

SELECCIÓN DE BOMBAS EN REDES DE RIEGO A PRESIÓN

Planells P., Carrión P., Ortega J.F., Moreno M.A. y Tarjuelo J.M.¹

Resumen:

Dada la aplicación cada vez más extendida de las redes colectivas de riego a la demanda, se presenta una herramienta de utilización general como ayuda a la toma de decisiones para el dimensionamiento y regulación de las estaciones de bombeo. Se trata de una aportación novedosa que trata de dar soluciones a un problema todavía sin resolver sobre el mejor equilibrio entre coste total (inversión y operación) y garantía de suministro. Para la selección del tipo y número de bombas de velocidad fija y variable se presenta un procedimiento fácil de implementar (Excel, Visual Basic), que proporciona la solución de menor coste total utilizando equipos existentes en el mercado. Los resultados indican que, es muy importante seleccionar correctamente el tipo de bomba que mejor se adapta a las necesidades de la demanda de la red, y que la solución de mínimo coste total es con una o dos bombas de velocidad variable y el resto de velocidad fija.

Palabras clave: Redes de riego a la demanda, estación de bombeo, optimización

INTRODUCCIÓN

La determinación del caudal y altura piezométrica en cabecera de una red de riego a la demanda que produzca el mejor equilibrio entre el coste total del bombeo y la calidad del servicio prestado, medida a través de la probabilidad de fallo de suministro a la red, es un problema no bien resuelto por el momento. Si se utiliza para dimensionar el bombeo el caudal de diseño en cabecera que resulta al aplicar el método de Clement (Clement y Galant 1986), habrá normalmente un gran número de fallos de suministro a la red (Lamaddalena 2000, Pulido-Calvo et al. 2003). Esto obligaría a pasar a un sistema de riego a turnos durante el periodo punta de riego. La concentración del riego durante la noche en sistemas de aspersión por ejemplo, o el distinto coste de la energía a diferentes horas del día, y en los distintos días de la semana, hace que no se cumpla la hipótesis de igualdad de probabilidad de funcionamiento de las tomas a cualquier hora del día o de la semana. Para tratar de solucionar estos problemas se plantean análisis de situaciones concretas en redes de riego a la demanda (Pulido-Calvo et al. 2003) que ponen de manifiesto que el problema esta sin resolver de

una forma general, antes de que pueda realizarse la puesta en marcha de la red de riego, y entonces ya puede ser tarde para hacer rectificaciones de posibles errores cometidos.

Para tratar de dar una solución general al problema, se plantea un procedimiento que parte del conocimiento de la dotación de las tomas de las parcelas a regar y del dimensionamiento de la red, aspectos suficientemente resueltos en general (Bhave y Lam 1983, Labye et al. 1988, Awumah et al. 1989, Lansey y Mays 1989, Lamaddalena 2000, Planells et al. 2001). También es necesario conocer las curvas de demanda máxima y mínima (Planells et al. 2001), y las curvas aleatorias de demanda diaria Planells y Tarjuelo 2001).

Una regulación óptima de la estación de bombeo (EB) será aquella que, con alto rendimiento, se adapte lo más posible a la "curva de consigna" de la red, que relaciona las necesidades de altura piezométrica y caudal en cabecera (García-Serra y Madalena 1992, López-Luque et al. 1995, Martínez y Vela 1993), minimizando los excesos de presión en la cabecera para cada caudal demandado.

¹ Centro Regional de Estudios del Agua. Universidad de Castilla-La Mancha. Campus Universitario s/n, 02071 Albacete. Tfno.: 967 599200; Fax: 967-599233(e-mail: Patricio.Planells@uclm.es).

Artículo recibido el 6 de abril de 2004, recibido en forma revisada el 2 de diciembre de 2004 y el 19 de agosto de 2005 y aceptado para publicación el 9 de noviembre de 2005. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

En este trabajo se presenta un procedimiento de ayuda en la toma de decisiones a la hora de realizar el dimensionamiento y regulación de una estación de bombeo que abastece a una red colectiva de riego a la demanda, buscando el mejor equilibrio entre coste total (inversión y operación), y garantía de suministro.

METODOLOGÍA

El primer paso es determinar el máximo caudal y altura piezométrica que debe suministrar la estación de bombeo, que siempre irá ligado a un determinado nivel de fallo de suministro a la red. Para ello utilizaremos las curvas aleatorias de demanda diaria (Planells y Tarjuelo 2001). El segundo será deducir el tipo y número de bombas con velocidad fija y/o variable que deben funcionar dentro de cada intervalo de caudales para minimizar los costes de inversión y operación de la estación de bombeo.

Los posibles puntos de funcionamiento de la red se encuentran entre la curva de consigna más desfavorable (H_{max}) y la más favorable (H_{min}) (Planells et al. 2001) (figura 1)

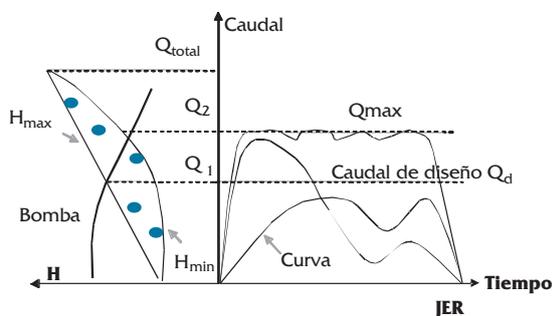


Figura 1. Esquema de las curvas de demanda máxima (H_{max}) y mínima (H_{min}) y de la curva característica Q-H de bombeo (parte izquierda), junto con las curvas aleatorias de demanda diaria (parte derecha)

El estudio de la fiabilidad de la estación de bombeo (EB) que abastece a una red de riego a la demanda se suele realizar eligiendo aleatoriamente un conjunto de tomas en funcionamiento simultáneo. Esto da lugar a un caudal en cabecera (Q_c) y, al conocer su situación en la red, a la altura piezométrica (H_c) necesaria para garantizar la presión mínima en los nudos de servicio (tomas de la red). Una vez definida la estación de bombeo, las necesidades de H_c pueden ser superiores a las que el sistema es capaz de dar para ese caudal Q_c , lo que supondrá un fallo de suministro de la EB.

En la figura 1 se muestra la situación frecuente de dimensionar la estación de bombeo para el caudal de diseño Q_1 , poniéndose de manifiesto la posibilidad de fallos. Así, para caudales demandados en cabecera (Q_c) menores que Q_1 no habrá fallos de suministro a la red al poder satisfacer con el bombeo cualquier necesidad de H_c y Q_c . Los caudales demandados comprendidos entre Q_1 y Q_2 pueden dar lugar a fallos de suministro dependiendo de las necesidades de H_c asociadas al caudal demandado. Para caudales demandados mayores que Q_2 , y hasta el caudal total Q_2 , siempre habrá fallo de suministro a la red. El nivel de fallos de suministro a la red dará idea de la fiabilidad de la estación de bombeo dimensionada para dicha red.

Generación de curvas aleatorias de demanda diaria

Para tratar de conocer, en cada momento del día, el caudal en cabecera de una red de riego a la demanda, base para el dimensionamiento de la estación de bombeo, se puede realizar una generación aleatoria de tomas en funcionamiento. El conjunto de tomas abiertas en cada instante dará lugar a una distribución de caudales en la red, generando un caudal y altura piezométrica necesarias en cabecera para satisfacer los consumos, lo que constituye las curvas aleatorias de demanda diaria (CADD) (figura 1). La envolvente de estas curvas permite estimar el caudal máximo en cabecera (Q_{max}).

Para estimar la evolución de la demanda diaria de caudal en la red se parte del volumen de agua que es necesario repartir según las necesidades de riego de los cultivos. Como datos, se conocerán además la dotación de las tomas de la red (q_d), el tiempo de riego de cada parcela (t_r), el intervalo entre riegos (I_r) y la duración de la Jornada Efectiva de Riego (JER). Para la obtención de las CADD, se divide la JER en intervalos de tiempo pequeños (por ejemplo 15 min) para discretizar el proceso, y se simula una distribución de tomas abiertas de forma aleatoria, con la condición de suministrar en todos los casos el mismo volumen de agua repartido al día y caudal medio (cociente entre el volumen diario y la JER). Para entender mejor este proceso se ha desarrollado, en el ejemplo que se expone a continuación, un caso sencillo de un solo cultivo, con $I_r = 1$ día y el mismo tiempo de riego (t_r) para todas las tomas, en cuyo caso cada toma deberá funcionar una vez al día, garantizándose que se reparte el volumen de riego diario ya que la dotación es proporcional a la superficie de la parcela regada.

Si I_r fuera de varios días, hay que poner una condición previa de selección de las tomas que funcionan cada día del intervalo. Esto puede hacerse, por ejemplo, asignando aleatoriamente un número entre 1 e I_r . Cuando haya diferentes cultivos en la zona regable se puede suponer que todos se manejan con el mismo intervalo medio, adaptando el tiempo de riego de cada parcela a las necesidades de su cultivo. Una vez identificadas las tomas que funcionan cada día se les aplica el procedimiento general de generación de las CADD.

En el proceso se supone que el inicio del tiempo de riego de cada una de las parcelas (t_{ri}) se puede efectuar aleatoriamente en un tiempo comprendido entre el inicio de la JER y la JER menos el t_{ri} . Sumando, para cada uno de los intervalos, los caudales de las tomas en funcionamiento en ese momento, se obtiene el caudal demandado en cabecera de forma casi continua (figura 2). Como se conocerá en cada intervalo las parcelas en riego y su situación, podrá determinarse la altura piezométrica necesaria en cabecera.

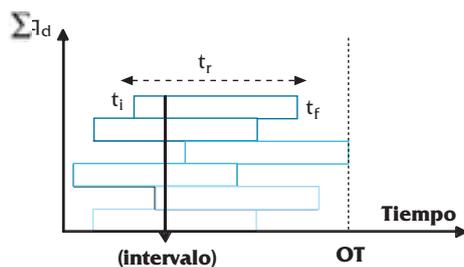


Figura 2. Esquema de parcelas en funcionamiento a lo largo de la JER y caudal demandado.

De cada día se tendrán tantos datos de caudal en cabecera como intervalos en que se ha dividido la JER. Generando numerosas curvas aleatorias como la indicada (figura 1), se tendrá una gran base de datos de caudales en cabecera, que podrá suponerse que siguen una distribución normal (Clement y Galant 1986). El número de simulaciones puede ser muy grande pues el proceso es muy rápido en un PC normal. En nuestras pruebas, con 4000 simulaciones siempre se alcanza la envolvente de las CADD con claridad (caudal máximo demandado). Moreno (2005), demuestra que, para las tres redes de riego estudiadas, incluida la que se utiliza como ejemplo en este trabajo, a partir de 1000 escenarios generadas, la diferencia de CV de los resultados es menor de 0,5. Con estos datos se podrá calcular el cálculo de diseño en cabecera (Q_d) para una determinada garantía de suministro o calidad de funcionamiento (CF) aplicando la metodología de Clement (Planells et al. 2001):

$$Q_d = \mu + U\sigma \quad (1)$$

Siendo: μ la media de la distribución y σ la desviación típica, y donde los valores de U son los percentiles de la función de distribución normal asociados a los coeficientes CF

En la generación de las CADD se pueden considerar muchas variables como: tipo de cultivo, pluviometría media del sistema, número de sectores por parcela, tiempo de riego de la parcela (t_r) y número de posturas al día, máximo número de tomas que pueden funcionar a la vez, existencia de posibles subredes, efecto de unas variables sobre otras, etc.

En un principio cabe suponer que todas las CADD tienen la misma probabilidad de funcionamiento:

$$p = \frac{t_r N_s}{I_r JER} \quad (2)$$

Siendo: N_s el número de sectores de riego por parcela

En realidad, bien por tarificación (p.e. periodos de menor coste de la energía eléctrica) o por hábitos de riego (p.e. regar de noche en aspersión o los fines de semana), el conjunto de curvas generadas puede presentar subconjuntos de curvas más probables (Pulido et al. 1998). Una forma de implementar esta posibilidad en el proceso planteado es establecer la condición de distribuir una proporción del volumen diario en algunas horas del día, desechando las CADD simuladas que no cumplan esta condición. En este caso habría que aumentar el número de simulaciones. Otra posibilidad es hacer los intervalos en que se divide la JER más grandes donde se prevea mayor concentración de tomas abiertas. Así por ejemplo, si la $JER = 18$ h/día, $I_r = 1$ día, $t_r = 3$ h, y se divide la JER en intervalos de 15 min, habrá un total de 4 ($18-3$) = 60 intervalos iguales de 15 min (4 intervalos de 15 min en 1 h por $(18-3)=15$ h donde se puede producir la apertura de una toma de forma aleatoria). Para concentrar el caudal en determinadas horas, se pueden hacer intervalos de 20 ó 25 min en ciertas horas, e intervalos de 10 ó 5 min en el resto. Evidentemente, puesto que existen numerosas posibilidades al respecto, y es necesario tener información de la posible concentración de caudales en hora concretas (motivadas por el tipo de manejo que los regantes hagan de la red de riego), se puede tratar de ajustar la amplitud de los intervalos a una función. En estos casos,

la probabilidad de funcionamiento ya no será igual en todas las horas del día, y las curvas de demanda obtenidas no seguirán una distribución normal, pudiendo utilizar otras funciones de densidad de probabilidades, entre ellas la de Weibull. (Mavropoulos 1997).

La fiabilidad de la estación de bombeo también puede estudiarse a partir de las CADD generadas para cada uno de los intervalos considerados durante la JER. Fijado un caudal en cabecera como caudal de diseño Q_d , se puede contar el número de veces que dicho caudal no es superado por el caudal máximo de cada una de las CADD generadas.

La energía neta (E_n , en kWh) consumida por la red para cada una de las CADD durante la JER puede calcularse como:

$$E_n = \sum_{i=1}^n P_{n,i} t_i \quad (3)$$

Siendo: $P_{n,i}$ la $\gamma Q_i H_i$ (en kW) la potencia neta suministrada al agua en cada uno de los n intervalos en que se ha dividido la JER, t_i el tiempo, en horas, que dura cada intervalo y γ el peso específico del agua (1000 kp/m³). Para cada caudal en cabecera (Q_i , en m³/s), se puede calcular la altura piezométrica asociada (H_i , en m), según las tomas abiertas en cada momento. La suma de las energías consumidas en cada intervalo de la JER será la energía neta consumida al día. Suponiendo que estos datos de energía en cada intervalo siguen una distribución normal, al igual que ocurre con los caudales, podría calcularse la media y desviación típica de la distribución.

Selección de las bombas

El tipo y número de bombas de velocidad fija y variable a colocar en la estación de bombeo será aquél que haga mínimos los gastos anuales totales, suma de los gastos de inversión y los de energía. Para ello se propone un procedimiento en dos fases:

A) Primera fase:

- Elegir, de entre las bombas existentes en el mercado, distintas soluciones posibles para cumplir las condiciones Q-H necesarias en la red.
- Para cada tipo de bomba, buscar la combinación del número de bombas de velocidad fija y variable que consigue un rendimiento

máximo de la estación de bombeo, o un consumo de energía mínimo, para el conjunto de caudales en que puede trabajar. Para ello puede emplearse SOLVER (incluido en EXCEL) que utiliza un procedimiento de optimización mediante programación no lineal entera, donde hay que definir la función objetivo, las variables cambiantes y el conjunto de restricciones. En la práctica suelen seleccionarse todas las bombas iguales, lo que disminuye posibles problemas en el proceso de acoplamiento y desacoplamiento de las bombas al trabajar en paralelo, no obstante en algunos casos podrían utilizarse bombas de distinto tamaño. Nosotros hemos elegido la primera opción, al ser la más frecuente, pero los planteamientos que se manejan son válidos para todas las opciones. El procedimiento consiste en:

- a) Tomar como datos de partida un conjunto de valores discretos de Q representativos del intervalo de caudales en que puede funcionar la estación de bombeo (por ejemplo 15 ó 20) y, según la curva de consigna de la red, los valores correspondientes de H . Estos valores se supondrán de igual probabilidad de ocurrencia. Si se dispone de información de valores más probables, podrían ponderarse ciertos valores, y calcular después una media proporcional al determinar el rendimiento, o el consumo de energía, medio de la estación de bombeo.

Para cada tipo de bomba, a partir de sus curvas características, se determina el número de bombas de velocidad fija y variable necesario para satisfacer cada par de valores Q_i - H_i , y se calcula el rendimiento y consumo de energía bruta de la estación de bombeo en cada caso. El primero (η_i), dividiendo la potencia neta ($P_{n,i} = \gamma Q_i H_i$) por la potencia bruta total ($P_{bt,i}$) absorbida por la estación de bombeo trabajando en el punto (Q_i, H_i), según el número de bombas fijas y variables que estén funcionando en ese momento.

$$\eta_i = \frac{P_{n,i}}{P_{bt,i}} = \frac{P_{n,i}}{\sum P_{b,i}} \quad (4)$$

Siendo: $P_{b,i}$ la potencia bruta consumida por cada bomba de velocidad fija o variable que funcione en ese momento.

La energía bruta consumida ($E_{b,i}$) se obtendrá multiplicando la potencia bruta total ($P_{bt,i}$) por las horas de funcionamiento al año (N_i) en esas condiciones (Q_i, H_i):

$$E_{b,i} = P_{bt,i} N_i \quad (5)$$

En las bombas de velocidad variable, además del rendimiento de la bomba y del motor (variable este último entre 0.90 y 0.93 para potencias entre 20 y 150 kW), se ha considerado un rendimiento de 0.96 para el variador.

b) Utilizando SOLVER, seleccionar el número de bombas de velocidad fija y variable que hacen máximo el rendimiento medio de la estación de bombeo, o mínimo el consumo global de energía, para el conjunto de caudales en que puede trabajar. El proceso es:

- Utilizar como variables cambiantes del proceso de optimización el número de bombas de velocidad fija y variable, así como el número de revoluciones relativo de las bombas de velocidad variable
- Introducir las restricciones de coherencia necesarias
- Plantear la función objetivo, como “máximo rendimiento medio de la estación de bombeo, o mínimo consumo global de energía, para el conjunto de caudales en que puede trabajar”.

El rendimiento medio (η_m) de la estación de bombeo para el conjunto de valores Q_i-H_i en que puede trabajar, se obtiene dividiendo la potencia neta global (P_{ng}) absorbida por la estación de bombeo por la potencia bruta global (P_{bg}) consumida por la estación de bombeo según el número de bombas fijas y variables que estén funcionando en cada caso. Un ejemplo del proceso se muestra en la tabla 2

$$\eta_m = \frac{P_{ng}}{P_{bg}} = \frac{\sum_{i=1}^{15} P_{n,i}}{\sum_{i=1}^{15} P_{bt,i}} \quad (6)$$

En caso de que los caudales de bombeo tengan distinta probabilidad de ocurrencia,

la energía neta global (E_{ng}) consumida por la estación de bombeo en las N horas de funcionamiento al año será:

$$E_{ng} = \sum_{i=1}^{15} P_{n,i} cp_i N \quad (7)$$

con

$$\sum_{i=1}^{15} cp_i = 1 \quad (8)$$

Siendo: cp_i el coeficiente de ponderación (como decimal) que tiene en cuenta el tiempo de funcionamiento de la estación de bombeo para cada uno de los caudales Q_i seleccionados.

La energía bruta global consumida será:

$$E_{cons,g} = \sum_{i=1}^{15} E_{b,i} = \sum_{i=1}^{15} \frac{P_{n,i}}{\eta_i} cp_i N \quad (9)$$

El rendimiento medio de la estación de bombeo para ese tipo de bomba será:

$$\eta_m = \frac{E_{ng}}{E_{cons,g}} \quad (10)$$

En el caso de que todos los coeficientes de ponderación fueran iguales, se tendría:

$$\eta_m = \frac{\sum_{i=1}^{15} P_{n,i}}{\sum_{i=1}^{15} P_{bt,i}} \quad (11)$$

B) Segunda fase. Cálculo de los costes anuales totales para cada tipo de bomba. El procedimiento consiste en:

- Calcular el consumo de energía neta anual según las necesidades de los cultivos durante la campaña de riegos. Puede hacerse como suma de la energía neta media diaria, calculada a partir de las CADD como se ha indicado antes.
- Calcular el consumo de energía bruta anual dividiendo la energía neta por el rendimiento medio óptimo para el intervalo de caudales en que puede funcionar la estación de bombeo.

- Seleccionar el tipo de bomba, y su correspondiente número de bombas de velocidad fija y variable que produzca el menor coste anual total.

En el ejemplo de aplicación, la anualidad de la inversión (A) se ha calculado multiplicando el valor inicial de la inversión (Iv) por el factor de actualización del capital (FAC), siendo:

$$FAC = \frac{t(1+t)^n}{(1+t)^n - 1} = 0,12 \quad (12)$$

Siendo: n la vida útil de la inversión, (10 años), y t la tasa de interés considerada (5 %). El coste energético se ha determinado para un coste medio de la energía de 0,064 €/kWh, ya que dependiendo de la hora del día, o del día de la semana, en que se produce el consumo, este puede variar. El considerar la discriminación horaria complicaría un poco el proceso, y entendemos no cambiaría sustancialmente la solución elegida. Lo mismo pasa con los gastos de mantenimiento, que tampoco se han considerado por entender que no tienen una influencia significativa en la solución final al poder estimarse entorno al 5% de los costes de inversión en cada bomba.

RESULTADOS. EJEMPLO DE APLICACIÓN

La metodología planteada se ha aplicado a una red de riego a la demanda que riega una superficie de 127,7 ha, dedicada al cultivo de agrrios en Valencia, con un marco de plantación de 5m x 4m (Planells et al. 2001). En el diseño agronómico resultan necesarios 6 goteros por planta de 4 l/h de caudal nominal, a una presión de 10 m.c.a. lo que origina unas necesidades de presión mínima en las tomas de las parcelas de 25 m. (figura 3.)

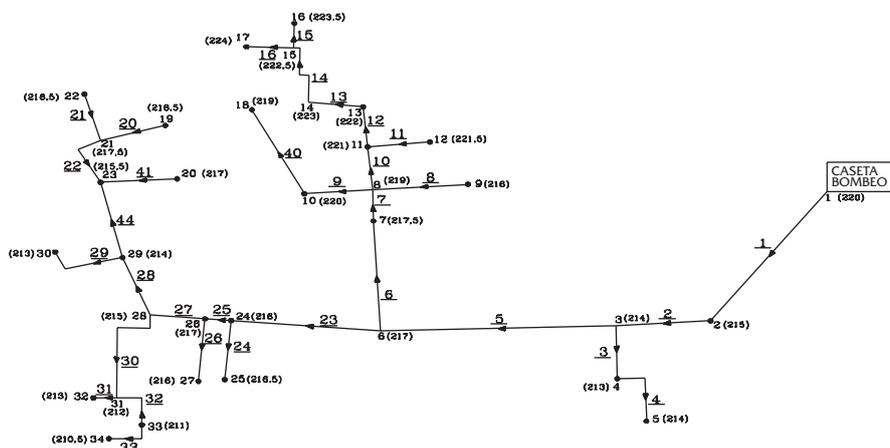


Figura 3. Enumeración de líneas y nudos en el esquema de la red colectiva de riego a la demanda considerado.

En la tabla 1, se indican las superficies y dotaciones de los nudos. Estas últimas se han obtenido fijando un tiempo de riego (t_r) de 3,5 h y un intervalo entre riego (I_r) de 1 día para el mes de julio. En los restantes meses se ha reducido el t_r y la JER, tratando de mantener unos caudales medios semejantes en todos los meses. A los nudos que no son de servicio se les ha asignado dotación cero.

Para el mes más desfavorable (Julio), con unas necesidades de $4,2 \text{ l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$, (lo que supone tener que repartir $5360 \text{ m}^3/\text{día}$), se ha fijado una JER de 18 horas, una pluviosidad media del sistema de $1,2 \text{ lm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (6 goteros x 4 l/h, dividido entre $5 \times 4 \text{ m}^2$), obteniendo un caudal medio de 82,7 l/s ($5360000 / 18 \times 3600$)

Dividiendo la JER en intervalos de 15 minutos, y generando 4000 CADD (o cualquier otro número, suficiente para definir bien la distribución), estas tienen un caudal medio de 82,7 l/s y una desviación típica de 45,8 l/s (curva 2 de la figura 4), resultando un caudal de diseño en cabecera de 189,2 l/s, según la ecuación (1), para una CF = 99%, y un valor de $U = 2.33$. Es conveniente que el tiempo de riego sea múltiplo del tiempo elegido en los intervalos para que no haya desajuste en el volumen de riego repartido al día. La envolvente de estas curvas da un caudal máximo de 256 l/s. El caudal total en la red, con todas las tomas abiertas, es 425,7 l/s.

Con intervalos de 3,5 horas (igual al tiempo medio de riego en la zona) para el mismo caudal medio de 82,7 l/s, la desviación típica es 35,4, y el caudal en cabecera de 165,1 l/s para el mismo valor de U (curva 1 de la figura 4).

Este tipo de análisis también puede hacerse con los caudales máximos de cada una de las CADD generadas. Para el caso de dividir la JER en intervalos de 15 min, se obtiene un caudal medio de

172,5 l/s, una desviación típica de 19,2 y un caudal en cabecera de 218 l/s para el mismo valor de U (curva 3 en la figura 4).

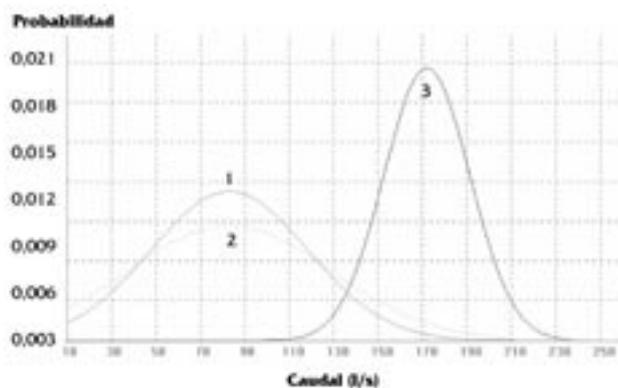


Figura 4. Funciones de densidad de probabilidad.

Con estas curvas aleatorias de demanda generadas se puede estudiar la fiabilidad de la estación de bombeo, y calcular la función distribución de aciertos, que contiene el porcentaje de curvas cuyo caudal máximo no supera un determinado caudal de diseño (Q_d) fijado previamente en cabecera. Para el caso de dividir la JER en intervalos de 15 min, la función distribución resultante se muestra en la figura 5, donde se ha marcado además el caudal máximo de 256 l/s, el caudal de diseño utilizando los caudales máximos de las CADD (218 l/s) y el caudal de Clement (166 l/s). La figura pone de manifiesto la escasa fiabilidad obtenida con el caudal de Clement.

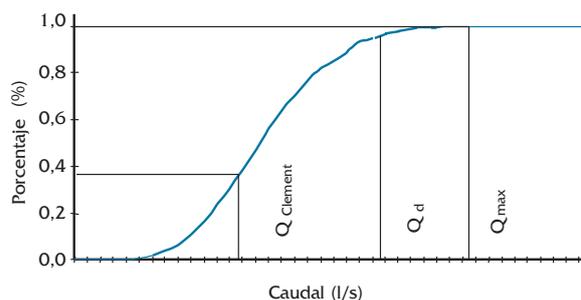


Figura 5. Función distribución de caudales

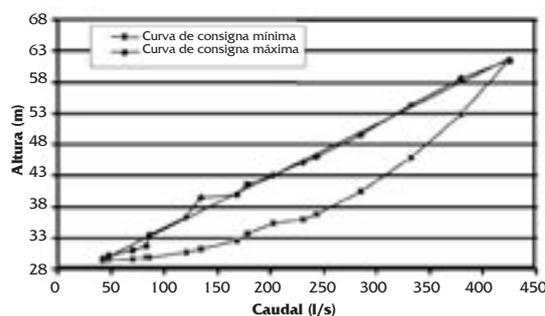


Figura 6. Curvas de consigna máxima y mínima.

Las curvas de consigna máxima (H_{max}), mínima (H_{min}), resultantes de aplicar la metodología indicada, se muestran en la figura 6. La curva de consigna máxima se aproxima en este caso a la recta $H = 25,84 + 0,081 Q$ (con Q en l/s).

Tabla 1. Superficies y dotaciones asignadas a los nudos

Nudo	1	2	3	4	5	6	7
Cota (m)	220	215	214	213	214	217	217.5
Superf. (ha)	0.00	5.04	0.00	8.64	5.91	0.00	4.38
Dotación(l/s)		16.80	0.00	28.80	19.70	0.00	14.60
Nudo	8	9	10	11	12	13	14
Cota (m)	219	216	220	221	221.5	222	223
Superf. (ha)	0.00	8.37	5.16	3.84	3.93	2.55	0.00
Dotación(l/s)	0.00	27.90	17.20	12.80	13.10	8.50	0.00
Nudo	15	16	17	18	19	20	21
Cota (m)	222.5	223.5	224	219	218.5	217	217.5
Superf. (ha)	0.00	4.92	2.58	5.49	8.07	5.22	0.00
Dotación(l/s)	0.00	16.40	8.60	18.30	26.90	17.40	0.00
Nudo	22	23	24	25	26	27	28
Cota (m)	216.5	215.5	216	216.5	217	216	215
Superf. (ha)	7.02	5.82	4.98	5.40	5.22	4.47	0.00
Dotación(l/s)	23.40	19.40	16.60	18.00	17.40	14.90	0.00
Nudo	29	30	31	32	33	34	
Cota (m)	214	213	212	213	211	210.5	
Superf. (ha)	1.89	0.33	0.00	5.70	5.76	7.02	
Dotación(l/s)	6.30	1.10	0.00	19.00	19.20	23.40	

Selección de bombas

Para dimensionar la estación de bombeo se ha considerado un caudal de 218 l/s, que es el caudal de diseño obtenido con la distribución de caudales máximos de las CADD generadas dividiendo la JER en intervalos de 15 min. En cuanto a la regulación, se ha considerado que sigue la curva de consigna máxima. Para ello, se necesitaría disponer de un caudalímetro y un transductor de presión que suministren datos al autómata programable que controla el funcionamiento de la estación de bombeo para hacer que ésta suministre los valores de presión y caudal deseados.

Para poder conseguir 218 l/s a 44 m, se han considerado cinco tipos de bombas (T1 (32 kW), T2 (40 kW), T3 (48 kW), T4 (113 kW) y T5 (101 kW)), cuyas curvas características Q-H y Q- η son las que se indican en las figuras 7 y 8, habiendo utilizado para el cálculo las ecuaciones correspondientes. Para calcular las curvas características de las bombas de velocidad variable se han aplicado las leyes de semejanza, y se ha limitado la velocidad mínima al 60% de la nominal, no habiendo considerado situaciones con velocidades de giro superiores a la nominal.

A la hora de seleccionar las bombas se ha tenido en cuenta su tamaño, y la forma de las curvas características. Las bombas tipo T1 (de 32 kW) y T2 (de 40 kW) son semejantes. La T3 (de 48 kW) es semejante a la T1 pero con curva Q-H más plana. Las T4 (de 113 kW) y T5 (de 101 kW) son de mayor tamaño, pero con curvas características muy diferentes.

Para buscar la solución óptima, el intervalo de caudal 0 - 218 l/s se ha representado por 15 valores uniformemente distribuidos. Para la determinación, de la combinación de bombas de

velocidad fija y variable con máximo rendimiento para el conjunto de los 15 caudales, se ha utilizado SOLVER, en cada tipo de bomba. Un ejemplo de estos cálculos se muestra en la tabla 2. Los resultados indican que son necesarias 5 bombas tipo T1 y T2, 4 bombas tipo T3, 2 tipo T4 o 3 tipo T5.

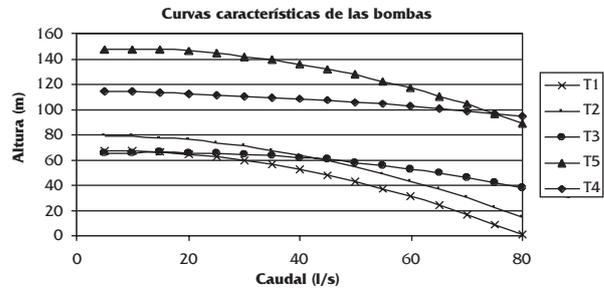


Figura 7. Curvas características Q-H del conjunto de bombas seleccionadas

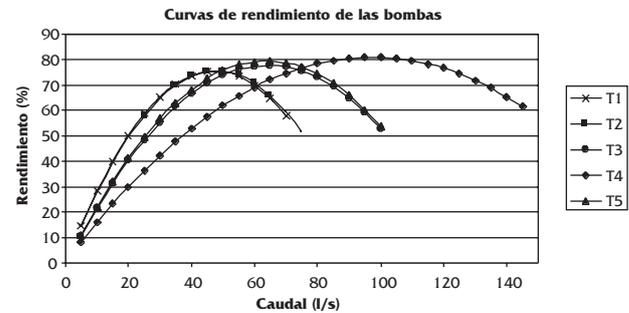


Figura 8. Curvas características caudal rendimiento de la bomba (Q- η) para el conjunto de bombas seleccionadas.

Para el cálculo del consumo de energía se ha considerado que la red se maneja durante la campaña de riegos para cubrir las necesidades de riego (N_r) y volumen de riego al día (V_d) indicadas en la tabla 3. En ella se ha incluido también la energía neta diaria, mensual y anual. La energía neta media diaria se ha calculado como la media de la distribución de consumo energético del conjunto de CADD generadas. Para simplificar el cálculo,

Tabla 2. Ejemplo del proceso de optimización con SOLVER

Q	H	Nº FUJAS	Nº VAR.	ALFA	GFUJAS	QVAR.	REN-FI	REN-VAR	Q-TOT	POT.FUJ.	POTVAR	POT.TOT	REN.GLO
10,000	26,650	0,000	1,000	0,638	0,000	10,000	-	41,554	10,000	0,000	6,292	6,292	0,416
25,000	27,885	0,000	1,000	0,709	0,000	25,000	-	70,492	25,000	0,000	9,695	9,695	0,705
40,000	29,080	0,000	1,000	0,816	0,000	40,000	-	75,334	40,000	0,000	15,147	15,147	0,753
55,000	30,295	0,000	2,000	0,747	0,000	27,500	-	71,680	55,000	0,000	11,402	22,804	0,717
70,000	31,510	0,000	2,000	0,804	0,000	35,000	-	74,942	70,000	0,000	14,436	28,873	0,749
85,000	32,725	0,000	2,000	0,866	0,000	42,500	-	75,328	85,000	0,000	18,113	36,225	0,753
100,000	33,940	0,000	2,000	0,934	0,000	50,000	-	74,124	100,000	0,000	22,450	44,918	0,741
115,000	35,155	1,000	2,000	0,802	56,913	29,043	72,328	71,256	115,000	27,137	14,057	55,250	0,718
130,000	36,370	1,000	2,000	0,860	55,851	37,075	72,978	74,823	130,000	27,306	17,679	62,683	0,740
145,000	37,585	1,000	2,000	0,925	54,766	45,116	73,561	75,360	145,000	27,451	22,074	71,596	0,747
160,000	38,800	1,000	2,000	0,996	53,663	53,169	74,075	74,194	160,000	27,574	27,277	82,127	0,742
175,000	40,015	3,000	1,000	0,796	52,534	17,367	74,515	53,485	175,000	27,675	12,768	96,794	0,717
190,000	41,230	2,000	2,000	0,943	51,381	43,619	74,875	75,387	190,000	27,755	23,402	102,315	0,751
205,000	42,445	3,000	2,000	0,857	50,202	27,198	75,151	67,202	205,000	27,815	16,852	117,149	0,729
220,000	43,660	4,000	1,000	0,853	48,994	24,025	75,335	62,994	220,000	27,854	16,335	127,753	0,738

se ha asignando a los caudales en cabecera la altura piezométrica correspondiente a la curva de consigna máxima, en lugar de calcularla en base a la distribución de tomas abiertas en cada una de las 4000 CADD generadas.

En la figura 9 se muestra la evolución del coste total según el número máximo de variadores y tipo de bomba. Para simplificar, se ha considerado que todas las bombas son iguales, situación que tiene el interés de poder intercambiar las bombas conectadas al variador, evitando el mayor desgaste de aquella que esté siempre conectada al variador. El coste total se ha calculado como suma del coste anual de la bomba, del motor y del variador, más el coste energético asociado a cada caso. Este último se ha calculado dividiendo la energía neta anual de la tabla 3 por el rendimiento óptimo medio para cada tipo de bomba y número máximo de variadores posible, obtenido aplicando la metodología antes indicada. En las bombas de velocidad fija se ha tenido en cuenta el coste del arrancador electrónico necesario para un funcionamiento similar al arranque con variador. Para fijar los costes de bombas y variadores se han utilizado valores medios de mercado. La ecuación de coste de bombas (P_{bomba} , en €) en función de la potencia (N, en kW) ha sido $P_{\text{bomba}} = 2,0 N^2 + 376,2N + 953$, y la de los variadores $P_{\text{variador}} = 1,8 N^2 + 337,2 N + 1638$

Como puede verse en la figura 9, la solución más barata suele ser utilizar una o dos bombas de velocidad variable y el resto de velocidad fija, siendo la mejor combinación para este caso utilizar las

bombas más pequeñas, aunque se necesite mayor número de estas para cubrir las necesidades de la estación de bombeo. Esta solución tiene un menor riesgo en caso de avería de una de las bombas y un menor coste de las bombas de reserva activa, necesaria en todas las estaciones de bombeo.

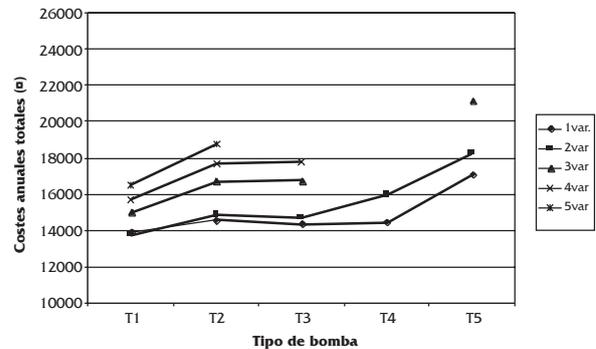


Figura 9. Evolución del coste total anual para los distintos tipos de bombas con la opción de que todas sean iguales y se permita distinto número máximo de variadores de velocidad.

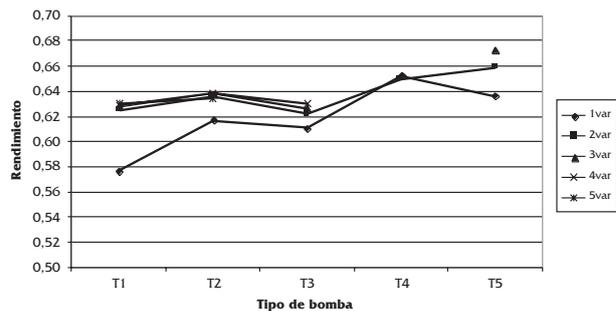


Figura 10. Rendimiento óptimo de la estación de bombeo para diferente número máximo de variadores, según el tipo de bomba.

Tabla 3. Datos básicos de necesidades de agua y consumo de energía anual

Mes	N_r (l m ⁻² día ⁻¹)	V_d (m ³ /día)	Energía neta media diaria (kWh)	Días del mes	Energía neta mensual (kWh)
Enero	0,520	664,092	74.0	31	2294.1
Febrero	0,300	383,313	35.8	28	1003.5
Marzo	0,720	919,512	115.4	31	3576.2
Abril	1,190	1519,749	145.7	30	4372.4
Mayo	1,930	2464,803	262.0	31	8122.5
Junio	3,230	4125,033	405.4	30	12161.6
Julio	4,20	5360,000	556.8	31	17259.6
Agosto	3,800	4852,980	481.8	31	14935.9
Septiembre	2,210	2822,391	299.1	30	8971.7
Octubre	0,790	1008,909	113.0	31	3502.6
Noviembre	0,550	702,405	74.0	30	2221.1
Diciembre	0,540	689,634	74.0	31	2295.2
TOTAL ANUAL					80716.0

N_r = necesidades de riego diarias; V_d = volumen de riego diario

En la figura 10 se han representado los rendimientos máximos obtenidos en la estación de bombeo para cada tipo de bomba, con distinto número de variadores. Como puede apreciarse, hay diferencias importantes al introducir el segundo variador, pero no al introducir los sucesivos.

Analizando las figuras 9 y 10 pueden verse como:

- Utilizar bombas con curvas Q-H más plana (bombas tipo T4 y T3), no produce diferencias importantes, ni en el coste total anual ni en el rendimiento.
- Utilizar bombas grandes, con una curva Q- η que abarca un amplio intervalo de caudales con gran rendimiento, como es el caso de la bomba tipo T4, reduce el número de bombas necesarias en la estación de bombeo (solo 2 en el ejemplo), pero puede disminuir la seguridad del bombeo en caso de avería.
- La introducción de la segunda bomba con velocidad variable produce un aumento significativo de rendimiento en muchas de las bombas, compensándose el incremento de coste de inversión con el ahorro energético.
- El disponer de dos bombas de velocidad variable permite una mejor adaptación a los caudales pequeños, mejorando además el acoplamiento de las bombas a velocidad fija. También producirá una mayor seguridad en el bombeo ya que, en caso de avería de uno de los variadores, la estación de bombeo podría funcionar perfectamente solo con uno.

Regulación con sólo un sensor de presión

Se ha estudiado el caso de mantener constante la presión en cabecera a 40 m, con lo que quedarían muy pocas situaciones con demanda insatisfecha para el caudal considerado de 218 l/s.

Con esta regulación manométrica, con cualquiera de los tipos de bomba utilizados, para caudales pequeños (inferiores a 125 l/s en nuestro ejemplo), se consume entre un 10-15% más de potencia que siguiendo la curva de consigna máxima (resultados no mostrados aquí). A partir de este caudal, las diferencias disminuyen hasta anularse a unos 160 l/s, y para caudales mayores a este, cada vez se consume menor potencia en comparación con la opción de seguir la curva de consigna máxima.

Este comportamiento es lógico por las diferencias de presión de trabajo que se producen, con presiones excesivas para caudales pequeños y presiones insuficiente par los caudales mayores.

Esta es una solución sencilla, que se utiliza frecuentemente en la practica por necesitar solamente un transductor de presión que controla el autómata del variado de velocidad de las bombas. Puesto que para caudales pequeños daría exceso de presión y para caudales grandes la presión suministrada puede ser insuficiente, la idoneidad de este sistema depende del diseño y manejo de la red, estando más adaptado a situaciones con pequeñas variaciones de presión en cabecera para el intervalo de caudales donde se concentre la demanda. Es pues una posible solución a contemplar, a la que se le puede aplicar el procedimiento de minimización de costes totales aquí planteado.

CONCLUSIONES

Para dimensionar la estación de bombeo necesaria para una determinada garantía de suministro a una red de riego a la demanda se presenta un procedimiento fácil de implementar (Excel, Visual Basic), que proporciona la solución de menor coste total utilizando equipos existentes en el mercado, indicando el tipo y número de bombas de velocidad fija y variable necesarias.

El procedimiento presentado tiene una validez muy general, aunque todavía puede haber situaciones muy concretas que requieran algún tipo de adaptación, pero entendemos que supone una ayuda importante en la toma de decisiones para aproximarnos a la optimización de las estaciones de bombeo ligadas a las redes de riego a la demanda.

En la red estudiada, la mejor solución para el dimensionamiento y regulación de la estación de bombeo es con una o dos bombas de velocidad variable y el resto de velocidad fija. El disponer de dos bombas de velocidad variable puede mejorar además la regulación y seguridad de la estación de bombeo.

LISTA DE SIMBOLOS

A	anualidad de la inversión
CADD	curvas aleatorias de demanda diaria
CF	garantía de suministro o calidad de funcionamiento
FAC	factor de actualización del capital

H_c	altura piezométrica en cabecera, m
I_r	intervalo entre riegos, días
JER	Jornada Efectiva de Riego, h día ⁻¹
n	vida útil de la inversión, años
N_r	Necesidades de riego al día, l m ⁻² día ⁻¹
N_s	número de sectores de riego por parcela
p	probabilidad de funcionamiento de una toma
Q_c	caudal en cabecera, l s ⁻¹
q_d	dotación de las tomas de la red, l s ⁻¹ ha ⁻¹
Q_d	caudal de diseño en cabecera, l s ⁻¹
Q_{max}	caudal máximo en cabecera, l s ⁻¹
Q_t	caudal total, l s ⁻¹
t	tasa de interés considerada, como decimal
t_r	tiempo de riego de cada parcela, h
V_d	Volumen de agua repartido al día por la red, m ³ /día
μ	media de la distribución
σ	desviación típica

REFERENCIAS

- Awumah, K., Bhatt, S.K. and Goulter, I.C. (1989). An integer programming model for layout design of water distribution networks. *Engineering Optimization*, Vol. 15, pp.57-70
- Bethery J. 1990. Réseaux collectifs d'irrigation ramifiés sous pression. Calcul et fonctionnement. CEMAGREF. Etudes n° 6
- Bhave, P.R. and Lam, C.F. (1983). Optimal layout for branching distribution networks. *Journal of Transportation Engineering (ASCE)*, Vol 109. N° 4, pp. 534-547
- Clément, R. and Galand, A. (1986). El riego por aspersión y las redes colectivas de distribución a presión. Editores Técnicos Asociados.
- EPANET: Lewis A. Rossman (1997). Manual de Usuario de Epanet. Risk Reduction Engineering Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, OH.
- García-Serra, J. y Madalena, M. (1992). La inyección directa a red con grupos de velocidad fija y variable. *Curso de ingeniería hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua*. U.D. de Mecánica de Fluidos, Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia. Tomo 2, Capítulo 17.
- Labye, Y., Olson, M.A., Galand, A. Y Tsourtis, N. (1988). Design and optimisation of irrigation distribution network. *Irrigation and drainage paper n° 44*. FAO.
- Lamaddalena N. (2000). Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems. N° 59 de FAO, Serie de riegos y drenajes,
- Lansley, K.E., and Mays, L.W. (1989). Optimization model for water distribution system design. *J. Hydraul. Eng.*, 115(10), 1401-1418.
- Martínez, F. y Vela, A. (1993). Regulación de estaciones de bombeo. *Curso de Diseño hidráulico de redes de riego*. U.D. de Mecánica de Fluidos, Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia. Capítulo 10.
- Moreno, M.A. (2005). Análisis hidráulico y energético de redes de riego a la demanda. Tesis doctoral. CREA y E.T.S.I. Agrónomos de Albacete. Universidad de Castilla-La Mancha (junio 2005).
- López-Luque, R., Reza, J., Camacho, E., Roldán, J. y Alcaide, M. (1995). Valoración energética y diseño óptimo de impulsiones con caudal variable. *Ingeniería del Agua 2*: 19-24.
- Mavropoulos, T.I. 1997. Sviluppo di una nuova formula per il calcolo delle portate di punta nelle reti irrigue don esercizio alla domanda. *Riv. Di Irr. E Dren.* 44(2): 27-35.
- Planells, P., Tarjuelo, J.M., Ortega, F and Casanova, M.I. (2001). Design of water networks for on-demand irrigation. *Irrig Sci* 20:189-201
- Planells, P. y Tarjuelo, J.M. 2001. Generación aleatoria de curvas de demanda y sus aplicaciones. XIX Congreso Nacional de Riegos. Zaragoza, 12 a 14 de junio de 2001
- Pulido, I., R. López y J. Roldán. 1998. Caracterización horaria y estacional de la demanda en una red de distribución de agua para riego. XVI Congreso Nacional de Riegos. AERYD.
- Pulido-Calvo, I., Roldan, J., López-luque, R. and Gutiérrez-Estrada, J.C. (2003). Water delivery system planning considering irrigation simultaneity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129(2), 247-255