

02-018

METHODOLOGY FOR PROJECTS OF PUMPING STATIONS DIRECTLY CONNECTED TO THE NETWORK CONSIDERING THE OPERATION STRATEGY

Arango Gil, Francisco Antonio⁽¹⁾; Iglesias-Rey, Pedro L.⁽¹⁾; Martínez-Solano, F. Javier⁽¹⁾; Lozano Cortes, Jessica Vanessa⁽¹⁾; Mora-Meliá, Daniel⁽²⁾

⁽¹⁾Universitat Politècnica de València, ⁽²⁾Universidad de Talca

Classic projects of pumping stations are made considering as a starting point the maximum flow to be supplied and the necessary pressure head. Based on these parameters, the pumps are selected and, subsequently, depending on the expected demand variation, the most appropriate operation mode is determined.

This paper proposes an alternative methodology where the pumping groups selection process includes, before selecting the equipment, an estimate of the operation cost based on the study of different operation modes of the pumps. The method involves a multicriteria selection in which the investment costs (pumping equipment, hydraulic installations, electrical and control equipment) and operating costs are considered. These operating costs consider the different ways of operating the system (fixed speed pumps, variable speed pumps or a combination of both). The proposed method is applied to several actual pumping stations where water demands and pressure requirements are known. The results are presented using a Pareto diagram in which all the possible solutions and all the potential operation modes are illustrated.

Keywords: Pumping station; project; operation

METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE ESTACIONES DE BOMBEO DIRECTO A LA RED CONSIDERANDO LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN

Los proyectos clásicos de estaciones de bombeo se realizan tomando como punto de partida el caudal máximo que tiene suministrar y la altura necesaria. En base a estos parámetros se seleccionan las bombas y posteriormente en función del consumo previsto se determina el modo de operación más adecuado.

En este trabajo se propone una metodología alternativa en el que el proceso de selección de los grupos de bombeo incluye, antes de seleccionar los equipos, una estimación del coste de explotación basándose en el estudio de diferentes modos de regulación y operación de las bombas. Se realiza así una selección multicriterio en la que se consideran por una parte los costes de inversión (equipos de bombeo, instalaciones hidráulicas, equipamiento eléctrico y de control) y por otra los costes de explotación. Estos costes de explotación consideran las diferentes formas de operar el sistema (bombas de velocidad fija, bombas de velocidad variable o combinación de ambas). El método propuesto se aplica a varias estaciones de bombeo reales de las que se conocen las demandas de agua y los requerimientos de presión. El resultado presenta un diagrama de Pareto en que se ilustran todas las posibles soluciones y todos los potenciales modos de regulación.

Palabras clave: Estación de bombeo; proyecto; regulación

Correspondencia: Pedro L. Iglesias Rey (piglesia@upv.es)



©2018 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/>).

1. Introducción

El cambio climático junto con un crecimiento exponencial de demanda de agua hace que se prevea que para el año 2030 haya un desabastecimiento de un 40% de la población mundial (Leese & Meisch, 2015). Sumado a esto, se estima que para el 2030 habrá un crecimiento del 60% del consumo de energía (Castells, 2012). Estos eventos no solo se evidencian en áreas urbanas sino también en agrícolas, haciendo que el agua y la energía se conviertan en bienes escasos, de los que resulta cada vez más importante hacer un buen aprovechamiento.

Poder reducir los costos de operación e inversión en todas y cada una de las actividades que requiere desempeñar el ser humano es cada vez más relevante. Entre estas destacan los sistemas de abastecimiento de agua, fundamentalmente debido a la gran importancia que estos sistemas tienen en las labores diarias del ser humano. En este campo resulta indispensable comprender la importancia que tiene el diseño de las estaciones de bombeo, ya que un mal diseño puede conllevar mayores costos de inversión y operación.

Un equipo de bombeo con un rendimiento bajo requiere una mayor potencia, puesto que son inversamente proporcionales y como resultado genera un consumo energético superior al necesario. Una misma estación de bombeo puede dimensionarse con diferente número de bombas. Un mayor número de bombas por lo general genera un aumento de la eficiencia de la estación de bombeo, pero al mismo tiempo supone un mayor coste de inversión. En base a estos requerimientos, se evidencia la necesidad de poder encontrar un equilibrio entre los costos de operación e inversión que ayude encontrar la opción óptima para una cierta estación de bombeo.

Generalmente, para el diseño de una estación de bombeo se consideran únicamente parámetros como el caudal máximo y la altura de bombeo necesaria para garantizar la presión mínima en el punto más desfavorable de la red. Establecidos estos parámetros se escoge el número de bombas necesarias (que en muchas ocasiones solo resulta ser una) acorde al rendimiento máximo que proporcione cada una de estas. El problema que genera este tipo de metodología es sobredimensionamiento de las estaciones de bombeo. Este sobredimensionamiento genera problemas en la posterior regulación del funcionamiento de las bombas, que pierden eficacia al tener que operar en zonas muy alejadas de aquellas en las que fueron dimensionadas. Esto supone un incremento notable de los costes de explotación por el hecho de no haber considerado la regulación durante el proyecto de dimensionado de la estación de bombeo.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología alternativa para el dimensionado de estaciones de bombeo en sistemas de distribución de agua (SDA). Esta metodología pretende considerar los costes asociados a la regulación de la estación de bombeo durante el proceso de dimensionado. Para ello se adoptan como punto de partida dos elementos diferentes. El primero es la curva de consigna, que determina la energía mínima requerida para poder satisfacer las necesidades hidráulicas en el punto más desfavorable de un SDA. El segundo es la curva de modulación, que representa la variación a lo largo del tiempo del caudal que debe suministrar la estación de bombeo.

A partir de estos dos conceptos la metodología propuesta considerará las características hidráulicas de los diferentes modelos de bombas que se piensan evaluar; las tarifas eléctricas existentes; y los diferentes modos de regulación de la estación de bombeo. El método se basa en el desarrollo de toda una serie de funciones de coste que valoran económicamente cada una de las opciones. Posteriormente se determinan los modelos que pueden ser válidos y los diferentes modos de regulación que pueden aplicarse en cada caso. Finalmente, el modo de decisión se convierte en una selección multiobjetivo que

contrasta el número de bombas, el costo de inversión y el costo de explotación. La metodología elabora finalmente la frontera de Pareto entre los costes de inversión y de explotación para cada uno de los modos de regulación que se consideren.

Finalmente, como aplicación de la metodología, ésta es aplicada al caso de la red de distribución de agua (RDA) de una población de aproximadamente 30 000 habitantes, la denominada red TF (León-Celi, Iglesias-Rey, Martínez-Solano, & Mora-Melia, 2016).

2. Metodología

La metodología propuesta consiste en la estimación global de costes de inversión y explotación que pueda incurrir una estación de bombeo. Para poder obtener los costos finales, es necesario realizar una selección multicriterio de todas las posibles soluciones que satisfagan las necesidades hidráulicas de la red en estudio.

La metodología planteada (ver Figura 1) toma como hipótesis de partida disponer de varios elementos básicos de partida: la curva de consigna; la curva de modulación; una base de datos con los parámetros característicos de las curvas candidatas a ser seleccionadas en el proyecto de la estación de bombeo; un diseño básico de la estación de bombeo parametrizado; y las tarifas eléctricas.

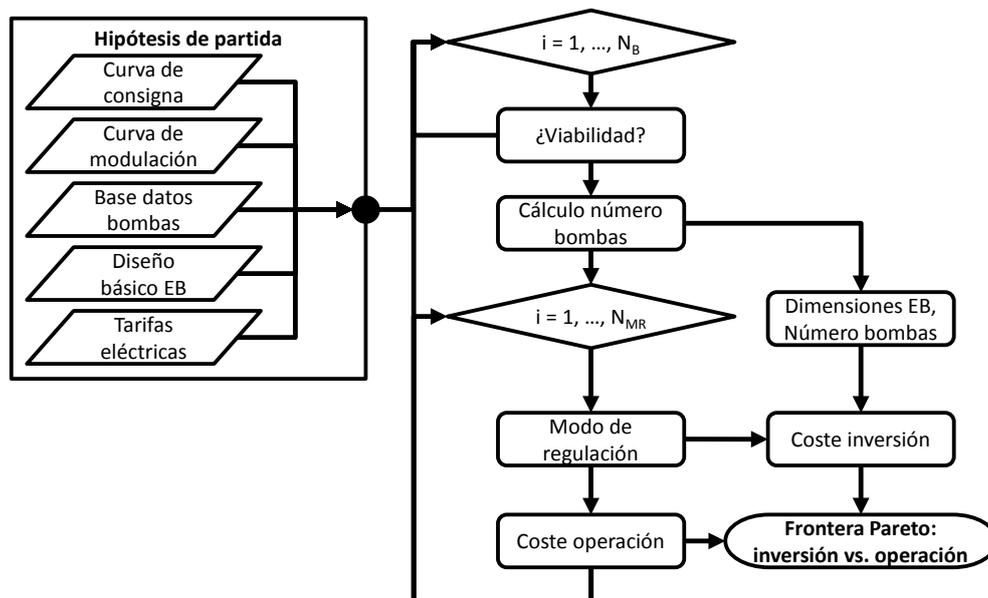


Figura 1. Esquema tipo del equipo de bombeo

Una vez establecidas las hipótesis de partida se procede a realizar un análisis de cada uno de los modelos de bomba definidos en la base de datos. Se comienza analizando si el modelo es viable. Caso de no ser viable el modelo se continúa con el siguiente. En caso de ser viable el modelo, se obtiene el número de bombas y junto con el diseño parametrizado de la estación de bombeo se obtiene parte del coste de inversión en base a una serie de funciones de coste.

A continuación con cada modelo de bomba válido se analizan los diferentes modos de regulación. Cada uno de estos modos de operación conduce a definir el coste de operación de la solución considerada. Al mismo tiempo, cada modo de regulación tiene asociados unos costos. Por ello, una vez considerado el modo de operación quedan completados los costes de inversión asociados.

La fase final analiza cada una de las soluciones (modelo de bomba) y modos de operación.

Este análisis permite establecer la frontera de Pareto que compara costes de inversión y de explotación. No obstante, a fin de analizar adecuadamente las soluciones estas fronteras se analizan para cada modo de regulación de la estación de bombeo. En los próximos apartados se describen los pasos definidos en el esquema de la Figura 1.

2.1. Hipótesis de trabajo

2.1.1. Curva de consigna

La curva de consigna resulta de seguir la altura piezométrica mínima necesaria en el punto de abastecimiento más desfavorable de la red, para cada uno de los caudales demandados (Pimentel Gomes, Pérez Garcia, & Iglesias Rey, 2007). Poder seguir esta curva lleva unas implicaciones no solo de carácter hidráulico, sino energético. Al proporcionar la altura piezométrica mínima necesaria se garantiza una potencia mínima para cada instante de la red, resultando per se, la forma de regulación que nos incurre a un menor consumo de energía. Poder establecer la curva de consigna resulta importante para determinar la intersección entre esta y la curva motriz. Este punto proporciona el caudal y la altura piezométrica para la cual debe iniciar la puesta en marcha, o el apagado de cada una de las bombas que pudiese haber.

La metodología de cálculo de la curva de consigna puede seguirse en León-Celi et al. (2016). Sin embargo, a fin poder representarla matemáticamente se ha formulado dicha curva mediante a expresión:

$$H = DH + RQ^2 \quad (1)$$

donde, H corresponde a la altura mínima de la curva de consigna, DH es un término adoptado como constante, R es una constante que representa el comportamiento del termino cuadrático y Q el caudal suministrado por la estación de bombeo.

La consideración del concepto de curva de consigna supone asumir que la estación de bombeo a diseñar suministra directamente agua a la red. Esto supone que el caudal demandado por la estación de bombeo es prácticamente independiente de la altura. Al mismo tiempo, cualquier aumento en la altura supone un aumento en la presión en los diferentes nudos de la red.

2.1.2. Curva de modulación

La curva de modulación se obtiene de la curva de demanda, donde el caudal medio multiplicado por cada uno de los patrones de consumo nos da como resultado el caudal que debe suministrar el equipo de bombeo para cada instante de tiempo. Estos datos se utilizan para calcular la altura piezométrica proporcionada por el equipo de bombeo y a su vez la potencia consumida.

2.1.3. Tarifas eléctricas

Para poder calcular el costo de operación es necesario obtener la potencia consumida por el equipo de bombeo (hallada previamente por la curva de modulación) y la tarifa eléctrica para esa hora definida. El producto de estas dos variables da como resultado el costo de operación. Las tarifas eléctricas contemplan discriminación horaria variable a lo largo del día, de forma que las tarifas puedan cambiar. No obstante, para el análisis realizado se contemplará únicamente el coste de la energía y no el coste asociado a la potencia contratada. Para poder calcular el costo de operación es necesario obtener la potencia consumida por el equipo de bombeo (hallada previamente por la curva de modulación) y la tarifa eléctrica para esa hora definida. El producto de estas dos variables da como resultado el costo de operación.

2.1.4. Base de datos de bombas

El equipo de bombeo estará compuesto por unos modelos de bombas previamente definidos: Por ello es seleccionar una base de datos de bombas, que serán las candidatas a formar parte de la solución final. Esta base de datos debiera ser tan amplia como fuese posible. El método requiere caracterizar hidráulicamente cada uno de los modelos considerados en la base de datos. Los parámetros que tienen mayor importancia a la hora de caracterizar cada bomba son la curva motriz de alturas, la curva de rendimiento y el rango de caudal en el que debe funcionar el equipo.

Los datos proporcionados por parte del fabricante permiten poder calcular si el modelo de bomba satisface o no las necesidades hidráulicas de la red. Además, las diferentes curvas permiten evaluar la potencia consumida para cada instante de funcionamiento del equipo de bombeo. Con estos datos se calcula el precio aproximado del equipo de bombeo y la energía consumida.

2.1.5. Diseño básico de la estación de bombeo

Un aspecto fundamental de la metodología desarrollada es la definición de un esquema tipo de la estación de bombeo (EB) que se está proyectando. La idea es definir una EB paramétrica en la que a partir del modelo de bomba queden definidos el resto de parámetros del proyecto.

El esquema (ver Figura 2) representa a todas las bombas trabajando en paralelo. El sistema dispone de dos válvulas de seccionamiento principales a la entrada y la salida de la EB. Asimismo, cada bomba dispone de sendas válvulas de seccionamiento y una válvula de retención. Las dimensiones $n1$, $n2$ y $n3$ se parametrizan en función de las características de la EB, de forma que una vez seleccionado el modelo de bomba quedan determinados distancias como la distancia entre bombas, la longitud de cada línea de bombeo y la distancia de toma y descarga del equipo de bombeo respectivamente.

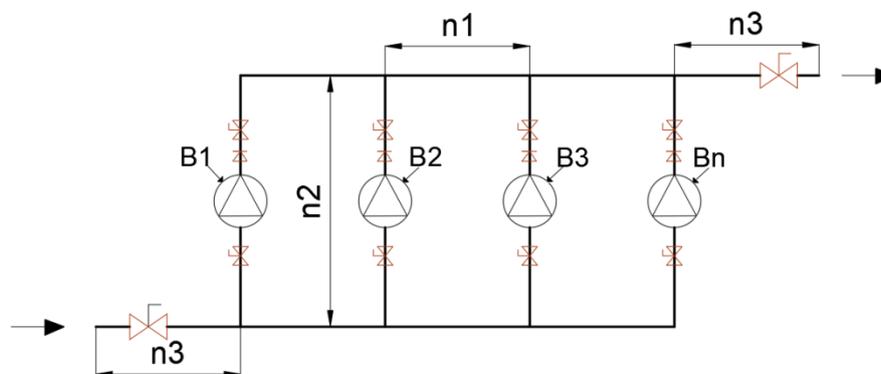


Figura 2. Esquema tipo del equipo de bombeo

2.2. Estimación de costes de inversión

La base metodológica del método propuesto se basa en la estimación de costes. Esta estimación de costes es posiblemente una de las partes fundamentales del trabajo presentado. De hecho, la adopción de un valor u otros es determinante al momento de descartar una posible solución frente a otra. Por todo ello, es necesario poder determinar de forma más aproximada el valor real de los elementos más importantes que componen un sistema de bombeo. Los costos contemplados en el presente trabajo corresponden a los siguientes elementos:

- Equipo de bombeo. Este coste se obtiene directamente de la base de datos y representa

el coste de adquisición e instalación de la bomba.

- Válvulas de seccionamiento y retención. Este coste se obtiene a partir del diseño parametrizado de la estación de bombeo definido en el apartado anterior. Una vez definido el modelo de bomba y sus dimensiones queda definido el tamaño de la EB, los diámetros de las tuberías y las válvulas a instalar.
- Tuberías y a
- ccesorios (codos, tes, ...). Otra consecuencia del diseño parametrizado de la EB son las conducciones y elementos accesorios que es necesario instalar. Estos elementos representan un coste significativo de la EB que se ha considerado en los costes de inversión en esta metodología.

Los costes de inversión anteriores quedan completamente definidos una vez seleccionado el modelo y número de bombas. Sin embargo, hay una serie de costes de inversión que están asociados al modo de regulación seleccionado para la estación de bombeo. Estos costes de inversión corresponden a los siguientes elementos:

- Variadores de velocidad. Son necesarios únicamente en el caso de que se desee emplear bombas de velocidad variable.
- Presostatos, transductores de presión y caudalímetros. Necesarios dependiendo del tipo de magnitud que es necesario medir durante el modo de regulación
- Equipo de regulación. Existen modos de regulación simples que no requieren apenas coste. Tal es el caso de la regulación de bombas de velocidad fija que arrancan y paran mediante presostatos. Por el contrario, otros modos de regulación con bombas de velocidad variables y medición de caudal, requieren de la instalación de algún tipo de elemento de regulación (sistema SCADA, PLC, ...).

Con el objetivo de estimar los costos de inversión se toman los precios del mercado de cada una de las variables que lo componen. Con estos valores por medio de una regresión se calculan las funciones de costos capaces de representar de forma más aproximada los valores reales.

2.3. Costes de operación

El único coste de operación previsto es la energía utilizada por el equipo de bombeo durante un tiempo definido, el cual depende no solo del número de bombas, sino en mayor medida del tipo de regulación. El costo definitivo será la sumatoria del producto entre la potencia consumida por el equipo de bombeo y el costo de la energía (ecuación 2).

$$\sum_{t=1}^{24} P(kW) * C(€/kW) \quad (2)$$

donde, P corresponde a la potencia consumida en kW, C es el costo de energía en un periodo determinado en €/kWh y t es el periodo de tiempo en horas.

En este capítulo se exponen los diferentes métodos de regulación que evalúan los distintos números y modelos de bombas que cumplan los requerimientos hidráulicos mínimos necesarios (Fuentes et al., 2002).

- *Bombas de velocidad fija (BVF) sin regulación.* En el primer método a evaluar se deja que las bombas que cumplan las condiciones hidráulicas demandadas por la red estén en funcionamiento constante. Es decir, sin importar los requerimientos de esta, las bombas necesarias para satisfacer el punto más crítico (hora de mayor demanda) estarán siempre en funcionamiento. Esto se hace con el objetivo de calcular el costo que puede tener un sistema de bombeo sin regulación alguna.

- *Bombas de velocidad fija con regulación manométrica (BVF M)*. Un sistema con regulación manométrica funciona de forma tal que cuando la curva motriz se ve superada por la curva de consigna, se enviara una señal de arranque a una nueva bomba, así cada vez, hasta que se llegue al número máximo de bombas que dispone la EB. De igual forma, cuando la demanda de la red disminuye y el punto de funcionamiento sobre la curva de consigna se encuentra por debajo de la curva motriz, se mandará una señal para apagar una unidad de bombeo. Todas estas señales de encendido y apagado se envían cuando las presiones sobre la red, establecidas previamente, superan o son inferiores a los datos encargados de activar la señal. A fin de evitar falsas señales en la medición de la presión en la red por parte de los presostatos, se aconseja que los umbrales de presión establecidos en el dispositivo deben estar desfasados entre si un mínimo de 0.3-0.5 bar.
- *Bombas de velocidad fija con regulación caudalimétrica (BVF Q)*. La regulación mediante el uso de la medición caudalimétrica funciona de forma similar a la manométrica. En este caso las curvas de las bombas y la curva de consigna definen los caudales a partir de los cuales se genera al arranque o la parada de los grupos de bombeo.
- *Bombas de velocidad variable con regulación manométrica (BVV M)*. Para este método de regulación se trabajará con una presión fija establecida en todo momento y que garantice la presión mínima en todos los puntos de la red. A partir de la presión de trabajo en cada momento se ajusta la velocidad de giro a fin de garantizar la presión previamente fijada.
- *Bombas de velocidad variable con regulación caudalimétrica (BVV Q)*. En este apartado las bombas funcionan con variadores de frecuencia que disminuyen la velocidad de giro de las mismas con el objetivo de seguir la curva de consigna, consiguiendo de esta manera disminuir al mínimo la potencia requerida para satisfacer las necesidades de la red para todo rango de caudales.
- *Combinación de bombas de velocidad variable y fija con regulación manométrica (BVF + BVV M)*. El método de regulación consiste en el uso de bombas de velocidad fijas y bombas de velocidad variable, teniendo como elemento de medición un transductor de presión, cuya función es medir en todo momento la presión de la red y así poder determinar tanto el número de bombas encendidas, como la velocidad de giro del variador de frecuencia.
- *Combinación de bombas de velocidad variable y fija con regulación caudalimétrica (BVF + BVV Q)*. La regulación para este método se lleva a cabo haciendo uso de un caudalímetro, el cual mediante la lectura del caudal demandado por la red, envía una señal de arranque o paro a la unidad de bombeo que lo requiera. El modo de regulación se basa en ajustar la curva de consigna en todo momento. Como primera opción, al igual que la opción de regulación anterior, se encenderán todas las bombas de velocidad variable, hasta agotarlas y comenzar así a arrancar las bombas de velocidad fija, de esta manera se garantiza una mayor eficiencia de regulación.

2.4. Cálculo y análisis de soluciones viables

Obtenidos los datos del apartado 2.1. (datos iniciales de la red y características de las bombas), se realiza un cálculo para determinar cuáles modelos de bombas pueden satisfacer los requerimientos de la red. Una vez obtenidas las posibles soluciones, se evalúan para cada uno de los métodos de regulación descritos.

Con todas las posibles soluciones obtenidas se hace necesario aplicar un método capaz de seleccionar una solución por encima de otra. Para poder realizar esto, se aplica el concepto de frontera de Pareto. La frontera de Pareto está conformada por óptimos de Pareto,

quienes representan las soluciones no dominadas, descartando así las soluciones dominadas. Para poder representar de forma más explícita el concepto de frontera de Pareto ver la figura 2.

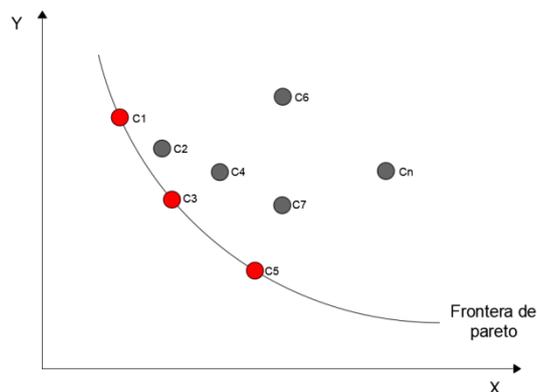


Figura 3. Representación frontera de Pareto

Una vez se tienen los datos de los costos de inversión versus los costos de operación representados gráficamente, mediante el uso de una ecuación de selección objetiva, se determinan los óptimos de Pareto, donde los datos representados en la gráfica 1. C1, C2 y C3 conformarían la frontera de Pareto, pues ninguno de los otros datos resulta siendo una solución dominadora (Pareto, 1906).

3. Caso de estudio

Como ejemplo de la metodología prevista se plantea el caso de la red TF (ver figura 3). Corresponde a la red de una ciudad española que cuenta con 30.000 habitantes cuya fuente de suministro viene de cuatro puntos diferentes (N16, N17, N18 y P0) (León-Celi et al, 2016) Para cada una de las fuentes se encontrarán por medio de la metodología propuesta, las distintas soluciones óptimas de modelos de bombas y tipos de regulación.

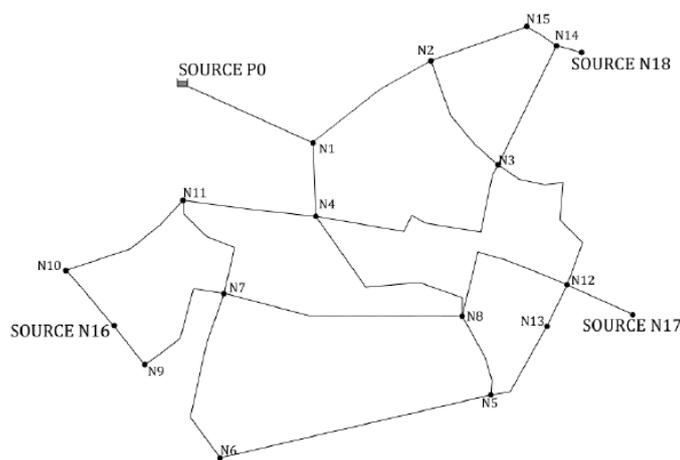


Figura 4. Red TF (Fuente: León-Celi et al. 2016)

3.1. Estimación de costes de inversión mediante curvas de coste

Con el fin de poder determinar el costo aproximado de la implementación de una estación de bombeo, se buscaron los precios del mercado de cada una de las variables más determinantes que la componen, obteniendo de estas, la ecuación que mejor ajusta dicha variación.

Curva de costo bombas

Las bombas seleccionadas para poder desarrollar este trabajo fueron de un catálogo comercial de un fabricante de bombas normalizadas. Para este apartado se definieron dos curvas de costes distintas según el rendimiento que ofrezca cada modelo de bomba en su punto más óptimo (Qopt – Hopt). Así las bombas con rendimientos superiores al 65% se caracterizan mediante la ecuación:

$$F(\text{€}), \eta > 0.65 = 203.14 * (QH)^{0.6115} \quad (3)$$

Por el contrario, las bombas con rendimientos inferiores al 65% se caracterizan mediante

$$F(\text{€}), \eta > 0.65 = 142.88 * (QH)^{0.5437} \quad (4)$$

En ambas ecuaciones H(mca) y Q(l/s) representan respectivamente la altura y el caudal en el punto óptimo de funcionamiento de la bomba. El ajuste de ambas curvas tiene un coeficiente de regresión cercano a 0,96.

3.1.1. Curva de costos variadores de frecuencia

La curva de costos de los variadores de frecuencia se determinó en base a los precios de un fabricante. Esta curva es dependiente exclusivamente de la potencia proporcionado por el mismo, siendo su expresión.

$$F(\text{€}) = 168.19 + 116.08 * P - 0.6033 * P^2 \quad (5)$$

donde P(kW) corresponde la potencia máxima de trabajo del variador . La curva de costes tiene en este caso un coeficiente de regresión del 0,99.

3.1.2. Curva de costos válvulas

Las curvas de costo de las válvulas de seccionamiento y retención se han ajustado a una ecuación polinómica de segundo grado según precios aproximados del mercado, teniendo como termino independiente el diámetro nominal (D_n) de la válvula.

$$F_{\text{válvula secc.}}(\text{€}) = 11.818 + 1.5268 * D_n + 0.0103 * D_n^2 \quad (6)$$

$$F_{\text{válvula ret.}}(\text{€}) = 14.551 + 0.2485 * D_n + 0.0057 * D_n^2 \quad (7)$$

Los coeficientes de represión de las ecuaciones 6 y 7 son prácticamente la unidad, lo que muestra la idoneidad del ajuste.

3.1.3. Curva de costos de accesorios

En este apartado se tendrán en cuenta los accesorios básicos que componen una estación de bombeo como lo son los codos, tés y la propia tubería.

$$F_{\text{tee}}(\text{€}) = 144.24 - 1.7447 * D_n + 0.0125 * D_n^2 \quad (8)$$

$$F_{\text{codo}}(\text{€}) = 269.49 - 4.2252 * D_n + 0.0202 * D_n^2 \quad (9)$$

$$F_{\text{tubería}}(\text{€}) = 8.009 - 0.1497 * D_n + 0.0004 * D_n^2 \quad (10)$$

Donde D_n es el diámetro nominal de los accesorios en milímetros. La Ecuación 8, 9 y 10

tienen un coeficiente de determinación de 0.9718, 0.9810 y 0.9975, respectivamente. La selección del diámetro se realiza en base a considerar que cada bomba trasiega aproximadamente el caudal óptimo y que se selecciona una velocidad de diseño en torno a 2 m/s.

3.1.4. Curva de costos de elementos de medición

Los costos que se prevén en elementos de medición son de caudalímetros, presostatos y transductores de presión. La curva de costes de los caudalímetros es:

$$F_{caudalimetro}(\text{€}) = 716.64 - 7.9118 * D_n + 0.0509 * D_n^2 \quad (11)$$

donde D_n es el diámetro nominal del caudalímetro en milímetros. La Ecuación 11 tiene un coeficiente de determinación de 0.9878. El precio del mercado de un presostato promedio en el mercado es de 84.71 € y el de un transductor de presión aproximadamente de 570.00 €. Estos elementos presentan amplios rangos de operación por lo que no fue necesario calcular sus correspondientes funciones de coste.

3.2. Costos de operación

Una vez definidos todos los costes de inversión a evaluar en este trabajo, se prosigue a determinar el coste de operación considerando el comportamiento tip de la red basado en la simulación durante un día. Los datos de entrada de la red son la curva d modulación de cada EB (Figura 5) y la evolución de las tarifas eléctricas (Figura 6). Asimismo, en la Tabla 1 se recoge el ajuste de las curvas de consigna de cada una de las EB, mientras que en la tabla 2 se recogen los parámetros de diseño de la EB.

Figura 5. Curvas de modulación fuentes de suministro

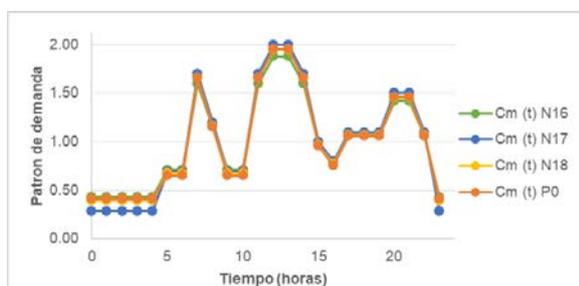


Figura 6. Tarifas eléctricas

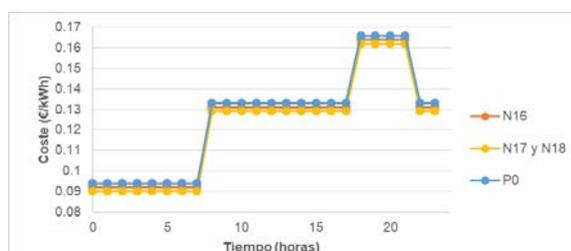


Tabla 1. Curvas de consigna (ver ecuación 1)

	Curvas de consigna			
	N16	N17	N18	P0
DH	17.95	25.64	28.18	31.55
R	0.0232	0.0332	0.0405	0.0111

Tabla 2. Parámetros de diseño

	N16	N17	N18	P0
V max (m/s)	2	2	2	2
n1	20	15	20	20
n2	60	60	60	60
n3	15	10	15	10

3.3. Análisis de resultados

Una vez definidas las funciones de coste de los apartados anteriores se analiza el coste de inversión y el coste de operación de cada uno de los modelos de bomba considerados. Para

analizar las soluciones del problema se construye en las gráficas siguientes (Figura 7, 8, 9 y 10) la frontera de Pareto de cada una de las fuentes de suministro del ejemplo considerado. En cada fuente se representa un frente de Pareto para cada uno de los distintos tipos de regulación evaluados.

Figura 7. Frontera de Pareto fuente N16

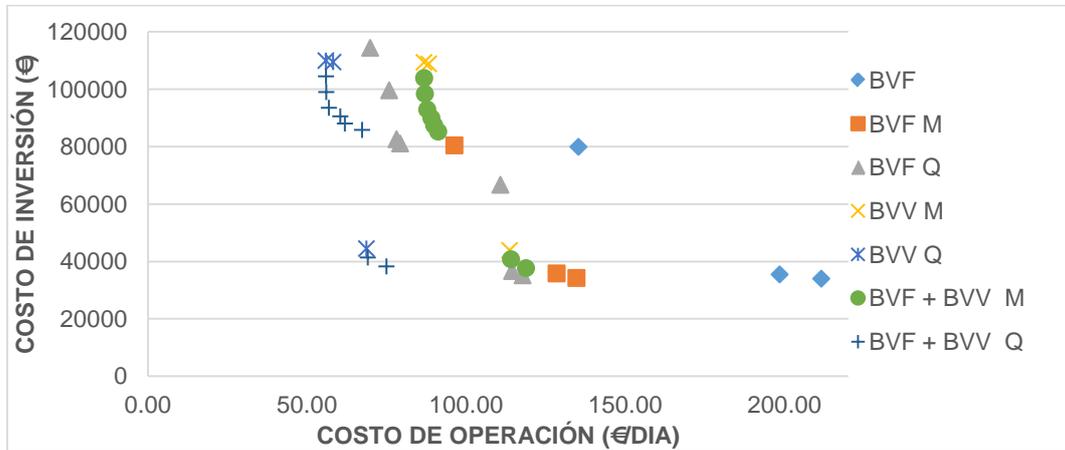


Figura 8. Frontera de Pareto fuente N17

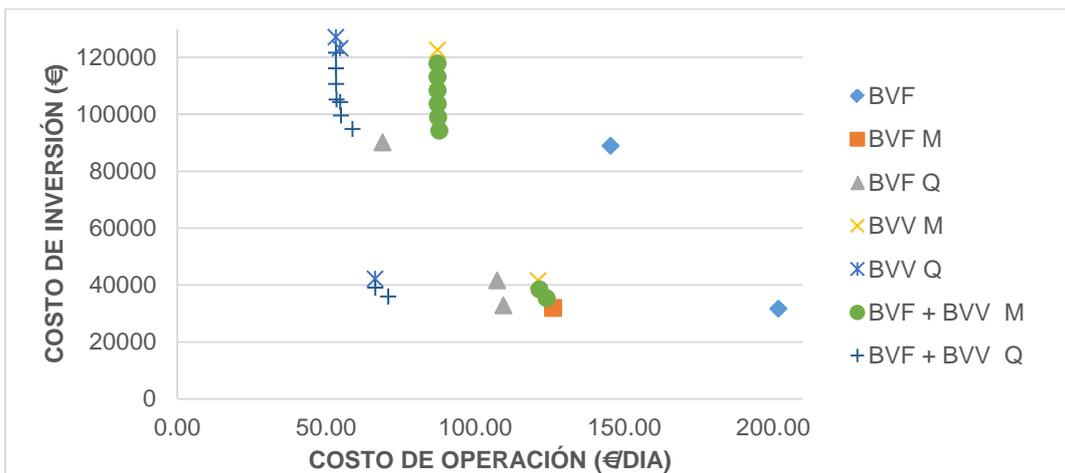


Figura 9. Frontera de Pareto fuente N18

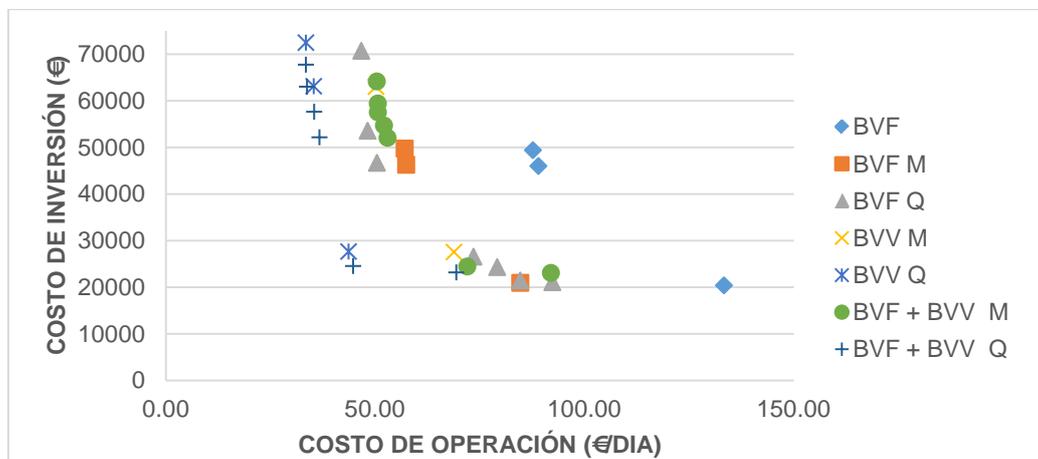
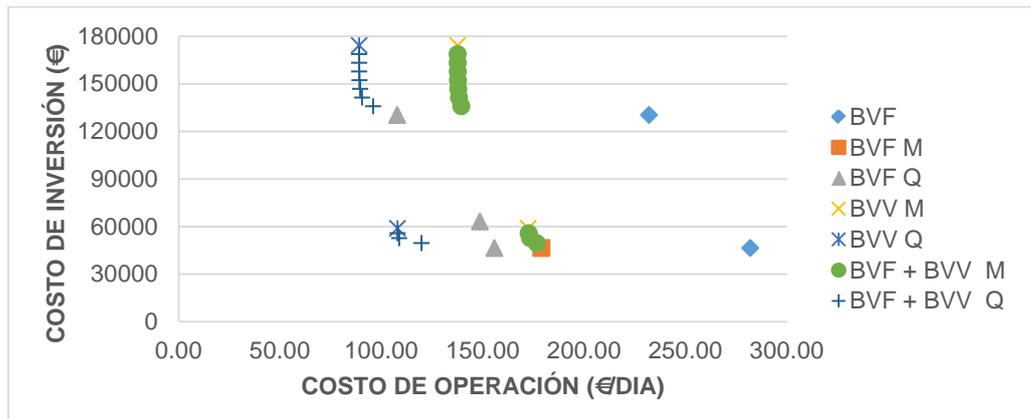


Figura 10. Frontera de Pareto fuente P0



En la tabla 5 se observan todas las posibles soluciones de las combinaciones entre modelos de bombas y métodos de regulación, además del resultado de las soluciones óptimas, es decir, las soluciones dominadas y las soluciones dominadoras.

Tabla 3. Resultados de las soluciones

	N16	N17	N18	P0
Soluciones posibles	153	65	115	65
Soluciones óptimas	35	28	34	30

Los resultados obtenidos muestran unas tendencias claras. Los métodos basados en bombas de velocidad fija (BVF) presentan mayores costes de operación, pero menores costes de inversión. Asimismo, de entre los diferentes modos de regulación el de menor coste de operación es el basado en una regulación caudalimétrica. En los casos en los que el caudal es la variable de control, de forma general se sigue de forma más cercana la curva de consigna. Por ello este tipo de regulación presenta menores costes de explotación.

En cualquier caso, dependiendo de las condiciones del proyecto, se abordará la selección de una cualquiera de las soluciones que forman parte de la frontera de Pareto. En el caso de optar por un modo de regulación concreto se seleccionará la solución del frente de Pareto de dicho modo de regulación, En el caso de querer considerar todos los modos de regulación posibles se considerará el frente de Pareto global. En definitiva, la solución seleccionada supone en todos los casos no solo seleccionar el modelo de bomba, sino también el número de bombas a instalar en paralelo, las dimensiones aproximadas de la estación de bombeo y los requerimientos de regulación.

4. Conclusiones

La aplicación de la metodología desarrollada aplicada al caso de estudio permite extraer las conclusiones siguientes:

- La metodología de diseño de estaciones de bombeo considerando al mismo tiempo los costes de inversión y de explotación asegura diseños más adecuados a las condiciones de operación de la red. Más aún, los diseños obtenidos consideran los

diversos modos de operación de la EB. Por ello, la solución de esta metodología no es solo un número de bombas y unas dimensiones de elementos y conducciones, sino también un modo de regulación del funcionamiento de la EB.

- La representación de los diferentes costes mediante curvas de costes se ha mostrado sumamente eficaz. De hecho la totalidad de curvas planteadas tienen coeficientes de represión superiores a 0,95.
- Sin duda los menores costes de inversión son los asociados a las soluciones que no emplean modo de regulación alguno. Sin embargo, la metodología propuesta pone de manifiesto los costes de operación vinculados a estas soluciones. De la misma forma, los métodos de regulación caudalimétricos, tienen un menor coste de operación que los manométricos.
- Sin embargo, si se construye la frontera de Pareto global siempre existe solución de los diferentes modos de regulación sobre dicha frontera de Pareto. Es decir, dependiendo del peso que se de en la valoración final al coste de inversión o al coste de explotación, pueden obtenerse soluciones con prácticamente todos los modos de regulación. Esto es, en el caso de primer la inversión frente a la operación la frontera de Pareto recoge valores sin regulación o con regulaciones basadas en BVF y mediciones de la presión. Por el contrario cuando se prima más la explotación que la inversión la frontera se mueve hacia soluciones con BVV y medición de caudales.

En definitiva, la metodología desarrollada ha mostrado ser eficaz como herramienta en la decisión de las inversiones a efectuar en proyectos de diseño de estaciones de bombeo para redes de distribución de agua. Sin duda, en cada caso las funciones de coste pueden variar, y las bases de datos de bombas pueden ser diferentes. Sin embargo, la metodología desarrollada permite obtener en todos los casos una serie de soluciones (frontera de Pareto) sobre las cuales habrá que seleccionar la solución final de diseño.

Bibliografía

- Cabrera, E., Espert, V., García, J., Martínez, J., Fuertes, V., Díaz, J., ... Iglesias, P. (1996). *Ingeniería hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de aguas*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Castells, X. E. (2012). *Energía, Agua, Medioambiente, territorialidad y Sostenibilidad*. Ediciones Díaz de Santos.
- Fuertes, V. S., García-Serra, J., Iglesias, P. L., López, G., Martínez, F. J., & Pérez, R. (2002). Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua. *Fluid Mechanics Group, Polytechnic University of Valencia, Spain*.
- Leese, M., & Meisch, S. (2015). Securitising sustainability? Questioning the 'water, energy and food-security nexus'. *Water Alternatives*, 8(1).
- León-Celi, C., Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., & Mora-Melia, D. (2016). A Methodology for the Optimization of Flow Rate Injection to Looped Water Distribution Networks through Multiple Pumping Stations. *Water*, 8(12), 575.
- Pareto, V. (1906). *Manuale di economia politica* (Vol. 13). Societa Editrice.
- Pimentel Gomes, H., Pérez Garcia, R., & Iglesias Rey, P. L. (2007). *Abastecimento de água: o estado da arte e técnicas avançadas*. Ed. UFPB.