

TITULO:

**OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DEL BOMBEO EN
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA. APLICACIÓN A
LA SAT N° 2130 "CAMPO DE NIJAR".**

AUTOR: Alfonso García-Manzano Salazar

DIRECTORES: Dr. Juan Reca Cardeña
Dr. Juan Martínez López

1. INTRODUCCION Y ANTECEDENTES:

En nuestro país, la escasa tasa de autoabastecimiento energético (23% en 2009), junto con el compromiso de reducción de las emisiones de CO₂, hacen del ahorro energético un punto clave en la política energética nacional, con el objetivo básico de reducir el crecimiento de la demanda a niveles acordes con el crecimiento económico ^[1].

En el campo de la agricultura, como sector estratégico que continúa siendo, las medidas de ahorro son de suma importancia a la hora de hacerlo competitivo. El gasto energético en los regadíos supone el 26% del total del sector ^[2].

La paulatina modernización de los regadíos en nuestro país ha incrementado mucho las demandas energéticas de las redes de distribución de agua de riego, pasando de sistemas de canalizaciones abiertas a sistemas presurizados en los que hay que incrementar la energía para abastecer las demandas de los riegos de tipo localizado y aspersión, más comunes en la actualidad y más eficientes en el uso del agua. Esta situación se produce también en los sistemas de distribución de agua para riego de invernaderos en Almería.

El coste energético en la fase de gestión y explotación de un sistema de distribución de agua supone, cada vez en mayor medida, un porcentaje elevado del total del gasto de explotación, debido principalmente al aumento gradual y progresivo del precio de la energía.

En general, el mayor consumo energético en las redes de distribución se produce en las captaciones y en las estaciones de bombeo.

Las comunidades de regantes juegan un papel importante en lo que se refiere al ahorro energético en la agricultura de regadío, puesto que gestionan una parte importante del consumo energético del sector.

Existen diferentes medidas que se pueden llevar a cabo para mejorar la eficiencia energética en los sistemas de distribución de agua de riego. Entre ellas se pueden citar la optimización del diseño hidráulico de las redes de distribución, el aumento de la

capacidad de embalse, la sectorización de los sistemas de distribución, la instalación de grupos de bombeo de velocidad variable, etc. Una de las medidas que puede tener una mayor incidencia en la reducción de los costes energéticos, y cuyo coste de implantación puede ser reducido, es la adopción de una política de bombeos acorde con la tarifa eléctrica contratada, así como una correcta elección entre la tarifa eléctrica más adecuada.

En este sentido, una correcta gestión de los bombeos ha de garantizarnos el suministro de los caudales demandados por la red, al mínimo coste, dadas unas especificaciones técnicas propias de cada sistema de distribución.

La presencia de depósitos de regulación en redes de distribución, como es el caso de la C.C.R.R de la que se han tomado los datos para este trabajo, permite independizar los bombeos del consumo.

De esta manera y al poder adaptar la gestión de los bombeos al tipo de tarifa eléctrica se consigue un funcionamiento más estable de las bombas con mejoras en los rendimientos y un ahorro notable tanto en el consumo como en el coste energético de la red ^[3].

Con anterioridad se ha abordado el problema de optimización de bombeos a depósitos en sistemas sencillos, mediante modelos heurísticos que no garantizan que el resultado sea el óptimo ^[4] y ^[5].

Por este motivo en este trabajo, se propone el uso de un modelo robusto basado en técnicas matemáticas de optimización y que garantice la consecución de la política de gestión óptima que minimiza el coste energético en los sistemas de bombeo.

2. OBJETIVOS:

- Desarrollar un modelo teórico que optimice la gestión de los sistemas de bombeo hasta depósitos de almacenamiento de forma que se minimice el coste energético de bombeo para una determinada tarifa eléctrica contratada.
- Poner a punto una aplicación informática que permita llevar a la práctica el modelo propuesto de una forma rápida y eficiente.
- Aplicar el modelo para comparar diferentes tarifas y seleccionar la tarifa óptima en una determinada aplicación.
- Aplicar el modelo propuesto a la red de riego de la SAT nº 2130 "Campo de Nijar" con objeto evaluar la gestión actual del sistema comparándolo con la política óptima proporcionada por el modelo.

3. MATERIAL Y METODOS:

3.1. Planteamiento del modelo:

El objetivo del modelo propuesto es determinar la estrategia de bombeo óptima que minimice el coste energético para un sistema de impulsión de agua hasta un depósito elevado.

El modelo determinará el tiempo óptimo de funcionamiento de las bombas y el volumen elevado en cada periodo tarifario en función del coste de la energía en cada periodo establecido por la tarifa de energía eléctrica.

En este trabajo se va a plantear la gestión óptima de los sistemas de bombeo como un problema de programación lineal. La programación lineal es un procedimiento o algoritmo matemático para resolver un problema, formulándolo a través de ecuaciones lineales. La programación lineal es una herramienta fundamental en la investigación de operaciones y procesos. Se trata de la descripción matemática de procesos mediante funciones lineales. Son de gran utilidad en la resolución de problemas reales en diferentes campos (ingeniería, comunicaciones, ciencias sociales...).

Se trata de modelos matemáticos de tipo determinista (los parámetros asociados son conocidos con certeza absoluta) en oposición a modelos de tipo estocástico (en los que los parámetros asociados al modelo sólo pueden describirse en términos probabilísticos).

Los modelos de programación lineal se caracterizan por buscar el mínimo o máximo de una función lineal objetivo de manera que las variables de dicha función están sujetas a un conjunto de restricciones que se representan como inecuaciones lineales.

3.1.1. Función objetivo:

El objetivo es minimizar el coste energético del bombeo del agua durante un determinado periodo de tiempo (un año en el caso de este estudio). Para una determinada tarifa eléctrica, el horizonte de estudio se va a subdividir en tantos periodos como tramos de discriminación horaria se establezcan. El coste energético total puede calcularse sumando los costes energéticos para cada uno de los periodos de discriminación horaria de la siguiente forma:

$$C = \sum_i p_i (\text{€/Kwh}) \cdot E_i (\text{Kwh}) \quad (1)$$

Siendo: C = coste energético total, p_i = precio de la energía en un periodo i y E_i = energía consumida en dicho periodo.

La energía consumida en un periodo i puede calcularse en función de la potencia y del tiempo de funcionamiento de la instalación:

$$E_i (\text{Kwh}) = P (\text{Kw}) \cdot N (h) \quad (2)$$

Donde: N = número de horas de funcionamiento de la estación de bombeo y P = potencia de la instalación.

Desarrollando la expresión anterior resulta:

$$E_i (\text{Kwh}) = \frac{\gamma (\text{N/m}^3) \cdot Q (\text{m}^3/\text{s}) \cdot H_m (\text{m})}{1000 \eta} \cdot N_i (h) \quad (3)$$

$$E_i (\text{Kwh}) = \frac{\gamma (\text{N/m}^3) \cdot H_m (\text{m})}{\eta} \cdot 3600 V_i (\text{m}^3) = c_i \cdot V_i \quad (4)$$

Finalmente, la función objetivo queda de la siguiente forma:

$$C = \sum_i p_i \cdot c_i \cdot V_i \quad (5)$$

En el caso de que existan varios grupos de bombeo j , esta expresión puede generalizarse de la siguiente forma:

$$C = \sum_i p_i \sum_j c_{i,j} \cdot V_{i,j} \quad (6)$$

En el modelo planteado las **variables** a optimizar son los volúmenes de agua bombeados en cada periodo i por cada sistema de bombeo j ($V_{i,j}$). Se trata, por tanto de una función objetivo lineal.

3.1.2. Restricciones:

Las restricciones al problema son las siguientes:

- **Restricciones de volumen máximo y mínimo:** El volumen bombeado en cada periodo y sistema de bombeo no puede superar la capacidad máxima de bombeo de cada sistema en dicho periodo, lo que puede calcularse en función del caudal elevado y el número de horas que dure el periodo.

$$V_{i,j} (m^3) \leq Q_j \left(\frac{m^3}{h} \right) \cdot N_i(h) \cdot \forall i, j \quad (7)$$

Siendo $V_{i,j}$ el volumen bombeado en el periodo i por el sistema de bombeo j . Si en un problema concreto se analizan un total de n periodos de discriminación horaria y existe un total de m sistemas de bombeo independiente el número de restricciones de este tipo que resultarían sería $(n \times m)$. También habría que introducir $(m \times n)$ restricciones de no negatividad de las variables para evitar que en la solución aparezcan valores negativos del volumen, lo cual es físicamente imposible.

$$V_{i,j} (m^3) \geq 0 \cdot \forall i, j \quad (m \times n) \quad (8)$$

- **Restricciones de capacidad máxima y mínima del embalse:** es necesario imponer restricciones para evitar que el nivel del agua en el depósito exceda su capacidad máxima y se produzca rebosamiento del depósito o se excedan los márgenes de seguridad establecidos y para que el nivel del depósito no baje de la capacidad

mínima establecida y se corra riesgo de agotamiento del mismo y desabastecimiento de la demanda.

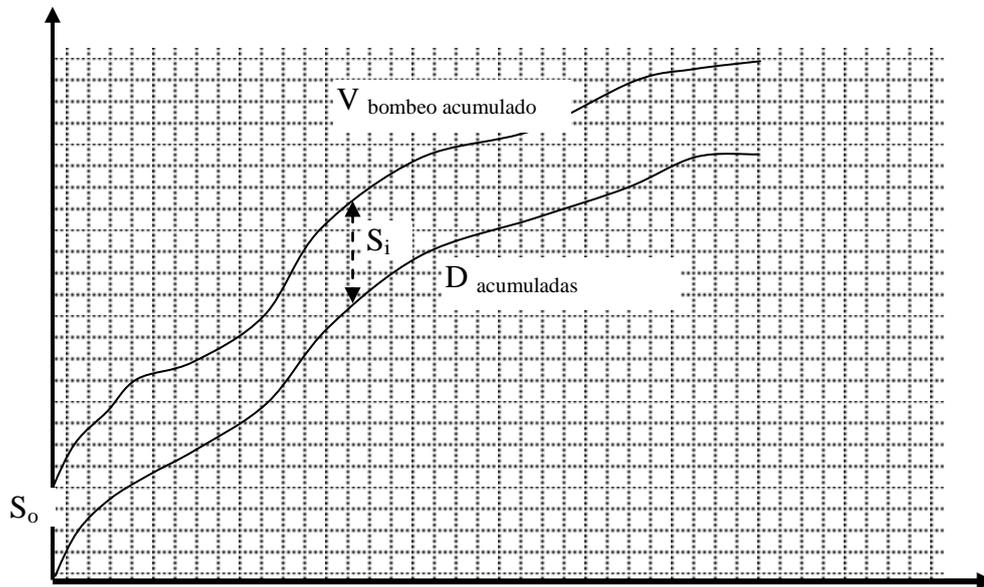


Figura 1. Volumen almacenado

Para un embalse que parte en el instante inicial de un volumen S_o , el volumen embalsado " S_i " en un periodo de tiempo " i " puede calcularse como la diferencia entre la el volumen acumulado hasta " i " menos las demandas acumuladas hasta i (ver figura). Matemáticamente esta condición podemos expresarla como:

$$S_i = S_o + \sum_i (V_i - D_i) \quad (9)$$

Que en caso de que existan varios sistemas de bombeo puede generalizarse de la siguiente forma:

$$S_i = S_o + \sum_i \left(\sum_j V_{i,j} - D_i \right) \quad (10)$$

Las restricciones de volumen máximo y mínimo a imponer quedarían de la siguiente forma:

$$S_i = S_o + \sum_i \left(\sum_j V_{i,j} - D_i \right) \leq S_M \cdots \forall i \text{ (n)} \quad (11)$$

$$S_i = S_o + \sum_i \left(\sum_j V_{i,j} - D_i \right) \geq S_m \dots \forall i \text{ (n)} \quad (12)$$

Serían, por tanto, n restricciones de volumen máximo y otras tantas de volumen mínimo.

- **Restricción de volumen total bombeado:** finalmente es conveniente imponer una restricción para controlar que el volumen final del depósito es igual a un nivel de agotamiento deseado establecido de antemano. Si no impone ninguna restricción de este tipo, el modelo tendería a agotar el volumen del depósito a dejarlo completamente vacío. Dicha restricción puede expresarse matemáticamente de la siguiente forma:

$$S_n = S_o + \sum_{i=1,n} \left(\sum_j V_{i,j} - D_i \right) = S_F \quad (13)$$

$$\sum_{i=1,n} \left(\sum_j V_{i,j} - D_i \right) = S_F - S_o \quad (14)$$

Si se desea que el volumen al final del periodo de análisis sea el mismo que al comienzo el término independiente de la siguiente igualdad sería 0.

El problema formulado de esta forma sería un problema de optimización lineal con restricciones lineales y con un total de nxm variables ($V_{i,j}$). Este tipo de problemas de programación lineal pueden resolverse mediante algoritmos de optimización eficientes que garantizan la convergencia de la solución al óptimo en un tiempo de ejecución razonable. El algoritmo que se ha utilizado en este estudio está basado en el método Simplex Revisado. El algoritmo Simplex fue descubierto por el matemático norteamericano George Bernard Dantzig (Dantzig, G.B, 1963)^[6].

Para facilitar la aplicación del modelo se ha desarrollado una aplicación informática específica que plantea de forma automática el problema y lo resuelve mediante un el uso del algoritmo Simplex Revisado. La aplicación se ha desarrollado en el lenguaje de programación Visual Basic 6.

La entrada de datos al modelo se realiza mediante la lectura de varias bases de datos realizadas en hojas de datos Excel. La lectura y manejo de los datos contenidos en dichas bases de datos se realiza mediante la tecnología ActiveX™ que permite usar la funcionalidad proporcionada por otras aplicaciones la hoja de cálculo Microsoft Excel desde el lenguaje de programación Visual Basic.

3.2. Descripción del sistema de distribución de agua.

3.2.1. Descripción del sistema.

Con objeto de aplicar el modelo desarrollado a un sistema de distribución de agua real, se ha elegido la red de distribución de la SAT 2130 "Campo de Níjar". El motivo ha sido que dicha entidad ha colaborado con el grupo de investigación de Ingeniería Rural en diversos proyectos y dispone de los datos necesarios para la aplicación del modelo.

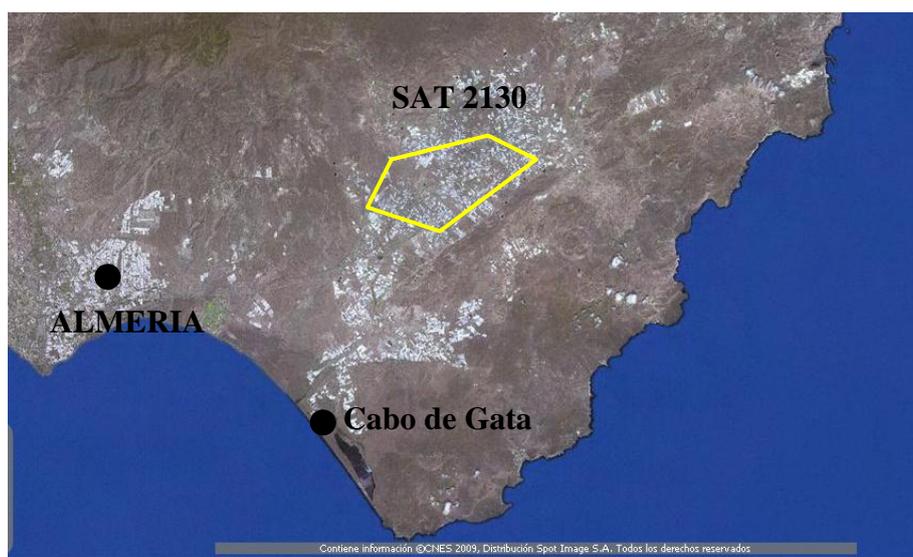


Figura 2. Plano de situación de la SAT 2130

La SAT 2130 "Campo de Níjar" es la entidad encargada de suministrar el agua de riego a una zona de invernaderos de unas 1.300 ha de cultivos de hortalizas bajo plástico situada en el Término Municipal de Níjar en Almería (ver Figura 2).

La red de riego de la CCRR SAT 2130 es un sistema de distribución a la demanda de formado por unas mallas principales y una serie de ramificaciones. La red tiene una

longitud de 123 Km de tuberías, con diámetros que van desde los 1200 mm en las arterias principales a los 50 mm en algunas tomas de parcela.

La SAT posee tres grandes depósitos de regulación con una capacidad de 100.000, 70.000 y 80.000 m³ con una altura de lámina libre de 200 m, que dominan la zona regable y distribuidos geográficamente en diferentes puntos de la red.



Figura 3. Vista de uno de los tres embalses de regulación

Existen también tres estaciones de bombeo (reelevadoras), próximas a cada depósito de regulación cuya misión es bombear el agua hasta cada uno de los depósitos.



Figura 4. Estación reelevadora.

La comunidad de regantes gestiona el agua de origen subterráneo proveniente de 15 sondeos propiedad de la comunidad que están repartidos por toda la zona de riego. Estos sondeos se distribuyen en tres grupos en función de su proximidad a las estaciones reelevadoras. El agua procedente de cada grupo de pozos se conduce mediante una red

de tubería hasta la estación relevadora más próxima. El agua se vierte en un pequeño depósito de poca capacidad desde el que se produce la aspiración de los grupos de bombeo que son los encargados, como se ha mencionado previamente, de elevar el agua hasta los depósitos de regulación (ver figura 4).



Figura 5. Grupos de bombeo de una estación reelevadora.

En la siguiente figura se muestra un esquema general del sistema de distribución de agua:

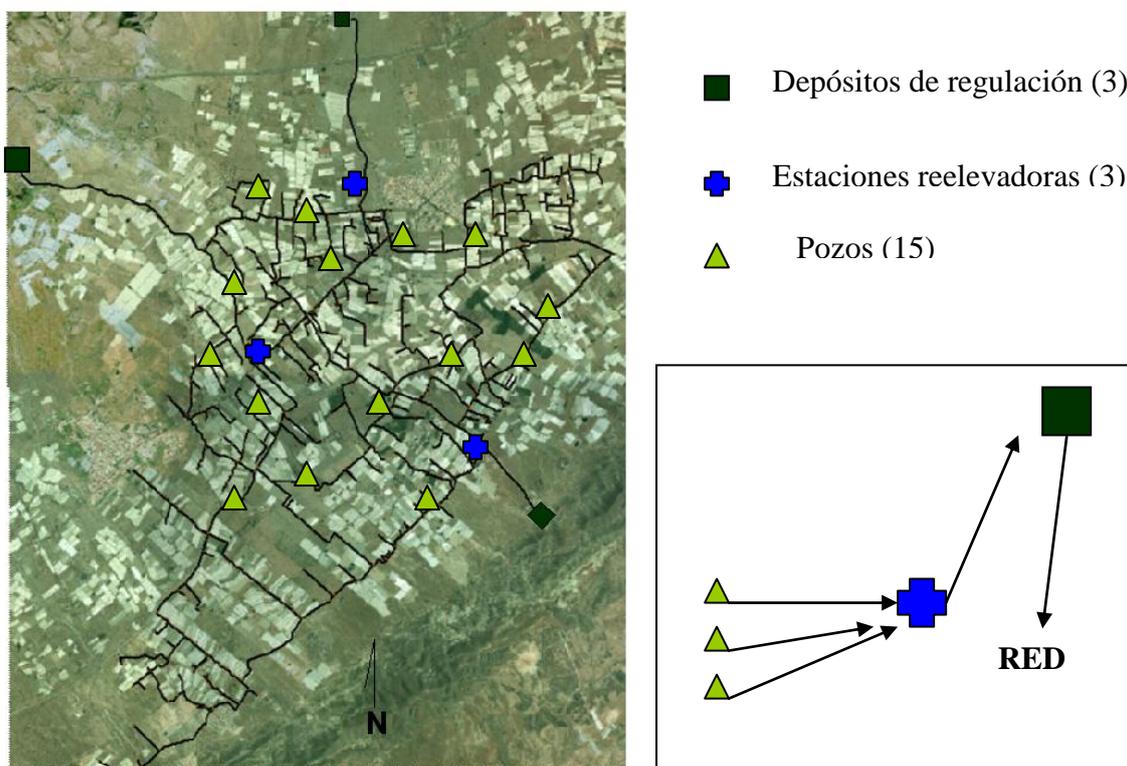


Figura 6. Esquema de la red de la SAT 2130.

Los depósitos de regulación dan servicio a la red por gravedad, con presión y caudal suficiente en todas las tomas de la red.

Los pozos de la comunidad tienen unas características (niveles estáticos, caudales y calidad de agua) muy variables entre sí y presentan una variabilidad temporal según el comportamiento del acuífero ante extracciones y recarga natural.

3.2.2. Descripción del sistema.

El gestor de la comunidad puede decidir cuando se ponen en marcha las bombas de los tres grupos de sondeos que vierten a cada uno de los depósitos de las tres estaciones reelevadoras. Para ello programa los momentos de arranque y parada de dichas bombas en el sistema de telegestión de la comunidad. La práctica habitual es que se pongan en marcha los tres grupos de pozos simultáneamente con objeto de que las extracciones del acuífero y la calidad de agua obtenida sea lo más uniforme posible a lo largo del tiempo. No obstante, si el gestor lo cree conveniente se podría poner en marcha dichos grupos de bombas de forma independiente.

Los depósitos situados en las estaciones reelevadoras están calculados para que los pozos los llenen en un tiempo de unos 25-30 minutos. Disponen de sensores de nivel máximo y mínimo de manera que cuando el agua llega al nivel máximo se ponen en marcha las bombas de las estaciones reelevadoras de forma automática. Como el caudal extraído por dichas bombas se ha calculado de forma que cuando éstas entran en funcionamiento, el depósito tarde otro intervalo de unos 25-30 minutos en vaciarse. Cuando se alcanza el nivel mínimo las bombas de las estaciones reelevadoras se desconectan y así sucesivamente. La puesta en marcha y parada de estos grupos es, por tanto automática y está condicionada por la puesta en marcha y parada de las bombas de los pozos que es el grado de libertad que tiene el gestor para controlar el funcionamiento del sistema.

Con el fin de disminuir el elevado coste energético de las operaciones de bombeo, el gestor procura bombear preferentemente en los periodos tarifarios de menor coste y aprovechar la gran capacidad de almacenamiento de agua disponible en los depósitos de regulación para abastecer la demanda por gravedad en las horas de mayor coste energético. No obstante, en los momentos de máxima demanda o cuando los depósitos se agotan se puede ver obligado a bombear en horas de coste energético elevado.

3.3. Datos necesarios.

Con objeto de optimizar la gestión energética del bombeo al sistema de distribución de agua de la SAT Nº 2130 "Campo de Níjar" es necesario disponer de una serie de datos de entrada requeridos por el modelo. Las bases de datos utilizadas por el modelo son las siguientes:

3.3.1. Tarifas eléctricas.

Para la ejecución del modelo es necesario elaborar una base de datos de tarifas eléctricas donde se incluye toda la información requerida por el programa sobre la tarifa o tarifas eléctricas que se vayan a analizar: número de periodos tarifarios y su distribución a lo largo del año, tanto para días festivos y laborales, precio de la energía en cada periodo tarifario.

En España el proceso de liberalización del mercado eléctrico comenzó en 1997 con la promulgación de la Ley del Sector Eléctrico 54/1997 (reformada por la Ley 17/2007).^[7] Las características específicas del funcionamiento del mercado mayorista aunque complejas e interesantes no atañen directamente al desarrollo de este trabajo por lo que no entraremos a comentarlas.

Lo que sí influye en el presente trabajo es la tarificación y los componentes de la misma que dan como resultado un precio final facturable al consumidor. Por ello vamos a comentarlos brevemente.

Los suministros en baja tensión de > 10 Kw y los de alta tensión , son los que más nos interesan ya que los sistemas de impulsión de las redes de distribución de agua de riego han de tener contratos de este tipo (contratados en mercado libre con comercializadora).

Los consumidores en mercado liberalizado han de pagar :

- Tarifa de acceso a redes. (ATR).
- Precio de comercializadora.
- Alquiler de equipos.
- Impuesto especial electricidad.
- IVA.

La ATR representa un coste por el uso de las redes de transporte y distribución, se estructuran según niveles de tensión y periodos tarifarios definidos en el RD 1164/2001 los precios se van actualizando con las consecutivas Ordenes del MITC.

La ATR comprende un término de potencia, un término de energía activa y complemento por energía reactiva. La ATR se ha de pagar por el consumidor al distribuidor correspondiente o bien ser abonadas en nombre del consumidor por la comercializadora al distribuidor. [8]

A la hora de ingresar los datos de precio de los distintos periodos tarifarios se ha tenido en cuenta únicamente el término de energía activa, de manera que si queremos comparar los resultados del modelo con los ofrecidos por la comunidad (datos reales), hemos de considerar únicamente dicho término en la factura real..

En este trabajo se han analizado tres tipos distintos de tarifas eléctricas: 3.0A , 3.1A , 6.1A. Estas tarifas parecen las más adecuadas a las características de las instalaciones de la comunidad de regantes. A continuación se muestra gráficamente la distribución de los diferentes periodos tarifarios a lo largo del año para cada una de estas tarifas:

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled "Energia (Tarifa 6.1)". The grid covers the months from January to December. Each month is represented by a row, and the days of the week are listed in columns. The grid is color-coded to show different tariff periods. For example, January shows a red period from the 1st to the 10th, a yellow period from the 11th to the 20th, and a blue period from the 21st to the 31st. Similar patterns are repeated for other months, with some variations in the number of days in each period.

Tabla 3. Distribución anual periodos tarifarios. (Tarifa 6.1)

La información de estas tarifas se ha ingresado en una hoja Excel para ser leídos por el programa de optimización y aplicar la tarifa correspondiente a cada periodo. A modo de ejemplo, en la siguiente tabla se muestra la base de datos correspondientes a una de las tarifas analizadas.

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled "Tarifas definit". The table contains the following data:

Periodo tarifari	Precio \$/kwh	Hora inicio	Hora Fin	Per. tarifa	Laborables	Periodo	Fecha inicial	Fecha final	Festivos
1	0.11917	0	8	7	Laborable	Invierno	11/2008	3/30/2008	01-01-08
2	0.107515	8	17	4	Laborable	Invierno	11/2008	3/30/2008	06-01-08
4	0.093732	17	18	5	Laborable	Invierno	11/2008	3/30/2008	21-03-08
5	0.097647	18	22	1	Laborable	Invierno	11/2008	3/30/2008	01-05-08
6	0.102049	22	23	5	Laborable	Invierno	11/2008	3/30/2008	15-08-08
7	0.083864	23	24	4	Laborable	Invierno	11/2008	3/30/2008	08-12-08
8	0.081309	0	8	7	Laborable	Verano	3/31/2008	10/26/2008	25-12-08
9		8	10	4	Laborable	Verano	3/31/2008	10/26/2008	
10		10	16	1	Laborable	Verano	3/31/2008	10/26/2008	
11		16	24	4	Laborable	Verano	3/31/2008	10/26/2008	
12		0	8	7	Laborable	Invierno	10/26/2008	12/31/2008	
13		8	17	4	Laborable	Invierno	10/26/2008	12/31/2008	
14		17	18	5	Laborable	Invierno	10/26/2008	12/31/2008	
15		18	22	1	Laborable	Invierno	10/26/2008	12/31/2008	
16		22	23	5	Laborable	Invierno	10/26/2008	12/31/2008	
17		23	24	4	Laborable	Invierno	10/26/2008	12/31/2008	
18		0	8	7	Festivo	Invierno	11/2008	3/30/2008	
19		8	18	6	Festivo	Invierno	11/2008	3/30/2008	
20		18	22	2	Festivo	Invierno	11/2008	3/30/2008	
21		22	24	4	Festivo	Invierno	11/2008	3/30/2008	
22		0	8	7	Festivo	Verano	3/31/2008	10/26/2008	
23		8	10	6	Festivo	Verano	3/31/2008	10/26/2008	
24		10	16	3	Festivo	Verano	3/31/2008	10/26/2008	
25		16	18	6	Festivo	Verano	3/31/2008	10/26/2008	
26		18	24	4	Festivo	Verano	3/31/2008	10/26/2008	
27		0	8	7	Festivo	Invierno	10/26/2008	12/31/2008	
28		8	18	6	Festivo	Invierno	10/26/2008	12/31/2008	
29		18	22	2	Festivo	Invierno	10/26/2008	12/31/2008	
30		22	24	4	Festivo	Invierno	10/26/2008	12/31/2008	

Tabla 4. Ejemplo de base de datos de tarifa.

3.3.2. Consumos.

Para la aplicación del modelo es necesario conocer el consumo de agua de los regantes de la SAT a lo largo del año y durante cada periodo tarifario. Los datos de consumo ha sido facilitados por los gestores de la SAT.

1. Consumo diario:

La información disponible en la SAT son los datos de consumo diario de agua en la red de riego obtenidos de manera automática mediante el sistema de telegestión disponible que transmite los datos vía radio y que cubre todas las tomas de la red. En la siguiente figura se muestra la evolución del consumo de agua en la red de riego de la SAT a lo largo de un periodo de un año (2008). Estos son los datos de consumo que se han utilizado para la ejecución del modelo. Dichos datos se han almacenado en una hoja de cálculo Excel que es directamente leída por el programa.

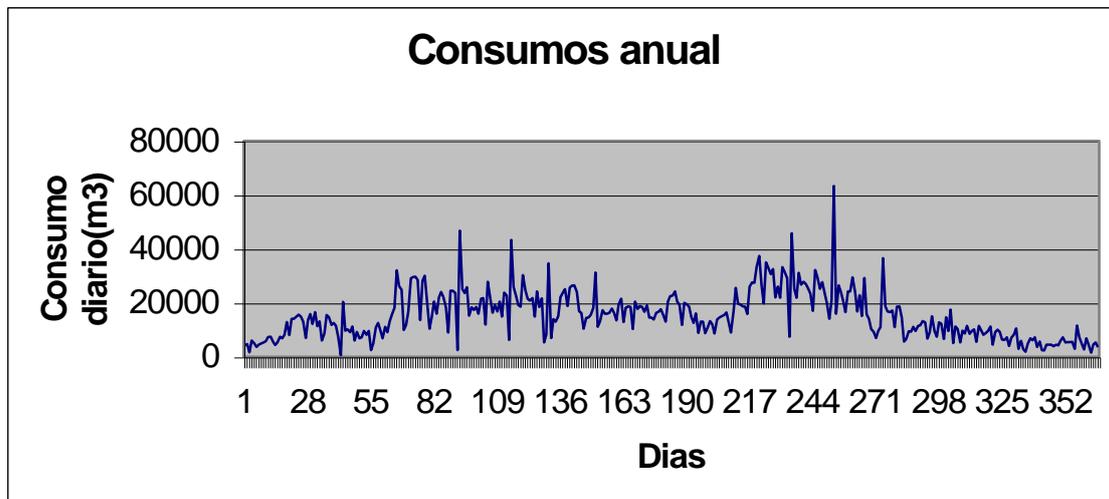


Figura 7. Consumos la SAT 2130.

2. Curva de modulación: Para desagregar el consumo diario en cada uno de los periodos tarifarios es necesario conocer el comportamiento de la demanda a lo largo del día. Debido a que no se dispone de datos horarios de consumo de agua se ha desagregado dicho consumo de agua utilizando una curva de modulación del consumo de agua a lo largo del día. Dicha curva refleja el patrón diario de consumo de los regantes de este tipo de sistemas de cultivo de invernadero en la zona de estudio. La

curva de modulación utilizada se muestra en la siguiente figura y ha sido utilizada en otros trabajos previos en esta zona [9].

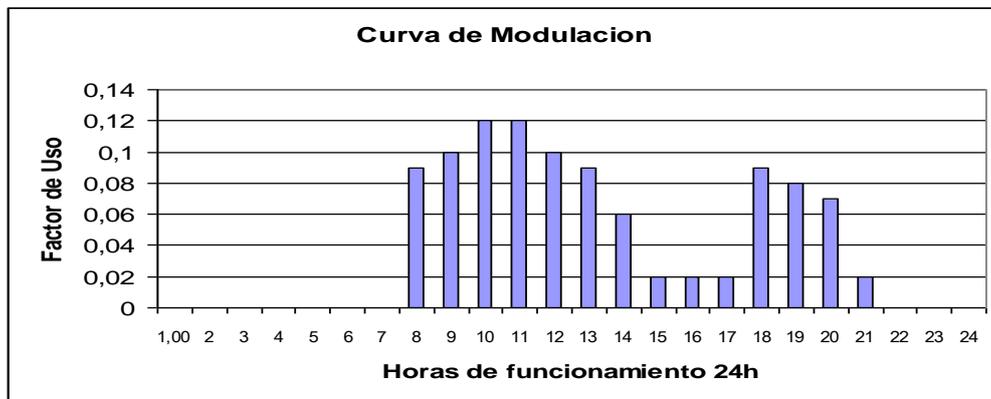


Figura 8. Curva de modulación.

3.3.3. Sistemas de bombeo.

Como se ha descrito anteriormente el sistema está compuesto por tres grupos de bombeo. Cada grupo está formado por las impulsiones desde los pozos hasta el depósito de las reelevadoras y el bombeo desde la reelevadora hasta los embalses de regulación.

Este conjunto de sistemas de bombeo y su funcionamiento se ha simplificado adoptando ciertas hipótesis para poder manejarlo de manera más operativa en el modelo.

El conjunto de bombas que elevan el agua de los pozos a las reelevadoras puede considerarse como un sistema de bombeo en paralelo que puede ser modelado como un único bombeo equivalente:

Así, un sistema de n bombas en paralelo cuyas potencias sean P_i ($i= 1, \dots, n$), podemos sustituirlo por un sistema equivalente de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} P_s &= \sum_{i=1, n} P_i \\ Q_s &= \sum_{i=1, n} Q_i \end{aligned} \quad (15)$$

Por lo que:

$$\frac{\gamma \cdot Q_s \cdot H_s}{\eta_s} = \sum_{i=1, n} \frac{\gamma \cdot Q_i \cdot H_i}{\eta_i} \quad (16)$$

Considerando como hipótesis simplificativa que los rendimientos de las distintas bombas sean similares ($\eta_s = \eta_i \forall i$), resulta:

$$H_s = \frac{\sum_{j=1,m} Q_j \cdot H_j}{\sum_{j=1,m} Q_j} \quad (17)$$

Siendo: P_s la potencia del sistema, Q_s el caudal del sistema y H_s la altura de elevación media del sistema.

Finalmente al sistema de bombeo equivalente al conjunto de pozos hay que añadirle el rebombeo realizado hasta el embalse. Este sería equivalente a un sistema de bombeo en serie en el que:

$$Q_g = Q_s \quad (18)$$

Siendo Q_g el caudal del sistema en serie

$$H_g = H_s + H_r \quad (19)$$

Siendo: H_g la altura de elevación del sistema en serie y H_r la altura de elevación de la reelevadora.

$$P_g = P_r + P_s = \frac{\gamma Q_g \cdot H_g}{\eta_g} \quad (20)$$

Por lo que conocido P_g , obtenido a partir de datos reales de consumos eléctricos y el resto de variables se puede obtener el valor del rendimiento global (η_g) del sistema de elevación equivalente de la siguiente forma:

$$\eta_g = \frac{\gamma Q_g \cdot H_g}{P_g} \quad (21)$$

Con lo que quedan definidas todas las variables necesarias para el modelo.

De esta manera hemos modelado el sistema complejo constituido por 3 sistemas de bombeo simples equivalentes.

Para la optimización de la gestión energética del sistema se van a considerar dos hipótesis de funcionamiento distintas:

a) Funcionando los tres sistemas equivalentes al mismo tiempo (funcionamiento normal del sistema)

b) Funcionando los tres sistemas equivalentes de forma independiente.

En el primer caso, resultaría un sistema compuesto por tres bombes funcionando en paralelo para cuya modelación se procedería como ya se ha comentado en (15).

Para ambas hipótesis se han diseñado una base de datos en formato Excel con la información necesaria para la ejecución del modelo. Los datos resultantes son los siguientes:

IMPULSION- SISTEMA 1

	Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	η
Pozo 1	47.8	115.3	70.85	
Pozo 2	21.19	114.4	40.38	
Pozo 3	35.71	111.1	62.63	
Pozo 4	28.61	109.9	57.38	
Pozo 5	26.34	113.6	47.69	
Pozo 6	45.52	98.5	77.30	
Reelev 1	174.04	64	142.46	
GLOBAL 1	174.04	173.78	506.72	0.690

IMPULSION- SISTEMA 2

	Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	η
Pozo 1	38.04	117	73.68	
Pozo 2	31.96	108.3	58.44	
Pozo 3	34.15	97	61.25	
Pozo 4	17.98	102.1	16.52	
Pozo 5	26.94	124.0	37.52	
Reelev 2	95.71	62	120	
GLOBAL 2	95.71	172.02	367.42	0.684

IMPULSION- SISTEMA 3

	Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	η
Pozo 1	40.74	85.3	74.8	
Pozo 2	29.74	74.4	38.69	
Pozo 3	29.02	137.2	65.96	
Pozo 4	3.9	104.9	16.99	
Reelev 3	104.82	88	150.11	
GLOBAL 3	104.82	189.33	346.57	0.554

HIPOTESIS IMPULSION UNICA

	Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	η
GLOBAL	0.457	176.87	1220.72	0.649

Tabla 5. Parámetros de los sistemas de bombeo en ambas hipótesis de funcionamiento

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

Se han llevado a cabo cuatro ejecuciones del modelo. Las tres primeras corresponden a la hipótesis de funcionamiento de impulsión única (hipótesis real). En cada una de ellas se ha considerado una tarifa diferente. La cuarta ejecución se ha realizado con la mejor tarifa obtenida en las ejecuciones anteriores pero con la hipótesis de bombeos independientes.

Se ha analizado el funcionamiento del sistema durante el periodo de un año completo. En todos los casos se ha considerado que el embalse de regulación se encontraba lleno hasta la mitad (125000 m^3) el primer día del año y se ha obligado a que al final de dicho periodo el volumen embalsado sea el mismo que al inicio. Con esto se garantiza que durante todo el año se bombea un volumen equivalente al consumo de agua anual.

Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

- Resultados hipótesis impulsión única.

Se han comparado las tres tarifas eléctricas alternativas para las condiciones del sistema estudiado. Los costes resultantes óptimos para cada tarifa se muestran en la siguiente tabla:

TARIFA	COSTE TOTAL (€)
3.0A	364366.17
3.1A	341719.11
6.1A	276860.76

Tabla 6. Costes óptimos

Como se observa la tarifa más económica ha resultado ser la 6.1^a. Esta tarifa es precisamente la que tiene contratada la comunidad de regantes.

Para cada ejecución el modelo proporciona, aparte del coste, la política de gestión óptima para cada hipótesis de funcionamiento: nº de horas y volumen bombeado por

cada sistema de bombeo durante el periodo de estudio (un año). También proporciona la evolución del volumen embalsado.

Para observar las diferentes "políticas óptimas de gestión" para cada tarifa es útil presentar los resultados de evolución del volumen embalsado a lo largo del año. Estos resultados se muestran en la siguiente gráfica.

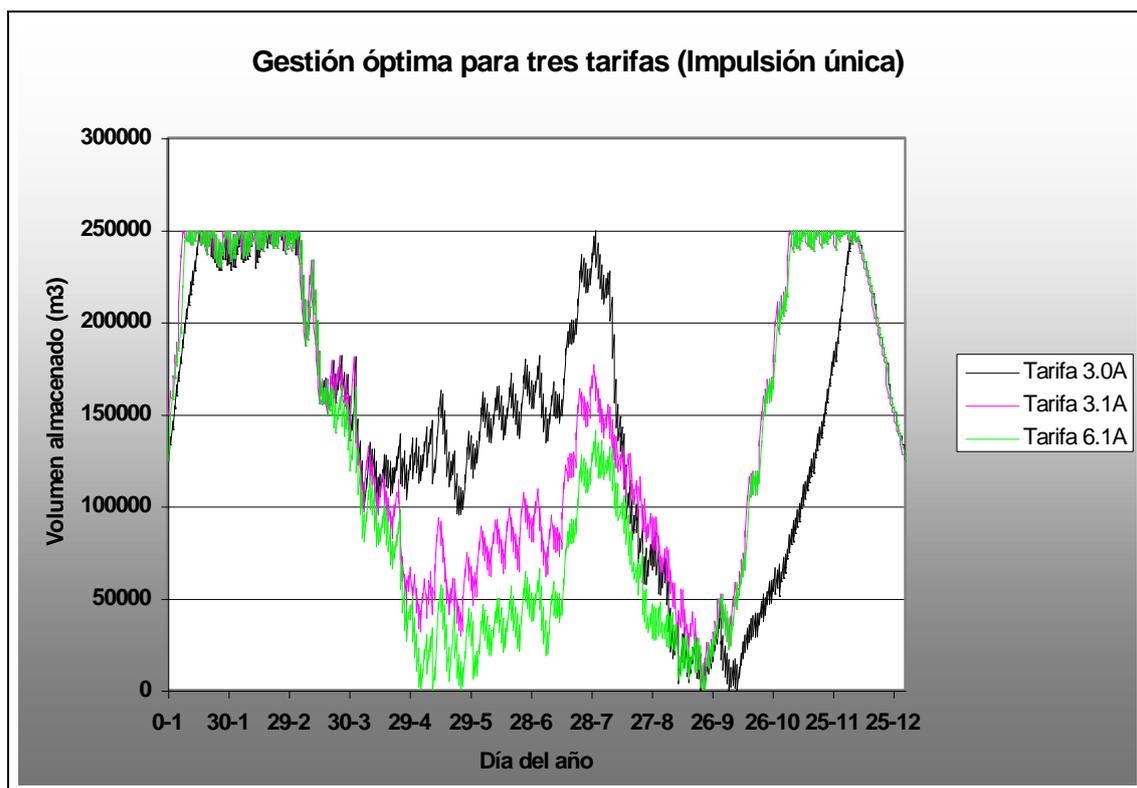


Figura 9. Evolución del volumen embalsado para cada tarifa.

Se observa que la tarifa más favorable (6.1A) permite un mayor agotamiento de la reserva de agua en el depósito en los momentos de mayor consumo, reduciendo el número de horas que es necesario bombear en periodos de mayor coste energético.

- Resultados hipótesis impulsión independiente.

Con objeto de evaluar la posible mejora de gestión bajo la hipótesis de bombeo independiente de los tres sistemas, se ha realizado una ejecución comparando los costes resultantes con impulsión conjunta e independiente con la tarifa más económica resultante (6.1A).

Los resultados muestran que la opción más eficiente desde el punto de vista económico es la de funcionamiento con bombes independientes. Los costes resultantes se muestran en la siguiente tabla.

HIPÓTESIS	COSTE TOTAL (€)
Impulsión conjunta	276860.76
Impulsión independiente	266541.82

Tabla 7. Costes óptimos

Esta mayor eficiencia con bombes independientes se explica debido a que en este caso el modelo da prioridad a las bombas más eficientes frente a las menos eficientes. Como se observa en la siguiente gráfica el sistema de bombeo 2, que resulta ser el más eficiente, ha funcionado durante un mayor porcentaje de tiempo mientras que el bombeo 3 (menos eficiente) se ha utilizado un porcentaje de tiempo muy reducido (sólo cuando no ha sido posible satisfacer la demanda de otra forma). Con la hipótesis de funcionamiento conjunto, los tres sistemas funcionan el mismo porcentaje de tiempo como es obvio.

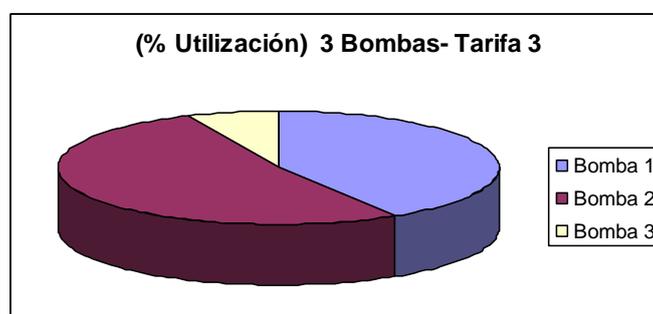


Figura 10. Evolución del volumen embalsado para cada tarifa

No obstante, a pesar de las ventajas económicas que supone el funcionamiento con sistemas independientes, hay que considerar que en la realidad este modo de funcionamiento es difícil de llevar a la práctica ya que puede acarrear que las extracciones del acuífero no sea homogéneas causando problemas de agotamiento y salinización puntual del mismo, por lo que para ponerla en práctica sería necesario un control exhaustivo del estado del acuífero.

A continuación se muestran en un gráfico los resultados de evolución del volumen embalsado a lo largo del año para ambas hipótesis:

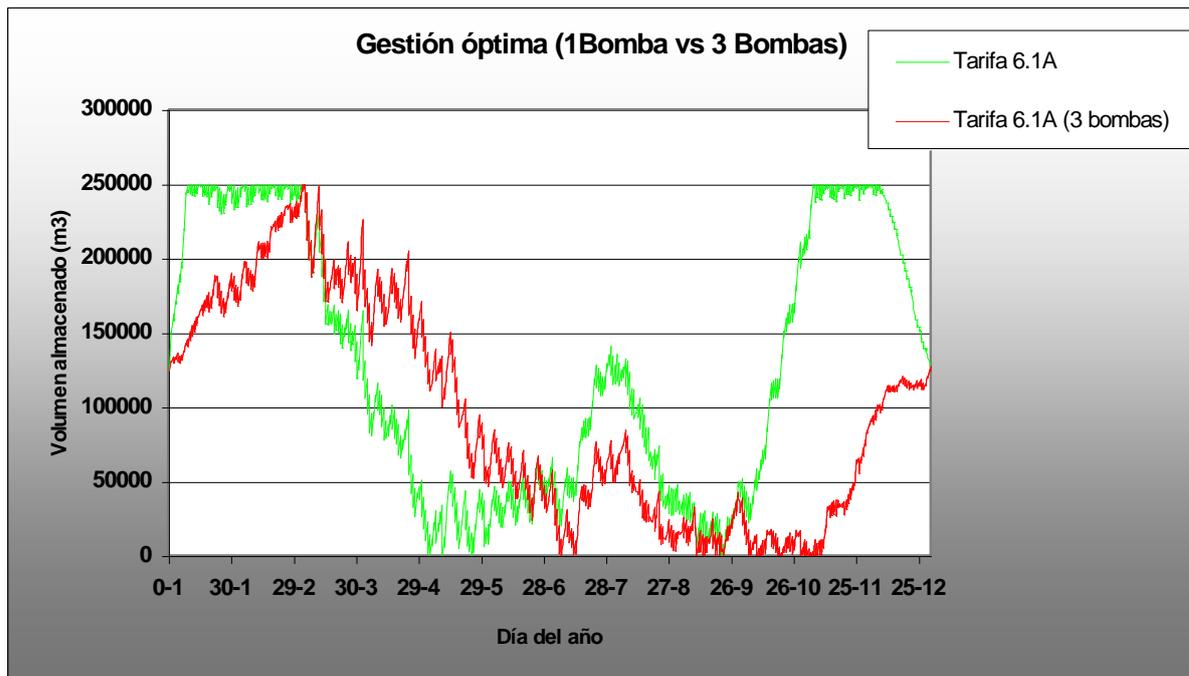


Figura 11. Evolución del volumen embalsado para cada hipótesis

Se observa que la hipótesis más eficiente (bombeo independiente) supone un mejor agotamiento de las reservas de agua acumuladas en el depósito, bombeadas en los momentos en el que el coste energético es más favorable.

- Comparación con la situación real.

La gestión que realizan los gestores de la SAT puede calificarse de muy buena, teniendo en cuenta los condicionantes y herramientas disponibles. La situación más parecida a la gestión real del sistema es la correspondiente a la impulsión única con tarifa 6.1A, que es justamente la que ha resultado ser más eficiente según los resultados del modelo. Por otro lado, la gestión real realizada tiende a aprovechar al máximo las horas de coste energético reducido de una manera intuitiva basada en la dilatada experiencia y el conocimiento de los gestores de su sistema de distribución.

No obstante, la utilización del modelo ha permitido optimizar el coste económico de la operación del sistema. A partir de los datos reales proporcionados por la comunidad, se observa que el coste total de operación de los sistemas de bombeo de la red son un 23.9% mayores que los costes obtenidos con el modelo para la simulación comparable. Estos resultados se pueden ver en la siguiente gráfica.

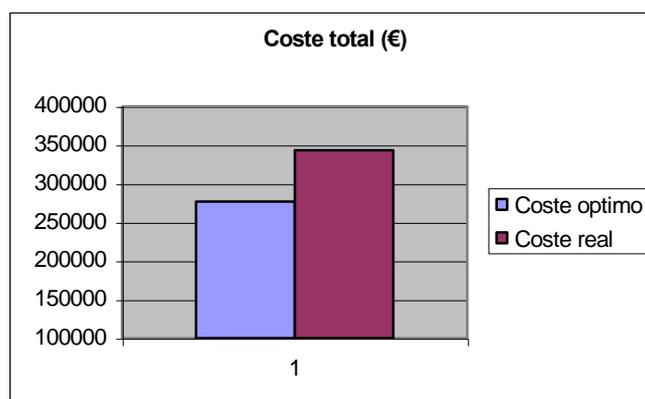


Figura 12. Comparación coste óptimo-real

A pesar de que se ha obtenido un importante ahorro económico hay que considerar que el modelo trabaja con demandas conocidas mientras que en la gestión real existe un cierto grado de indeterminación en las mismas que no se ha tenido en cuenta en el modelo.

Por otro lado, al descomponer los términos de la factura eléctrica no se han tenido en cuenta las penalizaciones por exceso de potencia ni el término de energía reactiva, que en cargas inductivas no compensadas puede ser considerable. Para poder hacer una comparación plenamente objetiva habría que haber descontado dichos términos y la diferencia entre el coste óptimo y el real habría sido menor.

El modelo podría aplicarse para el diseño de la capacidad óptima de embalse del sistema simulando teniendo en cuenta distintos volúmenes de embalse. En el caso estudiado se dispone de un volumen de embalse bastante generoso.

5. CONCLUSIONES

1. Se ha desarrollado un modelo de gestión óptima a los sistemas de bombeo y se ha aplicado a la SAT nº 2130 "Campo de Nijar" llegando a la conclusión de que se trata de una buena herramienta para disminuir los costes energéticos en los sistemas de distribución de agua.
2. El modelo permite comparar varias tarifas eléctricas y ser una herramienta a la hora de contratar o negociar con las empresas comercializadoras. Se ha aplicado el modelo para evaluar la gestión óptima del sistema con diferentes tarifas eléctricas, habiendo resultado que la tarifa 6.1A es la más eficiente desde el punto de vista económico para las condiciones del sistema analizado.
3. Se ha aplicado el modelo para evaluar dos hipótesis diferentes de funcionamiento: con bombeos conjuntos o independientes, habiéndose obtenido que el segundo caso es más eficiente desde el punto de vista económico, aunque existen dificultades para su aplicación práctica.
4. La gestión energética realizada por el personal técnico de la comunidad puede calificarse como muy buena teniendo en cuenta los factores condicionantes del sistema. No obstante el modelo desarrollado ha permitido obtener un importante ahorro (23.9%) en el coste de explotación del sistema.
5. El modelo se ha planteado de un modo determinista y considera conocidas las demandas de la red. Para la aplicación del modelo a la gestión en tiempo real del sistema sería conveniente ampliar el modelo para que tenga en cuenta el carácter aleatorio de las demandas.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Ministerio de Industria Servicio de publicaciones. "La energía en España" (2009).
- [2] I.D.A.E. "Ahorro y eficiencia energética en la agricultura" (2008).
- [3] M.H. Sabet y O.J. Helweg, "Peaking storage tanks for water supply systems", Water Resour. Bull. **25**(5): 1047-1053 (1989).
- [4] 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).
- [5] I. Pulido-Calvo, J. Roldán, R. López-Luque y J.C. Gutiérrez-Estrada, "Depósitos de regulación en cabecera de redes hidráulicas a presión." Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol. 10, N.º 2, pp. 81-96, (2006).
- [6] Dantzig, G.B. , "Linear Programming and Extensions" (Princeton, NJ: Princeton University Press). (1963).
- [7] BOE nº 316 de 23 Dic 2010 "Orden ITC/3353/2010, de 28 de diciembre".
- [8] J.F. Azofra. "Estudio de las tarifas eléctricas vigentes a partir del 11 de Abril de 2011" Federación Empresarios de La Rioja. Publicaciones. (2011)
- [9] F.J.Cobacho Jimenez. "Construcción y calibración del modelo hidráulico de la red de riego de la SAT Nº2130 y su aplicación a la mejora de la gestión del agua". Proyecto fin de carrera. EPS. Almería. (2010).