

ENERGY OPTIMIZATION OF BRANCHED WATER NETWORKS. IMPLEMENTATION TO A WATER INFRASTRUCTURE LOCATED IN CUENCA (SPAIN).

De Nicolas De Nicolas, V. L.

Universidad Politecnica de Madrid

Energy dependence of water networks for their exploitation makes its variable costs come to overshadow the construction costs or fixed costs in the long term. The aim of this paper is to analyze alternatives to minimize operating costs in existing simple branched networks and study the application of sectorization combined with variable speed drives as a means of improving energy efficiency. It is suggested a criterion to determine under what circumstances it is favorable to apply sectorization and the criterion is applied to a real case study which is located in Cuenca. The results show significant energy savings, which in combination with electrical charging means a reduction in the economic costs of pumping.

Keywords: *Networks; Sectorization; Variable speed drives; Optimization; Energy efficiency*

OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE REDES RAMIFICADAS DE AGUA. APLICACIÓN A UNA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA EN LA PROVINCIA DE CUENCA.

La dependencia energética de las redes hidráulicas para su explotación hace que, a lo largo de los años, sus costes variables lleguen a ensombrecer los costes de construcción o costes fijos. El objetivo de esta comunicación es analizar alternativas para la minimización de los costes de explotación en redes ramificadas simples ya existentes y estudiar la aplicación de las técnicas de sectorización junto con el uso de variadores de velocidad como medida para la mejora de la eficiencia energética. Se sugiere un criterio para determinar bajo qué circunstancias resulta favorable aplicar la sectorización y se aplica en un caso de estudio real, situado en la provincia de Cuenca. Los resultados muestran un importante ahorro energético, que combinado con la tarificación eléctrica supone una reducción de los costes económicos del bombeo.

Palabras clave: *Redes ramificadas; Sectorización; Variadores de velocidad; Optimización; Eficiencia energética*

Correspondencia: C\Infanta Mercedes 98, 2ºE. C.P 28020. Madrid, España.

1. 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 residencial (Pérez, 1993).

Estas redes, como cualquier infraestructura, implican una serie de costes. En una primera clasificación se dividen en costes de construcción o costes fijos y costes de explotación o costes variables (Truyols et al. 2007).

Los costes de construcción o costes fijos son los más inmediatos, aquellos que ineludiblemente hay que realizar para implantar y construir la red y prepararla para su pleno servicio. Estos costes 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 costes de explotación o costes variables son aquellos que se derivan de su uso haciendo posibles el funcionamiento y la rentabilidad de la misma. Dentro de estos últimos costes destaca por su importancia el coste energético, que puede alcanzar e 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 coste de operación del sistema está sin duda relacionado con el coste 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 costes implicados están referidos a diferentes bases temporales. El coste 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 costes de operación corresponden a las cantidades devengadas periódicamente para mantener el funcionamiento del sistema en las condiciones de servicio; los periodos de referencia son normalmente 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 costes 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 costes de construcción o costes 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 adecuadamente 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 costes de construcción el objeto de estudio de esta comunicación.

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 costes de construcción, aunque en el momento de

su ejecución fueron considerados como una fuerte inversión, quedan ensombrecidos por los no previstos siempre crecientes costes 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 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 predecible 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 costes de explotación previstos en la fase inicial (Castañón, 2010).

En el caso más extremo, este incremento de los costes 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 costes de explotación.

Se deduce por tanto que la eficiencia energética de estas infraestructuras ha pasado a un primer plano (Corominas, J. 2009).

Con el objetivo de minimizar los costes de explotación, en esta comunicación 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 necesaria reducciones de presión mediante válvulas de control y el consiguiente derroche energético (Rocamora et al. 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 fácilmente. 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.

2. Objetivos y metodología

El objetivo de esta comunicación es la minimización de los costes 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.

2.1 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)

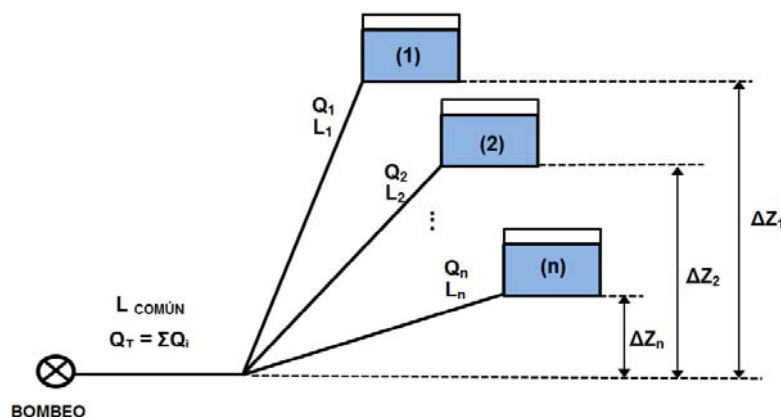
Q: Caudal bombeado por la bomba

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 (L_c =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.

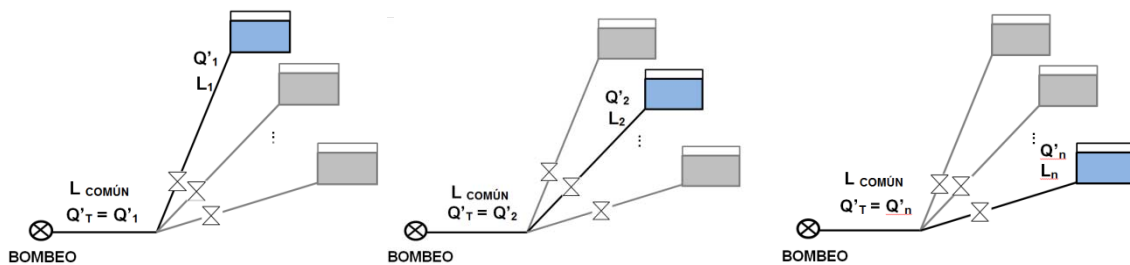
Figura 1 Red ramificada con funcionamiento sin sectorización



La Figura 2 muestra la misma red ramificada de la Figura 1 pero esta vez aplicando la técnica de sectorización. 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 tarifas más bajas y evitar la tarifa eléctrica de puntas.

Figura 2: Red ramificada funcionando con sectorización individual



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 "t_i" 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 Q_T , 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) supera a la suma de las energías específicas en cada sector. Esta condición se expresa en la inecuación (4).

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

Donde, según [1], para el bombeo continuo:

$$E_{\text{BOMBEO CONTÍNUO}} = \gamma \cdot Q_T \cdot (\Delta Z_1 + \Delta H_{L \text{ COMÚN}} + C_1 \cdot Q_1^2) \cdot t \quad (6)$$

Y para cada uno de los sectores:

$$E_i = \gamma \cdot Q_T \cdot (\Delta Z_i + \Delta H_{L \text{ COMUN}} + C_i \cdot Q_i^2) \cdot t_i \quad (7)$$

Por lo tanto:

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

Definiendo:

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

Resolviendo [4] 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, solo 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 6 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 otro sector formado por n ramales iguales, que parten del mismo tramo en común, con un caudal Q_2 .

El 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 $n-1$ depósitos o balsas con caudal cada uno Q_2 , 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:

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

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 2 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 punto de vista energético, y qué depósitos deben formar parte de cada uno de los sectores.

2.2 Variador de velocidad y rendimiento de la bomba

La sectorización requiere necesariamente la implantación de un variador de velocidad en los equipos de bombeo. Un variador de velocidad es un dispositivo o conjunto de

dispositivos mecánicos, hidráulicos, eléctricos o electrónicos empleados para controlar la velocidad giratoria de maquinaria (Phipps C, 1997; Al-Bassam y Maheshwari, 2011; Miller et al, 2012).

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 (Fernández Diez, 2003). Conociendo la curva característica correspondiente a n_1 rpm, el punto de funcionamiento A_1 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 A_2 (q_{A2} , H_{mA2}) de uno de nuestros sectores hallando su valor de K_{A2} y buscando a qué punto de la curva característica primitiva K_{A1} se corresponde.

Partiendo de los valores del punto de funcionamiento A_1 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:

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

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

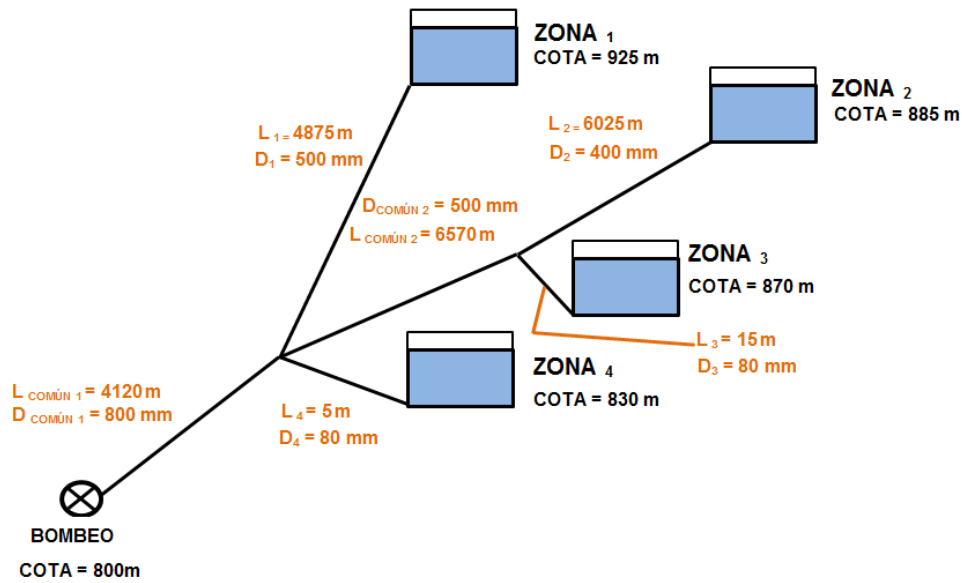
3. Caso de estudio

Se plantea como caso de estudio una red hidráulica existente en la provincia de Cuenca, 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).

Esta comunicación no pretende generalizar los resultados obtenidos en este caso de estudio (evidentemente el ahorro dependerá de la red a evaluar), no obstante, pretende mediante este caso analizar y cuantificar los ahorros que se producirían en esta red al aplicar el criterio propuesto en el apartado anterior. El criterio propuesto, como se demuestra en el apartado anterior, si es generalizable para cualquier red ramificada de agua, como bien indica la formulación (hallada en base a la teoría hidráulica).

Figura 3 Red ramificada: caso de estudio



El agua es impulsada mediante una estación de bombeo, situada a la cota 800m, compuesta por una única bomba de 1332,5KW 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.

Las siguientes tablas 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.

Tabla 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

Tabla 2: Distribución de la dotación anual por meses

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

4. 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, tal y como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Discusión de la sectorización para parejas de zonas

Zonas	¿Es favorable bombearlas por separado?
Z ₂ y Z ₃	No
Z ₁ y Z ₃	No
Z ₁ y Z ₄	Si
Z ₃ y Z ₄	Si

Es decir, en la situación óptima de bombeo Z₁ y Z₄ pertenecen a dos sectores diferentes y a su vez, Z₃ y Z₄ también pertenecen a sectores diferentes. Se desprende por ahora que existirán al menos 2 sectores: uno de ellos (SECTOR A) incluirá Z₄ y el otro u otros están todavía por definir. 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 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 concluir 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 la Tabla 4, manteniendo el número de horas originales estipuladas para el bombeo continuo.

Tabla 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

Esta situación además de suponer un ahorro energético, puede también verse beneficiada por la distribución del sistema tarifario 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 con respecto las originales estipuladas para el bombeo continuo, los caudales disminuirán. De esta forma, aunque la sectorización óptima descrita anteriormente no cambiaría, 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 la Tabla 5, el ahorro energético podría ser aún mayor.

Tabla 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

5. Conclusiones

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

Esta comunicación 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 basados en la programación lineal, o similares, deben ser reformulados.

6. Referencias

- Al-Bassam, E., & Maheshwari, G. P. (2011). A new scheme for cooling tower water conservation in arid-zone countries. *Energy*, 36, 3985–3991.
- Castañón, G. (2010). Optimización del regadío. *Cuides*, 4, 181-209.
- Corominas, J. (2009), Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad. *Jornadas de Ingeniería del Agua. 27-28 de Octubre*. CEDEX. Madrid.
- Fernández Diez, J. M. (1987). *Turbinas hidráulicas y bombas centrífugas volumétricas*. Santander: Universidad de Cantabria.
- Granados, A. (1985). *Cálculo de redes colectivas ramificadas de riego a presión*. Madrid: Biblioteca de la E.T.S.I. Caminos, canales y puertos. Politécnica de Madrid.
- Laguna, F. V. (1972). Cálculo de redes de aspersión. *Primeras Jornadas Nacionales sobre Aplicaciones de la Informática a la Ingeniería Civil*. Madrid, Diciembre de 1972.
- Miller, P., Olateju, B., & Kumar, A. (2012). A techno-economic analysis of cost savings for retrofitting industrial aerial coolers with variable frequency drives. *Energy Conversion and Management*, 54, 81-89.
- Pérez R. (1993). Dimensionamiento óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando los elementos de regulación. Disponible en: <http://personales.upv.es/rperez/C3-Fund.pdf>.
- Phipps, C. (1997). *Variable speed drive fundamentals*. Liburn: Fairmont press.
- Rocamora, M. C., Abadía, R., & Cámara, J. M. (2011). *Manual de auditorías energéticas en comunidades de regantes*. 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. *XXVI Congreso Nacional de Riegos*. Huesca, 24-26 de junio de 2008.
- Truyols, S., Hernaiz, A., & Martínez, J. M. (2007). *Organización de empresas para ingeniería civil: teoría y práctica*. Madrid: Delta publicaciones.