

DETECCIÓN DE COMUNIDADES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

COMMUNITY DETECTION IN WATER DISTRIBUTION NETWORKS

Jezabel D. Bianchotti, Pedro Ercole y Gabriel D. Puccini

Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Acuña 49, 2300 Rafaela, Argentina, gabriel.puccini@frra.utn.edu.ar

Palabras clave: Modularidad, Segmentación de redes, Recocido simulado, Optimización multiobjetivo.

Resumen. La segmentación de redes de distribución de agua en comunidades representa la implementación del paradigma 'divide y vencerás', que simplifica el análisis y permite la gestión eficiente del sistema hidráulico. Un desafío importante consiste en el diseño óptimo de la partición de redes de agua de gran tamaño sin disminuir el nivel de servicio ofrecido a los usuarios. En este trabajo se propone una metodología para la segmentación automática de una red utilizando el índice de modularidad, definido en el contexto de redes complejas, como métrica para detectar la estructura en comunidades de una red de agua; y el índice de resiliencia, definido en el contexto de los sistemas de distribución de agua, como una medida de la confiabilidad de la red. De acuerdo con esto, la segmentación se basa en dos diferentes fases de un proceso de optimización multiobjetivo. La primera tiene como objetivo encontrar la segmentación virtual de la red de agua, mientras que la segunda permite elegir la mejor ubicación para instalar los dispositivos, es decir caudalímetros y válvulas de aislación. El procedimiento de optimización, basado en el algoritmo de recocido simulado, se aplica a dos sistemas de suministro de agua: la red C-Town (un problema de referencia) y la red Huerta Grande (en Córdoba, Argentina).

Keywords: Modularity, Network segmentation, Simulated annealing, Multiobjective optimization.

Abstract. The segmentation of water distribution networks into communities represents the implementation of the paradigm of 'divide and conquer', that simplify the analysis and allows the efficient management of a water system. An important challenge consists on the optimal design of large water network partitioning without worsening the level of service offered to users. In this paper a methodology for an automatic partitioning of water network is proposed. The methodology uses the modularity index, defined into the context of complex networks, as metric to detect the community structure of water networks; and the resilience index, defined into the context of water distribution systems, as a measure of the network reliability. Accordingly, the segmentation is based on two different phases of multiobjective optimization. The first aims to find the virtual segmentation of the water network, and the second allows choosing the best position for installing the flow meters and boundary valves (On/Off). The optimization procedure, based on simulated annealing algorithm, is applied to two water supply systems: the C-Town (a benchmark problem) and Huerta Grande (a network of Córdoba, Argentina).

1. INTRODUCCIÓN

La segmentación de redes de distribución de agua potable en comunidades relativamente autónomas es una técnica para el análisis y la gestión de sistemas hidráulicos que se ha desarrollado extensamente en los países anglosajones y, en los últimos años, ha comenzado a aplicarse en Italia (Alvisi y Franchini, 2013; Wrc/WSA/WCA, 1994). Consiste en la división de la red de distribución en porciones más pequeñas, llamadas comunidades o módulos, mediante la instalación de válvulas de aislación y caudalímetros en determinados tubos. La necesidad de segmentar una red de manera óptima se relaciona con aspectos técnicos fundamentales como la planificación de sistemas de medición eficientes, la creación de zonas de control de presión, la colocación de válvulas y la instalación de sistemas de monitoreo para la detección temprana de contaminantes.

Tradicionalmente, los métodos de segmentación se realizan por “prueba y error” con ayuda de simuladores hidráulicos, o por la aplicación de diferentes reglas empíricas, como la longitud total máxima de tubos por sector o el valor recomendado de una propiedad. Estos procedimientos son difíciles de aplicar en redes de grandes dimensiones debido a que la incorporación de dispositivos puede modificar sensiblemente los parámetros de toda la red. Aunque recientemente se han propuesto técnicas heurísticas para realizar la partición de una red existente (Alvisi y Franchini, 2013; Di Nardo et al., 2014; Castro-Gamma et al., 2016), no existe una estrategia general para la segmentación de redes de agua debido a la falta de un índice que sea universalmente aceptado y que caracterice la estructura en módulos de la red.

En la teoría de redes complejas, el índice de modularidad se propone como métrica para caracterizar la estructura en comunidades de la red (Newman y Girvan, 2004). Este índice permite detectar las comunidades basado en la topología, es decir, aquellos vértices que están más densamente conectados dentro de un grupo respecto de la conectividad existente entre grupos. Sin embargo, el uso directo de este índice, definido sobre la base de consideraciones netamente topológicas, no está justificado en los sistemas hidráulicos debido a que las redes de agua son fuertemente dependientes de parámetros físicos como las presiones nodales, las demandas o los diámetros de las tuberías, por lo que estos factores deben ser tenidos en cuenta en el proceso de modularización.

En este trabajo se propone una estrategia para el diseño óptimo de la segmentación basado en dos problemas de optimización relacionados: un problema “dominante” y un problema “esclavo”. El problema dominante consiste en la detección de la estructura de comunidades de la red de agua basado en las características topológicas, en tanto que el problema esclavo consiste en el diseño óptimo de la segmentación en múltiples comunidades interconectadas basado en las características hidráulicas. Así, en primer lugar se plantea una optimización multiobjetivo para maximizar el índice de modularidad y minimizar el número de cortes virtuales y luego, sobre la base de la estructura de comunidades detectada, se determina la ubicación óptima de los dispositivos (válvulas y los caudalímetros) teniendo en cuenta tanto el costo que esta segmentación conlleva, como la búsqueda de la máxima resiliencia de la red de agua, es decir, la capacidad para sobrellevar fallas hidráulicas. El algoritmo desarrollado es aplicado a dos redes de distribución de agua, la red C-TOWN y la red de Huerta Grande, en la provincia de Córdoba.

2. MÉTODOS

2.1. Índice de modularidad

Una red de distribución de agua potable se compone de tubos, bombas, válvulas, caudalímetros, tanques y reservorios conectados de alguna manera para entregar agua a los consumidores

a una presión mínima requerida. La topología de la red puede describirse como un grafo cuyos vértices representan los nodos y sus enlaces los tubos del sistema hidráulico. Así, una red con N_n nodos se representa por una matriz de adyacencia A_{ij} de tamaño $N_n \times N_n$, con elementos $A_{ij} = 1$ sólo si los vértices i y j están conectados, en caso contrario el elemento $A_{ij} = 0$. La matriz de adyacencia permite definir el índice de modularidad Q de la siguiente manera (Newman y Girvan, 2004; Newman, 2006):

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{ij} (A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m}) \delta(c_i, c_j) \quad (1)$$

donde m denota el número de tubos (enlaces) en la red, A_{ij} es la matriz de adyacencia, $\frac{k_i k_j}{2m}$ es la probabilidad de que exista una conexión entre los vértices i y j , k_i es el grado de vértices de i y $\delta(c_i, c_j)$ es igual a 1 si el elemento i corresponde al conjunto de c_j . La maximización de Q se realiza sobre las posibles divisiones de la red en comunidades, tomando el máximo como la mejor estimación de la estructura en comunidades de la red. Nótese que esta medida de la división en módulos está basada solamente en propiedades de conectividad de la red.

2.2. Índice de resiliencia

La segmentación física de la red se consigue al introducir válvulas de aislación en tubos que delimitan módulos, tendiendo a reducir el rendimiento del sistema y disminuyendo su capacidad para sobrellevar fallas hidráulicas. El concepto de resiliencia fue introducido por Todini (2000), como medida de la confiabilidad hidráulica y habitualmente se usa para mejorar el rendimiento del sistema de agua bajo condiciones de falla, proporcionando mayor potencia en cada nodo que la mínima requerida. El índice de resiliencia se define como

$$I_R = 1 - \left(\frac{P_{int}^*}{P_{max}^*} \right) \quad (2)$$

donde $P_{int}^* = \gamma \sum_{k=1}^{N_r} Q_k H_k - \gamma \sum_{i=1}^{N_n} q_i^* h_i$ es la potencia disipada en la red para satisfacer la demanda total, y $P_{max}^* = \gamma \sum_{k=1}^{N_r} Q_k H_k - \gamma \sum_{i=1}^{N_n} q_i^* h_i^*$ es la máxima potencia disipada internamente para satisfacer las restricciones en términos de demanda q_i^* y presión h_i^* en el nodo i . Asimismo, q_i y h_i son las demandas y las presiones de cada nodo i , N_n es el número de nodos, Q_k y H_k son la descarga y la presión, respectivamente, de cada reservorio k , siendo N_r el número de reservorios y γ el peso específico del agua. Al sustituir estas expresiones, en la expresión (2), el índice de resiliencia se escribe

$$I_R = \frac{\sum_{i=1}^{N_n} q_i^* (h_i - h_i^*)}{\sum_{k=1}^{N_r} Q_k H_k - \sum_{i=1}^{N_n} q_i^* h_i^*} \quad (3)$$

Considerando que el índice propuesto está basado en un análisis del flujo de la red en estado estacionario y en la energía disipada en las tuberías, se desprende que el índice de resiliencia de una red es una medida del excedente de energía disponible en el abastecimiento (Herrera et al., 2015). De esta manera se evalúa la capacidad de la red para sobreponerse a condiciones de falla.

2.3. Formulación del problema

La primera etapa (problema dominante) consiste en identificar una estructura de comunidades que privilegian la conectividad interna sobre la externa. Las variables de diseño del problema de optimización están dadas por el conjunto de cortes virtuales C_j que definen los módulos

de la red. Esta etapa se plantea como un problema de optimización de dos objetivos:

$$\begin{aligned} \max(Q) &= \max \left\{ \frac{1}{2m} \sum_{ij} (A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m}) \delta(c_i, c_j) \right\} \\ \min(N_C) &= \min \left\{ \sum_j^m C_j \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

donde $C_j = 1$ si el j -ésimo tubo conecta dos módulos, de otra manera $C_j = 0$. Así, la función de costo que se busca minimizar es igual al número total de cortes virtuales N_C que separan módulos. El problema de optimización formulado en la Ec. (4) proporciona un conjunto Pareto de soluciones óptimas que representan el compromiso entre el número de cortes y la segmentación cuya métrica es la modularidad. Es importante notar que los cortes así obtenidos son cortes virtuales. No todos estos cortes podrán hacerse reales puesto que la modularización fue realizada teniendo en cuenta solamente la topología de la red sin tener en consideración las restricciones hidráulicas, por lo que podrían generarse presiones inferiores a la mínima establecida.

A partir del conjunto de cortes virtuales proporcionado por una solución particular del conjunto Pareto del problema dominante, en una segunda etapa se buscará determinar la ubicación óptima de los dispositivos a instalar: caudalímetros, en los tubos donde los cortes continuarán siendo virtuales y válvulas, donde los cortes puedan hacerse reales para aislar grupos de nodos de la red. Con la ubicación de estas válvulas se busca determinar una estructura de comunidades autónomas, de modo que frente a circunstancias especiales como cortes de servicio por reparación, o por presencia de contaminantes, sea posible aislar un sector sin afectar el funcionamiento del resto de la red.

La formulación del problema esclavo se plantea como un problema de optimización de dos objetivos,

$$\begin{aligned} \max(I_R) &= \max \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{N_n} q_i^* (h_i - h_i^*)}{\sum_{k=1}^{N_r} Q_k H_k - \sum_{i=1}^{N_n} q_i^* h_i^*} \right\} \\ \min(Costo) &= \min \left\{ \sum_i^{N_C} F_i \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

donde $F_i = 1$ si el i -ésimo tubo que conecta dos módulos, de otra manera $F_i = 0$. De este modo, la función de costo que se busca minimizar depende del número de caudalímetros a instalar. Es importante notar que sólo se considera el número de caudalímetros porque las válvulas de aislación poseen un costo monetario mucho menor, además de ser las encargadas de aislar en comunidades a la red. En esta segunda etapa se introdujo una penalidad en la función de costo para excluir aquellas soluciones que no satisfacen las restricciones de presión mínima requerida.

2.4. Recocido simulado para problemas de múltiples objetivos

Los problemas de optimización ec. (4) y (5) son problemas combinatorios del tipo NP-complejo. Como herramienta de optimización se implementó el algoritmo de recocido simulado (Kirkpatrick et al., 1983). Este algoritmo está basado en una generalización de la estrategia del progreso iterativo, la cual comienza con una solución inicial y luego busca, dentro de su entorno, otra solución de menor costo. La generalización introducida por recocido simulado

implica aceptar, con una probabilidad distinta de cero, una solución de mayor costo para evitar la permanencia en un mínimo local.

En el contexto de un problema de minimización de un solo objetivo, el recocido simulado comienza con una solución factible X_c a una temperatura inicial T_0 . La temperatura inicial debe ser suficientemente alta para asegurar un gran número de aceptaciones en la etapa inicial y permita explorar el espacio solución. Luego se genera una nueva solución X_n perturbando la solución inicial. Si el costo de esta solución es menor que la solución inicial, la nueva solución es aceptada como la solución actual. Pero si tiene un costo superior, la nueva solución tiene una probabilidad no nula de ser aceptada como solución actual dada por la distribución de probabilidad de Boltzmann $P = \exp[-(f(X_n) - f(X_c))/T_i]$, donde el parámetro T_i (temperatura) controla la probabilidad de aceptación de soluciones de mayores costos. Luego de un número fijo de iteraciones la temperatura es disminuida por un factor constante, en este caso $\alpha = 0,98$. El algoritmo continúa perturbando la solución actual y comparando con el costo de la solución anterior hasta alcanzar una temperatura nula.

Existen diferentes implementaciones del método recocido simulado para problemas de múltiples objetivos (Suman y Kumar, 2006). Aquí se emplea el método propuesto por Suppapitnarm et al. (2000) que comienza con un conjunto de soluciones no dominadas que forman el frente de Pareto inicial. Se genera una nueva solución perturbando una solución del conjunto inicial seleccionada aleatoriamente. Si la nueva solución es mejor que la solución perturbada en al menos un objetivo, el conjunto Pareto es actualizado y la nueva solución se renombra como la solución actual. Si no es aceptada en el paso anterior, puede ser aceptada de acuerdo al producto de las probabilidades de Boltzmann de cada objetivo.

Cada conjunto Pareto que se muestra en la Figura 1 fue construido comenzando con una solución candidata obtenida perturbando el conjunto no dominado inicial. La primera etapa del problema (dominante) no requiere la evaluación de las propiedades dinámicas de la red de agua, de modo que para cada solución perturbada se evalúan las funciones de costo dadas por la ec. (4). Esta solución candidata tiene la posibilidad de ser aceptada de acuerdo al esquema del algoritmo recocido simulado descrito más arriba. Finalmente, se determina el estatus de dominación con el objeto de actualizar el conjunto de soluciones no dominadas.

La segunda etapa del problema (esclavo) sigue el mismo procedimiento, pero en este caso se comienza perturbando una solución particular del conjunto Pareto determinado en la etapa anterior y, a diferencia del problema dominante, se deben calcular las propiedades hidráulicas de la red resultante. Estas se obtienen resolviendo el sistema hidráulico con EPANET (Rossman, 2000). El algoritmo de optimización utiliza la biblioteca de funciones de EPANET para calcular las presiones y demandas nodales que son necesarias para determinar si la solución satisface las restricciones hidráulicas del sistema, además de las funciones de costo dadas por la ec. (5). Note que en esta etapa se requiere simular la instalación de una válvula de aislamiento o de un caudalímetro. Esto se realiza con una función específica de EPANET que controla el estado de una tubería como “abierto” o “cerrado”. También debe notarse que la carga computacional de la segunda etapa es mucho mayor que la primera, puesto que para cada solución candidata debe resolverse el sistema hidráulico, mientras que la primera etapa solo requiere las propiedades topológicas de la red. Sin embargo, la división en módulos es una tarea poco frecuente y, generalmente, no es necesario realizarlo en tiempo real.

2.5. Casos estudiados

La red C-TOWN (A. Ostfeld, 2012), mostrada en la figura 2, está compuesta por 444 tubos y 396 nodos. Posee un sistema de bombeo compuesto por 3 bombas instalado adyacente al re-

servorio principal que bombea agua a cinco comunidades preexistentes. Existen además cuatro sistemas de bombeo en serie compuestos por dos bombas cada uno, y siete tanques que son llenados y vaciados durante el ciclo de operación. También cuenta con ocho medidores de presión, siete en los tanques y uno en el reservorio principal y de la misma forma son distribuidos los ocho caudalímetros. Tres válvulas reductoras de presión y una válvula de aislación controlada por un tanque están instaladas en el sistema hidráulico. Finalmente, se encuentran instalados tres manómetros para las válvulas reductoras de presión, totalizando los 22 dispositivos de la red.

La red de la figura 3 corresponde al sistema de distribución de agua de la comunidad de Huerta Grande, provincia de Córdoba, Argentina. Está compuesta por 439 tubos y 408 nodos, y durante el ciclo de operación, seis tanques son llenados y vaciados. Existe una cota de 270 metros entre los nodos ubicados a mayor y menor altura respectivamente. El sistema hidráulico no cuenta con válvulas de aislación, caudalímetros o estaciones de bombeo. La red se encuentra originalmente dividida en tres comunidades autónomas por cuestiones de diseño de la red.

3. RESULTADOS

En una primera etapa se busca encontrar el conjunto de cortes virtuales que maximizan la modularidad topológica. En la Figura 1 se muestra el conjunto Pareto de soluciones obtenido para problema de optimización establecido en la ec. (4). Se grafica el valor máximo de la modularidad en función del número de cortes virtuales que definen los módulos de la red. Con círculos se indica el conjunto Pareto obtenido para la red de C-TOWN y con cruces, el correspondiente a la red de Huerta Grande. Note que para la red de Huerta Grande se obtiene una modularidad distinta de cero aun cuando no se definan cortes virtuales, esto se debe a que el algoritmo es capaz de detectar módulos preexistentes.

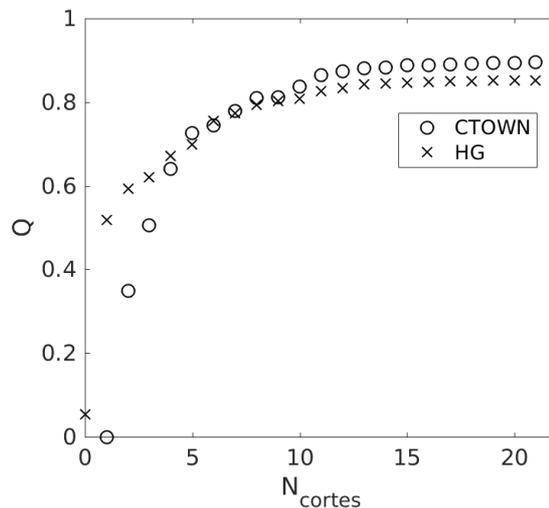


Figura 1: Conjunto Pareto de soluciones.

Cada una de las soluciones que forman el conjunto Pareto definen los cortes virtuales que delimitan los módulos de la red. Como la optimización se obtuvo a partir de la maximización del índice de modularidad dado por la ec. 1 (Newman y Girvan, 2004; Newman, 2006), los módulos obtenidos son similares en su grado de conectividad interna.

En el segundo problema de optimización, dado por la ec. (5), se obtienen las ubicaciones óptimas de los dispositivos a partir de los cortes virtuales. Para esto se requiere seleccionar una solución del conjunto Pareto obtenido en la etapa anterior. El criterio ingenieril de esta selección se basa en un compromiso entre un valor de modularidad y el número de cortes virtuales, compatibles con el presupuesto disponible para la segmentación. En la Figura 2 (derecha) se muestran los 10 módulos (diferenciados por colores) definidos por la solución del conjunto Pareto que demanda 9 cortes virtuales (indicados con líneas en color rojo). También se muestra la ubicación óptima de los caudalímetros y de las válvulas de aislamiento que se obtuvieron como solución del segundo problema de optimización. Las válvulas definen 4 comunidades que pueden funcionar de forma autónoma y que satisfacen las restricciones hidráulicas del sistema. Las comunidades formadas se ilustran delimitadas por líneas de color gris.

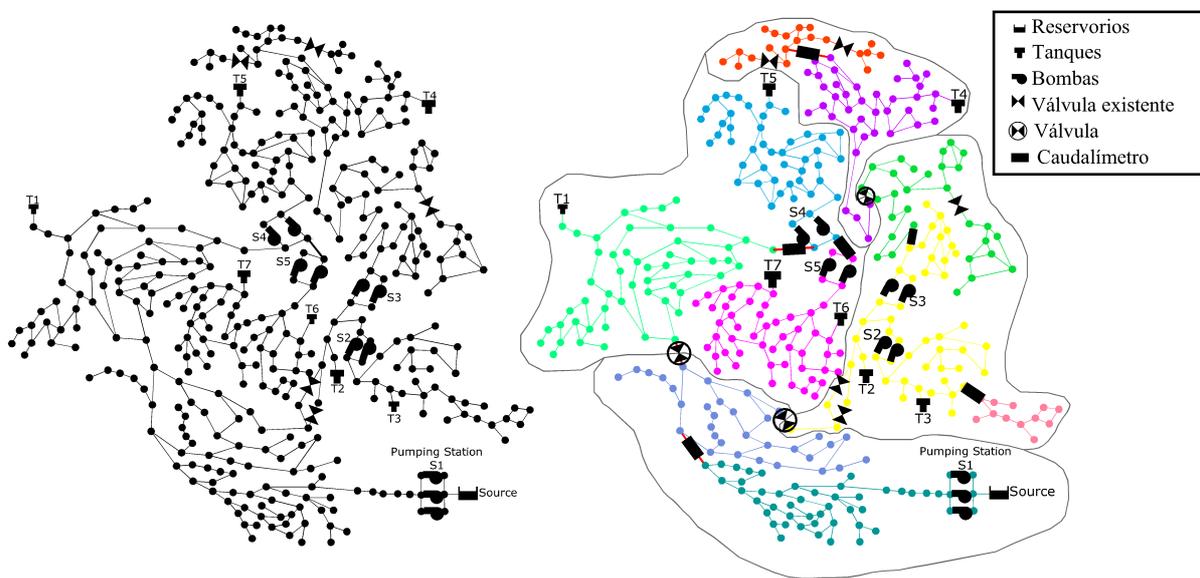


Figura 2: Red CTOWN. Izquierda: red original. Derecha: red modularizada, en colores se resaltan los módulos y encerradas con líneas de color gris las 4 comunidades autónomas.

En la tabla 1 se muestran las condiciones de funcionamiento hidráulico de la red C-TOWN. Como valores de referencia se muestran las presiones promedio mínimas y máximas de los módulos, y la presión promedio de toda la red. Puede observarse un incremento en todas las presiones promedio de la red segmentada. Otro indicador del rendimiento de la red está dado por el índice de resiliencia que mostró un aumento de 0.47 (sin segmentar) a 0.73 (segmentada).

CTOWN	N_{Mod}	Comunidades	$N_{Caud.}$	N_{Valv}	P_{min}	P_{max}	P_{prom}	I_{res}
Red original	0	0	8	4	19,92	93,96	59,59	0,47
Red segmentada	10	4	14	7	34,43	113,09	79,13	0,73

Tabla 1: Condiciones de funcionamiento de la red CTOWN sin segmentar y segmentada.

El segundo caso de estudio, la red de Huerta Grande, provee resultados similares. En la Figura 3 (derecha) se muestran los módulos definidos por una solución particular del conjunto Pareto del problema dominante, y la ubicación de las válvulas y caudalímetros obtenidos en

la segunda etapa de optimización. Para esta red se obtienen 5 comunidades autónomas con la capacidad de funcionar de forma aislada. En la tabla 2 se muestran los índices que cuantifican el rendimiento de la red original y de la red segmentada. A diferencia de la red C-TOWN, las presiones promedio máximas y mínimas disminuyen aunque la presión promedio de toda la red y el índice de resiliencia aumentan.

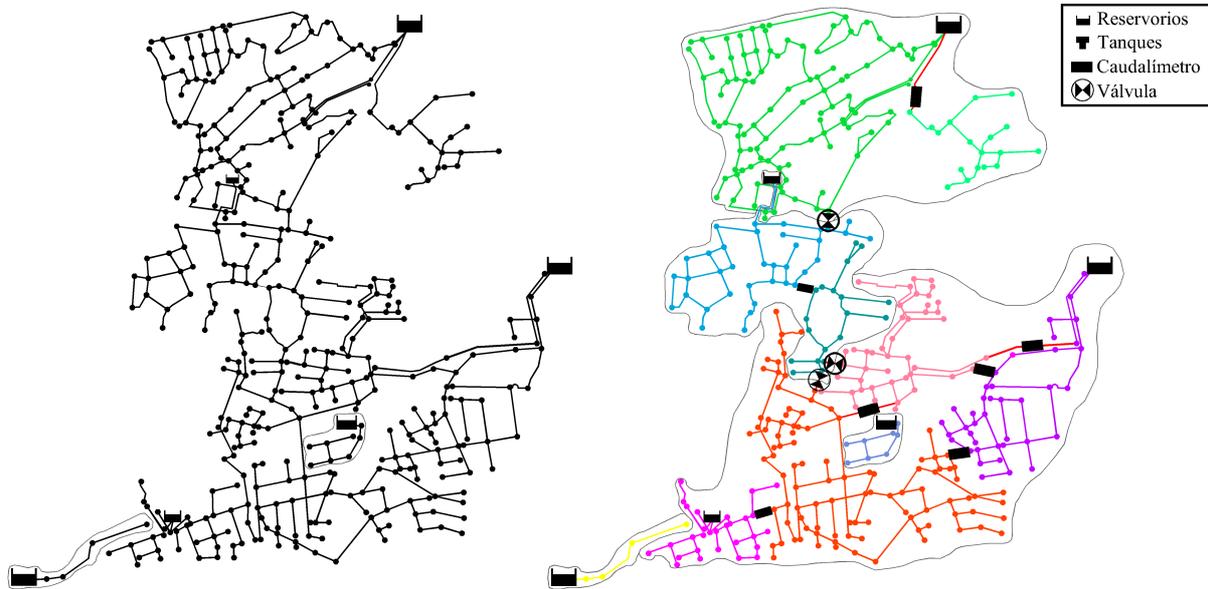


Figura 3: Huerta Grande. Izquierda: red original. Derecha: red modularizada, en colores se resaltan módulos y encerradas en líneas grises las 5 comunidades autónomas.

Huerta Grande	N_{Mod}	Comunidades	$N_{Caud.}$	N_{Valv}	P_{min}	P_{max}	P_{prom}	I_{res}
Red original	3	3	0	0	38,71	75,85	44,98	0,60
Red segmentada	10	5	7	3	37,52	75,34	46,49	0,62

Tabla 2: Condiciones de funcionamiento de la red Huerta Grande sin segmentar y segmentada.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se propone una metodología para la segmentación óptima de redes de distribución de agua potable. El enfoque desarrollado está basado en un algoritmo de optimización metaheurístico (recocido simulado), y relaciona conceptos de la teoría de redes complejas (la modularidad topológica) y específicos de los sistemas hidráulicos (el índice de resiliencia). El procedimiento general se plantea en dos etapas. La primera etapa consiste en la detección de los módulos, requiriendo únicamente la información topológica y geométrica de la red. La segunda etapa define las comunidades en base a la estructura de módulos detectada, utilizando datos hidráulicos del sistema de agua. En esta etapa se busca maximizar el rendimiento de la red, minimizando el costo económico de los dispositivos de segmentación y observación.

La metodología propuesta ha demostrado proporcionar soluciones para la segmentación óptima de dos redes de agua de mediano tamaño, C-TOWN y Huerta Grande. El rendimiento de cada red resultante fue superior al de la red sin segmentar debido al aumento de las presiones

en algunos de los nodos. Por último, debido a las condiciones establecidas por el método propuesto, las comunidades detectadas pueden funcionar de forma autónoma frente a situaciones de emergencia o cuando sea necesario aislar una zona para realizar el mantenimiento de la red.

REFERENCIAS

- Alvisi S. y Franchini M. A heuristic procedure for the automatic creation of district metered areas in water distribution system. *Urban Water Journal*, 23, 2013.
- Castro-Gamma M., Pan Q., Jonoski A., y Solomatine D. A graph theoretical sectorization approach for energy reduction in water distribution networks. *Procedia Engineering*, 154:19–26, 2016.
- Di Nardo A., Di Natale M., Santonastaso G., Tzatchkov V., y Yamanaka V.A. Divide and conquer partitioning techniques for smart water networks. *Procedia Engineering*, 89:1176–1183, 2014.
- Herrera M., Abraham E., Wright R., Izquierdo J., y Pérez-García R. Medidas híbridas para el análisis de la resiliencia de redes de distribución de agua. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2015.
- Kirkpatrick S., J.G., y Vecchi M. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220:671–680, 1983.
- Newman M. Modularity and community structure in networks. *PNAS.*, 103(23), 2006.
- Newman M. y Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks. *Phys. Rev. E.*, 69(2), 2004.
- Ostfeld A., et al. Battle of water calibration networks. *Journal of Water Resour. Plann. Manage.*, 138:523–532, 2012.
- Rossman L.A. *EPANET: User's manual*. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2000.
- Suman B. y Kumar P. A survey of simulated annealing as a tool for single and multiobjective optimization. *Journal of the Operational Research Society*, 57:1143–1160, 2006.
- Suppaitnarm A., Seffen K., Parks G., y Clarkson P. Simulated annealing: an alternative approach to true multiobjective optimization. *Engineering Optimization*, 33:59–85, 2000.
- Todini E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2:115–122, 2000.
- Wrc/WSA/WCA. Engineering and operation committee. managing leakage: Uk water industry managing leakage. *Report A-J. London: Wrc/WSA/WCA.*, 1994.