

Control de Fugas en Redes de Distribución de Agua: Estudio Comparativo de Métricas

Leakage Control in Water Distribution Networks: Comparative Study of Metrics

Presentación: 03/09/2024

Doctoranda:

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

Director:

Gabriel D. PUCCINI

Resumen

En las últimas décadas, la necesidad global de enfrentar la escasez de agua potable ha impulsado iniciativas para asegurar un suministro sostenible. Este trabajo propone una metodología de dos etapas para reducir las fugas en redes de distribución de agua mediante la gestión de presiones utilizando válvulas reductoras de presión (PRVs): En la primera, se emplea el índice de modularidad topológica para dividir la red en comunidades e identificar los cortes conceptuales donde se podrían instalar las PRVs. En la segunda etapa, se utiliza el método de recocido simulado para determinar la cantidad óptima de válvulas y sus parámetros durante una hora de la noche con presiones elevadas. Para esta etapa, la estrategia evalúa dos métricas: el índice de resiliencia de la red y el excedente de presión nodal. La aplicación de esta metodología en una red real muestra una disminución significativa de la presión y del volumen de fugas en la hora analizada.

Palabras clave: Gestión de presión, Metaheurística, PRV, Fugas de fondo

Abstract

In recent decades, the global need to address the scarcity of drinking water has driven initiatives to ensure a sustainable supply. This work proposes a two-stage methodology to reduce leakages in water distribution networks by managing pressures using Pressure Reducing Valves (PRVs): The first stage employs the topological modularity index to divide the network into communities and identify potential locations for PRV installation. In the second stage, the simulated annealing method is used to determine the optimal number of valves and their settings during an hour of the night with high pressures. For this stage, the strategy evaluates two metrics: the network's resilience index and the nodal pressure surplus. Applying this methodology to a real network shows a significant reduction in pressure and leakage volume during the analyzed hour.

Keywords: Pressure Management, Metaheuristics, PRV, Background leakage

Introducción

Mejorar la utilización eficiente de los recursos hídricos plantea un desafío importante, especialmente a la hora de abordar las pérdidas de agua dentro de las redes de distribución de agua potable. De particular preocupación son las fugas de fondo, que implican pérdidas continuas y de bajo volumen de agua que ocurren en tuberías, conexiones y otros componentes de la red. Estas pérdidas afectan no solo a los consumidores, sino también a las empresas proveedoras del servicio y a las escasas reservas de agua potable que existen en el

mundo. El volumen de estas fugas depende de la presión del sistema y del tiempo que se tarda en detectarlas y solucionarlas (Farley, 2001; Vrachimis et al., 2021).

Reducir eficazmente estas fugas requiere el uso de técnicas como la gestión de presión, la detección activa de fugas o el mantenimiento de infraestructura. La elección de la técnica más adecuada depende de las características de la red y de una evaluación realizada por el proveedor del servicio. Reemplazar los componentes de una red puede presentar un desafío a nivel social, técnico y económico; sin embargo, se pueden reducir notablemente las fugas con la infraestructura existente instalando dispositivos que controlen las presiones en el sistema. Este tipo de estrategia ha sido ampliamente documentada en la literatura durante décadas (Araujo et al., 2006; Creaco y Pezzinga, 2018; Maskit y Ostfeld, 2021).

El presente trabajo propone una metodología de dos etapas para el control de las fugas mediante la gestión de la presión nodal en horario nocturno, utilizando Válvulas Reductoras de Presión (PRVs, por sus siglas en inglés). En la primera etapa, se busca dividir la red en estructuras más pequeñas mediante la ubicación óptima de cortes conceptuales. Estos cortes, introducidos por primera vez por Giustolisi et al. (2014), representan puntos estratégicos donde se pueden instalar las potenciales PRVs que posibilitarán la gestión del sistema hidráulico en la siguiente etapa. El objetivo en esta primera etapa es maximizar el índice de modularidad, que mide la densidad de conexiones dentro de las comunidades en comparación con las conexiones entre ellas.

En la segunda etapa se instalan PRVs en todos los cortes conceptuales y en las salidas de los reservorios con el propósito de gestionar la presión de la red y reducir las fugas de fondo en horas del día caracterizadas por demandas altas y presiones elevadas. Estas válvulas se configuran inicialmente para estar completamente abiertas, con parámetros establecidos a la presión máxima del sistema. Aquí, el control de las fugas se logra mediante la minimización de una métrica que incluya las presiones nodales dentro de su función. Para ello, este trabajo propone utilizar y comparar dos métricas diferentes. Una métrica se basa en el índice de resiliencia, que mide la capacidad del sistema para sobrellevar fallas. Otra métrica es la suma de las diferencias entre las presiones nodales y la presión requerida en la red.

Ambas etapas involucran problemas de optimización de objetivo único, que por su complejidad se clasifican matemáticamente como problemas combinatorios del tipo NP-Completo. La primera etapa, maximizar el índice de modularidad, se aborda mediante un algoritmo tipo Louvain. La segunda etapa, minimizar el índice de resiliencia o minimizar la suma de las diferencias de presiones, emplea el algoritmo de Recocido Simulado. La metodología se ilustra utilizando una red real estudiada por Kang and Lansey (2012), denominada Modified Large Network (MLN). La aplicación del método a la medianoche demostró una reducción significativa de las fugas para ambas métricas.

Desarrollo

Modelo hidráulico

Las redes de distribución de agua se pueden caracterizar topológicamente como un grafo $G(V, E)$, donde $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ es el conjunto de n vértices, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ es el conjunto de m enlaces. Así, en los sistemas hidráulicos, los nodos de demanda, reservorios y tanques se representan mediante vértices; y las tuberías, válvulas y bombas se representan mediante enlaces. El comportamiento de este tipo de redes se puede evaluar conociendo, principalmente, las demandas de sus nodos y la presión en el sistema. En este trabajo, el análisis hidráulico se realiza bajo un Enfoque Impulsado por Presión (PDA), utilizando el software EPANET 2.2 (Rossman, 2020).

Simulación de fugas de fondo

EPANET 2.2 permite modelar el flujo a través de sistemas de rociadores, redes de riego o fugas en una tubería con el uso de emisores. Los emisores son dispositivos que simulan el flujo a través de un orificio que descarga a la atmósfera mediante la expresión:

$$L_i = CP_i^\beta \quad [1]$$

donde L_i y P_i son el caudal de fuga y la presión del nodo i , respectivamente; C es el coeficiente de descarga y β es el exponente de presión que, usualmente, se establece igual a 0,5. El presente trabajo propone simular las fugas instalando emisores en aquellos nodos de la red que representan puntos de demanda de los consumidores. Además, el valor del coeficiente C se ajusta para establecer una tasa de pérdidas que pueda representar un escenario real. El sistema resultante, es decir, la red con fugas, se denomina *escenario base*.

Primera etapa: Localización de potenciales puntos de control de presión

En teoría de redes complejas, un módulo o comunidad está representado por un conjunto de nodos con una gran conectividad entre sí y una menor conectividad con nodos no pertenecientes a su comunidad. El método Louvain (Blondel et al., 2008) es un algoritmo utilizado para la detección de comunidades mediante la maximización del Índice de Modularidad (Newman, 2006):

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

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 (igual a uno sólo si $M_i = M_j$) y la suma corre sobre todos los posibles pares de nodos (i, j) , con $i \neq j$. γ es el parámetro de resolución estructural que permite determinar el tamaño de las comunidades. La modularidad de una red, Q_T , puede adoptar valores entre 0 y 1. Un valor de Q_T próximo a 1 supone una conexión intra comunidades mayor que la conexión entre comunidades. Por el contrario, un valor de Q_T próximo a 0 indica que la agrupación de los nodos no se encuentra claramente definida en comunidades.

Esta primera etapa de la metodología maximiza el índice de modularidad para simplificar la complejidad en la segunda etapa, donde las tuberías en los límites entre comunidades se utilizarán como puntos de control para gestionar presiones. Dado que se considera solo la topología de la red, no es necesario resolver el sistema hidráulico en esta fase de optimización.

Segunda etapa: Control de la presión para la reducción de fugas

La metodología desarrollada propone, en una segunda etapa, reducir los volúmenes de agua que se fugan por la red en un horario nocturno. Este horario se encuentra representado por una demanda baja por parte de los consumidores y un nivel de presión elevado en los nodos del sistema. Para lograr minimizar las pérdidas se instalan potenciales PRVs en los tubos que delimitan las comunidades detectadas en la primera etapa y se adiciona, además, una válvula a la salida de cada reservorio para favorecer la gestión integral del sistema. Por lo tanto, las variables de decisión en esta segunda etapa son los parámetros de funcionamiento de las potenciales PRVs, siendo el parámetro, o setting, de la válvula la máxima presión que admite el dispositivo en el nodo aguas abajo. En este contexto, se hace referencia a potenciales Válvulas Reductoras de Presión (PRVs) ya que su implementación definitiva estará condicionada al estado final que adopte el dispositivo al finalizar el proceso de optimización. Si la válvula se activa, se instalará una PRV; si se mantiene cerrada, se colocará una válvula de aislación; y si permanece abierta, se considerará un punto de observación.

Este trabajo evalúa dos enfoques similares que se diferencian en la métrica utilizada como función objetivo. Por un lado, se evalúa reducir la potencia adicional que posee una red para sobrellevar fallas en un horario donde se puede prescindir de ella, garantizando al mismo tiempo un suministro de agua confiable y eficiente. Esta capacidad se puede cuantificar utilizando una métrica denominada Índice de Resiliencia. Este índice fue introducido por Todini (2000) y se define como:

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

donde q_i^* y h_i^* son la demanda y la carga hidráulica mínima en el nodo i , h_i es la carga hidráulica del nodo i , N_n es el número de nodos, Q_k y H_k son el volumen entregado y la carga hidráulica, respectivamente, de cada reservorio k ; y N_r es el número de reservorios. De la Ec. 3 se deduce que la reducción de la potencia adicional disponible en la red se logra a partir de una disminución de las presiones nodales, por lo tanto, el objetivo

planteado con esta métrica es minimizar el valor de I_R en una hora del día representativa del horario nocturno. Por otro lado, se evalúa reducir directamente la sobrepresión en el sistema dada por:

$$DP = \sum_{i=1}^{N_n} (P_i - P_{req}) \quad [4]$$

donde P_{req} es la presión requerida. Este enfoque propone, de esta manera, minimizar la función de costos DP, también en una hora del día representativa del horario nocturno.

El problema planteado en esta etapa, independientemente de la métrica utilizada, resulta un problema de optimización combinatoria, que se clasifica dentro de la categoría de problemas del tipo NP-Completo. Para abordarlo, se aplica un algoritmo estocástico conocido como Recocido Simulado (Kirkpatrick et al., 1983) y, dado los enfoques aquí utilizados, se requiere la resolución del sistema hidráulico en cada iteración. Además, la técnica empleada asegura que las soluciones aceptadas cubran el volumen total de la demanda, es decir, que se cumpla la condición $P_i \geq P_{req}$ en todos los nodos de la red. Luego del proceso completo de optimización, la red resultante se denomina *red optimizada*.

Caso de estudio

La metodología se aplica a una red real de tamaño medio denominada Modified Large Network, investigada por Kang y Lansley (2012). Esta red está compuesta por 5 reservorios, 1278 tubos y 935 nodos (ver Figura 1). Dicha red posee 4 patrones de demanda de 24 h cada uno. Sin embargo, este estudio propone realizar el análisis sobre un escenario que simule una hora del día con demandas bajas y presiones elevadas, situación que se suele presentar durante la noche. Particularmente, se utiliza la medianoche (hora 00:00) como escenario representativo del horario nocturno. El coeficiente C utilizado para generar el *escenario base* con fugas es igual a 0,30. Este valor evita que cualquier emisor supere un caudal igual al 35% de la demanda base del nodo. El análisis PDA considera una presión mínima y una presión requerida (P_{req}) de 5 m y 10 m, respectivamente.

Resultados

La Figura 1 presenta dos mapas de presiones nodales en distintos escenarios. A la izquierda, se muestran las presiones del escenario base a las 00:00 horas, donde todos los nodos del sistema mantienen presiones superiores a los 30 metros. A la derecha, el mapa refleja las presiones en la misma red durante una situación diferente, es decir, en una hora de alta demanda y presiones reducidas (las 18:00 horas). En este caso, una gran parte de la red opera con presiones que oscilan entre los 10 y 30 m. Esta comparación entre escenarios resalta la necesidad de reducir las presiones durante las horas nocturnas para minimizar las fugas de fondo y uniformizar las presiones en el sistema. La primera etapa del método detecta una estructura con 27 módulos, delimitados por 68 cortes conceptuales. Estos cortes, junto con los 5 tubos adyacentes a los reservorios, dan un total de 73 potenciales PRVs óptimamente posicionadas dentro del sistema hidráulico. Dado que la subdivisión depende únicamente de la topología de la red, esta solución se considera como punto de partida para el estudio de las dos métricas propuestas en la segunda etapa.

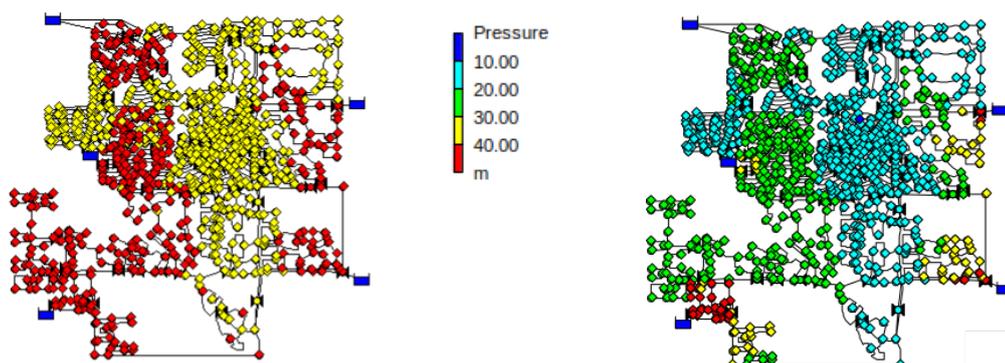


Figura 1. Presiones nodales. Horario nocturno para el escenario base (izq.) y horario diurno para el escenario base (der.)

La Tabla 1 resume la condición de servicio, a las 00:00 horas, de solo aquellas potenciales PRVs que se activan en la segunda etapa y que se consideran finalmente como PRVs reales. Las potenciales PRVs restantes se encuentran abiertas, por lo tanto, el flujo de agua pasa sin restricción y el tubo correspondiente es considerado simplemente un punto de observación. Por un lado, esta tabla muestra que la minimización del I_R requiere la activación de 6 potenciales PRVs. Por otro lado, la Tabla 1 indica que la minimización de DP precisa que 5 potenciales PRVs se activen. Aquí se destaca que la mayor cantidad de potenciales PRVs activas, para ambas métricas, se corresponde con válvulas instaladas a la salida de los reservorios.

Nº Potencial PRV	I_R			DP		
	Estado	Dispositivo asignado	Setting (m)	Estado	Dispositivo asignado	Setting (m)
6	Activa	PRV	25	Abierta	Punto de observación	-
16	Abierta	Punto de observación	-	Activa	PRV	29
23	Activa	PRV	31	Abierta	Punto de observación	-
69	Abierta	Punto de observación	-	Activa	PRV	25
70	Activa	PRV	29	Abierta	Punto de observación	-
71	Activa	PRV	33	Activa	PRV	29
72	Activa	PRV	39	Activa	PRV	31
73	Activa	PRV	27	Activa	PRV	31

Tabla 1: Resultados de la segunda etapa. Dispositivo final asignado a las potenciales PRVs.

La Figura 2 muestra los resultados finales obtenidos luego del proceso de optimización. En la Figura 2 (izq.) se identifican las potenciales PRVs que se activan luego de la segunda etapa, de acuerdo a la Tabla 1. Los puntos de observación no se indican en la figura para evitar sobrecargar la imagen. La Figura 2 (der.) muestra, en color azul, las presiones nodales de la red como resultado de minimizar I_R y, en color rojo, las presiones nodales luego de minimizar DP. Las presiones nodales del escenario base se grafican en color verde. En esta figura se advierte un descenso notable de la presión (~20m) luego de aplicar el método propuesto, para ambas métricas. Pese a esta reducción, no se obtuvieron presiones menores a las requeridas, lo cual indica que hay satisfacción total de las demandas.

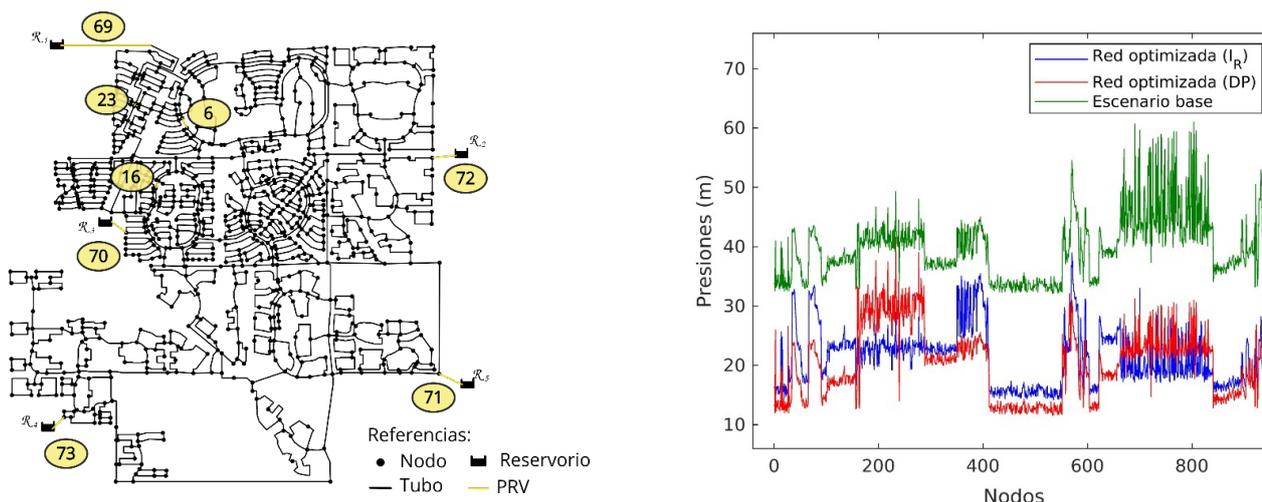


Figura 2. Resultados finales luego de aplicar la metodología completa a la red MLN. Disposición final de las PRVs en la red (izq.). Presiones nodales de las redes optimizadas y del escenario base (der.).

La Tabla 2 resume los volúmenes de fugas obtenidos utilizando ambas métricas, para el escenario base (columna 2) y la red optimizada (columna 3). La columna 4 indica la diferencia entre los volúmenes obtenidos antes y después de aplicar la metodología completa. La columna 5 muestra que, para ambas métricas, la reducción de las fugas luego del proceso de optimización se encuentra cercana al treinta por ciento.

Métrica	Escenario base (m ³)	Red optimizada (m ³)	Reducción (m ³)	Reducción (%)
I _R	6350,3	4636,5	1713,8	27
DP	6350,3	4496,5	1853,8	29

Tabla 2: Resumen de los volúmenes de fugas de fondo.

Conclusiones

Este estudio se centró en la reducción de fugas durante la medianoche, esto es, un horario de baja demanda y alta presión, con un enfoque particular en el uso de válvulas reductoras de presión como herramienta para gestionar las presiones elevadas en el sistema. La metodología propuesta se desarrolló en dos etapas con el objetivo de mejorar la eficiencia y el rendimiento general de la red. Las dos métricas evaluadas, el índice de resiliencia y la sobrepresión, permitieron lograr reducciones similares tanto en las presiones nodales como en los volúmenes de fugas. No obstante, la minimización de la sobrepresión resultó en una reducción levemente superior de las fugas de fondo, utilizando además un dispositivo menos. Esto sugiere que la minimización de la sobrepresión podría ser una métrica más eficiente para el control de fugas de fondo.

Referencias

- Araujo, L. S., Ramos, H. y Coelho, S. T. (2006). Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. *Water resources management*, 20, 133–149.
- Blondel, V.D., Guillaume, J., Lambiotte, R. y Lefebvre, E. (2008). Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 10, 10008.
- Creaco, E. y Pezzinga, G. (2018). Comparison of algorithms for the optimal location of control valves for leakage reduction in wdns. *Water*, 10(4), 466.
- Farley, M. (2001). Leakage Management and Control. *Who*, 1–98.
- Giustolisi, O. y Ridolfi, L. (2014). New modularity-based approach to segmentation of water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(10), 04014049.
- Kang, D. y Lansey, K. (2012). Revisiting optimal water-distribution system design: Issues and a heuristic hierarchical approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(3), 208–217.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. y Vecchi, M. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220, 671–680.
- Maskit, M. y Ostfeld, A. (2021). Multi-objective operation-leakage optimization and calibration of water distribution systems. *Water*, 13(11), 1606.
- Newman, M. E. J. y Girvan, M. (2004). Finding and evaluating community structure in networks. *Physical Review E*, 69(15).
- Rossman, L. A., Woo, H., Tryby, M., Shang, F., Janke, R. y 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.
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2, 115-122.
- Vrachimis, S. G., Timotheou, S., Eliades, D. G. y Polycarpou, M. M. (2021). Leakage detection and localization in water distribution systems: A model invalidation approach. *Control Engineering Practice*, 110, 104755.