

CONSUMO DE ENERGÍA CON BOMBAS DE VELOCIDAD VARIABLE

Sánchez Calvo R.¹, L. Juana Sirgado¹, F. Laguna Peñuelas², A. Losada Villasante¹, L. Rodríguez Sinobas¹ y G. Castañón León¹

¹ Profesores de Ingeniería Hidráulica y Riegos. Universidad Politécnica de Madrid (UPM). E.T.S.I. Agrónomos. Grupo de Investigación Hidráulica del Riego de la UPM. Ciudad Universitaria, 28040 Madrid.

² Profesor de Ingeniería Hidráulica. Universidad Politécnica de Madrid (UPM). E.T.S.I. Caminos Canales y Puertos. Grupo de Investigación Hidráulica del Riego de la UPM. Ciudad Universitaria, 28040 Madrid.

Resumen

Se estudia en este trabajo el efecto de la variación de la velocidad de rotación de bombas en instalaciones de impulsión a redes en carga. El objetivo es minimizar el consumo de energía en impulsiones mediante el uso de bombas de velocidad variable. Se presenta una metodología para determinar los parámetros de programación de convertidores de frecuencia, máquinas empleadas para variar la velocidad de las bombas. Se aplica el estudio a tres variantes de una misma estación de bombeo compuesta por tres bombas en paralelo: una con tres bombas a régimen de rotación constante, otra con una de las tres bombas con velocidad variable y la última con las tres bombas con velocidad variable.

El consumo de energía es función del caudal y, en los tres casos estudiados, es elevado para caudales pequeños. Se establece un valor de caudal mínimo por debajo del cual el consumo de energía es sustancialmente elevado. El uso de bombas de velocidad variable, además de elevar el agua a alturas más adecuadas a la demandada en la red de distribución y, por lo tanto, permitir reducir el consumo de energía, éste último depende menos del caudal, por comparación con bombas de velocidad constante. La reducción es mayor para caudales pequeños, aunque si son muy pequeños el consumo sigue siendo excesivamente elevado. El caudal por debajo del cual el consumo de energía es sustancialmente elevado es menor cuando se cuenta con al menos una bomba de velocidad variable. Por esta razón, las estaciones de bombeo con una o varias bombas de velocidad variable tienen un rango de caudal de trabajo más amplio que las de sólo cuentan con bombas de velocidad constante. Por último, el ahorro potencial de energía no siempre es mayor en una impulsión con varias bombas de velocidad variable que en otra con una bomba con velocidad variable, debido a la disipación de energía que tiene lugar en sus convertidores de frecuencia.

1.- Introducción, Objetivos

Una parte considerable de los costes de explotación en riegos a presión corresponde al consumo de energía en sus sistemas de elevación. La reducción de dicho consumo contribuye a la sostenibilidad ambiental, además de a la competitividad del regadío.

Con objeto de reducir la energía consumida, se adapta la altura de elevación del bombeo a la que demanda la red mediante la modificación de las velocidades de rotación de las bombas. La regulación de esa rotación la suelen realizar los controladores PID de los convertidores de frecuencia. Estos últimos, en caso de contar con la señal de un transductor de presión, pueden regular automáticamente la altura de elevación al valor de consigna introducido en la programación del controlador.

Por otro lado, a veces, a varias las bombas de un bombeo se les dota de convertidor de frecuencia. Se busca que trabajen con mejor rendimiento que si no dispusiesen de él. En este caso, la influencia del propio rendimiento de los convertidores de frecuencia en el rendimiento de la elevación debería tenerse en cuenta.

La altura de elevación que demanda un sistema de distribución es función de la combinación de bocas de riego que se encuentren abiertas. De manera simplificada, dicha altura de elevación es función del caudal demandado, motivo por el que los convertidores de frecuencia pueden trabajar con dos valores de consigna de presión, uno para caudal nulo y otro para caudal máximo cuando trabajan todas las bombas de la instalación. A partir de estos dos valores, mediante la estimación de una curva cuadrática o similar que pase por ambos valores, ellos mismos establecen una consigna diferente según el número de bombas que estén en marcha (Danfoss, 2005a).

Respecto al funcionamiento de bombas con velocidad variable, y a diferencia con lo que ocurre con la altura de elevación, el rendimiento no se puede predecir con precisión aplicando las leyes de semejanza, debido a la disipación de energía en los convertidores de frecuencia (Walski et al., 2003), entre otras. A este respecto, se apunta que la carga apenas influye sobre el rendimiento de los convertidores de frecuencia (Danfoss, 2005b; Buró, 2008). Por lo tanto, en términos prácticos, el rendimiento de un convertidor de frecuencia podrá considerarse constante.

Planells et al. (2005) proponen proyectar estaciones de bombeo mediante la selección de la combinación de bombas, con o sin convertidor de frecuencia, que determinan el óptimo económico. En el caso planteado se parte de que se conoce la función de distribución del caudal a lo largo de todo un año medio.

El presente trabajo tiene como objetivo determinar las variables significativas en la disminución del consumo de energía en sistemas con bombas de velocidad variable frente a los de velocidad fija. Asimismo, es objetivo del presente trabajo la determinación de los puntos de puesta en marcha y parada de bombas que minimizan la energía consumida en función del caudal. Esto permitirá la comparación entre sistemas de elevación distintos, aunque regulados para el mismo fin.

2.- Materiales y Métodos

Las curvas características $H_B(Q)$ de una bomba a régimen de rotación constante suele ajustarse por una expresión polinómica como la que sigue:

$$H_B = a_0 + a_1 \cdot Q + a_2 \cdot Q^2 \quad (1)$$

donde a_0 , a_1 , a_2 son coeficientes de ajuste que tienen como ecuación de dimensión $[L]$, $[L]^2 \cdot [T]$ y $[L]^5 \cdot [T]^2$, respectivamente. Con frecuencia, la curva en cuestión puede ser ajustada con suficiente precisión asumiendo $a_1 = 0$, como es el caso del presente trabajo. Ello permite simplificar la resolución de los modelos de estaciones de elevación y, como consecuencia, aumenta el alcance de su uso.

Por otra parte, la curva de rendimiento del grupo motobomba, también a régimen de rotación constante, $\eta_B(Q)$ suele ajustarse por la expresión:

$$\eta_B = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_B}{P} = b_1 \cdot Q + b_2 \cdot Q^2 \quad (2)$$

donde los coeficientes de ajuste b_1 y b_2 tienen como ecuación dimensional $[L]^3 \cdot [T]$ y $[L]^6 \cdot [T]^2$, respectivamente, y P es la potencia que ha de suministrarse al grupo motobomba.

El análisis de los bombeos con bombas de velocidad variable puede llevarse a cabo mediante la aplicación de las leyes de semejanza. La familia de curvas características de bombas con impulsores semejantes en régimen de funcionamiento homólogo se expresa en función de los coeficientes adimensionales:

$$C_Q = \frac{N \cdot D^3}{Q} \quad (3)$$

y

$$C_H = \frac{N^2 \cdot D^2}{H \cdot g} \quad (4)$$

de donde se deduce que dos puntos de funcionamiento homólogos cualesquiera (Q_0, H_0) y (Q, H) cumplirán:

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 \quad (5)$$

y

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{N}{N_0} \quad (6)$$

La curva característica $H(Q, N)$ de una bomba a un régimen de rotación N puede expresarse en función de la curva característica para un régimen de rotación N_0 , frecuentemente el nominal, en este caso ajustada con los coeficientes a_0 y a_2 , según:

$$H = a_0 \cdot f^2 + a_2 \cdot Q^2 \quad (7)$$

con $f = N/N_0$.

Asimismo, si se considera suficientemente aproximada la hipótesis de validez de la semejanza cinemática, es decir, que dos puntos con funcionamiento homólogo tengan el mismo rendimiento, entonces la curva $\eta(Q)$ se expresa:

$$\eta = \frac{b_1}{f} \cdot Q + \frac{b_2}{f^2} \cdot Q^2 \quad (8)$$

El análisis del funcionamiento de una estación de bombeo con bombas en paralelo, y en la que cada una de éstas puede disponer de un convertidor de frecuencia, se ha realizado con base en las expresiones (7) y (8).

La curva de altura de elevación H_i en función del caudal Q_i de cada bomba en una determinada instalación de bombeo se ha obtenido a partir de la curva característica de la misma, tomada de la información técnica proporcionada por el fabricante, y teniendo en cuenta las pérdidas de carga h_f en los elementos singulares necesarios para cada bomba, tales como codos, válvula de retención y llaves. En régimen de turbulencia completa, en el que las pérdidas de carga son proporcionales al caudal al cuadrado, la altura de elevación H_i en función de Q_i de una bomba i se expresa:

$$H_i = H_B - h_f = a_0 \cdot f^2 + a_2 \cdot Q_i^2 - h_f = a_0 \cdot f^2 + (a_2 - k) \cdot Q_i^2 \quad (9)$$

donde k se ha ajustado experimentalmente.

Por otro lado, el rendimiento de cada grupo motobomba i en la instalación viene dado por la relación entre la potencia que imprime a la corriente y la potencia consumida P_i , y se ha expresado como sigue:

$$\eta_i = \frac{\gamma \cdot Q_i \cdot H_i}{P_i} = \frac{\gamma \cdot Q_i \cdot (H_B - h_f)}{P_i} = \eta_B \left(1 - \frac{h_f}{H_B} \right) = \left(b_1 \cdot Q_i + b_2 \cdot Q_i^2 \right) \left(1 - \frac{k \cdot Q_i^2}{a_0 + a_2 \cdot Q_i^2} \right) \quad (10)$$

que se ha ajustado mediante la expresión:

$$\eta_i = b'_1 \cdot Q_i + b'_2 \cdot Q_i^2 \quad (11)$$

donde b'_1 y b'_2 son los coeficientes de ajuste.

De manera aproximada, en caso de que la bomba i disponga de convertidor de frecuencia de rendimiento η_{cf} , al considerar a este último constante y aplicar las leyes de semejanza cinemática al grupo motobomba, dicho rendimiento se expresa:

$$\eta_i = \eta_{cf} \cdot \left(\frac{b'_1}{f} \cdot Q_i + \frac{b'_2}{f^2} \cdot Q_i^2 \right) \quad (12)$$

A este respecto, el rendimiento medio de la instalación eléctrica de una bomba con convertidor de frecuencia puede ser un 8% menor que sin dicho convertidor. Del orden de un 3% se debería al rendimiento del convertidor propiamente dicho y el 5% restante a su sistema de refrigeración.

Se estudian a continuación tres casos para una estación de elevación compuesta por tres bombas centrífugas en paralelo. En el primero, caso de estar en marcha, cada una de las bombas rota a velocidad fija. En el segundo, una de las bombas en marcha trabaja con velocidad de rotación variable mientras que el resto lo hace con velocidad fija. Y, por último, en el tercero, todas las bombas que están en marcha trabajan con régimen de rotación variable. En los tres casos el número de bombas que están en marcha es función del caudal demandado.

Para aquellas bombas que giran a velocidad constante, por no disponer de convertidor de frecuencia, se ha considerado $f = 1$ y $\eta_{cf} = 1$.

En un bombeo con bombas en paralelo, el caudal Q que eleva es igual a la suma de los caudales Q_i de cada bomba. La altura de elevación H es igual a la aportada por cada bomba H_i . Y, por último, la potencia P consumida en el bombeo es la suma de las potencias P_i de cada bomba.

Así, el bombeo con n bombas iguales, en funcionamiento al mismo régimen de rotación, se ha modelado con las ecuaciones que siguen:

$$H(Q) = H_i = a_0 \cdot f^2 + (a_2 - k) \left(\frac{Q}{n} \right)^2 \quad (13)$$

y

$$\eta(Q) = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{P} = \frac{\gamma \cdot H \cdot \sum Q_i}{\sum P_i} = \frac{\sum Q_i}{\sum \frac{Q_i}{\eta_i}} = \eta_i = \eta_{cf} \cdot \left[\frac{b'_1}{f} \left(\frac{Q}{n} \right) + \frac{b'_2}{f^2} \left(\frac{Q}{n} \right)^2 \right] \quad (14)$$

Las ecuaciones (13) y (14) tienen aplicación en aquellos casos en los que todas las bombas son iguales y, además, todas trabajan con convertidor de frecuencia o sin él. En este último caso, tal y como se ha mencionado anteriormente $f = 1$ y $\eta_{cf} = 1$.

Por otro lado, en caso de que, de las n bombas en funcionamiento, una sola bomba disponga de convertidor de frecuencia, la impulsión se ha modelado mediante las ecuaciones:

$$Q = \sum Q_i = Q_{cf} + Q_{sf} = \sqrt{\frac{a_0 \cdot f^2 - H}{k - a_2}} + (n-1) \cdot \sqrt{\frac{a_0 - H}{k - a_2}} \quad (15)$$

y

$$\eta(Q) = \frac{\gamma H \cdot \sum Q_i}{\sum P_i} = \frac{Q}{\sum \frac{Q_i}{\eta_i}} = \frac{Q}{\frac{Q_{cf}}{\eta_{cf} \left[\frac{b'_1}{f} \left(\frac{Q}{n} \right) + \frac{b'_2}{f^2} \left(\frac{Q}{n} \right)^2 \right]} + \frac{Q_{sf}}{b'_1 \left(\frac{Q}{n} \right) + b'_2 \left(\frac{Q}{n} \right)^2}} \quad (16)$$

donde Q_{cf} representa el caudal elevado por la bomba con convertidor de frecuencia y Q_{sf} el elevado por las bombas sin él.

Tiene interés además determinar la curva de energía consumida por cada unidad de volumen elevada $E_V(Q)$, que se ha obtenido a partir de las curvas $H(Q)$ y $\eta(Q)$:

$$E_V = \frac{P \cdot t}{V} = \frac{P}{Q} = \frac{\gamma H(Q)}{\eta(Q)} \quad (17)$$

También tiene interés determinar el caudal óptimo de cambio Q_c a partir del cual una combinación de m bombas tiene menor consumo de energía E_V que otra de n bombas. Esto tiene especial interés cuando todas las bombas disponen de convertidor de frecuencia, por lo que la altura de elevación H es un valor constante y regulado por el controlador automático del propio convertidor. A partir de las expresiones (14) y (17) se obtiene que dicho caudal Q_c es:

$$Q_c = \frac{\frac{H_n \cdot b'_1}{n \cdot f_n} - \frac{H_m \cdot b'_1}{m \cdot f_m}}{\frac{H_m \cdot b'_2}{m^2 \cdot f_m^2} - \frac{H_n \cdot b'_2}{n^2 \cdot f_n^2}} \quad (18)$$

donde los subíndices m y n hacen referencia a las combinaciones de m y n bombas, respectivamente.

La determinación de dicho caudal debe hacerse junto a f_m y f_n simultáneamente y, además, teniendo en cuenta que los puntos H_m y H_n deben pertenecer además a la curva $H(Q)$ requerida por el sistema. Para este objetivo, dicha curva se ha caracterizado con la envolvente superior de los puntos de funcionamiento del sistema de distribución a alimentar, y se ha modelado con la expresión:

$$H = c_0 + c_2 \cdot Q^2 \quad (19)$$

Los valores de f_m y f_n así obtenidos son requeridos para programar los convertidores de frecuencia. Así con $f_m + \Delta f$ se obtiene el correspondiente valor de la velocidad de rotación a la que debe producirse el cambio de la combinación m a la n . Δf aporta estabilidad al funcionamiento del sistema y también es un parámetro que suele introducirse en la programación de los convertidores de frecuencia. Análogamente, $f_n - \Delta f$ determina la velocidad de rotación para que se produzca el cambio inverso.

Por otro lado, la comparación de las impulsiones estudiadas se ha efectuado con el parámetro E_{Vm} definido por:

$$E_{Vm} = \frac{\int_{Q_{min}}^{Q_M} E_V(Q) dQ}{Q_M - Q_{min}} \quad (20)$$

donde Q_{\min} y Q_M definen el intervalo de caudal razonable en el que la impulsión debería trabajar. Q_M es el caudal máximo que la impulsión puede elevar a la altura requerida por el sistema según (19). Respecto a Q_{\min} , caudal mínimo con el que la impulsión trabaja de manera razonable, se ha tomado aquel valor para el que $E_V(Q_{\min})$ supera en un determinado número de veces el valor medio de E_V en el intervalo de caudal en el que trabajan dos o más bombas. En particular, dicho número de veces se ha considerado igual a 0,5.

El parámetro E_{Vm} tal y como se ha definido en (20) es el valor medio de la función $E_V(Q)$ en el intervalo mencionado. Por este motivo, las diferencias de dicho parámetro en los casos estudiados no representan ahorros de energía reales, ya que para ello es necesario conocer la función de distribución del caudal. No obstante, sí que representa de manera orientativa el ahorro potencial de energía que se puede conseguir con bombeos de velocidad variable.

3.- Resultados y Discusión

La tabla 1 muestra los valores para los parámetros del modelo usados para predecir y simular el funcionamiento del bombeo. Asimismo, en la Figura 1a se muestra también su contraste experimental. Los valores de a_0 , a_2 , b_1 y b_2 de las curvas características $H(Q)$ y $\eta(Q)$ según las expresiones (1) y (2) se han obtenido mediante ajuste a partir de las curvas características $H_B(Q)$ y $\eta_B(Q)$ a régimen nominal dadas por el fabricante. Los valores de k y de η_{cf} en las expresiones (9) y (10) se han obtenido también mediante ajuste, ahora a partir de observaciones experimentales de H , Q y η . Y, por último, los valores de η correspondientes al rendimiento estimado conjunto del grupo motobomba y la instalación se han ajustado según (12) con los valores de b'_1 y b'_2 . El contraste del ajuste que proporcionan los parámetros k y η_{cf} en el rendimiento se muestra en la Figura 1b.

Tabla 1. Valores de los parámetros del modelo empleados en las simulaciones.

Parámetro	Valor	Unidad
a_0	91,8	m
a_2	-0,0366	h^2/m^5
k	0,0065	
b_1	0,0478	h/m^2
b_2	-0,00092	h^2/m^5
b'_1	0,0518	h/m^2
b'_2	-0,00115	h^2/m^5
η_{cf}	0,94	-
c_0	40	m
c_2	0,002	h^2/m^5

Por último, los valores de c_0 y c_2 definen la envolvente superior de la nube de puntos H y Q demandados por el sistema de distribución a alimentar por las impulsiones objeto de estudio. Cada punto se corresponde con una combinación de bocas de riego en uso. Se ha considerado que la elevación es adecuada para un sistema de distribución con puntos de funcionamiento (H, Q) cuya envolvente superior queda definida por los valores dados. El punto de corte de esta curva con la de la impulsión con las tres bombas en funcionamiento a velocidad de rotación nominal determinan un valor $Q_M = 83 \text{ m}^3/h$.

En la Figura 2 se han representado las curvas $H(Q)$, $\eta(Q)$ y $E_V(Q)$ para la impulsión con tres bombas sin convertidor de frecuencia.

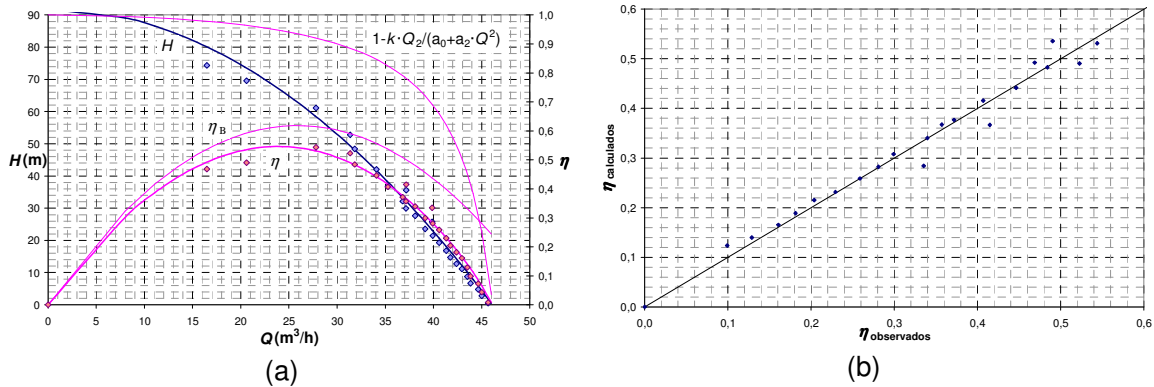


Figura 1. Contraste experimental entre las curvas características experimentales y las ajustadas.

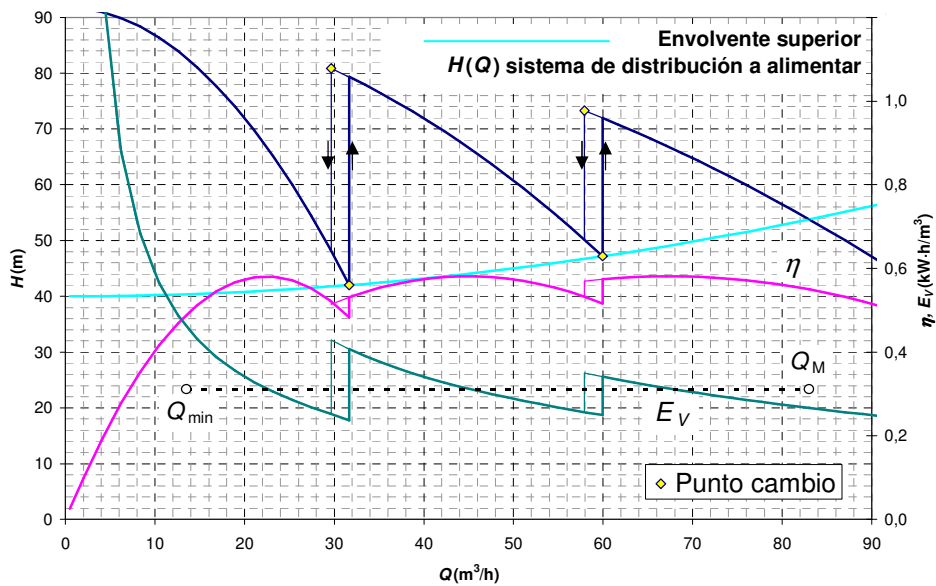


Figura 2. Sistema de elevación con tres bombas sin convertidor de frecuencia.

El valor promedio E_{Vm} de la energía consumida según la expresión (20) es de $0,31 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$, con un caudal mínimo Q_{\min} , determinado como aquel para el que la energía consumida es 1,5 veces la media, de $13,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

En la Figura 3 se han representado las curvas análogas a las de la figura 1, pero para el sistema de impulsión en el que una de las bombas cuenta con un convertidor de frecuencia.

En primer lugar, puede apreciarse que el hecho de que la altura de elevación de la impulsión se adapte a la altura requerida por la envolvente superior implica una reducción potencial en la energía consumida. Así, $E_{Vm} = 0,254 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$, lo que representa una diferencia del 18,4% frente a la situación sin convertidores de frecuencia. Y, en segundo lugar, el intervalo de uso de la impulsión, y por lo tanto su versatilidad, se ve ampliado, ya que Q_{\min} es ahora de $5,1 \text{ m}^3/\text{h}$.

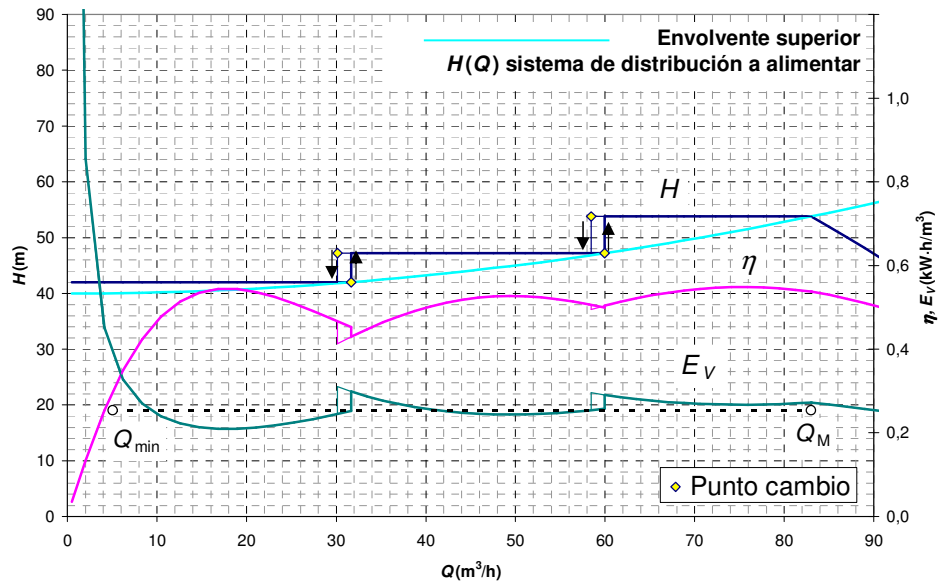


Figura 3. Sistema de elevación con tres bombas, una con convertidor de frecuencia.

En la Figura 4 se han representado las curvas análogas a las representadas en la Figura 2 y en la Figura 3, ahora para el sistema de impulsión en el que las tres bombas cuentan con convertidor de frecuencia. Las curvas se han obtenido con los valores de relación de rotación determinados según la metodología descrita en el apartado anterior y empleados para programar la puesta en marcha y la parada de las bombas, que se muestran en la Tabla 2.

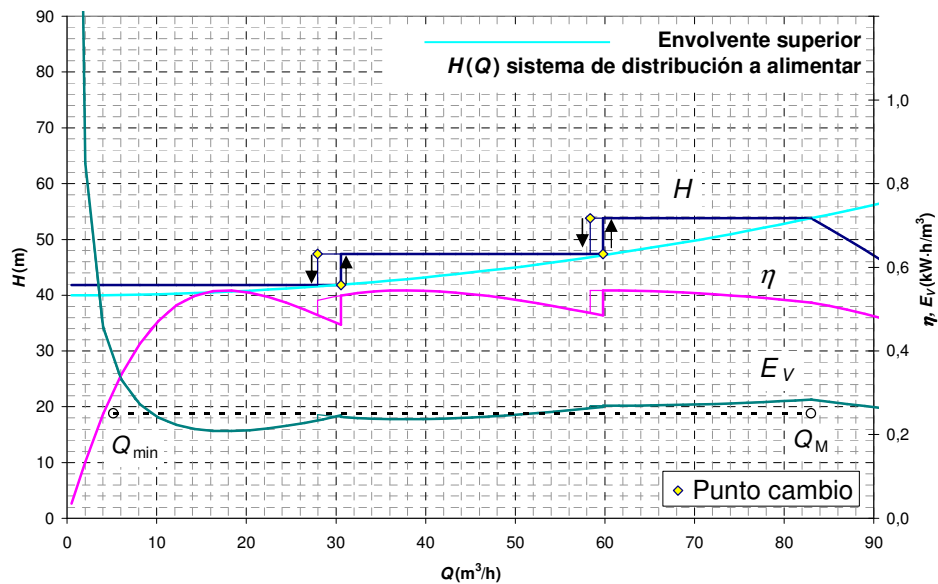


Figura 4. Sistema de elevación con tres bombas con convertidor de frecuencia.

En primer lugar, y al igual que ocurre en el caso de la Figura 3, puede apreciarse que el hecho de que la altura de elevación de la impulsión se adapte a la altura requerida por la envolvente superior implica una reducción potencial en la energía consumida. Así, $E_{Vm} = 0,251 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$, lo que representa una diferencia del 19,4% frente a la situación sin convertidores de frecuencia. Se aprecia una pequeña diferencia de un 1% frente a la situación con un convertidor de frecuencia, representada en la Figura 3. Por otro lado, y

como era previsible, el intervalo de uso adecuado de la impulsión apenas ha variado, ya que Q_{\min} es ahora de $5,2 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 2. Valores de relación de rotación determinadas y empleadas en las simulaciones.

Número de bombas en marcha	Valores de relación f de rotación óptimas	
	Se pone en marcha la siguiente bomba	Se para una de las bombas
	f_{\max}	f_{\min}
1	0,98	-
2	1,00	0,79
3	-	0,89

En la Figura 5 se representan simultáneamente las curvas de $E_v(Q)$ para las situaciones de las tres figuras anteriores. Se aprecia que la energía consumida depende del caudal. Por lo tanto, el consumo de energía real dependerá de la función de distribución del caudal. Puede apreciarse que la variabilidad de la energía consumida es mayor en el caso de que la impulsión no cuente con convertidores de frecuencia. Puede decirse que el convertidor de frecuencia contribuye a hacer más uniforme el consumo de energía respecto del caudal. También se aprecia que, debido a la pérdida de energía en el propio convertidor, la energía por unidad de volumen para determinados valores de caudal, p. ej., alrededor de $80 \text{ m}^3/\text{h}$, es mayor en la impulsión con tres convertidores de frecuencia que en la de un convertidor de frecuencia, y ésta es a su vez mayor que en la que no dispone de bomba alguna con convertidor.

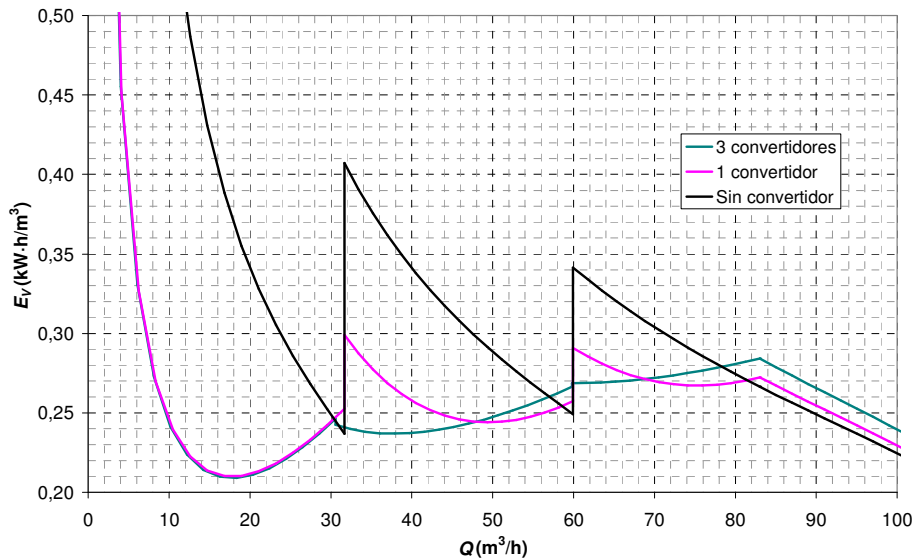


Figura 5. Curvas de energía consumida por unidad de volumen elevado para las tres impulsiones estudiadas.

En la Figura 6 se muestra la previsión del ahorro medio en energía por unidad de volumen que permitirían obtener los convertidores de frecuencia en función de su rendimiento η_{cf} , en los casos de la impulsión con un convertidor (1cf) y con tres convertidores (3cf), respecto a la impulsión sin él. También se muestra dicha previsión para el hipotético caso, señalados con $k = 0$, en el que las pérdidas de carga en los elementos anexos a cada bomba fuesen despreciables.

Puede verse como dicho ahorro medio depende del rendimiento del convertidor. Se aprecia además que en el caso estudiado un valor para η_{cf} alrededor de 0,91 implica un cambio de tendencia entre contar con un convertidor de frecuencia o con tres. Y por otro lado, que, para el hipotético caso en el que k fuese despreciable, dicho valor de η_{cf} estaría entre 0,92 y 0,93. Puede decirse entonces que el interés de instalar uno frente a más convertidores de frecuencia depende de su rendimiento.

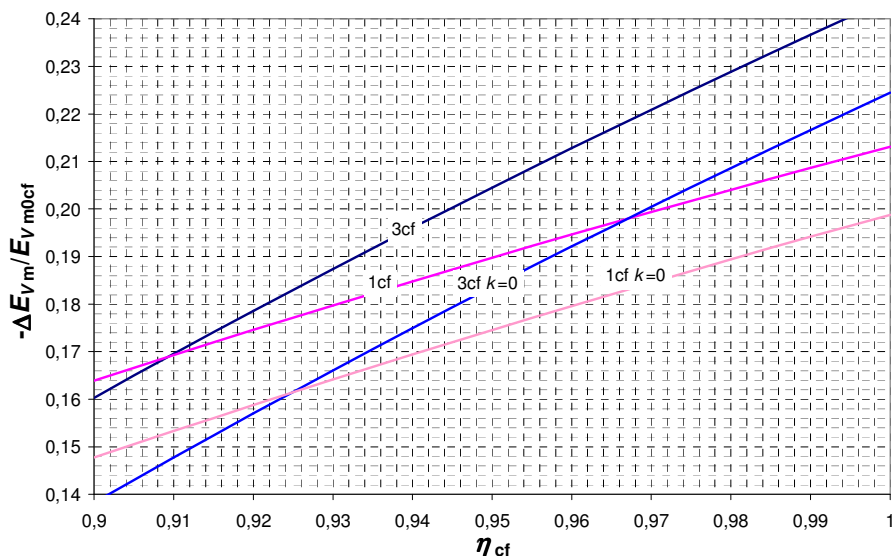


Figura 6. Ahorro de energía por unidad de volumen en las impulsiones con convertidor de frecuencia, uno (1cf) o tres (3cf), respecto de la que no dispone él.

4.- Conclusiones y Recomendaciones

El consumo de energía en una estación de bombeo depende de las características de la propia impulsión y, además, del caudal demandado. Por este motivo, el manejo de la red tiene consecuencias importantes sobre dicho consumo. En el caso de conocer la función de probabilidad del caudal demandado, las estimaciones sobre el consumo se pueden realizar con mayor precisión.

El empleo de convertidores de frecuencia en los sistemas de impulsión contribuye a independizar el consumo energético del caudal demandado. Desde el punto de vista del ahorro energético, el interés de usar más de un convertidor depende de su rendimiento.

El consumo de energía puede reducirse caso de adoptar el valor específico de presión a regular para cada situación de funcionamiento de la red, según las bocas de riego que se encuentren abiertas en un determinado momento. Para ello, tiene interés la combinación de las técnicas de telecontrol, las de predicción del funcionamiento de redes con sus llaves automáticas de control y, por supuesto, las de análisis del funcionamiento de estaciones de bombeo.

5.- Agradecimientos

Los autores del trabajo agradecen a la *Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT)* el apoyo prestado a través del proyecto AGL2004-01689/AGR.

6.- Bibliografía

- Burt, C. M., Piao, X., Gaudi, F., Busch, B, Taufik, F. N., 2008, "Electric Motor Efficiency under Variable Frequencies and Loads". J. of Irrig. and Drainage Eng. ASCE 134 (2): 129-36.
- Danfoss, 2005a, "Opción controlador de cascada para VLT 6000 HVAC y VLT 8000 AQUA", MG.60.I5.05.
- Danfoss, 2005b, "VLT 8000 AQUA. Manual de funcionamiento", MG.80.A9.05.
- Planells, P., Carrión, P., Ortega, J. F., Moreno, M. A., Tarjuelo, J. M., 2005, "Pumping Selection and Regulation for Water-Distribution Networks". J. of Irrig. and Drainage Eng. ASCE 131 (3): 273-81.
- Walski, T and Zimmerman, K; Dudinyak, M y Dileepkumar, P , 2003, "Some Surprises in Estimating the Efficiency of Variable-Speed Pumps with the Pump Affinity Laws", World Water and Environmental Resources Congress 2003.