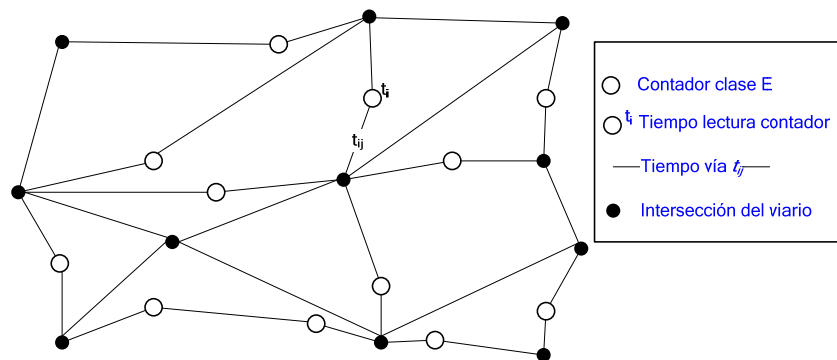


Figura 2. Escenario I

Si no existiese la limitación de ventanas temporales estaríamos ante un problema clásico del campo de la optimización, Multiple Travelling Salesman Problem (MTSP) (Bektas, 2006). La resolución de este problema podría aportar ayuda para diseñar una solución al problema. Sin embargo, a continuación proponemos un algoritmo para obtener soluciones de forma eficiente.

Algoritmo

Paso 1. Grafo de Rutas Mínimas. Diseñar un grafo a partir del grafo inicial donde los nodos serán los contadores de clase E y los arcos las distancias mínima entre dichos contadores (Figura 3). El diseño de este grafo sería un procedimiento sencillo de cálculo de caminos mínimos r_{ij} entre cada par de nodos contadores i y j , Larrañeta (1987). Además no sería necesario representar todos los arcos, sino únicamente aquellos caminos mínimos r_{ij} en los que no existe un nodo contador intermedio en el camino mínimo entre i y j .

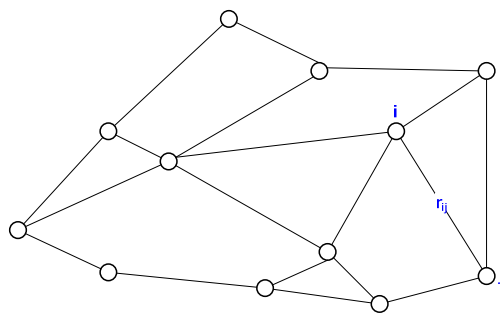


Figura 3. Grafo de rutas mínimas

Paso 2. Red de Coste Mínimo. Se obtiene una red de coste mínimo a partir del grafo del paso 1. La red de coste la forman el conjunto de arcos que conecta todos los nodos y cuya suma de costes (entendiendo coste de un arco como el tiempo del arco) es mínima. Para la obtención de la red de coste mínimo puede emplearse el algoritmo de Kruskal descrito en Cormen et al(2001). En la Figura 4 se empresa un ejemplo numérico.

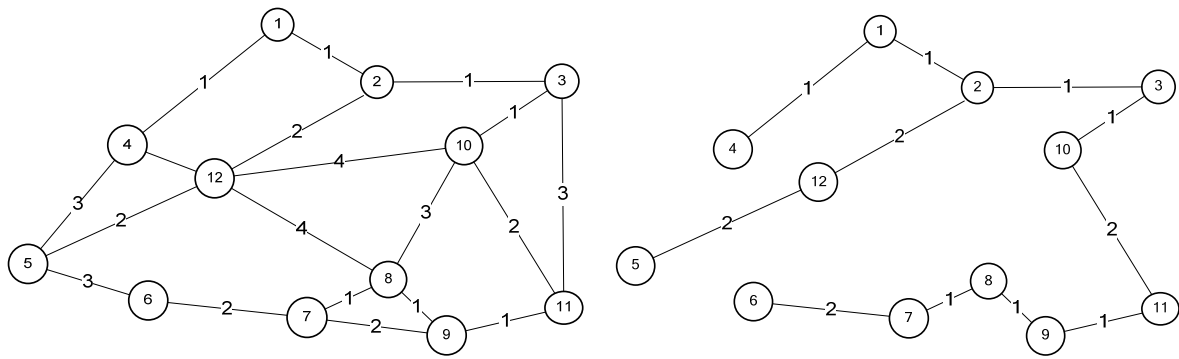


Figura 4. Red de coste mínimo

Paso 3. Búsqueda de rutas. A continuación tendríamos que buscar rutas cuya duración total, incluido tiempo entre contadores y tiempo de lectura de los contadores, fuera inferior al tiempo de duración t del intervalo de medición. Para ello se procede con el siguiente bucle repetitivo:

PARA CADA NODO i

Obtener todas las rutas que parten del nodo i cuya duración es inferior a t

{este procedimiento se basa únicamente en recorrer la red comenzando en el nodo i , por cada camino que parte del nodo i }

FIN PARA

Paso 4. Elaboración de matriz de rutas. Esto da lugar a una matriz binaria L de rutas/nodos con la siguiente estructura:

$L_{r \times |N_E|}$, donde r es el número de rutas generadas.

$L(k,i)=1$ si el nodo i pertenece a la ruta k ; 0 en otro caso

Tabla 2. Matriz de rutas

Ruta/Nodo	1	2	3	...	$ N_E $
Ruta 1	1	0	1	...	0
Ruta 2					1
...
Ruta r	0	1	0	...	0

Paso 5. Selección de rutas. En esta fase tendremos que seleccionar el mínimo número de rutas que contienen a todos los nodos. Un procedimiento sencillo y óptimo de obtención de rutas es la resolución del siguiente modelo:

Sea

$$\alpha_k = \begin{cases} 1 & \text{si se selecciona la ruta } k \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

$$\text{Min} \sum_{k=1}^r \alpha_k$$

s.a.

$$\sum_{k=1}^r L(i,k)\alpha_k \geq 1 \quad \forall i$$

La resolución de este modelo puede llevarse a cabo con cualquier optimizador comercial, como puede ser ILOG CPLEX o XA. Con ello obtendríamos el número mínimo de rutas necesarias para pasar por todos los contadores a medir.

5. Conclusiones

En este trabajo hemos presentado una visión general de la detección de fugas en un entorno urbano a partir de la sectorización de la red de aguas. Se ha descrito el concepto de DMA (District Metered Area) necesario para la detección de fugas y la utilización de ratios de consumo para la medición del consumo. Además de ello, se ha presentado un algoritmo para la selección de rutas de medición de contadores en un escenario donde no se considera el muestreo estadístico para el cálculo del número de contadores, sino que únicamente se considera la medición de clientes especiales. Dicho algoritmo se encuentra en fase experimental aunque experimentos previos han puesto de manifiesto un buen comportamiento.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte de un proyecto de título “Sistema integrado par la gestión de pérdidas y diagnosis en redes de distribución de agua basado en sistemas abiertos de información geográfica”, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (convocatoria PROFIT 2007) y realizado en colaboración con la empresa ACT SISTEMAS S.L.

Referencias

- Bektas T. (2006). “The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures”. *Omega*, 34:209-219.
- Farley, M. and Trow S (2003). *Losses in Water Distribution Networks*. International Water Association Publishing.
- Lambert A.O. and Morrison J.A.E. (1996). “Recent Developments in Application of Bursts and Background Estimates Concepts for Leakage Management”. *Water & Environment Management Journal*, 10(2)
- Lambert A. O. (1999). “A review of performance indicator for real losses from water supply systems”. *AQUA*, Dec.
- Larrañeta, J. (1987). *Programación Lineal y grafos*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Serie: Ingeniería, pp 296-306.

Reynolds, J. and Preston, S. (2001). “The International application of the BABE Concepts – from feasibility studies to performance target based NRW Reduction contracts”. *IWA Specialised conference*.

Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, and Clifford Stein (2001). *Introduction to Algorithms* (second ed.). MIT Press and McGraw-Hill. Section 23.2: The algorithms of Kruskal and Prim, pp.567–574.

UK Water Authorities Association (1980). *Report 26 Leakage Control Policy & Practice*.

UK Water industry (1994). “The managing leakage series of report”. *Report A: summary of reports*.

Water Loss Task Force (2007). *District metered areas. Guidance Notes*.
www.iwaom.org/wlwf