

### **(04-014) - Advanced Sectorization of Water Distribution Networks through Topological Clustering and Hydraulic-Energetic Analysis**

López Aburto, Carlos Samuel <sup>1</sup>; Mora Meliá, Daniel <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Talca

The main purpose of companies responsible for water distribution networks is to improve the efficiency of supply while minimizing associated costs to meet a specific water demand. This objective involves reducing water losses, maintaining pressure uniformity, and ensuring a minimum quality of the distributed water. This work proposes an innovative approach to address these challenges, focusing on pressure management by partitioning the network into district metering areas. A method is proposed that uses micro-turbine devices to optimize energy recovery and reduce leaks. The network partitioning process is based on the Leiden algorithm, using hydraulic and topological attributes of the network in the clustering process. The location and configuration of the recovery devices are determined through a multi-objective optimization model. This model incorporates hydraulic and energetic indicators to assess the technical and economic feasibility of installing these systems. The results obtained through the case study demonstrate that the application of the mathematical model ensures viable outcomes, excelling in terms of both water savings and energy production.

Keywords: Water network partitioning; District metering areas; Energy recovery; Leak reduction; Leiden algorithm; Optimization

#### **Sectorización Avanzada de Redes de Distribución de Agua mediante Clustering Topológico y Análisis Hidráulico-Energético**

El principal propósito de las empresas responsables de las redes de distribución de agua es mejorar la eficiencia del suministro, minimizando los costos asociados, para satisfacer una demanda específica de agua. Este objetivo implica reducir las pérdidas de agua, mantener la uniformidad de la presión y asegurar una calidad mínima del agua distribuida. Este trabajo propone un enfoque innovador para abordar estos desafíos, centrado en la gestión de la presión mediante la partición de la red en áreas de medición de distrito. Se propone un método que utiliza dispositivos de micro-turbinado para optimizar la recuperación de energía y reducir fugas. El proceso de partición de la red se basa en el algoritmo de Leiden, utilizando atributos hidráulicos y topológicos de la red en el proceso de clustering. La ubicación y configuración de los dispositivos recuperadores se determinan a través de un modelo de optimización multi-objetivo. Este modelo incorpora indicadores hidráulicos y energéticos para evaluar la factibilidad técnica y económica en la instalación de estos sistemas. Los resultados obtenidos a través del caso de estudio demuestran que la aplicación del modelo matemático garantiza resultados viables, destacando tanto en términos de ahorro de agua como de producción de energía.

Palabras clave: Partición de la red de agua; Áreas de medición de distrito; Recuperación de energía; Reducción de Fugas; Algoritmo de Leiden; Optimización

Correspondencia: Carlos Samuel López Aburto carlos.lopez@utalca.cl

Agradecimientos: Este trabajo fue apoyado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), Chile, mediante el Programa Fondecyt Regular (Proyecto 1210410) y a través de la Beca de Doctorado Nacional/2021- 21211743. También cuenta con el



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

apoyo del Ministerio de Universidades (España) y del Programa Unión Europea-Next generation.

## 1. Introducción

El desarrollo sostenible ha sido planteado como uno de los principales objetivos en la última década. El uso de nuevas estrategias para la correcta gestión de los recursos hídricos en las redes de distribución de agua (RDAs) es crucial. Cualquier reducción en el uso del agua tiene el potencial de reducir la demanda de energía y, por lo tanto, ayudar a mitigar los efectos del cambio climático (Giudicianni et al., 2020). A medida que los centros urbanos continúan expandiéndose, la presión sobre la disponibilidad de recursos como el agua y la energía aumenta por los impactos asociados al cambio climático. El uso mundial de agua se ha multiplicado por seis en los últimos 100 años y sigue creciendo a un ritmo del 1% anual desde la década de 1980 (UNESCO, 2020). Es probable que el cambio climático aumente la variabilidad estacional, creando un suministro de agua más errático e incierto, exacerbando así los problemas en zonas que ya sufren estrés hídrico. El estrés hídrico ha generado una serie de conflictos, ya que diversos sectores, como la agricultura, la minería, la industria e incluso el suministro de agua potable, compiten por los escasos recursos. Las necesidades de energía para el suministro de agua aumentan cuando el agua tiene que transportarse desde mayores distancias, o desde masas de agua subterránea más profundas, o cuando la calidad de la fuente disminuye.

En grandes ciudades con RDAs envejecidas, la operación y el mantenimiento es complejo. Además de suministrar agua a los usuarios y satisfacer los requisitos mínimos de servicio, las empresas de abastecimiento de agua deben gestionar condiciones anormales de funcionamiento (roturas de tuberías, extinción de incendios, variabilidad de la demanda, etc.), detección de fugas e incluso gestionar en tiempo real amenazas de contaminación accidental o deliberada (Mala-Jetmarova et al., 2017). Un objetivo crítico para las empresas es mejorar la eficiencia del suministro para una demanda de agua específica al menor costo. En particular, la eficiencia requiere reducir las fugas y el agua no facturada, controlar la uniformidad de la presión y garantizar una calidad mínima. Las fugas de agua en las redes son un problema a nivel mundial. Los reportes muestran que las fugas representan aproximadamente entre el 40-50% del suministro total de agua (Ávila et al., 2022), y se pronostica que esta situación empeore aún más.

Una manera de abordar estos desafíos es dividir la RDA en áreas de medición de distrito (AMDs). Esta técnica de gestión se denomina partición de la red de agua (PRA), y se ha convertido en una de las estrategias más estudiadas para la mejora de la eficiencia en RDA (Creaco et al., 2021). La PRA es un proceso heurístico que generalmente consta de dos fases: el clustering y la sectorización. El clustering consiste en la preformación de AMDs basada en la conectividad y topología de la red, con el objetivo de formar configuraciones fiables. La sectorización es un proceso de optimización para ubicar los caudalímetros y las válvulas de seccionamiento para un funcionamiento confiable del AMD. Los algoritmos aplicados incluyen la teoría de grafos como: la búsqueda en profundidad (DFS) y la búsqueda en amplitud (BFS), la detección de comunidades, los procedimientos basados en la modularidad, la partición multi-nivel, los métodos espectrales y de descomposición de grafos (Bui et al., 2020).

El diseño de las AMDs se ha basado principalmente en datos empíricos combinados con métodos de prueba y error. Determinar los límites y definir la configuración de la AMD es un reto del área, ya que se deben considerar diversos aspectos que influyen en el rendimiento de la RDA, incluido el funcionamiento de los grupos de bombeo, la gestión de los depósitos o los sistemas de desinfección del agua (Di Nardo et al., 2015). Tradicionalmente, el diseño de las AMDs implica la instalación de válvulas reductoras de presión (VRPs), que permiten mejorar considerablemente la eficiencia del sistema. En contraparte, generan pérdidas energéticas localizadas en la red. Esto puede ser considerado contraproducente en aspectos netamente energéticos, ya que el exceso de energía por encima de la presión mínima

requerida puede ser recuperada (Cubides-Castro et al., 2021), siempre que las condiciones topográficas de la RDA lo permitan.

En la búsqueda de reducir tanto las fugas como la disipación de energía en RDAs, varios autores sugieren la sustitución de las VRPs por sistemas de micro-turbinado, para reducir la presión y recuperar energía (Morani et al., 2021). Las bombas que trabajan en modo inverso, es decir las PATs (pumps as turbines), han sido propuestas como una solución económica para recuperar energía. El costo de estos dispositivos (la bomba más el generador) es entre 5 y 15 veces menor que el de las turbinas convencionales (Ávila et al., 2022). El uso de las PATs tiene aspectos positivos, dado que pueden aprovechar el exceso de energía de flujo y obtener valores de eficiencia adecuados a un bajo costo de inversión. Sin embargo, el principal aspecto negativo está relacionado con bajo rendimiento cuando opera alejado de su punto de mejor eficiencia (BEP).

El objetivo de este trabajo es presentar un marco metodológico para la PRA utilizando técnicas derivadas de la teoría de grafos y optimización multi-objetivo en la búsqueda de mejorar la eficiencia de la RDA. Se propone la utilización del algoritmo de Leiden para el procedimiento de clustering topológico basado en parámetros hidráulicos y energético para el dimensionamiento óptimo y la asignación de AMDs, con el fin de maximizar la producción energética y minimizar las fugas de agua, manteniendo un nivel suficiente de operatividad y resiliencia. Se postula el uso de PATs como sistemas de control para el aprovechamiento del exceso de presión de flujo y la reducción de fugas. Asimismo, se plantea la utilización de un algoritmo heurístico basado en el potencial hidroeléctrico de las tuberías para definir la ubicación y configuración de los dispositivos de regulación y control. Finalmente, se incorpora un método de evaluación económica para determinar la mejor solución de sectorización de la RDA.

## **2. Metodología**

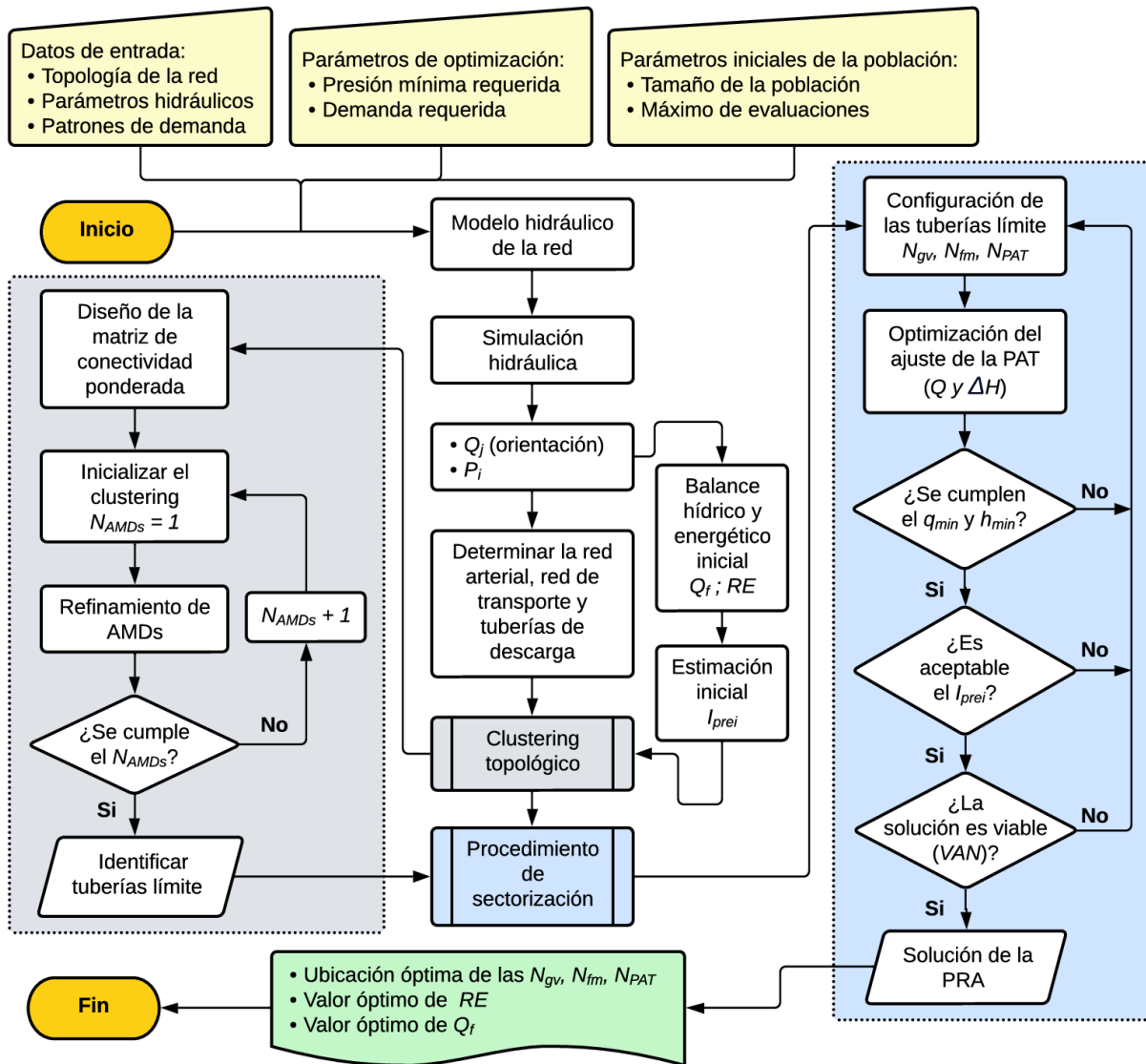
En esta sección, se describirá la metodología para el diseño de AMDs, que tiene como objetivo mejorar la eficiencia hidráulica y energética de la RDA. La Figura 1 muestra el esquema global de la metodología propuesta. A lo largo de esta metodología se delimitan los procedimientos y etapas necesarias para alcanzar los objetivos establecidos.

### **2.1 Modelo de simulación**

Para desarrollar el modelo matemático es fundamental contar con información detallada sobre las características topológicas e hidráulicas, así como con los datos de caudal, los cuales pueden variar según el paso temporal o dado un patrón de demanda establecido. Es importante destacar que los parámetros de entrada se mantienen constantes durante el análisis. El modelo de simulación hidráulica tiene como objetivo imperativo garantizar y satisfacer la demanda en cada nudo de consumo con la presión mínima requerida. Este criterio es fundamental en el diseño de las AMDs, dado que impacta directamente en la selección y configuración de los dispositivos de regulación y control candidatos a ser instalados en las tuberías límite.

En este proyecto se empleó la Toolkit de EPANET 2.2.3 (Rossman, 2000) para simular hidráulicamente la RDA, utilizando una herramienta creada en PyCharm CE y programada en Python 3.10. Para optimizar la reducción de fugas y el potencial de producción de energía se utilizó un algoritmo genético para determinar la ubicación óptima de las turbinas, caudalímetros y válvulas de seccionamiento mediante dos funciones objetivo. Se empleó el algoritmo NSGA-II a través del framework de JMetal (Gutiérrez-Bahamondes et al., 2019), así como una programación entera para determinar la configuración de los dispositivos.

Figura 1. Esquema general de la metodología.



## 2.2 Proceso de clustering

La etapa de clustering proporciona el tamaño, la forma y el conjunto de tuberías límite de cada AMD, es decir, aquellas tuberías candidatas para instalar turbinas, caudalímetros y/o válvulas de seccionamiento. Basado en una mejora del método de Louvain, el algoritmo de Leiden busca optimizar la modularidad entre comunidades (Traag et al., 2019). Su funcionamiento está basado en tres fases: el desplazamiento local de los nodos, el refinamiento de las particiones y la generación de la red basada en la partición mejorada. Este algoritmo, implementado en Python mediante las librerías NetworkX y igraph (e incorporado en la herramienta desarrollada), evita el inconveniente de crear agrupamientos que puedan tener miembros desconectados, mediante la incorporación de un proceso de refinamiento en las soluciones.

Se utilizaron como parámetros para ponderar las conexiones: las coordenadas geométricas, las fuentes de aporte, las demandas y presiones nodales calculadas. Asimismo, se utilizó el caudal circulante y el potencial de energía disipada en cada tramo con la red trabajando a la capacidad establecida. El número de AMDs ( $N_{AMDs}$ ) se utiliza como parámetro de entrada del

modelo y no se modifica durante del procedimiento. En relación a lo anterior, Di Nardo et al., (2015) proponen un número adecuado de AMDs para optimizar la conectividad global de la red. De acuerdo con el estudio, el número óptimo de AMDs desde un punto de vista topológico se puede obtener como  $N_{AMDs} \approx n^{0.28}$ , siendo  $n$  el número de nudos en la red.

### 2.3 Reducción de fugas

La reducción de fugas en el sistema se obtiene como la diferencia entre el volumen de fugas antes y después del proceso de optimización. Como sugieren Araujo et al., (2006), las fugas pueden asignarse en los nudos de la red como una demanda impulsada por la presión, de este modo:

$$Q_f = \sum_{i=1}^n q_i^f \rightarrow q_i^f = f_i \cdot h_i^\beta \quad (1)$$

Siendo  $n$  es el número de nudos y  $q_i^f$  es la descarga ( $m^3/s$ ) filtrada a través del  $i$ -ésimo nudo.  $h_i$  es la presión (m) del nudo  $i$ ,  $\beta$  un exponente que depende del material de la tubería y de la forma del orificio.

### 2.4 Recuperación de energía

La generación de energía hidroeléctrica depende tanto de la altura ( $H$ ) como del caudal ( $Q$ ), lo que implica que el potencial de generación de energía no puede establecerse únicamente por la presión excedente. La energía total excedente del sistema no equivale a la energía potencialmente recuperable, puesto que en determinados nudos este exceso de energía garantiza que se cumpla con la presión mínima requerida en otros nudos (Giudicianni et al., 2020). Para calcular el potencial de recuperación de distintas soluciones, se debe llevar a cabo la suma del potencial energético (kWh) en cada punto donde se pueda instalar un dispositivo de recuperación de energía (RE) que puede ser calculado como:

$$RE = \sum_{j=1}^M \rho \cdot g \cdot (H - H_{min})_j \cdot \max(Q_{ji}) \cdot \eta \cdot \Delta t \quad (2)$$

Donde  $M$  es el número de dispositivos de RE,  $H$  altura de presión disponible (m) en la tubería  $j$ ,  $H_{min}$  es la altura de presión mínima (m) en la tubería  $j$ ,  $Q_{ji}$  es el caudal ( $m^3/s$ ) en la tubería  $j$  conectada al nudo  $i$ ,  $\max(Q_{ji})$  es el caudal correspondiente a la tubería  $j$  con el máximo conectado al nudo  $i$ ,  $\eta$  es el rendimiento de la turbina,  $\rho$  es la densidad del agua ( $kg/m^3$ ),  $g$  es la aceleración gravitatoria ( $m/s^2$ ) y  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo.

### 2.5 Objetivos de optimización

El propósito de este estudio es la mejora de la eficiencia hidráulica y energética de la RDA, que se centra en la optimización del proceso de PRA y el diseño de AMDs donde se busca reducir el ratio de fugas y maximizar la RE por hora. Siguiendo el modelo propuesto por Fecarotta & McNabola (2017), se seleccionó el Valor Actual Neto (VAN) de la inversión como la función objetivo para la optimización. El VAN se formula de la siguiente manera:

$$VAN = - \left[ \sum_{g=1}^{n_{PAT}} C_{PAT} P N_{inst} + \sum_{h=1}^{n_{fm}} C_{fm} + \sum_{k=1}^{n_{gv}} C_{gv} \right] + \sum_{y=1}^Y \frac{C_w W_{red} + C_e E_{prod} - C_m}{(1+r)^y} \quad (3)$$

Siendo  $n_{PAT}$ ,  $n_{fm}$  y  $n_{gv}$  el número de PATs, caudalímetros y válvulas de seccionamiento instaladas respectivamente.  $C_{fm}$  y  $C_{gv}$  corresponden a los costos (€) individualizados de los

caudalímetros y válvulas de seccionamiento.  $C_{PAT}$  es el costo (€/kW) de la PAT,  $PN_{inst}$  es la potencia nominal de la PAT instalada (kW).  $C_w$  es el costo del agua (€/m<sup>3</sup>),  $W_{red}$  es la reducción anual de las fugas de agua (m<sup>3</sup>),  $C_e$  es el costo de venta de la energía recuperada (€/kWh),  $E_{prod}$  es el potencial energético anual recuperado (kWh) y  $C_m$  es el costo de mantenimiento anualizado. Por otra parte,  $Y$  es el número de años de proyección y  $r$  la tasa de descuento. El modelo implementado toma el año 0 como el punto de partida para la inversión inicial, con la generación de un flujo de caja anual que se registra al final de cada año.

Asimismo, se busca minimizar el índice de energía potencialmente recuperable ( $I_{PREI}$ ) formulado por Cubides-Castro et al., (2021) que relaciona el excedente de la potencia disponible que se puede recuperar en los elementos de la red y el excedente de potencia suministrada, el cual se expresa como:

$$I_{PREI} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i (h_i - h_{req,i}) + \sum_{v=1}^V q_v \Delta h_v}{\sum_{r=1}^R Q_r H_r - \sum_{i=1}^n q_i h_{req,i} - \sum_{j=1}^L Q_j \Delta h_j - \sum_{k=1}^K q_k \Delta h_k} \cdot \Delta t \quad (4)$$

Donde  $n$  es el número de nudos de consumo,  $R$  es el número de fuentes de origen,  $L$  es el número de tuberías,  $q_i$  y  $h_i$  son la demanda de agua (m<sup>3</sup>/s) y la presión (m) en el  $i$ -ésimo nudo respectivamente,  $h_{req,i}$  es la presión mínima requerida (m) en el  $i$ -ésimo nudo.  $Q_r$  y  $H_r$  son la descarga de agua (m<sup>3</sup>/s) y la altura total (m) de la  $r$ -ésima fuente de origen,  $Q_j$  y  $\Delta h_j$  son el caudal circulante (m<sup>3</sup>/s) y la pérdida de carga (m) en la  $j$ -ésima tubería de la red calculada a través de la fórmula de Hazen-Williams.  $K$  es el número de válvulas,  $q_k$  y  $\Delta h_k$  son el caudal circulante (m<sup>3</sup>/s) y la pérdida de carga (m) en la  $k$ -ésima válvula. Valores altos del  $I_{PREI}$  indica bajos valores de potencia disipada, y por tanto, mayor resiliencia.

### 3. Caso de estudio

La metodología descrita anteriormente se ha aplicado a una red sintética propuesta inicialmente por Sterling & Bargiela (1984) y que ha sido utilizada por diversos autores en la literatura (Jowitt & Xu, 1990; Fecarotta & McNabola, 2017; Morani et al., 2021). La red (ver Figura 2) está compuesta por 3 embalses, 22 nudos de consumo y 37 tuberías. La demanda nodal promedio es de 150 L/s y el coeficiente emisor para las fugas  $\beta$  se ha fijado en 1.18 (Araujo et al., 2006) con una presión mínima que varía entre 10 y 30 mca. El coeficiente de fuga  $f_i$  es constante para cada nudo y se han extraído del artículo original de Jowitt & Xu (1990). La longitud total de tuberías es de 44.26 km con diámetros desde 152 hasta 457 mm, mientras que el valor del coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams se encuentra entre 6 y 140. La red de transporte se identificó mediante un algoritmo BFS y una proporción que oscila entre el 5% y 10% de las tuberías que componen el sistema. El nivel de los embalses varía a lo largo del día, por lo cual se consideran tres condiciones de demanda para caudal mínimo, normal y máximo como se presenta en la Tabla 1.

El algoritmo genético se ejecuta con 1,000 generaciones para una población que abarca 100 individuos. Cada individuo es una secuencia de cromosomas enteros y tiene una longitud igual al número de tuberías límite. Además, cada cromosoma asume un valor 0 si se inserta una turbina, un valor 1 si se instala una válvula de seccionamiento y un valor 2 si se coloca un caudalímetro en la  $j$ -ésima tubería respectivamente. El porcentaje de cruce se fija en  $P_{cross} = 0.8$ , y el de mutación  $P_{mut} = 0.05$ .

Figura 2. Esquema de la red.

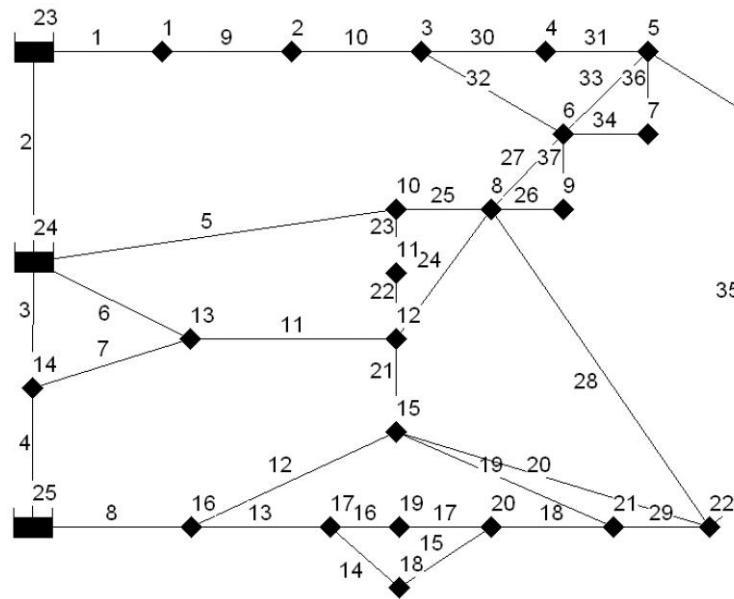


Tabla 1. Cota de la lámina de agua de los embalses.

ID Embalse	Nivel máximo (m)	Nivel normal (m)	Nivel mínimo (m)
23	56	54.66	54.5
24	55.5	54.6	54.5
25	55.5	54.5	54

Para simplificar el modelo, se utilizaron valores constantes para  $C_w$ ,  $C_e$  y  $r$ , haciendo referencia a los valores reportados por Creaco et al., (2021) para Italia. La Tabla 2 muestra los valores adoptados en este estudio. El costo unitario de la PAT se estima en función de los kW instalados (Giudicianni et al., 2020), la cual se instala en conjunto con una VRP con el fin de mantener una presión constante a la entrada de la turbina. Los costos de instalación  $C_{inst}$  de todos los dispositivos se fija en un valor constante. Por otra parte, el costo de mantenimiento  $C_m$  se estima en un 10% del coste total de la inversión (suma de todos los costes de los dispositivos). Se consideró un horizonte de inversión de 5 años para realizar el análisis.

Tabla 2. Costos asociados a los dispositivos y parámetros del análisis económico.

$C_w$ (€/m <sup>3</sup> )	$C_e$ (€/kWh)	$C_{PAT}$ (€/kW)	$C_{VRP}$ (€)	$C_{fm}$ (€)	$C_{gv}$ (€)	$C_{inst}$ (€)	$y$ (años)	$r$ (-)
0.30	0.22	1,200	400	600	450	2,500	5	0.05

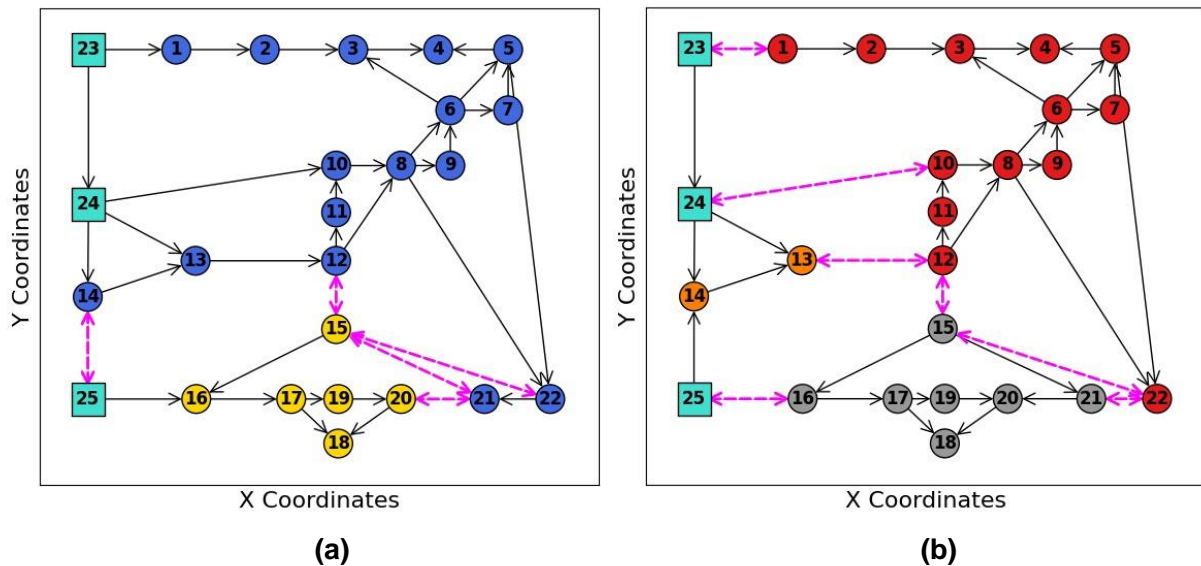
#### 4. Resultados

A fin de verificar la metodología descrita en el apartado anterior, se tomó el modelo matemático original de la RDA y se dividió en base a las características hidráulicas, topológicas y energéticas del sistema. En este marco, el método genera un conjunto de posibles escenarios de soluciones, cada uno de los cuales está asociado a un número diferente de AMDs. Se formularon diversas distribuciones para la PRA, caracterizadas por estar conformadas por entre dos y tres AMDs, los cuales fueron definidos a partir de la distribución de caudales en el periodo de mayor consumo. El modelo de optimización de las tuberías límite ha sido configurado para analizar y trabajar sobre el patrón diario de demanda. Los principales resultados obtenidos han sido clasificados en dos escenarios, como se



observa en la Figura 3, vinculados directamente con el número de AMDs y la configuración de las PATs/VRPs, válvulas de seccionamiento y los caudalímetros a ser instalados en las tuberías límite (color magenta).

Figura 3. Esquema de sectorización propuesta: (a) 2 AMDs (b) 3 AMDs.



Para determinar la consigna ( $max \Delta H_{ji}$ ) de las VRP que simulan la recuperación de energía en el modelo hidráulico de la red, se implementó un procedimiento que permite realizar el ajuste para cada dispositivo de manera simultánea en todos los periodos de simulación ( $t$ ). Para ello, se utiliza un algoritmo BFS que toma la dirección de los caudales para identificar las fuentes de aporte hacia los AMDs. En primera instancia, dentro del modelo matemático de la RDA se instalan todos los dispositivos de regulación en las tuberías límite, donde la consigna de las VRPs se configura con un valor nulo. Posteriormente, se determina el nudo que presenta la mínima presión disponible, para luego proceder a barrer la red en la dirección del flujo almacenando los dispositivos de RE instalados en el trayecto. Al tratarse de un modelo hidráulico dependiente de la presión, para determinar el ajuste específico se optó por utilizar valores incrementales ( $\Delta h$ ) de la consigna. Mediante simulación se verifica el cumplimiento de los requisitos mínimos de operación para el sistema (pueden ser consultados en el trabajo de Jowitt & Xu, 1990).

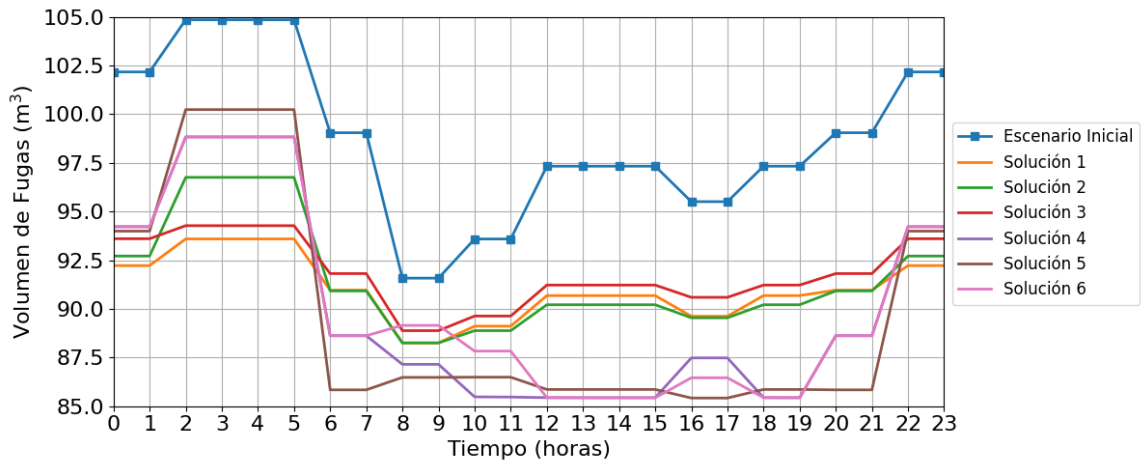
Cabe señalar, que una vez definidas las tuberías límites entre sectores, se identifican también aquellas tuberías de descarga desde las fuentes de suministro candidatas a ubicar una PAT/VRP con el objetivo de reducir las presiones en la red y recuperar energía en dichos puntos. Para ello, se mantuvieron las mismas restricciones en cuanto a la operación de estos dispositivos que en otros puntos de la red. Esto se realizó en conjunto con el proceso de optimización y ajuste de la configuración de los dispositivos de control. El procedimiento se lleva a cabo de forma iterativa en toda la red, con el propósito de asegurar el funcionamiento adecuado del sistema durante cada periodo de análisis, garantizando el cumplimiento de las restricciones de presión, demanda y distribución de caudales.

En la Tabla 3 se presenta un resumen de las soluciones propuestas para los dos escenarios planteados, en términos de costos de inversión y valorización económica en el horizonte de análisis para los tres casos de estudio (niveles de los embalses).

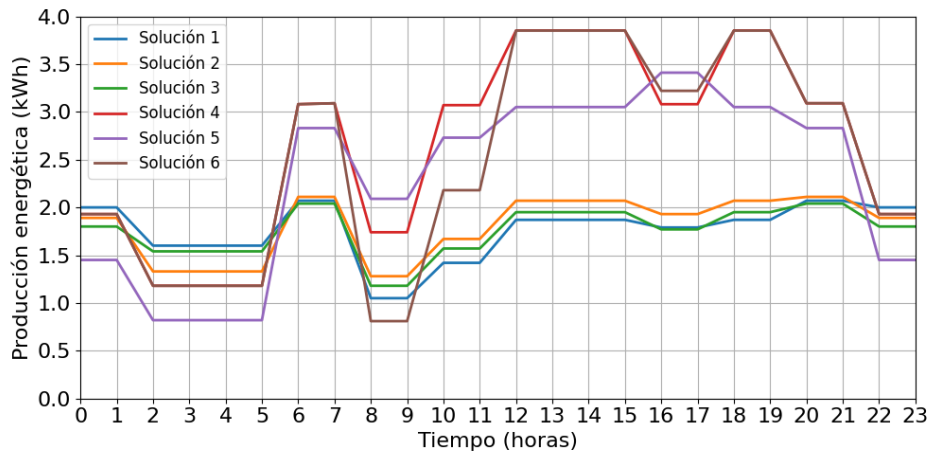
**Tabla 3. Resumen de los resultados de las soluciones seleccionadas para los escenarios planteados.**

Nº de AMDs	Sol. ID	Ubic. PAT + VRP	Ubic. Vál. Secc.	Ubic. Caud.	Costos de Inversión (€)	Valor Actual Neto (€)		
						Nivel Mínimo	Nivel Normal	Nivel Máximo
2	1	1, 4, 6, 8, 21	7, 17	15	33,750	53,014	53,749	50,489
	2	1, 4, 6, 8, 21	18	19	35,000	44,874	47,124	38,295
	3	4, 6, 8, 21	18, 19	20	34,350	28,099	43,817	42,545
3	4	1, 4, 6, 11	-	20, 21, 29	34,750	69,658	71,869	73,150
	5	4, 6, 8, 11	29	20, 21	35,750	62,450	70,928	53,666
	6	1, 4, 6, 8, 11	-	20, 21	34,600	70,755	67,801	28,098

**Figura 4. Resultados del modelo de optimización: (a) Volumen de fugas, (b) Producción de energía.**



**(a)**



**(b)**

Al comparar los escenarios estudiados con el estado original de la red, como se muestra en la Tabla 4, se observa una diferencia significativa. En el estado original, el volumen de fugas alcanza los 2,369.47 m<sup>3</sup>/día y una producción energética nula. Sin embargo, las soluciones propuestas mediante la valoración económica aportan resultados viables para la gestión del

sistema. Al analizar en profundidad los resultados de la partición de la RDA en tres AMDs se observa una reducción del 8.76% del volumen fugado y una reducción del 12% del  $I_{PREI}$ , seguida de una producción energética de 82.91 kWh/día. Sin embargo, al pasar de tres a dos AMDs, la reducción de la presión global es mínima (es decir, 1.51%), con una reducción del porcentaje de fugas de un 7.78% y una disminución de la producción energética del 51.16%. Un análisis detallado revela que la capacidad de recuperación de energía y de reducción de fugas de los dispositivos es muy diferente (ver Figura 4). En general, unos pocos dispositivos pueden recuperar una gran parte de la energía disponible y reducir un gran porcentaje del volumen de fugas, mientras que muchos de los dispositivos apenas contribuyen a mejorar la eficiencia hidráulica y energética del sistema.

**Tabla 4. Soluciones óptimas para la PRA.**

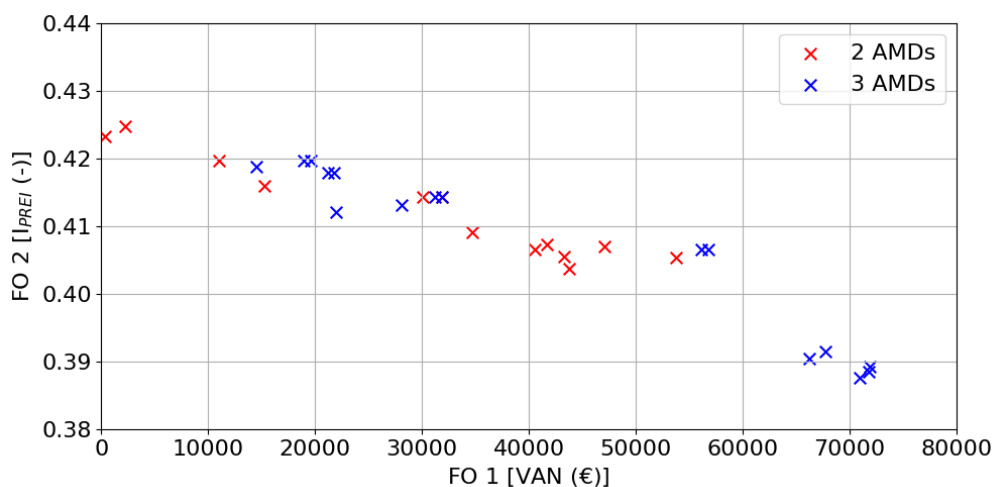
Nº de AMDs	Nº de PAT+VRP	Nº Vál. Secc.	Nº de Caud.	Energía Producida (kWh/día)	Vol. Recuperado (m³/día)	$I_{PREI}$	Presiones (m)	
							Mínima	Máxima
0	-	-	-	-	-	0.4443	30.25	44.26
2	5	2	1	42.42	184.33	0.4053	25.16	43.59
3	5	0	2	82.91	207.62	0.3912	28.27	41.43

La rentabilidad de la recuperación de energía, aunque es potencialmente beneficiosa, depende en gran medida de la optimización del sistema para maximizar la eficiencia de los dispositivos. Esto se subraya por el hecho de que el principal beneficio se observa en la gestión del agua, derivada de la mitigación de fugas. Para la configuración de dos AMDs, la rentabilidad obtenida de la venta de energía eléctrica generada es del 14.45%, mientras que la valoración económica producto del ahorro de agua constituye un 85.65%. En cambio, con tres AMDs, estos valores representan el 22.65% y 77.35%, respectivamente. Tales resultados destacan la importancia de priorizar el control de fugas, considerando su asociación directa con beneficios económicos inmediatos y beneficios medioambientales de largo alcance. La recuperación energética, si bien es valiosa, actúa como un beneficio secundario, contribuyendo aproximadamente con un 20% del beneficio total, y por ende, requiere de un análisis más detallado.

Para este estudio de caso, todas las soluciones presentadas satisfacen las restricciones hidráulicas, para una gestión eficiente de la RDA. Aquellas distribuciones con un número de válvulas de seccionamiento mayor a tres mostraron valores del VAN negativos, por lo que no son soluciones válidas desde un punto de vista económico. Como se esperaba, el  $I_{PREI}$  disminuye a medida que el número de PATs/VRPs aumenta, dando lugar a una menor disipación hidráulica como se presenta en la Figura 5. Esto podría deberse al hecho de que, cuanto menor sea el número de tuberías operativas entre distritos, mayor será el valor del caudal horario, y en consecuencia, mayor será el valor de la energía recuperada.

Este procedimiento propone resultados tanto de producción energética como de ahorro de agua asociado a la reducción en la presión de operación, con la garantía de cumplir con los criterios requeridos para el correcto suministro a los usuarios. Es por ello, que estos escenarios proponen un aprovechamiento de los recursos tanto hídricos como energéticos los cuales son desaprovechados debido a la no intervención de la red. Los beneficios asociados a la reducción de la presión en la RDA son relevantes si se comparan con la condición de no disipación (sin la presencia de recuperadores). La introducción de una restricción de la potencia mínima mayor permitiría evitar la selección de un elevado número de dispositivos, reduciendo así los costos de inversión. Para todos aquellos puntos que no cumplen con esta restricción, es posible colocar VRPs como solución, con el objetivo de perseguir la reducción de las fugas y el ahorro de agua, que en términos económicos presenta un mayor beneficio.

Figura 5. Relación entre los objetivos de optimización.



## 5. Conclusiones

La búsqueda de la mejora en la eficiencia hidráulica y energética de las RDAs se ha posicionado como uno de los campos de investigación más importantes en los últimos años. Todo esto, en la búsqueda de la sustentabilidad y el desarrollo sostenible de cara a las próximas décadas. La reducción de fugas y el aprovechamiento de la energía disipada en las RDAs son aspectos clave en el aumento de la eficiencia y la gestión de los abastecimientos. En este trabajo se desarrolló un procedimiento para la PRA que determina los límites de las AMDs y la configuración óptima de operación de los dispositivos de regulación y control. Además, permite valorar económicamente las distribuciones propuestas, enfocadas en el ahorro de agua y la producción energética.

En base a las soluciones obtenidas, se observa que la energía en forma de presión disminuye en la red a medida que aumenta en número de dispositivos de RE, lo que, a su vez, reduce la resiliencia del sistema ante eventos que perturben el normal funcionamiento. Sin embargo, dentro de las AMDs la energía aumenta en determinados puntos, particularmente en aquellos nudos de frontera a partir de los cuales se instalaron las válvulas de seccionamiento, donde las tuberías adyacentes pueden considerarse candidatas para instalar dispositivos de RE. Cabe señalar, que el proceso de PRA se ve fuertemente influenciado por las condiciones topográficas de la red, especialmente por la elevación de los nudos de consumo, lo cual repercute en la fase de clustering y en el diseño final del AMD. Finalmente, la energía recuperada puede ser utilizada para cubrir las necesidades eléctricas básicas de la estación de control (por ejemplo, sensores y controladores), ya que gran parte del beneficio de la PRA viene dado por la reducción del volumen de fugas del sistema.

## Referencias

- Araujo, L. S., Ramos, H., & Coelho, S. T. (2006). Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. *Water Resources Management*, 20(1), 133–149.
- Ávila, C. A. M., Sánchez-Romero, F. J., López-Jiménez, P. A., & Pérez-Sánchez, M. (2022). Improve leakage management to reach sustainable water supply networks through by green energy systems. Optimized case study. *Sustainable Cities and Society*, 83(5).
- Bui, X. K., Marlim, M. S., & Kang, D. (2020). Water network partitioning into district metered

- areas: A state-of-the-art review. *Water (Switzerland)*, 12(4).
- Creaco, E., Castagnolo, D., & Pezzinga, G. (2021). Assessing the impact of partitioning on optimal installation of control valves for leakage minimization in WDNs. *Water (Switzerland)*, 13(7).
- Cubides-Castro, E. D., López-Aburto, C. S., Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., Mora-Meliá, D., & Iglesias-Castelló, M. (2021). Methodology for determining the maximum potentially recoverable energy in water distribution networks. *Water (Switzerland)*, 13(4).
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G. F., Tzatchkov, V. G., & Alcocer-Yamanaka, V. H. (2015). Performance indices for water network partitioning and sectorization. *Water Science and Technology: Water Supply*, 15(3), 499–509.
- Fecarotta, O., & McNabola, A. (2017). Optimal location of pump as turbines (PATs) in water distribution networks to recover energy and reduce leakage. *Water Resources Management*, 31(15), 5043–5059.
- Giudicianni, C., Herrera, M., di Nardo, A., Carravetta, A., Ramos, H. M., & Adeyeye, K. (2020). Zero-net energy management for the monitoring and control of dynamically-partitioned smart water systems. *Journal of Cleaner Production*, 252.
- Gutiérrez-Bahamondes, J. H., Salgueiro, Y., Silva-Rubio, S. A., Alsina, M. A., Mora-Meliá, D., & Fuertes-Miquel, V. S. (2019). jHawanet: An open-source project for the implementation and assessment of multi-objective evolutionary algorithms on water distribution networks. *Water (Switzerland)*, 11(10).
- Jowitt, P. W., & Xu, C. (1990). Optimal Valve Control in Water-Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116(4), 455–472.
- Mala-Jetmarova, H., Sultanova, N., & Savic, D. (2017). Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system operation. *Environmental Modelling and Software*, 93, 209–254.
- Morani, M. C., Carravetta, A., D'Ambrosio, C., & Fecarotta, O. (2021). A new mixed integer non-linear programming model for optimal PAT and PRV location in water distribution networks. *Urban Water Journal*, 18(6), 394–409.
- Rossman, L. (2000). EPANET 2.0 User Manual. *Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Laboratory, USEPA, Cincinnati, OH*.
- Sterling, M. J. H., & Bargiela, A. (1984). Leakage reduction by optimised control of valves in water networks. *Trans. Inst. Meas. & Control*, 6(10), 293–298.
- Traag, V. A., Waltman, L., & van Eck, N. J. (2019). From Louvain to Leiden: guaranteeing well-connected communities. *Scientific Reports*, 9(1), 1–12.
- UNESCO, & UN-WATER. (2020). *United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change, Paris, UNESCO*.

**Comunicación alineada con los  
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

