

XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje

“METODOLOGÍA DE SECTORIZACIÓN DE REDES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE”

Enrique Campbell (1), Rafael Pérez García (2), Joaquín Izquierdo (3)

- (1) Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera, s/n 46022 Valencia, + 34 639 04 91 57, encamgo1@upv.es
- (2) Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera, s/n 46022 Valencia, + 34 682 17 93 61, rperez@upv.es
- (3) Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera, s/n 46022 Valencia, + 34 628 02 88 04, jizquier@upv.es

RESUMEN

La creciente presión sobre los recursos hídricos ha planteado la necesidad de establecer procedimientos encaminados a controlar de manera eficiente las pérdidas de agua en las redes de abastecimiento de agua potable (RDAP). Un ejemplo de tales procedimientos es la sectorización de las redes. En su mayoría, los proyectos de sectorización se basan en criterios empíricos, siguiendo técnicas de prueba y error. En el presente trabajo se plantea una novedosa combinación de aspectos hidráulicos, sociales y económicos para establecer el esquema de sectorización en una ciudad de tamaño medio.

Palabras claves: Modelos matemáticos, Redes, Sectorización, Fugas, Clústeres, Control.

ABSTRACT

The increasing pressure on water resources has raised the need to establish procedures to efficiently control water losses in the networks of water supply. An example of such procedures is the segmentation of the networks. Most of sectorization projects are based on empirical criteria, following trial and error techniques. This paper presents a novel combination of hydraulic, social and economic aspects to establish zoning schemes in medium size cities.

Key words: Mathematical models, Water networks, Sectorization, Leakages, Clusters, Control.

SOBRE EL AUTOR PRINCIPAL

El autor es Ingeniero Ambiental con cinco años de experiencia en una consultora internacional especializada en el ámbito de la hidráulica urbana. La presente investigación constituye su trabajo de fin de máster para optar al título de máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, España.

ANTECEDENTES E INTRODUCCION

Las redes de abastecimiento de agua potable (RDAP) son infraestructuras que transportan el agua desde las fuentes de abastecimiento hasta los usuarios. En estas, las pérdidas de agua pueden llegar a ser del orden del 50% del volumen inyectado. Para lidiar con tal problema, la sectorización ha sido planteada como una opción estratégica, la cual implica la subdivisión de las RDAPs en sectores (también conocidos como DMA por las siglas en inglés de District Metered Areas) (Farley, 2010). Tal división se hace mediante el cierre de algunas líneas e instalación de caudalímetros en una única línea a fin de controlar el caudal de entrada. Esta técnica presenta grandes ventajas, entre ellas, el aumento de la facilidad con la que se detecta cualquier incidencia (ruptura de tuberías por ejemplo) en la red. Cuanto más pequeños son los sectores, con más facilidad se detecta cualquier variación de caudal (Morrison, 2007). También, al cerrar líneas, se aumentan las pérdidas por fricción, lo que conlleva una disminución de la presión general de la red, que en un sentido positivo puede generar una disminución del nivel de pérdidas reales (fugas en las tuberías); no obstante, si dicha caída de presión es excesiva puede causar problemas de desabastecimiento. De ahí que no sea viable la implementación de un proyecto de esta naturaleza siguiendo una estrategia de prueba y error.

Teniendo en cuentas las ventajas y las desventajas de la sectorización, es de esperar que un buen esquema de sectorización aporte un buen balance entre el nivel de presión y los aspectos de control de fugas, minimizando el número de válvulas que se debe emplear para aislar los sectores.

En esta línea, en la última década, se han propuesto una serie de metodologías para ejecutar proyectos de sectorización sin causar problemas de desabastecimiento. En esencia, tales propuestas han empleado las técnicas de partición de grafos junto con herramientas matemáticas de optimización. En Tzatchkov (2008) se emplea el algoritmo Depth First Search (DFS; Búsqueda en Profundidad en castellano) para definir sectores aislados. El algoritmo DFS también fue empleado por Di Nardo *et al.* (2013a); no obstante, en este trabajo, el mencionado algoritmo se combina con índices de eficiencia energética en un procedimiento heurístico que persigue definir la localización apropiada de las válvulas y los caudalímetros. En específico, el índice de resiliencia del que se hace mención fue propuesto por Todini (2000), y es empleado para comparar esquemas de

sectorización alternativos. En una perspectiva general, este índice evalúa la capacidad de la red de superar situaciones extraordinarias (fallos). La idea de emplear heurística ha sido aplicada también en otros trabajos. En Di Nardo y Di Natale (2011b) se propone una metodología de apoyo para el diseño de sectores. La idea básica del procedimiento, es simplificar la red original por eliminación de las tuberías con los valores más altos de disipación de energía. A partir de las tuberías no eliminadas, se construye un grafo denominado grafo principal. En este grafo simplificado, los operadores de la RDAPs pueden seleccionar el número y dimensiones de los sectores, así como la localización de los caudalímetros y las válvulas de cierre de sectores. Luego, en función de los resultados de evaluación de índices de eficiencia energética, se modifica ya sea la dimensión de los sectores o la localización de los caudalímetros. En Di Nardo *et al.* (2013b), también se emplean caminos de mínima disipación de energía para identificar zonas de influencia de una fuente de abastecimiento. Luego, los nodos que son influenciados por más de una fuente de abastecimiento, son ubicados en uno u otro sector mediante una función objetivo que se resuelve a través de algoritmos genéticos. Por otro lado, en Di Nardo *et al.* (2011a), se propone el uso de la bisección recursiva multinivel (MLRB por las siglas en inglés de Multilevel Recursive Bisection), empleando diferentes pesos en las tuberías (pérdida de carga, caudal, diámetro) y en los nodos (demanda y altura piezométrica). En Herrera (2011) y Herrera *et al.* (2012), se propone el uso de una combinación de clústering espectral con técnicas multiagente para resolver el problema de sectorización en RDAPs de gran extensión.

Ninguno de los métodos previamente mencionados tiene en cuenta una división clara entre la red de abastecimiento principal y la red de distribución. En los ejemplos de implementación de los mismos se forman sectores con una fuente de abastecimiento exclusiva (conocidos como DMA aislados), o cascadas de sectores (que corresponden a sectores dentro de otros sectores). En algunas ciudades, la definición de este tipo de sectores no es viable ya que las fuentes de abastecimiento están alejadas de la ciudad y el suministro depende por completo de una línea de conducción principal de gran extensión. A su vez, el establecer cascadas de sectores complica la evaluación de caudales. El no incluir la red de conducción principal en la sectorización implica dos ventajas: por un lado, se reducen los costes de inversión en válvulas y caudalímetros de gran diámetro y, por otro lado, se mantiene el grado de

flexibilidad de la red en caso que sea necesario cambiar el esquema de sectorización si las circunstancias particulares lo ameriten.

En este trabajo se presenta una metodología para la sectorización de una red. En este desarrollo se dividen las RDAPs en una red de alta (red troncal) y una red de distribución. Además, no sólo se emplean como criterios las características hidráulicas tradicionales o geográficas de las RDAPs, sino que también se tiene en cuenta el caudal de fugas. Para esta tarea, se sigue un proceso que implica: (1). Definir dentro de la RDAP de estudio las líneas que constituyen la red primaria y las líneas que constituyen la red de distribución; (2). Estimar el número de sectores que debe tener la red de distribución en cuestión; (3). Establecer la distribución del número de microsectores calculados en el paso anterior; (4). Definir las entradas a los sectores; (5). Validar el esquema de sectorización resultante.

BASE CIENTIFICO-TEORICA

Un grafo (G) es un conjunto finito de objetos (V, E) llamados vértices (V) o nodos unidos por enlaces llamados aristas o arcos (V,V) o E_j , siendo j la relación de incidencia de dos elementos tipo (V) que se asignan a un enlace E; así, se puede denotar un grafo como $G = \{V, E_j\}$. Las RDAPs en EPANET 2.0¹ pueden ser representadas como un grafo, en donde los nodos de consumo y abastecimiento (tanques) son los vértices y las tuberías y las válvulas son las aristas. Las características (o pesos) que se pueden agregar a los vértices del grafo de una RDAP son las mismas que tienen los nodos en un modelo matemático (*coordenadas geográficas, elevación, demanda, coeficiente de emisor, presión, altura piezométrica*). En el caso de las tuberías, las características que se pueden emplear son: *diámetro, longitud, rugosidad, pérdidas de carga por fricción*. Los sectores en una RDAP pueden ser pensados como clústeres, siendo un clúster un conglomerado de nodos que comparten muchas características entre sí, o dicho de otra manera, aquel subgrupo (o sector) de nodos cuyos perfiles sean muy similares entre sí pero muy disimilares a aquellos en los nodos que pertenecen a otros subgrupos (o sectores). En el campo del aprendizaje automático computacional (*machine learning* en inglés), los métodos *kernel* son una serie de algoritmos empleados para hacer análisis

de patrones (Shawe-Taylor yCristiani, 2004). Herrera (2011), planteó el uso de esta técnica en combinación con clústering espectral para lograr la subdivisión de RDAPs en subsectores con el máximo grado de uniformidad posible. El clústering espectral se aplica sobre una matriz *kernel* global (K) en la que se suman las matrices de disimilaridad kernelizadas de todas las características de la red y la matriz *kernel* del grafo (ver ecuación 1). También, en la mencionada propuesta, se hace uso de análisis de jerarquía de prioridades (AHP por *Analytic Hierarchical Process*) para asignar pesos a las distintas características que se emplean en los nodos para llevar a cabo la partición. A la matriz kernel del grafo (K_G) y a la suma de las matrices de características, se les asigna un peso distinto (λ_A) pero cuya suma es igual a 1. Este peso se estima por un análisis de costes para diferentes particiones, a fin de determinar el peso de la partición que implica el menor número de válvulas. Pese a las ventajas implícitas en el uso de clústering espectral para subdividir grafos de RDAPs, esta técnica no define a priori el número de sectores en que se debe hacer la partición. En una red en la que no se puede asignar una fuente exclusiva a cada sector, esta técnica no puede ser aplicada directamente. En tal sentido, se puede hacer una exploración de los datos mediante la formación de clústering en jerarquía. La idea tras esta técnica, es construir árboles binarios (dendrograma) que sucesivamente se fusionen en grupos en dependencia de su similitud (Han y Kamber, 2006). A partir del estudio del árbol que se genere y mediante algunas medidas de homogeneidad de clústeres tales como: índice de Dunn, Conectividad e índice de Silueta, se puede determinar la cantidad de clúster que mantenga el mayor grado de homogeneidad posible y luego proceder a efectuar la partición del grafo a través de clústering espectral.

$$K = \lambda_A * K_G + (1 - \lambda_A) \left[\sum \omega_{\text{criterios}} \times \text{Matriz de criterios} \right] \quad (1)$$

Dónde:

K: Matriz kernel sobre la que se realizará el proceso de formación de clústeres.

K_A : Matriz kernel asociada a la matriz de afinidad del grafo.

K_i : Matriz kernel asociada con los inputs de interés.

¹Software de simulación hidráulica semi-estacionaria desarrollado por la Agencia Estadounidense de Protección Ambiental (EPA)

λ_A : Representa la importancia del grafo.

ω_i : Son los pesos de la combinación lineal de los criterios empleados.

METODOLOGIA

El método propuesto sigue la línea de aprendizaje automático computacional ya planteada por Herrera (2011); no obstante, en esta propuesta se presenta como novedad la no inclusión de las tuberías de la red que forman la red troncal. En este contexto, la resolución del problema sólo tiene en cuenta los nodos de la red de distribución y los cortes de tuberías propuestos se hacen en las líneas de esta misma. En un primer momento se hace uso del método de aprendizaje no supervisado - clústering jerárquico - . Con este, se hace una primera exploración de las características de la red. A partir de medidas de homogeneidad de clústeres, ya mencionadas previamente, se determina el número de clústeres (con máxima homogeneidad) en que se puede realizar la partición de la red. A continuación se emplea clústering espectral, con el cual se logra una partición en la que se optimice (minimice) el número de válvulas necesarias. Esta optimización también tiene en cuenta pesos en las características que se emplean en la partición, de manera tal que si una de las características es muy importante para la partición, a esta se le asigna un peso muy alto con respecto a las otras y la forma de los sectores se ve altamente influida por ella. Los pesos que se asocian a la suma de matrices *kernel* en el paso anterior, son estimados con la herramienta de AHP, AHPcalc (Goepel, 2013)². Otra novedad que se incluye en este método con respecto a la propuesta de Herrera (2011), es la inclusión de emisores de fugas dentro de las características a tener en cuenta; así, las zonas pueden ser aisladas en función del nivel de fugas que reporten. Para elegir la entrada de un sector dado, el primer paso consiste en determinar las líneas que de manera independiente pueden abastecer al mismo por 24 horas, mientras el resto de las líneas que conectan al sector con la red de alta están cerradas. Estas son definidas como líneas candidatas. Luego, se cierran todas las líneas del sector en que se hará la primera evaluación, mientras una de las líneas candidatas se deja abierta (las restantes líneas de la red se dejan abiertas). Bajo este escenario, se calcula para el sector

dado un coeficiente de pérdida de presión CPP y un índice de resiliencia I_r mediante las siguientes expresiones (ecuaciones 2 y 3):

$$I_r = 1 - \frac{[\sum_{i=1}^{n_e} (Q_e * H_e)_i + \sum_{i=1}^{n_p} [P_i] - \sum_{j=1}^{n_n} Q_j * H_j]}{[\sum_{i=1}^{n_e} (Q_e * H_e)_i + \sum_{i=1}^{n_p} [P_i] - \sum_{j=1}^{n_n} Q_j * H_j^*]} \quad (2)$$

Dónde:

Q_e = Caudal aportado por los tanques.

H_e = Altura de los tanques.

P_i = Potencia aportada por los bombeos.

Q_j = caudal de demanda en los nodos.

H_j = Altura piezométrica real.

H_j^* = Altura piezométrica requerida.

$$CPP = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{i_{df}}^* * P_i^*}{\sum_{i=1}^n Q_{i_{df}} * P_i} \quad (3)$$

Dónde:

n = número de nodos de la red.

$Q_{i_{df}}^*$ = Caudal de demanda y fuga en cada nodo en el nuevo esquema de RDAP.

P_i^* = presión en cada uno de los nodos de la red en el nuevo esquema de RDAP.

$Q_{i_{df}}$ = Caudal de demanda y fuga en cada nodo en el esquema original.

P_i = presión en cada uno de los nodos de la red en el esquema original.

² Disponible gratuitamente en la página web de la empresa "Business Performance Management"

Luego se procede de la misma manera para el resto de las líneas candidatas. Como resultado, se obtienen dos

rankings de valores de eficiencia energética del sector. A partir de estos rankings se puede seleccionar la mejor opción de alimentación del mismo.

A continuación se valida la propuesta mediante simulación hidráulica en EPANET 2.0. Los parámetros que se consideran para tal valoración son las velocidades en las líneas y las presiones en los nodos, tanto a la hora de mayor consumo, así como a la hora en la cual el consumo es menor.

Este método tiene ventajas sobre métodos de sectorización previamente planteados. Al establecer una segregación de la red de alta de la red de distribución, hace que este sea totalmente aplicable a redes que dependen de una línea de conducción principal de gran extensión. A su vez, conlleva a una reducción de costes para la implementación del esquema de sectorización y la conservación de un mayor nivel de flexibilidad operacional que permite modificar el esquema de sectorización en caso que circunstancias particulares lo requieran. También, el análisis energético para la selección de la entrada de cada sector, permite tener en cuenta aspectos urbanísticos con los que los diseñadores tienen que lidiar. Así, si la colocación de un caudalímetro en un punto dado es urbanísticamente compleja, se puede considerar el aumento del diámetro en otra línea candidata en la que si sea viable su instalación.

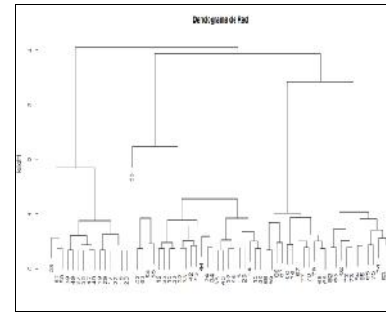


Figura 1: (arriba) red de ejemplo, (abajo) dendrograma obtenido

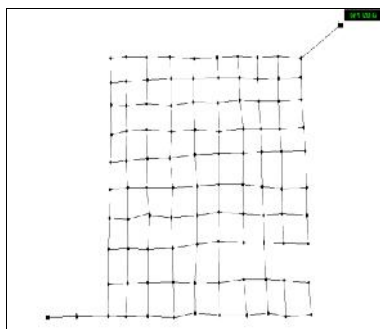
Como primer paso, se hace el análisis de los datos mediante la técnica de clústering jerárquico. Como resultado, se obtiene el dendrograma de la Ilustración 1 (abajo).

A partir del análisis de medidas de homogeneidad de grafos: índice de Dunn, Índice de Silueta y conectividad, se determinó que la partición se haría en tres clústeres. A continuación (ecuación 3) se presenta la suma de matrices *kernel* con las respectivas ponderaciones.

$$= 0.4 * k_{1,4} + \{(1 - 0.4) * [(0.044 * coorx) + (0.054 * coory)]$$

PRESENTACION DE RESULTADOS

Para ejemplificar el método se toma una red de 100 km de longitud de tubería, con una red de alta de 10 km (ver Figura 1) y dos fuentes de abastecimiento (tanques). La demanda media de la red corresponde a 523.8 m³/h y el caudal medio de fugas igual 210 m³/h.



ANALISIS DE RESULTADOS

En la Figura 2 se muestra la partición en tres sectores que se obtuvo. En esta misma figura se aprecia cómo, mediante el análisis de la eficiencia energética, se logra determinar los sectores.

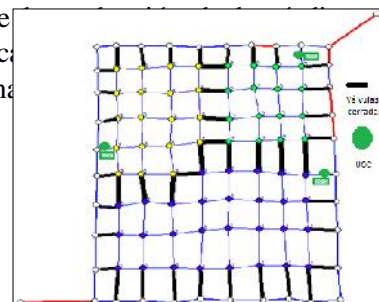


Figura 2: Subdivisión de la red ejemplo en tres sectores

En la Tabla 1 se puede observar que tras la sectorización se mantiene la red en un rango aceptable de funcionamiento.

Tabla 1: Comparación de presiones (mca) en la red antes y después de la sectorización

	Nodo 62		Nodo 15		Nodo 47	
	S1. Cerrado	S1. Abierto	S2. Cerrado	S2. Abierto	S3. Cerrado	S3. Abierto
Mínimo	11.44	40	24.85	46.18	19.67	41.15
máximo	40.91	45.48	50.58	51.89	46.18	47.62

Finalmente, esta propuesta de sectorización se traduce en un beneficio a corto plazo, ya que implica la reducción del caudal de fugas asociado a la disminución de la presión. Sólo por el hecho de sectorizar, se espera que el caudal de fugas baje de 4951 m³/día a 4256 m³/día, es decir, un 14%. A esto se le sumará el beneficio de las facilidades sobre el control activo de fugas que se gana al tener la red sectorizada, lo que permitirá ir reduciendo las fugas hasta alcanzar el nivel económico de fugas característico del sitio.

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se presenta una metodología novedosa para abordar el problema de sectorización en RDAPs. A partir de ella se logra estimar un número de sectores en los que se conserve el mejor grado de homogeneidad posible de las características de los sectores, lo que luego facilita que la red presente un buen rendimiento energético. Mediante el proceso de clústering espectral se logran mejorar los resultados de clústering jerárquico, encontrando una partición que además de mantener la homogeneidad de las características de cada uno de los sectores, minimice el número de válvulas que se deben emplear para hacer la partición. El empleo de indicadores de disipación de energía a través de la red, ha permitido encontrar las entradas a cada sector, de manera tal que se minimice la energía disipada por la red y se

garantice la mayor presión posible en los nodos de consumo. Con esta propuesta, se logra obtener un plano de red sectorizada (100 km de red, división en tres sectores) que mantiene la presión dentro de los rangos establecidos como apropiados y a su vez implican una disminución del nivel de fugas tan sólo por implementarla.

BIBLIOGRAFÍA

- Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G.F., y Venticque, S (2011a). "Graph partitioning for automatic sectorization of a water distribution system". Proceedings of 11th International Conference on Computing and Control for Water Industry (CCWI). Urban Water: Management Challenges and Opportunities Vol 3, pp. 841-846.
- Di Nardo, A., y Michele, D. (2011b). "A heuristic design support methodology based on graph theory for district metering of water supply networks". Engineering Optimization 43, pp. 193-211
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G.F., Tzatchkov, V y Victor, A. (2013a). "Water network sectorization based on graph theory and energy performance indices". Journal of Water Resources Planning and Management.
- Di Nardo, A., Di Natale., M., Santonastaso, F.G., Tzatchkov, V., y Victor, A. (2013b). "Water network sectorization based on genetic algorithms and minimum dissipated power path". Water Science and Technology: Water Supply 2, pp. 193-211.
- Farley, M. (2010). "Are there Alternatives to the DMA?". Assian Water. Sahana Singh. Vol 26, pp. 10-16.
- Goepel, K. (2013). AHPcal excel template. BPSMSG. <http://bpmmsg.com/new-ahp-excel-template-with-multiple-inputs/>
- Han, J., y Micheline, K. (2006). Data Mining:

Concepts and Techniques. San Francisco :Morgan Kaufmann Publisher.

Herrera, M. (2011), Improving Water Network Management by Efficient Division into Supply Clusters, Valencia, 2011.

Herrera, M. Izquierdo, J., Pérez-García, R., y Idel, M. (2012). “Multi-agent adaptive boosting on semi-supervised water supply clusters”.Advances in Engineering Software, 50, pp. 131-136.

Morrison, J., Stephen, T., y Dewi, R. (2007). District metered areas: Guidance notes. Technical Report 1. London:Water Loss Task Force. International Water Association, IWA.

Shawe-Taylor, J., y Nello, C. (2004). Kernel Methods for Pattern Analysis. Cambridge. Cambridge :Cambridge University Press.

Todini, E. (2000). “Looped water distribution design using a resilience index based heuristic approach”. UrbanWater 2, pp. 115-122.

Tzatchkov, V., Alcocer-Yamanaka, V., y Victor, B. (2008). “Sectorización de Redes de Distribución de Agua Potable a Través de Algoritmos Basados en la Teoría de Grafos”.TLALOC 40, pp. 14-22.