

SEGMENTACIÓN ÓPTIMA DE REDES DE AGUA BASADA EN LA CONFIABILIDAD

OPTIMAL SEGMENTATION OF WATER DISTRIBUTION NETWORKS BASED ON RELIABILITY

Jezabel D. Bianchotti, Carlos A. Bonetti 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, redes complejas, recocido simulado, optimización multiobjetivo.

Resumen. En el presente trabajo se propone una estrategia que permite segmentar las redes de agua con el propósito de facilitar el análisis y la gestión eficiente de los sistemas hidráulicos. La estrategia propuesta difiere de otras existentes en la búsqueda de un diseño que sea confiable pero que incorpore cierto grado de flexibilidad en la satisfacción de las demandas en aquellos nodos que no sean consumidores prioritarios. El enfoque tradicional para resolver el sistema hidráulico considera que las demandas nodales son independientes de las presiones. Pero este análisis, conocido como enfoque impulsado por demandas (DDA), no proporciona soluciones realistas del sistema hidráulico bajo condiciones de deficiencia de presión. Para solucionar este problema se implementa un análisis impulsado por presiones (PDA) que representa el enfoque más realista del sistema. En esta estrategia se utiliza el concepto de resiliencia generalizada para que sea consistente con el análisis PDA. Además, se toma de la teoría de redes complejas el concepto de modularidad extendida que tiene en cuenta propiedades distintas a la topología de la red. La metodología de optimización se aplica, y sus resultados se discuten, usando dos reales.

Keywords: modularity, complex networks, simulated annealing, multiobjective optimization.

Abstract. This paper proposes a strategy that allows the segmentation of water networks in order to facilitate the analysis and efficient management of hydraulic systems. The proposed strategy differs from others because the aims is to develop a reliable design but incorporating a certain degree of flexibility in satisfying demands on those nodes that are not priority consumers. The traditional approach to solving the hydraulic system considers that the nodal demands are independent of the pressures. But this analysis, known as the demand-driven approach (DDA), does not provide realistic solutions of the hydraulic system under pressure deficiency conditions. To solve this problem, a pressure-driven analysis (PDA) that represents the most realistic approach to the hydraulic system is implemented. In this strategy, the concept of generalized resilience is used to be consistent with the PDA analysis. In addition, the concept of extended modularity that takes into account properties other than the network topology, is taken from the theory of complex networks. The optimization methodology is applied, and its results are discussed, by using two networks.

1. INTRODUCCIÓN

Las redes de distribución de agua urbana son sistemas complejos que brindan un servicio vital para la sociedad. La mayoría de estas redes de distribución fueron diseñadas y construidas en el siglo pasado pero en la actualidad suelen experimentar fugas y fallas periódicas del sistema debido a los incrementos en las demandas y al deterioro de los artefactos que la componen. Estos problemas exponen a los consumidores al riesgo de accesos poco confiables al servicio de agua.

Una técnica que posibilita el análisis y la gestión eficiente de estos sistemas 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 tubos específicamente determinados. La potencialidad de segmentar una red de manera óptima está basado en 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. Los avances en las tecnologías de la información y la comunicación, y el aumento de la potencia computacional han permitido el almacenamiento de datos hidráulicos para el análisis de redes de gran tamaño. Esto ha generado un gran cambio en los métodos de segmentación que anteriormente se realizaban por “prueba y error” aunque con ayuda de simuladores hidráulicos, o por la aplicación de reglas empíricas.

El gran desarrollo que ha tenido la teoría de redes complejas ha permitido aplicar herramientas a las redes de infraestructura. El índice de modularidad se propone como métrica para caracterizar la estructura en comunidades de una red (Newman y Girvan, 2004). Este índice permite detectar comunidades basado en la topología de la red, 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 sectorización. El índice de modularidad extendido (Newman, 2004) permite incluir información sobre las propiedades de la red (longitud de los tubos, diámetros, presiones o caudales) como pesos en la matriz de adyacencia que representa la topología de la red de agua.

Como una complejidad adicional, los sistemas de distribución de agua han sido tradicionalmente simulados usando el análisis impulsado por demandas (DDA) (Todini y Pilati, 1988). Este método está basado en las ecuaciones de balance de masa y energía que se utilizan para calcular los flujos en las tuberías y las presiones en los nodos de la red, pero suponiendo que las demandas requeridas son siempre satisfechas. Aunque este enfoque es efectivo para una red operando en condiciones normales, bajo condiciones de deficiencia de presiones en las que las demandas requeridas no son satisfechas, el análisis DDA provee valores de presiones negativas sin sentido físico (Kapelán., 2006). Para sobrellevar esta dificultad, en este trabajo se realiza un análisis del sistema hidráulico impulsado por presiones (PDA), que determina el caudal suministrado en función de la presión disponible en cada nodo. Algunos autores han propuesto enfoques alternativos. Por ejemplo, Todini (2006) desarrolló una solución de tipo heurístico con tres pasos correctivos al algoritmo de gradiente global impulsado por la demanda con el fin de corregir las demandas cuando la presión es insuficiente; Piller y Van Zyl (2007) utilizaron un modelo de restricciones basadas en el balance de masa; Mahmoud et al. (2017) propusieron adicionar artefactos a los nodos con presiones inferiores a las requeridas para simular las demandas y realizar el análisis DDA con el software EPANET (Rossman, 2000).

En este trabajo se propone una estrategia para el diseño óptimo de la segmentación basado en

dos problemas de optimización relacionados: el primer paso consiste en la división conceptual de la red de agua, en tanto que el segundo paso consiste en el diseño óptimo de la segmentación en múltiples comunidades interconectadas teniendo en cuenta el comportamiento hidráulico de la red. Así, en primer lugar se plantea una optimización multiobjetivo para maximizar el índice de modularidad característico 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 caudalímetros) teniendo en cuenta tanto el costo que la segmentación como resiliencia de la red de agua, es decir, la capacidad para sobrellevar fallas hidráulicas. Como restricción adicional, se seleccionan un conjunto de nodos prioritarios que representan instituciones, como hospitales o escuelas, que bajo ninguna segmentación pueden soportar presiones menores que la requerida y que implique la interrupción del servicio de agua. Esta restricción se establece como una penalidad en la segunda etapa del proceso de optimización.

El trabajo está organizado como sigue. En la próxima sección se presentan algunas nociones básicas sobre el índice de modularidad definido en la teoría de redes complejas. Posteriormente, se define el índice de resiliencia para redes hidráulicas, seguido por la formulación matemática de los problemas de optimización multiobjetivo. La implementación del algoritmo metaheurístico utilizado se presenta al final de la sección. La descripción de los casos de estudio y los resultados obtenidos se discuten en la Sección 3. Finalmente, en la última sección se presentan las principales conclusiones.

2. METODOLOGÍA

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 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):

$$Q = \frac{1}{2n_p} \sum_{ij} (A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2n_p}) \delta(M_i, M_j) \quad (1)$$

donde k_i es el grado del nodo i , es decir el número de tubos conectados al nodo i , M_i identifica el módulo i de la red, δ es la función delta de Kronecker ($\delta = 1$ sólo si $M_i = M_j$) y la suma corre sobre todos los posibles pares de nodos (i, j) , con $i \neq j$. Básicamente, este índice de modularidad mide la fracción de tubos que pertenecen a cada módulo. Así, la modularidad Q es una medida de la capacidad que tiene la red a la división en módulos o comunidades basado solamente en propiedades de conectividad. Sin embargo, para redes de distribución de agua potable la segmentación debería considerar propiedades específicas del sistema hidráulico. Para considerar diferentes características de la red, el índice de modularidad puede definirse en base a propiedades w_k que caracterizan al flujo, es decir, caudal, longitud de tubería, volumen de tubería, etc. (Newman, 2004; Giustolisi, 2014):

$$Q_C = \frac{1}{2W} \sum_{ij} (W_{ij} - \frac{k_i^w k_j^w}{2W}) \delta(M_i, M_j) \quad (2)$$

donde W es la suma de las características de flujo $w_k (k = 1, \dots, n_p)$, $W_{ij} = w_k$ son los elementos de la matriz que caracteriza al tubo k que conecta los nodos i y j , y k_i^w es el grado de conectividad del nodo i ponderado por las propiedades de flujo.

2.2. Índice de resiliencia

La instalación de válvulas de aislación para la conformación de las comunidades autónomas tiende a reducir la capacidad de la red a sobrellevar fallas hidráulicas. Para cuantificar el rendimiento del sistema bajo una determinada segmentación se utiliza el índice de resiliencia. Este índice fue desarrollado por [Todini \(2000\)](#) como una métrica de la confiabilidad hidráulica del sistema y habitualmente se utiliza en la etapa de diseño de la red para mejorar el rendimiento del sistema bajo condiciones de falla. El índice de resiliencia se define como:

$$I_R = 1 - \left(\frac{P_{int}^*}{P_{max}^*} \right) \quad (3)$$

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 (3), el índice de resiliencia se escribe

$$I_R = \frac{\sum_{i=1}^{N_n} q_i^* (h_i - h_i^*)}{\sum_{k=1}^{N_r} Q_k H_k - \sum_{i=1}^{N_n} q_i^* h_i^*} \quad (4)$$

Considerando que el índice propuesto está basado en el análisis del flujo de la red en estado estacionario y en la energía disipada en las tuberías, se desprende que el índice de resiliencia es una medida del excedente de energía disponible para el abastecimiento ([Herrera et al., 2015](#)). De esta manera, la resiliencia evalúa la capacidad de la red para seguir operando incluso bajo condiciones de fallas.

2.3. Formulación del problema

La primera etapa consiste en identificar la estructura de comunidades maximizando la modularidad característica Q_C que implica obtener el mayor número de módulos similares entre sí con respecto a la propiedad w_k . Como propiedad característica se utilizó la diferencia entre las presiones de pares de nodos de la red, buscando que cada comunidad tengan la mayor homogeneidad en la presión de sus nodos componentes. Conjuntamente con la modularidad se pretende optimizar los cortes necesarios para la sectorización de la red, buscando la mínima cantidad de cortes virtuales C_j . Así, esta etapa se plantea como un problema de optimización de dos objetivos:

$$\begin{aligned} \max(Q_C) &= \max \left\{ \frac{1}{2W} \sum_{ij} (W_{ij} - \frac{k_i^w k_j^w}{2W}) \delta(M_i, M_j) \right\}, \\ \min(N_C) &= \min \left\{ \sum_j^m C_j \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

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. (5) 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 obtenidos son cortes virtuales, ya que la modularidad toma las presiones de la red original resolviendo el sistema hidráulico solamente una vez, al principio de la optimización, por lo cual no todos estos cortes podrán materializarse.

Del conjunto Pareto de soluciones obtenidas en la primera etapa se elige una en particular, y con ella, en la siguiente etapa, se buscará determinar la ubicación óptima de los dispositivos a instalar. En aquellos tubos donde los cortes puedan materializarse para aislar zonas de la red se colocarán válvulas, y donde el análisis de sistema hidráulico lo prohíba, se colocarán caudalímetros y se tomarán como puntos de observación. 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 de la segunda etapa se plantea también como un problema de optimización de dos objetivos,

$$\begin{aligned} \max(I_R) &= \max \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{N_n} q_i^* (h_i - h_i^*)}{\sum_{k=1}^{N_r} Q_k H_k - \sum_{i=1}^{N_n} q_i^* h_i^*} \right\}, \\ \min(Co) &= \min \left\{ \sum_i^{N_C} F_i \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

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 puntos de observación. Es importante notar que sólo se considera el número de puntos de observación porque las válvulas de aislación poseen un costo monetario mucho menor, además de ser las encargadas de aislar la red en comunidades. En esta segunda etapa, con el análisis PDA se logra flexibilizar la satisfacción de las demandas. Para valores de presión entre la presión mínima y la presión requerida, la demanda entregada es parcial. Si la presión del nodo supera la presión requerida la demanda total es satisfecha, pero si la presión se encuentra por debajo de la presión mínima, la red no aportará agua al nodo. Bajo la premisa de nodos prioritarios, como escuelas, centros de salud o centros cívicos, a los que no se los puede dejar sin servicio, se introdujeron penalidades en esta optimización para excluir aquellas soluciones que no satisfagan la demanda total de estos puntos. En la Figura 1 se muestra un diagrama flujo de la metodología propuesta.

2.4. Algoritmo de recocido simulado

Las segmentaciones óptimas de las redes se obtuvieron aplicando un algoritmo de optimización metaheurístico. En el presente trabajo se implementó un 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 (para un problema de minimización). La generalización introducida por recocido simulado para evitar la permanencia en mínimos locales consiste en aceptar algunas soluciones de mayor costo. Esto se realiza regulando la frecuencia de los movimientos de escape mediante una función de probabilidad de Boltzmann que hará disminuir la probabilidad de esos movimientos hacia soluciones de mayor costo conforme avanza la búsqueda.

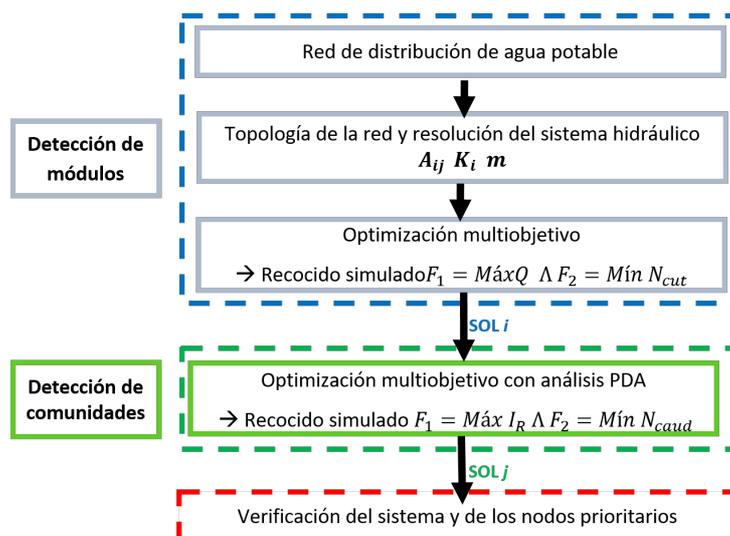


Figura 1: Diagrama de flujo del procedimiento para el diseño de la sectorización óptima.

En el contexto de un problema de minimización de un solo objetivo, el recocido simulado comienza con una temperatura inicial T_0 con una solución factible X_c con la que se evalúa la función objetivo. Luego se genera una nueva solución perturbando la solución inicial para obtener una solución X_n . Si la nueva solución tiene un costo menor, 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 costos mayores. Luego de un número fijo de iteraciones, la temperatura es disminuida por un factor constante $\alpha = 0,98$. La temperatura inicial debe ser suficientemente alta para asegurar un gran número de aceptaciones en la etapa inicial y que permita explorar el espacio solución. El algoritmo continúa perturbando la solución actual y comparando con el costo de la solución anterior hasta alcanzar un criterio de parada, como por ejemplo, un número de determinado iteraciones.

Existen diferentes implementaciones del método recocido simulado para problemas de múltiples objetivos (Suman y Kumar, 2006). Aquí se emplea el método propuesto por Suppaitnarm 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. En la figura 2 se muestra un diagrama del algoritmo que se aplicó en el presente trabajo.

En la primera etapa las propiedades dinámicas de la red de agua son calculadas al inicio de la simulación y son utilizadas durante todo el proceso de optimización. De modo que para cada solución perturbada se calculan los cambios de costos resultantes según la Ec. (5). El método de perturbación consiste en modificar el estado de los tubos (cerrado o abierto) seleccionados aleatoriamente, considerando como cerrados a aquellos que delimitan módulos. Finalmente, se determina el grado de dominación con el objeto de actualizar el conjunto de soluciones no dominadas. La segunda etapa comienza con la selección de una solución particular del conjunto de Pareto determinado anteriormente y se continúa con el procedimiento de optimización. En

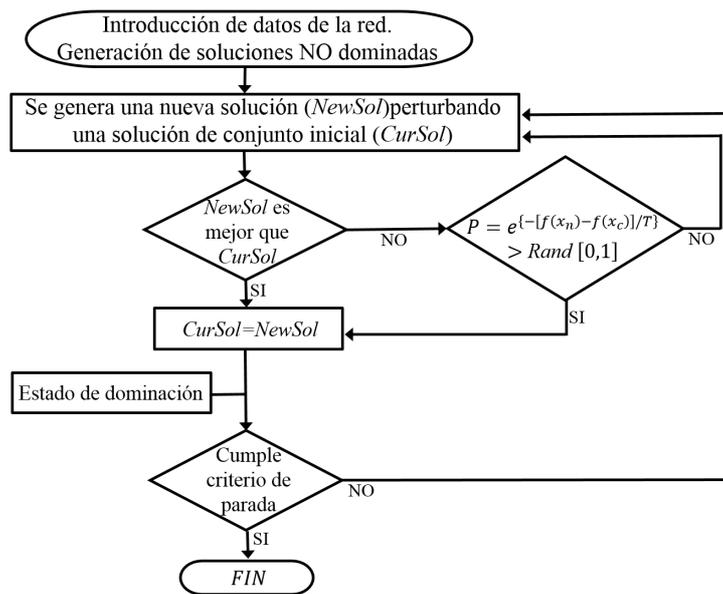


Figura 2: Diagrama de flujo de recocido simulado.

esta etapa, a diferencia de la anterior, se deberá resolver el sistema hidráulico mediante un análisis PDA a fin de conocer las condiciones de operación de la red. En cada iteración del proceso de optimización se evalúan los costos dados por Ec. (6), lo que implica una mayor carga computacional que la primera etapa.

3. CASOS DE ESTUDIO

La metodología desarrollada es aplicada a dos redes de distribución de agua potable: la red Anytown y la red de Huerta Grande. La red Anytown, mostrada en la figura 4A, está compuesta por 41 tubos, 19 nodos y 3 tanques. Posee una bomba instalada adyacente a un reservorio. Esta red de pequeño tamaño se encuentra densamente interconectada por lo que resulta desafiante detectar su estructura en comunidades. Para esta red se eligieron dos nodos prioritarios con características diferentes, uno más densamente conectado y el otro en la periferia de la red. La red de la figura 4C corresponde al sistema de distribución de agua de la comunidad de Huerta Grande, provincia de Córdoba, Argentina. Está compuesta por 431 tubos, 399 nodos y 5 tanques, y presenta una diferencia de cota de 270 metros entre la ubicación de los nodos de mayor y menor altura. La red no posee válvulas de aislación o caudalímetros, pero por cuestiones de diseño, una pequeña zona de la red se encuentra originalmente dividida. En esta red se priorizaron 3 nodos críticos a los cuales están conectados una escuela primaria, un dispensario y el centro cívico.

En la figura 3 se muestra el conjunto Pareto de soluciones para las dos redes estudiadas. Cada punto representa un conjunto de cortes virtuales que maximizan la modularidad extendida y minimizan el número de cortes virtuales. Note que para la red Huerta Grande (círculos) se obtiene un valor de modularidad distinto de cero aun sin cortes virtuales debido a que el algoritmo es capaz de detectar módulos preexistentes. Puesto que la optimización se obtuvo a partir de la maximización del índice de modularidad dado por la Ec. 2 (Newman, 2004), los módulos obtenidos son similares considerando las presiones de cada uno de los nodos que lo componen.

En la figura 4A se muestran los cortes virtuales establecidos por una solución particular del conjunto de Pareto para la red Anytown. Se muestran los 14 cortes virtuales (indicados

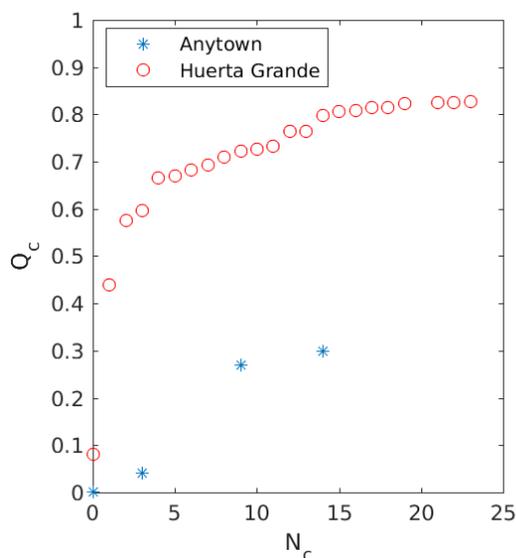


Figura 3: Conjunto Pareto de soluciones para las dos redes estudiadas.

con líneas en color rojo) que limitan 3 módulos. La elección de una solución particular debe realizarse siguiendo el criterio ingenieril basado en el compromiso entre el número de módulos y el número de cortes que sean compatibles con la gestión requerida y con el presupuesto disponible para la sectorización. En la figura 4B se observan los resultados de la optimización del problema planteado en la Ec. 6, que incluye las ubicaciones óptimas de las válvulas de aislación para delimitar dos comunidades autónomas.

En la figura 4C se muestran los resultados finales del análisis de la red Huerta Grande. Con cada color se resaltan los 9 módulos obtenidos a partir de los 10 cortes virtuales de una solución particular del conjunto Pareto. La ubicación óptima de las válvulas y los caudalímetros que se obtuvieron en la segunda etapa definen las comunidades que se reflejan agrupadas por módulos con tonalidades de colores similares. En este caso, se encuentran 5 comunidades que pueden funcionar de forma autónoma y que satisfacen las restricciones hidráulicas del sistema garantizando las presiones necesarias en los nodos prioritarios de la comunidad. Así, ante una situación de emergencia, con esta segmentación se garantiza que la escuela primaria, el dispensario y el municipio podrán continuar operando sin disminuir el servicio de agua.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se propone una metodología para la segmentación óptima de redes de distribución de agua potable. El enfoque desarrollado utiliza el concepto de modularidad extendida definido en el contexto de la teoría de redes complejas. A diferencia de la modularidad topológica, la modularidad extendida permite incorporar propiedades específicas de una red de agua. En este trabajo se considera la diferencia de presión entre los extremos de cada tubería como propiedad característica de la red. Además, se permite cierto grado de flexibilidad en la satisfacción de las demandas siempre que los nodos deficitarios no sean los nodos prioritarios, es decir nodos cuya interrupción del servicio puede impactar fuertemente en la salud pública (escuelas, centros de salud o centros cívicos). Esta flexibilidad impone implementar un enfoque PDA para la resolución del sistema hidráulico bajo condiciones de deficiencia. Consistente con este enfoque, se utiliza el concepto de resiliencia generalizada para cuantificar la confiabilidad de la red segmentada.

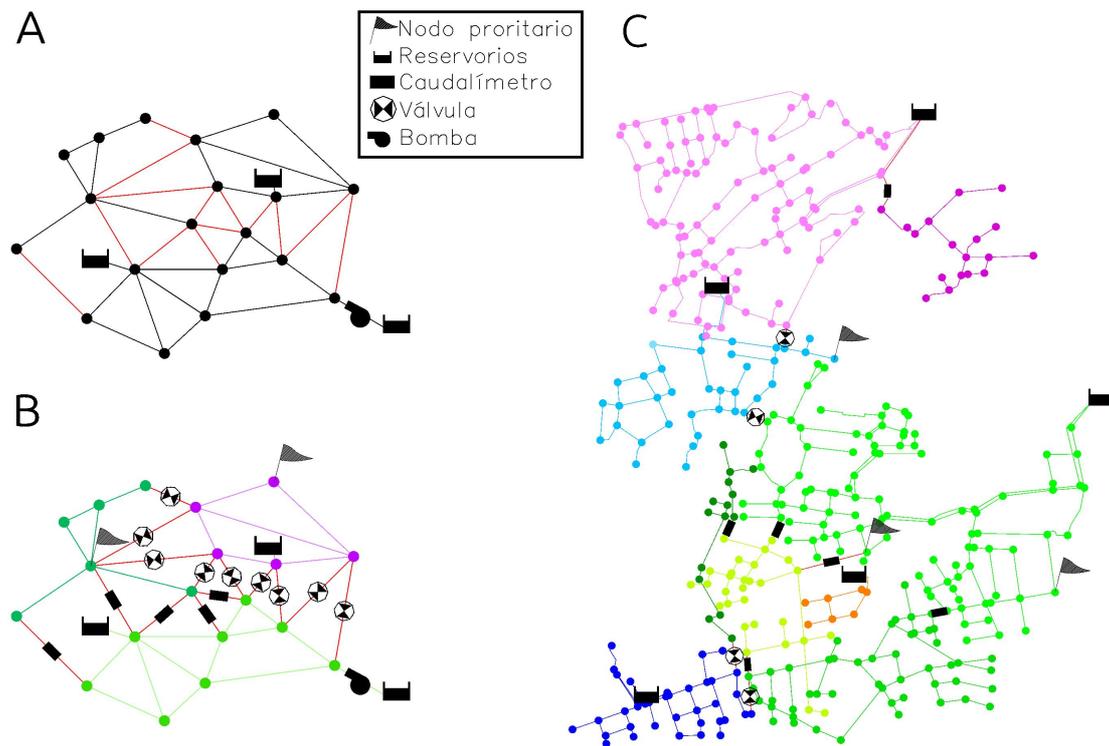


Figura 4: A Módulos obtenidos en la primera etapa para la red Red Anytown. Estructura de comunidades delimitadas por válvulas y caudalímetros obtenida en la segunda etapa para la red Anytown (B) y Huerta Grande (C). Módulos diferenciados por colores y comunidades agrupadas por módulos con tonalidades de colores similares.

El procedimiento general se plantea en dos etapas cada una de las cuales involucra un problema de optimización de múltiples objetivos. La primera etapa consiste en la detección conceptual de los módulos, requiriendo únicamente la información del funcionamiento inicial de la red sin segmentar. En esta etapa se busca maximizar la modularidad extendida pero minimizando el número de cortes virtuales. La segunda etapa consiste en el diseño óptimo de la segmentación en múltiples comunidades interconectadas basado en sus comportamientos hidráulicos. En esta etapa se busca maximizar el rendimiento de la red garantizando el servicio de agua en los nodos prioritarios pero minimizando el costo económico de los dispositivos de segmentación y observación.

La naturaleza combinatoria de los problemas de optimización requiere el uso de métodos metaheurísticos. Así, como herramienta de optimización se utiliza el algoritmo de recocido simulado para múltiples objetivos. La metodología propuesta ha demostrado proporcionar soluciones confiables para la segmentación óptima de dos redes de agua de distinto tamaño, Anytown y Huerta Grande. Bajo las condiciones establecidas en la metodología, las comunidades conformadas son capaces de funcionar de forma autónoma frente a situaciones de emergencia que impliquen la aislación de cierto sector, garantizando la continuidad del servicio en los puntos importantes.

REFERENCIAS

- A. Ostfeld e. Battle of water calibration networks. *Journal of Water Resour. Plann. Manage.*, 138:523–532, 2012.

- 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 technouques for smart water networks. *Procedia Engineering*, 89:1176–1183, 2014.
- Giustolisi O., y Ridolfi L. New Modularity-Based Approach to Segmentation of Water Distribution Networks. *J. Hydraul. Eng.*, 140 (10) 04014049:1-14, 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.
- Kapelan Z., y Giustolisi O. Risk assessment of water supply interruptions due to mechanical pipe failures. *Combined Int. Conf. of Computing and Control for the Water Industry and Sustainable Urban Water Management*, Taylor & Francis, London, 2006.
- Kirkpatrick S., . J.G., y Vecchi M. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220:671–680, 1983.
- Mahmud H. A., Savíc D., y Kapelan Z. New pressure-driven approach for modeling water distribution networks. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 143(8): -1–1, 2017.
- Newman M. Modularity and community structure in networks. *PNAS.*, 103(23), 2006.
- Newman M. Analysis of weighted networks. *Phys. Rev. E.*, 70, 2004.
- Newman M. y Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks. *Phys. Rev. E.*, 69(2), 2004.
- Piller O. y Van Zyl J. E. A unified framework for pressure driven network analysis. *Proc., Computer and Control in Water Industry*, Taylor & Francis Group, London, 25-30, 2007
- 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. A gradient algorithm for the analysis of pipe networks *Wiley. London*, 1-20, 1988.
- Todini E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2:115–122, 2000.
- Todini E. Towards realistic extended period simulations (EPS) in looped pipe network.” *Proc., 8th Annual Int. Symp. on Water Distribution Systems Analysis*, ASCE, Reston, VA.
- Wrc/WSA/WCA. Engineering and operation committee. managing leakage: Uk water industry managing leakage. *Report A-J. London: Wrc/WSA/WCA.*, 1994.