

# Sectorización y Gestión de Presión en Redes de Agua: Evaluación y Comparación de Estrategias para Reducir Fugas de Fondo.

## Sectorization and Pressure Management in Water Networks: Evaluation and Comparison of Strategies for Reducing Background Leakages.

Presentación: 26/10/2023

### **Melina Denardi**

Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Acuña 49, 2300 Rafaela, Argentina.

[melina.denardi@frra.utn.edu.ar](mailto:melina.denardi@frra.utn.edu.ar)

### **Jezabel Bianchotti**

Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Acuña 49, 2300 Rafaela, Argentina.

[jezabel.bianchotti@frra.utn.edu.ar](mailto:jezabel.bianchotti@frra.utn.edu.ar)

### **Victoria Williner**

Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Acuña 49, 2300 Rafaela, Argentina.

[willinervicky@gmail.com](mailto:willinervicky@gmail.com)

### **Valentín Verrochi<sup>4</sup>**

Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Acuña 49, 2300 Rafaela, Argentina.

[valenverrocchi@gmail.com](mailto:valenverrocchi@gmail.com)

## **Resumen**

En redes de distribución de agua, la gestión de la presión es una técnica que permite disminuir las fugas de fondo aplicando una mínima intervención. Por otra parte, la sectorización es una técnica que simplifica la gestión de la red, facilitando el proceso de detección, control y reducción de estas fugas. Pese a sus beneficios, la implementación conjunta representa un gran desafío. En este trabajo se comparan dos metodologías para la reducción de fugas de fondo durante el horario nocturno: La primera, consta de dos etapas y busca controlar la presión utilizando válvulas reductoras de presión. La segunda, agrega una etapa intermedia para realizar la sectorización de la red. La aplicación de estas metodologías a una red académica de pequeña escala ofrece porcentajes de reducción de fugas diferentes como así también variaciones en el comportamiento del sistema hidráulico, en el costo económico y en el control de los dispositivos utilizados.

**Palabras clave:** fugas de fondo, metaheurística, sectorización, índice de resiliencia, recocido simulado

## **Abstract**

In water distribution networks, pressure management is a technique that allows bottom background leakages to be reduced by applying minimal intervention. On the other hand, sectorization is a technique that simplifies network management, facilitating the process of detecting, controlling and reducing these leakages. Despite its benefits, joint implementation represents a great challenge. This work compares two methodologies for reducing bottom leakages during nighttime hours: The first consists of two

stages and seeks to control pressure using pressure reducing valves. The second adds an intermediate stage to carry out the sectorization of the network. The application of these methodologies to a small-scale academic network offers different leakages reduction percentages as well as variations in the behavior of the hydraulic system, in the economic cost and in the management of the devices used.

**Keywords:** background leakages, metaheuristic, sectorization, resilience index, simulated annealing

## Introducción

Las pérdidas de agua potable en redes de distribución presentan un desafío que la sociedad contemporánea no puede ignorar: Existen sistemas de distribución con más de tres décadas de antigüedad que experimentan un incremento constante en los volúmenes de agua no contabilizada. Esto se debe a diversos factores, entre los cuales destacan las pérdidas que ocurren en conexiones, accesorios o como resultado de pequeñas roturas debido al deterioro de los componentes. Estas pérdidas, que se caracterizan por ser continuas y de bajo caudal de agua, se conocen como fugas de fondo. El volumen de estas fugas se ve afectado en gran medida por la presión en la red (Farley, 2001), razón por la cual se observa que su magnitud aumenta cuando el consumo de agua disminuye, escenario que ocurre principalmente durante el horario nocturno. Por otro lado, dado que estas fugas son difíciles de detectar, su acumulación por períodos prolongados puede alcanzar niveles alarmantes. Así, ante la dificultad técnica, económica y social que plantea el reemplazo directo de la infraestructura, la comunidad académica ha estudiado por décadas diferentes estrategias para mitigar las pérdidas de este tipo en redes de agua (Creaco, E. and Haidar, H., 2019; Maskit, M. and Ostfeld, A., 2021). Existen estudios que proponen reducir las fugas de fondo utilizando una técnica efectiva que consiste en la gestión de las presiones mediante dispositivos tales como válvulas reductoras de presión (PRVs, por sus siglas en inglés) o válvulas de control de flujo (FCVs, por sus siglas en inglés), entre otros. Algunos trabajos incluyen en esta estrategia una técnica adicional que consiste en sectorizar la red en áreas más pequeñas denominadas Áreas de Medición de Distritos (DMAs, por sus siglas en inglés). La sectorización proporciona un beneficio adicional ya que facilita el proceso de detección, control y reducción de fugas. Este trabajo compara dos metodologías destinadas al control de fugas de fondo. La primera metodología, Método A, se desarrolla en dos etapas y su finalidad es la creación y gestión de Áreas de Medición de Presión (PMAs). La segunda metodología, Método B, cuenta con tres etapas y añade al Método A la sectorización de la red. Ambos métodos parten de la misma etapa inicial que consiste en maximizar el índice de modularidad para definir las comunidades o módulos iniciales de la red que se transformarán posteriormente en PMAs. Las variables de decisión en esta etapa se denominan cortes conceptuales y representan los tubos que delimitan las comunidades. La segunda etapa del Método A instala válvulas PRVs en todos aquellos cortes conceptuales obtenidos en la primera etapa. De esta manera se obtiene la configuración final de las PMAs. El proceso de optimización consiste en determinar los parámetros de funcionamiento (o settings) de las válvulas para cada hora del período analizado mediante la minimización del índice de resiliencia. La segunda etapa del Método B busca, previo a la creación de PMAs, la sectorización de la red en micro DMAs y macro DMAs autónomas. Aquí, las micro DMAs tienen la particularidad que se encuentran conectadas entre sí mientras que las macro DMAs son completamente independientes en su funcionamiento. En esta etapa, el algoritmo provee un conjunto de soluciones que cumple con dos objetivos: minimizar la pérdida de resiliencia y minimizar la cantidad de caudalímetros que conectan micro DMAs. Para ello, coloca válvulas de aislamiento en aquellos cortes conceptuales que delimitan micro y macro DMAs. Finalmente, la tercera etapa es similar a la planteada en el Método A. La particularidad que los diferencia es que, en el Método B, el número de variables de decisión se reduce a la cantidad de tubos que conectan micro DMAs (equivalente al número de caudalímetros obtenidos en la segunda etapa). La segunda etapa de ambos métodos y la tercera etapa del Método B son problemas del tipo NP-Complejo, por tal motivo se propone el uso del algoritmo recocido simulado para la búsqueda de soluciones óptimas. Ambos métodos se aplican a una red académica de pequeña escala con 25 nodos, 42 tubos y 2 reservorios.

## Metodología

### 2.1. Modularidad

La ciencia de redes proporciona un medio para extraer y caracterizar la estructura topológica que está presente en los sistemas de distribución de agua. Esta estructura se puede describir como un grafo  $G(V,E)$ , donde el conjunto de vértices  $V = \{v_1; v_2; \dots; v_{n_n}\}$  representa los nodos, depósitos y tanques, y el conjunto de enlaces  $E = \{e_1; e_2; \dots; e_{n_p}\}$  representa las tuberías, válvulas y bombas del sistema hidráulico, donde  $n_n$  es el número de nodos y  $n_p$  es el número de tuberías. La topología de una red puede ser representada 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  $A_{ij} = 0$ .

Una métrica fundamental en el análisis de redes y la teoría de grafos es el índice de modularidad. Este índice, propuesto por Newman y Girvan (2004), se utiliza para identificar grupos de nodos altamente conectados dentro de la red, y se define como:

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

donde  $n_p$  es el número de tubos,  $A_{ij}$  son los elementos de la matriz de adyacencia  $A$ ,  $k_i$  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,  $\delta$  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  $i \neq j$ . El índice de modularidad compara la densidad de los enlaces que se encuentran dentro de las comunidades con los enlaces que se encuentran entre comunidades. Este índice es un escalar que adopta valores entre 0 y 1. Un valor cercano a uno indica una estructura modular definida, lo que implica una organización significativa de los nodos en grupos cohesivos.

### 2.2. Índice de resiliencia

El concepto de resiliencia, propuesto por Todini (2000), se utiliza como métrica para evaluar la confiabilidad hidráulica de una red. Su aplicación se centra en mejorar el funcionamiento del sistema de suministro de agua, particularmente en situaciones de falla, garantizando que cada nodo cuente con una capacidad de suministro que supere la demanda mínima requerida. El índice de resiliencia se define de la siguiente manera:

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

donde  $q_i^*$  y  $h_i^*$  son la demanda y la presión requerida en el nodo  $i$ ,  $h_i$  es la presión de cada nodo  $i$ ,  $Q_k$  y  $H_k$  son, respectivamente, la descarga y la presión de cada reservorio  $k$ , y  $n_r$  es el número de reservorios. Por lo tanto, dado que la Ecuación 2 se basa en la relación entre la energía disipada en las tuberías y la energía proporcionada a la red, se utiliza el índice de resiliencia como una métrica para cuantificar el excedente de energía disponible para el abastecimiento.

### 2.3. Algoritmo de optimización

En el presente trabajo se implementaron dos algoritmos para desarrollar el proceso de optimización, los cuales fueron programados utilizando Matlab. En la primera etapa, se utilizó un algoritmo heurístico denominado Louvain (Blondel et al, 2008). Este algoritmo comienza considerando cada nodo como una comunidad individual, dividiendo así la red en comunidades iniciales. Luego, el algoritmo itera a través de los nodos y evalúa si unirlos a una nueva comunidad aumenta la modularidad de la red. Si trasladar un nodo a otra comunidad mejora la modularidad, se realiza ese movimiento. Esto implica ajustar la asignación de los nodos a las comunidades para lograr una mejor agrupación. Cuando las iteraciones ya no produzcan nuevos aumentos en la modularidad o se cumple un criterio de parada, las nuevas agrupaciones se convierten en la base para la siguiente iteración. Este proceso de iteración y fusión de las comunidades se repite hasta que no se puedan realizar más movimientos que aumenten la modularidad. Finalmente, el resultado es una estructura de la red en comunidades que maximiza la modularidad global, lo que significa que los nodos están agrupados de manera óptima según la medida de modularidad. Las variables de decisión en esta primera etapa está dada por el vector de cortes conceptuales,  $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_{C_c})$ , siendo  $C_c$  la cantidad total de cortes

conceptuales. En las etapas posteriores, se empleó el algoritmo de recocido simulado, propuesto por Kirkpatrick et al. (1983). Este algoritmo, en un contexto de minimización, se basa en una generalización de la estrategia del progreso iterativo. Comienza con una solución inicial y busca dentro de su entorno otra solución de menor costo. La generalización introducida por el recocido simulado implica la aceptación, con una probabilidad diferente de cero, de soluciones de mayor costo para evitar quedar atrapado en un mínimo local. En este esquema, recocido simulado comienza a una temperatura inicial  $T_0$  con una solución factible  $X_c$  y se evalúa la función objetivo,  $f(X_c)$ ; donde  $X_c$  y  $f$  denotan, respectivamente, la variable de diseño y la función de costo de las etapas descriptas tanto en el método A como en el método B. Luego, se genera una nueva solución  $X_n$  perturbando la solución inicial. Si la nueva solución tiene un mejor costo, la solución  $X_n$  se acepta como la solución actual. Sin embargo, si tiene un costo mayor, la nueva solución tiene una probabilidad no nula de ser aceptada, determinada por la distribución de probabilidad de Boltzmann  $P = e^{\{-[f(x_n)-f(x_c)]/T_i\}}$ , donde el parámetro  $T_i$  controla la probabilidad de aceptación de soluciones de mayor costo. Esta estrategia permite evitar quedar atrapados en un mínimo local. Luego de un número fijo de iteraciones, la temperatura es gradualmente disminuida por un factor constante  $\alpha = 0,98$ . Es importante que la temperatura inicial sea suficientemente alta para asegurar un gran número de aceptaciones en la etapa inicial y permitir explorar el espacio solución.

### 2.3. Métodos

En esta sección se presentan dos metodologías propuestas para el diseño de PMAs en redes de distribución de agua potable. La Figura 1 muestra los esquemas correspondientes a cada método desarrollado, las estructuras obtenidas en cada una de las etapas y las configuraciones finales de los dispositivos luego de su aplicación a una red académica.

#### Método A

El Método A consta de dos etapas (ver Figura 1). La primera etapa se centra en la detección de una estructura de comunidades utilizando el índice de modularidad (Ecuación 1). Los tubos que definen las comunidades en esta etapa se denominan cortes conceptuales y son las variables de diseño dadas por el vector  $\mathbf{Y}$  del proceso de optimización. Estos cortes conceptuales proporcionan la ubicación de las PRVs utilizadas en la segunda etapa. Para determinar el sentido de activación del dispositivo que proporciona la mejor solución, se modela la instalación de las válvulas PRVs mediante la simulación de dos válvulas PRVs paralelas con direcciones de flujo opuestas. Además, se agregan PRVs en los tubos adyacentes a los reservorios para mejorar el control de las presiones en la red. La segunda etapa de este método se plantea como una optimización uniobjetivo y su propósito es formar PMAs que permitan la gestión de las presiones en la red junto con la consecuente disminución de las fugas de fondo. Aquí, se busca reducir la función de costo dada por el promedio de los  $I_R$  de la red calculados entre las horas 0:00 y 5:00, es decir, en las horas de menor demanda. La resiliencia se define en función de la presión en los nodos de la red con respecto a la presión mínima requerida, por lo tanto, su reducción resulta en una disminución de la presión adicional disponible para hacer frente a posibles fallas en el sistema. Sin embargo, si bien la finalidad de esta etapa es obtener una solución con un  $I_R$  inferior al calculado para la red original sin intervenir, el resultado final debe garantizar el funcionamiento adecuado de la red. Esto implica que las presiones nodales en la red deben ser superiores a las requeridas, para lograr la satisfacción total de las demandas. En esta última etapa, las variables de diseño son los elementos  $s_{ij}$  de la matriz  $\mathbf{S}$ . Esta matriz tiene tamaño  $6 \times 2V_t$ , donde 6 es el número de horas, y  $V_t$  el número total de válvulas PRVs instaladas en la red, igual a la número de cortes conceptuales más las 2 válvulas ubicadas a la salida de los reservorios. Así, el elemento  $s_{ij}$  es el parámetro de funcionamiento de la válvula  $j$  a la hora  $i$ , donde  $0 \leq i \leq 5$ . Cada parámetro, o setting, se corresponde con el valor de la presión máxima que admite el dispositivo aguas abajo. El proceso de optimización se lleva a cabo utilizando el algoritmo de recocido simulado y los settings se perturban de manera aleatoria en cada iteración. Dado que el problema requiere la resolución del sistema hidráulico, se utiliza el software EPANET 2.2 (Rossman et al., 2020) para la obtención de las presiones y las demandas de la red.

#### Método B

El Método B se desarrolla en tres etapas (ver Figura 1). La primera etapa es idéntica a la utilizada en el Método A que se describió anteriormente. En la segunda etapa de este método se busca ubicar de manera óptima dispositivos de aislamiento que sectoricen la red en micro DMAs y macro DMAs autónomas. Las micro DMAs tienen la misma estructura que las comunidades obtenidas en la primera etapa, mientras que las macro DMAs reúnen dos o más micro DMAs y su funcionamiento es independiente, es decir, no se encuentran conectadas entre sí. Para ello se establece cuáles de los cortes conceptuales  $\mathbf{Y}$  obtenidos en la primera etapa deben materializarse. Esta etapa se plantea como un problema de optimización de dos objetivos: maximizar en número de cortes físicos, equivalente a minimizar el número de tuberías que conectan y permiten el paso del flujo entre micro DMAs; y

minimizar la pérdida de resiliencia, definida como  $P_R = 1 - I_R$ , en la hora de mayor demanda. El proceso de optimización se realiza con el algoritmo recocido simulado y las variables de decisión está dado por el conjunto de elementos del vector  $C_r$  de cortes reales. La técnica garantiza que las soluciones aceptadas cumplan con la satisfacción total de las demandas y que, además, las macro DMAs sean abastecidas por, al menos, un reservorio. La tercera etapa es similar a la desarrollada en el Método A. La diferencia entre ambos métodos reside en que el Método B coloca las PRVs en aquellos tubos que permanecen abiertos luego de la segunda etapa, y en la salida de los reservorios.

## Resultados y discusión

La metodología propuesta se aplica a una red académica de pequeña escala, denominada R25N. Esta red posee 25 nodos con demandas que varían entre 2 y 5 l/s, 40 tuberías con longitud igual a 1000 m, 2 tuberías adyacentes a los reservorios de 2000 m de longitud y 2 reservorios con una altura de 50 m. La cota máxima se encuentra en los nodos periféricos, alcanzando los 20 m, mientras que la mínima se registra en el nodo central, con 10 m. La presión mínima es de 0 mca y la presión requerida es de 7 mca. Como resultado de la primera etapa se detectan 4 comunidades, delimitadas por 10 tubos. Su distribución se puede observar en el bloque denominado “Detección de comunidades” de la Figura 1, donde los tubos identificados en cian se corresponden con los cortes conceptuales. Como se menciona en la Sección 2, ambos métodos utilizan esta distribución de cortes en las etapas posteriores. En la segunda etapa del Método A se modelan en estos 10 tubos las PRVs, más dos válvulas adicionales en las salidas de los reservorios, para lograr gestionar de modo eficiente las presiones en la red. De esta manera, luego de la optimización de la segunda etapa, se obtiene la configuración final que se observa en Figura 1. Como muestra la figura, solo 5 válvulas funcionan como PRVs. Las 7 PRVs restantes se reemplazan por válvulas ON/OFF debido a que los dispositivos no regulan su apertura para el control de la presión, sino que simplemente se abren o se cierran. La Tabla 1 detalla la configuración operativa de las válvulas, mostrando en cada caso su condición de funcionamiento: completamente abierto (CA), completamente cerrada (CC) o activa ( $A^{xx}$ ), donde el superíndice indica el valor de configuración de la válvula que determinará la presión de los nodos aguas abajo. El Método B parte, al igual que el Método A, con los 10 cortes conceptuales obtenidos en la primera etapa y luego de la optimización planteada en la segunda etapa se obtienen 8 cortes materializables, tal como se observa en el bloque “Método B - Segunda etapa” de la Figura 1. Por lo tanto, en la tercera etapa la cantidad de válvulas a instalar resulta igual a 4. La distribución de estos 4 dispositivos se indica en el bloque “Tercera etapa” de la Figura 1. Sin embargo, luego de la optimización de los parámetros de las válvulas, la válvula colocada en la posición V9 (ver bloque “Configuración final” de la Figura 1) permanece completamente abierta en todas las horas optimizadas, por lo que se reemplaza por un caudalímetro.

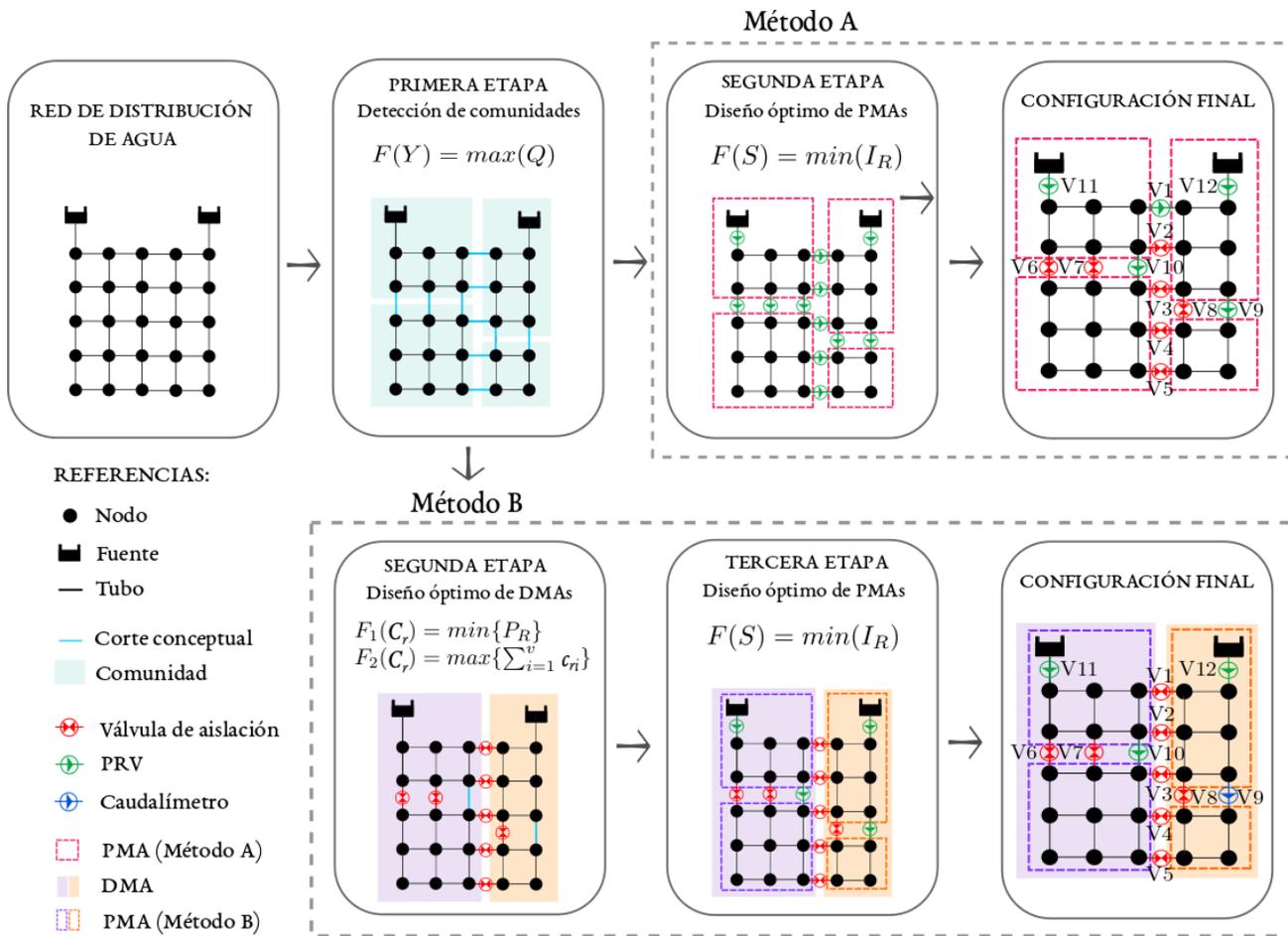


Figura 1 – Esquemas de metodologías desarrolladas con resultados obtenidos

En la Tabla 1 se puede observar que el Método B ofrece una configuración del sistema más estable en comparación con el Método A. Esto se refleja en la constancia de los parámetros de las válvulas durante las seis horas optimizadas. Por otro lado, el Método A requiere un control desigual de los parámetros (settings) en gran parte de las horas. La Figura 2 muestra las presiones nodales obtenidas antes y después de aplicar cada uno de los métodos. Es evidente que, si bien el proceso de optimización se enfoca en la disminución de las fugas durante las horas nocturnas, el Método A reduce las presiones de manera significativa en todas las horas del período extendido. En contraposición, el descenso de las presiones en el Método B es más notorio durante las primeras seis horas, presentando sus valores en este período, una mayor homogeneidad respecto al Método A.

ID	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12
HORA	MÉTODO A											
00:00	CA	CA	CC	CC	CA	CC	CA	CA	CA	CC	A <sup>10</sup>	CC
01:00	CC	CC	CC	CA	CA	CA	CC	CC	CA	CA	CC	A <sup>10</sup>
02:00	CA	CC	CA	CC	CC	CA	CC	CC	A <sup>10</sup>	CC	A <sup>12</sup>	CC
03:00	CA	CC	CC	CC	CA	CC	CC	CA	CA	CC	A <sup>10</sup>	CC
04:00	A <sup>10</sup>	CC	CC	CC	CA	CA	CA	CC	A <sup>10</sup>	CA	A <sup>10</sup>	A <sup>12</sup>
05:00	CA	CC	CC	CA	CA	CA	CC	CC	CC	A <sup>10</sup>	A <sup>10</sup>	CC
HORA	MÉTODO B											
00:00	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	A <sup>15</sup>	A <sup>9</sup>	A <sup>9</sup>
01:00	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	A <sup>15</sup>	A <sup>9</sup>	A <sup>9</sup>
02:00	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	A <sup>15</sup>	A <sup>9</sup>	A <sup>9</sup>
03:00	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	A <sup>15</sup>	A <sup>9</sup>	A <sup>9</sup>
04:00	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	A <sup>15</sup>	A <sup>9</sup>	A <sup>9</sup>
05:00	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	A <sup>15</sup>	A <sup>9</sup>	A <sup>9</sup>

Tabla 1 – Configuración final de las válvulas instaladas en ambas metodologías

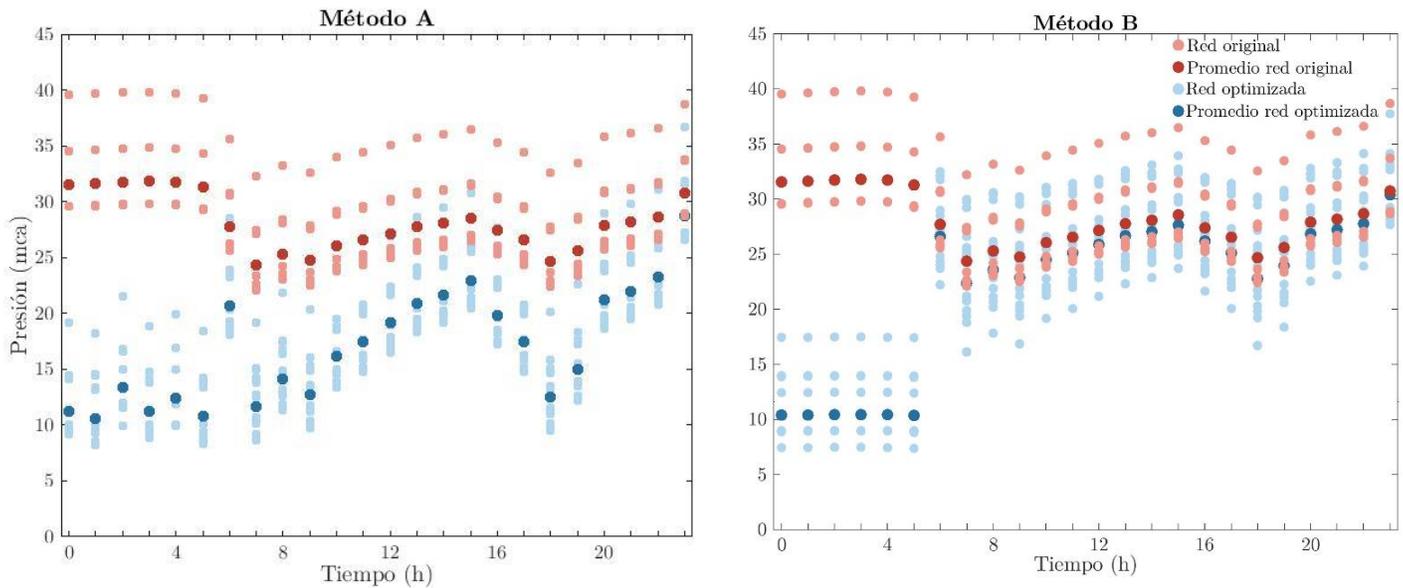


Figura 2 – Presiones nodales de la red original y las redes optimizadas para cada método

La Tabla 2 resume los volúmenes de fugas para cada uno de los métodos. Se observa que el Método A logra una mayor reducción de las fugas en comparación con el Método B. Esto se debe a la marcada disminución de las presiones durante las 24 horas del día que se visualiza en el Método A contra el descenso significativo que se experimenta en solo las primeras 6 horas en el Método B (ver Figura 2). Esta información destaca la importancia de considerar tanto la reducción de las presiones como la gestión de las fugas al evaluar la efectividad de los métodos. Por un lado, el Método A demuestra ser más eficiente en la reducción de fugas y presenta una mayor variación de las presiones a lo largo del día. Por otro lado, el Método B logra estabilizar las presiones luego del período nocturno, lo cual se traduce en una menor disminución de las fugas en comparación con el Método A.

ALTERNATIVA	Volúmenes de fugas diarios (m <sup>3</sup> /d)		Reducción	
	Red original sin intervenir	Red optimizada	(m <sup>3</sup> /d)	%
<b>Método A</b>	288,5	219,5	69	24
<b>Método B</b>	288,5	246,5	42	15

Tabla 2 – Volúmenes de fugas para la red original y la red optimizada

## Conclusiones

El presente trabajo propone analizar dos métodos que poseen un objetivo en común, disminuir las fugas de fondo en una red de distribución de agua mediante la gestión de las presiones en el período nocturno. Aplicados a la misma red académica, el Método A logra porcentajes de reducción de fugas superiores al Método B. Sin embargo, el Método B requiere la instalación de una menor cantidad de PRVs para lograr el control de las presiones, lo cual se traduce no solo en un menor costo económico y operacional, sino que también en un descenso del costo computacional necesario para resolver el problema. Esto se debe a la notable reducción que experimenta el número de variables de decisión en la etapa final. Por otro lado, a diferencia del Método A, el Método B cuenta con una segunda etapa que permite simplificar el análisis y la gestión de la red, ya que es posible cuantificar los flujos a las entradas y las salidas de cada una de las micro DMAs y así realizar los balances de agua. Finalmente, se concluye que ambos métodos logran disminuir de manera significativa los volúmenes de fugas diarios, activando un número reducido de PRVs en solo las primeras 6 horas del día. Además, si bien las presiones en la red disminuyen notoriamente en el horario nocturno, las

intervenciones realizadas con ambos métodos no afectan de manera negativa la calidad del suministro a los consumidores ya que los valores obtenidos superan la presión requerida.

## Referencias bibliográficas

Blondel, V.D., Guillaume, J., Lambiotte, R. and Lefebvre, E. (2008). “Fast unfolding of communities in large networks”. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, Volume 2008, October 2008, Vol. 10, P 10008.

Creaco, E., & Haidar, H. (2019). “Multiobjective Optimization of Control Valve Installation and DMA Creation for Reducing Leakage in Water Distribution Networks”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(10).

Farley, M. (2001). “Leakage Management and Control”. *Who*, 1–98.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. and Vecchi, M. (1983). “Optimization by simulated annealing”. *Science*, Vol. 220, pp 671–680.

Maskit, M. and Ostfeld, A. (2021). “Multi-objective operation-leakage optimization and calibration of water distribution systems”. *Water*, 13(11), 1606.

Newman, M. E. J. and Girvan, M. (2004). “Finding and evaluating community structure in networks” *Physical Review E*. Vol. 69, No. 15, Feb 2004.

Rossman, L. A., Woo, H., Tryby, M., Shang, F., Janke, R. and Haxton, T. (2020) *EPANET 2.2 User’s Manual*, Water Infrastructure Division, Center for Environmental Solutions and Emergency Response. Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH. Available from: <https://epanet22.readthedocs.io/en/latest/>.

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