

Organización de turnos para la optimación energética de redes colectivas de riego a presión (AGUA Y ENERGÍA)

Raúl Sánchez Calvo

Ingeniero Agrónomo; Profesor de Ingeniería Hidráulica, Grupo de investigación Hidráulica del Riego de la Universidad Politécnica de Madrid

raul.sanchez@upm.es

Francisco V. Laguna Peñuelas

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos; Profesor de Ingeniería Hidráulica, Grupo de investigación Hidráulica del Riego de la Universidad Politécnica de Madrid

he15@caminos.upm.es

Luis Juana Sirgado

Ingeniero Agrónomo; Profesor de Ingeniería Hidráulica, Grupo de investigación Hidráulica del Riego de la Universidad Politécnica de Madrid

luis.juana@upm.es

Alberto Losada Villasante

Ingeniero Agrónomo; Profesor de Ingeniería Hidráulica, Grupo de investigación Hidráulica del Riego de la Universidad Politécnica de Madrid

alberto.losada@upm.es

Guillermo Castañón León

Ingeniero Agrónomo; Profesor de Ingeniería Hidráulica, Grupo de investigación Hidráulica del Riego de la Universidad Politécnica de Madrid

guillermo.castanon@upm.es

Leonor Rodríguez Sinobas

Ingeniera Agrónoma; Profesora de Ingeniería Hidráulica, Grupo de investigación Hidráulica del Riego de la Universidad Politécnica de Madrid

leonor.rodriguez.sinobas@upm.es

María Gil Rodríguez

Ingeniera Agrónoma; Investigadora de Ingeniería Hidráulica, Grupo de investigación Hidráulica del Riego de la Universidad Politécnica de Madrid

maria.gil@upm.es

1. Introducción y objetivos.

Una parte considerable de los costes de explotación en riegos a presión corresponde al consumo de energía en sus sistemas de elevación. Dichos costes se han visto incrementados sustancialmente desde la aplicación efectiva de los contenidos del RD 871/2007 por el que se ajustan las tarifas eléctricas. FENACORE (2009a) manifiesta la preocupación de que el regadío podría llegar a ser insostenible con las tarifas actuales. De hecho, la modificación

de las tarifas ha supuesto un coste al sector, no previsto en la planificación de modernización de regadíos mas reciente, de aproximadamente 50 M€ (FENACORE, 2009b). Por tanto, la reducción del consumo de energía en el regadío contribuirá a la mejora de su competitividad y viabilidad, además de a la sostenibilidad ambiental global.

Respecto a aplicación de la tecnología para reducir el consumo energético, el uso de convertidores de frecuencia en los bombeos a redes de riego es frecuente. Éstos permiten reducir la altura de elevación al valor de consigna previamente establecido mediante la modificación automática de la velocidad de rotación de las bombas.

Por otro lado, en la gestión de redes, es habitual que, el regante, en vez de regar a discreción –riego a la demanda–, pida el agua con antelación y el gestor asigne diariamente un turno a cada una de las peticiones, lo que suele requerir menos energía que si se gestionase mediante riego a la demanda. En este caso, el gestor se enfrenta al problema de organizar los turnos en los que repartir P bocas desde las que se ha pedido previamente el servicio de riego y al de la ejecución de dichos turnos. Es frecuente contar con la posibilidad de manejar las bocas de riego a distancia mediante la tecnología de telecontrol para facilitar la ejecución de los turnos. El uso de la tecnología de la información y comunicación (TIC) ha agilizado el trámite de las peticiones mencionadas, atenuándose así uno de los inconvenientes del riego por turnos por comparación con el riego a la demanda.

Moraleda et al. (2009), a partir de cálculos de múltiples escenarios de demanda en dos redes de distribución a presión para riego, redujeron la energía consumida en las mismas mediante la modificación del número de turnos con los que se operó durante la campaña de riegos. Por otra parte, la tecnología de telecontrol, ampliamente extendida en las redes de riego, podría convertirse en una herramienta que ahorre energía mediante el manejo detallado durante una jornada de riego. Y la reducción del consumo de energía podría ser aún mayor, en consonancia con el nivel tecnológico instalado en el regadío actual.

Este trabajo tiene como objetivo la organización de los turnos específicos de una determinada jornada de riego para minimizar la energía demandada por una red a la vez que se satisfacen las peticiones de riego. Se asume la presencia de tecnología que permita seleccionar y mantener la altura de elevación del bombeo durante cada uno de los turnos. En principio, para cada combinación de bocas de riego que formen parte de un turno, la altura de elevación que demanda una red es distinta.

La tecnología de telecontrol, ya instalada en numerosos regadíos, en teoría posibilita la aplicación práctica de los desarrollos del trabajo. Además de abrir y cerrar las bocas de riego a distancia, transmitiría la altura de elevación necesaria en cabeza de la red durante cada turno al controlador de los convertidores de frecuencia del bombeo.

2. Materiales y métodos.

La resolución del problema planteado se ha abordado combinando técnicas de programación dinámica y de cálculo hidráulico de redes de distribución a presión.

El cálculo hidráulico de la red se ha resuelto bajo la simplificación de considerar caudal desaguado constante en cada boca, hecho que efectivamente puede darse en la práctica, debido al uso extendido de elementos reguladores de presión y limitadores de caudal en las llaves de las bocas. Para un grupo C_j de bocas de riego abiertas simultáneamente durante el turno de riego j , se ha calculado la carga mínima necesaria en cabeza de la red H_{0j} [L] que asegura que todas las bocas del grupo disponen de, al menos, la presión requerida. Este valor se ha calculado a partir de los valores de la carga necesaria en cabeza $H_{0j;i}$ [L] para que exclusivamente la boca i , perteneciente al grupo C_j , disponga de la presión que requiere. El cálculo de la red empleado se define con las ecuaciones que siguen, también conocidas como de la energía:

$$H_{0j;i} = H_i + h_{f_{0-i}}, \forall i \in C_j \quad (1)$$

donde H_i [L] es la carga necesaria en la boca i y $h_{f_{0-i}}$ [L] son las pérdidas de carga desde la cabeza de la red hasta la boca i . En el presente trabajo se ha despreciado el sumando correspondiente a la energía cinética en el cálculo de H_i , que se ha calculado como la suma de la cota de la boca y su presión requerida.

La energía H_{0j} mínima que garantiza la presión disponible en todas las bocas que riegan simultáneamente en el turno j queda determinada por:

$$H_{0j} = \max\{H_{0j,i}\}, \forall i \in C_j \quad (2)$$

Se deduce que H_{0j} es mayor o igual que $H_{0j,i}$.

Para resolver el problema de seleccionar las bocas a incluir en cada uno de los turnos, se ha elaborado un algoritmo basado en la técnica de la programación dinámica. La solución de problemas de optimación mediante dicha técnica se basa en el principio del óptimo enunciado por Bellman a principios de la década de 1950, que dice: "En una secuencia de decisiones óptima, toda subsecuencia ha de ser también óptima" (Dreyfus, 2002). Es decir, la secuencia resultante de eliminar la última decisión incorporada a una secuencia óptima es también óptima (Cormen et al., 2001).

Por último, la energía a suministrar al bombeo de cabeza de una red es mayor que la que requiere la propia red, como consecuencia de que el rendimiento del propio bombeo es menor que la unidad. La energía por unidad de volumen de agua elevada es directamente proporcional a la altura de elevación del bombeo e inversamente proporcional al rendimiento de este último. A pesar de que el rendimiento de un punto de funcionamiento de un bombeo con bombas de velocidad variable se puede predecir (Sánchez et al., 2008), en el presente trabajo no se ha tenido en cuenta para que los análisis queden centrados en el manejo de la red.

2.1. Algoritmo de optimación de turnos.

Se ha considerado que en una jornada de riego se realizan T turnos de igual duración, y que el tiempo de riego requerido para regar desde cada boca es un múltiplo entero de dicha duración. Si el múltiplo en cuestión fuese uno, el tiempo de riego requerido en la boca correspondiente sería igual que la duración del turno, caso en el que la inclusión de la boca debería considerarse en un único turno. Si el múltiplo mencionado fuese dos, el tiempo de riego necesario sería el doble, caso en el que su inclusión debería hacerse en dos turnos. Y así sucesivamente. Asimismo, se ha considerado que, en caso de que una boca deba incluirse en varios turnos, éstos no serán necesariamente correlativos.

El algoritmo formulado se basa en ir introduciendo de manera recursiva una boca i , que aún no tiene turno asignado, en el grupo de bocas C_k del turno k , aquél que menos energía requiere, con objeto de aproximar esta última a la que requiere el grupo de bocas C_m , siendo m el turno que más energía requiere antes de la introducción de la boca i . El turno k y el m se determinan mediante:

$$k = j \mid \min\{H_{0j}\}, \forall j \in [1..T] \quad (3)$$

y

$$m = j \mid \max\{H_{0j}\}, \forall j \in [1..T] \quad (4)$$

A continuación, se introduce aquella boca sin turno aún asignado que dé lugar al mínimo valor de energía que sobrepase a la que requiere el turno m , que es el que más energía requiere en cabeza de la red. Y, dado que varias bocas podrían dar lugar al mismo valor de energía requerida en cabeza de la red, en ese caso, la boca i a seleccionar será la que requiera la máxima energía en cabeza de la red para que el requisito de presión exclusivamente en la misma sea satisfecho.

Si la introducción de al menos una boca i da lugar a una energía en cabeza de la red que supera la del turno H_{0m} que más requiere, el nuevo grupo de bocas del turno será ahora el que cumpla:

$$C_k = C_{k,i} \mid (\max\{H_{0k,i}\} \mid \min\{H_{0k,i}\}), \forall i \notin C_k \quad (5)$$

donde $C_{k,i}$ representa la introducción de la boca i en el grupo de bocas C_k , $H_{0k,i}$ es la energía mínima necesaria en cabeza de la red del grupo de bocas $C_{k,i}$, y $H_{0k,i}$ es la energía que requiere exclusivamente la boca i en cabeza de la red.

Si, por el contrario, al introducir todas las bocas i en C_k ninguna diese lugar a la superación de H_{0m} , el nuevo grupo de bocas del turno será el que cumpla:

$$C_k = C_{k,i} \mid (\max\{H_{0k,i}\} \mid \max\{H_{0k,i}\}), \forall i \notin C_k \quad (6)$$

En este caso, la ecuación (6) debe ser empleada en lugar de la (5).

Por último, en el comienzo del proceso aún no hay boca alguna asignada a ningún turno. Es decir:

$$C_j = \emptyset, \forall j \in [1..T] \quad (7)$$

No es posible la aplicación de la expresión (3), puesto que los turnos no requieren aún energía alguna. El proceso descrito requiere la introducción de una boca en cada uno de los T turnos. El cumplimiento del principio del óptimo exige introducir las bocas que más difícilmente cumplan (5). Por tanto, la primera que se introduce en cada turno es la que más energía requiere en cabeza de la red cuando es la única abierta. Lo que se expresa:

$$C_j = i \mid \max\{H_{0\emptyset,i}\}, \forall i \in P \circ \forall j \in [1..T] \quad (8)$$

2.2. Orden del algoritmo.

El orden de un algoritmo indica cómo variará el consumo de recursos de cálculo para resolver un problema conforme aumenta la complejidad de este último. En este caso, el grado de complejidad debe entenderse que es el número de bocas con que cuenta una red.

La aplicación del algoritmo requiere disponer del par de valores de H_{0j} y de $H_{0j,i}$ cada vez que se introduce una boca i en el turno C_j . El cálculo de la red para un determinado grupo de bocas C_j podría no tener que repetirse en caso de que dicho cálculo hubiese sido realizado alguna vez con anterioridad y dichos valores hubiesen sido almacenados. El cómputo de las operaciones necesarias en la ejecución del algoritmo se muestra a continuación.

En primer lugar, en la aplicación de la expresión (8) son requeridos P cálculos de la red y seleccionar en el mismo los T valores mayores de H_{0j} . Estos cálculos de la red se corresponden con todas y cada una de las P bocas cuando únicamente está abierta una de ellas. Y el número de comparaciones necesarias N para seleccionar los mayores valores es:

$$N_1 = \sum_{i=1}^{i=T} (P - i) = O(P) \quad (9)$$

El orden O del algoritmo en este primer paso es lineal con respecto a P , por lo que la resolución de un problema con el doble de bocas con petición de riego implicará el doble de recursos a emplear.

A continuación se asigna una boca i de las $P-T$ bocas que quedan por introducir mediante la expresión (5) o la (6), según el caso. Previamente es necesario conocer el turno que menos energía requiere y el que más. El número de comparaciones necesarias por cada boca a introducir es:

$$N_{2a} = \sum_{i=1}^{i=P-T-1} [(T-1) + (T-1)] = O(T) \quad (10)$$

El orden de esta parte del paso es lineal respecto al número de turnos.

Y el número de comparaciones entre las energías $H_{0k,i}$ es:

$$N_{2b} = \sum_{i=1}^{i=P-T-1} (P-T-i) = O(P-T) \quad (11)$$

El orden de esta parte del paso es lineal con respecto a $(P-T)$.

Y el número de comparaciones entre las energías $H_{0k,i}$ depende del número de bocas i cuya introducción dé lugar a la energía necesaria mínima en cabeza de la red. El caso más desfavorable se dará cuando todas las bocas i den lugar al valor mínimo, y entonces el número de comparaciones también viene dado por (11).

Puede verse que el orden del algoritmo, en su primera parte, es lineal con respecto al número de turnos T , la de selección de la primera boca a introducir en cada turno, y, en su segunda parte, es también lineal con respecto al número de bocas P con petición de riego y a la diferencia $(P-T)$.

Por último, dicho algoritmo, también tiene interés para su aplicación a la gestión de redes de riego alimentadas desde balsas y depósitos. Aplicado de manera recursiva, permite determinar, en caso de tener carga constante H_0 [L] en cabeza de la red, la determinación de las combinaciones de bocas C_j que minimizan el número de turnos necesarios para satisfacer las demandas solicitadas. A partir de un valor inicial del número de turnos se han determinado las combinaciones óptimas que minimizan la altura en cabeza mediante la aplicación completa del algoritmo. Si todas las alturas necesarias H_{0j} correspondientes a cada C_j son menores que H_0 , ese valor del número de turnos es viable, aunque quizá no sea aún el mínimo y pueda disminuirse. Si hubiese algún H_{0j} que fuese mayor que H_0 , el número de turnos debe ser aumentado puesto que no sería viable. La solución será aquella que, siendo viable, presenta el menor número de turnos.

3. Resultados y discusión.

A efectos ilustrativos y de contraste, el algoritmo descrito en el apartado anterior se ha aplicado a las dos redes de la Figura 1. Ambas redes están alimentadas por un bombeo, situado en el nudo 0, y constan de ocho bocas, situadas en los nudos 1 a 8. Todos los nudos se encuentran al mismo nivel y en cada una de las bocas se requiere una altura de presión de 25 m y un caudal de $50 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Respecto a la identificación de los tramos, aquél que precede a un nudo queda identificado por dicho nudo. En ambas redes, los diámetros considerados, a efectos de cálculos de pérdidas de carga, han sido de $200 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ para los tramos 1 y 2, de $175 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ para los tramos 3 y 4 y, por último, de $150 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ para los tramos 5, 6, 7 y 8. Solamente se han considerado las pérdidas de carga debidas a los tramos uniformes de tubería, y se han calculado con un valor de aspereza de arena equivalente de $50 \cdot 10^{-5} \text{ m}$.

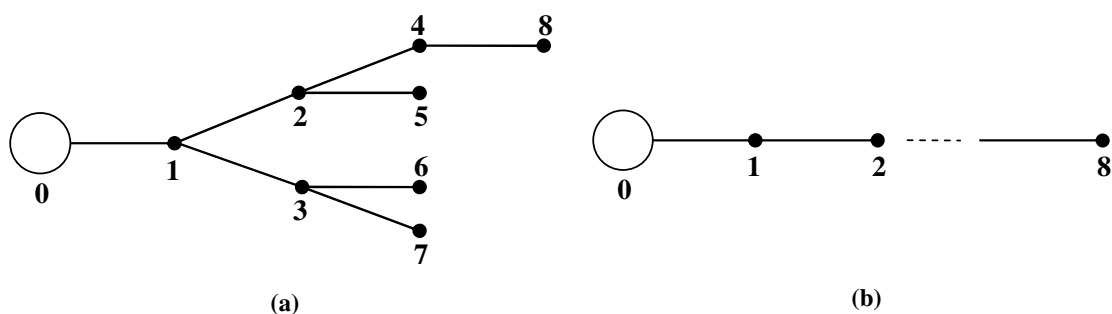


Figura 1. Esquema en planta de las redes empleadas para verificar la utilidad del algoritmo.

Se ha aplicado el método propuesto para organizar tres turnos de riego para atender una supuesta demanda de riego desde cada una de las ocho bocas de igual duración entre sí e igual a la de un turno.

3.1. Red ramificada de la Figura 1(a).

En la red de la Figura 1(a), la aplicación del algoritmo sigue la secuencia que se muestra en la Tabla 1. Las agrupaciones de bocas en los tres turnos son: $C_1 = 1; 5; 6$ con $H_{01} = 50,3 \text{ m}$, $C_2 = 2; 4; 7$ con $H_{02} = 50,3 \text{ m}$ y, por último, $C_3 = 3; 8$ con $H_{03} = 43,8 \text{ m}$. Obviando el rendimiento que tendrá el bombeo, la energía media por unidad de peso de líquido elevado que requerirá la red en la jornada de riego considerada será de 48,1 m.

Paso 0		Paso 1		Paso 2		Paso 3		Paso 4	
C_j	H_{0j}	C_j	$H_{0j}(H_{0j;i})$	C_j	$H_{0j}(H_{0j;i})$	C_j	$H_{0j}(H_{0j;i})$	C_j	$H_{0j}(H_{0j;i})$
1	26,6	6:1	42,2(31,5)	7:1	42,2(31,5)	8:1	43,8(31,5)	6;5;1	50,3(39,6)
2	28,3	6:2	42,2(33,1)	7:2	42,2(33,1)	8:2	48,7(38,0)	6;5;2	53,5(46,0)
3	29,9	6:3	52,0(44,6)	7:3	52,0(44,6)	8;3	43,8(34,8)	-	-
4	31,6	6:4	42,2(36,4)	7;4	42,2(36,4)	-	-	-	-
5	35,7	6;5	42,2(40,6)	-	-	-	-	-	-
$C_1=6$	37,4	$C_1=6;5$	42,2	$C_1=6;5$	42,2	$C_1=6;5$	42,2	$C_1=6;5;1$	50,3
$C_2=7$	37,4	$C_2=7$	37,4	$C_2=7;4$	42,2	$C_2=7;4$	42,2	$C_2=7;4$	42,2
$C_3=8$	39,0	$C_3=8$	39,0	$C_3=8$	39	$C_3=8;3$	43,8	$C_3=8;3$	43,8

Tabla 1. Secuencia de decisión en la formación de turnos de la red de la Figura 1(a). La energía por unidad de peso está expresada en m.

En el paso 0 se introduce en cada turno una boca. Se introducen, en cada uno de los turnos, precisamente, aquellas bocas que más dificultarán la aproximación de la energía del turno que menos energía requiere a la del que más requiere. En cada turno, se introduce la boca que da lugar al mayor requisito de energía cuando es la única en la red que desagua. En este caso, son las bocas **6**, **7** y **8** las que más energía requieren, y, por tanto, una de ellas pasa a formar parte de uno de los turnos. En el paso 1 se introduce, en el turno que menos energía requiere, en este caso C_1 o C_2 indistintamente, aquella boca que da lugar a la mínima energía requerida. En este caso, las bocas **1**, **2**, **4** y **5** son las que requieren la mínima energía en cabeza de la red, 42,2 m. Por otra parte, la energía que, en exclusiva, requiere la boca **5**, 40,6 m, es la mayor de todas ellas. La aplicación recurrente de este procedimiento hasta agotar las bocas sin turno asignado permite llegar a la solución.

La elección de la boca **7**, en vez de la **6**, en el turno C_1 durante el paso 0 conllevaría que, en la solución óptima, dichas bocas aparecerían intercambiadas. En este caso, el problema tiene varias soluciones. En ellas se intercambian precisamente estas dos bocas. Sin embargo, aunque en el paso 3 hay dos combinaciones que requieren la mínima energía en cabeza, la elección de una u otra combinación para continuar con el algoritmo siempre lleva a la misma solución final. En este caso no hay varias soluciones. Puede comprobarse así que el hecho de tener dos bocas idénticas en lo que respecta al comportamiento hidráulico de la red, en este caso la 6 y la 7, implica que habrá dos soluciones óptimas.

En la Tabla 2 pueden apreciarse la variación de la energía media requerida en cabeza de la red de algunos turnos distintos de los de la solución óptima por comparación con ésta, que se muestra en la primera fila.

C_1	C_2	C_3	$\overline{H_0}$	$\overline{\Delta H_0(\%)}$
1;5;6	2;4;7	3;8	48,1	0
2;5;6	1;4;7	3;8	49,2	2,2
2;5;6	3;4;7	1;8	52,5	9,0
3;5;6	2;4;7	1;8	51,4	6,8
3;5;6	1;4;7	2;8	53,0	10,1
3;4;6	1;5;7	2;8	53,0	10,1
3;4;6	1;2;7	5;8	53,0	10,1
2;3;6	1;4;7	5;8	53,0	10,1
2;3;6	1;5;7	4;8	53,3	16,9
1;3;6	2;5;7	4;8	57,3	19,1

Tabla 2. Comparación con otros turnos no óptimos en la red de la Figura 1(a). La energía media por unidad de peso está expresada en m.

Queda comprobado que la aplicación del algoritmo propuesto a la red ramificada de la Figura 1(a) proporciona una solución óptima. Asimismo, puede apreciarse que los ahorros de energía podrían ser considerables.

3.2. Ramal de la Figura 1(b).

En la red de la Figura 1(b), la aplicación del algoritmo se resume en la secuencia que se muestra en la Tabla 3. Las agrupaciones de bocas en los tres turnos son: $C_1 = 2; 3; 6$ con $H_{01} = 85,3$ m, $C_2 = 1; 4; 7$ con $H_{02} = 94,5$ m y, por último, $C_3 = 5; 8$ con $H_{03} = 115,9$ m. Y la energía media por unidad de peso de líquido elevado que requerirá la red durante la jornada considerada será de 98,6 m.

Paso 0		Paso 1		Paso 2		Paso 3		Paso 4	
C_j	H_{0j}	C_j	$H_{0j}(H_{0j;i})$	C_j	$H_{0j}(H_{0j;i})$	C_j	$H_{0j}(H_{0j;i})$	C_j	$H_{0j}(H_{0j;i})$
1	26,6	6;1	54,6(31,5)	7;1	62,0(31,5)	8;1	69,4(31,5)	6;3;1	77,3(39,6)
2	28,3	6;2	59,4(38,0)	7;2	66,8(38,0)	8;2	74,3(38,0)	6;3;2	85,3(54,1)
3	31,5	6;3	69,2(51,1)	7;4	84,4(64,2)	8;5	115,9(93,7)	-	-
4	34,9	6;4	79,0(54,2)	7;5	108,5(93,7)	-	-	-	-
5	42,3	6;5	101,1(93,7)	-	-	-	-	-	-
$C_1=6$	49,7	$C_1=6;3$	69,2	$C_1=6;3$	69,2	$C_1=6;3$	69,2	$C_1=6;3;2$	85,3
$C_2=7$	57,1	$C_2=7$	57,1	$C_2=7;4$	84,4	$C_2=7;4$	84,4	$C_2=7;4$	84,4
$C_3=8$	64,6	$C_3=8$	64,6	$C_3=8$	64,6	$C_3=8;5$	115,9	$C_3=8;5$	115,9

Tabla 3. Secuencia de decisión en la formación de turnos de la red de la Figura 1(b). La energía por unidad de peso está expresada en m.

El proceso de aplicación del algoritmo ha sido análogo al descrito en el apartado 3.1.

En la Tabla 2 pueden apreciarse la variación de la energía media requerida en cabeza de la red de algunos turnos distintos de los de la solución óptima por comparación con ésta, que se muestra en la primera fila.

C_1	C_2	C_3	$\overline{H_0}$	$\overline{\Delta H_0(\%)}$
2;3;6	1;4;7	5;8	98,6	0
2;3;6	1;5;7	4;8	98,6	0
1;3;6	2;5;7	4;8	98,6	0
1;5;6	2;4;7	3;8	98,6	0
2;5;6	1;4;7	3;8	98,6	0
2;5;6	3;4;7	1;8	101,8	3,3
3;5;6	2;4;7	1;8	101,8	3,3
3;5;6	1;4;7	2;8	100,8	2,2
3;4;6	1;5;7	2;8	100,8	2,2
3;4;6	1;2;7	5;8	100,8	2,2
2;3;5;6	1;4;7	8	105	6,5
2;3;6	1;4;5;7	8	106,1	7,7

Tabla 2. Comparación con otros turnos no óptimos en la red de la Figura 1(b). La energía media por unidad de peso está expresada en m.

3.3. Número de turnos mínimo en redes con altura constante en cabeza.

Se ha planteado el problema de planificar una demanda de riego desde las ocho bocas de la red de la Figura 1(a), con un tiempo de riego idéntico en cada una, cuando un depósito con nivel libre a la cota 75 m alimenta dicha red. La aplicación del algoritmo determina que el número mínimo de turnos sería dos y las combinaciones de bocas serían $C_1 = 2; 3; 6; 8$ y $C_2 = 1; 4; 5; 7$, con las alturas mínimas correspondientes $H_{01} = 71,4$ m y $H_{02} = 64,7$ m, respectivamente.

A la vista de los resultados mostrados en los apartados 3.1 y presente, puede decirse que, para $50,3 < H_0 \leq 71,4$, y para una petición de riego desde las ocho bocas de la red, las combinaciones de bocas aquí mostradas serán el resultado del algoritmo, es decir dos turnos.

Sin embargo, aunque el problema ha sido resuelto, puede que no lo haya sido de manera óptima. La solución al problema implica que el máximo de las energías que requieren los turnos sea menor o igual que la carga disponible. Sin embargo, el algoritmo no proporciona ese resultado, sino que proporciona la menor energía

conjunta en todos los turnos. No obstante, en la mayoría de los casos puede decirse que el problema habrá quedado resuelto de manera óptima.

4. Conclusiones.

Se ha propuesto un algoritmo de orden lineal para organizar los turnos desde las bocas sobre las que existe una petición de riego que, junto con el empleo de bombeos con velocidad de giro variable, permite optimar la energía consumida en redes colectivas de riego a presión. Dicho algoritmo es una herramienta que le permite al gestor determinar los turnos óptimos de manera mecánica.

El traslado de los resultados de dicho algoritmo a las instalaciones de campo se verá favorecido por la disponibilidad de tecnología de telecontrol. Ésta deberá, por un lado, establecer en el bombeo la carga necesaria en cada turno H_{0j} , mediante la sintonía de la presión de consigna inmediatamente aguas abajo del bombeo y, por el otro, abrir y cerrar las llaves de las bocas oportunas.

5. Agradecimientos.

Los autores del trabajo agradecen al Ministerio de Educación y Ciencia el apoyo prestado a través del proyecto AGL2008-00153/AGR.

6. Referencias.

- Cormen, T. H.; Leiserson, C. E.; Rivest, R. L., Stein, C., 2001, *Introduction to algorithms*, (2nd ed.). MIT Press and McGraw-Hill.
- Dreyfus, S., 2002, *Richard Bellman on the birth of Dynamic Programming*, Operation Research, 50(1), 48-51.
- FENACORE, 2009a, *El regadío y el mercado libre de energía*, Boletín intercuenas, núm. 19.
- FENACORE, 2009b, *La aplicación de un IVA reducido, casi una realidad*, Boletín intercuenas, núm. 20.
- Moraleda, D. A.; Córcoles, J. I.; Martínez, A.; Charco, J. R.; Planells, P.; Tarjuelo, J. M.; Moreno, M.A., 2009, *Determinación de turnos óptimos en redes de riego como medida de eficiencia energética*, comunicación XXVII Congreso Nacional de Riegos, Consejería de Agricultura de la Región de Murcia, AERYD y CERYD.
- Sánchez, R.; Juana, L.; Laguna, F. V.; Losada, A.; Rodríguez-Sinobas, L.; Castañón, G., 2008, *Consumo de energía con bombas de velocidad variable*, comunicación XXVI Congreso Nacional de Riegos, AERYD y CERYD.