

Eficiencia energética en redes de agua a presión en su fase de diseño

del Teso, R.^{a1}, Gómez, E.^{a2}, Cabrera, E.^{a3}, Estruch, E.^{a4}

^aGrupo de Ingeniería y Tecnología del Agua (ITA), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n - Edificio 5C, 46022 Valencia.
E-mail: ^{a1}rodete@ita.upv.es, ^{a2}elgosel@ita.upv.es, ^{a3}ecabrera@ita.upv.es, ^{a4}maesjua1@ita.upv.es

Línea temática B | Hidrología, usos y gestión del agua. Riegos. Energía hidroeléctrica.

RESUMEN

El presente trabajo muestra la importancia de un correcto diseño de las redes de agua a presión, en el que además de cumplir con unas determinadas condiciones de servicio, se tenga en cuenta la energía consumida por la red. Para ello se realiza con EPANET el modelo matemático de la red propuesta en 1989 por Gemanopoulos y Jowitt, base de multitud de estudios. El objetivo es reducir al máximo las ineficiencias energéticas de este sistema desde la fase de diseño, para ello se realizará su auditoría energética con la intención de conocer de qué forma se distribuye la energía total aportada y consumida por el sistema. A lo largo del trabajo se proponen diferentes modificaciones en la red, desde el cambio en el suministro hasta el rediseño del sistema, lo que permite finalmente reducir la energía consumida en más de un 15 %, minimizando la energía de exceso y topográfica.

Palabras clave | eficiencia energética; diseño de redes; energía topográfica; pérdidas; auditoría energética.

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente tanto el diseño como la gestión de las redes de agua a presión se han basado en cumplir una serie de estándares de servicio con el mínimo coste de inversión posible. En la actualidad, la eficiencia energética en cualquier sector está a la orden del día, teniendo incluso que cumplir unos determinados ratios exigidos por normativa. Por lo tanto, parece lógico tener en cuenta también la eficiencia energética en las redes de agua a presión. Más aún cuando el agua y la energía forman un binomio fundamental en el desarrollo económico y social de cualquier comunidad. Estando acoplados, es necesario tratarlos de manera conjunta si se desea mejorar la eficiencia de los sistemas de distribución de agua a presión.

En esta línea, el objetivo del presente trabajo es mostrar la importancia de un correcto diseño de las redes de agua a presión, en el que además de cumplir con unas condiciones de servicio establecidas, se tenga en cuenta la energía consumida por la red una vez ésta se ponga en servicio, tratando de minimizarla en la medida de lo posible. Para ello se tratará de reducir al máximo las ineficiencias energéticas del sistema, principalmente la energía de exceso y la energía topográfica, desde la fase de diseño para que en la fase de funcionamiento, la red sea eficiente.

La energía de exceso debe ser eliminada, ya que ni se necesita ni viene impuesta por causas inevitables, sino que es una sobrepresión en todos los nudos de la red, que propiciará un mayor nivel de fugas y al tiempo mayor energía disipada por fricción. En cambio, el valor de la energía topográfica viene condicionado por el perfil del terreno, por lo que es más complicado disminuir su valor. Aun así se deben explorar diferentes alternativas que permitan evitar, recuperar o en última instancia disipar esta energía.

La primera estrategia a explorar es evitarla y para ello se debe concebir un trazado que permita minimizar esta componente de la energía consumida. Si no fuera posible evitarla, desde la misma fase de diseño se deberá estudiar la posibilidad de recuperarla o de reducirla, con la instalación de bombas trabajando como turbinas (PATs) o válvulas reductoras de presión (VRPs), respectivamente. Estas dos últimas acciones están bien documentadas en la literatura (Guigni et al., 2013; Corcoran et al., 2015; Fontana et al., 2016). Este trabajo se centra en la primera de las acciones, la racionalización del diseño, fase crucial, pues como se ha dicho, la mayoría de los sistemas han sido diseñados de espaldas a los problemas energéticos. Para

ello, se recurre a estudiar una red de referencia como es la red propuesta en 1989 por Gemanopoulos y Jowitt (Germanopoulos y Jowitt, 1989), red extensamente difundida y utilizada en diferentes estudios desde su publicación en 1990 por Jowitt y Xu (Jowitt y Xu, 1990).

En este caso se reproduce el modelo matemático de la red con EPANET para realizar su auditoría energética (Cabrera et al, 2010) y posteriormente compararla con los resultados obtenidos por el análisis realizado por otros investigadores tras la instalación de VRPs (Nicolini y Zovatto, 2009). Una vez analizados estos dos casos de estudio, se exploran diferentes escenarios para las mejora energéticas de la red, planteando alternativas tanto en la fuente de suministro como en el diseño del sistema, estas últimas basadas en la minimización de la energía topográfica. Su análisis demuestra cómo además de mejorar la eficiencia energética de la red, se consiguen los mismos objetivos para los que se concibió, reducir las fugas, ya que los estudios realizados en esta red de referencia se centraron en disminuir las fugas del sistema mediante la incorporación de VRPs, analizando a través de algoritmos de optimización tanto el lugar óptimo de instalación como la apertura necesaria a lo largo del día para disminuir al máximo las fugas a través de la reducción de presión en el sistema.

El análisis energético de la instalación como estrategia de mejora de la eficiencia energética, con la consiguiente reducción de fugas, no ha sido llevado a cabo en ninguna de las publicaciones previas.

ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL SISTEMA

En lo que sigue se recuerdan un conjunto de conceptos necesarios para comprender los desarrollos realizados. La notación utilizada coincide con la establecida previamente (Cabrera et al., 2010 y Cabrera et al., 2015). En efecto, contabilizar y poner cifras a la energía que interviene en una red es posible con una auditoría energética, que permita conocer de qué forma se distribuye la energía total aportada y consumida, a partir de los resultados derivados del modelo matemático del sistema. La energía aportada podrá ser natural ($E_{sr,n}$) si el abastecimiento se realiza por gravedad desde embalses o depósitos, o de eje ($E_{sr,p}$) si el suministro requiere un bombeo. Esta energía aportada deberá ser igual a la consumida, que se dividirá en cinco términos:

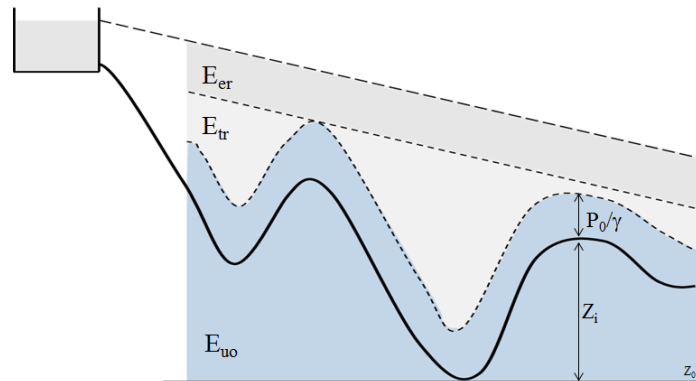
- Energía entregada a los usuarios (E_u): es la energía que se entrega en los nudos de consumo del modelo, consecuencia del caudal que demandan los usuarios a la presión a la que se suministra.
- Energía disipada por fricción (E_{rf}): es la energía que se disipa por el rozamiento del agua con las tuberías del sistema.
- Energía disipada en válvulas (E_{rv}): ésta se debe a las pérdidas de carga que se da en las diferentes válvulas del abastecimiento.
- Energía perdida a través de fugas (E_{rl}): representa la energía embebida en las fugas, lo que exige que el modelo las incluya. De esta manera los modelos matemáticos que no tengan cargadas las fugas del sistema, obtendrán una energía perdida por fugas igual a cero, que no representará la realidad del abastecimiento.
- Otras pérdidas de energía (E_{ro}): cualquier pérdida energética que no esté contemplada en el resto de términos.

Lógicamente, interesa que la energía consumida se aproxime a la energía entregada a los usuarios. De este modo el resto de energías consumidas, las cuales se consideran pérdidas, serán menores. Pero además es importante analizar cómo se entrega esta energía útil, pues debe ser la mínima requerida, evitando en la medida de lo posible suministrar más presión de la que fijan los estándares de calidad (Cabrera et al., 2015). Esta energía entregada a los usuarios tiene tres componentes:

$$E_u = E_{uo} + E_{tr} + E_{er} \quad (1)$$

- Energía mínima requerida (E_{uo}): aquella que debe suministrarse a los usuarios para cumplir con la presión de referencia (P_0/γ) y el volumen de agua demandado. Corresponde al área azul de la Figura 1.
- Energía topográfica (E_{tr}): término energético que el sistema demanda debido a las irregularidades del terreno. Representa la energía que se debe aportar para alcanzar, prestando el servicio adecuado, la cota del nudo crítico, afectando al resto de nudos de consumo de menor cota, ya que para que el nudo más alto tenga presión el resto de nudos del sistema tendrán

c) Energía de exceso (E_{er}): es el exceso sobre la energía mínima requerida en el nudo crítico y por tanto en el resto de nudos. Tal exceso de energía es superflua porque se supera la mínima necesaria para garantizar en el nudo crítico la presión mínima, y por tanto debe ser eliminada. Se corresponde con el área gris oscuro de la Figura 1.



El valor de estas energías permitirá evaluar la eficiencia del sistema. Organizadas en una serie de indicadores hídricos y energéticos ayudarán a entender el estado de la red. Como indicadores hídricos se utilizan el rendimiento volumétrico y las fugas por unidad de longitud:

- Rendimiento volumétrico (η_v): indicador hídrico que permite evaluar las fugas del sistema relacionando el volumen de agua suministrado con el volumen de agua inyectado. Su valor corresponde con el porcentaje de volumen de agua consumido. Conviene recordar que este indicador no es adecuado para establecer comparaciones entre sistemas. Pero utilizarlo para caracterizar la evolución de un mismo sistema, por representativo, sí tiene interés.
- Fugas por unidad de longitud: se calcula a partir del total del volumen fugado, de la longitud de tuberías de la red y del tiempo de simulación del modelo, según la expresión (2).

Como indicadores energéticos se utiliza el rendimiento ideal y el rendimiento real del sistema, comparando uno con otro se puede estimar cuan cerca estamos de la mejor versión energética de la red:

- $$\eta_{ai} = \frac{E_{uo}}{E_{si}} \quad (3)$$

- $$\eta_{ar} = \frac{E_{uo}}{E_{sr}} \quad (4)$$

V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

estructurales, vendrá regida por los datos extraídos de la auditoría energética. Por ejemplo, no parece lógico centrar esfuerzos en reducir las pérdidas si el componente de la energía perdida en fugas es minoritario. Se deberá evitar cualquier tipo de exceso de energía, en el caso de suministro con energía natural tratando de reducir la altura de depósitos y embalses hasta la mínima que permita abastecer en las condiciones de servicio al nudo más desfavorable. Si la energía es de eje, deberá ajustarse el punto de funcionamiento de las bombas a aquel que permita dotar al nudo más desfavorable del caudal demandado bajo las condiciones de presión establecidas. Para ello se hace uso de bombas de velocidad variable (BVV) que permitan adaptar en todo momento el punto de trabajo de la bomba al requerido por el nudo más desfavorable, operando de esta manera el sistema en su punto óptimo.

Por otro lado se deberán seleccionar aquellas medidas que permitan reducir al mínimo cualquier tipo de pérdida, ya sea utilizando bombas más eficiente, reduciendo las pérdidas por fricción con el cambio de tuberías, o tratando de reducir las fugas mediante una correcta gestión de la presión con la instalación de VRPs, o con el cambio de tuberías; incluso con la mejora del diseño del suministro. El objetivo es claro, tratar de disminuir al máximo cualquier tipo de pérdidas existente en el sistema.

CASO DE ESTUDIO

Como se ha dicho anteriormente, se plantea analizar y mejorar la eficiencia de la red propuesta en 1989 por Gemanopoulos y Jowitt, representada en la Figura 2 y analizada por diferentes autores (Vairavamorthy y Lumbers, 1998; Araujo et al., 2006; Campisano et al., 2009; Fecarotta et al., 2015). Para ello, en primer lugar se crea su modelo matemático con EPANET (Rossman, 2000) y a continuación se realiza la auditoría energética, comparándola posteriormente con la auditoría que se obtiene tras la instalación de VRPs tal cual se propone en un trabajo previo (Nicolini y Zovatto, 2009).

Características de la red

La red está compuesta por 25 nudos y 37 tuberías. De los 25 nudos, tres de ellos son embalses y están encargados del suministro del sistema, 13 tienen demandas base con una demanda total de 150 l/s, mientras que los otros 9 no tienen demanda base asignada. Las propiedades de los nudos y las tuberías, Tabla 1, se han extraído del artículo original (Jowitt y Xu, 1990). En la red inicial, el nivel de los embalses varía 1.5 m a lo largo del día, siguiendo un esquema habitual de llenado durante periodos nocturnos, cuando el bombeo es más barato. En este análisis se mantiene el nivel de cada depósito constante, en línea con análisis posteriores (Nicolini y Zovatto, 2009), siendo sus valores 54.66 m, 54.60 m y 54.5 m (nudos 23, 24 y 25 respectivamente).

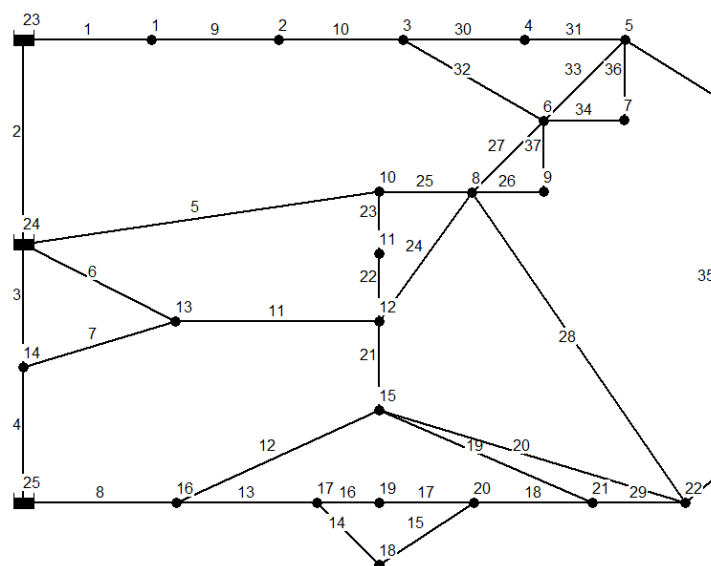


Figura 2 | Esquema de la red.

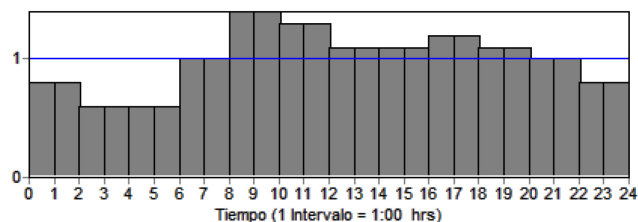
Tabla 1 | Características de nudos y tuberías

Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Coefficiente C_{HW}	Nudo	Cota (m)	Demanda base (l/s)	Coefficiente emisor (K)
Tubería 1	606	457	110	Conexión 1	18	5	0.0127
Tubería 2	454	457	110	Conexión 2	18	10	0.0354
Tubería 3	2782	229	105	Conexión 3	14	0	0.0338
Tubería 4	304	381	135	Conexión 4	12	5	0.0059
Tubería 9	1930	457	110	Conexión 5	14	30	0.0193
Tubería 10	5150	305	10	Conexión 6	15	10	0.0202
Tubería 30	326	152	100	Conexión 7	14.5	0	0.0056
Tubería 31	844	229	100	Conexión 8	14	20	0.0189
Tubería 32	1274	152	100	Conexión 9	14	0	0.0037
Tubería 34	615	381	110	Conexión 10	15	5	0.0209
Tubería 33	1115	229	90	Conexión 11	12	10	0.0066
Tubería 36	500	381	110	Conexión 12	15	0	0.0257
Tubería 27	743	381	110	Conexión 13	23	0	0.0177
Tubería 26	443	229	90	Conexión 14	20	5	0.0205
Tubería 37	300	229	90	Conexión 15	8	20	0.0304
Tubería 23	542	229	90	Conexión 16	10	0	0.0142
Tubería 22	777	229	90	Conexión 17	7	0	0.0115
Tubería 25	249	305	105	Conexión 18	8	5	0.0056
Tubería 5	3383	305	100	Conexión 19	10	5	0.0097
Tubería 6	1767	475	110	Conexión 20	7	0	0.0114
Tubería 7	1014	381	135	Conexión 21	10	0	0.0212
Tubería 12	914	229	125	Conexión 22	15	20	0.0368
Tubería 8	1097	381	6				
Tubería 14	411	152	100				
Tubería 13	822	305	140				
Tubería 16	1072	229	135				
Tubería 17	864	152	90				
Tubería 19	832	152	90				
Tubería 20	2334	152	100				
Tubería 28	931	229	125				
Tubería 18	711	152	90				
Tubería 35	1408	152	100				
Tubería 24	1600	457	110				
Tubería 15	701	229	110				
Tubería 29	2689	152	100				
Tubería 21	1996	229	95				
Tubería 11	762	457	110				

La demanda base de cada nudo se ve afectada por unos coeficientes encargados de representar el patrón de consumo diario. Estos coeficientes (Tabla 2), corresponden al artículo original (Jowitt y Xu, 1990), y se aprecia cómo en las horas centrales del día la demanda es máxima, mientras que en horario nocturno la demanda es mínima. Esto afectará a la evolución de presiones en la red, y por lo tanto a las fugas, aspecto clave de la eficiencia de estos sistemas.

Tabla 2 | Coeficientes y gráfica del patrón de consumo

Hora	Coeficiente	Hora	Coeficiente
1:00	0.8	13:00	1.1
2:00	0.8	14:00	1.1
3:00	0.6	15:00	1.1
4:00	0.6	16:00	1.1
5:00	0.6	17:00	1.2
6:00	0.6	18:00	1.2
7:00	1	19:00	1.1
8:00	1	20:00	1.1
9:00	1.4	21:00	1
10:00	1.4	22:00	1
11:00	1.3	23:00	0.8
12:00	1.3	24:00	0.8



El caudal fugado a través de cada nudo se representa en el modelo matemático realizado con EPANET mediante emisores que permiten descargar por cada nudo un determinado caudal en función de la presión. Se modelan siguiendo la expresión (5):

$$Q_f = K (P)^\gamma \quad (5)$$

siendo γ el exponente del emisor que en el caso de estudio tiene un valor constante igual a 1,18. De otra parte, el coeficiente K del emisor se ha calculado a partir de la expresión (6):

$$K = C_L 0,5 \sum L_{ij} \quad (6)$$

donde C_L toma un valor de 10^{-5} . La longitud de tubería aplicada a cada emisor es la mitad del total de longitudes que llegan a cada nudo, cuanto más longitud de tubería confluye en un nudo, más posibilidad tiene de fugar. De este modo los coeficientes del emisor K para cada nudo del sistema son los que aparecen en la Tabla 1.

Análisis energético de la red

Una vez elaborado el modelo matemático de la red de estudio, se realiza su auditoría hídrica y energética siguiendo la metodología previamente desarrollada (Cabrera et al, 2010), con la intención de obtener de qué manera se distribuye el agua y la energía a lo largo del sistema. La auditoría hídrica permitirá tener un conocimiento del porcentaje de fugas existen en la red, y por ende del rendimiento volumétrico de la misma, el cual está próximo al 85 %.

Pese al notable rendimiento de la red desde el punto de vista de las fugas, los trabajos previos ya referidos se han centrado en reducir el volumen fugado gestionando la presión en la red con VRPs. Sin embargo nadie ha planteado el análisis energético como medida para tratar de buscar una alternativa más eficiente energéticamente y que cumpla con el objetivo de la reducción de fugas. En la Tabla 3 pueden verse los resultados de la auditoría realizada en la red inicial de estudio.

Tabla 3 | Resultados de la auditoría realizada en la red inicial

Auditoría hídrica	m³/día	%
Volumen inyectado total	15320	100
Volumen consumido	12960	84.59
Volumen fugado	2360	15.41
Auditoría energética	kWh	%
Energía entregada a los usuarios	1529	77.01
Energía mínima requerida	1289	84.28
Energía de exceso	7.3	0.48
Energía topográfica entregada	233	15.24
Energía topográfica disipada en válvulas	0	0.00
Energía disipada por fricción	175	8.81
Energía perdida a través de las fugas	282	14.19
Energía total consumida	1986	

Una vez realizada la auditoría energética, se comprueba que el 77 % de la energía consumida es energía entregada a los usuarios, representando la energía mínima requerida el 84 %, mientras que la topográfica supone un 15 %, no existiendo apenas energía de exceso. En cuanto a las pérdidas energéticas del sistema, corresponde principalmente a la embebida en fugas y en menor medida a la fricción de tuberías. Realizando un análisis de las características de la red, se encuentra la explicación a estos datos energéticos. Las cotas del sistema oscilan entre 7 y 23 m, encontrándose la cota más alta en el nudo 13, justo a la salida del depósito 24. Para poder ofrecer la presión de servicio en este nudo, es necesario dotar a los depósitos de suficiente altura, implicando que el resto de nudos sufran una serie de sobrepresiones, ya que están a menor cota. He aquí la explicación a la energía topográfica que se debe entregar a los usuarios.

En cuanto a la energía disipada por fricción, se observa que el coeficiente de Hazen Williams (C_{HW}) de algunas tuberías es extremadamente bajo. En efecto, en las tuberías 10 y 8, el C_{HW} es de 10 y 6 respectivamente, cuando valores típicos para tuberías de polietileno rondan los 140 (Jeppson, 1976). Localizando estas tuberías, se observa como la tubería 8 se encuentra a la salida del depósito 25, condicionando el abastecimiento de la zona inferior de la red. Mientras que la tubería 10 está aguas abajo del depósito 23, ocurriendo una situación similar a la del tubo 8, pero ahora condicionando el suministro de la parte superior.

Este análisis de las características de la red a partir de los resultados de la auditoría energética permitirá llevar a cabo una serie de medidas a implementar para mejorar la eficiencia del sistema, comenzando por la instalación de VRPs tal como ha sido propuesto previamente (Nicolini y Zovatto, 2009).

Instalación de VRPs

Analizada la red inicial, se han replicado los resultados obtenidos en otro de los estudios realizados sobre este sistema (Nicolini y Zovatto, 2009), donde se decide instalar cinco VRPs, cuyo emplazamiento se optimizó utilizando técnicas de algoritmos genéticos multiobjetivo, indicando además las pérdidas introducidas por cada válvula para tres escenarios diferentes: demanda mínima, media y máxima de la red.

La auditoría hídrica y energética de este caso es la que muestra la Tabla 4. Se observa que el volumen inyectado total disminuye debido a que el volumen fugado se ha reducido con la instalación de las VRPs y la consiguiente reducción de presiones. Parte de la energía topográfica entregada a los usuarios es disipada por las VRPs. Sin embargo se observa que la energía total consumida es similar (apenas una reducción del 2.5% con las VRPs).

Tabla 4 | Resultados de la auditoría de la red tras la instalación de VRPs

Auditoría hídrica	m³/día	%
Volumen inyectado total	14933	100
Volumen consumido	12960	86.79
Volumen fugado	1973	13.21
Auditoría energética	kWh	%
Energía entregada a los usuarios	1356	70.04
Energía mínima requerida	1289	95.09
Energía de exceso	1.6	0.12
Energía topográfica entregada	65	4.79
Energía topográfica disipada en válvulas	190	9.81
Energía disipada por fricción	182	9.40
Energía perdida a través de las fugas	208	10.74
Energía total consumida	1936	

ESCENARIOS PLANTEADOS

Tras la elaboración del modelo matemático de la red y su análisis energético, tanto con los datos de la red inicial como con los de la red tras la instalación de VRPs, se proponen una serie de medidas para mejorar la eficiencia energética del sistema, fundamentalmente con cambios en las fuentes de suministro. Finalmente, y buscando mejoras adicionales, se rediseña la red, desacoplando el abastecimiento en varios sectores y aumentando los diámetros de algunas tuberías clave. El trabajo concluye con su comparación final.

Mejoras por ajuste de la energía suministrada

Descenso de depósitos

El exceso de energía suministrada en el sistema es mínimo, aun así, siguiendo con la intención de eliminarla se plantea en primer lugar descender el nivel de los depósitos al mínimo necesario para satisfacer las condiciones de servicio. Tal como muestra la Tabla 5, con esta alternativa la energía de exceso prácticamente desaparece al estar dotando el nudo más desfavorable de la presión mínima requerida en los momentos de máxima demanda. Esto permite reducir la presión de la red y por lo tanto la energía perdida a través de las fugas. Sin embargo, el perfil del abastecimiento sigue siendo un obstáculo, representando la energía topográfica casi el 14 % de la energía entregada a los usuarios.

Junto al descenso de depósitos se plantea la posibilidad de instalar dos VRPs para disipar la energía topográfica existente. Esto permite reducir la presión y por lo tanto el volumen fugado. Con el cierre de las VRPs el caudal se redistribuye a lo largo de la red a través de tuberías que no están dimensionadas para tal efecto, teniendo como consecuencia un aumento de la energía disipada por fricción, siendo la energía total consumida ligeramente inferior pero similar a la del caso precedente.

Tabla 5 | Resultados de la auditoría de la red tras el descenso del nivel de depósitos y la instalación de VRPs

	Descenso depósitos		Con VRPs	
	m ³ /día	%	m ³ /día	%
Auditoría hídrica				
Volumen inyectado total	15230	100	14967	100
Volumen consumido	12960	85.10	12960	86.59
Volumen fugado	2270	14.90	2007	13.41
Auditoría energética	kWh	%	kWh	%
Energía entregada a los usuarios	1491	76.96	1378	72.53
Energía mínima requerida	1289	86.42	1289	93.51
Energía de exceso	1.2	0.08	1.2	0.09
Energía topográfica entregada	201	13.50	88	6.40
Energía topográfica disipada en válvulas	0	0	88	4.65
Energía disipada por fricción	183	9.43	219	11.54
Energía perdida a través de las fugas	264	13.61	214	11.27
Energía total consumida	1938		1901	

Suministro con bombas de velocidad variable

Para tratar de aportar en todo momento el caudal y presión de servicio en los nudos más desfavorables, y no únicamente en los momentos de máxima demanda como en el caso anterior, se plantea un cambio en el suministro, sustituyendo el bombeo a depósitos y posterior suministro por gravedad, por un bombeo directo con bombas de velocidad variable que permitan aportar en cada instante la energía necesaria desde las tres fuentes de suministro existentes, de esta manera se pretende que el sistema trabaje en su punto de funcionamiento óptimo en todo momento. La cota de aspiración de las bombas se sitúa a una altura igual a la de la cota del nudo más bajo, 7 m, ya que esta cota sirve de nivel de referencia para realizar la auditoría energética. El rendimiento de las bombas será del 100 % con la intención de poder comparar este escenario con el escenario inicial, en el que el agua se bombea a los depósitos desde los que se realiza el suministro, pero sin tener en cuenta el rendimiento de las bombas ni el gasto energético de las mismas consumido para tal fin.

Con esta alternativa tanto el volumen fugado como la energía perdida en fugas disminuye, aunque la energía topográfica sigue siendo un componente importante debido a la propia topografía de la red.

Tabla 6 | Resultados de la auditoría de la red con bombeo directo utilizando bombas de velocidad variable

	m ³ /día	%
Auditoría hídrica		
Volumen inyectado total	15212	100
Volumen consumido	12960	85.20
Volumen fugado	2252	14.80
Auditoría energética	kWh	%
Energía entregada a los usuarios	1485	77.08
Energía mínima requerida	1289	86.81
Energía de exceso	1	0.07
Energía topográfica entregada	195	13.12
Energía topográfica disipada en válvulas	0	0
Energía disipada por fricción	181	9.42
Energía perdida a través de las fugas	260	13.5
Energía total consumida	1926	

Mejoras en el diseño de la red

Como con los cambios de las fuentes de suministro apenas se consiguen mejoras hídricas y energéticas, se plantea modificar su diseño con la intención de reducir la energía topográfica, y por consiguiente el resto de pérdidas de la red.

Sectorización del sistema en 3 sectores

Tras analizar la topografía y características de la red, se plantea la posibilidad de desacoplarla en tres subsistemas diferentes agrupados por similitud de cotas en los nudos de consumo (Figura 3). De esta manera la bomba 23 se encargará de abastecer al sector 1, zona superior de la red que comprende los nudos 1 y 2, cuya cota en ambos casos es de 18 m. Este sector se aísla del resto de sistema con el cierre de la tubería 10, cuya pérdida de carga, debido al bajo C_{HW} , es muy elevada, lo que ayudará a disminuir las pérdidas por fricción.

La bomba 25 estará destinada al suministro del sector 3, parte inferior de la red que incluye siete nudos con una diferencia de tres metros entre la cota mínima (7 m) y máxima (10 m). Además, para reducir la pérdida por fricción producida por el bajo C_{HW} de la tubería 8 se sustituye por una nueva de diámetro interior igual a 423.3 mm y C_{HW} de 140. Se aprovecha este cambio para aumentar su diámetro, lo que permite disminuir tanto la energía disipada por fricción, como la curva de la bomba que abastece esta zona.

Por último, la bomba 24 estará encargada de abastecer el sector 2, zona central del abastecimiento con cotas comprendidas entre los 12 y 23 m. En este caso la diferencia de cotas es bastante grande debido a los nudos 13 y 14 situados a la salida de la bomba, que obligan al resto de nudos de este sector a estar sometidos a presiones por encima de la de servicio, lo que hace que en este caso la energía topográfica todavía sea un componente energético a tener en cuenta.

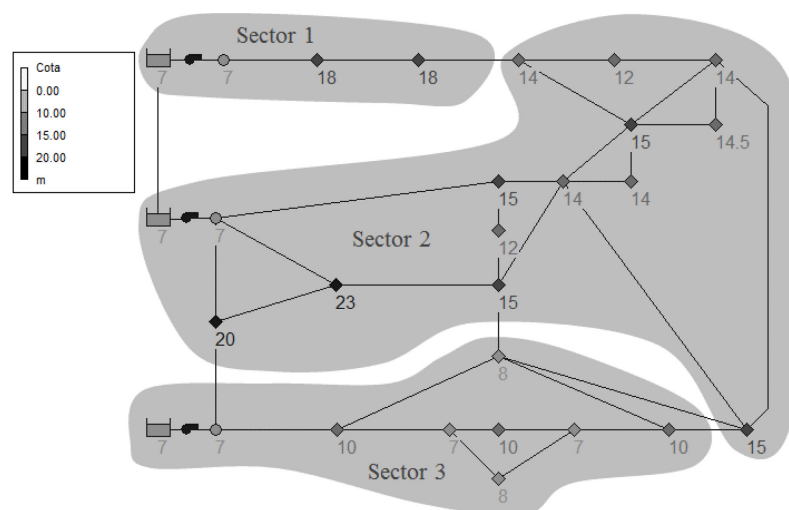


Figura 3 | Sectorización del sistema en tres sectores

La auditoría hídrica y energética se realiza de forma independiente para cada uno de los tres sectores definidos, puesto que los resultados de uno no afectan al resto. La suma de los resultados de las tres auditorías conforma la auditoría hídrica y energética final del sistema, tal y como puede verse en la Tabla 7.

Tabla 7 | Resultados de la auditoría tras desacoplar la red en tres sectores

	Sector 1		Sector 2		Sector 3		TOTAL	
Auditoría hídrica	m³/día	%	m³/día	%	m³/día	%	m³/día	%
Volumen inyectado total	1530	100	10464	100	3133	100	15127	100
Volumen consumido	1296	84.71	9072	86.70	2592	82.73	12960	85.70
Volumen fugado	234	15.29	1392	13.30	541	17.27	2167	14.30
Auditoría energética	kWh	%	kWh	%	kWh	%	kWh	%
Energía entregada a los usuarios	146	84.57	1084	79.83	238	79.61	1468	80.15
Energía mínima requerida	145	98.99	923	85.16	221	93.09	1289	87.95
Energía de exceso	1.5	1.01	0.3	0.03	0	0	1.8	0.02
Energía topográfica entregada	0	0	161	14.81	16	6.91	177	12.03
Energía topográfica disipada en válvulas	0	0	0	0	0	0	0	0
Energía disipada por fricción	0.3	0.15	105	7.75	11	3.64	116	6.51
Energía perdida a través de las fugas	26	15.27	169	12.42	50	16.75	245	13.35
Energía total consumida	173		1358		299		1829	

Sectorización del sistema en 4 sectores

Con la intención de reducir la energía topográfica del sector 2, se instala una cuarta bomba encargada de abastecer únicamente a los nudos 13 y 14 de mayor cota, formando así un nuevo sector, el sector 4. Con esta actuación se consigue que las cotas en el sector 2 sean más uniformes, con una diferencia entre la cota mínima y máxima de únicamente tres metros, frente a los once metros del caso anterior. De esta manera la energía entregada a los usuarios está representada prácticamente en su totalidad por la energía mínima requerida, reduciéndose la energía de exceso y la energía topográfica casi hasta desaparecer, como puede verse en la Tabla 8. Lógicamente, al desacoplarse el sistema, las auditorías del sector 1 y 3 no varían.

En cambio, la energía total consumida aumenta considerablemente debido al aumento de la energía disipada por fricción del sector 2. Esto se debe a que el dimensionado inicial del abastecimiento no está preparado para el nuevo diseño, ya que el abastecimiento se pensó para abastecer al sector 2 con las tuberías 3, 5 y 6, mientras que ahora se realiza únicamente a través de la tubería 5, es decir, el caudal que antes circulaba por tres líneas ahora circula por una. Para solventar este problema se requiere la sustitución de algunas tuberías del sector 2 por tuberías de diámetro mayor y menor rugosidad, lo que permitirá obtener valores aceptables de energía disipada por fricción.

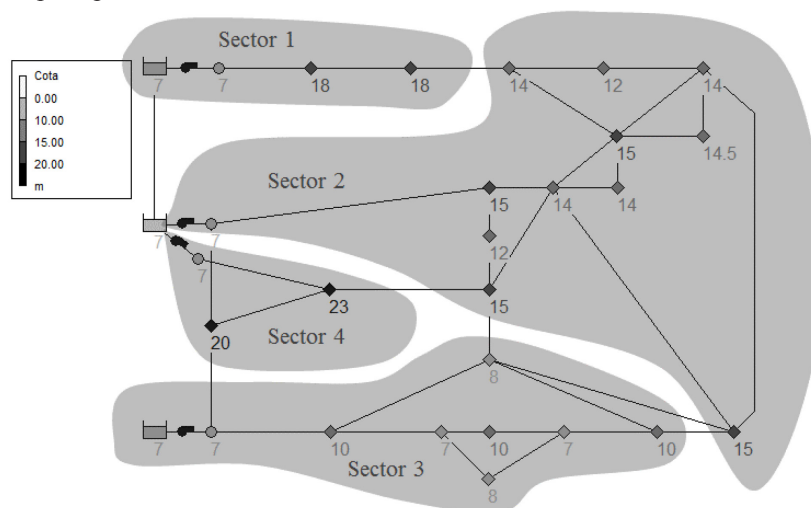
**Figura 4** | Sectorización del sistema en cuatro sectores

Tabla 8 | Resultados de la auditoría tras desacoplar la red en cuatro sectores

	Sector 1		Sector 2		Sector 3		Sector 4		TOTAL	
Auditoría hídrica	m³/día	%	m³/día	%	m³/día	%	m³/día	%	m³/día	%
Volumen inyectado total	1530	100	9646	100	3133	100	627	100	14936	100
Volumen consumido	1296	84.71	8640	89.57	2592	82.73	432	68.90	12960	86.77
Volumen fugado	234	15.29	1005	10.43	541	17.27	195	31.10	1975	13.23
Auditoría energética	kWh	%	kWh	%	kWh	%	kWh	%	kWh	%
Energía entregada a los usuarios	146	84.57	919	40.47	238	79.61	54	68.84	1358	48.10
Energía mínima requerida	145	98.99	872	94.88	221	93.09	51	93.2	1289	94.94
Energía de exceso	1.5	1.01	0.25	0	0	0	0.16	0.3	1.9	0.17
Energía topográfica entregada	0	0	46.8	5.09	16	6.91	3.5	6.5	66	4.89
Energía topog. disipada en válvulas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Energía disipada por fricción	0.3	0.15	1245	54.82	11	3.64	0.04	0.05	1257	44.53
Energía perdida a través de las fugas	26	15.27	107	4.72	50	16.75	25	31.11	208	7.37
Energía total consumida	173		2272		299		79		2823	

Redimensionado del sector 2

Para concretar las tuberías a redimensionar, se analiza las pérdidas unitarias de carga introducidas por las tuberías pertenecientes al sector 2, observando que las tuberías 5 y 25 son con diferencia las tuberías que mayores pérdidas de carga unitaria introducen en el sector, llegando a valores de 20.92 m/km, por lo que se aumentará el diámetro de estos tubos hasta conseguir que la pérdida de carga ronde los 1.5 m/km. Esto se consigue dotando a estas tuberías de un diámetro interior de 470.3 mm y un C_{HW} de 140, valor típico para tuberías de polietileno, como se ha citado anteriormente.

Con este cambio en el diseño de las tuberías se consiguen valores de energía disipada por fricción aceptables, y consecuentemente una reducción notoria de la energía consumida por el abastecimiento, como puede verse en la Tabla 9.

Tabla 9 | Resultados de la auditoría tras desacoplar la red en cuatro sectores y redimensionar el sector 2

	Sector 1		Sector 2		Sector 3		Sector 4		TOTAL	
Auditoría hídrica	m³/día	%	m³/día	%	m³/día	%	m³/día	%	m³/día	%
Volumen inyectado total	1530	100	9635	100	3133	100	627	100	14925	100
Volumen consumido	1296	84.71	8640	89.67	2592	82.73	432	68.90	12960	86.83
Volumen fugado	234	15.29	995	10.33	541	17.27	195	31.10	1965	13.17
Auditoría energética	kWh	%	kWh	%	kWh	%	kWh	%	kWh	%
Energía entregada a los usuarios	146	84.57	915	81.84	238	79.61	54	68.84	1353	81.12
Energía mínima requerida	145	98.99	872	95.38	221	93.09	51	93.2	1289	95.28
Energía de exceso	1.5	1.01	0	0	0	0	0.16	0.3	1.7	0.13
Energía topográfica entregada	0	0	42.3	4.62	16	6.91	3.5	6.5	62	4.59
Energía topog. disipada en válvulas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Energía disipada por fricción	0.3	0.15	97.7	8.74	11	3.64	0.04	0.05	109	6.53
Energía perdida a través de las fugas	26	15.27	105	9.42	50	16.75	25	31.11	206	12.35
Energía total consumida	173		1118		299		79		1668	

RESULTADOS

Tras un análisis en profundidad de las características de la red de estudio, se han estudiado diferentes alternativas a llevar a cabo con el fin de mejorar la eficiencia energética del sistema. Se ha comprobado que los cambios en la fuente de suministro no supone una mejora energética sustancial. Esto es debido a la propia topografía de la red, que obliga a entregar a la mayoría de usuarios más presión de la necesaria para abastecer a los nudos críticos con la presión de servicio establecida, es decir, hay que prestar especial atención al componente de energía topográfica si se desea mejorar la eficiencia del sistema. Por ello, la opción de modificar la fuente de suministro debe ir acompañada de un rediseño del abastecimiento que permita evitar en la medida de lo posible la energía de exceso y topográfica suministrada en la red.

Para lograr este objetivo, finalmente se decide desacoplar la red en cuatro sectores compuestos por nudos de consumo de cotas similares, con la intención de minimizar la energía topográfica de cada sector. El suministro a cada sector se realizará de forma independiente mediante un bombeo directo con bombas de velocidad variable que permita aportar en cada instante el volumen demandado a la presión de servicio en el nudo más desfavorable.

De este modo cada bombeo se encarga de abastecer a nudos con cotas muy similares, reduciéndose casi hasta desaparecer la energía topográfica del sistema. El problema que aparece con esta alternativa es la cantidad de energía disipada por fricción por condicionantes del dimensionado inicial. Su solución requiere la sustitución de dos tuberías por tuberías de diámetro mayor y menor rugosidad, lo que permite obtener valores aceptables de energía disipada por fricción, reduciendo de esta manera considerablemente la energía consumida por la red, como se observa en la Tabla 10.

Los indicadores que aparecen en la Tabla 11 muestran como tanto el rendimiento volumétrico, como el ideal y el real aumentan considerablemente con la última alternativa planteada, mientras que las fugas por unidad de longitud disminuyen. Del mismo modo se observa que el rendimiento real se aproxima notablemente al rendimiento ideal e inalcanzable de la red.

Tabla 10 | Resumen de los resultados obtenidos en la auditoría de cada alternativa estudiada

	Inicial		VRPs		Descenso		BVV		3 sectores		4 sectores	
Auditoría hídrica	m ³ /día	%	m ³ /día	%	m ³ /día	%	m ³ /día	%	m ³ /día	%	m ³ /día	%
Volumen inyectado total	15320	100	14933	100	15230	100	15212	100	15127	100	14925	100
Volumen consumido	12960	84.59	12960	86.79	12960	85.10	12960	85.20	12960	85.70	12960	86.83
Volumen fugado	2360	15.41	1973	13.21	2270	14.90	2252	14.80	2167	14.30	1965	13.17
Auditoría energética	kWh	%	kWh	%	kWh	%	kWh	%	kWh	%	kWh	%
Energía entregada a los usuarios	1529	77.01	1356	70.04	1491	76.96	1485	77.08	1468	80.15	1353	81.12
Energía mínima requerida	1289	84.28	1289	95.09	1289	86.42	1289	86.81	1289	87.95	1289	95.28
Energía de exceso	7.3	0.48	1.6	0.12	1.2	0.08	1	0.07	1.8	0.02	1.7	0.13
Energía topog. entregada	233	15.24	65	4.79	201	13.50	195	13.12	177	12.03	62	4.59
Energía topog. disipada en válvulas	0	0.00	190	9.81	0	0.00	0	0	0	0	0	0
Energía disipada por fricción	175	8.81	182	9.40	183	9.43	181	9.42	116	6.51	109	6.53
Energía perdida a través de fugas	282	14.19	208	10.74	264	13.61	260	13.5	245	13.35	206	12.35
Energía total consumida	1986		1936		1938		1926		1829		1668	

Tabla 11 | Indicadores hídricos y energéticos de cada alternativa estudiada

	Inicial	VRPs	Descenso	BVV	3 sectores	4 sectores
Indicadores hídricos	Rendimiento volumétrico (%)	84.59	86.79	85.1	85.2	86.8
	Fugas por km (m ³ /km h)	2.22	1.86	2.14	2.12	1.84
Indicadores energéticos	Rendimiento ideal	0.74	0.74	0.74	0.82	0.83
	Rendimiento real	0.65	0.66	0.66	0.67	0.77

Con este diseño final del abastecimiento se ha logrado reducir la energía consumida en un 16 % respecto del diseño inicial (Jowitt y Xu, 1990), y en un 14 % con relación a posteriores refinamientos (Nicolini y Zovatto, 2009) con la inclusión de cinco VRPs. Conviene subrayar que de la energía consumida, el 81.12 % es energía entregada a los usuarios, de la cual el 95.28 % se corresponde con la energía mínima requerida por los mismos, desapareciendo prácticamente tanto la energía de exceso como la topográfica.

Obviamente la modificación de tuberías, la instalación de una nueva bomba y los variadores de frecuencia conllevan unos costes de inversión a considerar. Teniendo en cuenta los costes de instalación de estos elementos, se estima una inversión necesaria de 800.000 €, mientras que el ahorro anual de energía supone 35.000 €, por lo que los costes de inversión se recuperarían en algo más de 20 años. Este periodo de recuperación de inversiones, a priori, es bastante elevado, pero no hay que olvidar que se parte de un abastecimiento diseñado de espaldas a la eficiencia energética.

Dicho de otro modo, el sistema está condicionado por el diseño inicial planteado. Si se cuantifica el coste correspondiente a la construcción de los tres depósitos iniciales, el coste de la inversión de la mejora planteada es inferior a la mitad del coste de éstos.

CONCLUSIONES

Este completo análisis evidencia que en el caso de estudio planteado la mejor opción para disminuir tanto la energía consumida por la red como el volumen fugado en la misma, hubiese sido realizar un correcto diseño de la misma, abasteciendo la red con una inyección directa a través de cuatro bombas de velocidad variable, con cada bomba alimentando a un sector definido a partir de las cotas de los nudos, de forma que se minimiza la energía topográfica y se elimina la de exceso, y por consiguiente la asociada a pérdidas en fugas.

El proceso realizado en este trabajo es perfectamente aplicable al estudio de otras redes y abastecimientos, únicamente faltará realizar el correspondiente estudio económico en cada caso. Aunque en esta ocasión parece evidente que el ahorro de construir y mantener tres depósitos es suficiente como para llevar a cabo esta alternativa, en la que únicamente se tendría que tener en cuenta la instalación de las tres tuberías redimensionadas y la bomba del sector 4, puesto que los otros tres bombeos ya existían para llenar los depósitos.

Las redes de agua a presión consumen energía, mayor o menor en función de las características de cada sistema, pero sin duda, suficiente como para tener en cuenta esta componente en el diseño de los mismos. Para ello se deben plantear diseños y estrategias que permitan minimizar al máximo la energía consumida, pero sobretudo tratando de minimizar las pérdidas energéticas, es decir, con un ecodiseño de la red desde su concepción inicial. En esta dirección deben enfocarse los futuros trabajos e investigaciones a realizar en el campo de la eficiencia energética de las redes de agua a presión.

REFERENCIAS

- Araujo, L., Ramos, H., Coelho, S. 2006. Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management. *Water Resources Management* 20(1), 133–149.
- Cabrera, E., Pardo, M. A., Cobacho, R., Cabrera Jr., E. 2010. Energy Audit of Water Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136(6), 669–677.
- Cabrera, E., Gómez, E., Cabrera Jr., E., Soriano, J., Espert, V. 2015. Energy Assessment of Pressurized Water Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 141(8).
- Campisano, A., Creaco, E., Modica, C. 2009. RTC of valves for leakage reduction in water supply networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136(1), 138–141

- Corcoran, L., McNabola, A., Coughlan, P. 2015. Optimization of Water Distribution Networks for Combined Hydropower Energy Recovery and Leakage Reduction. *Journal of Water Resources Planning and Management*. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000566.
- Fecarotta, O., Aricò, C., Carravetta, A., Martino, R., Ramos, H.M. 2015. Hydropower Potential in Water Distribution Networks: Pressure Control by PATs. *Water Resources Management* 29, 699–714. DOI :10.1007/s11269-014-0836-3
- Fontana, N., Giugni, M., Marini, G. 2016. Real Time Control of a Prototype for Pressure Regulation and Energy Production in Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000651.
- Germanopoulos, G., and Jowitt, P. W. 1989. Leakage reduction by excess pressure minimization in a water supply network. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, June, 87(2), 195-214.
- Giugni, M., Fontana, N., Ranucci, R. 2013. Optimal Location of PRVs and Turbines in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000418.
- Jeppson, R.W. 1976. *Analysis of flow in pipe networks*. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Michigan, USA.
- Jowitt, P.W., Xu, C. 1990. Optimal valve control in water distribution networks. *Journal Water Resources Planning and Management* 116(4), 455–472.
- Nicolini, M. y Zovatto, L. 2009. Optimal Location and Control of Pressure Reducing Valves in Water Networks. *Journal Water Resources Planning and Management* 135(3), 178-187.
- Rossman, L. A. 2000. *EPANET 2: User's manual*. U.S. EPA, Cincinnati.
- Vairavamoorthy, K., Lumbers, J. 1998. Leakage Reduction in Water Distribution Systems: Optimal Valve Control. *Journal of Hydraulic Engineering* 124(11), 1146–1154.