

Criterio para la optimización energética de redes ramificadas de agua

• Víctor Luis de Nicolás* • Francisco Laguna-Peñuelas • Pablo Vidueira •
Universidad Politécnica de Madrid, España

*Autor de correspondencia

Resumen

De Nicolás, V. L., Laguna-Peñuelas, F., & Vidueira, P. (noviembre-diciembre, 2014). Criterio para la optimización energética de redes ramificadas de agua. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6), 41-51.

La dependencia energética de las redes hidráulicas para su explotación hace que, a lo largo de los años, sus costos variables lleguen a ensombrecer los costos de construcción o costos fijos. El objetivo de este artículo es la minimización de los costos de explotación en redes ramificadas simples ya existentes y estudia la aplicación de las técnicas de sectorización, junto con el uso de variadores de velocidad, como medida de eficiencia energética. Se sugiere un criterio para determinar bajo qué circunstancias resulta favorable aplicar la sectorización. Se aplica en un caso de estudio real: una red simple ramificada existente con cuatro zonas hidráulicas usada para regadío en la provincia de Segovia, España, resultando en un ahorro energético de un 7.52%, pudiéndose llegar hasta un 26.31%, ampliando la franja horaria del bombeo inicial.

Palabras clave: redes ramificadas, sectorización, variadores de velocidad, optimización, eficiencia energética.

Introducción

Las redes de topología ramificada son muy habituales en sistemas de regadío, cuyas características principales son una gran dispersión espacial de los puntos de consumo y una elevada demanda de caudal. La configuración de tipo ramificado también es usual en el caso de grandes sistemas regionales para el suministro de agua a poblaciones, en redes de tipo industrial y en redes de distribución en pequeños núcleos residenciales (Pérez, 1993).

Estas redes, como cualquier infraestructura, implican una serie de costos. En una primera

Abstract

De Nicolás, V. L., Laguna-Peñuelas, F., & Vidueira, P. (November-December, 2014). An Energy Optimization Criterion for Branching Water Networks. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(6), 41-51.

Hydraulic networks' energy dependence in order for them to be exploited causes that, over the years, its variable costs overshadow the construction costs or fixed costs. The aim of this paper is to minimize the operating cost in existing simple branching networks and it analyses the application of sectoring techniques together with the use of variable speed drives as an energy efficient measure. A criteria to determine if the use of sectoring is favorable, is suggested. It is applied to a real case study: a simple branching network with four hydraulic zones used for irrigation in the province of Segovia, Spain. It resulted in energy savings of 7.54%, which may reach 26.31% if the pumping time of the original case is increased.

Keywords: Branching networks, sectoring; variable speed drives, optimization, energy efficiency.

Recibido: 13/06/13

Acceptado: 18/03/14

clasificación se dividen en costos de construcción o costos fijos, y costos de explotación o costos variables (Truyols, Hernaiz, & Martínez, 2007).

Los costos de construcción o costos fijos son los más inmediatos, aquellos que de forma ineludible hay que realizar para implantar y construir la red y prepararla para su pleno servicio. Estos costos tienen una valoración bastante objetiva, pudiendo verse aumentados durante la ejecución por imprevistos habituales intrínsecos a la misma obra.

Una vez ejecutada y puesta en marcha la red, los costos de explotación o costos variables son aquellos que se derivan de su uso haciendo

posible el funcionamiento y la rentabilidad de la misma. Dentro de estos últimos costos destaca por su importancia el costo energético, que puede alcanzar o incluso superar el valor de la amortización anual de la inversión, mientras que los apartados de mantenimiento y personal pueden cifrarse como una pequeña fracción de la misma.

El costo de operación del sistema está sin duda relacionado con el costo de inversión; por ejemplo, si se invierte en la automatización del sistema, ello revertirá en menores necesidades de personal.

Además, es preciso tener en cuenta que, por su naturaleza, los costos implicados están referidos a diferentes bases temporales. El costo de inversión constituye un pago único, expresado en unidades monetarias, que es necesario realizar para acometer la construcción y puesta en marcha de la red, mientras que los costos de operación corresponden a las cantidades devengadas periódicamente para mantener el funcionamiento del sistema en las condiciones de servicio; los periodos de referencia son por lo normal de duración anual y, en consecuencia, los gastos de operación se expresan en unidades monetarias por año. Surge por tanto la necesidad de expresar todos los costos implicados durante la vida útil de la red en referencia a una única base temporal, con la intención de hacer valoraciones económicas acertadas en un instante determinado (Pérez, 1993).

La minimización de los costos de construcción o costos fijos ha sido ampliamente estudiada en los problemas de optimización económica del diseño de redes de distribución. Este diseño pasa por dos etapas: se trata, por un lado, de la determinación del trazado de la red y el conexionado entre sus elementos y, por otro lado, del dimensionamiento de dichos elementos para cumplir de manera adecuada su función. El trazado de la red suele venir determinado a priori por multitud de condicionantes, por lo que desde el punto de vista de la optimización resulta mucho más interesante el estudio del dimensionamiento

de los elementos de la red. Ejemplos relevantes de métodos de optimización inicial en el diseño de diámetros de las conducciones son el de programación lineal (Laguna, 1972) o el método Granados (Granados, 1985). Como se verá más adelante, no son los costos de construcción el objeto de estudio de este artículo.

Por otra parte, en general, las redes hidráulicas se caracterizan por ser bastante longevas. No es extraño el caso de redes ya existentes en las que, al analizar los gastos implicados a lo largo de los años, encontramos que los costos de construcción, aunque en el momento de su ejecución fueron considerados como una fuerte inversión, quedan ensombrecidos por los no previstos siempre crecientes costos de mantenimiento y explotación.

De todos es sabido que el deterioro natural de cualquier sistema hace necesario un mantenimiento apropiado que cubra el arreglo de averías y desperfectos. En el caso de las redes hidráulicas hay dos aspectos que agravan esta situación: por una parte, los cambios en el sistema (demandas, regímenes de funcionamiento) que pueden hacer que las nuevas condiciones difieran ampliamente de las hipótesis iniciales (Cabrera-Béjar & Tzatchkov, 2012) que condicionaron su diseño y, por otra parte, su dependencia de la energía eléctrica para su explotación. Es un hecho que las tarifas eléctricas se caracterizan por su tendencia cambiante al alza y en ocasiones poco predecibles a largo plazo. En los últimos años hemos vivido importantes cambios en cuanto a subvenciones, limitaciones, tarifas reducidas, tarifas bonificadas, etc. Son precisamente estos cambios los que descuadran la estimación de los costos de explotación previstos en la fase inicial (Castañón, 2010).

En el caso más extremo, este incremento de los costos de mantenimiento y explotación puede dar lugar a la pérdida de competitividad de las redes, que dejan de ser rentables y las hacen necesitadas de una remodelación integral. Asoma entonces la tentación de su abandono. La necesidad de seguir prestando

servicios lleva, la mayoría de las veces, al alargamiento de su vida con mínimas y no siempre acertadas modificaciones, pese a su baja eficiencia energética y sus insostenibles costos de explotación. Se deduce, por tanto, que la eficiencia energética de estas infraestructuras ha pasado a un primer plano (Corominas, 2009).

Con el objetivo de minimizar los costos de explotación, en este artículo se aborda la optimización energética de una red hidráulica ramificada simple ya existente (diámetro, longitudes y árbol ya fijados), aplicando las técnicas de sectorización e incluyendo variadores de velocidad en las bombas de la impulsión.

Es muy común que entre los puntos receptores de una red ramificada existan diferencias importantes en cuanto a desniveles o demandas. La sectorización consiste en dividir la red en zonas que agrupen puntos receptores con los mismos atributos hidráulicos. Si no se sectoriza, el diseño de la impulsión vendrá limitado por los puntos críticos por cota y esto dará lugar a sobrepresiones en los puntos más bajos, haciendo necesarias reducciones de presión mediante válvulas de control y el consiguiente derroche energético (Rocamora, Abadía, & Cámara, 2011).

El siguiente paso a la sectorización es el diseño del funcionamiento de la impulsión. Las bombas operan casi siempre a velocidad constante o cuasi-constante, y con valores que dependen de la alimentación y de las características propias de la bomba, las cuales no se pueden modificar con facilidad. Por consiguiente, la capacidad de la bomba o, lo que es lo mismo, el caudal suministrado, es fijo para una misma bomba.

En este sentido, la sectorización carece de utilidad práctica, a no ser que o bien cada uno de los sectores sea atendido por un bombeo diferente dimensionado para la demanda de ese sector, o bien que se apliquen dispositivos para hacer que la capacidad de la bomba sea variable. Estos dispositivos son precisamente los variadores de velocidad.

Materiales y métodos

El objetivo de este artículo es la minimización de los costos de explotación en redes ramificadas de agua que ya han sido construidas. Se trata, pues, de un caso de optimización energética a posteriori.

Se plantea un criterio para determinar bajo qué circunstancias sería provechosa desde el punto de vista energético la implantación de la técnica de sectorización acompañada de variadores de velocidad en redes hidráulicas ramificadas simples ya existentes (diámetro, longitudes y árbol ya fijados).

Se compara la energía teórica y real consumida en una misma red operando bajo diferentes filosofías: sin aplicar y aplicando la sectorización.

En el primero de los casos se efectúa un bombeo continuo que abastece a todos los puntos durante un tiempo determinado de bombeo.

En el segundo caso, el mismo tiempo se divide en tantas fracciones como sectorizaciones se hayan aplicado. El bombeo abastece a cada uno de los sectores por separado en cada periodo de tiempo. Mediante la implantación de variadores de velocidad al equipo de bombeo existente se conseguirá la ampliación de su rango de trabajo (Sánchez *et al.*, 2008). Adaptando el punto de funcionamiento de la bomba al sector abastecido en cada caso se consiguen evitar las sobrepresiones y se consume sólo la energía demandada por cada sector.

Potencia y sectorización

La potencia de una bomba hidráulica se define por la siguiente expresión:

$$P = \gamma \cdot Q \cdot H_b / \eta \quad (1)$$

Donde:

P : potencia de la bomba.

γ : peso específico del fluido (agua).

Q : caudal bombeado por la bomba.
 H_b : altura de bombeo.
 η : rendimiento.

La figura 1 muestra el esquema de una red ramificada funcionando sin la aplicación de la sectorización. Está compuesta por los siguientes elementos: bombeo, tramo común de tubería ($LC =$ longitud común y caudal $Q_T = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$) y n ramificaciones de diferentes diámetros (longitud L_i y caudal Q_i), que llegan a los n depósitos de regulación situados a cotas variables; y donde $i = 1$ para el sector que condiciona la red durante el bombeo continuo, por ser el que precisa mayor altura de energía.

La figura 2 muestra la misma red ramificada de la figura 1, pero esta vez aplicando la

técnica de sectorización (Tzatchkov & Alcocer-Yamanaka, 2011). Para evitar que queden tramos de tubería con presiones negativas, se incorporan válvulas de cierre en la propia bifurcación o incluso añadimos válvulas de retención.

Para el desarrollo de la formulación que se busca, la sectorización se aplica de la siguiente manera: la red se divide en tantos sectores como depósitos, de manera que cada uno de ellos constituye un sector. De aquí en adelante nos referiremos a este tipo de sectorización como sectorización individual. Se observa que en este caso los caudales se han acompañado de un apóstrofe para diferenciarlos de los caudales continuos, caso anterior que corresponde a todo el tiempo posible de bombeo. En la práctica, se adopta una cifra de 16 horas para conseguir

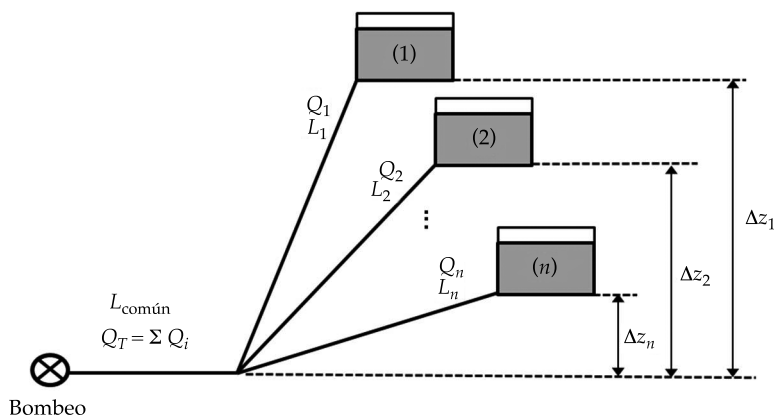


Figura 1. Red ramificada funcionando sin sectorización.

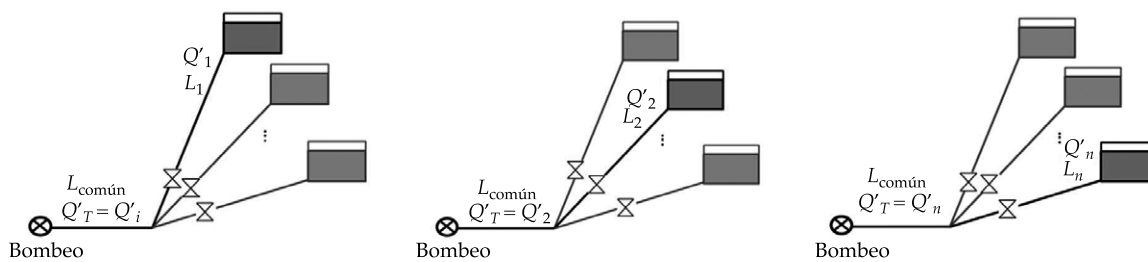


Figura 2. Red ramificada funcionando con sectorización individual.

tarifas más bajas y evitar la tarifa eléctrica de puntas.

Se toman las siguientes hipótesis de partida:

- 1) El tiempo total de bombeo "t" es el mismo para los dos regímenes de funcionamiento. En el segundo caso, el tiempo empleado en el bombeo de cada sector "ti" viene dado por:

$$t_i = \left(\frac{Q_i}{Q_T} \right) \cdot t \quad (2)$$

- 2) Como consecuencia de la anterior hipótesis, el caudal circulante por el tramo sectorizado *i* se incrementa por el factor $\frac{t}{t_i} = \frac{Q_T}{Q_i}$, quedando por tanto el caudal total como:

$$Q_T = Q_i \cdot \left(\frac{t}{t_i} \right) \quad (3)$$

- 3) La parte común tendrá siempre el mismo QT, y por lo tanto las pérdidas de carga de dicho tramo también serán siempre las mismas:

$$Q_T = \sum Q_i = Q'_T = Q'_i \quad (4)$$

Para determinar bajo qué circunstancias sería favorable la aplicación de la sectorización, buscamos el valor del desnivel mínimo Δ, que permita el cumplimiento de que la energía gastada sin sectorización (bombeo continuo) supere a la suma de las energías específicas en cada sector. Esta condición se expresa en la ecuación (4).

$$E_{\text{Bombeo continuo}} > E_1 + E_2 + \dots + E_n \quad (5)$$

Donde, según (1), para el bombeo continuo:

$$E_{\text{Bombeo continuo}} = \gamma \cdot Q_T \cdot \left(\Delta Z_1 + \Delta H_{L \text{ común}} + C_1 \cdot Q_1^2 \right) \cdot t \quad (6)$$

Y para cada uno de los sectores:

$$E_i = \gamma \cdot Q_T \cdot \left(\Delta Z_1 + \Delta H_{L \text{ común}} + C_i \cdot Q_T^2 \right) \cdot t_i \quad (7)$$

Por lo tanto:

$$E_{\text{Bombeo continuo}} > \sum_{i=1}^n E_i \quad (8)$$

Definiendo:

$$\Delta Z_m = \sum_i \frac{Q_i}{Q_T} \Delta Z_i \quad (9)$$

Resolviendo (5) se plantea la condición de la siguiente forma:

$$\Delta Z_1 - \Delta Z_m > Q_T \cdot \sum C_i \cdot Q_i - C_1 \cdot Q_1^2 \quad (10)$$

Donde:

C_i = constante de pérdidas de carga del tramo *i*.

Q_i = caudal del tramo *i*.

La fórmula (10) permite evaluar si es o no favorable, desde el punto de vista de la energía consumida, la sectorización individual de una red ramificada en la que los *n* depósitos están precedidos por un tramo común.

Sin embargo, el caso de una red dividida en tantos sectores como depósitos la componen, en raras ocasiones sería favorable desde el punto de vista energético (según (10), se precisaría un desnivel muy elevado). Prácticamente, sólo es posible aplicar este método a dos sectorizaciones.

Resolviendo la fórmula para dos sectores formados por dos depósitos, admitiendo, para simplificar, que tienen tramos iguales con consumos idénticos, se obtiene:

$$\Delta Z_1 - \frac{\Delta Z_1 - \Delta Z_2}{2} > Q_T \cdot \sum C_i \cdot Q_i - C_1 \cdot Q_1^2$$

$$\frac{\Delta Z_1 - \Delta Z_2}{2} > 2 \cdot Q_1 \cdot 2 \cdot C_1 \cdot Q_1 - C_1 \cdot Q_1^2 = 3 \cdot C_1 \cdot Q_1^2$$

Llamando Δ al desnivel entre los depósitos, se tiene la condición:

$$\Delta > 6 \cdot C_1 \cdot Q_1^2 \quad (11)$$

Es decir, sólo a partir de desniveles superiores a seis veces las pérdidas de carga en los tramos independientes de llegada al depósito sería favorable la sectorización.

Para tres depósitos o balsas de llegada, en el supuesto de tramos de llegada iguales en caudal y diámetro, así como desniveles entre depósitos equidistantes, se puede demostrar que para que fuera rentable la sectorización a tres depósitos se precisaría un desnivel entre el depósito superior y el inferior de valor al menos 16 veces las pérdidas de carga en cada ramal.

Pensando en la limitación anterior, puede ser interesante proceder a hacer dos sectores: uno de ellos absorbe un caudal Q_1 y el otro está formado por n ramales iguales, que parten del mismo tramo en común, con un caudal Q_2 en cada ramal.

La energía del bombeo para el primer sector será:

$$E_1 = \gamma \cdot Q_T \cdot (\Delta Z_1 + \Delta H_c + C_1 \cdot Q_T^2) \cdot t_1 \quad (12)$$

El bombeo para el segundo sector que agrupa n depósitos o balsas con caudal Q_2 de llegada para cada uno de ellos será:

$$E_2 = \gamma \cdot Q_T \cdot (\Delta Z_2 + \Delta H_c + C_2 \cdot Q_T^2) \cdot t_2 \quad (13)$$

Resultando:

$$\Delta Z_1 - \Delta Z_m > Q_T \left(C_1 \cdot Q_1 + \frac{C_2 \cdot Q_2}{n} \right) - C_1 \cdot Q_1^2 \quad (14)$$

Desarrollando:

$$\Delta Z_1 - \Delta Z_m = \frac{\Delta}{2} > Q_1 \cdot Q_2 \cdot \left(n \cdot C_1 + \frac{C_2}{n} \right) + C_2 \cdot Q_2^2 \quad (15)$$

Si los caudales son similares, para que pueda ser eficiente sectorizar en dos, el desnivel Δ debe ser superior al doble de las pérdidas de carga en el sector 2 y en el sector 1.

La fórmula (10) también puede ser aplicada de la siguiente forma para n diferente al número total de depósitos que componen la red. Por ejemplo, para una red compuesta de 10 depósitos (10), podría aplicarse con $n = 2$ para los pares de depósitos (1) y (2), (2) y (3), (3) y (4)... El valor obtenido nos permitiría determinar si es favorable bombear cada depósito de la pareja por separado. En caso afirmativo, cada uno de ellos debería formar parte de un sector diferente y la red debería tener como mínimo dos sectores. En caso negativo, la pareja estudiada debería formar parte siempre del mismo sector.

La aplicación sucesiva de este procedimiento determina el número óptimo de sectores en los que debe ser dividida la red desde el punto de vista energético, y qué depósitos deben formar parte de cada uno de los sectores.

Variador de velocidad y rendimiento de la bomba

La sectorización conlleva que las necesidades de presión y caudal para cada uno de los nuevos sectores sean diferentes entre sí y distintos además a las originales de diseño. Los puntos de funcionamiento de la bomba para la velocidad a la que fue diseñada constituyen su curva característica; estas nuevas necesidades difícilmente estarán dentro de dicha curva, por lo que para satisfacerlas, la bomba trabajará con una presión o un caudal excesivos, además de con un bajo rendimiento.

A fin de mejorar la eficiencia energética y la operatividad del sistema, se propone modificar el régimen de giro de la bomba mediante un variador de velocidad, es decir un dispositivo o conjunto de dispositivos mecánicos, hidráulicos, eléctricos o electrónicos empleados para controlar la velocidad giratoria de maquinaria. Controlar la velocidad de la bomba permitirá modificar su curva característica y natu-

ralmente los puntos de funcionamiento, adecuándolos para cada sector (Phipps, 1994; Al-Bassam & Maheshwari, 2011; Miller, Olateju, & Kumar, 2012). De esta manera se dotará a cada sector exactamente con la presión y caudales demandados, obteniendo rendimientos aceptables.

Si se conoce la curva característica de una bomba correspondiente a un número de revoluciones (n), se conocen todas las curvas características para un número de revoluciones cualquiera (Almondoz, Mongelo, & Pellejero, 2007). Conociendo la curva característica correspondiente a n_1 rpm, el punto de funcionamiento A1 dado por el caudal q_{A1} y la altura manométrica H_{mA1} de dicha curva característica, se puede determinar la constante K_A en la forma:

$$K_{A1} = \frac{H_{mA1}}{q_{A1}^2} \quad (16)$$

Para un mismo valor de K_A , el rendimiento de una bomba se mantiene constante para cualquier velocidad.

Por lo tanto, se puede conocer el rendimiento para el punto de funcionamiento A2 (q_{A2} , H_{mA2}) de uno de nuestros sectores encontrando su valor de K_A y buscando a qué punto de la curva característica primitiva K_{A1} se corresponde.

Partiendo de los valores del punto de funcionamiento A1 en la curva característica primitiva, se puede conocer la velocidad n_2 a la que funcionaría la bomba dotada de variador de velocidad gracias a las siguientes expresiones:

$$H_{mA1} = H_{mA2} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad (17)$$

$$Q_{A1} = Q_{A2} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (18)$$

Caso de estudio

Se plantea como caso de estudio una red hidráulica existente en la provincia de Segovia,

sita en la comarca agraria de El Carracillo, perteneciente a un grupo de agricultores. Esta red se utiliza para el riego de remolacha azucarera y de cultivos hortícolas (patatas, zanahorias y cebolla).

Se trata de una red simple ramificada, con cuatro zonas hidráulicas (ver el esquema que se muestra en la figura 3). Cada zona hidráulica es regulada por una balsa, cuyo volumen es igual a la necesidad hídrica de un día cualquiera del mes con más demanda (agosto).

El agua es impulsada mediante una estación de bombeo, situada a la cota 800 m, compuesta por una única bomba de 1 332.5 kW de potencia, que funciona durante 16 horas diarias en el mes de máxima demanda (agosto). Esta bomba siempre impulsa en las mismas condiciones de caudal y altura, por tanto, durante los meses de menor demanda, el número de horas de funcionamiento disminuye.

Los cuadros 1 y 2 muestran la superficie regable de cada zona y la dotación requerida anual, y cómo se distribuye ésta a lo largo de los meses de regadío.

Discusión y resultados

Se aplicará (10) particularizada para $n = 2$ balsas, de esta forma se comprueba si es favorable bombear a cada pareja de balsas (precedidas de un tramo común) de manera conjunta o por separado; en nuestro caso, al tener cuatro zonas habrá un total de seis pares posibles ($n-1$), tal y como se muestra en el cuadro 3.

Es decir, en la situación óptima de bombeo, Z1 y Z4 pertenecen a dos sectores diferentes y, a su vez, Z2 y Z4, y Z3 y Z4 también pertenecen a sectores diferentes. Se desprende por ahora que existirán al menos dos sectores: uno de ellos (sector A) incluirá Z4, y el otro u otros están todavía por definirse. El análisis indica que no es favorable separar las zonas Z1 y Z3, por lo que existirá un segundo sector (sector B) que incluya estas dos zonas. Queda por determinar si se debe incluir Z2 en el sector B (por la topología de la red no se plantea la posibilidad de que forme parte del sector A) o

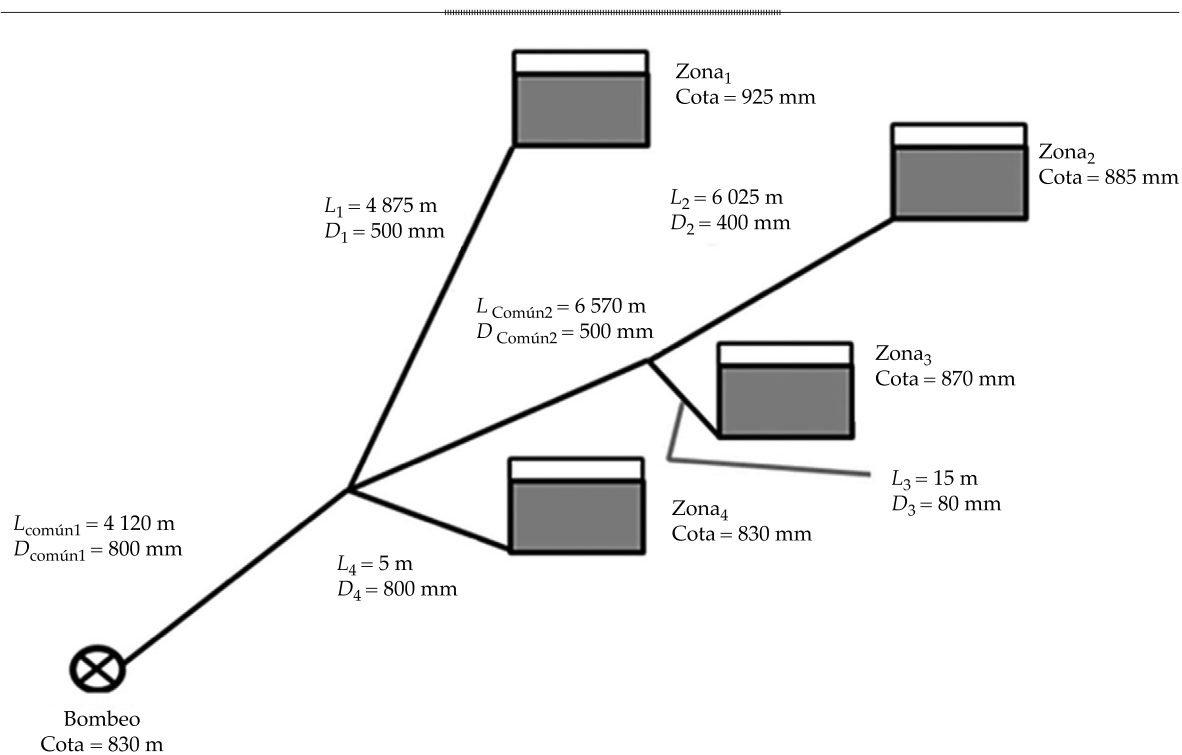


Figura 3. Red ramificada: caso de estudio.

Cuadro 1. Superficie regable por zonas y dotación requerida anual.

Zona	Superficie (ha)	Necesidad anual (m ³ /ha)
1	150	12 000
2	75	12 000
3	120	12 000
4	100	12 000

Cuadro 2. Distribución de la dotación anual por meses.

Zona	% de la dotación anual requerido para cada mes					
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
1, 2, 3 y 4	10	15	17	20	22	16

Cuadro 3. Discusión de la sectorización para parejas de zonas.

Zonas	¿Es favorable bombearlas por separado?
Z1 y Z2	No
Z1 y Z3	No
Z1 y Z4	Sí
Z2 y Z3	No
Z2 y Z4	Sí
Z3 y Z4	Sí

en uno nuevo. El análisis concluye que no es favorable bombear por separado Z2 y Z3, por lo que Z2 queda incluida en el sector B.

De esta manera, se puede determinar que la sectorización óptima es la siguiente:

Sector A: Z1 + Z2 + Z3

Sector B: Z4

También podríamos aplicar, de forma más general, la metodología aplicada por la fórmula (15), obteniendo los mismos resultados de sectorización.

Aplicando este criterio de sectorización se obtienen los resultados energéticos mostrados en el cuadro 4, manteniendo el número de horas originales estipuladas para el bombeo continuo.

Esta situación, además de suponer un ahorro energético, puede también verse beneficiada por la distribución del sistema tari-

fario eléctrico; puesto que para cada sector de bombeo se tendrá una potencia, se podrá impulsar el sector de mayor potencia en las horas valle y el sector de menor potencia en las horas punta.

Si se aumentan las horas de bombeo en relación con las originales estipuladas para el bombeo continuo, los caudales disminuirán. De esta forma, aunque la sectorización óptima descrita anteriormente no cambiara, esa disminución de caudal traería consigo la consiguiente disminución de pérdidas de carga en la red y el aumento de los rendimientos de la bomba, con lo cual, como se aprecia en el cuadro 5, el ahorro energético podría ser aún mayor.

Conclusiones

Es posible deducir la sectorización óptima desde el punto de vista energético para una red

Cuadro 4. Comparación de consumos energéticos (se mantienen las horas de bombeo).

Mes	Horas/día	Situación actual	Con sectorización	% ahorro
		Consumo energético (kWh/día)	Consumo energético (kWh/día)	
Abril	7.3	9 690	8 927	
Mayo	11	14 536	13 440	
Junio	12.4	16 774	15 343	
Julio	14.6	19 381	18 030	
Agosto	16	21 320	19 768	
Septiembre	11.7	15 505	14 393	
	Total	97 206	89 901	7.52

Cuadro 5. Comparación de consumos energéticos (se aumentan las horas de bombeo).

Mes	Situación actual		Con sectorización		% ahorro
	Horas/día	Consumo energético (kWh/día)	Horas/día	Consumo energético (kWh/día)	
Abril	7.3	9 690	16	6 911	
Mayo	11	14 536	16	10 607	
Junio	12.4	16 774	16	12 718	
Julio	14.6	19 381	20	14 417	
Agosto	16	21 320	24	15 453	
Septiembre	11.7	15 505	16	11 522	
	Total	97 206	Total	71 628	26.31

ramificada simple, en función de la diferencia de altura existente entre los elementos reguladores de la red.

En general, la sectorización en redes ramificadas simples es favorable desde el punto de vista energético siempre y cuando:

Las diferencias de altura entre las diferentes zonas de la red sean grandes. Por esta razón, sectorizar en tres o más zonas es algo complicado, pues sería necesario que existiera una elevada diferencia de cotas entre ellas.

Los tramos que salen del tramo común y llegan a los elementos de regulación sean de corta longitud. De esta forma la constante de las pérdidas de carga (C_i) será menor.

Aquellas redes que tengan el mismo diámetro en el tramo común que en los ramales de llegada a los depósitos o balsas presentan mayor facilidad para verse favorecidas por la sectorización.

Para el caso particular de una red compuesta por un tramo común y dos depósitos con las mismas necesidades hídricas, si los ramales de llegada a esos depósitos son iguales en longitud y diámetro, la sectorización es posible siempre que la diferencia de alturas entre ambos depósitos sea mayor a seis veces la pérdida de carga del ramal llegada a los mismos. En el caso de tres depósitos, se precisaría un desnivel entre el depósito superior y el inferior de valor al menos 16 veces las pérdidas de carga en cada ramal.

En los sistemas hidráulicos, cuya estación de bombeo tenga holgura horaria, la sectorización sería más positiva si se incrementaran las horas de bombeo. Al aumentar las horas de bombeo disminuyen los caudales circulantes por la red, circunstancia a la que es posible adaptarse gracias al uso de los variadores de velocidad.

La sectorización con variadores de velocidad, siempre que sea factible, permite un mayor ajuste del sistema hidráulico con el sistema tarifario eléctrico, permitiendo bombear los sectores de mayor potencia en las horas valle y los de menor en las horas punta.

Este artículo abre la posibilidad de replantear una nueva optimización de las redes

abiertas, basadas en la situación de bombeo alternativo en cada sector. Los algoritmos de la optimización a partir de la programación lineal o similares deben ser reformulados.

Referencias

- Al-Bassam, E., & Maheshwari, G. P. (July, 2011). A New Scheme for Cooling tower Water Conservation in Arid-Zone Countries. *Energy*, 36, 3985-3991, doi: 10.1016/j.energy.2011.05.003.
- Almondoz, J. M., Mongelo, M. B., & Pellejero, I. (2007). *Apuntes de máquinas hidráulicas* (349 pp.). Donosti: Universidad del País Vasco.
- Cabrera-Béjar, J. A., & Tzatchkov, V. G. (April, 2012). Modeling Water Distribution Networks with Intermittent Water Supply. *Water and Technology Science*, 3(2), 5-25.
- Castañón, G. (April, 2010). Optimización del regadío. *Cuides*, 4, 181-209.
- Corominas, J. (2009). Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad. En *Actas Jornadas de Ingeniería del Agua*. Madrid, 27-28 de octubre.
- Granados, A. (1985). *Cálculo de redes colectivas ramificadas de riego a presión*. Director: Florentino Santos García. Tesis doctoral. Madrid: ETSI Caminos, Canales y Puertos, Politécnica de Madrid.
- Laguna, F. V. (diciembre, 1972). *Cálculo de redes de aspersión*. Primeras Jornadas Nacionales sobre Aplicaciones de la Informática a la Ingeniería Civil, Madrid.
- Miller, P., Olateju, B., & Kumar, A. (February, 2012). A Techno-Economic Analysis of Cost Savings for Retrofitting Industrial Aerial Coolers with Variable Frequency Drives. *Energy Conversion and Management*, 54, 81-89, doi.org/10.1016/j.enconman.2011.09.018.
- Pérez, R. (1993). *Dimensionamiento óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando los elementos de regulación*. Director: Fernando Martínez Alzamora. Tesis doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Rocamora, M. C., Abadía, R., & Cámara, J. M. (2011). *Manual de auditorías energéticas en comunidades de regantes* (258 pp.). San Vicente: Editorial Club Universitario.
- Sánchez, R., Juana, L., Laguna, F. V., Castañón, G., & Rodríguez, L. (2008). Consumo de energía con bombas de velocidad variable. En: *Actas XXVI Congreso Nacional de Riegos*, Huesca, 24-26 de junio.
- Phipps, C. (1994). *Variable Speed Drive Fundamentals* (193 pp.). Liburn: Fairmont Press.
- Truyols, S., Hernaiz, A., & Martínez, J. M. (2007). *Organización de empresas para Ingeniería Civil: teoría y práctica* (454 pp.). Madrid: Delta Publicaciones.
- Tzatchkov, V. G., & Alcocer-Yamanaka, V. H. (July, 2011). Implementation of Graph Theory Based Algorithms in Water Distribution Network Sectorization Projects. *Water and Technology Science*, 2(3), 97-114.

Dirección institucional de los autores

M.I. Víctor Luis de Nicolás

Universidad Politécnica de Madrid
Departamento de Hidráulica y Energética
Avenida Complutense s/n
28040 Madrid, ESPAÑA
Teléfono: +34 (91) 3365 838
vl.denicolas@upm.es
Dr. Francisco V. Laguna-Peñuelas

Universidad Politécnica de Madrid
Departamento de Hidráulica y Energética
Calle del Profesor Aranguren
28040 Madrid, ESPAÑA
Teléfono: +34 (91) 3365 838
franciscovicente.laguna@upm.es

M.I. Pablo Vidueira

Universidad Politécnica de Madrid
Departamento de Hidráulica y Energética
Avenida Complutense s/n
28040 Madrid, ESPAÑA
Teléfono: +34 (91) 3365 838
pablo.vidueira@upm.es