

La recuperación de energía como medida de la resiliencia en sistemas de distribución de agua con consumos dependientes de la presión

Energy recovery as a measure of resilience with consumption pressure-dependent in water distribution systems

E. Duvan Cubides-Castro^{a1}, Pedro L. Iglesias-Rey^{ib a2*}, Daniel Mora-Meliá^{ib a3}, F. Javier Martínez Solano^{ib a4}

^aDepartamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n. 46022 Valencia, España.

E-mail: ^{a1}elcu@doctor.upv.es, ^{a2}piglesia@upv.es, ^{a3}damome@upv.edu.es, ^{a4}jmsolano@upv.es

*Autor para correspondencia

Recibido: 26/04/2024

Aceptado: 12/11/2024

Publicado: 31/1/2025

Citar como: Cubides-Castro, E.D., Iglesias-Rey, P.L., Mora-Meliá, D., Martínez Solano, F.J. 2025. Energy recovery as a measure of resilience with consumption pressure-dependent in water distribution systems. *Ingeniería del agua*, 29(1), 1-14. <https://doi.org/10.4995/ia.2025.21629>

RESUMEN

En el análisis de Sistemas de Distribución de Agua (SDA) pueden encontrarse distintas metodologías para la determinación de la Energía que es Potencialmente Recuperable (EPR); sin embargo, éstas suelen aplicarse a redes de distribución que no consideran pérdidas en la red, y cuyo control se realiza configurando los dispositivos instalados y determinando los valores potenciales de recuperación de energía considerando determinados criterios de servicio. En cuanto al análisis en cada nodo de la red asociado a los Consumos Dependientes de la Presión (CDP), existen todavía muchas incógnitas, en particular la variabilidad del caudal en la red en función de la energía recuperable y cómo ésta, puede afectar a otros nodos de la red, tanto en la distribución del caudal como en la presión, dicha variabilidad depende de la particularidad de cada SDA. La Energía Recuperable (ER) en los SDA es uno de los aspectos relevantes de la gestión de los recursos hídricos, ya que estos sistemas requieren una elevada energía para cumplir las condiciones mínimas de servicio. Muchos de estos sistemas tienen puntos en los que las presiones de suministro son superiores a las mínimas requeridas suponiendo un exceso de energía suministrada. Este exceso de energía puede considerarse como EPR, ahora bien, para el caso de CDP, dicha EPR en cada nodo puede variar al mismo tiempo varía el caudal y la presión. Este trabajo presenta la aplicación de una metodología para analizar la posible cantidad de EPR máxima considerando la topología y conectividad de los nodos y líneas de la red en los SDA con CDP (caudal y presión variable por configuraciones en la red). La aplicación del método se realiza en diferentes casos de estudio para validar y obtener un indicador de resiliencia para cada una de las redes analizadas, permitiendo estimar la EPR máxima.

Palabras clave | presión; optimización de redes; distribución de redes; índices de resiliencia; consumos dependientes; recuperación de energía.

ABSTRACT

In the analysis of water distribution systems (WDNs), different methodologies can be found for the determination of energy that is potentially recoverable (PRE); however, these are usually applied to distribution networks that do not consider losses in the network, and whose control is performed by configuring the installed devices and determining the potential energy recovery values considering certain service criteria. As for the analysis at each network node associated with pressure-dependent consumptions (PDC), there are still many unknowns, in particular the variability of the flow rate in the network as a function of the recoverable energy and how this can affect other nodes in the network, both in the distribution of the flow rate and in the pressure, said variability depending on the particularity of each distribution system. Recoverable energy (RE) in WDNs is one of the relevant aspects of water resources management, as these systems require a high level of energy to meet minimum service conditions. Many of these systems have points where the supply pressures are higher than the minimum required, implying an excess of energy supplied. This excess energy can be considered as potentially recoverable energy (PRE), however, in the case of PDC this potentially recoverable energy in each

node can vary at the same time as the flow and pressure vary. This work presents the application of a methodology to analyse the possible amount of maximum PRE considering the topology and connectivity of the network nodes and lines in WDNs with PDC (flow and pressure varying by network configurations). The application of the method is carried out in different case studies to validate and obtain a resilience indicator for each of the networks analysed, allowing the maximum PRE to be estimated.

Key words | *pressure; network optimization; network distribution; resilience index; dependent consumption; energy recovery.*

INTRODUCCIÓN

El aumento de la demanda mundial de energía está estrechamente relacionado con el crecimiento de la población, así como con la importancia de los cambios climáticos a lo largo del tiempo y las economías emergentes. (Matuszewska-Pierzynka, 2021; Sharif *et al.*, 2019). En un sistema de suministro de agua, se consume energía para la extracción del agua de la fuente, la transmisión, el tratamiento y la distribución. Alrededor del 7%-8% de la energía total generada en el mundo se utiliza para la producción y distribución de agua potable. Una parte importante de esta energía se utiliza para la distribución, es decir, el bombeo, la cloración y las actividades de mantenimiento (Sharif *et al.*, 2019). Además, el consumo requerido para los WDN es mayor cada año a medida que aumenta la población (Wakeel y Chen, 2016). Los SDA suelen diseñarse para un estado de funcionamiento máximo (estado crítico), garantizando en todo caso unas determinadas condiciones mínimas de servicio (caudal máximo y presión mínima). Sin embargo, estas condiciones de funcionamiento tienen una frecuencia de ocurrencia muy baja. Por lo tanto, es posible que gran parte del tiempo se suministre a la red un exceso de presión. Además de este exceso de energía suministrada, existen otras pérdidas de energía inherentes a la red (pérdidas por fricción, elementos pasivos y dispositivos de control, etc.). Por lo tanto, en escenarios no críticos, el exceso de energía podría recuperarse con los dispositivos adecuados. Esto último es lo que podría denominarse EPR de un SDA. Otros autores como del Teso *et al.* (2019) revisa conceptos energéticos ya introducidos en relación con los sistemas de distribución de agua, en particular las diferencias entre pérdidas operativas y estructurales permitiendo evaluar y gestionar la energía topográfica con el objetivo de mejorar la eficiencia del transporte de agua, buscando minimizar las pérdidas de energía debido a pérdidas operativas estructurales.

La ER en SDA puede considerarse relevante dentro de la gestión de los recursos hídricos, pues dichos sistemas requieren una energía considerablemente alta para poder suplir las condiciones mínimas de servicio. Al tener dicha solicitud de energía y según los requerimientos establecidos para cada SDA puede darse que, en indistintos puntos de la red se tengan presiones por encima de las mínimas requeridas, lo que implica la existencia de un exceso de energía que podría ser EPR. De acuerdo con (Cabrera *et al.*, 2018), el estudio de la eficiencia energética de los SDA está condicionada por su trazado, la gestión de la presión de servicio establecido en la fase de diseño, abordando el problema durante la fase de diseño y establecer AGE (áreas de gestión energética), siendo esto más eficaz que modificar un sistema operativo. Cuando un sistema ya está en funcionamiento, la gestión de la presión de exceso en la red puede aplicarse: Instalación de válvulas reductoras de presión (VRP) para disipar la energía sobrante (Cabrera *et al.*, 2018), Sectorizar la red en zonas de gestión de la presión (ZGP) para intentar que funcionen como una zona sectorizada de distribución DMA (del inglés *district metered areas*) (Lambert *et al.*, 2021) o particionando la red buscando mitigar la presión de servicio y del consumo de energía mediante la partición de redes cerradas SDA (Creaco *et al.*, 2023) y la Instalación de bombas como turbinas PATs (del inglés *Pumps as Turbines*). Esta opción mantiene las ventajas de las VRP y recuperación de energía, una ventaja que compensa la complejidad que supone regular una máquina hidráulica (Patelis *et al.*, 2017).

En la búsqueda por aprovechar la energía que se pierde en las SDA, diferentes estudios buscan en primer lugar identificar los elementos base que permiten determinar cuánta energía se podría recuperar. Particularmente, estos trabajos identifican los parámetros hidráulicos que tienen un mayor impacto en el rendimiento energético de los SDA. En este sentido, Hashemi *et al.* (2018) proponen una metodología basada en tres pasos: determinar los parámetros hidráulicos con mayor influencia en el rendimiento energético de la SDA; realizar combinaciones de parámetros hidráulicos que permitan distinguir las tuberías más/menos eficientes desde el punto de vista energético; y buscar el efecto que una rehabilitación de la tubería (basada en la edad o en el índice de rotura) tendría en la eficiencia energética de las SDA. Estas acciones se relacionan midiendo la energía que se puede recuperar a partir de las características de la red. Esto se obtiene analizando la relación entre la tubería y parámetros hidráulicos como el caudal transportado, el coeficiente de rugosidad, el diámetro de la tubería, las pérdidas unitarias, la presión, la elevación y la proximidad hidráulica a los principales componentes del SDA Hashemi *et al.* (2018). Este análisis permite identificar inicialmente

los parámetros que podrían ser relevantes para la instalación de posibles puntos o dispositivos de RE. Es decir, se trata de un estudio más enfocado en el análisis individual de las conducciones que en el efecto conjunto que todas ellas tienen.

A partir de estos primeros análisis en los SDA y como avance en el análisis de la EPR, otros autores (Abd Rahman *et al.*, 2018; Carravetta *et al.*, 2014; Covelli *et al.*, 2016) proponen PATs o realizando el control con válvulas reductoras de presión (VRP). Ambos casos buscan controlar el exceso de presión y su relación directa con las fugas en los SDA, es el primero tendría EPR y el otro estaría asociado al control de la presión en la gestión técnica de las redes. Otra forma de analizarlo según Samora *et al.* (2016) es cuantificar la energía excedente del potencial hidroeléctrico en una red asociada a la EPR en los SDA; sin embargo, esto aplica para solo un caso de estudio. Estas metodologías no permiten localizar los mejores puntos para extraer esta energía, sino realizar una recuperación energética (ER) sobre determinados dispositivos ya instalados. También consideran como premisa que no hay variación en los caudales de la red analizada, lo que no sería el caso real del funcionamiento de un SDA.

La sustitución de las Válvulas de rotura de presión (VRP) por turbinas, microturbinas o PAT en los SDA. Según Pérez-Sánchez *et al.* (2017), tiene aspectos positivos, ya que pueden sustituir a las VRP para disipar el exceso de energía, obteniendo valores de eficiencia adecuados. Otras ventajas del uso de PATs son el menor coste de inversión y la existencia de un elevado número de máquinas comerciales disponibles. Sin embargo, es importante considerar los principales aspectos negativos de los PAT, como su baja eficiencia cuando operan fuera de su punto de mejor eficiencia. Sinagra *et al.* (2017) proponen la sustitución de las VRP por turbinas de flujo cruzado con presión de salida positiva ya que éstas generan la misma disipación de energía que las VRP pero permitiendo la generación hidroeléctrica. La regulación de estas turbinas requiere un acoplamiento entre hidráulica y electrónica para mejorar la eficiencia de la generación hidroeléctrica (Sammartano *et al.*, 2017). Este aprovechamiento hidroeléctrico puede ser significativo, ya que estos dispositivos proporcionan altas eficiencias y bajos costes de fabricación. Al mismo tiempo, tienen la capacidad de controlar la presión y el caudal de descarga mientras generan energía eléctrica. Otras opciones de dispositivos de ER son las válvulas propuestas por Ferrarese y Malavasi (2020). Se trata de dispositivos que sustituyen a las VRP tradicionales. Tienen la capacidad de recuperar energía y al mismo tiempo permiten controlar en tiempo real las presiones y caudales en la red, pudiendo ser una herramienta que facilite la optimización y la gestión de la red. La ER en una SDA puede abordarse desde dos puntos de vista, el primero considera una aproximación global del problema, considerando al mismo tiempo las diferentes fuentes de energía (bombas, paneles solares, turbinas eólicas, baterías de almacenamiento) Este tipo de análisis trata de combinar la energía necesaria en la red, teniendo en cuenta tanto las cargas residenciales como la capacidad de almacenamiento de agua en los depósitos, con la capacidad de producción de energía. En este punto, la instalación de dispositivos de RE adopta un enfoque completamente diferente. El segundo se centra en una perspectiva local en la que sólo se analizan las actuaciones que se realizan directamente sobre la red de distribución de agua. En esta línea se encuadran trabajos como los de Fernández-García *et al.* (2019), Ramos *et al.* (2020), Rosado *et al.* (2020), Viana *et al.* (2023) y bajo la misma línea, pero particularizando en la búsqueda de la disminución de pérdidas en la red lo trabajado por Parra y Krause (2017).

Los estudios previos se centran en la ER en la red, pero no se especifica si existe algún tipo de ER por el usuario o por otros elementos ya instalados dentro de un análisis energético de un SDA. Un trabajo que considera no solo un nuevo balance de los SDA teniendo en cuenta la EPR sino además de la EPR existente en dispositivos instalados es el de Cubides-Castro *et al.* (2021), el balance que finalmente se presenta en dicho trabajo será un punto de partida no solo porque considera variables más específicas dentro de la energía suministrada y consumida dentro de un SDA, sino que permite determinar un valor de medición de la resiliencia en cada red. Este indicador pretende superar algunas de las limitaciones del índice de Todini *et al.* (2016) al considerar no sólo los excesos de presión sobre el valor mínimo requerido, sino también la topología y la conectividad de la red. Sin embargo, el método propuesto por Cubides-Castro *et al.* (2021) es válido únicamente para Consumos Independientes de la Presión (CIP).

Respecto a la localización de instalación de las VRP en los SDA, Cubides-Castro *et al.* (2021) relaciona en su metodología la instalación de cada dispositivo de control requerido aguas arriba de los nodos críticos identificados (teniendo en cuenta la tipología de la red, las pérdidas, etc.) dentro del análisis de cada red; siendo estos en cada iteración los mismos dado que la presión y el caudal en las tuberías no cambia. Otras propuestas de localización de VRP es la presentada por Price *et al.* (2022) en donde también identifica los nodos críticos en una red de distribución, determinando de forma óptima las posiciones y puntos de instalación de las VRP en un SDA buscando determinar un potencial de reducción de presión, localizando la ubicación potencial para instalar una PRV, definiendo los valores de consigna y manteniendo los requisitos de presión de servicio en cada nodo; y Jain y Khare (2023) cuyo objetivo es determinar el potencial de ER de un SDA y el lugar de instalación de las VRP a partir de la definición de una

presión de servicio mínima, la instalación aleatoria de dispositivos y una función objetivo, pudiendo realizar un control de las fugas y definiendo que la ubicación óptima de la instalación es crucial a la hora de utilizar microturbinas o PAT en SDA.

Los trabajos anteriores definen la EPR en una red con CIP, cada uno con limitaciones de instalación de dispositivos en donde la presión y caudal no varía; sin embargo, una de las aportaciones más relevantes de este trabajo es la consideración de CDP en los SDA realizando el análisis mediante la consideración de los nudos como emisores y permitiendo determinar la variación del caudal debido a la presión y a la variación del valor de consigna de la VRP instalada.

La hipótesis inicial de considerar la distribución de caudal fijo antes de instalar los dispositivos de ER ya no se mantiene realmente como fue considerada por Cubides-Castro *et al.* (2021). Los dispositivos instalados (VRP) modificarán las presiones y la distribución del caudal no solo del primer dispositivo sino de los demás dispositivos instalados en el análisis del SDA. La instalación de los dispositivos de ER se realiza del mismo modo que en los modelos de demanda no dependientes por la presión; sin embargo, la diferencia está en que cada dispositivo de ER instalado requiere la validación de que el nodo crítico tiene la presión mínima requerida. El algoritmo sólo pasa al siguiente elemento cuando está seguro de que se cumple totalmente la presión mínima tanto del dispositivo instalado o del que le antecede (según el caso).

El objetivo principal de este trabajo es determinar la máxima EPR de un SDA aplicado en redes con CDP, la ubicación de los dispositivos de ER necesarios para alcanzar dicho máximo, y discriminar entre la EPR recuperable en la red de la que sólo pueden recuperar los usuarios, tomando como base la metodología desarrollada por Cubides-Castro *et al.* (2021) para redes con CIP, en cuanto al balance energético, determinación de la máxima EPR y el algoritmo para determinar la localización de dispositivos instalados, este último adaptado en un algoritmo iterativo ya que cada variación (reducción o aumento) de presión puede suponer una nueva distribución de caudales en redes con CDP.

MATERIAL Y MÉTODOS

De acuerdo con Cubides-Castro *et al.* (2021) cualquier exceso de presión sobre el mínimo requerido es un exceso de energía suministrada. Parte de esta energía puede recuperarse en la red instalando diferentes dispositivos de ER. Sin embargo, la topología de la red hace que para mantener la presión mínima en algunos nodos sea necesario tener presiones superiores a la mínima en otros. En estos nodos, el exceso de energía suministrada no puede recuperarse en la red. Pero los usuarios conectados a estos nodos podrían instalar pequeños dispositivos de ER para aprovechar esa energía. Es lo que en este trabajo se denomina EPR por usuarios. La metodología simplificada y aplicada para CDP se presenta a continuación:

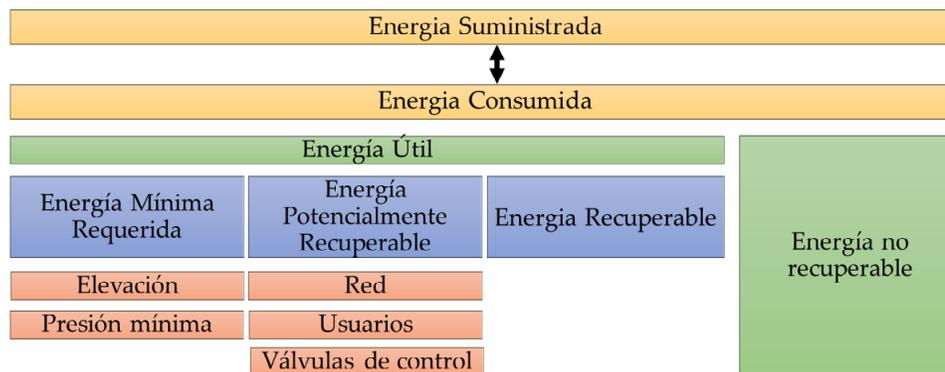


Figura 1 | Balance energético en un sistema de distribución de agua potable – Energía útil.

El desarrollo del objetivo principal de este trabajo es determinar la máxima EPR en un SDA pero proyectado para redes con consumo dependiente de la presión, este se ha estructurado en tres etapas definidas. En la primera, se ha tomado como balance energético de un SDA adaptado por Cubides-Castro *et al.* (2021), considerando explícitamente tanto la EPR como la energía

efectivamente recuperada mediante dispositivos de ER como turbinas o PAT. La segunda etapa ha consistido en definir el método que permite obtener la máxima EPR considerando que la distribución de caudales no se mantiene antes y después de instalar el dispositivo de RE debido a la variación de la presión al instalarse un dispositivo de recuperación de energía. La tercera etapa utiliza los resultados tanto del balance energético como del cálculo de la EPR para determinar el indicador de resiliencia (EPR) para los SDA determinado por Cubides-Castro *et al.* (2021). Este indicador se centra en la capacidad de ER de una red.

Como parte del desarrollo de la metodología se tomará como ejemplo la red representada en la Figura 2 donde la presión mínima se establece en 20 m. Como se puede observar, esta red presenta un exceso de presión respecto al mínimo requerido en todos los nodos de demanda.

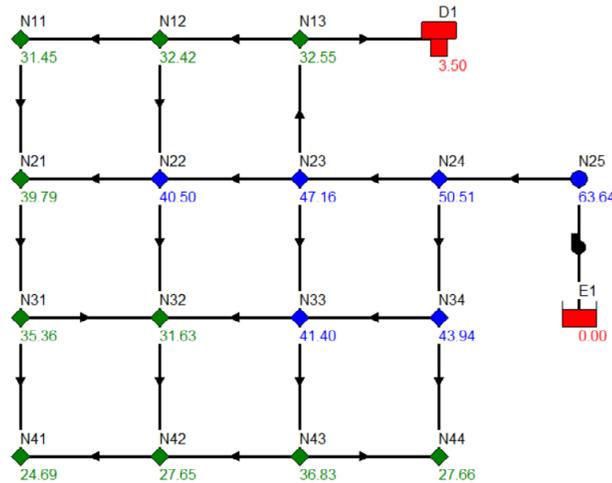


Figura 2 | Modelo matemático. Presiones obtenidas – Red con CDP.

El primer paso de la metodología planteada en este trabajo (ver Figura 3) consiste en definir los llamados Nodos de Origen Inicial (NOI). Estos nodos de origen son todos aquellos nodos de la red en los que se fija la presión, ya sean tanques o depósitos. A partir de aquí, se realiza el análisis hidráulico de la red, que determina las direcciones del flujo en las líneas.

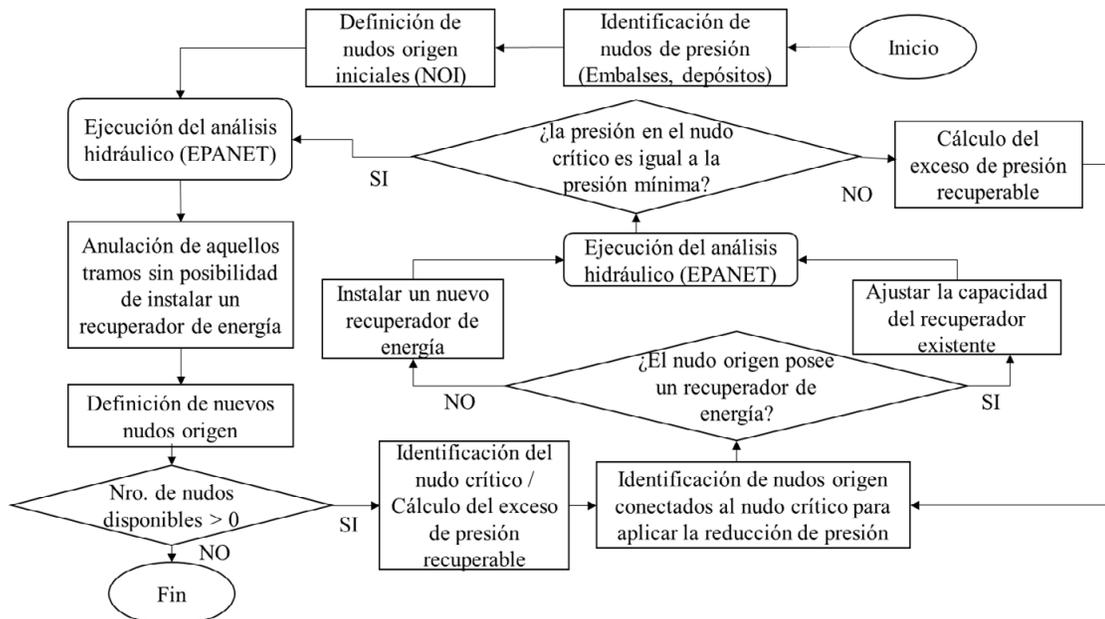


Figura 3 | Esquema de la metodología propuesta – Redes con CDP.

Después de la simulación hidráulica, el primer procedimiento consiste en cancelar las líneas donde no hay posibilidad de instalar dispositivos de ER. Si hay flujo entre depósitos o tanques, este flujo se produce a través de una serie de tuberías en la red. La instalación de cualquier resistencia adicional en estas líneas modificaría el flujo. Por esta razón, no es posible instalar ninguna unidad de ER en estas líneas.

En la red analizada, no se anulan tuberías por lo que los NORi se convierten en los nudos de origen (NOr). Al existir nudos origen (NOr), se realiza un análisis hidráulico para determinar los niveles de presión en la red, localizando el nudo crítico del sistema (aquel con presión más cercana a la mínima requerida definida). En este nudo la diferencia entre la presión y la mínima requerida define el exceso de presión y por tanto la ER que puede aplicarse. En ese momento se aplica una RE (pérdida de energía) en todas las líneas que tienen como origen un NOr, regulando o instalando un dispositivo y aplicando dicho exceso de presión que se puede regular.

Realizado este primer proceso de determinación de la ER se valida que la presión definida en el nudo crítico sea muy cercana a la mínima requerida, de lo contrario se debe recalcular de manera iterativa dicho exceso de presión y asignarle ese valor adicional a la consigna de los dispositivos previamente instalados. Una vez se llega a la validación de que la presión en el nudo sea cercana a la presión mínima, se continúa con el siguiente nudo crítico según los nudos disponibles. Seguido a este segundo proceso, se determinan de nuevo los tramos en los que no existe posibilidad de RE, que son anulados de nuevo del sistema. Estos tramos anulados generan que nudos que inicialmente sean NOR dejen de serlo y pasen a ser sustituidos por nuevos NOR. Estos nuevos NOR son los orígenes de los tramos de red sobre los que todavía puede obtenerse ER. De esta forma, el método se repite hasta que no quedan NOR disponibles.

El algoritmo se aplica a dos casos prácticos. El primero es una red mallada estudiada previamente por Cubides-Castro *et al.* (2021), en adelante Red de Ejemplo. El segundo es una red de riego “Balerna Network” (Reca y Martínez, 2006), en adelante Caso de Aplicación. En ambos casos es posible evaluar la EPR y el índice de resiliencia modificado. A continuación, se presentan los resultados de la aplicación de la metodología al modelo matemático de Figura 3. El ejemplo utilizado es un modelo de estado estacionario. Por lo tanto, solo se analiza un paso de tiempo y el proceso no se repetirá por diferentes instantes. Los valores por obtener serán las potencias que se pueden recuperar en el instante representado por el modelo.

La iteración inicial identifica dos NORi: E1 y D1. En consecuencia, se cancelan las líneas N13-D1, N23-N13, N24-N23, N25-N24 y E1-N25, ya que la instalación de un dispositivo de ER en cualquiera de ellas implica una variación en la distribución del flujo (ver Figura 4 – Iteración inicial (b)). A través de esta cancelación, se generan nuevos NOR en los nodos N13, N23 y N24, donde el nudo crítico NC es N41 (presión igual a 24.69 m), lo que implica un exceso de energía (presión) de 4.68 m. Esto implica la instalación de cuatro dispositivos de ER en las líneas N12-N13, N22-N23, N23-N33 y N24-N34 (Figura 4 – Iteración 1 (c)) con el valor de la consigna inicial con dicho valor de ER; sin embargo, dado que los caudales de las líneas varían según la presión en los nudos debido a que las redes analizadas tienen emisores que simula el cambio de presión y caudal para cada instante de tiempo (en estos casos estático) de acuerdo con la presión que es regulada por el dispositivo de recuperación instalado, es por esto que el proceso de cálculo debe iterarse para cada valor de ER hasta que la presión de este cumpla con la presión mínima, por lo que el valor final de ER será de 5.135 m. Estos nuevos dispositivos de ER conducen a la cancelación de las líneas marcadas en rojo (Figura 4 – Iteración 1 (c)) para mantener la presión en el nodo N41 igual a 20 m. Por lo tanto, aparecen nuevos NOR: N34 y N43.

En la siguiente iteración (Figura 4 – Iteración 1 (d)), el NC corresponde al N44, con una presión inicial de 22.72 m. Reducir la presión a 20 m en este nodo implica incorporar dos dispositivos de ER en las líneas N34-N44 y N43-N44, cada uno con una caída de presión de 2.72 m; sin embargo, dado que los caudales de las líneas varían según la presión en los nudos, se debe iterar dicho valor de ER en el dispositivo instalado hasta que la presión de este cumpla con la presión mínima, por lo que el valor final de ER será de 2.76 m. En resumen, la solución final corresponde a la que se muestra en la Figura 4 – Iteración final (d). Después de la entrada de los dos dispositivos de ER de la última iteración, se cancelan todas las líneas de la red, ya que no es posible instalar ningún dispositivo de ER. Por lo tanto, se concluye el proceso definitivo de la metodología.

Los resultados de los diferentes dispositivos de ER requeridos en la red para obtener la EPR máximo son los que se muestran en la Tabla 1. Esta tabla contiene los resultados de los seis dispositivos de ER que en la Figura 4 (d) se representan como válvulas en el modelo de red. Es de aclararse que el análisis realizado en este ejemplo es estático (análisis de estado estacionario). Por esta razón, solo se obtienen potencias eléctricas potencialmente recuperables.

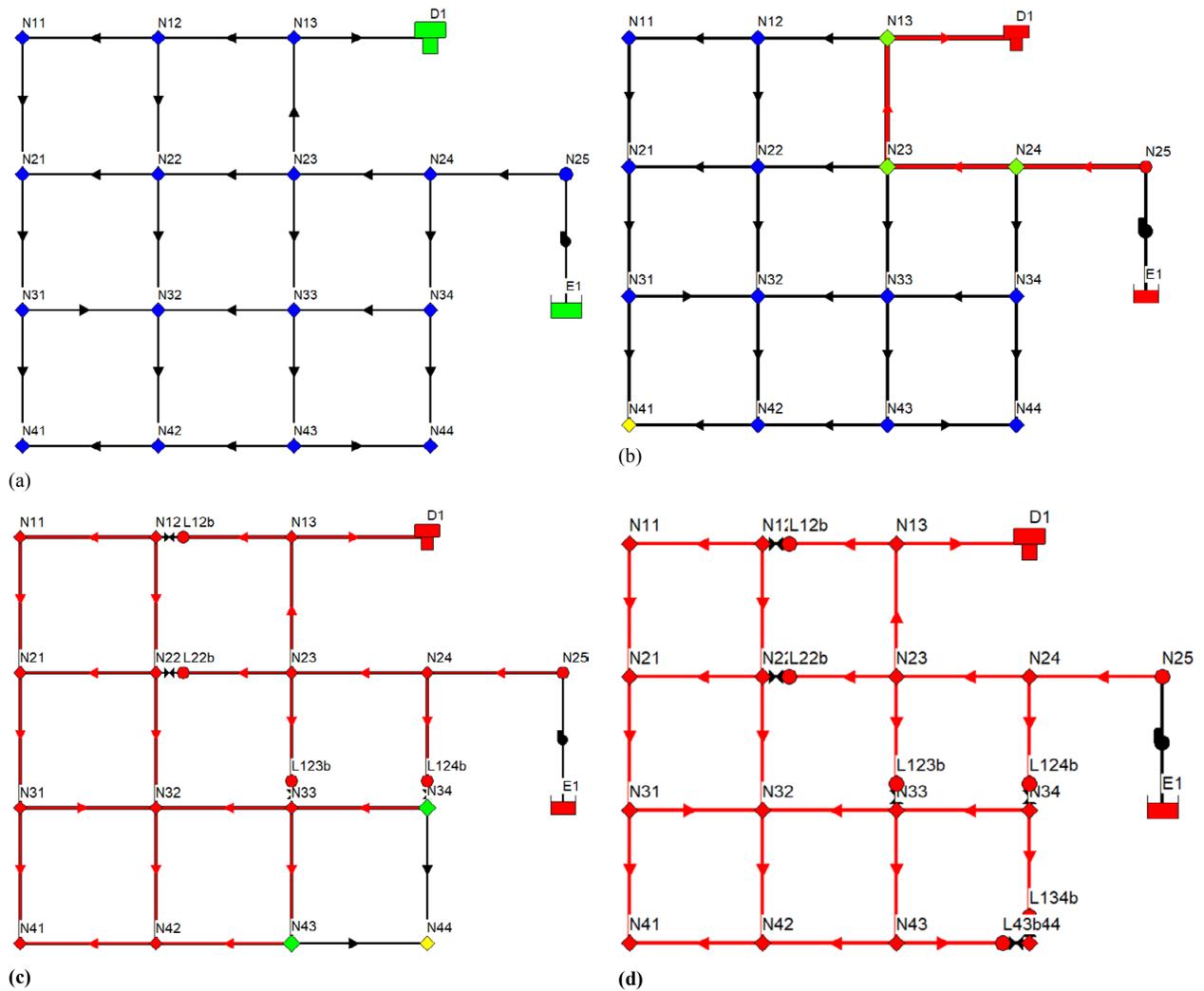


Figura 4 | Solución red de ejemplo, figuras presentadas (a) Configuración inicial, (b) Iteración inicial, (c) Iteración 1, (d) Iteración final – Red de ejemplo con CDP.

En la Tabla 1 esta se encuentra ordenada agrupada según dispositivos instalados por cada nudo crítico encontrado. En cada dispositivo de ER se recoge la línea donde está instalado. La tabla también muestra la potencia generada por cada dispositivo, el porcentaje generado sobre el total y el porcentaje acumulado. Los primeros cuatro dispositivos de ER (primera iteración) tienen una

Tabla 1 | Dispositivos de recuperación de energía requeridos en la red de ejemplo.

No.	ID Tubería	ID ER	ER (kW)	% ER	% Acum. ER
1	Tubería L12	ER-12	0.47	20.96%	20.96%
2	Tubería L22	ER-22	0.78	35.06%	56.02%
3	Tubería L123	ER-123	0.39	17.69%	73.71%
4	Tubería L124	ER-124	0.42	18.74%	92.45%
5	Tubería L134	ER-134	0.15	6.56%	99.01%
6	Tubería L43	ER-43	0.02	0.99%	100.00%
			2.22	100%	

ER 1,2,3,4 (primera iteración); ER 5 y 6 (iteración final).

capacidad de recuperación de energía notablemente significativa. Los dos últimos tienen una contribución mucho más baja respecto al total. Las cantidades totales son de 2.22 kW, que es el valor una vez terminado el proceso para la RE. Una vez determinado la ER, se puede completar el resto del balance energético de la red (Tabla 2).

Tabla 2 | Balance energético red de ejemplo con CDP.

			Sin dispositivos instalados				Con dispositivos instalados			
Esum:	Ee:	Ee,e:	2.87	2.87	39.35	39.35	2.87	2.87	39.35	39.35
		Ee,d:	0.00				0.00			
	Eb:		36.48	36.48			36.48	36.48		
Econ:	Ens	Ed,r	Ed,f	11.03	11.03	13.13	10.94	10.94	13.21	39.35
			Ed,b	0.00			0.00			
			Ed,v	0.00			0.00			
		Ed,a	Ed,f	2.09	2.09		2.27	2.27		
			Ed,t	0.00			0.00			
			Emin	Eu,t			6.66			
	Eu,n	10.75		10.69						
	EPR	EPRu		0.00	8.81	0.00	6.60			
		EPRr	8.81	6.60						
		EPRv	0.00	0.00						
	ER		0.00	0.00	2.22	2.22	26.14	26.14		

El balance energético con dispositivos instalados concluye que la EPR total (EPR+ER) en la red es el 22.4% (8.81 kW) de la energía total suministrada (Econ=Esum=39.35 kW), que se desglosa en EPR por los usuarios (EPRu, EPRn y EPRv) y ER en la red. Tras aplicar el método, la energía suministrada es prácticamente la misma. Tras instalar los dispositivos ER la EPR por parte de los usuarios es del 16.8% (6.6 kW) de la energía total, mientras que la ER en la red es del 5.7% (2.22 kW), ya que la topología no favorece la ER.

Por lo tanto, la capacidad de calcular el EPR total nos permite conocer de alguna manera el exceso real de energía de la red, por lo que podría considerarse como una medida del sobredimensionamiento de la red o de la capacidad que esta red puede tener para adaptarse a otras condiciones de operación. En el siguiente apartado se aborda el uso de esta metodología como indicador de resiliencia.

Para la aplicación de la metodología se utilizó una red (Tabla 3), modificada particularmente a un solo sector. Esta red estudiada corresponde a la red Balerna presentada por Reca y Martínez (2006). Para esta red, la presión mínima requerida en los nodos de demanda se ha fijado en 20 m. Los datos de esta red se pueden encontrar en la literatura.

Tabla 3 | Propiedades generales caso de estudio.

SDA	Balerna (simplificada)
No. de nudos de demanda	51
No. de embalses	1
No. de depósitos	0
No. de tuberías	50
No. de bombas	0
No. de válvulas	0
Duración de la simulación (h)	0
Extensión de la red (km)	11.82
Demanda media de la red (l/s)	124.78

La red Balerna se analiza con un modelo de estado estacionario. Este es un modelo de red clásico utilizado en problemas de evaluación comparativa de optimización. El análisis de esta red permite visualizar las capacidades de la metodología propuesta sin considerar la variación de la red de operación a lo largo del tiempo.

RESULTADOS

La metodología se ha aplicado al caso seleccionado con CIP y cuyos detalles se indican anteriormente. La red Balerna (Reca y Martínez, (2006) es un modelo estático que representa un único estado operativo. Por lo tanto, los resultados que se pueden obtener son el máximo EPR, así como la posible ubicación de los dispositivos ER.

La aplicación del método de cálculo EPR para la red Balerna muestra que es necesario instalar 20 dispositivos de ER para obtener el EPR máximo (misma cantidad que para CIP aplicando la metodología de Cubides-Castro *et al.* (2021)). Dado que se trata de una simulación estática, se obtiene un único valor de cada ER correspondiente a la potencia que se puede recuperar en el instante de cálculo modelado. En la Tabla 4 se muestra los resultados de ER para cada uno de los dispositivos instalados. Las dos primeras columnas indican el orden y el ID de los dispositivos ER. Las siguientes dos columnas representan la potencia que cada dispositivo puede recuperar (en energía y como porcentaje del total recuperable). Finalmente, las dos últimas columnas representan el porcentaje de potencia recuperada con respecto al total y el porcentaje acumulado de energía recuperada.

Tabla 4 | Resultados de ER de los dispositivos instalados – Red Balerna (modificada) con CDP.

No. Orden	ID ER	ER (kW)	% ER	% Acum. ER
1	ER-Válvula V166	23.75	48.96%	48.96%
2	ER-Válvula V51	14.48	29.84%	78.80%
3	ER-Válvula V576	3.04	6.27%	85.07%
4	ER-Válvula V607	1.99	4.10%	89.18%
5	ER-Válvula V545	1.72	3.55%	92.72%
6	ER-Válvula V567	0.55	1.14%	93.86%
7	ER-Válvula V571	0.47	0.98%	94.84%
8	ER-Válvula V554	0.39	0.81%	95.65%
9	ER-Válvula V616	0.33	0.68%	96.32%
10	ER-Válvula V601	0.30	0.62%	96.94%
11	ER-Válvula V546	0.29	0.60%	97.54%
12	ER-Válvula V548	0.23	0.47%	98.01%
13	ER-Válvula V620	0.23	0.46%	98.47%
14	ER-Válvula V589	0.20	0.40%	98.88%
15	ER-Válvula V590	0.15	0.32%	99.19%
16	ER-Válvula V547	0.15	0.31%	99.50%
17	ER-Válvula V435	0.12	0.25%	99.76%
18	ER-Válvula V555	0.08	0.17%	99.93%
19	ER-Válvula V615	0.02	0.05%	99.97%
20	ER-Válvula V568	0.01	0.03%	100.00%
		48.51	100%	

En el análisis de los SDA con CDP, se debe considerar la variabilidad del caudal en cada uno de los enlaces de la red una vez configurado un dispositivo de recuperación. Dicha condición permite tener valores mucho más reales de ER que se acercan a la operación real en estos sistemas. En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 5 | Resultados de variación del caudal en las líneas (instalación de ER) – Red Balerma (modificada) con CDP.

No. Orden	ID ER	Caudal inicial LPS	Caudal final LPS	% Reducción del caudal
1	ER-Válvula V51	124.78	112.22	10.07%
2	ER-Válvula V607	24.87	22.96	7.68%
3	ER-Válvula V615	4.97	4.50	9.46%
4	ER-Válvula V545	14.98	13.44	10.28%
5	ER-Válvula V546	9.99	8.93	10.61%
6	ER-Válvula V547	7.49	6.68	10.81%
7	ER-Válvula V555	2.50	2.25	10.00%
8	ER-Válvula V548	4.99	4.44	11.02%
9	ER-Válvula V616	2.49	2.22	10.84%
10	ER-Válvula V554	2.50	2.24	10.40%
11	ER-Válvula V166	64.97	56.91	12.41%
12	ER-Válvula V576	34.98	30.48	12.86%
13	ER-Válvula V435	2.50	2.15	14.00%
14	ER-Válvula V590	2.50	2.15	14.00%
15	ER-Válvula V589	2.50	2.15	14.00%
16	ER-Válvula V620	2.50	2.16	13.60%
17	ER-Válvula V567	5.00	4.28	14.40%
18	ER-Válvula V568	2.50	2.14	14.40%
19	ER-Válvula V601	2.50	2.15	14.00%
20	ER-Válvula V571	2.50	2.14	14.40%
		322.01	286.59	

DISCUSIÓN

La aplicación de la metodología descrita permite obtener todos los términos del balance energético para la red estudiada. En concreto, no solo se consigue el EPR, sino también la localización de todos los lugares donde la instalación de dispositivos de ER llevaría al máximo de ER. Los resultados finales después de obtener el EPR máximo en las redes se muestran en la Tabla 6. En este caso, se ha realizado un balance energético similar al ejemplo de la Tabla 2 para la red.

En el caso de estudio (Tabla 6) la EPR total (EPR+ER) una vez instalados los dispositivos de recuperación de energía es del 44.6% (55 kW) de la energía suministrada ($E_{con}=E_{sup}=123.30$ kW). Al instalar los dispositivos ER, la energía suministrada se reduce en un 8.9% (11.03 kW), ya que las presiones son menores. En este caso, la EPR de los usuarios es del 5.3% (6.49 kW) del total y la ER en la red es del 39.4% (48.51 kW).

Aplicando la metodología de Cubides-Castro *et al.* (2021) la red analizada como con CIP, la EPR total (EPR+ER) una vez instalados los dispositivos de recuperación de energía es del 46.8% (51.45 kW) de la energía suministrada ($E_{con}=E_{sup}=109.87$ kW). Al instalar los dispositivos ER, la energía suministrada se reduce en un 7.3% (7.99 kW), ya que las presiones son menores. En este caso, la EPR de los usuarios es del 5.0% (5.48 kW) del total y la ER en la red es del 41.8% (45.96 kW).

Comparando los resultados obtenidos para CDP y CIP, se tiene que la energía que es consumida o suministrada en una red con CDP es mayor que la que no consideran variaciones en caudal y presión (CIP), así mismo, el porcentaje de la energía que es recuperable en la red disminuye pues para una condición de simulación más acorde al funcionamiento de un SDA, el cual, la variación del caudal y la presión permite tener realmente una ER más baja.

Tabla 6 | Balance energético caso de estudio – Red Balerma (modificada) con CDP.

			Sin dispositivos instalados				Con dispositivos instalados			
Esum:	Ee:	Ee,e:	137.10	137.10	137.10	137.10	123.30	123.30	123.30	123.30
		Ee,d:	0.00				0.00			
	Eb:		0.00	0.00			0.00	0.00		
Econ:	Ens	Ed,r	Ed,f	14.94	14.94	137.10	11.03	11.03	11.03	123.30
			Ed,b	0.00			0.00			
			Ed,v	0.00			0.00			
		Ed,a	Ed,f	0.00	0.00		0.00	0.00		
			Ed,t	0.00						
			Emin				Eu,t			
	Eu,n	24.50	22.01							
	Eu	EPR	EPRu	0.00	59.23		0.00	6.51		
			EPRr	59.23			6.51			
			EPRv	0.00			0.00			
			ER				0.00		0.00	

Una de las aportaciones más relevantes de este trabajo es el análisis de redes de distribución con CDP, considerando la variabilidad del caudal en cada uno de los enlaces de la red una vez configurado un dispositivo de recuperación. A medida que se instala un elemento de recuperación de energía, se valida que el nudo crítico tenga la presión mínima requerida, pasando únicamente al siguiente elemento de la línea a instalar una vez que se tiene la certeza de que la presión mínima se cumple en su totalidad, a medida que se instala un nuevo dispositivo, se genera una variación de caudales en la red, y por tanto, una distribución de presiones diferente, afectando no sólo al último dispositivo instalado, sino posiblemente al primero de todos. Por tanto, es necesario analizar cada uno de los dispositivos de recuperación de energía que se han instalado previamente en cada una de las iteraciones realizadas.

Comparando los índices de resiliencia, los resultados son considerablemente significativos. En caso de ejemplo (Tabla 2), el índice de resiliencia de Todini muestra un exceso de energía sobre el mínimo requerido del 22.4%, cuando la energía que realmente se puede recuperar teniendo en cuenta la topología de la red es del 5.7%. Por el contrario, en el caso de estudio (Tabla 6), el exceso de energía de Todini es del 43.2% cuando la energía que realmente se puede recuperar es del 39.4%.

En resumen, la metodología presentada por Cubides-Castro *et al.* (2021) permite definir mejor el exceso de energía de una red y puede considerarse como un índice de resiliencia que tiene en cuenta la topología y la conectividad de la red, permitiendo obtener valores mucho más reales de la cantidad de EPR en los SDA que permitirá definir con mucha más exactitud la capacidad de recuperación de energía en el análisis de SDA para CIP; sin embargo, dicha metodología no contempla la variación de caudal y presión en redes con CDP, las cuales pueden variar al instalarse un dispositivo de ER, obligando a que el algoritmo diseñado requiera la interacción de validación de la presión de servicio desde la primera hasta el último dispositivo de recuperación instalado. Esta nueva metodología propuesta en este trabajo busca poder analizar estas redes con CDP con el fin de obtener la energía que es realmente recuperable en los SDA a partir de un escenario en que se asemeje al funcionamiento real de estos sistemas.

CONCLUSIONES

Un primer análisis de los resultados demuestra que la EPR disminuye con el nivel de complejidad de la red. A menos que la red tenga una topografía abrupta o niveles de presión muy variados, la capacidad de ER de la red disminuye progresivamente con el aumento de la complejidad del SDA.

El indicador de la EPR puede utilizarse no sólo como indicador de la eficiencia de las ER, sino también como indicador de la resiliencia de la red. El índice Todini *et al.* (2016) representa el exceso de energía suministrada en los nodos respecto a la

energía mínima requerida. Este es definido inicialmente como un indicador de resiliencia y representa al mismo tiempo un balance energético simplificado de la red. La única restricción de este índice como indicador energético es que no tiene en cuenta la topología de la red, por lo que los valores de la EPR pueden ser un mejor valor como índice de resiliencia de SDA.

El análisis energético de un SDA es importante. Esta importancia queda demostrada por los distintos balances energéticos que se pueden encontrarse en la literatura científica. De acuerdo con Cubides-Castro *et al.* (2021) esta falta de conocimiento de la EPR en los SDA influye en que las soluciones que pueden darse en el ámbito de la ER se tomen sin tener en cuenta una evaluación global del problema. Las definiciones de la EPR máxima son relevantes como medida de cualquier estrategia de ER en los SDA, permitiendo reducir el consumo de energía y definiendo una metodología para la ubicación de los dispositivos de ER en SDA. En este trabajo se particulariza entre la metodología desarrollada por Cubides-Castro *et al.* (2021) para SDA con CIP y se realiza un complemento para SDA con CDP.

A partir del balance energético propuesto por Cubides-Castro *et al.* (2021) se determina el valor de la EPR; la cual, proviene de la sustitución de las válvulas de control existentes por microturbinas o PAT, la EPR que proviene de la instalación de nuevos dispositivos de ER en la red y la EPR que sólo pueden recuperar los usuarios de la red en sus instalaciones privadas. Una vez definido el balance energético de un SDA, el análisis hidráulico de la red permite calcular tanto la EPR_n como la EPR_v para SDA con CDP.

La determinación de la EPR_n propuesto en este trabajo requiere como base una metodología como la descrita por Cubides-Castro *et al.* (2021) pero con una particularidad, y es que se sigue tratando de un método iterativo, pero en donde ocurre que los caudales en las líneas varían antes y después de la ER debido a la variabilidad de las presiones en la red al instalarse algún dispositivo de ER. En definitiva, se trata de un algoritmo que complementa el algoritmo planteado en la metodología trabajada por Cubides-Castro *et al.* y que conduce finalmente a la evaluación de la energía máxima recuperable en la red mediante la instalación de los dispositivos ER adecuados (EPR_n) para SDA con CDP.

La obtención de los valores EPR_n y EPR_v ha permitido definir un índice energético. El (EPR), el cual, está más orientado a la ER. Es un indicador del porcentaje de energía sobrante que se puede recuperar. Este indicador (EPR) no evalúa la totalidad de la ER, sino la capacidad de la red con CDP para recuperar energía. Esta limitación de la valoración del exceso de energía del EPR es lo que ha hecho que el EPR complemente al RI de Todini. El RI, además de un indicador de resiliencia, es un indicador del exceso de energía en la red.

Como puede observarse en los resultados de las redes analizadas, el método conduce a la definición de numerosos puntos en los que podría instalarse un dispositivo de ER; sin embargo, esto no significa que todos ellos sean energética o económicamente viables. El método permite obtener la ER máxima, la localización de todos los posibles puntos ER y el valor de la energía a recuperar en cada uno de ellos. Algunos de ellos pueden tener una ER muy baja. Además, es posible que al no instalarse algunos dispositivos ER con poca capacidad de recuperación se permita que otros dispositivos tengan mayor capacidad de ER. Esta es una de las limitaciones de la metodología actual. El método no realiza una optimización global, ni discrimina los puntos en donde se realiza la instalación de recuperadores, lo cual, podría analizarse dentro del algoritmo, permitiendo en un primer análisis determinar la totalidad de recuperadores instalados y luego únicamente instalar aquellos que permitan una eficiencia de recuperación adecuada. Así mismo, podría analizarse un control de fugas asociadas al cambio de presión dentro de la regulación realizada por cada dispositivo instalado, lo cual podría analizarse específicamente en el futuro.

La metodología desarrollada por Cubides-Castro *et al.* (2021) permite determinar la máxima EPR y la localización de dispositivos de control de presiones o puntos de recuperación de energía, destacándose el tiempo de simulación pues las redes analizadas son con CIP, es decir, la presión y el caudal en los nodos y las líneas respectivamente no varían. La aplicación de la metodología propuesta en este trabajo tiene como particularidad analizar SDA con CDP, es decir, en donde la presión y el caudal respectivamente en los nodos y las líneas varían, situación que en condiciones reales de operación ocurre en un SDA, permitiendo determinar una máxima EPR y la localización de dispositivos de control de presiones o puntos de recuperación de energía, este proceso al tratarse de CDP es de manera iterativa y por lo tanto aumenta el tiempo de simulación dado que la modificación de la consigna de algún dispositivo puede afectar los ya instalados. Estos dos métodos podrían ser comparables si el sistema analizado con CDP no considere fugas en la red, lo cual, sería una condición ideal y lo convertiría en una red con CIP.

Por último, cabe destacar la limitación derivada de considerar la invariabilidad de los flujos antes y después del ER que se plantea en el trabajo Cubides-Castro *et al.* (2021) es superada en este trabajo, permitiendo analizar la red en los instantes en que el caudal cambia debido a la ER por cada dispositivo instalado. Ahora bien, como desarrollo futuro, se podría explorar otras soluciones de recuperación de energía que pudieran recuperar menos energía, pero concentrándola en dispositivos ER más pequeños instalados en un SDA

REFERENCIAS

- Abd Rahman, N., Muhammad, N.S., Wan Mohtar, W.H.M. 2018. Evolution of research on water leakage control strategies: where are we now? *Urban Water Journal*, 15(8), 812-826. Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1547773>
- Cabrera, E., Asce, M., Gómez, E., Soriano, J., Del Teso, R. 2018. Eco-Layouts in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001024](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001024)
- Carravetta, A., Fecarotta, O., Sinagra, M., Tucciarelli, T. 2014. Cost-Benefit Analysis for Hydropower Production in Water Distribution Networks by a Pump as Turbine. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000384](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000384)
- Covelli, C., Cozzolino, L., Cimorelli, L., Della Morte, R., Pianese, D. 2016. *Optimal Location and Setting of PRVs in WDS for Leakage Minimization*. *Water Resources Management*, 30(5), 1803-1817. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1252-7>
- Creaco, E., Giudicianni, C., Tosco, A. 2023. Service Pressure and Energy Consumption Mitigation-Oriented Partitioning of Closed Water Distribution Networks. *Water (Switzerland)*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/w15183218>
- 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). <https://doi.org/10.3390/w13040464>
- Del Teso, R., Gómez, E., Estruch-Juan, E., Cabrera, E. 2019. Topographic Energy Management in Water Distribution Systems. *Water Resources Management*, 33(12), 4385-4400. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02375-9>
- Fernández-García, I., Ferras, D., Mc Nabola, A. 2019. Potential of Energy Recovery and Water Saving Using Micro-Hydropower in Rural Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001045](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001045)
- Ferrarese, G., Malavasi, S. 2020. Perspectives of water distribution networks with the greenvalve system. *Water (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/W12061579>
- Hashemi, S., Fillion, Y., Speight, V. 2018. Identification of factors that influence energy performance in water distribution system mains. *Water (Switzerland)*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/w10040428>
- Jain, P., Khare, R. 2023. *Optimum location for energy recovery and leakage reduction in water distribution networks*. *Journal of Water and Climate Change*, 14(3), 962-976. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.497>
- Lambert, A., Fantozzi, M., Thornton, J. 2021. Practical approaches to modeling leakage and pressure management in distribution systems-progress since 2005. www.leakssuitelibrary.com
- Matuszewska-Pierzynka, A. 2021. Relationship between corporate sustainability performance and corporate financial performance: evidence from U.S. companies JEL Classification: D24; F23; M14. *Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy*, 16. <https://doi.org/10.24136/eq.2021.033>
- Parra, S., Krause, S. 2017. Pressure management by combining pressure reducing valves and pumps as turbines for water loss reduction and energy recovery. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 12(1), 89-97. <https://doi.org/10.2495/SDP-V12-N1-89-97>

- Patelis, M., Kanakoudis, V., Gonelas, K. 2017. Combining pressure management and energy recovery benefits in a water distribution system installing PATs. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 66(7), 520-527. <https://doi.org/10.2166/aqua.2017.018>
- Pérez-Sánchez, M., Sánchez-Romero, F.J., Ramos, H.M., López-Jiménez, P.A. 2017. Energy recovery in existing water networks: Towards greater sustainability. *Water (Switzerland)*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/w9020097>
- Price, E., Abhijith, G.R., Ostfeld, A. 2022. Pressure management in water distribution systems through PRVs optimal placement and settings. *Water Research*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119236>
- Ramos, H.M., Dadfar, A., Besharat, M., Adeyeye, K. 2020. Inline pumped storage hydropower towards smart and flexible energy recovery in water networks. *Water (Switzerland)*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/w12082224>
- Reca, J., Martínez, J. 2006. Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks. *Water Resources Research*, 42(5). <https://doi.org/10.1029/2005WR004383>
- Rosado, L.E.C., López-Jiménez, P.A., Sánchez-Romero, F.J., Fuertes, P.C., Pérez-Sánchez, M. 2020. *Applied strategy to characterize the energy improvement using PATs in a water supply system. Water (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/w12061818>
- Sammartano, V., Filianoti, P., Sinagra, M., Tucciarelli, T., Scelba, G., Morreale, G. 2017. Coupled Hydraulic and Electronic Regulation of Cross-Flow Turbines in Hydraulic Plants. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001226](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001226)
- Samora, I., Manso, P., Franca, M.J., Schleiss, A.J., Ramos, H.M. 2016. Energy recovery using micro-hydropower technology in water supply systems: The case study of the city of Fribourg. *Water (Switzerland)*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/w8080344>
- Sharif, M.N., Haider, H., Farahat, A., Hewage, K., Sadiq, R. 2019. *Water-energy nexus for water distribution systems: A literature review. Environmental Reviews*, 27(4), 519-544. <https://doi.org/10.1139/er-2018-0106>
- Sinagra, M., Sammartano, V., Morreale, G., Tucciarelli, T. 2017. A new device for pressure control and energy recovery in water distribution networks. *Water (Switzerland)*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/w9050309>
- Todini, E., Creaco, E., Franchini, M. 2016. Generalized Resilience and Failure Indices for Use with Pressure-Driven Modeling and Leakage. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000656](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000656)
- Viana, I.L.B., Batista, J.C.M., Sá, J.H.M., Ramalho, R.V.C., Lopes, R.M., Souza, D.E.S., Mesquita, A.L.A. 2023. Pressure regulation and energy recovery in water distribution networks using pumps as turbines. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 58(1), 103-113. <https://doi.org/10.5327/z2176-94781551>
- Wakeel, M., Chen, B. 2016. Energy Consumption in Urban Water Cycle. *Energy Procedia*, 104, 123-128. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.022>