

COMPARACIÓN DE INDICADORES PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE DISTRITOS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

COMPARISON OF INDICATORS FOR THE OPTIMAL DESIGN OF DISTRICTS IN WATER DISTRIBUTION NETWORKS

Jezabel D. Bianchotti, Melina Denardi, Mario Castro-Gama 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*

*Water Expertise Center (WEC) at Vitens N.V., Oude Veerweg 1, Zwolle, 8001 BE Zwolle.,
Mario.CastroGama@vitens.nl*

Palabras clave: Sectorización; optimización; recocido simulado; coeficiente de Gini.

Resumen. La sectorización es una técnica que permite reducir las complejidades asociadas al análisis y la gestión de las redes de agua potable. Los distritos que resultan de la partición deben satisfacer ciertas condiciones como número mínimo de intervenciones, uniformidad en las presiones y similitud de las demandas, entre otras. Desarrollar una metodología para el diseño óptimo de distritos que sea eficiente y satisfaga algunas de tales exigencias representa un gran desafío. En este trabajo, se investiga la aplicación de tres criterios diferentes de sectorización. Para ello, se presenta un enfoque de optimización de dos etapas. La primera etapa, la detección de comunidades, se basa en un algoritmo del tipo Louvain para la maximización del índice de modularidad para redes ponderadas. La segunda etapa, la división física del sistema, se plantea como un problema de optimización de dos objetivos que utiliza un algoritmo de recocido simulado. El primero de estos objetivos es el número de válvulas de aislamiento, mientras que para el segundo objetivo se proponen tres índices diferentes: (a) Pérdida de resiliencia, (b) Coeficiente de Gini y (c) Desviación estándar, los dos últimos definidos para cuantificar la uniformidad de las presiones entre distritos. La metodología desarrollada se aplica a un caso de estudio real de mediano tamaño.

Keywords: Sectorization; optimization; simulated annealing; Gini coefficient

Abstract. Sectorization is a wide used technique that reduces the complexities associated with the analysis and management of drinking water networks. The districts resulting from sectorization are expected to meet certain performance criteria, such as the minimum number of interventions, uniformity in pressures, and similarity in demands, among others. Developing a methodology for optimal district design that meets some of these requirements is a significant challenge. In this work, the advantages in the use of three different criteria are compared. To this, a two-stage approach is presented. The first stage, the communities detection, is based on a Louvain-type algorithm for the maximization of modularity in weighted networks. The second stage, the physical division of the system, is posed as a two-objective optimization problem using a simulated annealing algorithm. The first of these objectives is the number of isolation valves, while for the second objective three different indices are studied: (a) Loss off resilience, (b) Gini coefficient and (c) Standard deviation, the last two are defined to quantify pressures uniformity. The methodology is applied to real study case: a medium-sized network.

1. INTRODUCCIÓN

Las redes de infraestructura juegan un rol crucial en la sociedad moderna. Entre las más importantes se encuentran las redes de distribución de agua (WDNs, por sus siglas en inglés) que están destinadas a abastecer de agua potable a la población. En redes antiguas, la calidad del servicio se ve muchas veces afectada por el crecimiento de la demanda, asociada a la expansión de las ciudades, o bien por las fugas que se producen como consecuencia del envejecimiento de los componentes del sistema hidráulico.

El tamaño de las redes de agua y la naturaleza no lineal del sistema hidráulico hacen que el control de la calidad del agua, la reducción de fugas y la gestión de la presión sean tareas extremadamente difíciles de ejecutar. La división de las WDNs en áreas más pequeñas, llamadas áreas de medición de distritos (DMAs, por sus siglas en inglés), es una técnica eficaz que reduce la complejidad en el análisis y la gestión de estas infraestructuras.

En la última década, la sectorización de las redes de agua ha atraído un gran interés dentro de un amplio grupo de investigadores (ver ref. [Kho-Bui et al. \(2020\)](#) para una revisión). Para redes reales, la sectorización óptima en una sola etapa es computacionalmente prohibitiva. Esto se debe a que el sistema hidráulico debe resolverse para cada sectorización candidata a fin de cumplir con las restricciones que caracterizan una buena partición de la WDN ([Hajebi et al., 2015](#)). Dentro de este contexto, hay una intensa investigación que busca encontrar métodos cuyo tiempo de cómputo sea mínimo ([Chatzivasili et al., 2019](#)). En términos generales, los métodos de diseño siguen dos etapas. La primera etapa, busca la división de la WDN basada en consideraciones topológicas y se logra mediante el uso de diferentes conceptos de teoría de grafos ([Alvisi y Franchini, 2013](#); [Hajebi et al., 2015](#); [Scarpa et al., 2016](#)), teoría de redes complejas ([Scibetta et al., 2014](#); [Giustolisi y Ridolfi, 2014](#); [Campbell et al., 2014](#); [Castro-Gama et al., 2016](#); [Laucelli et al., 2016](#); [Zhang et al., 2017](#); [Di-Nardo et al., 2020](#); [Bianchotti et al., 2021](#)) o siguiendo un enfoque de multiagentes ([Herrera et al., 2010](#)). La segunda etapa, se ocupa de la ubicación de caudalímetros y válvulas de aislamiento en base a los diferentes indicadores hidráulicos que se buscan optimizar. En la literatura se utilizaron varias alternativas para estos indicadores: índice de resiliencia ([Scarpa et al., 2016](#); [Vasilic et al., 2020](#)), fugas de fondo ([Laucelli et al., 2016](#)), número de observaciones de flujo ([Giustolisi y Ridolfi, 2014](#); [Laucelli et al., 2016](#)), además de otros indicadores como edad del agua, entropía ([Scarpa et al., 2016](#)), y potencia disipada ([Di-Nardo et al., 2013](#)). Otros diseños, basados en el concepto de modularidad, proponen el uso de un algoritmo de partición para crear DMAs a través de información codificada por ponderaciones de las tuberías ([Creaco et al., 2019](#)).

El diseño de los distritos de una red de agua no es único debido a la amplia variedad de topologías y diversas características hidráulicas que las redes pueden tener. En los casos en que las redes posean una única fuente, el diseño de los DMAs se realiza con el uso de caudalímetros. Sin embargo, en el presente trabajo se propone el diseño óptimo de distritos para una WDN con múltiples fuentes, donde cada DMA es aislada del resto de la red mediante válvulas de aislamiento en tuberías óptimamente seleccionadas. La partición se concibe, entonces, identificando una o más fuentes por DMA lo que permite garantizar el servicio agua a todos los consumidores. La determinación óptima del número y ubicación de estas válvulas se propone aquí como un problema multiobjetivo.

Aunque se busca que la mejor partición cumpla con ciertos criterios de diseño, como costos mínimos de intervención, uniformidad de presiones, similitud de demandas, calidad del agua y número de distritos, entre otros ([Rahmani et al., 2018](#)) ([Saldarriaga et al., 2019](#)), en la actualidad no existe un procedimiento general que permita, por un lado, lograr que todos ellos se satisfagan

al mismo tiempo y, por el otro, la elección adecuada de un criterio que rijan las particiones.

El objetivo de este estudio es la evaluación de diferentes criterios de partición para el diseño óptimo de DMAs que presenten uniformidad en las presiones. De forma similar a [Bianchotti et al. \(2021\)](#), se desarrolla una metodología de dos etapas (ver también [Bianchotti J. \(2018\)](#), [Bianchotti J. \(2019\)](#)). La primera etapa, consiste en la división conceptual de la red en módulos o comunidades independientes usando índice de modularidad como métrica para caracterizar la estructura en comunidades de una red ([Newman y Girvan, 2004](#)). Particularmente, en este trabajo se propone utilizar el índice de modularidad extendido para redes ponderadas ([Newman, 2004](#)).

La segunda etapa, se formula como un procedimiento de optimización de dos objetivos y consiste en la división física del sistema en subsistemas o distritos hidráulicamente independientes, agrupando los módulos definidos en la primera etapa para la formación de distritos. Estos distritos se diseñan implementando los siguientes objetivos: (1) minimizar el número de conexiones entre las comunidades de obtenidas en la primera etapa (de manera equivalente, maximizar el número de válvulas a instalar), y (2) minimizar tres métricas diferentes: (a) Pérdida de resiliencia, (b) Coeficiente de Gini y (c) Desviación estándar. Por lo tanto, este procedimiento proporciona tres conjuntos de soluciones óptimas que dan la posibilidad de una comparación no sesgada, ya que todas se obtienen basándose en el mismo agrupamiento inicial. La metodología se aplicó a una red real compuesta de 3 depósitos y 128 tubos reportada en la literatura ([Zheng y Zecchin, 2014](#); [Kang y Lansey, 2012](#)).

El trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera. En la próxima sección se detallan los procedimientos realizados y se presentan las nociones teóricas sobre el índice de modularidad para redes ponderadas. Posteriormente, se define la formulación matemática del problema de optimización multiobjetivo. La descripción del caso de estudio y los resultados obtenidos se discuten en la Sección 3. Finalmente, en la última sección se presentan las principales conclusiones.

2. METODOLOGÍA

La ciencia de redes proporciona un medio para extraer y caracterizar la estructura topológica que está presente en los sistemas de distribución de agua ([Alireza y Paul, 2011](#); [Todini y Pilati, 1988](#)). Esta estructura se puede describir como un grafo $G(V, E)$, donde el conjunto de vértices $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ representa los nodos, depósitos y tanques, y el conjunto de enlaces $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ representa las tuberías, válvulas y bombas del sistema hidráulico, donde n es el número de nodos y m es el número de tuberías. La topología de una red puede ser descrita con la matriz de adyacencia, donde una red con n nodos se representa por una matriz de adyacencia A de tamaño $n \times n$, con elementos $A_{ij} = 1$ sólo si los vértices i y j están conectados, en caso contrario el elemento $A_{ij} = 0$.

2.1. Primera etapa: identificación de módulos

La detección de comunidades o módulos es un tema estudiado por la ciencia de redes. Existen diferentes métodos para la identificación de módulos ([Porter et al., 2009](#); [Fortunato, 2010](#)). Una de los más utilizados se basa en la optimización del índice de modularidad Q ([Newman y Girvan, 2004](#)), el cual mide la capacidad que tiene la red a la división en módulos de acuerdo a sus propiedades de conectividad. Sin embargo, ciertos sistemas son sumamente dependientes de propiedades específicas. En el caso de las WDNs, esta dependencia está asociada a propiedades físicas del sistema hidráulico, como caudales, presiones y demandas. Para poder considerarlas,

el índice de modularidad puede extenderse para redes ponderadas y se define (Newman, 2004; Giustolisi et al., 2014):

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

donde A_{ij} son los elementos de la matriz de adyacencia \mathbf{A} , en la cual se ponderan los enlaces entre los vértices i y j con una propiedad física de la red, k_i es el grado del vértice i y $m = \frac{1}{2} \sum_{ij} A_{ij}$. La función delta de Kronecker δ es igual a uno si el vértice i y j pertenece a la misma comunidad ($C_i = C_j$) y cero en caso contrario. En este trabajo se usa el caudal Q_{ij} como la propiedad utilizada para la ponderación de la red.

Existen varias estrategias heurísticas para la maximización de la modularidad Q . En este trabajo, se aplica un algoritmo del tipo Louvain (Blondel et al., 2008; Jeub et al., 2011-2019). La partición proporciona un conjunto de enlaces, denominados *cortes conceptuales* que son las variables de diseño de la primera etapa y vienen dadas por el vector binario $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, donde $x_i = 0$ en caso de que exista un corte conceptual, y $x_i = 1$ de lo contrario. Es importante notar que estos cortes obtenidos son cortes conceptuales, ya que esta etapa se realiza sin resolver el sistema hidráulico. Como consecuencia, no todos estos cortes podrán materializarse sobre la red para lograr su división en comunidades autónomas capaces de garantizar el servicio de agua potable.

2.2. Segunda etapa: diseño de distritos

La segunda etapa, consiste en ubicar de manera óptima los dispositivos de aislamiento, es decir, establecer cuáles de los cortes conceptuales definidos en la primera etapa podrán materializarse. Con la ubicación de 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 toda la red.

La formulación del problema de la segunda etapa se plantea como un problema de optimización de dos objetivos. Se propone minimizar el número de tuberías que deben permanecer conectadas junto con algunas de las siguientes métricas para caracterizar el sistema hidráulico: a) Pérdida de resiliencia, b) Coeficiente de Gini y c) Desviación estándar.

a) *Pérdida de resiliencia* (\mathbf{P}_R). El índice de resiliencia fue introducido por Todini (Todini, 2000) y viene dado por:

$$I_R = \frac{\sum_{i=1}^n q_i^* (h_i - h_i^*)}{\sum_{k=1}^r Q_k H_k - \sum_{i=1}^n q_i^* h_i^*} \quad (2)$$

donde q_i^* y h_i^* denotan, respectivamente, la demanda mínima requerida y la carga en el nodo i . De manera similar, q_i y h_i representan la demanda y la altura del nodo i , n es el número de nodos, Q_k y H_k son la descarga y la altura, respectivamente, del reservorio k , donde r es el número de depósitos.

El I_R representa un indicador importante de la energía disponible que permite que el agua encuentre caminos alternativos cuando la red está dividida. La reconfiguración de la red mediante particiones conduce a una disminución de la resiliencia. En este trabajo se propone minimizar la pérdida de resiliencia:

$$P_R = 1 - I_R \quad (3)$$

b) *Coefficiente de Gini (G)*. Aunque el coeficiente de Gini se definió originalmente como una medida de la desigualdad de ingresos en una sociedad, también se utiliza como medida de cualquier distribución desigual. Consiste en un índice que varía entre 0 (igualdad absoluta) y 1 (desigualdad absoluta). En este estudio, G se utiliza para minimizar la desigualdad de las presiones por cada distrito. Formalmente, G se define como:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |p_i - p_j|}{2N^2\bar{p}} \quad (4)$$

donde p_i denota la presión total de la comunidad i , \bar{p} es la presión promedio del sistema de agua completo y N es el número de distritos.

b) *Desviación estándar (S)*. Esta métrica cuantifica la dispersión de las presiones entre comunidades, es decir:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p}_i)^2}{N - 1}} \quad (5)$$

donde p_i es la presión total de la comunidad i , \bar{p}_i es la presión promedio de la comunidad i y N es el número de comunidades.

Formalmente, la optimización de dos objetivos se formula como:

$$F_1(\mathbf{Y}) = \min \left\{ \sum_{i=1}^v y_i \right\} \quad (6)$$

$$F_2(\mathbf{Y}) = \min[P_R] \text{ o } \min[G] \text{ o } \min[S]$$

donde y_i representa el número de cortes conceptuales definidos en la etapa uno que no pueden ser materializados. Para la resolución de las simulaciones hidráulicas se utilizó el software EPANET 2.0 (Rossman, 2000).

3. RESULTADOS

La metodología desarrollada se aplicó a una red de distribución de agua potable denominada red de tres embalses (TRN) que fue estudiada por (Zheng y Zecchin, 2014). Esta red, ilustrada en la Figura 1, está compuesta por 287 tubos y 202 nodos. Durante el ciclo de operación, se utilizan tres depósitos como fuentes. La diferencia entre la elevación máxima y mínima del terreno es igual a 37 m.

Como resultado de la primera etapa, en la figura 1 se muestran 54 cortes (indicados en rojo) que definen 11 módulos. Esta configuración se corresponde con el máximo global para la modularidad calculada con la matriz de adyacencia ponderada por la presión. Esta solución es el punto de partida para la segunda etapa.

Como resultado de la segunda etapa, se obtuvieron varios diseños de DMAs para cada métrica estudiada. Cada una de las soluciones obtenidas se muestran en las Tablas 1, 2 y 3 donde se detalla el número de DMAs, el número de intervenciones, el valor de cada métrica y las presiones extremas y promedio, para conocer el desempeño del sistema hidráulico frente a cada configuración. El número máximo de DMAs que se encuentra para cada métrica está limitado por el número de embalses.

Para ilustrar una sectorización particular, de cada métrica se seleccionó una configuración con tres DMAs. Como resultado de la optimización de P_R , sólo una solución determina tres DMAs. En cambio, para G , de las cuatro soluciones obtenidas tres son capaces de detectar tres

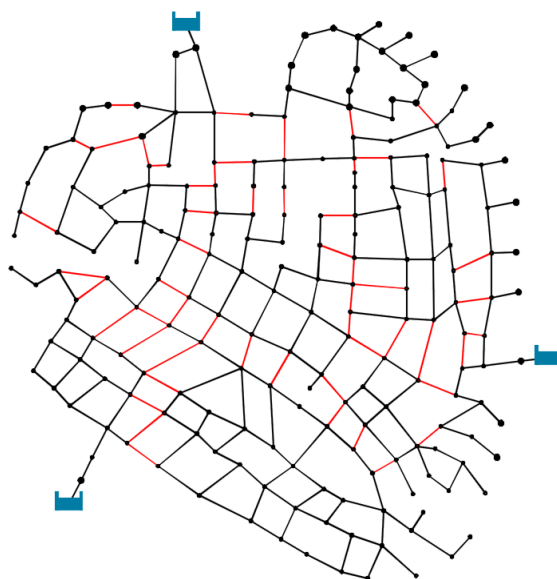


Figura 1: Cortes conceptuales obtenidos en la primer etapa de optimización.

DMAs. En este segundo caso se seleccionó el diseño que, con la misma cantidad de distritos, es capaz de minimizar la diferencia en la distribución de presiones y que, además, requiere menor número de intervenciones. En el caso de S , la optimización generó tres configuraciones alternativas, de las cuales dos definen tres DMAs. Como en el caso anterior, se seleccionó la solución que con el número máximo de distritos otorgó mejores resultados para el índice optimizado y un menor número de válvulas. Las configuraciones obtenidas para cada una de estas soluciones seleccionadas se muestran en la Figura 2. Se observa que dos soluciones poseen un distrito compuesto por los mismo nodos. La figura 3 muestra las distribuciones de demanda correspondientes para cada distrito, siguiendo el esquema de colores para cada comunidad definido en la figura 2.

N° DMA	$P_{min}(m)$	$P_{max}(m)$	$\bar{P}(m)$	P_R	G	S	N° válvulas
3	3.28	28.99	14.05	0.579	0.265	0.199	23
2	11.44	28.99	16.66	0.506	0.232	0.328	19
2	13.10	31.00	17.73	0.474	0.168	0.238	13
2	13.77	29.98	17.72	0.473	0.251	0.356	11

Tabla 1: Condiciones de operación para cada solución obtenida para la minimización de P_R

En la figura 4, se muestran las presiones obtenidas para las soluciones óptimas seleccionadas, en el caso extremo de que las válvulas estén cerradas aislando todos los DMAs. Para las soluciones A (P_R) y B (G) se puede observar que el módulo que posee las mayores presiones posee, además, la misma configuración. En el caso de las soluciones B y C (S) también comparten un distrito idéntico (sombreado en verde). La solución A muestra mayor variación de presión dentro de un distrito. Los picos de presión que se generan en la red determinada por esta solución aumenta la resiliencia pero no garantiza un servicio homogéneo en toda la red. La solución B genera en las DMAs presiones mínimas más altas que la solución A, sin embargo la solución

N° DMA	$P_{min}(m)$	$P_{max}(m)$	$\bar{P}(m)$	P_R	G	S	N° válvulas
3	3.28	28.99	14.05	0.579	0.265	0.199	23
3	3.41	29.07	10.53	0.672	0.243	0.201	21
3	4.27	28.35	14.46	0.574	0.235	0.187	20
2	9.21	27.50	15.02	0.555	0.004	0.006	13

Tabla 2: Condiciones de operación para cada solución obtenida para la optimización de G

N° DMA	$P_{min}(m)$	$P_{max}(m)$	$\bar{P}(m)$	P_R	G	S	N° válvulas
3	0.94	33.43	11.32	0.655	0.199	0.163	22
3	13.47	31.01	17.69	0.475	0.113	0.085	21
2	9.21	27.50	15.02	0.555	0.005	0.006	13

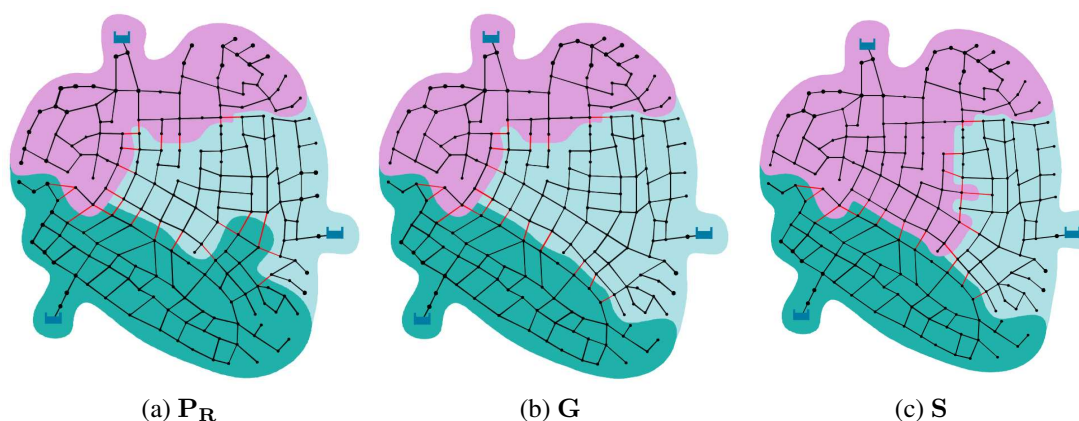
Tabla 3: Condiciones de operación para cada solución obtenida para la optimización de S de las presiones

Figura 2: DMAs seleccionados de la segunda etapa de optimización para cada métrica.

C es la que genera las presiones mínimas más altas. La solución C, es la configuración que genera las presiones más homogéneas entre los tres DMAs. Esta configuración es la que define el DMAs más grande con 90 nodos, lo que representa el 44.55 % de la red. Una comparación con las demás soluciones muestra que el aumento de tamaño para este distrito determina una disminución en las presiones de sus nodos, pero mejora las condiciones de los demás distritos otorgando mejores condiciones hidráulicas a toda la red.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se propone una metodología de dos etapas para la partición de redes de distribución de agua. La primera etapa usa un algoritmo del tipo Louvain para la sectorización inicial que está basada en la maximización de la modularidad ponderada por caudales. En la segunda etapa, se realizan tres optimizaciones independientes, cada una de dos objetivos, que comienzan de la misma configuración inicial. En esta etapa se busca determinar la ubicación y la cantidad de las válvulas de aislamiento en tubos óptimamente seleccionados. Como objetivo de la optimización se busca la uniformidad de las presiones entre distritos. Para esto se investigan

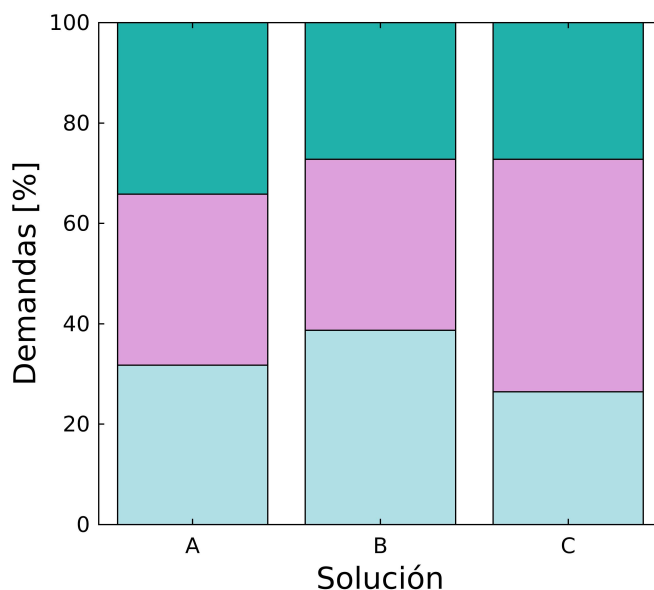


Figura 3: Distribución porcentual de las demandas por módulos para cada solución indicada.

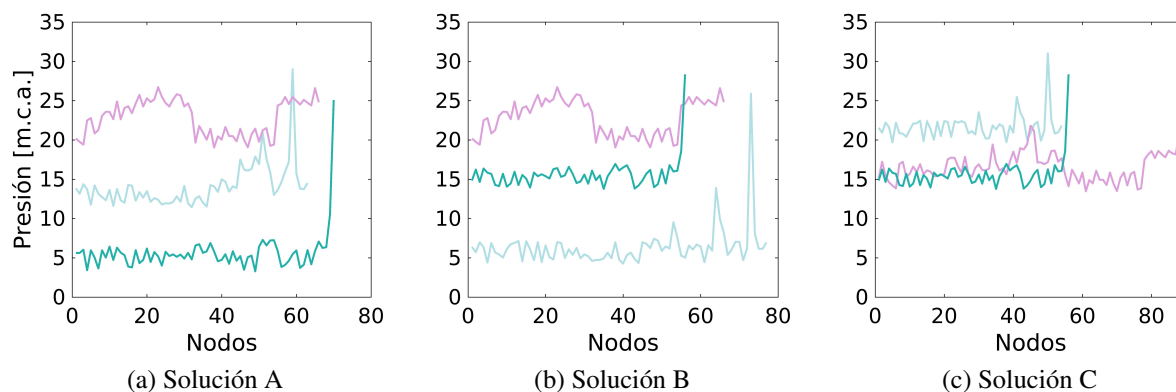


Figura 4: Presiones nodales identificadas por módulos para las soluciones óptimas seleccionadas.

tres indicadores: P_R , G y S . Aunque el primer indicador provee una única solución con tres DMAs, el rendimiento hidráulico de los DMAs obtenidos bajo la minimización de P_R y G son similares en término de distribución de demandas y uniformidad de presiones. También se observa que una distribución homogénea en las demandas no garantiza la uniformidad de las presiones. En cambio, los distritos obtenidos bajo la minimización del tercer indicador, S , muestran una mejor uniformidad en las presiones entre módulos y un incremento en la presión mínima. Estudios previos usando estos mismo indicadores (Bianchotti et al., 2021), aunque bajo distintas condiciones iniciales (es decir, sectorización topológica sin ponderación por caudales) y diferentes criterios de optimización (es decir, uniformidad en las demandas entre módulos), mostraban que la desviación estándar era el criterio que proveía diseños de distritos con menor rendimiento hidráulico. De modo, los resultados sugieren que no existe un criterio universal que gobierne el diseño óptimo de distritos.

REFERENCIAS

- Alireza Y. y Paul J. Complex network analysis of water distribution systems. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 21(1):016111, 2011. doi:10.1063/1.3540339.
- 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.
- Bianchotti J.D., Denardi M., Castro-Gama M., y Puccini G.D. Sectorization for water distribution systems with multiple sources: A performance indices comparison. *Water*, 13(2), 2021. ISSN 2073-4441. doi:10.3390/w13020131.
- Bianchotti J. Bonetti C. P.G. Segmentacion optima de redes de agua basada en la confiabilidad. *Mecanica Computacional*, Vol XXXVII. ISSN 2591-3522:1823– 1832, 2019.
- Bianchotti J. Ercole P. P.G. Deteccion de comunidades en redes de distribucion de agua potable. *Mecanica Computacional*, 36 ISSN 2591-3522:2059–2067, 2018.
- Blondel V.D., Guillaume J., Lambiotte R., y Lefebvre E. Fast unfolding of communities in large networks. *J. Stat. Mech.: Theor. Exper.*, 10:P10008, 2008.
- Campbell E., Ayala-Cabrera D., Izquierdo J., Perez-García R., y Tavera M. Waler supply network sectorizarion based on social networks community detection algorithms. *Procedia Engineering*, 89:1208–1215, 2014.
- Castro-Gama 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.
- Chatzivasili S., Papadimitriou K., y Kanakoudis V. Optimizing the formation of dmas in a water distribution network through advanced modelling. *Water*, 11 (2):278, 2019.
- Creaco E., Cunha M., y Franchini M. Using heuristic techniques to account for engineering aspects in modularity-based water distribution network partitioning algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(12):04019062, 2019.
- Di-Nardo A., Di-Natale M., Di-Mauro A., Martinez-Díaz E., Blazquez-García J., Santonastaso G., y Tuccinardi F. An advanced software to design automatically permanent partitioning of a water distribution network. *Urban Water Journal*, 17(3):259–265, 2020.
- Di-Nardo A., Di-Natale M., Santonastaso G.F., y Venticinque S. An automated tool for smart water network partitioning. *Water Resour. Manage.*, 27 (13):4493–4508, 2013.
- Fortunato S. Community detection in graphs. *Physics Reports*, 486(3):75–174, 2010.
- Giustolisi O., Berardi L., y Laucelli D. Optimal water distribution network design accounting for valve shutdowns. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140:277–287, 2014.
- Giustolisi O. y Ridolfi L. New modularity-based approach to segmentation of water distribution networks. *J. Hydraul.*, 140 (10) 04014049:1–14, 2014.
- Hajebi S., Roshani E., Cardozo N., Barrett S., Clarke A., y Clarke S. Water distribution network sectorisation using graph theory and many-objective optimisation. *Journal of Hydroinformatics*, 18(1):77–95, 2015.
- Herrera M., Izquierdo J., Perez-García R., y Ayala-Cabrera D. *Water Supply Clusters by Multi-Agent Based Approach*, páginas 861–869. 2010.
- Jeub L., Bazziand M., Jutla. I., y Mucha P. A generalized louvain method for community detection implemented in matlab. <https://github.com/GenLouvain/GenLouvain>, 2011-2019.
- Kang D. y Lansey K. Revisiting optimal water-distribution system design: Issues and a heuristic hierarchical approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(3):208–217, 2012.
- Khoa-Bui X., Marlim M.S., y Kang D. Water network partitioning into district metered areas:

- A state-of-the-art review. *Water*, 12 (4):1002, 2020.
- Laucelli D.B., Simone A., Berardi L., y Giustolisi O. Optimal design of district metering areas. *Procedia Engineering*, 162:403–410, 2016.
- Newman M.E.J. Analysis of weighted networks. *Phys. Rev. E*, 70:056131, 2004.
- Newman M.E.J. y Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks. *Phys. Rev. E*, 69:026113, 2004.
- Porter M.A., Onnela J., y Mucha P.J. Communities in networks. *Notices of the AMS.*, 56:1082–1097, 2009.
- Rahmani F., Muhammed K., Behzadian K., y Farmani R. Optimal operation of water distribution systems using a graph theory-based configuration of district metered areas. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(8):04018042, 2018.
- Rossman L.A. *EPANET: User's manual*. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2000.
- Saldarriaga J., Bohorquez J., Celeita D., Vega L., Paez D., Savic D., Dandy G., Filion Y., Grayman W., y Kapelan Z. Battle of the water networks district metered areas. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(4):04019002, 2019.
- Scarpa F., Lobba A., y Becciu G. Elementary dma design of looped water distribution networks with multiple sources. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(6):04016011, 2016.
- Scibetta M., Boano F., Revelli R., y Ridolfi L. Community detection as a tool for district metered areas identification. *Procedia Engineering*, 70:1518–1523, 2014.
- Todini E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2:115–122, 2000.
- Todini E. y Pilati S. A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. *Computer Application in Water Supply, System Analysis and Simulation*. John Wiley, London, vol. I.:1–20, 1988.
- Vasilic Z., Stanic M., Kapelan Z., Prodanovic D., y Babic B. Uniformity and heuristics-based dense method for sectorization of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(3):04019079, 2020.
- Zhang Q., Wu Z.Y., Zhao M., y Qi. J. Automatic partitioning of water distribution networks using multiscale community detection and multiobjective optimization. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 149(9):04017057, 2017.
- Zheng F. y Zecchin A. An efficient decomposition and dual-stage multi-objective optimization method for water distribution systems with multiple supply sources. *Environmental Modelling & Software*, 55:143–155, 2014.