



DEPÓSITOS DE REGULACIÓN EN CABECERA DE REDES HIDRÁULICAS A PRESIÓN

INMACULADA PULIDO CALVO¹, JUAN CARLOS GUTIÉRREZ ESTRADA², JOSÉ
ROLDÁN CAÑAS³, RAFAEL LÓPEZ LUQUE⁴

¹Área de Mecánica de Fluidos, Dep. Ciencias Agroforestales, Escuela Politécnica Superior, Campus de La Rábida, Universidad de Huelva, 21819 Palos de la Frontera (Huelva)

²Área de Tecnologías del Medio Ambiente, Dep. Ciencias Agroforestales, Escuela Politécnica Superior, Campus de La Rábida, Universidad de Huelva, 21819 Palos de la Frontera (Huelva)

³Área de Ingeniería Hidráulica, Dep. Agronomía, Universidad de Córdoba, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes, Apdo. 3048, 14080 Córdoba

⁴Área de Física Aplicada, Dep. Física Aplicada, Universidad de Córdoba, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes, Apdo. 3048, 14080 Córdoba

(Recibido 22 de octubre de 2004, para publicación 23 de diciembre de 2005)

Resumen – La presencia de un depósito de regulación en un sistema de impulsión permite independizar los caudales bombeados de la variabilidad del uso del agua en la red de distribución. De este modo el depósito se podrá utilizar, además de como acumulación del recurso agua, en la reducción de los costes energéticos al poder adaptar el esquema de operación de los grupos de bombeo al tipo de discriminación horaria de las tarifas eléctricas y al poder conseguir un funcionamiento más regular de las estaciones de bombeo en comparación con la impulsión directa a la red de distribución. En este trabajo, se propone una metodología para determinar una capacidad de almacenamiento que permita elevar el agua en las horas con el coste energético más ventajoso y establecer una política de bombeo para el período anual de funcionamiento, de forma que se minimicen los costes totales del sistema de impulsión (coste de inversión del depósito y coste del consumo de energía eléctrica). Se aplica el modelo desarrollado a un sistema de impulsión de una zona regable con registros históricos de demanda horaria de agua. El volumen de regulación óptimo resulta ser el 41% de la demanda máxima diaria. El régimen de funcionamiento óptimo del bombeo al depósito durante la campaña de riegos supone el uso exclusivo de las horas bonificadas de tarifa eléctrica, y sólo es necesario el uso de algunas horas de coste medio en el período de máximas demandas de agua. La incorporación del depósito de regulación reduce en un 33% el coste del consumo de energía eléctrica y en un 12% el coste total anual en comparación con el bombeo directo a la red hidráulica.

Palabras clave – Demanda de agua, grupos de bombeo, rendimiento, ahorro de energía, almacenamiento de agua.

1. INTRODUCCIÓN

Un depósito entre la captación y la red distribución de agua actúa como elemento regulador entre los recursos disponibles y la demanda de agua variable a lo largo del tiempo. La finalidad primordial es la optimización del esquema de operación de los diferentes elementos (estaciones de bombeo, estaciones depuradoras, ...) aguas arriba del depósito, al independizar los caudales impulsados al depósito de la variabilidad del consumo en la red de distribución. De este modo, el dimensionado y la gestión de estos elementos puede realizarse independientemente de las variaciones que vayan a producirse en el uso del agua, siendo el depósito el encargado de asumir las discrepancias entre el caudal impulsado a la red y el caudal consumido. Asimismo la alta inversión que supone la construcción de un depósito puede verse compensada por la disminución de los costes energéticos mediante: a) La posibilidad de un funcionamiento más regular de las estaciones de bombeo con mejores rendimientos en comparación con la impulsión directa a la red de distribución; b) La posibilidad de desplazar el bombeo a las horas bonificadas de tarifa eléctrica. Durante dicho tiempo se acumulará agua en el depósito, que será consumida en las horas durante las cuales el precio de la energía eléctrica es mayor.

La cuantificación de la capacidad de regulación de un depósito depende de las diferencias entre las curvas de caudal demandado y de caudal impulsado [1]. La evolución diaria de los usos de agua a lo largo del año en días sucesivos constituye una de las bases para el estudio de las necesidades de regulación. Así Nel y Haarhoff [2] determinan mediante la simulación de distintos escenarios el volumen óptimo de depósitos en redes urbanas considerando la variabilidad temporal de la demanda, consecuencia de los ciclos vitales y de los hábitos de los usuarios. La fluctuación de la demanda adquiere especial relevancia en las redes de distribución de agua para riego debido al ciclo biológico de la planta en los cultivos estacionales. Hirose [3] con datos de demanda horaria durante un determinado número de años determina los valores medios y, con éstos y el número medio de horas de descarga del depósito calcula la capacidad de una balsa de regulación en un sistema de riego. Mehta y Goto [4] con distintas alternativas de cultivos y patrones de demanda horaria simulan determinados esquemas de operación de una balsa de riego, seleccionando aquel funcionamiento que da la capacidad mínima.

La curva de caudal impulsado hasta el depósito está determinada por el régimen de bombeo: potencia y características de las bombas, caudal impulsado cada hora, número de bombas en marcha, horas de funcionamiento, y momentos de arranque y parada. Este régimen de funcionamiento puede ser continuo o bien estar limitado a las horas bonificadas de tarifa eléctrica las cuales dependen del tipo de contrato del suministro eléctrico. En este último caso el tamaño del depósito será mayor, pero el incremento en la inversión inicial puede compensarse con el ahorro en el consumo de energía eléctrica. De este modo, la relación directa existente entre la capacidad del depósito y su presupuesto obliga a considerar los costes como un factor limitativo en la magnitud del depósito a proyectar. Sabet y Helweg [5] analizan la inclusión en una red de distribución de un depósito de regulación que almacena el agua durante los períodos bonificados de energía eléctrica para su uso durante los períodos de demanda punta. La función objetivo a minimizar incluye los costes de amortización de la inversión del depósito y los costes de operación del sistema (costes de energía eléctrica). Los resultados, considerando un período de simulación de 24 horas, muestran un decremento del 25 % en el coste total del sistema de impulsión.

El objetivo principal de este trabajo es obtener una capacidad de almacenamiento que permita elevar el agua en las horas con el coste energético más ventajoso y establecer una política de bombeo para el período anual de funcionamiento, pero siempre adaptando el esquema de operación a la forma de demandar de los usuarios de la red de distribución. En definitiva se trata de proponer con los datos actuales de un sistema de distribución de agua (características hidráulicas y demanda de agua), un diseño del depósito de regulación y de estimar su esquema de operación para un período próximo de tiempo que en este caso va a ser un período anual de funcionamiento. De este modo en el modelo de optimización desarrollado se propone la integración de la fase de diseño del depósito con la planificación y gestión del sistema de impulsión.

Para ello se ha desarrollado una aplicación de ordenador DYGOSIA v.1.0, que pretende ser un aporte metodológico y una herramienta de posible utilización en cualquier red hidráulica a presión [6]. Este modelo se ha aplicado en la optimización del diseño y gestión del sistema de impulsión de la zona regable de Fuente Palmera (perteneciente a los términos municipales de Córdoba y Sevilla-España).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Formulación de la función objetivo

El problema se formula bajo el objetivo de minimizar una función objetivo que contempla como costes asociados al sistema: a) el valor anual equivalente del coste de inversión C_I del depósito que se amortiza a lo largo de t años a una tasa de interés r ; b) los costes energéticos de los grupos de bombeo C_E :

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^{NE} \sum_{j=1}^{nb} \left[\frac{g Q_j(t) H_j(t)}{h_j(t)} C_{Ej}(t) \right] Dt + \frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} C_I \right\} \quad (1)$$

donde NE es el número de etapas o intervalos considerados en el período de optimización; nb es el número de grupos de bombeo; g es el peso específico del agua; $Q_j(t)$ es el caudal impulsado por el grupo de

bombeo j durante el intervalo t ; $H_j(t)$ es la altura de energía que suministra el grupo de bombeo j al agua en el intervalo t ; $\eta_j(t)$ es el rendimiento global de los grupos de bombeo j en el intervalo t ; $C_{Ej}(t)$ es el coste del consumo de la energía eléctrica durante el intervalo t en la estación de bombeo j , en €/kWh; y Δt es la duración adoptada para el intervalo t .

El conjunto de restricciones a que se ve sometida la función objetivo es el siguiente:

- El caudal impulsado, la altura de energía suministrada y el rendimiento global de los grupos de bombeo será función de las características de las bombas y de sus esquemas de operación.
- El volumen de agua útil almacenado en el depósito de regulación debe mantenerse dentro de unos límites de seguridad marcados por un volumen mínimo V_{\min} y otro máximo V_{\max} :

$$V_{\min} \leq V(t) \leq V_{\max} \quad \forall t \quad (2)$$

- Debe verificarse el balance de volúmenes en el depósito:

$$V(t) - V(t-1) = [Q(t) - Demanda(t)] \Delta t \quad \forall t \quad (3)$$

- Los volúmenes almacenados en el depósito al final del período de optimización deben coincidir con los volúmenes iniciales, por lo que el volumen total aportado a la red a lo largo del período de optimización debe ser igual al demandado:

$$V(NE) = V(0) \quad (4)$$

$$\sum_{t=1}^{NE} Q(t) = \sum_{t=1}^{NE} Demanda(t) \quad \forall t \quad (5)$$

El período de optimización se divide en intervalos horarios por ser la base de todos los sistemas de discriminación en la tarificación eléctrica. Para la resolución del problema planteado se propone un procedimiento iterativo, ya que la función de costes a minimizar es no lineal debido a que los posibles depósitos y grupos motor-bomba se constituyen como series discretas (series comerciales) (Fig. 1). Dado que el coste de amortización del sistema en estudio aumenta con el volumen del depósito, al contrario de lo que le ocurre a los costes energéticos, existe un mínimo del coste total que se corresponde con una determinada capacidad de depósito y cuya determinación se realiza mediante un proceso de búsqueda dicotómica [7-8]. Con este procedimiento se analizan distintas capacidades de regulación hasta determinar la que implica un coste total mínimo. Se considera que el volumen útil o de regulación del depósito no será inferior a la mayor demanda horaria en todo el período de funcionamiento del sistema ($V_{\max 1}$, Fig. 1). Como límite superior se considera la demanda de los 10 días de máximo consumo ($V_{\max q}$, Fig. 1). Asimismo se ha desarrollado un algoritmo para la determinación de la política de bombeo anual al depósito para una capacidad de regulación dada (apartado 2.3).

El modelo propuesto requiere como datos de entrada: 1) Características hidráulicas del sistema de distribución de agua; 2) Datos históricos de demanda de agua; 3) La estructura del contrato del suministro de energía eléctrica (Datos de entrada, Fig. 1).

2.2. Diseño del depósito de regulación. Costes de inversión

El modelo incluye una base de datos con distintos tipos de depósitos en cuanto a su forma y material. Depósitos cilíndricos y con forma de paralelepípedo de acero galvanizado y hormigón, y depósitos semi-enterrados de polietileno con forma de tronco pirámide de base cuadrada (Fig. 2). Junto con el coste de los depósitos se considera el coste de oportunidad que supone dejar de percibir el beneficio derivado del uso de la superficie de terreno ocupado. El modelo recomienda un tipo de depósito en función del volumen de regulación necesario.

El modelo selecciona el depósito cuyo volumen total es el volumen útil o de regulación incrementado al incluir un resguardo inferior para emergencias y uno superior para prevenir rebosamientos debidos a lluvias o a errores en la operación de las bombas. Ambos resguardos se corresponden con el 20% del volumen útil o de regulación [9-10].

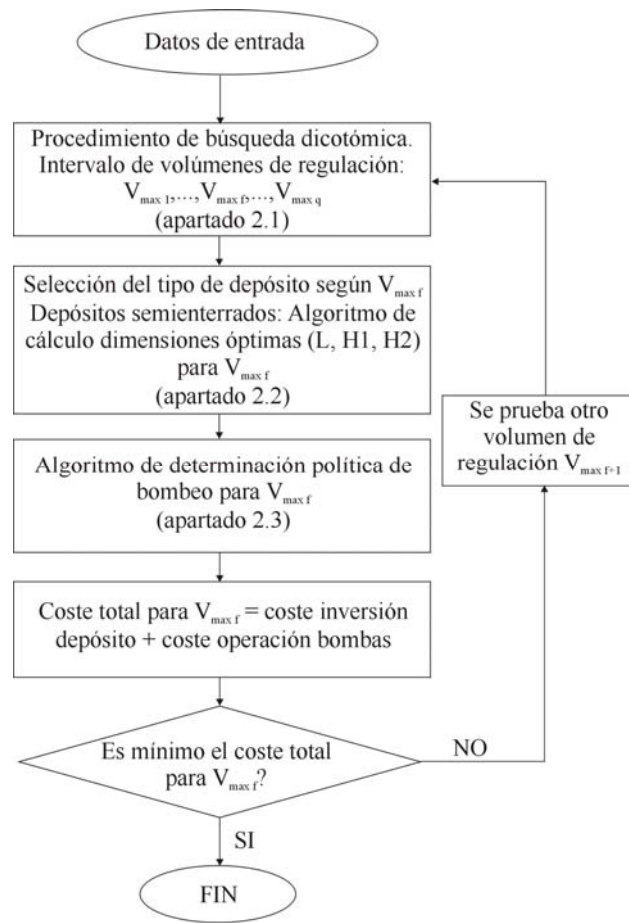


Fig. 1. Organigrama del modelo de optimización.

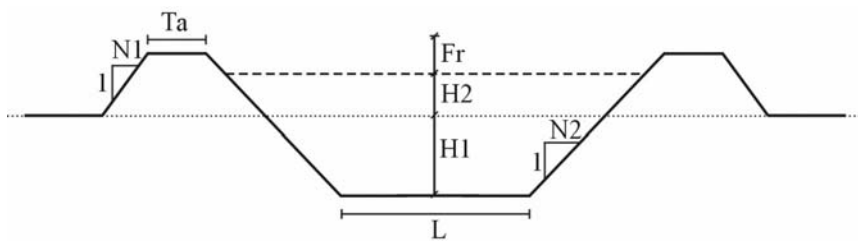


Fig. 2. Sección transversal de un depósito semienterrado y parámetros que la describen.

Un algoritmo ha sido propuesto para calcular las dimensiones óptimas de los depósitos semienterrados (**L**, **H1** y **H2** en Fig. 2) para una capacidad de regulación determinada (Fig. 1). Los tres elementos que de manera sustancial influyen en el coste de un depósito semienterrado son: movimiento de tierras, superficie de impermeabilización y superficie de terreno ocupado [11-12].

El volumen total del depósito **VT** (m^3) viene dado por:

$$VT = L^2 (H1 + H2 + Fr) + 2 L N2 (H1 + H2 + Fr)^2 + 1,33 N2^2 (H1 + H2 + Fr)^3 \quad (6)$$

siendo **L** la longitud (m) del lado de la base del depósito, **H1** la profundidad (m) de la excavación, **H2** la diferencia (m) entre la altura del agua y la profundidad de la excavación (**H1**), **Fr** el resguardo o diferencia (m) entre la altura del depósito y la del agua, y **N2** la pendiente interior (Fig. 2).

El coste de excavación del depósito es proporcional al volumen excavado **VX** (m³), el cual se calcula como:

$$VX = L^2 HI + 2 L N2 HI^2 + 1,33 N2^2 HI^3 \quad (7)$$

Como es deseable minimizar el coste de excavación, **VX** será igual al volumen aportado para construir los terraplenes **VL** (m³), considerando un coeficiente **CF** de diferencia, para compensar las pérdidas en los movimientos de tierras:

$$VL = 4 \left[L + 2 N2 (H1 + H2 + Fr) + 2Ta + 2 N1 (H2 + Fr) \right] \left[0,5 (N1 + N2) (H2 + Fr)^2 + Ta (H2 + Fr) \right] \quad (8)$$

$$VL = VX (1 + CF) \quad (9)$$

donde **N1** es la pendiente exterior del depósito y **Ta** la anchura (m) del pasillo de coronación (Fig. 2).

El coste de impermeabilización es proporcional a la superficie a impermeabilizar **SI** (m²):

$$SI = L^2 + 4 \left\{ \left[L + (H1 + H2 + Fr) N2 \right] (H1 + H2 + Fr) \sqrt{1 + N2^2} \right\} \quad (10)$$

La superficie de terreno **ST** (m²) ocupado se calcula como:

$$ST = \left[2 (H1 + H2 + Fr) N2 + L + 2Ta + 2 (H2 + Fr) N1 \right]^2 \quad (11)$$

Para poder establecer las dimensiones geométricas (**L**, **H1** y **H2**) que hagan mínimo el coste de inversión de un depósito semienterrado para un volumen de regulación dado, se han fijado las siguientes premisas para los valores de **N1**, **N2**, **Ta** y **CF** que dependen de los métodos locales de construcción: **N1** = 2, **N2** = 3, **Ta** = 5 m y **CF** = 10 % [11]. Asimismo, se consideran las alturas del agua contenida en el depósito (**H1+H2**) en el intervalo de 2 a 12 m [13], quedándonos así del lado de la seguridad ya que cuanto mayor sea la altura líquida mayor será la presión que se ejerce sobre el fondo y los taludes laterales, y en consecuencia los riesgos de hundimiento del terreno y de rotura por sobretensión de la membrana impermeabilizante son mayores.

Las dimensiones de **L**, **H1** y **H2** para un volumen de almacenamiento determinado se calculan iterativamente. En primer lugar se selecciona un valor inicial de (**H1+H2**) y con la ecuación (6) se obtiene **L** considerando que **L** > (**H1+H2**). Los valores de **H1** se determinan con las ecuaciones (7)-(9) usando el método numérico de Newton [8], finalizando su proceso iterativo cuando se cumple que $|H1_{k+1} - H1_k| \leq 0,001$. **H2** se calcula como diferencia entre la altura del agua contenida en el depósito (**H1+H2**) y **H1**. De este modo, se incrementa el valor de (**H1+H2**) y se repite el proceso anterior hasta conseguir, para un volumen determinado, las dimensiones geométricas que hagan mínimos los costes del depósito.

De cara al balance volumétrico en el depósito, se considera que las extracciones se realizan al final del período horario correspondiente y la alimentación al principio del mismo. De esta manera, al no superponerse en el modelo la alimentación con la extracción, no resulta necesario conocer la evolución real de las demandas dentro del período horario considerado. La utilización de esta hipótesis en sistemas reales, implica un mayor grado de seguridad ante el rebosamiento del depósito.

2.3. Política de bombeo al depósito de regulación. Coste de operación de las bombas

Un algoritmo se ha desarrollado para determinar el esquema de operación del depósito para un volumen de regulación dado. El fundamento del algoritmo se basa en el concepto de *período de vaciado* [14], definiéndose éste, como el intervalo horario ($i < j \leq i+k$) en cuya hora inicial t_{i+1} el depósito tiene almacenado un volumen de regulación determinado y en cuya hora final t_{i+k} se producirá un déficit (volumen almacenado igual o menor que el volumen correspondiente al resguardo inferior). De este modo, habrá diferentes períodos de vaciado durante el período de funcionamiento anual. Si **V_j** es el volumen útil almacenado en la hora **j**, se podrá definir un volumen útil de recepción **VR_j** mediante:

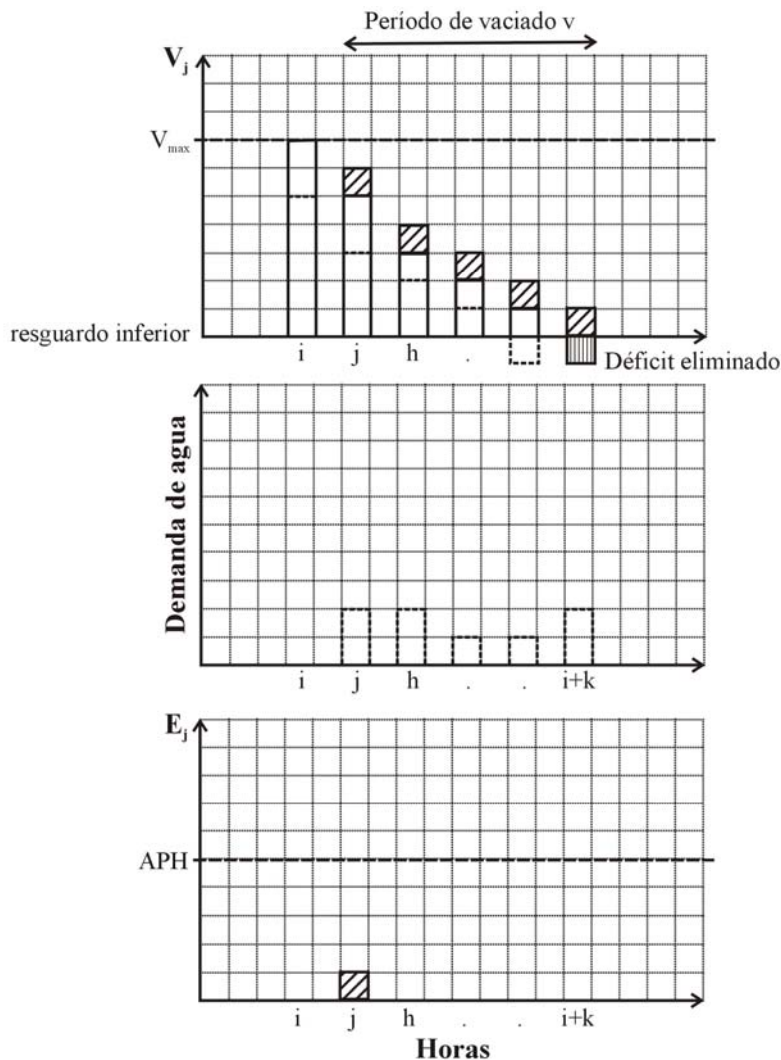


Fig. 3. Incremento de volumen a bombear en la hora j ($E_{j,v} = \Delta V_{j,v}$) condicionado por el déficit producido al final del período de vaciado v (hora $i+k$: $-V_{i+k,v}$). El déficit se ha eliminado, satisfaciéndose las demandas en el período de vaciado v : $\Delta V_{j,v} = -V_{i+k,v}$. La hora j es la de mayor bonificación energética dentro del período de vaciado v .

$$VR_j = V_{max} - V_j \tag{12}$$

siendo V_{max} el volumen útil máximo de almacenamiento. El valor inicial de V_i ($t = 0$) es V_{max} , es decir, se inicia el algoritmo con el depósito lleno de agua.

Se define el *aporte potencial horario APH*, como el volumen que se aportaría al depósito en una hora, bombeando el grupo de impulsores el caudal de diseño. El vector \bar{E} ($E_i, \dots, E_j, \dots, E_{i+k}$) representa los volúmenes impulsados en cada hora j , y cuyo cálculo es el objetivo primordial del algoritmo. Para cada hora j , se pueden realizar diversos bombeos en diferentes períodos de vaciado (u, v, \dots, z): $E_j = E_{j,u} + E_{j,v} + \dots + E_{j,z}$.

El déficit que ocurre al final de un determinado período de vaciado v del depósito deberá ser corregido incrementando el volumen de agua almacenada en alguna hora j perteneciente a dicho período ($i < j \leq i+k$). El algoritmo seleccionará la hora de mayor bonificación energética dentro del período de vaciado del depósito de regulación. El incremento de volumen a bombear en dicha hora j estará condicionado por:

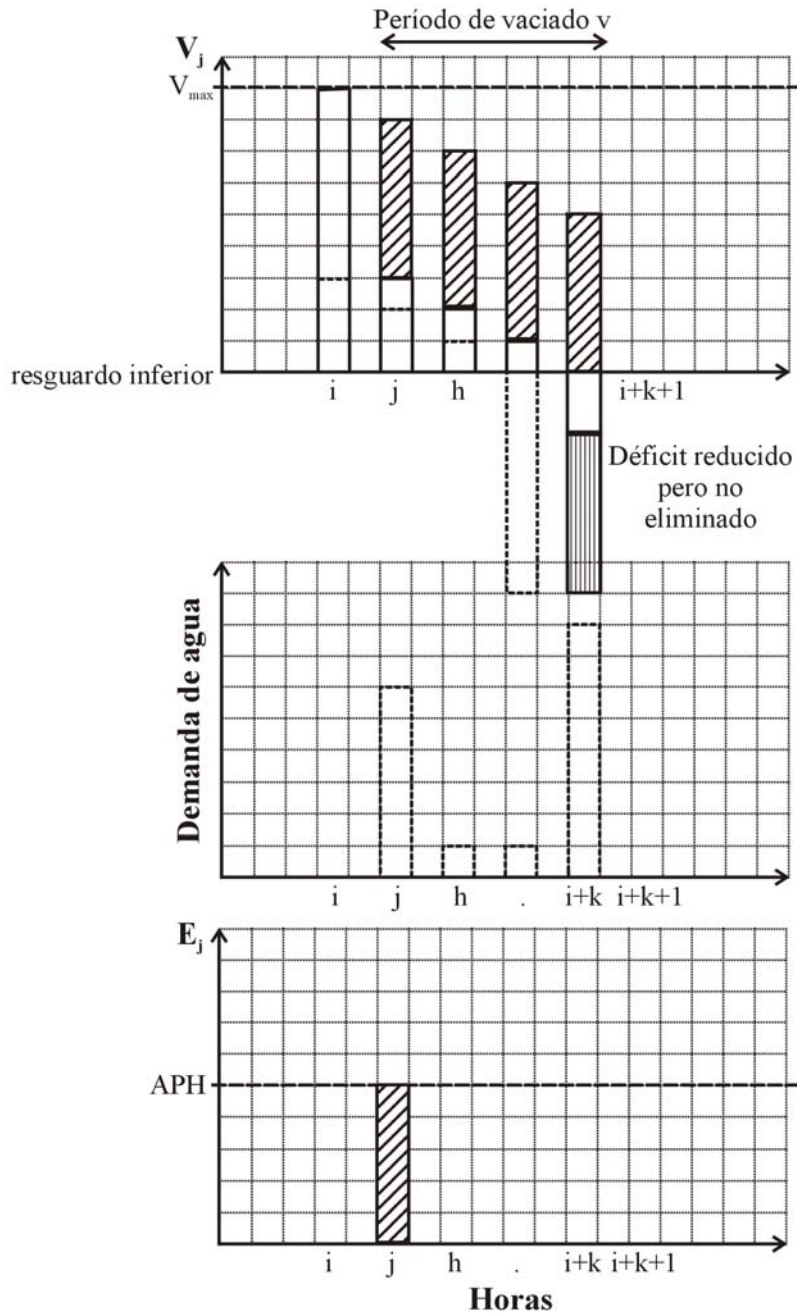


Fig. 4. Incremento de volumen a bombear en la hora j ($E_{j,v} = \Delta V_{j,v}$) condicionado por el aporte potencial horario **APH**. No se ha satisfecho el déficit de la hora $i+k$ ($-V_{i+k,v}$) si bien se ha reducido: $\Delta V_{j,v} = APH$. La hora j es la de mayor bonificación energética dentro del período de vaciado v .

- El déficit producido al final del período de vaciado v , $-V_{i+k,v}$ (Fig. 3).
- La diferencia entre el aporte potencial horario y el volumen impulsado en la hora j en algún período de vaciado u anterior al v , $APH - E_{j,u}$ (Fig. 4: En este caso, no hay bombeo en la hora j en un período de vaciado u anterior al v).
- El mínimo volumen de recepción de las horas comprendidas entre la hora j elegida para el bombeo y la hora final ($i+k$) del período de vaciado v , $\min (VR_{j,v}, VR_{j+1,v}, \dots, VR_{i+k,v})$ (Fig. 5).

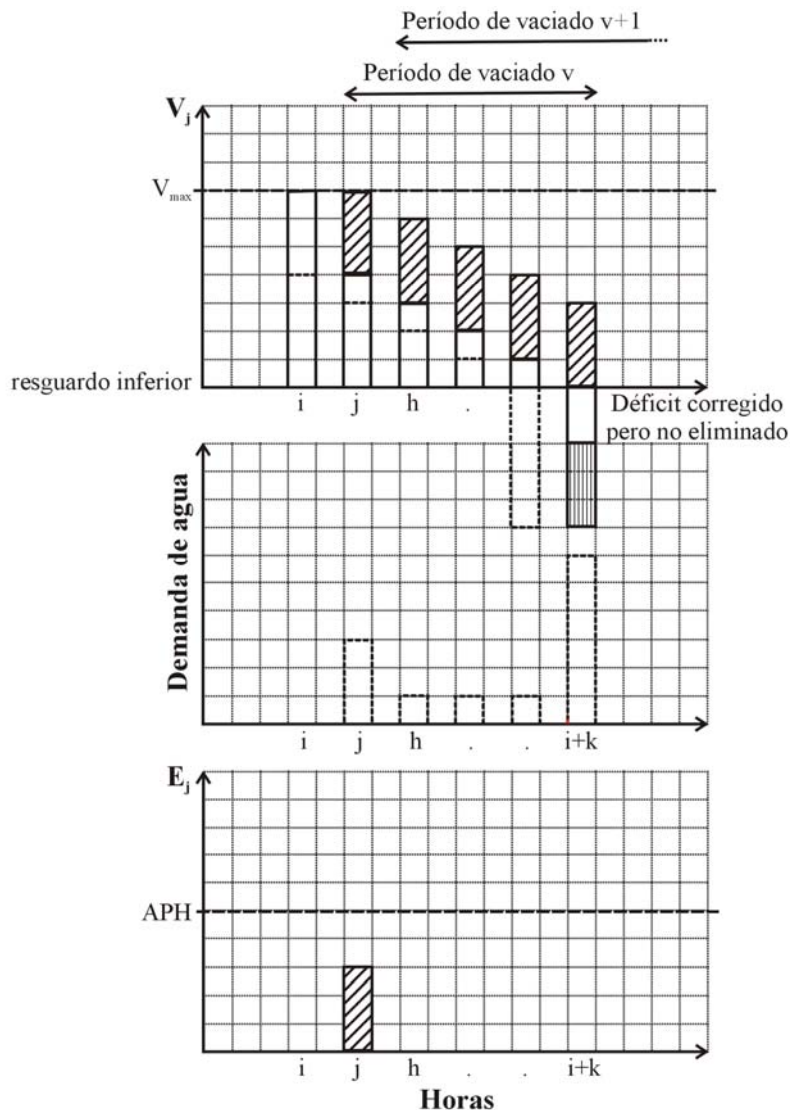


Fig. 5. Incremento de volumen a bombear condicionado por el menor volumen de recepción $VR_{j,v}$ de las horas comprendidas entre la hora elegida para el bombeo (hora j) y la hora final del período de vaciado v (hora $i+k$). No se ha satisfecho el déficit de la hora $i+k$ ($-V_{i+k,v}$) si bien se ha reducido: $\Delta V_{j,v} = VR_{j,v}$. La hora j es la de mayor bonificación energética dentro del período de vaciado v .

El incremento de volumen que habrá que realizar en la hora j mediante bombeo será:

$$\Delta(V_{j,v}) = \min \left[-V_{i+k,v}, \min(VR_{j,v}, VR_{j+1,v}, \dots, VR_{i+k,v}), APH - E_{j,u} \right] \quad (13)$$

Una vez incrementado el volumen en la hora j , vía incremento de $E_{j,v} = \Delta V_{j,v}$, los volúmenes disponibles para el intervalo comprendido entre la hora j elegida para el bombeo y la hora final ($i+k$) del período de vaciado v se verán incrementados en igual magnitud. Tras esta operación el déficit de la hora final del período de vaciado v se habrá eliminado o se habrá corregido. Habiéndose cumplido alguna de las tres condiciones siguientes:

- Se ha cubierto el déficit en la hora $i+k$ ($-V_{i+k,v}$), satisfaciéndose las demandas del período de vaciado v [Fig. 3 y ecuación (14)]. Seguidamente, se analiza la siguiente hora ($i+k+1$) y, caso

de que exista déficit, se procederá de la forma descrita para corregirlo, quedando el período de vaciado igual al anterior incrementado en una hora: **(i, i+k+1)**.

$$\Delta(V_{j,v}) = -V_{i+k,v} \quad (14)$$

- No se ha satisfecho el déficit de la hora **i+k**, si bien se habrá reducido (Fig. 4), siendo el nuevo déficit el calculado por la expresión (15), con un incremento de volumen dado por la ecuación (16). Como el aporte realizado en la hora **j** será igual al **APH**, dicha hora ya no será hábil para corregir el nuevo déficit. De este modo, se deberá reasignar el valor de **j** dentro del período de vaciado **v** para corregir el nuevo déficit. Esta nueva hora será la siguiente con mayor bonificación energética dentro del período de vaciado **v**.

$$-V_{i+k,v} = -V_{i+k,v} + \Delta(V_{j,v}) \quad (15)$$

$$\Delta(V_{j,v}) = APH - E_{j,u} \quad (16)$$

- No se ha satisfecho el déficit de la hora **i+k**, pero se ha reducido [ecuación (15)], con un incremento de volumen dado por la ecuación (17) (Fig. 5). El período de vaciado se habrá reducido iniciándose el nuevo período en la hora **h** con **(j < h ≤ i+k)**.

$$\Delta(V_{j,v}) = \min(VR_{j,v}, VR_{j+1,v}, \dots, VR_{i+k,v}) \quad (17)$$

Se procede de la misma manera para el nuevo déficit y el nuevo período de vaciado, y el proceso iterativo se completa hasta cubrir todo el período de funcionamiento del sistema. Se habrá obtenido de esta forma, la distribución de volúmenes bombeados en cada hora del período anual de funcionamiento mediante el vector $\bar{\mathbf{E}}$, para un volumen de almacenamiento del depósito de regulación. A partir de $\bar{\mathbf{E}}$ se determina la potencia absorbida \mathbf{P}_i en cada hora por las bombas, y por consiguiente, el coste del consumo de energía, mediante la caracterización del funcionamiento de las bombas con las curvas características altura de energía-caudal (**H-Q**) y potencia absorbida-caudal (**P-Q**). Admitiendo la variación cuadrática de las variables **H** (energía real ganada por el líquido) y **P** (potencia absorbida al motor por el eje de la bomba) con **Q**, las curvas características se modelan analíticamente mediante análisis de regresión a partir de las gráficas proporcionadas por los fabricantes [5,15-18].

El rendimiento global η de una bomba considera el rendimiento hidráulico debido a pérdidas hidráulicas durante el tránsito a través de la bomba, el rendimiento mecánico debido a las pérdidas por rozamiento hidráulico y mecánico, y el rendimiento volumétrico debido a posibles fugas. La modelación analítica de la curva característica rendimiento global-caudal (η -**Q**) se obtiene mediante un ajuste directo como combinación de las dos curvas características precedentes ya que: $\eta = \gamma Q H/P$. Se define el rendimiento de regulación η_{reg} como el cociente entre la potencia necesaria (producto del caudal solicitado por la altura de energía necesaria) y la potencia suministrada (producto del caudal solicitado por la altura de energía real ganada por el agua). Dadas las características hidráulicas del sistema de distribución y los datos de demanda horaria de agua, la altura de energía necesaria que debe aportar la estación de bombeo se calcula aplicando la ecuación de la energía. Las pérdidas de carga por rozamiento se calculan aplicando la ecuación de Darcy-Weisbach y el coeficiente de fricción se estima mediante la ecuación de Colebrook-White.

El caudal y la altura de energía necesarios nos indicarán las condiciones de bombeo ideales, mientras que la curva característica (**H-Q**) de los grupos de bombeo nos indicará las reales. La diferencia entre una y otra será un índice para contrastar la rentabilidad energética de un sistema de regulación determinado. Luego es importante llamar la atención sobre el rendimiento de regulación η_{reg} , al que en realidad se le presta poca importancia al diseñar un sistema de impulsión, pero que puede incrementar los costes de operación posteriores. De este modo, el problema de la regulación económica de una bomba consistirá pues en adaptar el caudal a las exigencias de servicio de cada instante con el mayor rendimiento de la instalación posible, es decir, empleando la mínima potencia de accionamiento.

3. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se va a aplicar la metodología expuesta al sistema de impulsión de la red hidráulica a presión de la zona regable de Fuente Palmera, con aproximadamente unas 5000 ha regables pertenecientes a las provincias de Córdoba y Sevilla (España). Las necesidades medias de la zona son $16,5 \pm 5,9 \text{ hm}^3$ de agua anuales que es preciso derivar del río Guadalquivir. Se trata de una zona regada por aspersión a la demanda, por lo que la frecuencia de los riegos se adapta a las necesidades en función de los cultivos, la época del año y las condiciones climáticas.

Analizando la evolución de los cultivos de mayor extensión superficial e importancia económica de la zona regable desde la campaña de riegos 1984/85 hasta la 1997/98, la alternativa media de cultivos consta de un $43,31 \pm 18,68 \%$ de algodón, $23,78 \pm 11,60 \%$ de girasol, $14,30 \pm 8,30 \%$ de trigo, $3,37 \pm 2,79 \%$ de remolacha, $2,81 \pm 3,47 \%$ de olivar, $2,61 \pm 3,39 \%$ de maíz, $1,41 \pm 2,52 \%$ de sorgo, $1,23 \pm 1,07 \%$ de cítricos y $1,12 \pm 1,07 \%$ de melón/sandía.

El sistema de impulsión se divide en dos etapas: estación de bombeo extracción o de toma (4 grupos en paralelo) y estación de impulsión o de puesta en carga (6 grupos en paralelo). La primera se realiza hasta un depósito apoyado en el suelo de 5000 m^3 que se constituye en cámara de aspiración de la segunda impulsión. Este depósito tiene un volumen que no permite el independizar el régimen de funcionamiento de las dos estaciones de bombeo, con lo que su papel se relega a dar presión a la red principal de tuberías que es ramificada y que lleva el agua desde la estación de puesta en carga hasta 78 agrupaciones de parcelas y, desde aquí, el agua se distribuye a las parcelas mediante una red secundaria enterrada y fija. De la boca de riego situada en cada unidad de explotación, parten los ramales de aspersión.

En el contrato del suministro de energía eléctrica se tienen 8 horas valle (0,026 €/kWh en temporada eléctrica baja -mayo, junio, agosto y septiembre- y 0,029 €/kWh en temporada eléctrica media -marzo, abril, julio y octubre-), 12 horas llano (0,045 €/kWh en temporada eléctrica baja y 0,050 €/kWh en temporada eléctrica media) y 4 horas punta (0,076 €/kWh en temporada eléctrica baja y 0,085 €/kWh en temporada eléctrica media) al día. Los períodos horarios son de 12 p.m. a 8 a.m. en valle, de 10 a.m. a 2 p.m. en punta y el resto en llano).

3.1. Demanda horaria de agua

Se dispone de datos horarios del caudal demandado por el sistema de distribución durante una serie de ciclos de funcionamiento durante los años 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1996 y 1997. Con estos datos se obtiene, mediante una análisis no jerárquico de 'clusters' [19-20], un patrón de demanda horaria para todo el período anual de funcionamiento (campaña de riegos), que se utiliza para desagregar la demanda diaria de la alternativa media de cultivos en la demanda horaria media del sistema de distribución [4,21], como se describe a continuación.

El análisis de 'clusters' es un método estadístico de clasificación automática de datos que se utiliza en este trabajo para determinar los posibles patrones estándares de demanda horaria de la zona regable. A partir de los datos horarios de caudales disponibles, se trata de situar los días en grupos homogéneos o 'clusters', de manera que las demandas horarias a lo largo de un día que puedan ser consideradas similares sean asignadas a un mismo grupo, mientras que evoluciones diferentes de la demanda horaria se localicen en grupos distintos. El algoritmo de clasificación no jerárquica que se utiliza es el de las K-medias que se basa en hacer mínima la varianza residual (varianza dentro de los grupos formados) y máxima la varianza factorial (varianza entre los grupos formados). Para conseguir patrones de demanda unitarios y asegurar la comparabilidad, se estandarizan previamente todos los datos disponibles de demanda horaria. El análisis precisa que se fije de antemano el número de grupos en que se quiere agrupar las evoluciones horarias de demanda diaria; como a priori ni se conoce el número de grupos, la prueba se ha repetido haciendo de 2 a 8 grupos a fin de tantear la clasificación que mejor se ajuste al objetivo del problema, o la de más clara interpretación.

El análisis de 'clusters' se inicia formando dos grupos homogéneos con los registros horarios disponibles del caudal impulsado a la red de distribución. Uno agrupa 411 días (cluster 1 de la Fig. 6a) y el otro los 58 días restantes (cluster 2 de la Fig. 6a), obteniéndose valores del indicador de la bondad de separación (Pseudo F) aceptables y niveles de significación $p < 0,001$. En las siguientes pruebas con mayor nú-

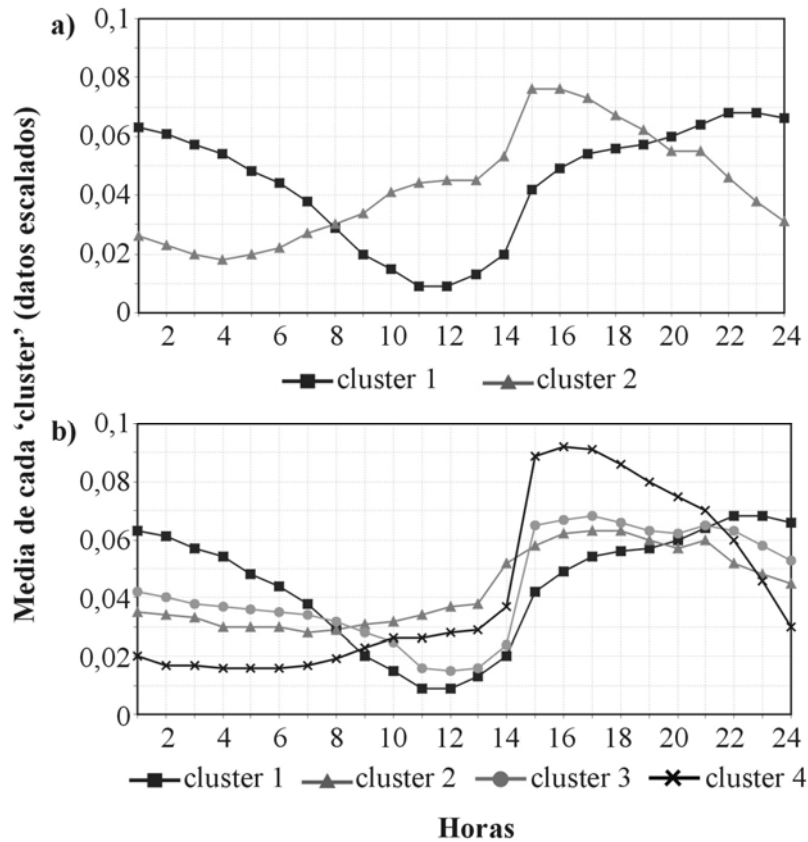


Fig. 6. Análisis no jerárquico de 'clusters': a) dos grupos de separación; b) cuatro grupos de separación.

mero de grupos formados, se mantiene el grupo que anteriormente englobaba los 411 días mientras que los otros 58 días se incluyen en los grupos restantes disminuyendo el número de casos en cada grupo homogéneo conforme aumenta su número (Fig. 6b). Estos últimos se presentan de forma aleatoria en cualquier momento de la temporada de riegos, lo que nos indujo a pensar que los 58 días son casos atípicos, seleccionando como patrón de demanda horaria el que agrupa los 411 días.

Las necesidades hídricas de los cultivos se calculan restando la evapotranspiración del cultivo ET_c y la precipitación efectiva. La evapotranspiración del cultivo se determina como: $ET_c = k_c ET_0$, donde ET_0 es la evapotranspiración de referencia que cuantifica la demanda evaporativa de la atmósfera y k_c es el coeficiente de cultivo que incluye los efectos propios del cultivo como pueden ser el área foliar, la altura, el porcentaje de suelo cubierto, etc. [22]. Para el cálculo de ET_0 diaria se ha utilizado la expresión de Hargreaves que sólo requiere datos de temperatura [23]. Los valores de k_c se tomaron de trabajos experimentales realizados en zonas próximas a las de estudio y de otras investigaciones [24-27]. Parte del agua de lluvia se pierde por escorrentía. Solamente una fracción de la misma, denominada efectiva, se infiltra y queda almacenada en el suelo a disposición del cultivo. Valores medios en torno al 70% parecen adecuados para ambientes similares a los de este trabajo [26-27].

La aplicación de un modelo de regresión lineal entre los usos diarios de agua registrados y las necesidades hídricas de la alternativa de cultivos de estos años ha dado resultados aceptables [$R^2 = 0,62$; $F(1,469) = 403$; $p < 0,001$; Demanda ($m^3/día$) = $9244,3 + 0,52$ Necesidades ($m^3/día$)]. De este modo, con este modelo de regresión y el patrón de demanda horaria se determina el vector de demanda horaria media del sistema de distribución de la zona regable (Fig. 7).

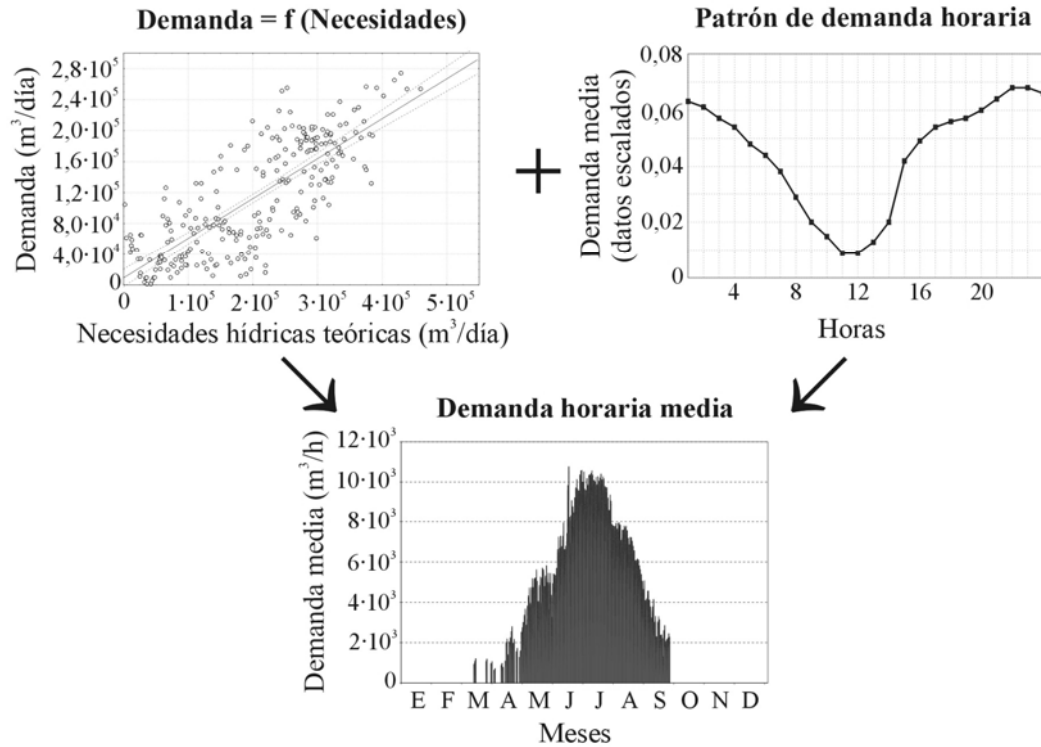


Fig. 7. Desagregación de la demanda diaria de agua en demanda horaria mediante el patrón de demanda horaria.

4. RESULTADOS

Como datos de entrada al modelo desarrollado, se considera una vida útil del depósito de regulación de 20 años, la tasa de interés de la amortización del 5 % y un coste de oportunidad que supone dejar de percibir el beneficio derivado del uso alternativo de la superficie de terreno ocupada por el depósito de 0,0264 €/m² (renta anual). El modelo recomienda para el caso en estudio un depósito semienterrado de polietileno con forma de tronco pirámide de base cuadrada (Fig. 2). Y por tanto, como parámetros influyentes en el coste del depósito de regulación, se consideran unos costes del material impermeabilizante y del movimiento de tierras de 2,40 €/m² (polietileno de alta densidad de 1,5 mm de espesor) y 2,70 €/m³ (suelo franco), respectivamente.

El volumen útil de almacenamiento de agua resulta de 65000 m³ que es el 41 % de la demanda máxima diaria (158000 m³/día) y el 0,42% de la demanda total (15400000 m³) de la zona regable. A este volumen se le añade un resguardo inferior y uno superior, teniendo así un volumen total del depósito de regulación de 91000 m³. Las dimensiones de **L**, **H1** y **H2** (Fig. 2) son de 48,63 m, 5,32 m y 6,68 m, respectivamente.

Con respecto al consumo de energía eléctrica, el coste correspondiente al primer bombeo al incluir el depósito (153000 €/año) es un 33% menor al coste del bombeo directo a la red de distribución (226000 €/año). El coste total anual, que considera el coste amortizado de construcción del depósito y el coste de operación de las bombas, es un 12% menor con la inclusión del depósito de regulación y el período de recuperación de la inversión es de 2 años. Por tanto, se muestra la elevada reducción de los costes energéticos al usar el depósito como adaptación entre las horas de bombeo y el tipo de discriminación horaria, lo que supone una disminución de las potencias absorbidas en horas llano y punta, y el aumento de éstas en horas valle, y mayores rendimientos global y de regulación.

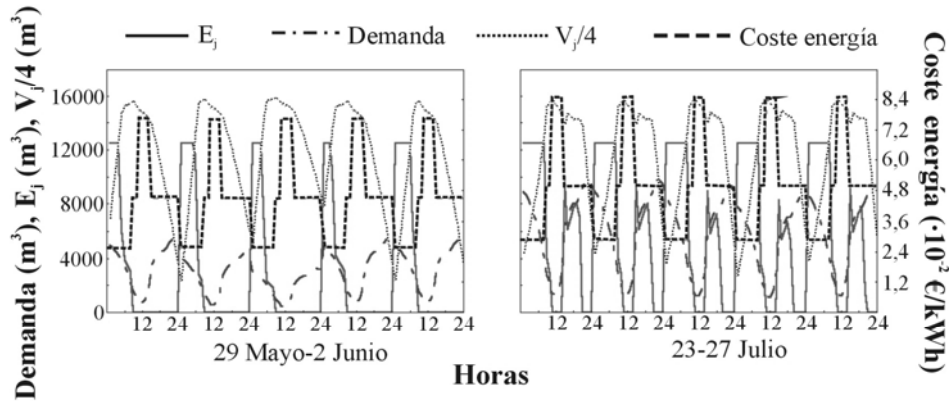


Fig. 8. Régimen de operación óptimo de la estación de bombeo de toma con depósito en dos ciclos de funcionamiento (por razones de escala se representa $V_j/4$).

El régimen de operación óptimo del primer bombeo con el depósito muestra que al principio de los riegos se deben usar únicamente las horas bonificadas de tarifa eléctrica, aumentando su utilización conforme crece la demanda de agua y así, llegar a bombear con el caudal de diseño de las bombas durante las ocho horas valle (2 junio). Este régimen de funcionamiento se mantiene hasta que es necesario el uso de horas llano (6 junio) para satisfacer la demanda de la red de distribución. La utilización de estas horas llano también va aumentando conforme se llega al período de necesidades máximas de agua (21 junio-27 julio), pero sin llegar a usar todas estas horas ni de bombear el aporte potencial horario. Posteriormente, decae su uso y se hace nulo a finales de agosto (20 agosto), volviendo a impulsar al depósito únicamente en horas valle. No es necesario bombear al depósito de regulación en horas punta de tarifa eléctrica (Fig. 8).

Los diagramas de frecuencias de los rendimientos global y de regulación durante todo el período de funcionamiento anual de la red hidráulica a presión, con y sin depósito de regulación, se muestran en la Fig. 9. Los rendimientos global y regulación medios para la primera estación de bombeo son de 79,91% y 92,82%, respectivamente, impulsando a un depósito de regulación, y de 77,22% y 85,49% sin el depósito. La comparación de las distribuciones de frecuencias de los rendimientos global y de regulación para ambas situaciones (con y sin depósito) mediante un test χ^2 de homogeneidad de muestras, muestra diferencias significativas tanto en las distribuciones del rendimiento global ($\chi^2 = 685,81$; $p < 0,001$) como en las distribuciones del rendimiento de regulación ($\chi^2 = 2131,82$; $p < 0,001$).

5. DISCUSIÓN

La presencia del depósito de regulación entre la captación y la red de distribución además de usarse como acumulación del recurso agua, permite optimizar el caudal de trabajo de los diferentes elementos que tiene aguas arriba, al independizar dichos caudales de la variabilidad del uso del agua en la red de distribución, ya que es el depósito el encargado de asumir estas discrepancias entre el caudal que le llega y el caudal demandado. De este modo el régimen de funcionamiento óptimo del bombeo al depósito supone el uso exclusivo de las horas bonificadas de tarifa eléctrica, y sólo es necesario el uso de algunas

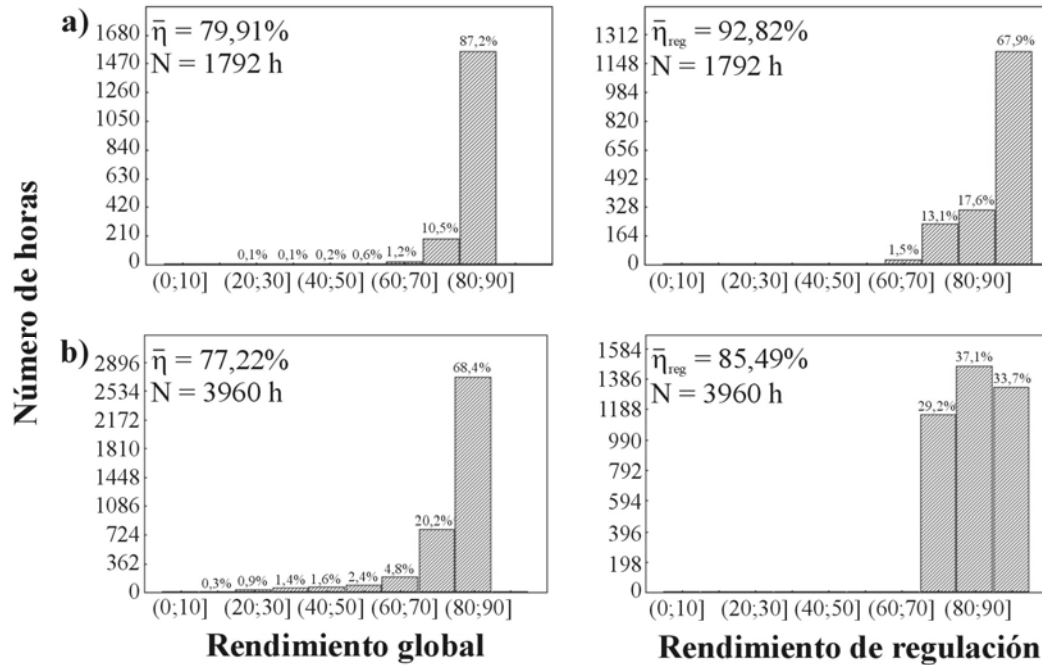


Fig. 9. Distribución de frecuencias de los rendimientos global (η) y de regulación (η_{reg}) en la estación de bombeo de toma: a) con depósito y b) sin depósito (N = número de horas de funcionamiento de los grupos de bombeo).

horas de coste medio en el período de demanda punta de la red de distribución. Este esquema de operación también implica un régimen de funcionamiento de los grupos de bombeo más regular trabajando con mejores rendimientos que en la impulsión directa. Ambas razones determinan que en la impulsión directa del caudal variable demandado por la red de distribución el coste de energía es el 33% mayor al de la impulsión al depósito. Asimismo, el coste total anual (amortización de la inversión del depósito y consumo de energía eléctrica de las dos estaciones de bombeo) es aproximadamente 469000 €/año, un 12% menor que en la situación actual del sistema de distribución sin depósito de regulación.

El volumen de regulación óptimo resulta ser del orden del 40% de la demanda máxima diaria, siendo algo inferior a los obtenidos por Sabet y Helweg [5] y Nel y Haarhoff [2] en redes de distribución urbanas, y mucho menor al recomendado por otros autores [10] que sugieren un volumen correspondiente a la regularización del caudal del día de mayor demanda de agua. El valor obtenido se debe a que el coste actual de la construcción de los depósitos es aún elevado, lo que viene a significar en muchos casos una fuerte inversión con respecto al coste de los demás elementos de la red hidráulica.

El diseño tronco piramidal de base cuadrada considerado para los depósitos semienterrados es la forma deseada desde el objetivo de conseguir la máxima capacidad a igualdad de coste. Si el relieve del terreno lo impone la geometría viable puede alejarse de este óptimo, pero el resultado del modelo desarrollado es un primer grado de aproximación en el diseño en estas circunstancias.

La optimización en diferido (optimización OFF-LINE) del esquema de operación que se propone en este trabajo, aporta unos valores consigna para todo el periodo anual de funcionamiento tomando como partida el estado previsible de la red hidráulica y se constituyen como el trabajo óptimo 'previsto' del sistema de distribución. Si la previsión de las demandas no coincide con la situación real o se producen otras perturbaciones no controladas (roturas, incendios, ...) que alteren el 'punto de trabajo previsto', es necesario un control ON-LINE para corregir dichas deficiencias en un tiempo mínimo buscando un nuevo óptimo en posiciones próximas al punto de trabajo previsto.

Hay tener en cuenta que no siempre la incorporación de un depósito de regulación es la solución más idónea, ya que puede que la inversión inicial no se compense con el ahorro de costes energéticos. Este puede ser el caso de una zona donde la búsqueda de un emplazamiento idóneo puede alejar excesivamente el depósito de la zona de consumo, e incluso de la estación de bombeo, dando lugar a unas pér-

didadas de carga adicionales en las tuberías que aumenten las necesidades de potencia de la instalación y, por consiguiente, aumenten los costes totales. Para llegar a este resultado será necesario realizar el estudio comparativo de costes con los datos concretos de la red de distribución en estudio.

REFERENCIAS

- [1] V.S. Fuertes, J. García-Serra y M. García, “Los depósitos en los sistemas de distribución”, *Ingeniería hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua*, U.D. Mecánica de Fluidos de la Universidad Politécnica de Valencia y Aguas de Valencia, S.A. (Eds.), Vol. II, capítulo 19: 877-935, Valencia (1996)
- [2] D. Nel y J. Haarhoff, “Sizing municipal water storage tanks with Monte Carlo simulation”, *J. Water SRT—Aqua* **45**(4): 203-212 (1996)
- [3] S. Hirose, “Determination of the capacity of a regulating pond in a pipeline irrigation system”, *Rural and Env. Engrg.* **33**: 66-78 (1997)
- [4] B.K. Mehta y A. Goto, “Design and operation of on-farm irrigation ponds”, *J. Irrig. and Drain. Engrg.* **118**(5): 659-673 (1992)
- [5] M.H. Sabet y O.J. Helweg, “Peaking storage tanks for water supply systems”, *Water Resour. Bull.* **25**(5): 1047-1053 (1989)
- [6] I. Pulido-Calvo, J. Roldán, R. López-Luque y J.C. Gutiérrez-Estrada, “DYGOSIA: aplicación de ordenador para el diseño y gestión de estaciones de bombeo y depósitos de regulación en sistemas de distribución de agua”, *Anales de Ingeniería Mecánica* **14**(II): 1263-1266 (2003)
- [7] R.W. Pike y L. Guerra, “Técnicas de búsqueda multidimensional”, *Optimización en Ingeniería*, Alfaomega, 7: 209-252, Madrid (1989)
- [8] F.S. Hillier y G.J. Lieberman, *Introduction to operations research*, McGraw-Hill, Inc., Méjico (2001)
- [9] P.W. Jowitt y G. Germanopoulos, “Optimal pump scheduling in water-supply networks”, *J. Water Resour. Planning and Mgmt.* **118**(4): 406-422 (1992)
- [10] E. Amigó y E. Aguiar, *Manual para el diseño, construcción y explotación de embalses impermeabilizados con geomembranas*, Dirección General de Estructuras Agrarias, Consejería de Agricultura y Alimentación, Gobierno de Canarias (1994)
- [11] Centre Agropecuari ‘Mas Bové’ (C.A.M.B.), *Balsas y embalses para riego*, Generalitat de Catalunya, Diputació de Tarragona y Solvay Láminas Industriales, s.a. (1986)
- [12] D.R. Edwards, J.A. Ferguson y E.O. Fryar, “Analyzing conjunctive use reservoir performance for soybean irrigation. I: Development of a simulation model”, *Trans. ASAE* **35**(1): 129-135 (1992)
- [13] Giscosa, “Todo sobre la impermeabilización de embalses con geomembranas sintéticas”, *Impermeabilización profesional* **7**: 61-78 (1995)
- [14] R. López-Luque, J. Reca y J. Roldán, “Algoritmo de selección y gestión de tarifas de energía eléctrica en los sistemas de impulsión de agua”, *Actas de las XI Jornadas Técnicas sobre Riegos*, AERYD, Valladolid, 323-328 (1993)
- [15] M.T. Yin, J.F. Andrews y M.K. Stenstrom, “Optimum simulation and control of fixed-speed pumping stations”, *J. Envir. Engrg.* **122**(3), 205-211 (1996)
- [16] L.W. Mays, *Water distribution systems handbook*, McGraw-Hill Companies, Inc., Nueva York (2000)
- [17] M. Moradi-Jalal, M.A. Mariño y A. Afshar, “Optimal design and operation of irrigation pumping stations”, *J. Irrig. and Drain. Engrg.* **129**(3), 149-154 (2003)
- [18] I. Pulido-Calvo, J. Roldán, R. López-Luque y J.C. Gutiérrez-Estrada, “Water delivery system planning considering irrigation simultaneity”, *J. Irrig. and Drain. Engrg.* **129**(4), 247-255 (2003)
- [19] J.L. Carrasco y M.A. Hernán, “Análisis de clusters”, *Estadística multivariante en las ciencias de la vida*, Ed. Ciencia, 9: 293-338, Madrid (1993)
- [20] J.F. Hair, R.E. Anderson, R.L. Tatham y W.C. Black, *Multivariate data analysis*, Fifth Ed., Prentice Hall International, Inc., Londres (1998)
- [21] I. Pulido-Calvo, *Diseño y gestión óptimos de sistemas de impulsión y de almacenamiento de agua para riego*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba, Córdoba (2003)
- [22] J. Doorenbos y W.O. Pruitt, *Las necesidades de agua de los cultivos*, Riego y Drenaje 24, FAO, Roma (1977)

- [23] G.H. Hargreaves, "Defining and using reference evapotranspiration", *J. Irrig. and Drain. Engrg.* **120**(6), 1132-1139 (1994)
- [24] J. Doorenbos y A.H. Kassam, *Yield response to water*, Irrigation and Drainage 33, FAO, Roma (1979)
- [25] M. Smith, *Cropwat software manual, version 5.7*, FAO, Roma (1990)
- [26] J. Reça, J. Roldán, M. Alcaide, R. López-Luque y E. Camacho, "Optimisation model for water allocation in deficit irrigation systems II. Application to the Bémbezar irrigation system", *Agric. Water Mgmt.* **48**, 117-132 (2001)
- [27] I. Pulido-Calvo, J. Roldán, R. López-Luque y J.C. Gutiérrez-Estrada, "Demand forecasting for irrigation water distribution systems", *J. Irrig. and Drain. Engrg.* **129**(6), 422-431 (2003)

REGULATING TANKS IN PRESSURIZED WATER DISTRIBUTION NETWORKS

Abstract – A regulating tank between the water supply source and the delivery system buffers the system from fluctuating demands. In addition, the system can reduce energy costs, by storing water pumped during off-peak energy tariff times and by improving the operation of pumping station. A model is proposed to determine a regulating tank's capacity and establish an annual pumping schedule that accounts for energy costs. The optimal tank size and operation minimize the sum of the amortized tank construction and annual pumping costs (annual total cost). The model was applied to a pressurized irrigation delivery system located in southern Spain. The analysis used historical hourly water demand data. The optimal regulating capacity was determined to be 41% of maximum daily demand. Optimal annual pumping to the regulating tank involves pumping mostly during off-peak hours (low-cost energy), and use average-cost energy only during periods of maximum water requirements. The regulating tank reduced the annual electrical energy cost by 33% and the annual total cost by 12% relative to direct pumping to the delivery system.

Keywords – Water demand, pumps, efficiency, cost saving, reservoir.