

04-044

## PROJECT OF OPERATION OPTIMIZATION IN PUMPING STATIONS FOR WATER NETWORKS

Briceño León, Christian Xavier <sup>(1)</sup>; Iglesias-Rey, Pedro L. <sup>(2)</sup>; Martínez-Solano, F. Javier <sup>(1)</sup>; Mora-Meliá, Daniel <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Universitat Politècnica de València, <sup>(2)</sup> Universitat Politècnica de Valencia, <sup>(3)</sup> Universidad de Talca

Proper design of a pumping system requires that the pump curve have to be as close as possible the system set-point curve, so that the energy used is optimal. This is achieved by control systems, in which and the combination between Fixed Speed Drives (FSD) pumps and Variable Speed Drive (VSD) pumps and the type of control to be used (flow or pressure) are involved. The objective of this work is to determine the optimal number of FSD and VSD pumps operating for each flow rate range. For this, a generic formulation is developed that allows discussing the influence of the network curve and the best efficient point of the pump provided in the pumping design solution analyzed. Additionally, the method includes analyses investment costs and maintenance costs and value the importance of these aspects in a design of a pumping system. The application of the methodology to different cases studies allows to conclude that the number of FSD and VSD pumps cannot be deduced in simple way as it is done in classic design of control system pump, but it requires a depth analysis in control modes system for do a proper pumping system design.

*Keywords: pumping control system; set-point curve; best efficient point; variable speed driver (VSD) pump, fixed speed driver (FSD) pump*

## PROYECTO DE OPTIMIZACIÓN EN LA OPERACIÓN DE ESTACIONES DE BOMBEO PARA REDES DE AGUA

Para un diseño adecuado de sistemas de bombeo se requiere que la curva motriz de una bomba opere lo más cerca posible a la curva consigna según varíe la demanda, a fin de que la eficiencia energética utilizada sea la óptima. Esto se puede conseguir con sistemas de regulación, en donde interviene la combinación de operación de bombas de velocidad fija (BVF) y bombas de velocidad variable (BVV). El objetivo de este trabajo es determinar el número óptimo de BVF y BVV en funcionamiento para cada rango de caudal. Para la metodología propuesta se ha creado una formulación para determinar la influencia de los parámetros de la curva consigna y los puntos nominales de la bomba en los sistemas de regulación. Adicionalmente, este trabajo incluye analizar los costes de inversión y mantenimiento, y valorar su importancia en un diseño de bombeo. La metodología propuesta se ha aplicado a distintos casos de estudio. De los resultados obtenidos, se ha podido concluir que el número de BVF y BVV no se puede inferir simplemente como en un diseño clásico de regulación, sino que se requiere un análisis profundo en los modos de regulación para un diseño adecuado en sistemas de bombeo.

*Palabras clave: sistema de regulación; curva consigna; punto nominal; bomba de velocidad variable (BVV); bomba de velocidad fija (BVF)*

Correspondencia: Christian Xavier Briceño León [chbri1@alumni.upv.es](mailto:chbri1@alumni.upv.es)



©2020 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 2. Introducción

El crecimiento de los asentamientos urbanos ha acarreado al aumento de la demanda de consumo de agua en las redes de suministro lo que ha derivado a mayores exigencias en producción de energía y mayores consumos de energía de las redes de agua potable en especial con los sistemas de bombeo. Por otro lado, se han originado problemas nuevos en la generación de gases de efecto invernadero en la producción de energía (Stokes, Simpson & Maier, 2014). Estos hechos han incentivado a la elaboración de estudios de investigación con el propósito de optimizar el consumo energético en las estaciones de bombeo.

Las gestiones inteligentes de los sistemas de bombeo en redes de agua potable se basan en una selección y operación optimizada donde se debe incluir aspectos como: costes de inversión, costes de instalación, costes operacionales y costes de mantenimiento (Environmental Protection Agency [EPA], 2008). La eficiencia de las estaciones de bombeo está estrechamente relacionada con el sistema de operación que se está manejando, con el dimensionamiento de las tuberías de las redes, el dimensionamiento de la estación de bombeo y las presiones de servicio en el sistema. Por lo tanto, la mejor forma de disminuir la energía consumida es mediante la optimización de operación en las estaciones de bombeo (Leiby & Burke, 2011).

Para la optimización en las operaciones de sistemas de bombeo se han utilizado una variedad de modelos matemáticos de programación: la programación lineal donde se destacan trabajos como Pasha y Lansey (2009); Jowitt y Germanopoulos (1992); la programación no lineal Sakarya y Mays (2000) y la programación dinámica (McCormick y Powell (2003). Sin embargo, estos modelos matemáticos están limitados en el manejo de una gran cantidad de datos en las variables de decisión y el tiempo de cálculo en buscar el óptimo puede resultar ineficiente.

Con el avance computacional, se han desarrollado algoritmos metaheurísticos, los cuales son más eficientes en el manejo de datos, pueden escapar de soluciones locales, implementando espacios de búsqueda multimodal aún sin perder eficiencia computacional. Entre estos algoritmos aplicados a la optimización en sistemas de bombeo cabe destacar el trabajo de López-Ibáñez, Prasad y Paechter (2008) utilizando el algoritmo de colonia de hormigas o el trabajo Price y Ostfeld (2013) donde aplicaron el algoritmo denominado camino más corto de Dijkstra (Dijkstra, 1959). Posteriormente, se han implementado algoritmos híbridos en la optimización de estaciones de bombeo combinado la programación lineal y el algoritmo voraz (Giacomello, Kapelan & Nicolini, 2012). Finalmente, Abdallah y Kapelan (2017) han desarrollado una metodología de programación iterativa de objetivos lexicográficos extendidos, logrando optimizar el tiempo computacional en la búsqueda de las funciones objetivos.

El uso de BVV permite ajustar de mejor manera a las condiciones de demanda y presión que requiere el sistema. Por consiguiente, se puede disminuir la energía consumida de manera significativa en comparación con las bombas de velocidad fija (Lingireddy & Wood, 1998). Existen varios trabajos previos de optimización con BVV, donde se han utilizado una variedad de algoritmos como: colonia de hormigas (Hashemi, Tabesh & Ataekia, 2014) y la programación iterativa de objetivos lexicográficos extendidos (Abdallah & Kapelan, 2019).

Los diseños para sistemas de regulación de bombeo están relacionados con la curva motriz de la bomba, la curva de eficiencia de la bomba y la curva resistente de la red. Esta curva hace referencia a la altura mínima necesaria en la estación de bombeo para suministrar la demanda y presión mínima requerida en los nudos de consumo (Walski, Hartell & Wu, 2010). Los distintos modos de operación que pueden existir en los sistemas de regulación dependen de las distintas combinaciones entre BVF y BVV y

adicionalmente de los modos de control manométrico y/o caudalimétrico (Fuertes *et al.*, 2009).

Para lograr una mayor eficiencia en términos de energía consumida en los sistemas de regulación de bombeo, es importante incorporar BVV al sistema de bombeo. Existen varias técnicas de regulación asociados a BVV. Una de ellas es que el sistema de regulación siga una presión de consigna constante con respecto al caudal de consumo. La otra técnica es seguir la curva resistente. Se ha demostrado que cuando el sistema de regulación sigue la curva resistente, se consiguen ahorros significativos de energía y adicionalmente mejora la eficiencia de operación del sistema de bombeo Lamaddalena & Khila, 2013).

En cuanto a las configuraciones de estaciones de bombeo conectadas a paralelo, se ha comprobado que, al utilizar BVF y BVV de menor capacidad de caudal en comparación al equivalente a la configuración con menor número de BVF y BVV pero con mayor capacidad de caudal, ofrece mejores resultados en cuanto al rendimiento del sistema y por consiguiente existe un menor consumo energético y un menor costo total del ciclo de vida de la bomba (Walski & Creaco, 2016).

Como complemento y diferencia del trabajo de Lamaddalena y Khila (2013), León-Celi *et al.* (2016), desarrollaron una metodología para determinar la distribución óptima de caudales en múltiples estaciones de bombeo y adicionalmente aplicaron un concepto más simplificado que curva resistente, denominada curva consigna. Esta curva se la define como el conjunto de puntos entre demanda y altura necesaria que requiere una fuente de suministro de modo que se pueda entregar la demanda requerida al nudo de consumo más crítico del sistema y manteniendo siempre la presión mínima de servicio en el nudo crítico (Martínez-Solano *et al.*, 2014). Esta metodología desarrollada se puede aplicar para determinar la mínima energía que se puede consumir en el diseño de estaciones de bombeo (León-Celi *et al.*, 2018).

Una de las mayores limitaciones de los trabajos de optimización con BVV es que o bien no consideran la eficiencia del variador de frecuencia y como podría afectar al rendimiento del sistema, o se considera éste como un valor constante como en el trabajo de Walski y Creaco (2016). Existen estudios que han realizado estudios experimentales donde analizan la eficiencia del variador de frecuencia en función de la velocidad de giro de la bomba y el par mecánico en el eje (Europump & the Hydraulic Institute, 2004), (Aranto, 2008). Otra de las limitaciones es la omisión de la desviación de la curva de la eficiencia en BVV con respecto a la aplicación de las leyes de afinidad, lo cual genera inexactitudes para estimar la eficiencia (Simpson & Marchi, 2013). A pesar de ello existen formulaciones que corrigen dichos defectos de las leyes de semejanza como los trabajos de Sarbu y Borza (1998) y más tarde con la formulación de Coelho & Andrade-Campos (2016).

Las aportaciones de este trabajo en el análisis de los modos de regulación siguiendo la curva consigna, es la estimación del rendimiento del variador de frecuencia mediante una expresión matemática. Dicha expresión se la obtendrá de acuerdo al mejor ajuste de los trabajos experimentales ya existentes (Europump & the Hydraulic Institute, 2004), (Aranto, 2008). Adicionalmente, se tomará en cuenta las correcciones a realizar por las inexactitudes de las leyes de semejanza para estimar la eficiencia del sistema. De esta manera la metodología a proponer para el análisis de regulación se obtendrán resultados más aproximados a la realidad sobre todo en cuanto al rendimiento global del sistema de bombeo.

En resumen, el presente trabajo consiste en determinar las configuraciones de bombeo más adecuadas (combinación entre BVF y/o BVV) para cada rango de caudal con el fin de que la energía consumida en la estación de bombeo sea la mínima. En otras palabras, el objetivo del presente trabajo es determinar el número óptimo de bombas de BVF y BVV. Para esto, los conceptos que interviene en el análisis de sistema de bombeo

como la curva de la bomba, curva de la eficiencia y la curva consigna serán expresados de forma adimensional y cuyos términos estarán en relación con el punto de máximo rendimiento (BEP del inglés *Best Efficiency Point*).

### 3. Metodología.

Antes de explicar en qué consiste la metodología, es importante explicar en qué consiste un sistema de regulación y como es su funcionamiento en el sistema clásico para después abordar a lo que se propone en el presente trabajo.

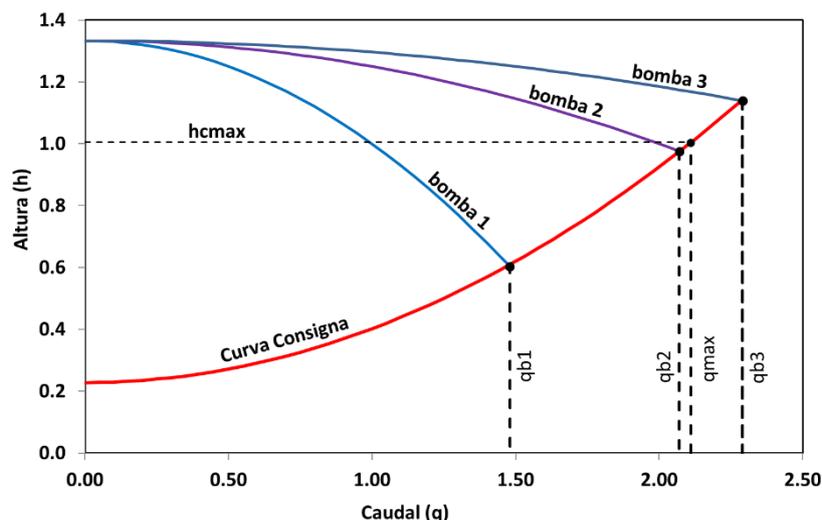
Las estaciones de bombeo pueden disponer de dos tipos de control: manométrico y caudalimétrico. En el primero se mide únicamente la presión a la salida de la estación de bombeo, mientras que en el segundo se mide adicionalmente el caudal. En ambos casos las mediciones de las variables (presión y caudal) permiten finalmente a un PLC ordenar el número de bombas en marcha y la velocidad a las que éstas deben girar para ajustarse al máximo a la curva consigna.

El sistema de regulación clásico siguiendo la curva consigna (figura 1) funciona a partir de las siguientes variables:

- $q_{b1}$  es el caudal de una bomba de la intersección de la curva de la bomba y curva consigna;
- $q_{b2}$  es el caudal de la intersección de la curva de dos bombas y la curva consigna;  $q_{b3}$  es el caudal de la intersección de la curva de tres bombas y la curva consigna;  $q_{max}$  es el caudal de máximo consumo;  $q_{b1}-h_{cmax}$  es el caudal de una bomba cuando ( $h_c = h_{cmax}$ ) y  $H_c$  es la altura consigna que varía según la curva consigna.

La intersección de las curvas de funcionamiento n bombas con la curva de consigna define el caudal  $q_{bn}$  que marca el límite de utilización de n bombas. Para caudales superiores serían necesarias n+1 bombas. De acuerdo a la figura 1, cuando el caudal de consumo está entre el rango  $0 < q < q_{b1}$  funciona una sola bomba con la velocidad de giro respectiva siguiendo la curva consigna. Cuando el caudal de consumo está en el rango  $q_{b1} < q < q_{b2}$  funcionan 2 bombas, una de ellas girando al 100% de su velocidad y la otra girando con una velocidad inferior para ajustarse a la demanda. Finalmente, en el último rango ( $q_{b2} < q < q_{max}$ ), funcionarían las tres bombas, donde las dos primeras estarían al 100% y la tercera sería una BVV con un valor  $\alpha$  inferior a 1. Es decir, los diferentes caudales  $q_{bn}$  definen el número de bombas en funcionamiento,

**Figura 1: Sistema de Regulación Clásico**



La idea principal del presente trabajo consiste en probar distintas combinaciones que puedan existir entre BVF y BVV para cada rango del sistema clásico. Empezando con

el número mínimo de BVF y BVV requeridos en cada rango del sistema clásico y después se aumentará el número de BVV hasta alcanzar el resultado óptimo de energía consumida.

En esta metodología se parte siempre de que se dispone de las curvas características de la bomba a instalar y la curva de consigna de la red. En este sentido el objetivo no es seleccionar la curva más adecuada sino el número de bombas y el tipo que deben funcionar para cada rango de caudales de funcionamiento.

Primero se determina el número de bomba requeridas según el sistema clásico. Para lo cual se debe definir el caudal que suministra una bomba ( $q_{b1}$ ) que mantiene la altura máxima requerida ( $h_{cmax}$ ) cuando se produce el caudal máximo de consumo ( $q_{max}$ ) (figura 1). Finalmente, la relación entre ( $q_{max}$  y  $q_{b1}$ ), se obtiene el número de bombas necesarias en el sistema clásico de regulación.

$$n_{bombas} = \frac{q_{max}}{q_{b1}} \quad (1)$$

Una vez obtenido el número de bombas necesarias, se definen los rangos de operación del sistema de regulación: ( $0 < q < q_{b1}$ ); ( $q_{b1} < q < q_{b2}$ ) y ( $q_{b2} < q < q_{bn}$ ).

Para que la metodología tenga una aplicación más general, se ha procedido en expresar las curvas que definen el sistema de bombeo (curva de altura manométrica de la bomba, curva de rendimiento de la bomba y curva consigna de la red) en forma paramétrica o adimensional, cuyos términos estarán relacionados con el BEP ( $Q_o, H_o, \eta_o$ ) de la bomba. El desarrollo de estas formulaciones se explica de la siguiente manera:

La curva de altura manométrica de la bomba ( $H$ ) y la curva de rendimiento de la bomba ( $\eta$ ) están expresadas en función del caudal ( $Q$ ), en función de la velocidad de giro reducida (relación entre la velocidad de giro actual ( $M$ ) y la velocidad de giro nominal ( $N_o$ ) y del número de bombas ( $n$ ) que las compone el sistema. Aplicando las leyes de semejanza, las ecuaciones de altura de la bomba ( $H$ ) y su rendimiento ( $\eta$ ) quedan expresadas de la siguiente forma.

$$H = H_1 \alpha^2 - \alpha^{(2-B)} A \cdot \left(\frac{Q}{n}\right)^B \quad (2)$$

$$\eta = E \cdot \frac{Q}{\alpha \cdot n} - F \cdot \left(\frac{Q}{\alpha \cdot n}\right)^2 \quad (3)$$

En las ecuaciones anteriores (2) y (3), los términos ( $H_1, A, B, E$  y  $F$ ) son coeficientes característicos diferentes para cada bomba considerada. Para una bomba cualquiera, la relación entre la potencia consumida por la bomba ( $P$ ), en par en el eje ( $M$ ) su velocidad de giro ( $\omega$ ) es:

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta} = M \cdot \omega \quad (4)$$

La metodología propuesta supone considerar las ecuaciones en forma adimensional. Las ecuaciones se hacen adimensionales tomando como referencia los valores en el punto de máxima eficiencia (BEP), de forma que los valores reducidos de altura ( $h$ ), caudal ( $q$ ), rendimiento ( $\theta$ ), par mecánico ( $\beta$ ) y potencia ( $\pi$ ) se obtienen como relación entre el valor de la variable y su valor en el BEP.

$$h = \frac{H}{H_o} ; q = \frac{Q}{Q_o} ; \theta = \frac{\eta}{\eta_o} ; \beta = \frac{M}{M_o} ; \pi = \frac{P}{P_o} ; \alpha = \frac{N}{N_o} \quad (5)$$

Tomando estas variables como referencia, las ecuaciones características del sistema de bombeo se expresan de forma adimensional como:

$$h = h_1 \alpha^2 - \alpha^{(2-B)} \cdot a \cdot \left(\frac{q}{n}\right)^B \quad (6)$$

$$h_1 = \frac{H_1}{H_0}; a = \frac{A \cdot Q_0^B}{H_0} \quad (7)$$

$$\theta = e \cdot \frac{q}{\alpha \cdot n} - f \cdot \left(\frac{q}{\alpha \cdot n}\right)^2 \quad (8)$$

$$e = \frac{E}{\eta_0}; f = \frac{F}{\eta_0} \quad (9)$$

El trabajo desarrollado por Coelho y Andrade-Campos (2016) que corrigen la desviación de la curva de la eficiencia real respecto cuando se aplica las leyes de semejanza, relaciona el rendimiento real ( $\eta_2$ ) para una velocidad de giro ( $N_2$ ) con el rendimiento ( $\eta_1$ ) para una velocidad de giro ( $N_1$ ). Dicha formulación queda expresada de la siguiente forma:

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = 1 - \left(1 - \frac{N_2}{N_1}\right)^3 \quad (10)$$

El par mecánico reducido ( $\beta$ ) puede tomar valores superiores a la unidad para ciertos caudales. Por otro lado, en el caso del variador de frecuencia su carga mecánica ( $\beta_v$ ) se define como la relación entre el par en el eje y el par máximo a aplicar:

$$\beta_v = \frac{M}{M_{m\acute{a}x}} \quad (11)$$

Adicionalmente, se puede relacionar el par mecánico de la bomba ( $\beta$ ) y la carga del variador ( $\beta_v$ ), quedando la siguiente expresión:

$$\beta_v = \frac{\beta \cdot M_0}{M_{m\acute{a}x}} = \frac{\beta}{\beta_{max}} \quad (12)$$

En la ecuación (12), el termino ( $\beta_{max}$ ) representa el valor máximo reducido del par en la bomba. Dicho valor corresponde cuando la velocidad de giro sea la nominal ( $\alpha = 1$ ) y el caudal es máximo ( $q = q_{max}$ ). Basándose en la definición del término ( $\beta$ ), se obtiene la siguiente expresión:

$$\beta = \frac{q \cdot h}{\theta} = \frac{h_1 - a \cdot q^B}{e - f \cdot q} \quad (13)$$

De esta manera, la definición del par máximo  $\beta$  queda expresada de la siguiente manera:

$$\beta_{max} = \frac{q_{max} \cdot h}{\theta} = \frac{h_1 - a \cdot q_{max}^B}{e - f \cdot q_{max}} \quad (14)$$

Otro aspecto para considerar en el análisis energético de los sistemas de regulación es la disminución de la eficiencia por el rendimiento del variador de frecuencia. Europump and The Hydraulic Institute (2004) realizó un análisis de rendimiento de los variadores de frecuencia en función de la velocidad de giro. Un ajuste matemático utilizando las variables reducidas que mejores resultados ofrece es.

$$\eta_v = \eta_{v,0} \cdot (\beta_v^{0.0253} - 0.1 \cdot (1 - \alpha)^{2.705}) \quad (15)$$

El termino  $\eta_v$  de la ecuación (15) es el valor actual del rendimiento de variador de frecuencia considerando que tiene una carga ( $\beta_v$ ) y que está girando con una velocidad reducida ( $\alpha$ ). Dicho valor depende del valor máximo del rendimiento del variador de frecuencia ( $\eta_{v,0}$ ), el cual se produce cuando la carga es máxima y gira a su velocidad nominal. Para poder aplicar este rendimiento al rendimiento global del sistema es necesario establecer una relación entre la carga del variador (par en su eje) y el par en el eje de la bomba.

Admitiendo que el variador modifica su rendimiento en función de la carga y la velocidad de giro es posible definir un rendimiento reducido del variador ( $\vartheta_v$ ) mediante la expresión:

$$\theta_v = \left( \frac{\beta}{\beta_{max}} \right)^{0.0253} - 0.1 \cdot (1 - \alpha)^{2.705} \quad (16)$$

En cuanto a la energía consumida por la bomba puede representarse en variables adimensionales como:

$$\pi = \frac{q \cdot h}{\theta} = \beta \cdot \alpha \quad (17)$$

La energía final consumida del sistema ( $\pi_v$ ) y considerando el rendimiento del variador queda expresado así:

$$\pi_v = \frac{q \cdot h}{\theta \cdot \theta_v} \quad (18)$$

Por otro lado, solo queda definir la curva consigna para poder analizar por completo el sistema de regulación. La curva consigna ( $h_c$ ), se define matemáticamente mediante la ecuación:

$$H_c = \Delta H + R \cdot Q^2 \quad (19)$$

En la ecuación (19) los términos ( $\Delta H$  y  $R$ ) son los parámetros característicos de dicha curva. El primero está relacionado con la presión mínima requerida en el sistema y el segundo con las pérdidas de energía. La adimensionalización de la curva anterior conduce a:

$$h_c = \lambda_1 + r \cdot q^2 \quad (20)$$

donde los coeficientes  $\lambda_1$  y  $r$  se definen como:

$$\lambda_1 = \frac{\Delta H}{H_0} ; r = \frac{R \cdot Q_0^2}{H_0} \quad (21)$$

Una vez definido las ecuaciones la forma paramétrica, se procede a calcular la energía del sistema reducida ( $\pi$ ) para cada configuración de bombeo que se va a probar en el sistema de regulación. El número de configuraciones de bombeo a probar estarán definidos por el número  $n$  BVV necesarias a aumentar al número mínimo requerido de BVF y BVV en cada rango de operación del sistema clásico hasta minimizar la energía consumida ( $\pi$ ) en cada rango de caudal.

Los resultados obtenidos, determinarán el número óptimo de BVF y BVV en operación para cada rango de caudal desde ( $0 < q < q_{max}$ ), que es el objetivo final del presenta trabajo.

#### 4. Caso de Estudio

El caso de estudio aplicado a la presente metodología propuesta corresponde a la estación de bombeo PS2 de la red TF, cuyos datos son obtenidos de la tesis doctoral de León-Celi (2018). En el presente estudio en particular, se analizará el sistema de regulación configurado con BVV y BVF en paralelo siguiendo la curva consigna. Los datos de la curva de consigna y caudales de la red se recogen en la Tabla 1.

**Tabla 1: Datos de funcionamiento de la estación de bombeo PS2**

| $\Delta H$ | $R$    | $Q_m$ (l/s) | $Q_{max}$ (l/s) |
|------------|--------|-------------|-----------------|
| 17.95      | 0.0232 | 27.39       | 51.40           |

En el proceso de dimensionado de la estación de bombeo y a partir de una serie de soluciones de distintos modelos de bomba, se ha fijado un modelo de bomba para este caso de estudio en particular. Sus datos característicos se recogen en la Tabla 2.

**Tabla 2: Datos característicos del BEP del modelo de bomba analizado**

|              |           |
|--------------|-----------|
| Caudal $Q_0$ | 24.32 l/s |
|--------------|-----------|

|                      |         |
|----------------------|---------|
| Altura $H_0$         | 78.73 m |
| Rendimiento $\eta_0$ | 63 %    |

La aplicación de la metodología descrita con el modelo de bomba de la tabla 2 conduce a la obtención de los parámetros adimensionales tanto de la bomba como de la curva de consigna (Tabla 3).

**Tabla 3: Parámetros adimensionales de las curvas características de las bombas y de la curva de consigna de la red**

| Curva de la bomba |        | Curva de consigna |        |
|-------------------|--------|-------------------|--------|
| $h_1$             | 1.33   | $\lambda$         | 0.2280 |
| $a$               | 0.33   | $r$               | 0.1743 |
| $e$               | 0.0822 |                   |        |
| $f$               | 0.0017 |                   |        |

El sistema de regulación de la estación de bombeo (PS2) se puede observar en la figura 1, donde previamente se había explicado el funcionamiento de un sistema de regulación clásico. Con el modelo de bomba previamente fijado, el número mínimo de bombas necesario según el sistema clásico es de tres bombas en paralelo (Figura 1). En dicha figura  $q_{b1}$ ,  $q_{b2}$ ,  $q_{b3}$  y  $q_{max}$ , son los límites de cada rango de funcionamiento en el sistema clásico y  $h_{max}$  corresponde a la altura necesaria para suministrar el consumo máximo ( $q_{max}$ ). Los rangos de caudal en el caso concreto del caso de estudio son los que recoge la Tabla 4.

**Tabla 4: Rango de caudales del caso de estudio**

| $q_{b1}$ | $q_{b2}$ | $q_{max}$ | $q_{b3}$ |
|----------|----------|-----------|----------|
| 1.48     | 2.07     | 2.11      | 2.29     |

Como se explicó anteriormente en la metodología del trabajo, para cada rango de funcionamiento en el sistema clásico, se probarán distintas combinaciones de configuraciones con BVV y/o BVF y se calculará la potencia reducida para cada rango de caudal y en cada configuración probada. De esta manera, se obtendrá una gráfica de la potencia reducida consumida ( $\pi$ ) para cada configuración en los distintos rangos en función del caudal reducido ( $q$ ).

En el primer rango ( $0 < q < q_{b1}$ ) solo es posible utilizar BVV para que el sistema siga la curva consigna. De esta forma, se han probado configuraciones empezando con el mínimo número de BVV requerido y en cada prueba se va aumentando el número de BVV hasta asegurarse que no es posible obtener una potencia óptima. Para el segundo rango estudiado ( $q_{b1} < q < q_{b2}$ ), existen dos posibilidades de funcionamiento en el sistema clásico: la primera con (0 BVF-2 BVV) y la segunda con (1 BVF-1 BVV). Al igual que el primer rango en cada prueba se va aumentando el número de BVV hasta no obtener un resultado óptimo de potencia. Finalmente, en el último rango ( $q_{b2} < q < q_{max}$ ), existen tres posibilidades de funcionamiento en relación al sistema clásico: 3 BVV; 2 BVV y 1 BVF; y 1 BVV con 2 BVF. Al igual que en los anteriores rangos en cada prueba se aumenta el número de BVV hasta conseguir el resultado óptimo de energía. En la siguiente tabla, se detalla las distintas pruebas de combinaciones de bombeo para cada rango de estudio.

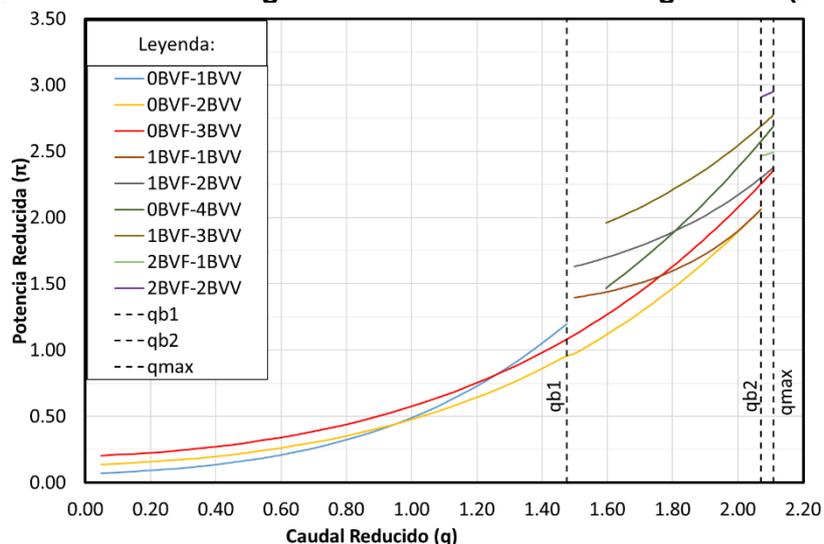
**Tabla 1: Configuraciones de bombeo para cada rango de estudio**

| Caso | Rango de caudales |     |                       |     |                        |     |
|------|-------------------|-----|-----------------------|-----|------------------------|-----|
|      | $0 < q < q_{1b}$  |     | $q_{1b} < q < q_{2b}$ |     | $q_{2b} < q < q_{max}$ |     |
|      | BVF               | BVV | BVF                   | BVV | BVF                    | BVV |
| 1    | 0                 | 1   | 0                     | 2   | 0                      | 3   |
| 2    | 0                 | 2   | 0                     | 3   | 0                      | 4   |
| 3    | 0                 | 3   | 1                     | 1   | 1                      | 2   |
| 4    | -                 | -   | 1                     | 2   | 1                      | 3   |

|   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | - | - | - | - | 2 | 1 |
| 6 | - | - | - | - | 2 | 2 |

En la Figura 2 se puede observar los resultados de las curvas de la potencia consumida para los distintos casos que se han probado en cada rango de caudal. En el primer rango ( $0 < q < q_{1b}$ ), el caso 1 (0 BVF-1 BVV) tiene mejores resultados de potencia consumida al inicio del rango hasta valores de  $q$  alrededor de 0.95. A partir de ese valor, el caso 2 (0 BVF-2 BVV) pasa a ser la combinación óptima hasta el final de este rango.

**Figura 2: Casos de configuración en el sistema de regulación ( $0 < q < q_{max}$ )**

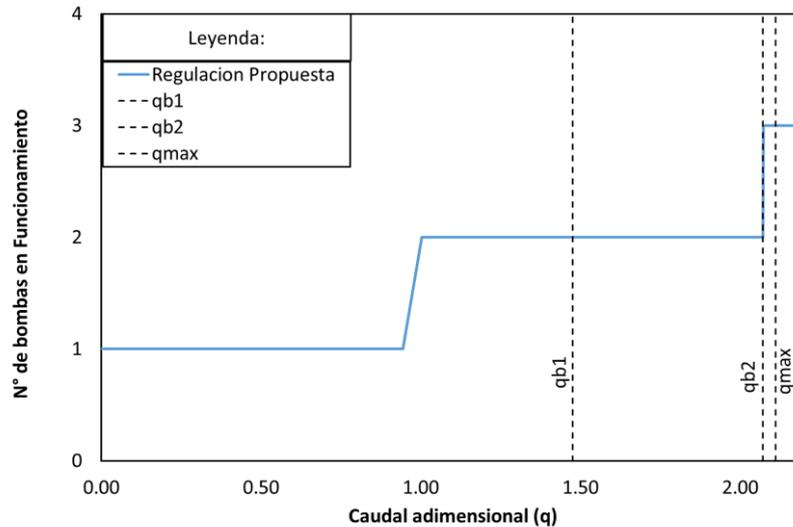


En el segundo rango de caudal ( $q_{1b} < q < q_{2b}$ ), se observa que en la mayoría del rango la mejor combinación es el caso 1 (0 BVF-2 BVV). Sin embargo, al final de este rango la mejor combinación pasa a ser el caso 2 (1 BVF-1 BVV). En esta parte, el caudal de la BVV es similar al caudal de la BVF y por lo tanto sus rendimientos son similares. Sin embargo, en la BVV está afectado adicionalmente por la eficacia del variador de frecuencia, esto hace que su rendimiento global sea inferior al de una BVF. Por tal razón, combinando BVF y BVV da mejores resultados que dos BVV.

En el último rango de estudio ( $q_{2b} < q < q_{max}$ ), el caso 1 (0 BVF- 3 BVV) es la que obtiene mejores resultados en todo el rango. Sin embargo, como se observa en la (figura 2), existe la tendencia que el caso 4 (1 BVF-2 BVV) se acerca cada vez más a la configuración (0 BVF-3 BVV) a medida que aumenta el caudal de consumo. Por lo tanto, podría existir un caudal de consumo de tal manera que sea más conveniente utilizar al menos una BVF.

En definitiva, la utilización de un número de bombas superior al definido por la regulación clásica permite obtener mejores resultados de energía consumida. Es decir, los límites que definen el número de bombas en funcionamiento no vienen definido por los caudales  $q_{ib}$ , sino que es un resultado de la optimización del funcionamiento del sistema. En la Figura 3 se observa la comparación entre la regulación clásica y la regulación propuesta. En el primer caso los límites de funcionamiento de cada bomba se definen por los caudales  $q_{ib}$ . Esto es, funciona una única bomba hasta  $q_{1b}$ , dos bombas hasta  $q_{2b}$  y así sucesivamente hasta alcanzar el caudal máximo  $q_{max}$ . Por el contrario, se representa en la figura el número de bombas que se propone funcionen en el caso de aplicar el modelo de regulación propuesta.

**Figura 3: Número óptimo de bombas con relación al caudal reducido**



## 5. Conclusiones

En el presente estudio, se ha logrado expresar la curva de la bomba, eficiencia y curva consigna en forma adimensional para así analizar el sistema de regulación del caso de estudio y poder determinar su operación óptima (número óptimo de BVF y BVV) en cada rango de caudal. Adicionalmente, se ha podido incluir el rendimiento del variador de frecuencia en BVV, no solo asumiendo un rendimiento constante como normalmente se ha hecho en estudios anteriores, sino también calculando dicho rendimiento en función de la velocidad de giro de BVV. Al aplicar estos conceptos se ha conseguido determinar el grado de influencia del variador de frecuencia en seleccionar la configuración de bombeo más adecuada en los sistemas de regulación.

Cuando el caudal de consumo se acerca a los límites de los rangos de funcionamiento del número de bombas del sistema clásico, el sistema de regulación más adecuado podría ser combinando BVF y BVV. En estos casos en particular, la eficiencia calculada en los variadores de frecuencia en función de la velocidad de giro de las BVV tiene una gran influencia para determinar el tipo de configuración más adecuada que minimice el consumo de energía. La eficiencia de este dispositivo hace que el rendimiento global de una BVV sea menor que una BVF y en consecuencia su consumo energético es mayor que el consumo de una BVF.

En el caso de estudio, el sistema de regulación óptimo difiere con el sistema de regulación clásico, especialmente dentro del primer rango de caudal ( $0-q_{b1}$ ), donde el número óptimo de BVV llega a ser a dos bombas en lugar de solo una como lo establece el sistema clásico. Por lo tanto, el número mínimo de bombas requeridas en el sistema clásico no necesariamente es el óptimo en cuanto al consumo de energía. En resumen, el número óptimo de bombas en funcionamiento no se puede inferir de manera simple como lo establece el sistema de operación clásico, sino que se requiere un análisis en profundidad en el sistema de regulación para determinar el número de bombas más adecuado para que la energía sea la mínima posible. El número de bombas requeridas en el sistema clásico solo pudiere servir como una simple referencia para analizar el

sistema de regulación y así determinar la configuración de bombeo óptima.

En futuras aplicaciones se podría analizar en conjunto el coste operacional, coste de inversión y coste de mantenimiento para seleccionar el sistema de bombeo más adecuado en los sistemas de regulación. Estos costes podrían analizarse de forma anualizada en función del ciclo de vida de la estación de bombeo. Para esto se desarrollaría un algoritmo multiobjetivo que abarque los tres costes en la optimización del sistema de bombeo.

## 6. Referencias

- Abdallah, M. and Kapelan, Z. (2017) "Iterative Extended Lexicographic Goal Programming Method for Fast and Optimal Pump Scheduling in Water Distribution Networks," *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(11). doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000843.
- Abdallah, M. and Kapelan, Z. (2019) "Fast Pump Scheduling Method for Optimum Energy Cost and Water Quality in Water Distribution Networks with Fixed and Variable Speed Pumps," *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(12), p. 04019055. doi: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001123.
- Aranto, N. (2008) *Competitor: Variable speed drivers in pumping Application* (Master Thesis). Lappeenranta University of Technology.
- Coelho, Bernardet;Andrade-Campos, A. (2016) "A new approach for the prediction of speed-adjusted pump efficiency curves," *Journal of Hydraulic Research*, 54, pp. 586–593. doi: 10.1080/00221686.2016.1175521.
- Dijkstra, E. W. (1959) "A note on two problems in connexion with graphs," *Numerische Mathematik In Numerische Mathematik*, pp. 269–271. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01386390>.
- Environmental Protection Agency, (EPA) (2008) *Ensuring a Sustainable Future: An Energy Management Guidebook for Wastewater and Water Utilities*. Washington, DC United States. Available at: <https://www.epa.gov/sustainable-water-infrastructure/water-and-energy-efficiency-utilities-and-home>.
- Europump & the Hydraulic Institute (2004) *Variable Speed Pumping: Elsevier, Variable Speed Pumping: A Guide to Successful Applications*. Elsevier.
- Fuertes, V. et al. (2009) "Regulación de los sistemas hidráulicos," *Ingeniería Hidráulica Aplicada a los sistemas de distribución de agua*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Giacomello, C., Kapelan, Z. and Nicolini, M. (2012) "Fast Hybrid Optimization Method for Effective Pump Scheduling," *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(2), pp. 175–183. doi: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000239.
- Hashemi, S. S., Tabesh, M. and Ataeeikia, B. (2014) "Ant-colony optimization of pumping schedule to minimize the energy cost using variable-speed pumps in water distribution networks," *Urban Water Journal*, pp. 335–347. doi: 10.1080/1573062X.2013.795233.
- Jowitt, Paul;Germanopoulos, G. (1992) "Optimal Pump Scheduling in Water-Supply Networks," *Journal of Water Resources Planning and Management*, 118(4), pp. 406–422.
- Lamaddalena, N. and Khila, S. (2013) "Efficiency-driven pumping station regulation in on-demand irrigation systems," *Irrigation Science*, 31(3), pp. 395–410. doi: 10.1007/s00271-011-0314-0.
- Leiby, V. M. and Burke, M. E. (2011) *Energy Efficiency Best Practices for North American Drinking Water Utilities*. Denver: Water Research Foundation.
- León-Celi, C. et al. (2016) "A methodology for the optimization of flow rate injection to looped water distribution networks through multiple pumping stations," *Water (Switzerland)*, 8(12). doi: 10.3390/w8120575.
- León-Celi, C. (2018) *Optimisation of both energy use and pumping costs in water*

- distribution networks with several water sources using the setpoint curve* (Doctoral Thesis). Universidad Politécnica de Valencia. doi: 10.4995/Thesis/10251/107956.
- León-Celi, C. F. *et al.* (2018) "Operation of Multiple Pumped-Water Sources with No Storage," *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(9), p. 04018050. doi: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000971.
- Lingireddy, S.; Wood, J. (1998) "Improved operation of water distribution systems using variable-speed pumps," *Journal of Energy Engineering*, 124(3), pp. 90–103.
- López-Ibáñez, M., Prasad, T. D. and Paechter, B. (2008) "Ant Colony Optimization for Optimal Control of Pumps in Water Distribution Networks," *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(4), pp. 337–346. doi: 10.1061/(asce)0733-9496(2008)134:4(337).
- Martínez-Solano, F. J. *et al.* (2014) "Using the set point concept to allow water distribution system skeletonization preserving water quality constraints," *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., 89, pp. 213–219. doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.179.
- McCormick, G. and Powell, R. S. (2003) "Optimal Pump Scheduling in Water Supply Systems with Maximum Demand Charges," *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(5), pp. 372–379. doi: 10.1061/(asce)0733-9496(2003)129:5(372).
- Pasha, M. F. . and Lansey, K. (2009) "Optimal Pump Scheduling by linear programming," *World Environmental and Water Resources*, pp. 1–10. doi: 10.1061/41036.
- Price, E. and Ostfeld, A. (2013) "Iterative linearization scheme for convex nonlinear equations: Application to optimal operation of water distribution systems," *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(3), pp. 299–312. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000275.
- Sakarya, A. B. A. and Mays, L. W. (2000) "Optimal Operation Of Water Distribution Pumps Considering Water Quality," *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126(August), pp. 210–220. doi: 10.1061 (ASCE) 290733-9496.
- Sarbu, Ioan; Borza, I. (1998) "Energetic Optimization Of Water Pumping in Distribution Sytems," *Periodica Polytechnica Mec. Eng.*, 42(2), pp. 141–152.
- Simpson, A. R. and Marchi, A. (2013) "Evaluating the Approximation of the Affinity Laws and Improving the Efficiency Estimate for Variable Speed Pumps," *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(12), pp. 1314–1317. doi: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000776.
- Stokes, C. S., Simpson, A. R. and Maier, H. R. (2014) "The cost–greenhouse gas emission nexus for water distribution systems including the consideration of energy generating infrastructure: an integrated conceptual optimization framework and review of literature," *Earth Perspectives*, 1(1), p. 9. doi: 10.1186/2194-6434-1-9.
- Walski, T. and Creaco, E. (2016) "Selection of Pumping Configuration for Closed Water Distribution Systems," *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(6), p. 04016009. doi: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000635.
- Walski, T., Hartell, W. and Wu, Z. (2010) "Developing system head curves for closed systems," *Journal / American Water Works Association*, 102(9), pp. 84–89. doi: 10.1002/j.1551-8833.2010.tb10189.x.

