

# ***Indicadores energéticos para aplicar estrategias inteligentes en redes de riego a presión***

*Raúl Sánchez<sup>1</sup>, Luis Juana<sup>1</sup>, Leonor Rodríguez-Sinobas<sup>1</sup>, Francisco V. Laguna<sup>1</sup>, Guillermo Castañón<sup>1</sup>, María Gil<sup>1</sup>, Javier Benítez<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>. *HIDER Grupo de investigación Hidráulica del Riego, Universidad Politécnica de Madrid*  
[raul.sanchez@upm.es](mailto:raul.sanchez@upm.es), [gi.hider@upm.es](mailto:gi.hider@upm.es)

## **Resumen**

El coste de la energía es, en la actualidad, una de las principales preocupaciones de determinadas zonas regables. Aquellos proyectos de mejora de regadíos, que consistieron fundamentalmente en la sustitución de las redes de distribución en lámina libre por redes a presión, se ven ahora en una situación en la que su rentabilidad financiera se pone en duda y, como consecuencia, su sostenibilidad. El relativamente reciente comienzo del incremento del precio de la energía y otros cambios, como por ejemplo los acaecidos en la política agraria común PAC o la eliminación de las tarifas eléctricas estacionales para riego, han provocado que los proyectos estén operando en puntos alejados de las previsiones iniciales, en los que la rentabilidad social, económica y ambiental quedaba justificada.

Ante esta situación, las comunidades de regantes están abordando cambios. Entre estos, destacan, por un lado, las actuaciones sobre las infraestructuras, tales como modificación de equipos de bombeo, reducción de la resistencia al flujo de determinados tramos o zonas de las redes. Por el otro, están abordando cambios en la gestión de estas últimas. En algunos casos, en el riego a la demanda, a través de la aprobación del colectivo, se pierde cierta libertad con la intención de reducir la factura energética.

Sin embargo, al final, es el propio regante el que tiene que actuar. En algunos casos, se cambian los cultivos por otros de cosecha temprana o incluso se dejan de regar parte de las tierras regables.

En esta situación, que se puede calificar de frágil, por un lado, conviene identificar aquellas actuaciones que por unidad monetaria invertida producirán el máximo beneficio. Y, por el otro, aquellas que por unidad monetaria perdida en el beneficio redunden en una reducción máxima de los costes.

Este trabajo trata de centrar el objetivo general arriba enunciado al ámbito de las redes de riego a presión. Si bien hay ya algunos trabajos sobre auditorías energéticas, su aplicación no permite desarrollar el objetivo de este trabajo, ya que van dirigidas hacia la recopilación y elaboración de información. Por este motivo, se proponen y analizan indicadores de rendimiento basados en el balance energético tanto de las infraestructuras, desglosados según la funcionalidad de sus elementos, como del manejo y las condiciones de funcionamiento.

## **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.

Sánchez et al. (2009) proponen un algoritmo basado en programación dinámica para la organización de los turnos específicos de una determinada jornada de riego para minimizar la energía consumida por un bombeo directo a la red a la vez que se satisfacen las peticiones de riego. Asumen la presencia en el bombeo de la tecnología que permita elevar a la altura de elevación específica de 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 estos desarrollos. 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. Por otra parte, con el mismo objetivo, aunque no para realizar una programación inmediata, se hay varios trabajos basados en algoritmos genéticos, tales el de Jiménez-Bello et al. (2010). Otra metodología, como la aplicada por Carrillo Cobo et al. (2011) y Rodríguez Díaz et al. (2009), es la de agrupar bocas de riego con características similares en cuanto a cota y requerimientos de presión.

En determinadas redes con suficiente entidad, la aplicación de medidas de ahorro energético como las arriba mencionadas, de manera indiscriminada, podrían requerir el tiempo suficiente como para que no fuesen viables. Por ese motivo, interesa identificar aquellas situaciones en las que merece la pena abordar este tipo de actuaciones para el ahorro energético.

El presente trabajo tiene como objetivo el presentar una metodología que permita, en el ámbito de los riegos a presión, identificar aquellas actuaciones que por unidad monetaria invertida producirán el máximo beneficio. Y, por el otro, aquellas que por unidad monetaria perdida en el beneficio redunden en una reducción máxima de los costes. En las redes de riego a presión, y ya como objetivos particulares, se pretende proponer y analizar indicadores de rendimiento basados en el balance energético tanto de las infraestructuras, desglosados según la funcionalidad y ubicación de sus elementos, como del manejo y las condiciones de funcionamiento.

En diversos trabajos tales como los de Abadía et al. (2008), IDEA (2008) y Moreno et al. (2010) se usan indicadores que de manera agregada en el periodo de tiempo considerado caracterizan el funcionamiento de la red y los bombeos. Se basan en la medición de variables acumulativas, tales como el volumen de agua inyectado a red o la energía consumida. Sin embargo, dada su naturaleza, no permiten hacer análisis sobre situaciones concretas y servir de guía hacia las acciones oportunas. No obstante, permiten obtener valores para comparar sistemas entre sí, aunque infraestructuras y manejo de manera conjunta.

## 2 Materiales y métodos

### 2.1 Coste de energía del bombeo de una comunidad de regantes

La facturación del suministro de energía, que se realiza en unidades monetarias, suele comprender varios términos aditivos. Destacan dos de ellos, el de potencia  $C_P$ , que depende del valor de la potencia contratada y el de energía consumida  $C_E$ , que depende del precio unitario de la energía y la energía consumida, según:

$$C_E = \sum c_{Ej} \cdot E_j \quad (1)$$

donde  $c_{E_j}$  es el coste unitario de la energía y  $E_j$  es la energía consumida, ambos durante las condiciones<sup>1</sup> caracterizadas por  $j$ . Hay otro término, el de penalización debido a que la potencia consumida supere de manera continua durante cierto tiempo el valor de la potencia contratada. Este término de penalización está relacionado con  $C_p$  y ambos son los que dan lugar al coste efectivo de la potencia contratada. A mayor valor de potencia contratada el sumando del coste de potencia  $C_p$  es mayor, pero el riesgo de tener que asumir una penalización por exceso de potencia consumida se reduce.

Por otro lado, la energía consumida  $E_j$  en el periodo de facturación de duración  $T_j \in j$ , tiempo en el que se aplican las condiciones caracterizadas por  $j$  a efectos de facturación, puede determinarse a partir de la potencia instantánea absorbida por los equipos de bombeo o potencia facturable en el bombeo  $P_{fb}$ :

$$E_j = \int_0^{T_j} P_{fb} \cdot dt = \gamma \int_0^{T_j} \frac{Q \cdot H_b}{\eta_b} \cdot dt \quad (2)$$

donde  $Q$  es el caudal elevado,  $H_b$  la altura de elevación y  $\eta_b$  el rendimiento del bombeo.

La comunidad de regantes asume el coste de la energía y lo repercute entre sus miembros.

## 2.2 Destino de la energía en una red de distribución

Una red de distribución se alimenta en uno o, quizás, unos pocos puntos y entrega el agua en multitud de puntos distribuidos por la zona regable, precisamente allí donde se encuentran las parcelas de cultivo. En los puntos de alimentación la lámina libre de agua dispone de una cota  $z_0$  y, en la mayor parte de los casos, el agua ve incrementado su potencial gracias a un bombeo en una cantidad  $H_b$ . Hasta llegar a las bocas de riego, puntos de entrega, el agua debe circular por las conducciones y atravesar los elementos de regulación.

El flujo en un conducto implica rozamiento y, como consecuencia, disipación de energía. En lo que respecta a los conductos, las redes colectivas de distribución a presión constan, por un lado, de tuberías y singularidades de forma geométrica fija y, por el otro, de elementos automáticos reguladores de presión y limitadores de caudal. Las pérdidas de carga en los mismos deben ser consideradas de manera distinta.

### 2.2.1 Pérdidas de carga en las conducciones de forma geométrica fija

En el tramo  $k$  de conducción, que comprende una tubería y puntos singulares, las pérdidas de carga se expresan:

$$h_{fk} = \left( f_k \frac{L}{D} + K_k \right) \frac{U^2}{2g} \quad (3)$$

Donde  $U$  es la velocidad media en la tubería, se calcula con la relación entre el caudal  $Q$  y la sección de la tubería. Los valores de los coeficientes adimensionales de pérdidas de carga localizadas  $K$  han de estar referidos precisamente a dicha sección.

### 2.2.2 Pérdidas de carga en los elementos automáticos reguladores de presión y caudal

Estos elementos funcionan automáticamente y disipan la energía que excede sobre el valor de consigna. En las redes de riego, suelen instalarse en las bocas, con objeto de que el riego se lleve a cabo bajo condiciones de presión contratada. No obstante, aunque con escasa frecuencia, en determinados casos se ha recurrido a instalar equipos reguladores de presión en puntos distintos de las bocas. La energía disipada en la boca  $i$  es:

$$h_{fri} = H_i - H_{ri} = \frac{p_i - p_{ri}}{\gamma} \quad (4)$$

donde  $H_{ri}$  es la energía por unidad de peso correspondiente a la presión regulada. El valor expresado se corresponde con el funcionamiento ideal y se producirán si  $H_i > H_{ri}$ . Dicha diferencia es igual a la diferencia de alturas de presión.

---

<sup>1</sup> La relativamente reciente liberalización del mercado finalista de la energía eléctrica, donde son los acuerdos privados entre el suministrador y el consumidor los que rigen el precio de la energía, ha provocado que sean multitud los factores ha tener en cuenta para determinar el precio unitario correspondiente. No obstante, aspectos tales como hora, fecha y potencia, entre otros, siguen teniendo importancia.

### 2.2.3 Rendimiento energético de la red

La potencia disipada por el conjunto de los elementos de una red compuesta por  $n$  tramos y con  $m$  bocas en funcionamiento es:

$$P_d = \gamma \left[ \sum_{k=1}^n h_{fk} \cdot Q_k + \sum_{i=1}^m (H_i - H_{ri}) \cdot Q_i \right] = P_{dc} + P_{dr} \quad (5)$$

Comprende la potencia disipada en los elementos de conducción  $P_{dc}$  y en los de regulación  $P_{dr}$ . El primer sumando tiene en cuenta los factores que dan lugar a pérdidas de carga en los elementos de conducción, es decir, distancia recorrida hasta las bocas en funcionamiento, tamaño de los conductos y distribución de las bocas en funcionamiento. El segundo contabiliza la diferencia entre la energía disponible  $H_i$  y la requerida  $H_{ri}$  en las bocas en funcionamiento. Adviértase que una boca o tramo que no esté en funcionamiento el caudal  $Q_k$  o  $Q_i$ , según corresponda, será nulo y, como consecuencia, la potencia disipada también.

Por otro lado, en cabeza de la red, el bombeo, en su caso, suministra a esta última una potencia

$$P_b = \gamma \cdot H_b \cdot \sum_{i=1}^m Q_i \quad (6)$$

donde  $H_b$  es el incremento de energía por unidad de peso que proporciona el bombeo y dependerá de las características del bombeo y de su manejo, que, seguramente se realizará automáticamente siguiendo una programación.

Asimismo, el campo de fuerza gravitatoria proporciona o requiere, según el caso, la potencia

$$P_g = \gamma \cdot \sum_{i=1}^m (z_0 - z_i) \cdot Q_i \quad (7)$$

donde  $z_i$  es la cota de cada boca y  $z_0$  es la de la lámina libre de agua en origen. En caso de ser positivo significa que el campo gravitatorio aporta potencia, el potencial gravitatorio es mayor en origen que en destino.

Se debe a que los puntos de origen y entrega del agua están a diferente cota. Tal y como está expresada  $P_g$  en la ec. (7), se ha asumido que el punto de entrega a la red es único, situación habitual en las redes de distribución para riego a presión.

Por tanto, la potencia entregada a la red es

$$P_0 = P_b + P_g \quad (8)$$

Por otro lado, la potencia útil, es decir, una vez regulado, entregada al conjunto de las bocas es:

$$P_e = \sum_{i=1}^m p_{ri} \cdot Q_i \quad (9)$$

En el cálculo de la potencia útil, no se contemplan aquellas situaciones en las que la presión disponible  $p_i$  es menor que la requerida  $p_{ri}$ . Se estaría produciendo un funcionamiento en el que la calidad del suministro no cumpliría los requisitos mínimos de entrega en las bocas.

La potencia entregada a las bocas también puede expresarse

$$P_e = \gamma \left\{ \sum_{i=1}^m [H_b + (z_0 - z_i)] \cdot Q_i - \sum_{k=1}^n h_{fk} \cdot Q_k - \sum_{i=1}^m (H_i - H_{ri}) \cdot Q_i \right\} \quad (10)$$

$$P_e = P_0 - P_{dc} - P_{dr} = P_b + P_g - P_{dc} - P_{dr} \quad (10')$$

Una vez desglosadas las diferentes potencias, que conviene tener presente que tienen carácter instantáneo, dado que están asociadas a una situación de demanda determinada, el rendimiento de la red  $\eta_r$  ya puede definirse como la relación entre la potencia entregada en las bocas y la suministrada en la red, según:

$$\eta_r = \frac{P_e}{P_0} = 1 - \frac{P_{dc}}{P_0} - \frac{P_{dr}}{P_0} \quad (11)$$

El bombeo, por su parte, presenta también un rendimiento que, para una estación de bombeo dada y una programación del funcionamiento de sus elementos dada, depende esencialmente del caudal elevado (Sánchez et al., 2008). El rendimiento del bombeo  $\eta_b$  se define como:

$$\eta_b = \frac{P_b}{P_{fb}} \quad (12)$$

donde  $P_{fb}$  es la potencia facturable en concepto de bombeo.

El producto de  $\eta_r$  y  $\eta_b$  da lugar al rendimiento del conjunto red y bombeo.

A efectos de evaluar cómo se reparte la potencia del bombeo, se presenta la relación entre la potencia entregada en las bocas, que estaría en proporcionalidad con la parte de los ingresos por operación relativos al volumen

entregado y la potencia facturable de bombeo, que determinará los costes de operación. A esta relación se le ha denominado *indicador de potencia entregada-consumida Pec*.

$$Pec = 1 + \frac{P_g}{P_b/\eta_b} - \frac{P_{dc}}{P_b/\eta_b} - \frac{P_{dr}}{P_b/\eta_b} \quad (13)$$

Puede apreciarse que, dado que  $P_g$  puede ser positivo o negativo, según la cota de las bocas respecto de la lámina origen del agua, el valor de la relación  $Pec$  puede ser mayor que la unidad, lo que no puede ocurrir con los rendimientos arriba mencionados.

Por otra parte, no tiene sentido el coeficiente  $Pec$  en aquellas redes de riego que no tengan bombeo, como las que cuentan con una balsa elevada. No obstante, tal vez esa balsa elevada es llenada a través de un bombeo, por lo que el concepto de potencia de bombeo facturable  $P_{fb}$  queda identificado.

Es lógico pensar que el gestor de la red tratará de operar la red y el bombeo para abastecer la demanda tratando de maximizar el valor de  $Pec$ .

#### 2.2.4 Influencia de las fugas en el rendimiento de la red

En este apartado, se modifican las ecuaciones del apartado anterior teniendo en cuenta las fugas. A pesar de que estas son dispersas, se consideran mediante un valor agregado de caudal de fuga  $Q_f$ . Dado que las fugas se producen a través de orificios, y cuya sección puede variar con la presión, es precisamente esta última variable la que más influencia tendrá sobre el valor del caudal fugado. Por tanto, este valor dependerá de la situación en la que esté operando la red, por lo que  $Q_f$  debe considerarse también como una variable que varía en el tiempo.

En relación a la potencia de bombeo, puede decirse que el caudal de fuga incrementa el caudal que es demandado por las bocas. A priori, podría pensarse que la presencia de las fugas sería equivalente a que hubiese una boca más que demandase un caudal  $Q_f$ . No obstante,  $H_b$  se verá incrementada porque a mayor caudal en una conducción, las pérdidas de carga son también mayores. Este incremento aparecerá indirectamente en los valores de presión de consigna en el bombeo, que el gestor de la red se ve obligado a elevar por el hecho de que el incremento mencionado en las pérdidas de carga provoca que, ante determinadas agrupaciones de bocas abiertas, algunos regantes no dispongan de la presión requerida  $p_{ri}$ . La ec. (6) queda modificada en la forma:

$$P_b = \gamma \cdot H_b \cdot (Q_f + \sum_{i=1}^m Q_i) \quad (14)$$

El caudal fugado, también sometido a la acción del campo gravitatorio, recibe o debe aportar ahora una potencia. La inclusión de este término considerando  $F$  fugas, con un caudal en cada una  $Q_{fi}$  a una cota  $z_{fi}$ , en la ec. (7) permite expresar esta potencia según:

$$P_g = \gamma \cdot [\sum_{l=1}^F (z_0 - z_{fl}) \cdot Q_{fl} + \sum_{i=1}^m (z_0 - z_i) \cdot Q_i] \quad (15)$$

Dada la complejidad de localizar y cuantificar las fugas, puede ser conveniente hablar del caudal  $Q_f$  del conjunto de fugas a la cota promedio  $\bar{z}_f$ , y de manera simplificada, la potencia que recibe o que hay que aportar debido a la acción del campo gravitatorio, se expresa:

$$P_g = \gamma \cdot [(z_0 - \bar{z}_f) \cdot Q_f + \sum_{i=1}^m (z_0 - z_i) \cdot Q_i] \quad (15')$$

Sin duda, el valor de  $\bar{z}_f$  presenta dificultades para su determinación, más aún si se tiene en cuenta que seguramente cambiará en el tiempo con los cambios debidos a la operación de la red.

Puede observarse que el valor  $(z_0 - \bar{z}_f)$  determina si la fuga incrementa o reduce  $P_g$ . Este valor puede servir de indicio para determinar aquellas fugas sobre las que es más rentable actuar<sup>2</sup>, aunque será preferible analizarlo con el resto de indicadores, especialmente con  $Eec$ .

Puesto que la energía no es el único recurso en juego, hay que hablar también del *indicador agua entregada en relación a la introducida Aei*, que se ha definido como:

$$Aei = \frac{\sum_{i=1}^m Q_i}{Q_f + \sum_{i=1}^m Q_i} \quad (16)$$

Es menor o igual que la unidad. Precisamente, en una red sin fugas es igual al último valor.

<sup>2</sup> Dada la dificultad para localizar las fugas, salvo casos claros, que pueden denominarse roturas, la reducción de fugas suele realizarse mediante la sustitución de tramos completos de tuberías.

Posiblemente, la aplicación de la política de recuperación de costes de las infraestructuras relacionadas con la disponibilidad del recurso agua, tales como embalses, canales, ..., implica que una comunidad de regantes tendrá que abonar la repercusión de estos sobre cada unidad de volumen de agua introducida. Por tanto, el indicador  $Aei$  permitiría observar la evolución frente a distintas estrategias de operación del incremento en los costes del agua servida debido a las fugas.

La influencia de las fugas sobre la disipación de energía es un aspecto que también se debe destacar. Se debe al incremento que experimenta el caudal y recae solamente sobre los elementos de conducción, ya que los elementos reguladores se encuentran ya en las bocas, donde el caudal es exactamente el demandado. La ec. (5) no debe modificarse para tener en cuenta las fugas. Sólo hay que tener presente  $Q_k$  y, como consecuencia,  $h_{fk}$  se verán ahora incrementados por las fugas. Al caudal de cada tramo le corresponderá un incremento que dependerá del número de fugas aguas abajo del mismo.

Como se deduce del párrafo anterior, las fugas no intervienen sobre la potencia  $P_e$  entregada en las bocas de riego.

De la potencia entregada a la red, tiene interés separar la debida a los caudales de fuga  $Q_f$  y la debida a los caudales demandados en las bocas  $P_{db}$ . Así,  $P_0$  puede también expresarse:

$$P_0 = P_f + P_{db} = \gamma \{ [H_B + (z_0 - \bar{z}_f)] \cdot Q_f + \sum_{i=1}^m [H_B + (z_0 - z_i)] \cdot Q_i \} \quad (17)$$

### 3 Resultados y discusión

Se han llevado a cabo simulaciones del funcionamiento de la red de la Fig. 1. A partir de las mismas se han calculado los indicadores presentados en el apartado anterior. Se ha realizado un análisis sobre aquellas configuraciones de la demanda sobre las que sería más conveniente actuar.

En cada simulación se ha considerado un grupo de bocas abiertas (escenario de riego) y se han calculado las pérdidas de carga en la red y determinado la altura de elevación  $H_b$  mínima necesaria en cabeza de la misma (nudo 0). Se ha variado el escenario entre simulaciones atendiendo a criterios de apertura de bocas según un valor de probabilidad  $p$  asignada<sup>3</sup>.

Para no distorsionar el análisis de la red se ha considerado un bombeo "ideal", es decir, aquel cuya altura de elevación  $H_b$  es la mínima necesaria en cabeza de la red y además siempre con rendimiento unidad. Esto es equivalente a no considerar la disipación de energía que proporciona un bombeo por dos motivos. El primero, que el rendimiento de un bombeo no es la unidad  $\gamma$ , el segundo, que los bombeos suelen programarse con una altura de elevación de consigna que no se adapta a la combinación de bocas que están regando.

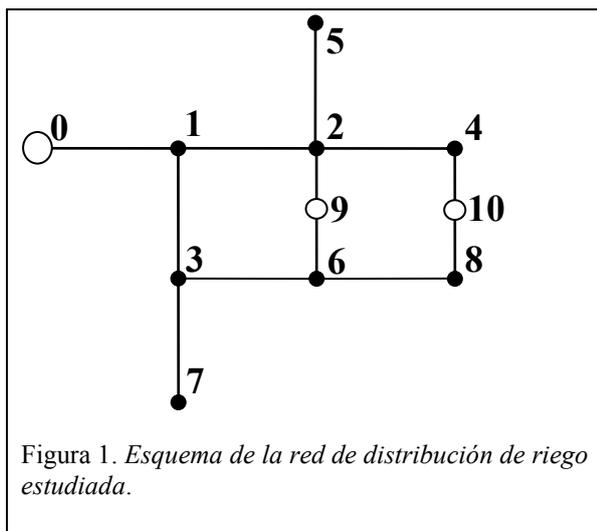


Figura 1. Esquema de la red de distribución de riego estudiada.

Boca/tramo	Nodo					
	precedente	$q$ (L/s)	$p/\gamma$	$z$	$D$ (mm)	$L$ (m)
1	0	30	25	10	250	250
2	1	40	25	12	200	250
3	1	40	25	-15	200	250
4	2	20	25	15	175	250
5	2	30	25	25	150	250
6	3	30	25	-12	150	250
7	3	30	25	-25	150	250
8	4	20	25	-10	150	250
9a	2				150	125
9b	6				150	125
10a	6				150	125
10b	8				150	125

Tabla 1. Datos de la red (en el SI salvo indicación contraria): cotas de las bocas y presiones y caudales requeridos y diámetros y longitudes de los tramos.

<sup>3</sup> La probabilidad de que una boca esté abierta depende en gran medida de la relación entre el tiempo necesario para aplicar la lámina de riego y el tiempo durante el que es posible o conveniente regar.

En la Fig. 2 se muestra la potencia que debe aportar el bombeo a la red  $P_b$  en función del caudal demandado. La potencia acumulación en el tiempo de la potencia da lugar a la energía consumida [ver ec. (2)].

Por otra parte, la energía empleada en elevar cada unidad de volumen de agua viene dada por:

$$\frac{E}{V} = \frac{P \cdot t}{\eta \cdot V} = \frac{\gamma \cdot H_b \cdot Q \cdot t}{\eta \cdot V} = \frac{\gamma \cdot H_b}{\eta} \quad (18)$$

Puede observarse que la energía por unidad de volumen es igual al producto del peso específico por la altura de elevación y dividido por el rendimiento. En la Fig. 3 se muestra la altura que debería aplicar el bombeo en cabeza de la red, que, como puede verse en la ec. (18), es directamente proporcional a la energía por unidad de volumen. Es decir, en esta figura, puede observarse el coste por unidad de volumen en función del caudal demandado.

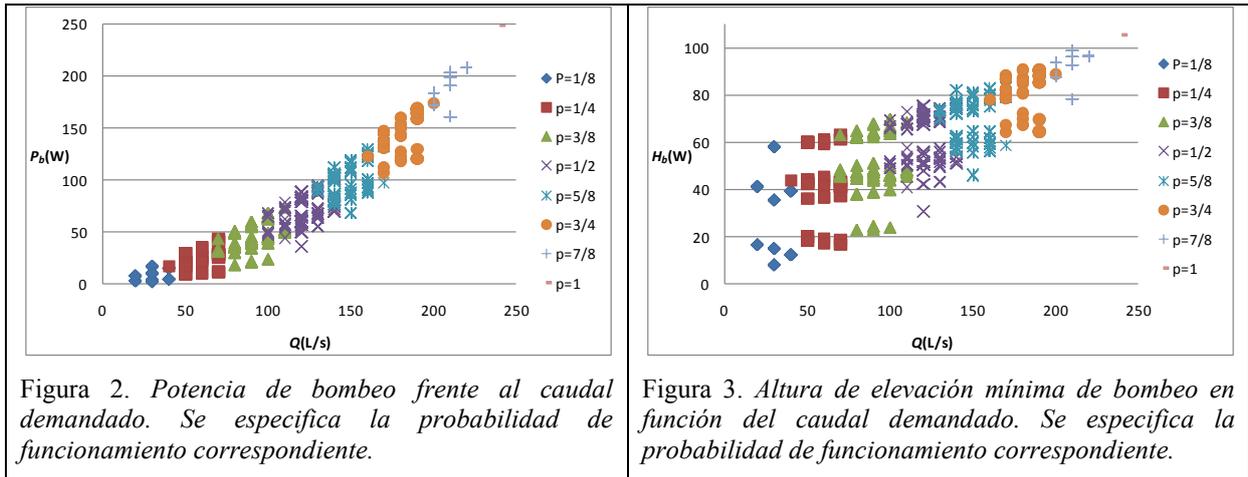


Figura 2. Potencia de bombeo frente al caudal demandado. Se especifica la probabilidad de funcionamiento correspondiente.

Figura 3. Altura de elevación mínima de bombeo en función del caudal demandado. Se especifica la probabilidad de funcionamiento correspondiente.

Mediante la observación de las figuras 2 y 3 se aprecia que la dispersión, que está relacionada con la posibilidad de obtener ahorro en energía, aparentemente no parece la misma según se observe  $P_b$  o  $H_b$ , que es equivalente a  $E/V$ .

En la Fig. 4 se muestra el rendimiento de la red  $\eta_r$  en función del caudal. Se muestra también el intervalo de caudales correspondiente a las probabilidades de apertura de bocas más frecuente,  $0,2 < p < 0,5$ . Y en la Fig. 5 se muestra su comparación con el indicador  $Pec$ . En ambos casos se observa gran dispersión en el intervalo en cuestión.

En la Fig. 6 se muestran los valores promedio, máximo, mínimo y la desviación típica  $\sigma$  del rendimiento energético de la red  $\eta_e$ . Puede observarse que, en caso de aplicar estrategias para aumentar  $\eta_e$ , sería interesante actuar sobre aquellas circunstancias que den lugar a una dispersión elevada. En la Fig. 7 se muestran los mismos valores pero para el indicador de potencia entregada frente a potencia consumida  $Pec$ . De la observación de la dispersión en ambas figuras se deduce que el indicador  $Pec$  permite acotar los valores de caudal que se corresponden con circunstancias en las que interesa aplicar estrategias para reducir el consumo energético. Así, podría decirse que aquellas circunstancias que dan lugar a caudales menores de 80 L/s son las más susceptibles de ahorro energético.

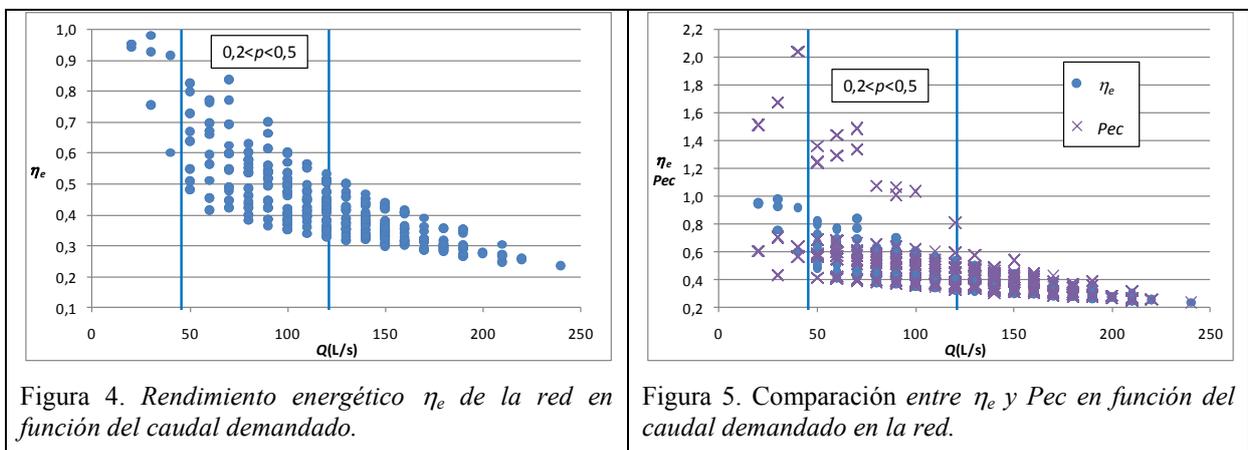


Figura 4. Rendimiento energético  $\eta_e$  de la red en función del caudal demandado.

Figura 5. Comparación entre  $\eta_e$  y  $Pec$  en función del caudal demandado en la red.

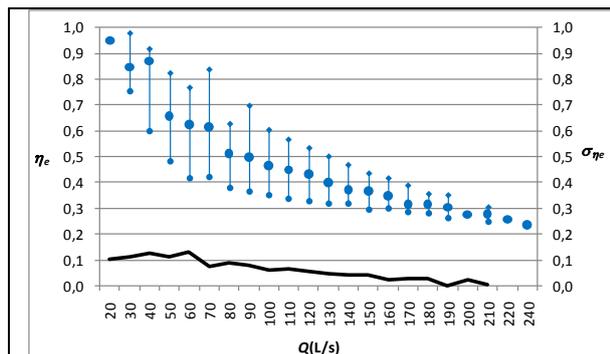


Figura 6. Valores promedio, máximo, mínimo y desviación típica de  $\eta_e$ .

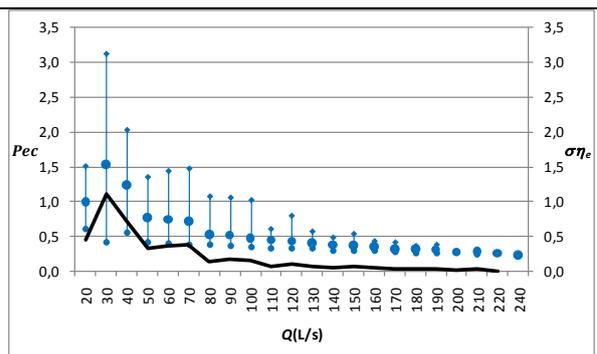


Figura 7. Valores promedio, máximo, mínimo y desviación típica del indicador  $Pec$ .

## 4 Conclusiones

Se han propuesto y analizado indicadores, basados en el destino de la potencia, para caracterizar el funcionamiento de una red. El indicador potencia entregada en relación a la potencia consumida  $Pec$  permite acotar las circunstancias en las que el abordar cambios darán lugar a mayores beneficios.

## Agradecimiento

Los autores desean agradecer a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) el apoyo prestado a través de la financiación del Proyecto No. AGL2008-00153/AGR.

## Referencias

- Abadia, R., Rocamora, C., Ruiz, A., Puerto, H., 2008, *Energy efficiency in irrigation distribution networks I: Theory*. Biosystems Engineering. 101(1), 21-27
- Carrillo Cobo, M., Rodríguez Díaz, J., Montesinos, P., López Luque, R., Camacho Poyato, E., 2011, *Low energy consumption seasonal calendar for sectoring operation in pressurized irrigation networks*. Irrigation Science, 29: 157-169.
- 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.
- IDAE, 2008, *Protocolo de Auditoría Energética en Comunidades de Regantes*. Madrid, Spain: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio
- Jimenez-Bello, M. A., Martínez Alzamora, F., Bou Soler, V., Bartoli Ayala, H. J., 2010, *Methodology for grouping intakes of pressurized irrigation networks into sectors to minimize energy consumption*. Biosystems Engineering, 105, 429-438
- 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.
- Moreno, M.A., Corcoles J.I., Tarjuelo J.M., Ortega J.F., 2010, *Energy efficiency of pressurized irrigation networks managed on-demand and under a rotation schedule*, Biosystems Engineering. 107, 349-363

- Rodríguez Díaz, J.A.; López Luque, R. ; Carrillo Cobo M. T.; Montesinos, P., Camacho, E., 2009, *Exploring energy saving scenarios for on-demand pressurized irrigation networks*, Biosystems Engineering, 104: 552-561.
- 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.