

SECTORIZACIÓN Y GESTIÓN DE PRESIONES NOCTURNAS PARA LA REDUCCIÓN DE FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

SECTORIZATION AND MANAGEMENT OF NIGHTTIME PRESSURES FOR LEAK REDUCTION IN WATER DISTRIBUTION NETWORKS

Melina Denardi, Jezabel D. Bianchotti, Carlos A. Bonetti, Sergio E. Bertone y Gabriel D. Puccini

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

Palabras clave: Resiliencia, Áreas de medición de distritos, Zonas de control de presión

Resumen. La sectorización y la gestión de la presión son técnicas fundamentales para simplificar la detección, el control y la reducción de fugas de fondo en redes de distribución de agua potable. En este trabajo se propone una metodología de tres etapas que integra ambas técnicas. La primera etapa se centra en la detección de cortes conceptuales para la división óptima de la red en comunidades, maximizando el índice de modularidad mediante un algoritmo tipo Louvain. La segunda etapa se enfoca en el diseño óptimo de Áreas de Medición de Distritos (DMAs) mediante la reconexión de cortes conceptuales. Utilizando el algoritmo de recocido simulado, se busca optimizar dos objetivos contrapuestos: minimizar la pérdida de resiliencia durante la hora de mayor demanda y maximizar el número de tuberías cerradas entre DMAs. La tercera etapa tiene como objetivo formar zonas de control de presión mediante la instalación y activación óptima de potenciales válvulas reductoras de presión en las tuberías abiertas que conectan los DMAs. Aplicando recocido simulado se busca minimizar la resiliencia durante las horas nocturnas de menor demanda. Aplicada a una red real de tamaño medio, esta metodología ha demostrado una sectorización efectiva en DMAs y una reducción significativa de los volúmenes de fugas diarias.

Keywords: Resilience, District Metered Areas, Pressure Control Zones

Abstract. Sectorization and pressure management are fundamental techniques aimed at simplifying the detection, control, and reduction of background leaks in water distribution networks. This study proposes a three-stage methodology that integrates both techniques. The first stage focuses on identifying conceptual cuts to achieve optimal network division into communities, maximizing the modularity index through a Louvain-type algorithm. In the second stage, the methodology optimally designs District Metering Areas (DMAs) by reconnecting conceptual cuts. Utilizing simulated annealing, it aims to optimize two conflicting objectives: minimizing resilience loss during peak demand and maximizing the number of closed pipes between DMAs. The third stage aims to establish pressure control zones by installing and optimally activating potential pressure reducing valves in the open pipes connecting DMAs. Simulated annealing is applied to minimize resilience during low-demand nighttime hours. Applied to a real medium-sized network, this methodology has demonstrated effective sectorization into DMAs and a significant reduction in daily leak volumes.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la creciente escasez de agua potable ha convertido en una prioridad global la adopción de medidas orientadas a garantizar la sostenibilidad del suministro de este recurso vital. Esto implica implementar políticas y planes integrales diseñados para fomentar el uso eficiente de nuestros recursos hídricos. Un desafío crucial en esta búsqueda de sostenibilidad es la reducción de las pérdidas de agua que se producen en las redes de distribución, con un enfoque particular en las fugas de fondo. Este tipo de fugas se caracteriza por ser pérdidas continuas y de bajo caudal de agua que se producen en las tuberías, las conexiones y los accesorios de la red. Debido a esto, la detección de las fugas de fondo se convierte en una tarea compleja y su potencial para alcanzar niveles alarmantes hace que sus consecuencias sean motivo de preocupación tanto para los actores del sector privado como para la comunidad académica. La sectorización y la gestión de la presión son técnicas que, aplicadas en conjunto, ofrecen una solución eficiente para abordar el proceso de detección, control y reducción de fugas de fondo. Por un lado, la sectorización implica dividir la red en estructuras de menor tamaño, conocidas como Áreas de Medición de Distritos (DMAs), las cuales facilitan el proceso de gestión del sistema hidráulico. La división de la red en DMAs permite identificar y aislar con mayor facilidad los sectores que experimentan pérdidas anómalas de agua. Por otro lado, la gestión de la presión nodal busca reducir las fugas mediante dispositivos tales como Válvulas Reductoras de Presión (PRVs) o válvulas de control de flujo (FCVs), entre otros (Farley, 2001; Creaco y Haidar, 2019; Huzsvár et al., 2023). Así, una disminución del excedente de presión disponible durante las horas de menor demanda (horario nocturno) posibilita una reducción de los volúmenes de fuga sin afectar negativamente la calidad del suministro a los usuarios. Existen diversos estudios que tratan, por una lado, la sectorización de la red (Zhang et al., 2019; Bianchotti et al., 2021) y, por el otro, la gestión de fugas mediante el control de la presión (Sahu y Gupta, 2020; Alsaydani, 2024). Sin embargo, aún no se ha establecido una estrategia general que unifique ambas técnicas, que sea evaluada en períodos extendidos y que reciba el consenso de todo el ámbito académico. Este trabajo propone una metodología de tres etapas para la sectorización de redes y la reducción de fugas de fondo. La primera etapa consiste en la detección de una estructura de comunidades mediante la ubicación óptima de los tubos que las delimitan, denominados cortes conceptuales. El objetivo, aquí, es maximizar el índice de modularidad propuesto por Newman (2006), basado en las características topológicas de la red, utilizando un algoritmo tipo Louvain. La segunda etapa busca el diseño óptimo de DMAs. Esta etapa se plantea como un problema de optimización multiobjetivo y utiliza el algoritmo Recocido Simulado para la búsqueda del conjunto Pareto de soluciones posibles. Un objetivo consiste en minimizar la pérdida de resiliencia producida por la sectorización en la hora de mayor demanda. El otro objetivo busca maximizar el número de cierre de las conexiones entre DMAs, es decir, maximizar el número de válvulas de aislación que delimitan DMAs. La tercera etapa se basa en la gestión de las presiones nodales durante el horario nocturno para reducir los volúmenes de fugas. Esto se logra reemplazando los tubos que permanecen abiertos luego de la segunda etapa por potenciales PRVs. El objetivo en esta etapa es minimizar la potencia excedente en la red durante el período de menor demanda de agua, utilizando el algoritmo Recocido Simulado. Para ello, los parámetros de funcionamiento de las potenciales PRVs se controlan de manera óptima durante la noche. La metodología propuesta se aplica a una red real de tamaño medio denominada MLN.

2. METODOLOGÍA

2.1. Simulación de fugas de fondo

En este trabajo, el análisis hidráulico se realiza bajo un Enfoque Impulsado por Presión (PDA), utilizando el software EPANET 2.2 [Rossman et al. \(2020\)](#). El flujo a través de sistemas de rociadores, redes de riego o fugas en una tubería se puede modelar en EPANET 2.2 instalando emisores en los nodos de la red. Los emisores son dispositivos que modelan el flujo a través de un orificio que descarga a la atmósfera mediante la expresión $L_i = CP_i^\beta$, 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 normalmente se fija igual a 0,5. La red con fugas y sin ningún tipo de intervención se denominará, en este estudio, *red original*.

2.2. Primera etapa: Detección de comunidades

Un red puede describirse topológicamente como un grafo $G(V, E)$ cuyos vértices $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ representan los nodos de demanda y las fuentes, y sus enlaces $E = (e_1, e_2, \dots, e_m)$ los tubos, válvulas y bombas del sistema hidráulico; donde n es el número de vértices y m el número de enlaces. Por lo tanto, una red con n nodos se representa por una matriz de adyacencia A_{nn} de tamaño $n \times n$, con elementos $A_{ij} = 1$ si los vértices i y j están conectados y con elementos $A_{ij} = 0$ en caso contrario. En el contexto de redes complejas, la matriz A_{nn} se utiliza para detectar posibles estructuras de comunidades asociadas a una red. Una *comunidad* es un conjunto de nodos que se encuentran fuertemente conectados entre sí, y débilmente conectados a nodos que no pertenecen a la comunidad. El método Louvain ([Blondel et al., 2008](#)) es un algoritmo para la detección óptima de comunidades basado en la maximización del Índice de Modularidad definido por [Newman \(2006\)](#):

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

donde γ es el parámetro de resolución estructural, 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 $i \neq j$. Este índice puede adoptar valores entre 0 y 1. Un valor de Q_T cercano a 1 indica que la conexión de los nodos intra comunidades es mayor que la conexión entre comunidades. Por el contrario, un valor de Q_T próximo a 0 indica que los nodos de la red no se encuentran agrupados en comunidades claramente definidas. Así, el problema de optimización en esta etapa se formula de la siguiente manera:

$$F_1(\mathbf{X}) = \max[Q_T] \quad (2)$$

donde las variables de diseño están dadas por el vector binario $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$. Si un tubo se ubica en el límite entre comunidades $x_i = 0$, en caso contrario, $x_i = 1$. Del conjunto de c_p cortes dado por $\{x_i \in \mathbf{X}, i = 1 : c_p \wedge x_i = 0\}$ se define el vector de *cortes conceptuales* $\mathbf{C}_p = (x_j, \dots, x_{c_p})$. Estos cortes se denominan también *cortes virtuales* debido a que en esta etapa no se lleva a cabo el corte real del elemento.

2.3. Segunda etapa: Sectorización de la red en DMAs

La segunda etapa busca la sectorización física de la red para facilitar la gestión integrada del sistema hidráulico. La sectorización implica la división de la red en estructuras más pequeñas.

Para ello, la metodología parte de la estructura de comunidades obtenida en la primera etapa e identifica dos tipos de tubos: 1) tubos denominados puntos de observación, donde el agua circula libremente entre DMAs y, 2) tubos donde se instalan válvulas de cierre para aislar grupos de nodos. Teniendo en cuenta esta técnica para dividir la red, cuanto menor sea el número de tubos que conectan DMAs (puntos de observación), menor será la cantidad de puntos de control de presión que deban gestionarse en la siguiente etapa. Es decir, el problema busca minimizar el número de puntos de observación (N_o) con el objetivo de simplificar la gestión de la red: Cuanto menor sea N_o , mayor será el número de válvulas de aislación (N_{iv}) instaladas y menor será la cantidad de conexiones entre micro DMAs que deban controlarse. Sin embargo, la sectorización de una red tiende a reducir su resiliencia, es decir, el rendimiento del sistema y su capacidad para sobrellevar fallas (Todini, 2000; Puccini et al., 2016). El índice de resiliencia, introducido por Todini (2000), es una métrica utilizada para cuantificar la confiabilidad hidráulica de una red y,

$$I_R^s = \frac{\sum_{i=1}^n q_i^{s*} (h_i^s - h_i^{s*})}{\sum_{k=1}^r Q_k^s H_k^s - \sum_{i=1}^n q_i^{s*} h_i^{s*}} \quad (3)$$

donde s es el paso de tiempo analizado; q_i^{s*} y h_i^{s*} son valores constantes que denotan, respectivamente, la demanda requerida y la carga hidráulica mínima del nodo i ; h_i^s es la carga del nodo i ; n es el número de nodos; Q_k^s y H_k^s son, respectivamente, la descarga y la carga hidráulica del reservorio k ; y r es el número de reservorios.

Sin embargo, no solo la sectorización reduce la resiliencia de una red, también los elevados volúmenes de agua demandados durante el día hacen descender significativamente las presiones y, por lo tanto, la potencia adicional disponible para sobrellevar fallas. Por ello, la metodología propuesta busca minimizar la pérdida de resiliencia de la red sectorizada en la hora con mayor demanda de agua puesto que, al optimizar la sectorización en un horario crítico con un marcado descenso de las presiones nodales, se logra una división de la red que asegure un suministro de agua confiable y eficiente en cualquier otro momento del día.

De esta manera, la segunda etapa se formula como un problema de optimización de dos objetivos:

$$F_2(\mathbf{Y}) = \min[L] = \min[1 - I_R^{sd}]$$

$$F_3(\mathbf{Y}) = \min\left[\sum_1^{c_p} y_i\right] \quad (4)$$

sujeto a:

$$P_i^s \geq P_{req} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \wedge \quad \forall s = 0, \dots, 23$$

donde I_R^{sd} es el índice de resiliencia evaluado para la hora de mayor demanda, sd . El vector de variables de diseño $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_{c_p})$ es un vector binario que indica el estado final que adopta cada uno de los tubos que componen el vector C_p . De esta manera, si $y_i = 1$, significa que el i -ésimo tubo está abierto y representará un punto de observación. Por otro lado, si $y_i = 0$, significa que el i -ésimo tubo está cerrado y deberá instalarse una válvula de aislamiento.

El análisis hidráulico se realiza en período extendido ya que la sectorización de la red debe asegurar la satisfacción total de la demanda ($P_i^s \geq P_{req}$) en cualquier momento del día. Finalmente, la red obtenida luego de esta segunda etapa se denomina *red sectorizada*.

2.4. Tercera etapa: Gestión de la presión para la reducción de fugas de fondo

La sobrepresión dentro un sistema hidráulico impacta de manera directa en los volúmenes de fugas de fondo. La tercera etapa busca minimizar la resiliencia durante la noche para reducir la presión excedente en el sistema durante un período en el que se puede prescindir de ella. Así, el problema se limita al horario nocturno, entre las horas 00:00 AM y 05:00 AM, período en el que las demandas disminuyen, las presiones aumentan y la exigencia de los consumidores en cuanto a calidad de suministro se ve reducida a niveles mínimos. Puesto que el índice de resiliencia (Ec. 3) depende de la diferencia entre la presión en los nodos de demanda y la presión mínima requerida, la tercera etapa busca minimizar el promedio de los I_R^s de la red sectorizada calculados durante el período nocturno. Para ello, la metodología propone instalar PRVs únicamente en las posiciones indicadas por los elementos y_i del vector \mathbf{Y} que representan los tubos quedan abiertos luego de la segunda etapa.

Si bien metodología propuesta consiste en instalar una única PRV en cada uno de los tubos que conectan las DMAs, el modelo hidráulico utilizado incluye dos PRVs paralelas en cada posición. Estas válvulas poseen iguales características, pero se incluyen para permitir cambio en el sentido del flujo que ocurre en un mismo tubo para distintas soluciones durante el proceso de optimización. Además, se adicionan válvulas en los tubos adyacentes a los reservorios para mejorar el control integral del sistema hidráulico. Por lo tanto, la cantidad de PRVs se incrementa en un valor igual al número total de reservorios presentes en la red (N_r).

En esta etapa, las variables de diseño se denotan con la matriz \mathbf{W} , con elementos w_{ij} que indican el parámetro de funcionamiento de la j -ésima válvula PRV en el paso de tiempo i , con $1 \leq j \leq 2N_o + N_r$ e $1 \leq i \leq S_n$, donde S_n es igual al total de horas consideradas dentro del período nocturno, es decir, $S_n = 6$. El parámetro de funcionamiento de una PRV (también conocido como *setting*), limita la máxima presión que admite la válvula en el nodo aguas abajo del dispositivo.

Esta etapa se formula, entonces, como un problema de optimización uniobjetivo:

$$F_4(\mathbf{W}) = \min[I_{RN}] \quad (5)$$

$$I_{RN} = \frac{\sum_{t=1}^{S_n} I_R^s}{S_n} \quad (6)$$

sujeto a:

$$P_i^s \geq P_{req} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \wedge \quad \forall s = 0, \dots, 23$$

Aquí, nuevamente el análisis hidráulico se realiza bajo un enfoque PDA en período extendido y son penalizadas aquellas soluciones que tengan, en algún momento del día, presiones menores a la presión requerida en los nodos de demanda. La red obtenida luego de la optimización se denomina *red optimizada*.

Si en la *red optimizada* se logra una división del sistema hidráulico en áreas cuyos ingresos y salidas se pueden gestionar con algún tipo de dispositivo (válvula o caudalímetro), dentro de límites físicos definidos y permanentes, entonces se podrá considerar un nuevo diseño de red dividido en Zonas de Control de Presión (PMZ, por sus siglas en inglés). En caso contrario, la gestión de la presión se llevará a cabo mediante la distribución de dispositivos de control (de flujo o presión) sin la formación de zonas claramente establecidas.

2.5. Recocido simulado

Los problemas de optimización combinatoria planteado en las Ecs. 2 y 5 son de naturaleza NP-duro, por lo tanto, se abordan empleando un algoritmo metaheurístico para la búsqueda de soluciones aproximadas. El presente trabajo propone aplicar el algoritmo denominado Recocido Simulado (Kirkpatrick et al., 1983; Wagner et al., 1988). Este algoritmo posee tres características particulares: (i) genera nuevas soluciones dentro del espacio de búsqueda, (ii) adquiere una probabilidad de aceptación para una solución propuesta, a partir de una solución anterior, e (iii) incluye una estrategia de enfriamiento. El algoritmo parte de una solución inicial Z_0 a una determinada temperatura ficticia T_0 y continúa durante un número previamente estipulado de iteraciones. En cada iteración, el método considera una nueva solución Z_{i+1} dentro de la vecindad de su solución actual Z_i . Para la versión del algoritmo con un objetivo único, la nueva solución se acepta como solución actual según una probabilidad de aceptación dada por:

$$P(\Delta F(Z_i), T_i) = \min \left(1, \exp \left\{ \frac{-\Delta F(Z_i)}{T_i} \right\} \right) \quad (7)$$

donde $\Delta F(Z_i) = F(Z_{i+1}) - F(Z_i)$. De esta manera, si el costo de la nueva solución Z_{i+1} es menor que el costo de la solución actual Z_i , esta nueva solución se convierte en la solución actual. En caso contrario, se acepta una peor solución Z_{i+1} según una probabilidad que incluye el cambio del costo y del parámetro de temperatura. Esta estrategia otorga la oportunidad de escapar de un mínimo local. Por otro lado, la literatura ofrece diferentes implementaciones del recocido simulado para tratar problemas multiobjetivo. En este trabajo se implementa la versión SMOSA propuesta Suppaitnarm et al. (2000), la cual propone una nueva probabilidad de aceptación con múltiples temperaturas (una para cada objetivo):

$$P(\Delta F(Z_i), T_i) = \min \left(1, \prod_{j=1}^2 \exp \left\{ \frac{-\Delta F_j(Z_i)}{T_{j,i}} \right\} \right) \quad (8)$$

Aquí, la probabilidad de aceptación general está dada por el producto de las probabilidades de aceptación individuales para cada objetivo asociado con una temperatura T_j . Dado que la temperatura resulta un valor crítico para la convergencia del algoritmo, inicialmente debe ser lo suficientemente alta como para aceptar alrededor del 80 % de las soluciones generadas. Luego se disminuye en cada iteración de acuerdo a una estrategia de enfriamiento adecuada que, por lo general resulta ser $T_{i+1} = \alpha T_i$, con $0 < \alpha < 1$.

2.5.1. Caso de estudio

Este trabajo aplica la metodología propuesta a una red real de tamaño medio, denominada MLN e investigada por Kang y Lansley (2012). Esta red está compuesta por 5 embalses, 1278 tuberías, 935 nodos de demanda (ver Fig. 1). Posee 4 patrones de demanda de 24 h cada uno, registrándose el mayor volumen de demanda a la hora $sd = 19:00$ (07:00 PM). Para lograr un porcentaje total de fugas diario cercano al 20 %, respecto al volumen total entregado, se fijó el coeficiente C de los emisores en un valor igual a 0,30. Las simulaciones hidráulicas se realizan considerando una presión mínima y una presión requerida de 0 m y 5 m, respectivamente.

3. RESULTADOS

La primera etapa de la metodología propuesta aplicada a la red de estudio detecta una estructura con 24 módulos. Estos módulos se encuentran delimitados por un total de 68 cortes

conceptuales, indicados en color anaranjado en la Fig. 1.

La Fig. 2 muestra los resultados obtenidos luego de aplicar la segunda etapa. El conjunto de Pareto (ver Fig. 2a) muestra que, para variaciones significativas en los valores de N_{iv} , la pérdida de resiliencia se mantiene entre 0,75 y 0,8. Es por ello que se analizan las 5 soluciones con mayor valor de N_{iv} , indicadas en el gráfico con las letras de la A a la E. Los diagramas de caja y bigotes de la Fig. 2b muestran la distribución de las presiones nodales para estas 5 soluciones a la hora de mayor demanda. En esta etapa se considera la solución B, que requiere 12 válvulas de aislación y 56 caudalímetros. Estos dispositivos dividen la red en 22 DMAs que se diferencian en distintos tonos de grises en la Fig. 3. La solución adoptada (B) se elige por encima de las otras dado que presenta el mayor valor de mediana (19 m), para valores similares de L . Esto implica que el 50 % de las presiones nodales superan en 14 m la presión requerida, mientras que en el resto de las soluciones, este valor ronda los 12 m.

En la tercera etapa se colocan, en los puntos de observación, PRVs cuyos parámetros son optimizados para lograr una reducción de las presiones nodales en el sistema. Así, la minimización de I_{RN} da como resultado la configuración final de los dispositivos que se observa en la Fig. 3. En esta imagen se aprecia que el número de PMZs formados en esta etapa, delimitados en líneas de trazos, es equivalente al número de DMAs obtenidos en la segunda etapa.



Figura 1: MLN. Primera etapa: Ubicación de los cortes conceptuales en la red.

La Tabla 1 indica, de la columna 2 a la 5, la cantidad de dispositivos que se utilizan en las redes original (Orig.), sectorizada (Sect.) y optimizada (Opt.). Aquí es importante aclarar que aparece un nuevo tipo de dispositivo. Esto se debe a que existen válvulas PRVs que, al finalizar la tercera etapa, varían su estado de completamente abierta (CA) a completamente cerrada (CC), es decir, trabajan como válvulas On-Off (OO). Las columnas 6 y 7 muestran las presiones mínimas (P_{min}) y máximas (P_{max}) en el sistema. Aunque se observa un descenso considerable de las presiones mínimas en la red luego de cada etapa, las presiones máximas se mantienen aproximadamente constantes. Además, el valor de I_{Rsd} (columna 8) no exhibe un cambio significativo, lo cual indica que se logró mantener un valor de resiliencia cercano al de la *red original* luego de la sectorización. Sin embargo, el promedio de los índices de resiliencia durante el período nocturno (I_{RN}) muestra una disminución notable que impacta en los volúmenes de fugas

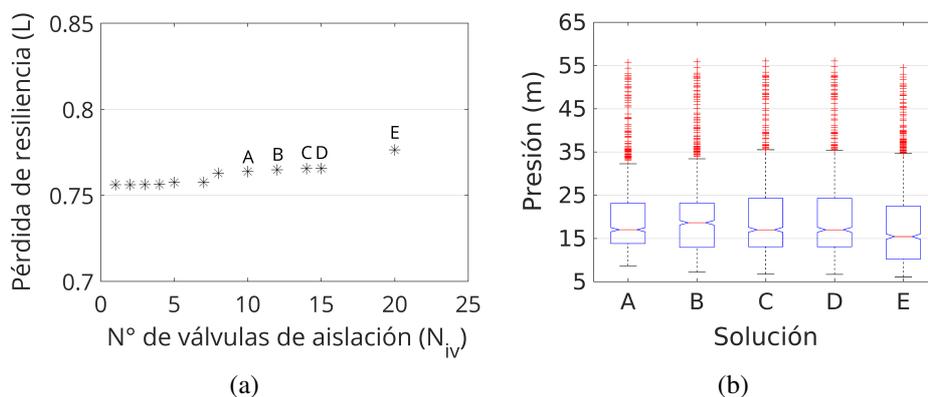


Figura 2: MLN. (a) Conjunto de Pareto obtenido en la segunda etapa. (b) Distribución de presiones nodales en la hora de mayor demanda: Diagrama de caja y bigotes de las 5 soluciones con mayor valor de N_{iv} .

que se indican en la columna 10. En la red original, los volúmenes de fugas en el período nocturno y durante el resto del día son iguales a 37490 m^3 y 94205 m^3 , respectivamente. En la *red optimizada* los volúmenes cambian y pasan a ser iguales a 22930 m^3 y 92708 m^3 . Dado que la diferencia entre el volumen de fugas diario de la *red original* y la *red optimizada* es igual a 16057 m^3 , la reducción de las pérdidas luego de aplicar la metodología completa se acerca al 12 %.

Tabla 1: MLN. Resumen de valores calculados para la red original (Orig.), la red sectorizada (Sect.) y la red optimizada (Opt.).

MLN	N_o	N_{iv}	N_{PRV}	N_{OO}	P_{min} (m)	P_{max} (m)	I_{Rsd}	I_{RN}	Fugas (m^3/d)
Orig.	0	0	0	0	8.9	61.0	0.24	0.38	131695
Sect.	56	12	0	0	7.2	61.2	0.23	0.38	129969
Opt.	22	12	31*	8	5.4	60.1	0.23	0.18	115638

* Este valor incluye las 5 válvulas instaladas a la salida de los reservorios.

Por último, la Fig. 4 muestra la distribución de las presiones nodales durante todo el período extendido. La gráfica superior se corresponde con la *red original* y la inferior con la *red optimizada*.

La comparación entre ambas gráficas manifiesta un cambio en las presiones, durante las 24 horas del día, luego de aplicar la metodología completa. Parte de este cambio es producto de la sectorización llevada a cabo en la segunda etapa; sin embargo, el descenso marcado de las presiones que se percibe entre las 00:00 AM y las 05:00 AM se debe, principalmente, a la gestión de la presión realizada con las PRVs en la tercera etapa.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo propone la conjunción de dos técnicas para una reducción eficiente de las fugas de fondo durante el horario nocturno. Por un lado, la técnica de sectorización de la red en Áreas de Medición de Distritos (DMAs) vincula conceptos de la teoría de redes complejas, como lo es la modularidad topológica, con aspectos específicos de los sistemas hidráulicos,

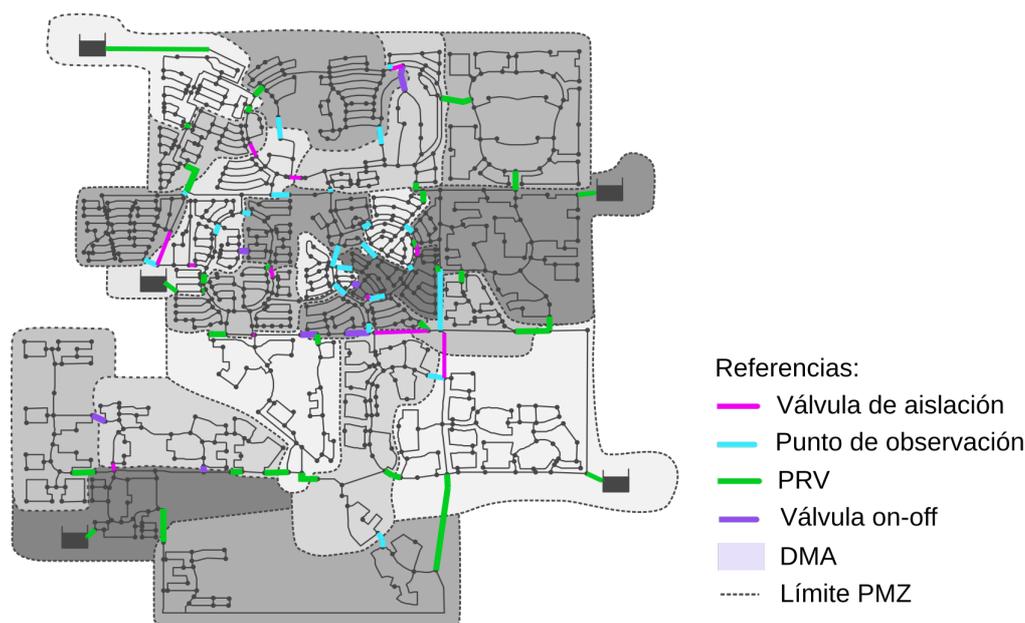


Figura 3: MLN. Diseño final de la red luego del proceso de optimización completo.

representados por el índice de resiliencia. Por otro lado, la técnica para gestionar las presiones se fundamenta únicamente en las condiciones hidráulicas del sistema.

La metodología aplicada a una red real de tamaño medio demostró su eficacia al dividir físicamente la red en DMAs y reducir considerablemente las fugas de fondo mediante el control de un número limitado de Válvulas Reductororas de Presión (PRVs), que se ubican en lugares óptimamente seleccionados y forman Zonas de Control de Presión (PMZs) bien definidos. Aunque el proceso de optimización reduce la resiliencia de la red en las dos últimas etapas, las presiones nodales resultantes superan los niveles requeridos, asegurando un suministro de agua fiable y eficiente sin impactar en el horario diurno de mayor demanda.

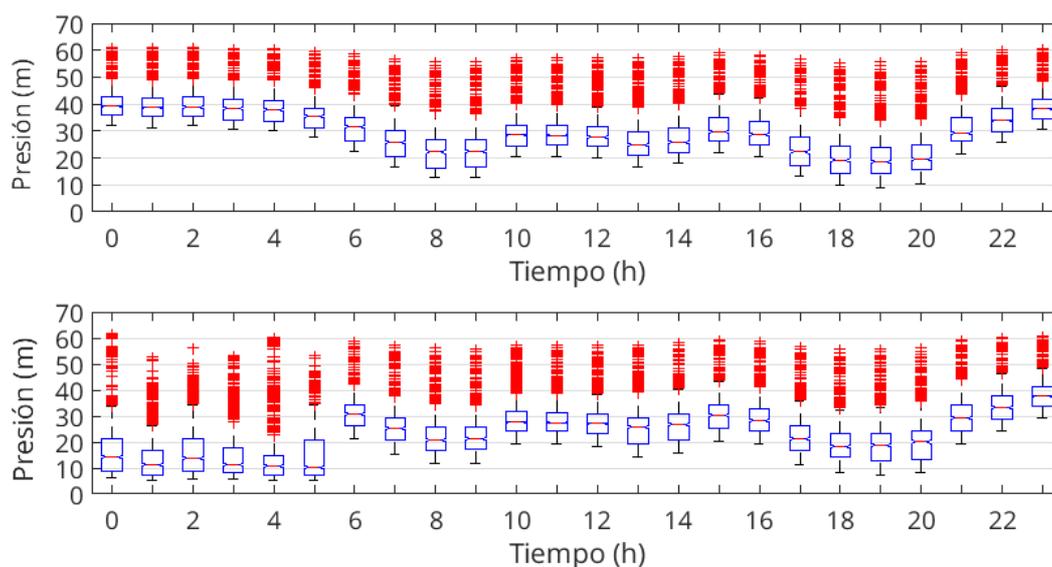


Figura 4: MLN. Distribución de presiones nodales, por hora, durante el período extendido para la red original (sup.) y la red optimizada (inf.).

REFERENCIAS

- Alsaydalani M.O. Hydraulic modelling for leakage reduction in water distribution systems through pressure control. *The Open Civil Engineering Journal*, 18, 2024.
- 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):131, 2021.
- 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.
- Creaco E. y Haidar H. Multi-objective optimization of control valve installation and dma creation for reducing leakage in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(10):04019046, 2019.
- Farley M. Leakage management and control: a best practice training manual. *WHO/SDE/WSH/01.1*, 2001.
- Huzsvár T., Wéber R., Szabó M., y Hős C. Optimal placement and settings of valves for leakage reduction in real life water distribution networks. *Water Resources Management*, 37(12):4949–4967, 2023.
- 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.
- Kirkpatrick S., Gelatt C., y Vecchi M. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220:671–680, 1983.
- Newman M.E.J. Modularity and community structure in networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(23):8577–8582, 2006.
- Puccini G., Blaser L., Bonetti C., y Butarelli A. Robustness-based design of water distribution networks. *Water Utility Journal*, páginas 13–28, 2016.
- Rossman L.A., Woo H., Tryby M., Shang F., Janke R., y Haxton T. *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, 2020.
- Sahu R.C. y Gupta A. Genetic algorithm based pressure management technique for leakage reduction in the water distribution system. En *2020 3rd International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)*, páginas 1464–1470. IEEE, 2020.
- Suppaitnarm A., Seffen K., Parks G., y Clarkson P. Simulated annealing: an alternative approach to true multiobjective optimization. *Engineering Optimization.*, 33:59–85, 2000.
- Todini E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2:115–122, 2000.
- Wagner J., Shamir U., y Marks D. Water distributions system reliability: simulation methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114:276–294, 1988.
- Zhang K., Yan H., Zeng H., Xin K., y Tao T. A practical multi-objective optimization sectorization method for water distribution network. *Science of The Total Environment*, 656:1401–1412, 2019.