

Procedimiento para la selección de la estrategia de regulación más adecuada en estaciones de bombeo

P. Gómez Pajares ¹, J. García-Serra García ², J. Soriano Olivares ², C. Giner González ¹

¹Aguas de Valencia, S.A.

²ITA - Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad Politécnica de Valencia

1. Introducción

La selección de la mejor estrategia de operación en una estación de bombeo que impulsa caudales directamente a red es un problema complejo de naturaleza multivariable. El problema se puede plantear como la búsqueda de la mejor estrategia en una instalación ya existente (la mejora de un sistema que está en funcionamiento con posibilidades de instalar, por ejemplo, variadores de frecuencia en los equipos de la estación de bombeo y diseñar la estrategia de regulación más adecuada) o bien, directamente, como un problema de selección tanto de los equipos de bombeo como del sistema de regulación para una estación de bombeo a diseñar.

Todo ello implica que en cada caso es necesario manejar un campo de soluciones excesivamente amplio, no conociendo la existencia de herramientas que, filtrando y acotando las soluciones posibles, aborden dicho problema teniendo en cuenta las variables más significativas: modelo de las bombas a instalar con sus curvas características, número de bombas de velocidad fija (BVF), número de bombas de velocidad variable (BVV), rendimiento mínimo aceptable, velocidad mínima y máxima de giro de las bombas, tarifas eléctricas, caudales a impulsar, etc.

Debido a esto, el técnico se ve obligado a realizar suposiciones generales sin suficiente base técnica que acote el número de soluciones. Al actuar de esta forma es posible que en muchos casos se desestimen soluciones atractivas desde el punto de vista energético y económico.

2. Objetivo

El objetivo principal del presente artículo es describir una herramienta que visualice y simule el funcionamiento de estaciones de bombeo con el fin de ayudar en la toma de decisiones respecto a la estrategia de regulación y control de las mismas. Para alcanzarlo es imperativo cumplir los siguientes objetivos funcionales:

- Construir una herramienta, fundamentalmente visual, que permita ver, de forma ágil, cuales son las mejores alternativas para acotar el campo de soluciones posibles.
- Definir unos indicadores que sintetizen la información aportada por la herramienta y sirvan, junto con la visualización, como base de comparación de las alternativas rechazando las menos atractivas.
- Construir el modelo matemático para la simulación de las alternativas aceptadas, de manera que se realice una valoración económica del coste energético que presenta cada solución en cada escenario.

3. Principios Básicos

Se define una **bomba de velocidad variable** (BVV) como aquella que puede variar su velocidad de giro, generalmente mediante un variador de frecuencia, siendo $\alpha=N/N_0$ el cociente entre la velocidad de giro de la bomba (N) y la velocidad de giro nominal (N_0) cuando esta se alimenta a la frecuencia normal de la red, que en Europa es $f=50$ Hz (E. Cabrera, 2009).

Asimismo, pueden definirse unos valores máximos y mínimos de velocidad de giro de las bombas de velocidad variable que darán lugar a unos valores máximos y mínimos de la velocidad normalizada ($\alpha_{MÁX}=N_{MÁX}/N_0$ y $\alpha_{MÍN}=N_{MÍN}/N_0$).

El fabricante de la bomba normalmente proporciona datos de la curva característica de la misma (curva H-Q) a velocidad de giro nominal y de la curva de rendimiento frente al caudal (curva η -Q) a esta misma velocidad, pero no suele detallar en los catálogos las curvas de las bombas ensayadas a diferentes velocidades de giro.

Desde un punto de vista teórico, si se aplica la teoría de la semejanza a una bomba de velocidad variable funcionando a diferentes velocidades de giro, se aprecia que las curvas características adoptan la misma forma que la correspondiente a velocidad nominal pero quedando por debajo cuando la velocidad de giro es inferior a la nominal (Ver figuras 1 y 2). En el caso de que la velocidad de giro sea superior a la nominal, la curva quedará por encima.

Asimismo, la teoría de la semejanza establece que todos los puntos en una misma parábola (definida por ésta teoría) que pase por un punto de la curva H-Q a velocidad nominal y el origen de coordenadas tienen el mismo rendimiento que el punto de intersección de esta parábola con la curva H-Q a velocidad nominal. De esta manera se establecen las denominadas parábolas de isorrendimiento (ver figuras 1 y 2).

Pero la teoría de la semejanza no se cumple de manera estricta, de manera que los puntos de igual rendimiento no están sobre parábolas sino sobre curvas denominadas colinas de isorrendimiento. Se puede observar en las Figuras 1 y 2 como cuanto menor es la velocidad

de giro de la bomba, más diferencia existe entre la teoría (parábola) y la realidad (colina de isorrendimiento).

Se denomina zona útil teórica de la bomba al área encerrada por las parábolas de isorrendimiento (η_{MIN}) y las curvas HQ para $\alpha_{\text{MÁX}}$ y $\alpha_{\text{MÍN}}$. En esta zona el rendimiento será superior al mínimo prefijado. De la misma forma, en una asociación de bombas en paralelo existe una zona útil resultado de sumar los caudales de las zonas útiles de cada bomba.

Especial interés tiene el límite inferior de esta zona ($\alpha_{\text{MÍN}}$) debido a la diferencia de rendimiento entre el establecido por las leyes de semejanza y la realidad. Con esta velocidad mínima se acota, de alguna manera, la validez o no de la teoría de la semejanza. Una mala elección de este límite conllevaría incluir en la zona útil puntos con rendimientos reales muy inferiores al esperado. Generalmente, y debido a esta pérdida de rendimiento, rara vez se permite a una BVV funcionar a menos de un 80 % de su velocidad nominal. Existen expresiones que permiten predecir de manera aproximada esta pérdida de rendimiento respecto a lo que describe la teoría de la semejanza cuando se disminuye la velocidad de giro de la bomba (Ioan Sârbu, 1998), si bien ello depende fuertemente del tipo de bomba en lo que al rendimiento de la misma se refiere.

A la hora de simular el funcionamiento de una estación de bombeo para evaluar su coste energético, con un escenario dado, por un lado será necesario tener en cuenta la pérdida de rendimiento del motor eléctrico al girar a velocidades diferentes a la nominal y no estar a plena carga; por otro lado, habrá que considerar el rendimiento del variador de frecuencia funcionando en esas mismas condiciones.

Cabe destacar que, si se dispone de un mapeo del espacio H-Q de la estación de bombeo en cuestión (mediante ensayos en campo), quedando medido en cada punto del plano: el rendimiento de la bomba, el del motor eléctrico y el del variador de frecuencia, no es necesario recurrir a las leyes de semejanza ni a posteriores correcciones puesto que todo esto pretende modelar la realidad del bombeo. Los resultados de campo siempre se aproximarán más a la realidad que cualquier modelación.

En la figura 1 se observa una zona útil en la que se señala un punto con rendimiento real inferior al que puede predecir la teoría de la semejanza. En la figura 2 se plantea un $\alpha_{\text{MÍN}}$ límite mayor, de manera que los valores de rendimiento de la zona útil teórica se asemejan más a los reales.

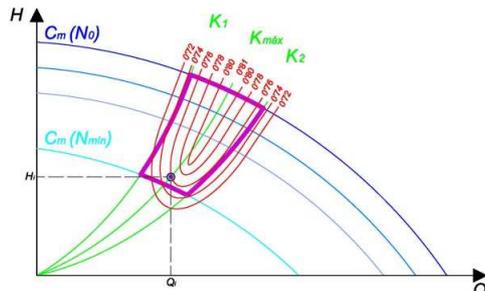


Figura 1. Zona útil. $\alpha_{MÍN}$ muy bajo

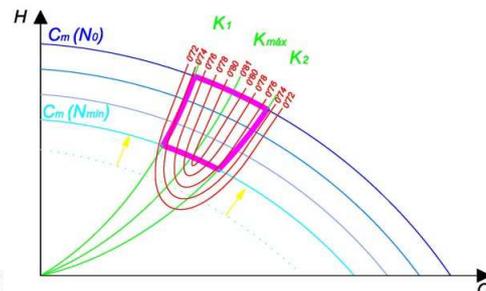


Figura 2. Zona útil. $\alpha_{MÍN}$ razonable

Se conoce como **curva de consigna** de una instalación a aquella que establece la altura piezométrica mínima en cabecera a suministrar para cada caudal demandado. La curva de consigna será creciente con el caudal a suministrar dado que habrá que vencer las mayores pérdidas de carga que se producen a mayores caudales. No obstante, en muchas ocasiones se establece una curva de consigna horizontal. Esto implica mantener a la salida de la estación de bombeo un valor constante de la presión, independiente del caudal, y que satisfaga las condiciones de funcionamiento para cualquier caudal demandado (García-Serra, 2011).

Se define la **cobertura** de la curva de consigna a la zona de dicha curva que queda incluida en las zonas útiles de las asociaciones de bombas, definiendo un caudal mínimo y un caudal máximo de funcionamiento.

En una asociación de bombas en paralelo, se define como **recubrimiento** al rango de curva de consigna contenida en la intersección de las zonas útiles de dos asociaciones de bombas. Este recubrimiento permite al sistema cambiar de forma de funcionar (poner en marcha o parar una bomba), manteniendo el rendimiento por encima de un mínimo fijado.

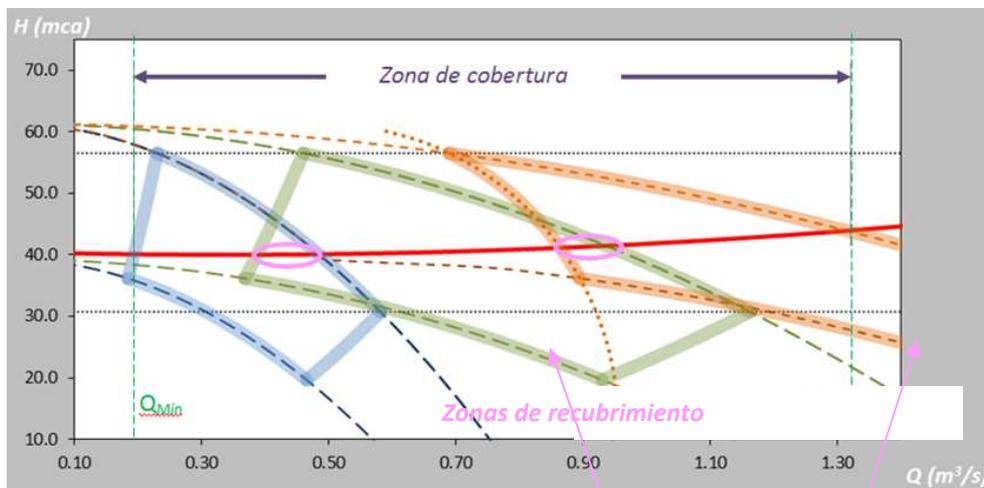


Figura 3. Espacio H-Q de 2xBVV+1xBVF. Curva de consigna, zonas útiles, cobertura y recubrimiento

En la figura se observa:

- Zonas útiles de: 1xBVV (azul), 2xBVV (verde) y 2xBVV+1xBVF (naranja)
- Curva de consigna: trazo rojo.
- Zona de cobertura entre caudales definidos, mínimo y máximo, previstos para la estación de bombeo ($Q_{MÍN}$ y $Q_{MÁX}$)
- Zonas de curva de consigna con recubrimiento: señalado en magenta

Hay que destacar que en el caso de asociaciones de BVV en paralelo, lo usual es trabajar solo con una BVV a caudales bajos, hasta una velocidad de giro igual a la nominal y, a partir de ese momento, trabajar con dos BVV en regulación compartida, es decir, girando las dos BVV a igual velocidad.

4. Herramienta de visualización

Esta herramienta ha sido creada en el entorno de programación de VBA. Permite plasmar gráficamente, en el espacio HQ, las zonas útiles de las asociaciones de equipos de bombeo y también su curva de consigna.

Además, permite realizar cambios (incorporación o supresión de variadores de frecuencia, variación del número de bombas, etc) de una forma ágil, por lo que la construcción de escenarios alternativos se realiza de una forma razonablemente rápida.

Para que la herramienta tenga la operatividad deseada se deben implementar los siguientes inputs:

- Número de bombas: Tanto BBV como BVF mediante los parámetros " n_V " y " n_F " respectivamente.
- Curva motriz de las bombas a velocidad de giro nominal: parametrizada mediante los coeficientes de la expresión
- $$H(Q) = A + B \cdot Q + C \cdot Q^2$$

[1]
- α mínimo y máximo. Es posible plantear un α_{MAX} mayor que 1.
- Curva de rendimiento de bombas a velocidad de giro nominal: parametrizada mediante los coeficientes de la expresión $\eta(Q) = D \cdot Q - E \cdot Q^2$

[2]
- Valor del rendimiento mínimo aceptado (η_{MIN}).
- Corrección del rendimiento mediante la expresión de Sarbu y Borza (Ioan Sârbu, 1998):

$$\eta_{SB} = 1 - (1 - \eta) \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{0,1} = 1 - (1 - \eta_{AF})\alpha^{-0,1}$$

[3]

- Curva de consigna: parametrizada mediante los coeficientes de la expresión $H_{CC} = G + J \cdot Q + L \cdot Q^2$ [4]
- Valores de los caudales límite a suministrar de la estación de bombeo ($Q_{Mín}$ y $Q_{Máx}$).

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de visualización, en el que quedan marcadas las zonas útiles, curva de consigna, recubrimientos, etc.

5. Indicadores

Para poder sintetizar cómo y en qué medida se consiguen cubrir las necesidades que plantea el sistema hidráulico, expresadas por la curva de consigna, se han implementado dos indicadores cuyos valores serán resueltos y mostrados por el modelo.

Indicador de cobertura: Cuantifica la proporción de caudales de la curva de consigna que quedan cubiertos por la unión de las zonas útiles. Se expresará en % y se corresponde con la siguiente expresión:

$$C = \sum_{i=1}^m \frac{Q_i^A - Q_i^B - R_i}{Q_{Máx} - Q_{Mín}} \cdot 100$$
 [5]

“ Q_i^A ” expresa el caudal donde se produce la intersección de entrada de la Curva de Consigna a la Zona Útil de la asociación “i” en cuestión. “ Q_i^B ” expresa el caudal donde se produce la intersección de salida de la Curva de Consigna a la Zona Útil de la asociación “i” en cuestión. “ R_i ” expresa el recubrimiento producido por la zona útil “i” y la zona útil “i – 1”, si este existe. “ $Q_{Máx}$ ” y “ $Q_{Mín}$ ” expresan los límites que puede tomar el Caudal Demandado “ Q_D ”.

Indicador de recubrimiento acumulado: Pretende cuantificar la proporción de caudales de la curva de consigna que quedan cubiertos por dos zonas útiles de asociaciones consecutivas según el orden predeterminado (orden de arranque). Se expresará en % y se corresponde con la siguiente expresión:

$$R_{Acum} = \sum_{i=1}^m \frac{R_i}{Q_{Máx} - Q_{Mín}} \cdot 100$$
 [6]

donde: “i” expresa el número de orden de la asociación de bombas en estudio en relación a su orden predeterminado (orden de arranque) y puede tomar valores desde 1 hasta “m”, siendo “m” el número total de asociaciones posibles planteadas.

6. Simulación

Tanto en la visualización de las zonas útiles cómo el cálculo de indicadores son características generales del escenario en cuestión, esto es, dichos resultados nos describen como es el entorno de ese escenario en el espacio H-Q y de qué forma se superpone a la

curva de consigna. Pero la realidad de un sistema hidráulico es más compleja. La variabilidad del caudal demandado complica el estudio y obliga a realizar una segunda simulación, esta vez con datos reales (si existen) o estimados, consiguiendo una aproximación razonable del gasto energético y de la repercusión económica de éste.

Para realizar la simulación, el modelo necesita como input fundamental el histórico de caudales demandados (un año), es decir, una serie temporal de demandas ordenadas cronológicamente. Esta serie se ha planteado inicialmente con un paso temporal horario, pero podría plantearse con un paso temporal menor. Un paso temporal mayor al horario se considera exiguo y con poca información. Se denomina Δt_i al paso temporal considerado para la situación de caudal de consumo " $Q_{D,i}$ ". En el intervalo planteado, el caudal de consumo se considera constante.

Además, se necesita que el usuario caracterice los siguientes parámetros.

- Caudales de consigna. Que indicarán al modelo cuando arranca o para una bomba.
- Rendimiento del motor eléctrico. Para simplificar el cálculo se ha considerado un dato constante, pero el modelo podría redefinirse para aceptar un rendimiento variable con la carga.
- Tarifa de Alquiler de Equipo de Medida Eléctrica.
- Relación de días festivos en el año a estudiar.
- Tarifa por energía para cada periodo.
- Tarifa por potencia para cada periodo.
- Asignación de los periodos contratados.
- Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA).
- Impuesto Eléctrico (IE).

Este modelo de simulación se diseña bajo la realidad de facturación eléctrica en España a fecha de este trabajo (P Gómez, 2013). No obstante, se podría redefinir para cualquier otra realidad de facturación.

Para cada Caudal Horario Demandado " $Q_{D,i}$ ", el modelo calcula " n_T " (número total de bombas), " n_F " (número de BVF) y " n_V " (número de BVV) gracias a las consignas implementadas. Después, separa la parte de este caudal que se bombea mediante BVF y la parte que se bombea mediante BVV.

Llegados a este punto, el modelo calcula el rendimiento de las BVF con la expresión:

$$\eta(Q_{D,i}^F)_i = D \cdot \frac{Q_{D,i}^F}{n_{F,i}} - E \cdot \left(\frac{Q_{D,i}^F}{n_{F,i}}\right)^2 \quad [7]$$

y el de las BVV mediante la expresión:

$$\eta(Q_{D,i}^V)_i = D \cdot \frac{Q_{D,i}^V}{\alpha \cdot n_{V,i}} - E \cdot \left(\frac{Q_{D,i}^V}{\alpha \cdot n_{V,i}} \right)^2 \quad [8]$$

Tal como se ha explicado anteriormente, el rendimiento definido por las leyes de semejanza puede ser afectado por la expresión de Sarbu y Borza (Ioan Sârbu, 1998):

$$\eta_{SB} = 1 - (1 - \eta) \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{0,1} = 1 - (1 - \eta_{AF}) \alpha^{-0,1} \quad [9]$$

Donde " η_{SB} " es el rendimiento modificado, " η_{AF} " es el rendimiento definido por las leyes de semejanza y " α " la relación de velocidades " N_1/N_2 ".

El modelo posibilita simular teniendo en cuenta esta corrección o no, y así poder comparar el efecto que produce.

En las expresiones anteriores se ha supuesto que todas las BVV son iguales y que cuando entran en funcionamiento lo hacen en regulación compartida, y que todas las BVF también son iguales entre sí.

Para cada situación de consumo demandado " $Q_{D,i}$ ", habrá una parte del caudal impulsado por las BVF ($Q_{D,i}^F$) y otra parte impulsado por las BVV ($Q_{D,i}^V$). La regulación permite al sistema mantenerse sobre la curva de consigna y también se puede determinar el valor de la altura de consigna para cada caudal demandado " $H_{CC,i}$ ". Asimismo, se conoce el rendimiento de las BVF para cada caudal " η_i^F ", por lo que puede determinarse la potencia de las BVF " P_i^F ".

$$P_i^F = \frac{\gamma \cdot Q_{D,i}^F \cdot H_{CC,i}}{\eta_i^F} \quad [10]$$

y la potencia de las BVV " P_i^V ", dado que se conoce también, para el caudal y velocidad de giro dadas, el rendimiento de las BVV " η_i^V ":

$$P_i^V = \frac{\gamma \cdot Q_{D,i}^V \cdot H_{CC,i}}{\eta_i^V} \quad [11]$$

La potencia eléctrica absorbida de la red es la potencia de la bomba dividida por el rendimiento del motor eléctrico en el caso de BVF, y también por el rendimiento del variador de frecuencia para el caso de las BVV. La suma de las potencias eléctricas absorbidas por todas las bombas proporciona el valor de la potencia eléctrica absorbida total $P_{E,i}$, dada una situación de caudal de consumo " $Q_{D,i}$ ", y una combinación de bombas propuesta.

En este punto se procede a hallar la cantidad de energía en " $kW \cdot h$ " consumida en cada paso temporal en el que se divide la simulación (intervalo Δt_i), mediante la expresión:

$$E_{Ei} = P_{E,i} \cdot \Delta t_i \quad [12]$$

Una vez se obtiene la energía, su coste se calcula multiplicando el valor de energía por el precio de la misma en el intervalo horario considerado:

$$\text{Coste Anual por Energía} \left(\frac{\text{€}}{\text{año}} \right) = \sum_i^n E_{E,i} \cdot t_i^E \quad [13]$$

Siendo " E_i " la energía consumida para cada intervalo horario considerado y " t_i^E " la tarifa para esa energía según el periodo de tarificación al que pertenece (€/kWh).

El coste por término de potencia va a depender de la potencia que se tenga contratada con la compañía, que puede ser diferente en cada periodo tarifario. Optimizar este punto pasa por minimizar el balance entre los costes de la potencia contratada y los costes de los excesos de potencia. Los datos de potencia eléctrica máxima demandada en cada periodo vendrán reflejados en la factura de suministro eléctrico (tarifa 3.0 y 3.1) o los suministrará la compañía eléctrica en formato electrónico (tarifa 6.1, 6.2...) (Alcázar Ortega, 2011).

De esta forma el coste anual por potencia contratada será:

$$\text{Coste Anual por Potencia} \left(\frac{\text{€}}{\text{año}} \right) = \sum_i^n P_{C,i} \cdot T_i^P \quad [14]$$

Siendo " $P_{C,i}$ " la potencia contratada para cada periodo tarifario y " T_i^P " la tarifa para esa potencia y periodo (ITC2794/2007).

Si bien el modelo considera que todas las bombas, sean de velocidad fija o variable, son iguales, de una a otra simulación puede cambiarse la bomba para analizar el funcionamiento del sistema con diferentes equipos.

No obstante, sería posible construir un modelo más general para considerar asociaciones de bombas con curvas diferentes, y otros aspectos tales como los rendimientos reales medidos en cada punto del plano H-Q teniendo en cuenta los rendimientos de la bomba, motor eléctrico y variador, si lo hubiera. En cualquier caso, bien se disponga de datos de ensayos o bien se trate de modelos para estimar los rendimientos a diferentes velocidades de giro, cargas, etc, cabría implementar en los modelos de visualización la posibilidad de definir zonas útiles teniendo en cuenta solo los rendimientos hidráulicos o también los rendimientos globales.

En la figura 4 se presenta una tabla resumen de los resultados de la simulación para un caso real. Se trata de una impulsión directa a una red de riego con una curva de consigna creciente con el caudal. El sistema consta de 8 bombas iguales, habiendo sido analizados 3 escenarios:

- Escenario 1: Compuesto por $3 \times BVV$ y $5 \times BVF$. Con regulación compartida para las BVV y una relación máxima de velocidad de $\alpha_{m\acute{a}x} = 1$, es decir, no se permite sobrevelocidad.
- Escenario 2: Compuesto por $2 \times BVV$ y $6 \times BVF$. Con regulación compartida para las BVV y una relación máxima de velocidad de $\alpha_{m\acute{a}x} = 1$, es decir, no se permite sobrevelocidad.

- Escenario 3: Compuesto por $1 \times BVV$ y $7 \times BVF$. Con una relación máxima de velocidad de $\alpha_{m\acute{a}x} = 1'15$.

Para la simulación energética se ha dispuesto de los datos de la serie temporal de caudales consumidos por la red para un año de funcionamiento, con un paso de tiempo horario.

Debido a no disponer del coste del exceso de potencia se ha estimado la potencia contratada en un 80% de la potencia máxima horaria consumida en cada periodo y año. Esta estimación se realiza para aproximar el valor al que sería el óptimo, ya que es evidente que este óptimo será menor al 100%. No obstante, sería necesario conocer el coste de los excesos de potencia para poder evaluar de una manera más exacta el coste energético anual. Este coste de los excesos de potencia debería ser añadido al calculado en los ejemplos que se presentan.

	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3
	3V+5F	2V+6F	1V+7F
NºBVV	3	2	1
NºBVF	5	6	7
NºB (TOTAL)	8	8	8
ALFA MÍN	0.80	0.80	0.80
ALFA MÁX	1.00	1.00	1.15
COBERTURA DE C.C.	98.89%	94.25%	99.16%
RECUBRIMIENTO ACUMULADO	45.86%	12.42%	2.11%
COSTE DE LA ENERGÍA (€/AÑO)	105651.38	107090.72	123708.11
TOTAL FACTURADO (€/AÑO)	198,289.93	200,116.25	221,201.30
OBSERVACIONES	Regulación Compartida	Regulación Compartida	

Figura 4. Resumen de resultados de simulaciones para tres escenarios de regulación

Evidentemente, además del coste energético será necesario tener en cuenta los gastos de inversión y amortización de los equipos para completar el estudio.

7. Conclusiones

El modelo hidráulico de visualización ofrece al usuario una visión veraz de los escenarios posibles y puede ser utilizado como apoyo a la decisión del técnico para descartar o validar dicho escenario, respecto a las premisas planteadas. Además, la interacción que permite el modelo con el usuario, sobre todo a la hora de realizar pequeños cambios, es razonablemente buena, lo que ayuda a formar opinión sobre el funcionamiento de cada escenario.

El modelo energético económico es capaz de calcular con fidelidad tanto el gasto energético como el coste de esa energía, permitiendo al usuario hacer un balance de resultados para elegir el mejor escenario.

La herramienta presentada no exige del estudio de amortización a realizar por el técnico de forma posterior al uso de la misma.

Bibliografía

Alcázar Ortega, M. (2011). *Auditorías Energéticas. Material didáctico Master en Tecnología Energética para el Desarrollo Sostenible*. Valencia.

BID, B. I. (2011). *Evaluación para sistemas de bombeo de agua. Manual de Eficiencia Energética*. Washington, D.C.

E. Cabrera, V. E.-S. (2009). *Ingeniería hidráulica aplicada en los sistemas de distribución de agua*.

García-Serra, J. (2011). *Hidráulica Avanzada. Material didáctico*. Valencia.

Ioan Sârbu, I. B. (1998). *Energetic optimization of water pumping in distribution systems*.

ITC2794/2007. *Regulación tarifas electricas*.

P Gómez. (2013). *PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN MÁS ADECUADA DESDE EL PUNTO DE VISTA ENERGÉTICO EN INSTALACIONES CON GRUPOS DE BOMBEO*. Valencia.