

Reducción de fugas en redes de agua aplicando recocido simulado

Leakage reduction in water distribution networks applying simulated annealing

Melina DENARDI¹, Jezabel BIANCHOTTI², Ligia MOLINA³ y Luis NADALUTTI⁴

¹⁻²⁻³⁻⁴Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Acuña 49, 2300 Rafaela, Argentina.

E-mail de autores: ¹melina.denardi@frfa.utn.edu.ar, ²jezabel.bianchotti@frfa.utn.edu.ar, ³molinabrilsci@gmail.com, ⁴luis-nada@hotmail.com

Resumen: Las fugas de fondo en redes de distribución de agua potable producen efectos indeseados como el desperdicio de agua y el deterioro de la infraestructura de la red. En este trabajo se propone una metodología de dos etapas para la reducción de fugas mediante el control de las presiones nodales. En la primera etapa se efectúa el diseño de la sectorización de la red mediante la maximización del índice de modularidad. Como resultado se obtiene la ubicación óptima de los cortes para la instalación de válvulas reductoras de presión. En la segunda etapa se utiliza el algoritmo recocido simulado para minimizar el índice de resiliencia de la red con el objetivo de optimizar los parámetros de funcionamiento de las válvulas. Como ejemplo de aplicación de esta metodología se estudia una red académica bajo dos escenarios diferentes de consumo de agua, obteniendo una reducción superior al 25% del volumen de fugas.

Palabras claves: fugas de fondo, metaheurística, sistemas de agua, sectorización, resiliencia

Abstract: Background leakages in water distribution networks produce unwanted effects such as water waste and deterioration of the network infrastructure. In this work, a two-stage methodology is proposed for the reduction of leakages by means of the control of nodal pressures. In the first stage, the design of the network sectorization is obtained by maximizing the modularity index. As a result, it is obtained the optimal location of the cuts for the installation of pressure reducing valves. In the second stage, the simulated annealing algorithm is used to minimize the resilience index of the network in order to optimize the operating parameters of the valves. As an example of the application of this methodology, an academic network is studied under two different scenarios of water demands, obtaining a reduction of more than 25% in the volume of leakages.

Keywords: background leakage, metaheuristic, water systems, sectorization, resilience

1. Introducción

La pérdida total de agua en una red de distribución, denominada agua no contabilizada, puede llegar a representar el 45% del agua total suministrada (Farley, 2001). Estas pérdidas suelen producirse por roturas de las tuberías que componen la red o por pérdidas continuas en los elementos de conexión. Estas últimas, llamadas fugas de fondo, constituyen pérdidas de agua de bajo caudal (~250 l/h) que se producen en uniones y accesorios. Los volúmenes de salida son muy difíciles de detectar por equipos acústicos convencionales, razón por la cual se producen pérdidas de agua graduales e imperceptibles durante un largo período de tiempo (meses e incluso años) que pueden dañar la propia infraestructura y/o estructuras adyacentes.

Las fugas de fondo se producen debido al deterioro de los componentes de la red y se manifiestan en los períodos nocturnos con la disminución de las demandas por parte de los consumidores. Si bien no se pueden eliminar por completo, las fugas de fondo se pueden reducir mediante una adecuada gestión de la presión o el reemplazo de algunos componentes críticos de la infraestructura. La elección de la estrategia adecuada dependerá de las características de cada red y la evaluación técnico-económica que realice la empresa prestadora del servicio. Sin embargo, la tendencia actual consiste en una disminución de las fugas mediante la reducción de la presión (Farley, 2001).

La gestión de los sistemas de distribución de agua es una tarea compleja debido a los múltiples aspectos que intervienen, como la topología de la red, y la ubicación de las fuentes, válvulas y bombas. Es por ello que existen técnicas que se encargan de particionar la red en áreas de medición de distritos más pequeñas (DMAs, por sus siglas en inglés) cuyas dimensiones facilitan el proceso de gestión. La partición de una red de agua es un problema de optimización combinatoria que puede resolverse utilizando teoría de grafos, detección de comunidades y métodos basados en modularidad (Bianchotti et al., 2021), entre otras metodologías.

Diversos estudios resuelven conjuntamente el problema de control de las presiones y el problema de la partición de la red utilizando válvulas reguladoras de presión (PRV por sus siglas en inglés). Estas válvulas se ubican en los límites de cada distrito de la red sectorizada y el parámetro de ajuste es el valor de la presión máxima permitida en el nodo aguas abajo de la válvula.

En el presente trabajo se propone evaluar la incidencia que tiene la disminución de las presiones en los volúmenes de las fugas cuando los parámetros de las válvulas PRV se modifican al tiempo que se originan cambios en las demandas. Para ello, se propone un método de dos etapas que incluye (1) identificar un esquema de partición de la red inicial maximizando el índice modularidad y ubicar las válvulas reguladoras de presión en las tuberías delimitadoras de distritos; y (2) regular los valores de los parámetros de las válvulas minimizando el Índice de Resiliencia de la red segmentada.

Se analizan dos escenarios diferentes aplicados a una misma red. En el primer escenario, se reduce la demanda base en un 50% y, en el segundo escenario, se aumenta la demanda base en un 50%. Esto permite

simular dos períodos del día bajo condiciones extremas: un horario nocturno con un consumo bajo y un horario diurno con un consumo elevado. Este procedimiento se aplica a la red académica que posee 19 nodos, 40 tubos, 1 bomba y 3 reservorios.

2. Metodología

2.1. Primera etapa: Partición de la red

La división de una red en DMAs permite monitorear los flujos de entrada y salida a través sus límites y la gestión de las presiones en cada distrito para que la red opere al nivel óptimo de presión. Los métodos utilizados para la partición de redes de distribución de agua describen topológicamente al sistema hidráulico como un grafo donde los nodos están representados por vértices y los tubos por enlaces.

El método Louvain (Blondel et al., 2008) es un algoritmo para la detección de comunidades en redes complejas que se basa en la maximización del Índice de Modularidad definido por Newman y Girvan (Newman, 2006):

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

donde n_p es el número de tubos, A_{ij} son los elementos de la matriz de adyacencia A_{nn} , 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 (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. Valores cercanos a 1 indican una buena división de la red.

Los tubos que delimitan las comunidades obtenidas en esta primera etapa, denominados cortes conceptuales, proveen las posiciones donde se deben ubicar las válvulas PRV que permiten regular las presiones de la red. Sin embargo, el sentido del flujo en esos tubos es desconocido debido a que las presiones en los nodos dependerán tanto del diseño de distritos finalmente adoptado como de los parámetros de ajuste de cada válvula. Con el propósito de determinar el sentido de activación del dispositivo que provea la mejor solución, en este trabajo se modela la instalación de las válvulas PRV mediante el cierre de los tubos que delimitan las comunidades y la simulación de dos válvulas PRV paralelas con las posibles direcciones de circulación del flujo.

2.2. Segunda etapa: Regulación de los parámetros de las válvulas

En una segunda etapa, se pretende optimizar la configuración del parámetro de ajuste de cada una de las válvulas que se encuentran distribuidas en la red con el objetivo de minimizar el volumen de agua que se pierde como fuga. Para realizar el proceso de optimización, se tuvo en cuenta que el porcentaje de agua que representan las fugas de fondo dentro de las pérdidas totales varía de un país a otro, pudiendo adoptar valores cercanos al 70% (Farley, 2001). En este trabajo se simulan las fugas de fondos de la red sectorizada mediante el uso de emisores cuyos caudales no superen el 30% respecto a la demanda base del nodo. El índice de resiliencia es la métrica utilizada para cuantificar el rendimiento de la red bajo condiciones de falla. Este índice fue introducido por Todini (2000) y se define como:

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

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 , N_n es el número de nodos, Q_k y H_k son la descarga y la presión, respectivamente, de cada reservorio k , N_r es el número de reservorios y γ el peso específico del agua. Como el Índice de Resiliencia depende de la presión en los nodos de la red respecto a la mínima presión requerida, una disminución de la resiliencia implica reducción de la presión adicional que está disponible para sobrellevar fallas. Por ello, el objetivo de este trabajo es obtener una solución cuyo Índice de Resiliencia sea menor que el calculado con la red original sin sectorizar, pero sin comprometer el correcto funcionamiento de la red, es decir, garantizando valores de presiones mayores a los requeridos y satisfaciendo completamente las demandas.

2.3. Algoritmo de optimización

Para resolver este problema de optimización combinatoria, del tipo NP-completo, se propone aplicar un algoritmo estocástico denominado Recocido Simulado (Kirkpatrick et al., 1983). Este algoritmo comienza con una solución factible inicial X_c a una temperatura inicial T_0 . Las válvulas se fijan inicialmente a un valor igual a la presión máxima del sistema sin sectorizar, y se evalúa la función objetivo (I_R). En la siguiente iteración, se genera una nueva solución, X_r , perturbando la solución inicial y se resuelve el sistema hidráulico mediante el uso del software Epanet 2.2. Si la nueva solución tiene un costo menor, la solución es aceptada. De otro modo, tiene una probabilidad no nula de ser aceptada de acuerdo a la probabilidad de Boltzmann $\exp[(X_r - X_c)/T]$, donde T es la temperatura de la iteración. Esta estrategia de aceptar soluciones de peor costo permite evadir mínimos locales dependiendo de la temperatura del sistema. Luego de un número fijo de iteraciones, la temperatura se disminuye aplicando un factor constante $\alpha = 0.97$. Este proceso se repite hasta llegar al número total de iteraciones.

2.4. Caso de estudio

Este proceso de optimización se aplica a la red académica Anytown que posee 19 nodos, 40 tubos, 1 bomba y 3 reservorios. Se estudian dos escenarios: en el primero, denominado nocturno, la bomba se encuentra desactivada y se simula una hora del día con baja demanda. En el segundo, denominado diurno, se activa la bomba y se simula una hora del día con alta demanda. Los patrones de consumo utilizados para simular los escenarios se obtienen multiplicando la demanda base de los nodos por un coeficiente igual a 0.5 para el escenario nocturno y por 1.5 para el escenario diurno.

3. Resultados

Como resultado de la primera etapa se obtienen 4 módulos que se indican con diferentes colores en la Figura 1. La máxima modularidad se obtiene realizando 14 cortes conceptuales que se materializan con la instalación de las válvulas PRV. Cada válvula se numera y se diferencia con un color, rojo (R) o verde (V), de acuerdo a la dirección en la que opera.

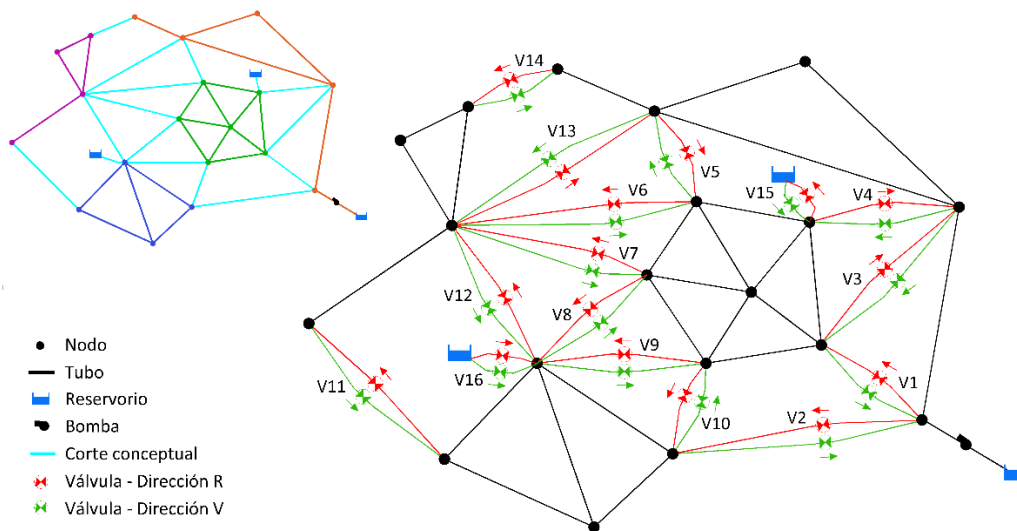


Figura 1 – Red sectorizada y distribución de las válvulas PRV

Los resultados de la segunda etapa se muestran en la Figura 2. Los marcadores que identifican las presiones nodales de la Red original y de la Red optimizada tienen forma triangular y circular, respectivamente. Asimismo, en la gráfica, las presiones de los nodos se encuentran agrupadas por módulos y diferenciadas con sus colores correspondientes (ver Figura 1). Los valores obtenidos luego de la optimización indican que todos los nodos de la red experimentan una disminución de las presiones, tanto para el escenario nocturno como para el escenario diurno.

En la Tabla 1 se detallan las configuraciones operativas de las válvulas luego de la optimización. La configuración adoptada por cada válvula V_i se identifica con las siglas CA (completamente abierta), CC (completamente cerrada) o A (activa), según sea su estado. La sigla A se encuentra acompañada, además, por el valor del parámetro de funcionamiento.

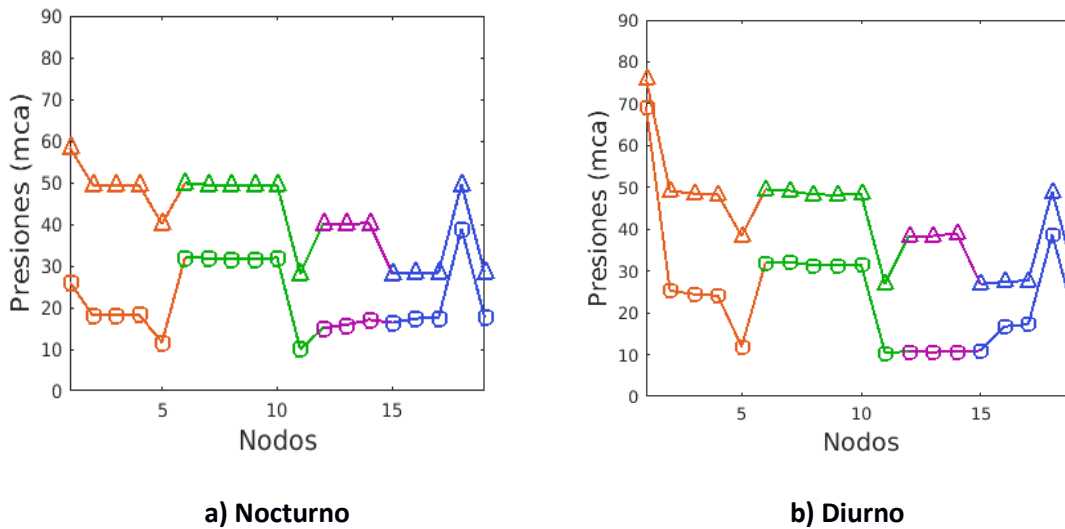


Figura 2 – Distribución de presiones de la red

Escenario	Válvula	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16
Nocturno	R	CA	CA	CC	A ^{*36}	CC	CC	CC	CC	CC	CC	A ^{*17}	CC	A ^{*23}	CA	CC	A ^{*5}
	V	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	CC	CC	CC	CC	CC	CC	A ^{*10}	CC
Diurno	R	CC	CC	CC	CC	CC	CC	A ^{*18}	CC	CC	CC	CA	CC	CC	CC	CC	A ^{*5}
	V	CC	CC	CC	CC	A ^{*26}	CC	CC	CC	CA	CC	CC	CC	CC	A ^{*19}	A ^{*10}	CC

Tabla 1 – Configuración operativa de las válvulas para las redes optimizadas

La Tabla 2 resume los resultados que se asocian a las fugas que se producen en la red. En las columnas 2 y 3 se detallan los volúmenes de agua totales que fluyen por los emisores (volúmenes de fuga). Los valores de la columna 4 indican la diferencia entre el volumen de fugas calculado antes y después de la optimización y, los valores de la columna 5, denotan el porcentaje que representa esta diferencia respecto al volumen de la Red original.

Escenario	Fugas Red original	Fugas Red optimizada	Reducción de fugas	
	Volumen (m ³)	Volumen (m ³)	Volumen (m ³)	Porcentaje (%)
Nocturno	266.3	189.7	76.6	28.8
Diurno	265.5	194.0	71.5	26.9

Tabla 2 – Resumen de fugas

4. Conclusiones

En este trabajo se propone un método para reducir las presiones nodales con el propósito de minimizar las fugas de fondo que ocurren en las redes de agua. El mecanismo adoptado consiste en regular los valores de los parámetros de las válvulas ubicadas en los límites de los distritos de la red sectorizada. Como caso de estudio se aplicó la metodología propuesta a una red académica y se simuló dos escenarios de consumo. Como resultado se obtuvo la activación de un número reducido de válvulas PRV y una configuración del sistema hidráulico con menores presiones nodales y menores volúmenes de fuga de fondo que la red original. El proceso de optimización utilizado proporciona un porcentaje de reducción de fugas cercano al 29% cuando la red sufre una disminución del 50% en sus demandas, como es el caso de una hora nocturna, y una reducción cercana al 27% cuando la red experimenta un incremento del 50% en sus demandas, como es el caso de una hora diurna.

5. Referencias

- Bianchotti, J. D., Denardi, M., Castro-Gama, M., & Puccini, G. D. (2021). Sectorization for water distribution systems with multiple sources: A performance indices comparison. *Water (Switzerland)*, 13(2), 1–17.
- Blondel, V. D., Guillaume, J. L., Lambiotte, R., & Lefebvre, E. (2008). Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2008(10).
- Farley, M. (2001). Leakage Management and Control. *Who*, 1–98.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D. & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220(4598) 671-680
- Newman, M. E. J. (2006). Modularity and community structure in networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(23), 8577–8582.
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(2), 115–122.