

ENERGY OPTIMIZATION OF WATER SUPPLY FLOWS IN WATER DISTRIBUTION NETWORKS WITH MULTIPLE PUMPING STATIONS

León Celi, Christian F.; Iglesias-Rey, Pedro L.; Martínez-Solano, F. Javier
Universitat Politècnica de València

Water distribution networks (water supply systems, industrial networks, irrigation, ...) needs, more and more, the use of pumping units for guarantee minimum pressures in consumption points. The problem is related to the development of water supply projects that optimize energy consumption.

Therefore, in this paper a methodology for allocating flow in the supply points is developed. This methodology is based on the use of the concept of set-point curve of each supply point.

The methodology includes two approaches: the first method called discrete method and a second method called continuous method.

In the first a series of pre-defined combinations of pumps operation are evaluated. In the second, finding the optimal solution is performed using two optimization algorithms: Hooke and Jeeves, and Nelder-Mead. The hydraulic model used for the evaluation of solutions through its EPANET toolkit application.

Finally, the method applies to the determination of the optimal flow distribution of a real system.

Keywords: Optimization; water distribution networks; energy efficiency; pumping stations

OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS CAUDALES DE SUMINISTRO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA CON MÚLTIPLES FUENTES DE BOMBEO

El suministro de agua a presión (abastecimiento de agua, consumo industrial, riego, ..) necesita cada vez más la utilización de grupos de bombeo para conseguir los niveles de presión exigidos en los puntos de consumo. El problema radica en el desarrollo de proyectos de suministro que optimicen los consumos energéticos empleados.

Por ello, en este trabajo se presenta una metodología de reparto de los caudales de suministro y de las presiones necesarias para garantizar en cada punto las exigencias de caudal demandado y presión mínima. Esta metodología se basa en la utilización del concepto de curva de consigna de cada uno de los puntos de suministro.

La metodología desarrollada contempla dos enfoques: un primer método denominado método discreto y un segundo método denominado método continuo.

En el primero se evalúan toda una serie de combinaciones de funcionamiento previamente definidas para las estaciones de bombeo. En el segundo, la búsqueda de la solución óptima se realiza empleando dos algoritmos de optimización: Hooke-Jeeves y Nelder-Mead. El modelo hidráulico utilizado para la evaluación de las soluciones en EPANET a través de su toolkit de aplicaciones.

Finalmente, el método se aplica para la determinación de la distribución óptima de caudales de un sistema real.

Palabras clave: Optimización; Sistemas distribución agua; Eficiencia energética; Estaciones de bombeo

Correspondencia: Pedro L. Iglesias-Rey - piglesia@upv.es

1. Introducción

En los sistemas de distribución de agua a presión, ya sean de abastecimiento, consumo industrial o riego, siempre existe la necesidad de incorporar nuevas fuentes de suministro debido al aumento del consumo, ya sea originado por un crecimiento de la población, la expansión de la red, el incremento de fugas, o las nuevas condiciones del servicio, etc. En redes alimentadas mediante grupos de bombeo estas nuevas fuentes de abastecimiento representan un aumento del consumo energético debido a la energía adicional que se requiere para entregar la cantidad de agua demandada. En este contexto es importante que cualquier proyecto dirigido al abastecimiento del recurso agua, desarrolle un análisis sobre la factibilidad del caudal suministrado desde cada punto de abastecimiento y que a la vez permita ajustar las presiones de los nudos de consumo a las mínimas requeridas asegurando la eficiencia del servicio. Por otro lado, será este ajuste el que permita optimizar el gasto de energía al momento de satisfacer las demandas de la red. Para poder llevar a cabo este análisis es necesario solucionar las siguientes interrogantes: ¿cuáles son los caudales y alturas de presión óptimos a ser suministrados por cada fuente de abastecimiento?, los caudales abastecidos ¿son los que requieren el menor consumo de energía para satisfacer la demanda de la red con las mínimas presiones requeridas?, ¿cómo interactúan las distintas fuentes de suministro y cuál es su importancia respecto del consumo energético?, ¿cómo influye la incorporación de una nueva de abastecimiento en el consumo energético de la red?, ¿cómo minimizar el consumo energético?.

Son muchos los trabajos mediante los cuales se han evaluado distintas estrategias dirigidas a optimizar el consumo energético. En grupos de bombas de velocidad fija (BVF) por ejemplo una de las estrategias es reducir el consumo energético optimizando el número de encendidos y apagados de la bomba, reduciendo los ciclos de bombeo (Yin et al. 1996). Posteriormente se incorporan el uso de bombas de velocidad variable (BVV) las cuales permiten un mejor ajuste entre la curva motriz del grupo de bombeo y la curva resistente de la red o curva del sistema, reduciendo de esta forma el exceso de energía en el bombeo del agua al momento de cumplir con las mínimas presiones requeridas por la red. El uso de BVV se complementa estableciendo restricciones que permitan trabajar a los grupos de bombeo todo el tiempo en las zonas de máxima eficiencia (Lingireddy & Wood 1998; da Costa Bortoni et al. 2008; Viholainen et al. 2013). Cuando se trata de sistemas que involucran ambo tipos de bombas (BVV y BVF) la optimización energética resulta de una adecuada selección de las bombas así como de la correcta combinación de las mismas para lograr un mejor ajuste respecto de la curva del sistema (López-Luque et al. 1995). Otros trabajos utilizan funciones multiobjetivo que buscan además de la optimización energética la optimización de costos de operación, incorporando variables como la capacidad de almacenamiento de la red y la inclusión de las tarifas eléctricas, consiguiendo así programar los grupos de bombeo para que funcionen en las horas de menor coste energético. Adicionalmente esta estrategia se complementa con el control de los niveles de llenado y vaciado de los tanques de almacenamiento (Bene & Hós 2012; Amirabdollahian & Mokhtari 2015; Prasad 2010). Por otro lado, el consumo energético también se puede ver reducido si se disminuyen las demandas por medio de una adecuada gestión de las presiones y de fugas. En sistemas de riego por medio de la conformación de distritos hidrométricos se pueden agrupar los nudos de consumo que requieren mayor energía y gestionarlos de forma más eficiente (Fernández-García et al. 2013). La identificación y gestión de puntos críticos de la red también es una de las estrategias adoptadas al momento de reducir el consumo energético (Fernández García et al. 2014). De hecho, Fernández García et al. (2015) conjuga estas dos últimas estrategias incluyendo la discretización tarifaria y considerando la interacción de las fuentes de suministro con la intención de lograr además una reducción de costos.

Hasta el momento los trabajos realizados no analizan de forma explícita la interacción entre las fuentes de abastecimiento de una red y se asume que siempre están en continua operación. Adicionalmente en muchos de los casos solamente se considera una fuente de suministro. Por otra parte, el ajuste del grupo motriz se realiza a través de la curva resistente del sistema la cual resulta muchas veces difícil de medir y calcular. Alternativamente en este trabajo se va a intentar ajustar el funcionamiento de las bombas al concepto de curva de consigna (CC). La CC es una curva que para cualquier caudal demandado indica la altura de presión necesaria para mantener la presión mínima requerida en el nudo más desfavorable de la red o también conocido como nudo crítico (Iglesias-Rey et al. 2012; Martínez-Solano et al. 2014).

En este trabajo se presenta una metodología que usando como punto de partida del concepto de la CC permite obtener los caudales de reparto y alturas de presión necesarias en cada fuente de abastecimiento para cumplir con los mínimos requerimientos de presión de la red optimizando a la vez el consumo energético. La metodología se aborda por medio de dos enfoques. El primero denominado método discreto que consiste en encontrar la mejor solución luego de evaluar un conjunto discreto de posibilidades previamente definido. El segundo enfoque o método continuo se basa en la aplicación de algoritmos de optimización: Hooke and Jeeves (1961) y Nelder & Mead (1965). La metodología en sí tiene dos niveles: el primer nivel corresponde al problema de optimización, y el segundo al modelo hidráulico. Ambos se resuelven a través del software EPANET (Rossman, 2000) y su TOOLKIT de aplicaciones. La metodología desarrollada se aplica a dos casos de estudio. El primero es una red académica denominada CT1 cuyos consumos no son dependientes de la presión, y el segundo que pertenece a una red real Cooperativa el Plantío y la Cañada (COPLACA).

En la siguiente sección se procede a explicar la metodología que se debe seguir para determinar la curva de consigna cuando existe más de una fuente de abastecimiento. Seguidamente se desarrolla la función objetivo así como las restricciones a las que se encuentra sujeta. A continuación se describe los métodos con los que se resuelve la función objetivo. Posteriormente se presentan los casos de estudio así como los resultados obtenidos.

2. Curva de consigna (CC)

La curva de consigna se define como aquella que resulta de representar la altura de presión necesaria en cabecera para entregar un caudal determinado manteniendo la mínima presión requerida en el nudo crítico de la red. El nudo crítico es el nudo más representativo y de mínima presión de la red, pudiendo ser un punto diferente de la red para diferentes demandas del sistema. No obstante la curva de consigna siempre será la misma. Existirán tantas curvas de consigna como fuentes de suministros existan en la red. El proceso para determinar la CC depende principalmente de dos aspectos: el número de fuentes de suministro (N_f) y si los consumos son no dependientes o dependientes de la presión.

Partiendo del supuesto del modelo de una red desarrollado en EPANET que cuenta únicamente con una fuente de abastecimiento y con consumos no dependientes de la presión, el proceso para determinar la CC resulta bastante sencillo. Para cada demanda de la red, que corresponde al caudal abastecido por la fuente de suministro en cada instante (i) (Q_{fi}), se asigna una altura inicial al embalse (H_0). El número total de escenarios (N_e) que corresponde a todos los instantes de análisis (i) se debe definir previamente. Posteriormente se procede a determinar el nudo crítico de la red y su altura presión (p_{min}). Esta se compara con la presión mínima requerida en el sistema (p_{req}) permitiendo de esta manera saber si existe exceso o déficit de presión en el sistema. La altura del embalse para el instante i (H_{emb_i}) resulta de ajustar la altura inicial del embalse en base a la diferencia de la presión

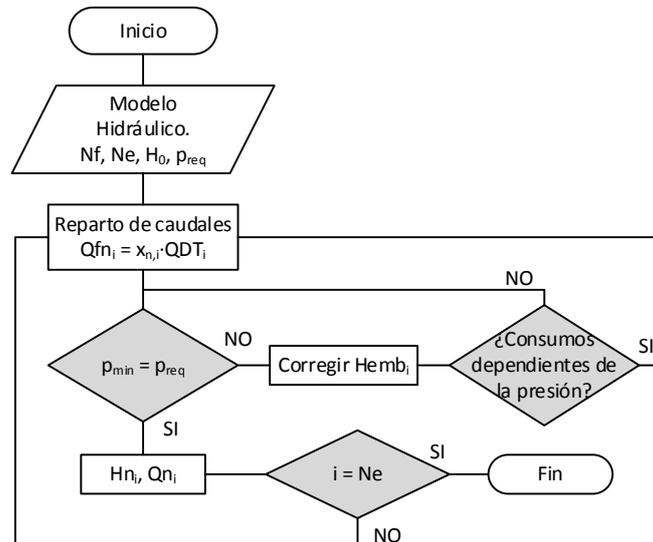
requerida y la presión del nudo crítico. El ajuste se realiza una sola vez. La CC se construye al representar Q_{fi} y H_{mb_i} para cada instante. Cuando se trata de consumos dependientes de la presión el ajuste de H_{mb_i} se vuelve iterativo, ya que cada vez que se modifique la altura del embalse las demandas también se verán modificadas al igual que la presión en el nudo crítico, de esta forma el ajuste se realizará hasta que la diferencia entre la presión mínima y la requerida sea nula.

Cuando existe más de una fuente de suministro hay que tener en cuenta que solo un nudo puede ser representado como embalse, mientras que las restantes fuentes deben representarse como nudos de inyección. En este caso se empieza por fijar el caudal (Q_{fn_i}) que será suministrado por cada fuente (n) de la red en cada instante (i) para cumplir con la demanda total de la red en ese instante (QDT_i). En este proceso no es posible fijar el caudal suministrado por el embalse de la red ya que este es asumido por EPANET como el caudal necesario para cumplir con la demanda total de la red. Posteriormente se define la altura inicial del embalse y se procede de igual forma a como se indicó para el caso de una sola fuente de suministro. Las curvas de consigna resultarán de representar los caudales (Q_{fn_i}) y alturas de presión (H_{n_i}) de cada fuente. Este procedimiento es válido siempre y cuando los consumos no sean dependientes de la presión. En el caso de que se trate de consumos dependientes de la presión el reparto suministrado por cada fuente se fija como una fracción (x_{n_i}) del caudal total demandado por la red (1). Esto debido a que en cada ajuste de la altura piezométrica del embalse, la demanda variará y por tanto el reparto debe ser recalculado.

$$Q_{fn_i} = x_{n_i} \times QDT_i \quad (1)$$

De forma general el proceso para la obtención de la curva de consigna se encuentra representado en el diagrama de la figura 1.

Figura 1: Proceso para obtención de la curva de consigna.



2. Planteamiento del modelo de optimización

Como se había mencionado en la sección anterior, para obtener las alturas de presión de cada fuente mediante el concepto de CC es necesario fijar el reparto de caudales previamente. No obstante, el problema se presenta cuando lo que se desea conocer es el

reparto óptimo de caudales; es decir, la combinación (c) que produce el mínimo consumo energético de la red. El número total de combinaciones (Nc) depende del número de fuentes (Nf) que posea la red. La función objetivo a minimizar para el instante (i) está conformada por el sumatorio del producto entre el caudal y la altura de presión de cada fuente de suministro tal y como se presenta en la ecuación (2). En esta función se consideran dos sumandos. El primero pertenece al reparto fijado a los nudos de suministro, mientras que el segundo a la fuente representada como embalse. No hay que olvidar que la altura del embalse corresponde a la altura piezométrica del nudo, por lo que para obtener la altura de presión se debe restar la cota del mismo (zn).

$$\min [f(x)_i] = \sum_{n=1}^{Nf-1} x_{n,c,i} \times QDT_i \times H_{n,c,i} + \left(1 - \sum_{n=1}^{Nf-1} x_{n,c,i}\right) \times QDT_i \times (H_{emb,c,i} - z_n) \quad (2)$$

$$n = 1, \dots, Nf-1; i = 1, \dots, Ne; c = 1, \dots, Nc$$

En la expresión anterior, $x_{n,c,i}$ es el reparto de caudal asignado a la fuente (n), para la combinación (c), en el instante (i); QDT_i es el caudal total demandado en el instante (i); $H_{n,c,i}$ es la altura de presión de la fuente (n), para la combinación (c), en el instante (i); $H_{emb,c,i}$ es la altura piezométrica del embalse para la combinación (c) en el instante (i); y z_n es la cota del embalse.

La función objetivo (2) se encuentra sujeta a las siguientes restricciones:

- La suma de la fracción de reparto de caudales a ser suministrados por cada una de fuentes de abastecimiento debe ser igual a la unidad.

$$\sum_{n=1}^{Nf} x_{n,c,i} = 1 \quad (3)$$

- La fracción de reparto que puede asumir una fuente de abastecimiento está comprendida entre cero y uno.

$$0 \leq x_{n,c,i} \leq 1 \quad (4)$$

- Por otra parte hay que tomar en consideración que el modelo hidráulico como tal está sujeto a las restricciones propias del mismo como son las restricciones de conservación de masa y energía, de no negatividad de algunas variables, y restricciones de altura. Así, una de las principales restricciones a las que se debe prestar atención como parte del concepto de CC es que la presión mínima en el nudo crítico sea igual a la presión requerida por el sistema y que ha sido fijada en función de las condiciones de desarrollo del proyecto.

$$P_{\min} = P_{\text{req}} \quad (5)$$

3. Métodos de resolución de la función objetivo

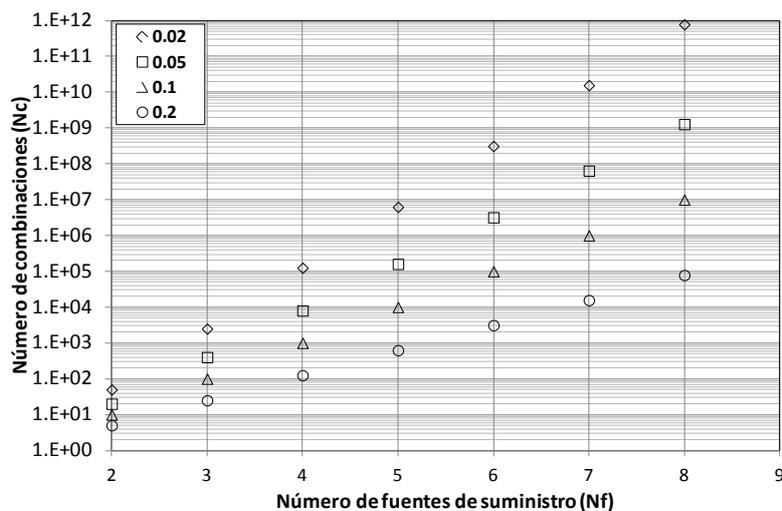
Tal como se abordó en la descripción inicial la optimización de la función objetivo se ha realizado mediante dos métodos diferentes: el denominado método discreto y el denominado método continuo.

3.1 Método discreto

Para encontrar el mínimo valor de la función, el método discreto se basa en la evaluación de un número finito de combinaciones de reparto entre las diferentes fuentes de suministro. El número de combinaciones depende del valor incremental con el que se analice la fracción

de reparto de cada fuente de suministro Δx_n . Es decir, mientras menor sea el valor del incremento habrá una mayor cantidad de escenarios diferentes a evaluar por cada fuente. Por otra parte, mientras mayor sea el número de fuentes de suministro mayor será el número de combinaciones a evaluar. En todo caso no hay que olvidar que el número de combinaciones estará sujeto principalmente a la restricción de la expresión (3). En la figura 2 se puede evidenciar el número de combinaciones necesarias para evaluar la función objetivo para el caudal total demandado en un instante i en función de los diferentes pasos ($\Delta x_n = 0.02, 0.05, 0.1, 0.2$).

Figura 2: Número de combinaciones a evaluar la función objetivo en función del número de fuentes de abastecimiento (Nf)



La metodología a emplear en el método continuo es simple: evaluar la energía total empleada considerando todas las potenciales combinaciones de reparto de caudales y determinar cuál es la que menor consumo tiene.

3.1 Método Continuo

La aplicación del método continuo implica el encontrar la combinación óptima de reparto que produzca el menor consumo energético sin la necesidad de evaluar todo el rango posible de combinaciones para valores pequeños de Δx_n . Esto se puede lograr mediante la aplicación de algoritmos de optimización. En este caso y con el fin de validar los resultados se han aplicado dos algoritmos: Hooke and Jeeves (1961) y Nelder and Mead (1965). La selección de los algoritmos responde a un problema multidimensional no lineal con restricciones. Los algoritmos seleccionados son de búsqueda directa debido a que la derivada de la función no tiene una representación matemática clara y habría que obtenerla de forma numérica.

El algoritmo de Hooke and Jeeves posee dos movimientos de búsqueda: una de exploración y otro de salto. El movimiento de exploración se encarga de analizar cada una de las dimensiones del problema, en este caso el reparto para cada fuente de abastecimiento. Para poder ejecutar el movimiento de exploración hay que definir ciertos parámetros: punto de partida, longitud de paso, y valor de parada. Mientras menor sea el valor de la longitud de paso se pueden encontrar mejores valores de la función, si bien siempre será a costa de tiempos de cálculo mayores. Por otra parte el valor de parada es el criterio mediante el cual se comparan los valores obtenidos en cada evaluación de la función. Este valor permite evaluar los alrededores de un valor que produce buenos resultados. En el caso de que este valor sea demasiado pequeño el tiempo de cálculo se verá incrementado de forma

considerable. Cuando el movimiento de exploración encuentra un mejor resultado de la función objetivo, se produce entonces el movimiento de salto en esa misma dirección con la intención de encontrar mejores resultados, caso contrario se procede a explorar alrededor del mejor resultado obtenido. El algoritmo de Hooke and Jeeves puede presentar algunos problemas en con óptimos locales, por lo cual es conveniente limitar el espacio de búsqueda por medio de la restricciones mencionadas en el apartado anterior. Por otra parte, una forma de garantizar que el óptimo ha sido encontrado es empezar la búsqueda empleando distintos puntos de partida. En el presente estudio se asumido los siguientes valores de 0.1 y 0.0001 para la longitud de paso y el valor de parada respectivamente.

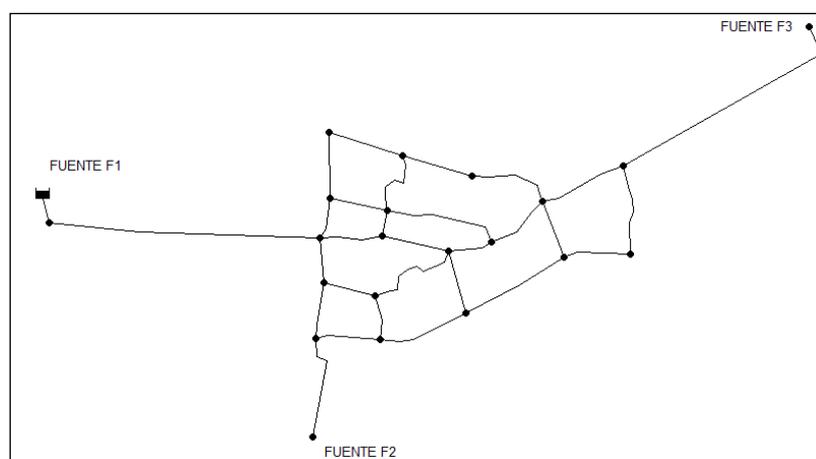
Por su parte, el algoritmo de Nelder Mead requiere inicialmente un mayor número de evaluaciones que el de Hooke and Jeeves ya que parte de evaluar los $n+1$ vértices de un simplex. Dependiendo de los resultados de evaluar la función para cada uno de los vértices se ejecutan cuatro movimientos: reflectante, expansión, contracción y reducción. En cada movimiento se reconstruye el simplex. El movimiento reflectante es el movimiento mediante el cual se busca descartar el peor valor de la evaluación inicial de los vértices del simplex. Si se encuentra un mejor valor se realiza el movimiento de expansión. Si por el contrario el nuevo valor obtenido está entre los dos peores de la evaluación inicial se realiza el movimiento de contracción, mientras que si no se ha logrado un mejor valor después de haber ejecutado el movimiento reflectante, se ejecuta el movimiento de reducción. Las iteraciones del movimiento terminan cuando se cumpla un cierto criterio de parada, que en este caso se ha establecido en que la diferencia entre los valores obtenidos de evaluar los vértices no supere el 0.0001.

4. Casos de estudio

4.1 Red CT1

La red CT1 que se presenta en la figura 3 posee tres fuentes de suministro: F1, F2 y F3. Los consumos no son dependientes de la presión. La demanda total media es de 154.20 l/s. La presión mínima requerida es de $p_{req} = 45$ mca. El modelo que representa el comportamiento de la red está compuesta por un total de 30 tuberías y 19 nudos de consumo. Las cotas de los nudos se encuentran en media alrededor de los 7 m de altura y no existen mayores variaciones entre ellos, por lo que se puede considerar una red plana.

Figura 3: Red CT1.



La obtención del óptimo reparto se ha analizado usando tanto el método discreto (con un paso $\Delta x_n=0.1$), como el método continuo aplicando los dos algoritmos de optimización señalados. El rango de caudales analizado está comprendido entre 0.05 a 2 veces el caudal medio diario con incrementos de 0.05 cada vez.

En la figura 4 se presentan los resultados obtenidos a través del método discreto en donde se puede observar que el reparto se mantiene invariable respecto del factor de demanda. Es decir, la fuente F2 es la que abastece una menor cantidad de caudal (10%) al momento de satisfacer la demanda de la red. En términos energéticos esto quiere decir que la fuente F2 es la que consume una mayor cantidad de energía y por tanto no es conveniente que asuma una mayor cantidad del reparto. Por otra parte, los resultados del método continuo de la figura 5 muestran de forma comparativa la similitud entre el reparto obtenido entre el algoritmos de Hooke and Jeeves y Nelder Mead. No obstante, si comparamos ambos métodos vemos que el reparto de caudales es más preciso en el caso del método continuo permitiendo mejorar la confiabilidad del método y validando su utilidad para trabajos posteriores como el dimensionamiento del grupo de bombeo en función del caudal y alturas de presión que producen el menor consumo energético.

Figura 4: Resultados Método Discreto. Red CT1

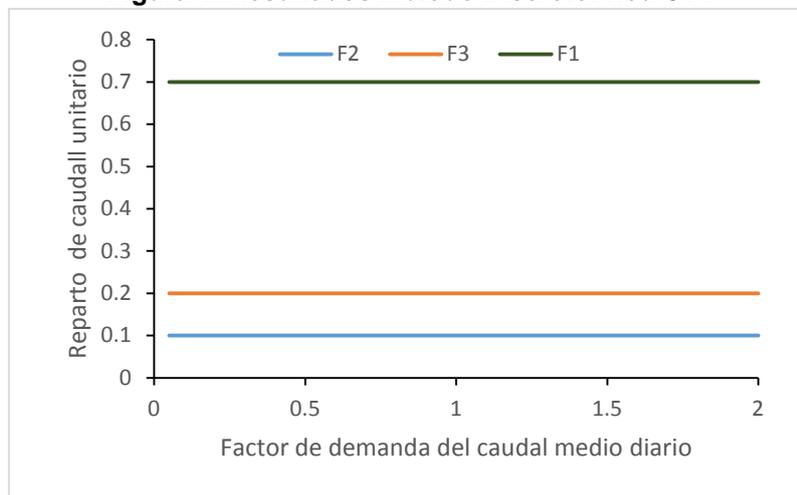
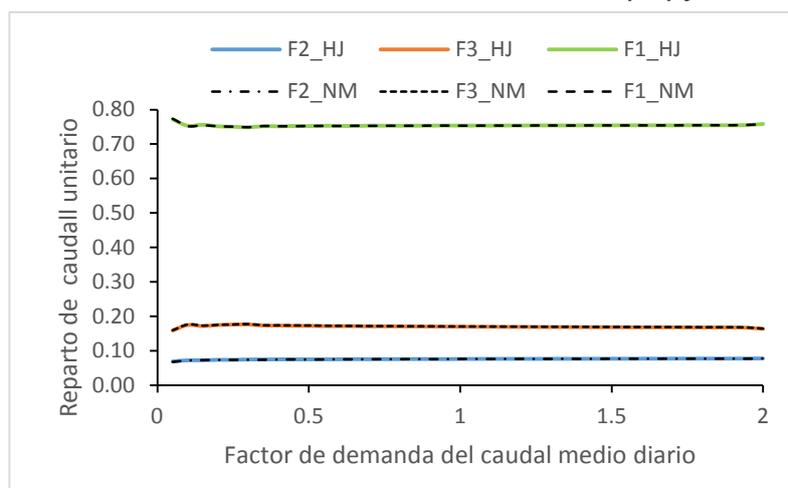


Figura 5: Resultados Método Continuo: Hooke and Jeeves (HJ) y Nelder Mead (NM)



Debido a la similitud entre los resultados de ambos métodos de optimización en lo sucesivo se presentarán únicamente los correspondientes a la aplicación del algoritmo de Hooke and Jeeves.

4.2 Red Cooperativa el Plantío y la Cañada (COPLACA)

El segundo ejemplo corresponde a una red de suministro de agua a un conjunto de zonas residenciales en las proximidades de Valencia, en concreto en la zona sur de la localidad El Plantío y La Cañada. En este caso, se trata de evaluar el reparto de caudales óptimos para cada una de las fuentes observando si es necesario que operen todas las fuentes de suministro. La red cuenta con ocho fuentes de suministro: P05, P06, P07, P11, P12, P13 y D10. Las 6 primeras fuentes corresponden a pozos y la última corresponde a una toma de un grupo de bombeo que aspira directamente del agua de un río. La presión mínima requerida en la red es 20 mca. A diferencia del caso de la red CT1 aquí se ha considerado el caudal máximo (Q_{max}) que es posible abastecer a cada fuente: P05 (9 l/s), P06 (3 l/s), P07 (7 l/s), P11 (17 l/s), P12 (15 l/s), P13 (15 l/s), y D10 (80 l/s.). La diferencia más grande de nivel entre los nudos de consumo es de 53 m, y la altura media de la red es de 100m, por tanto el desnivel de la red es apreciable. El modelo de la red cuenta con un total de 1032 nudos y 1095 tuberías.

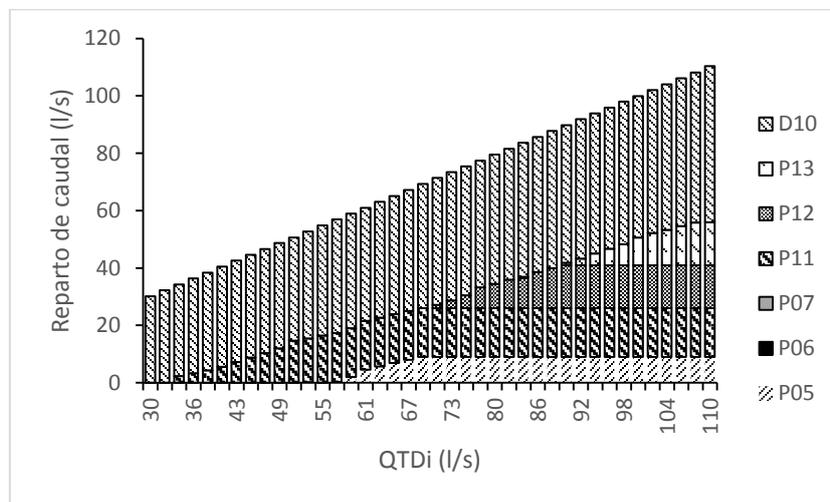
Figura 6: Red Cooperativa el Plantío y la Cañada



En la figura 7 se puede observar que la fuente que produce el menor consumo energético es la D10 ya que posee el mayor caudal de reparto, es decir abastece la mayor cantidad de caudal demandado por la red. A medida que se alcanza la capacidad física de cada fuente entran en funcionamiento aquellas fuentes que requieren un menor consumo energético. Aunque existen fuentes de abastecimiento que poseen una mayor capacidad física para el abastecimiento de caudal, se puede observar que entran en funcionamiento antes aquellas de menor capacidad como es el caso de la fuente P05. Adicionalmente se puede observar que las fuentes P06 y P07 no intervienen en el reparto. Por tanto, es necesario realizar un análisis de factores externos relacionados con costos de operación y mantenimiento de cada

una de las fuentes o pozos de bombeo como es el caso de la presente red, que reflejen la factibilidad de mantenerlos en funcionamiento.

Figura 7: Red Cooperativa el Plantío y la Cañada. Reparto de caudales



En definitiva, el modelo pone de manifiesto la relevancia de cada uno de los pozos de bombeo así como del grupo de bombeo del río a la hora de la demanda de la red. Adicionalmente, los resultados obtenidos se pueden utilizar para formular el plan de operación de los distintos grupos de bombeo, así como planes de mantenimiento, análisis de la capacidad de los pozos, análisis de la localización óptima, etc. Incluso puede añadirse como parte de la función objetivo a tener en cuenta una cierta ponderación de la calidad del agua captada.

5. Conclusiones y desarrollos futuros

De los distintos casos analizados se desprende la gran capacidad que tiene la metodología basada en el concepto de la curva de consigna para determinar los repartos de caudales y las alturas de presión necesarias en cabecera para cada una de las fuentes de abastecimiento. Este reparto óptimo permite abordar de forma más eficiente todos aquellos proyectos relacionados con el abastecimiento de agua, proveyendo una herramienta para el análisis de las políticas de operación de las distintas fuentes de suministro, evaluación de la necesidad de fuentes nuevas, su localización óptima, la relevancia de cada fuente respecto del caudal aportado, etc.

De los métodos aplicados para minimizar la función objetivo el método discreto requiere de un tiempo considerable de cálculo y de probar cada una de las posibles soluciones hacia la búsqueda del óptimo reparto lo cual supone un enorme coste computacional cuando el número de fuentes de suministro aumenta. En lo que respecta a los algoritmos de Hooke and Jeeves y de Nelder Mead, ambos resultan suficientemente eficaces y simples para abordar el problema planteado. El uso de algoritmos más complejos dependerá del número de variables a considerar en la función objetivo.

En el caso de aplicar la metodología en redes cuyos consumos se hayan representado como dependientes de la presión, ésta puede ser interesante para valorar diferentes planes de gestión de fugas. Hay que tener en cuenta que a mayores presiones empleadas en la cabecera de la red, mayores serán las presiones en los nudos y por tanto mayores las pérdidas de agua por los defectos o roturas del sistema. Por ello, el método desarrollado puede permitir también para analizar el comportamiento de diferentes planes de gestión de fugas y pérdidas de agua desde el enfoque de cuál es el mejor reparto obtenido y cuáles

son las mínimas alturas de presión necesarias en cabecera para cumplir con las demandas de la red.

Finalmente, cabe indicar que en este trabajo no se ha entrado en el dimensionado de las diferentes estaciones de bombeo. No obstante, al ser uno de los resultados la curva de consigna de cada fuente, esta problemática se puede abordar en futuros trabajos. Tampoco se ha considerado la capacidad de almacenamiento de la red, ni las tarifas eléctricas, ni elementos de regulación. En cualquier caso, cualquiera de estas acciones debe tomar siempre como punto de partida los resultados de altura y caudal de cada fuente aportados por el método presentado.

6. Referencias

- Amirabdollahian, M., & Mokhtari, M. (2015). Optimal Design of Pumped Water Distribution Networks with Storage Under Uncertain Hydraulic Constraints. *Water Resour Manag.*, (29), 2637–2653. <http://doi.org/10.1007/s11269-015-0961-7>
- Bene, J. G., & Hős, C. J. (2012). Finding Least-Cost Pump Schedules for Reservoir Filling with a Variable Speed Pump. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(6), 682–686. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000213](http://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000213)
- da Costa Bortoni, E., de Almeida, R. A., & Viana, A. N. C. (2008). Optimization of parallel variable-speed-driven centrifugal pumps operation. *Energy Efficiency*, 1(3), 167–173. <http://doi.org/10.1007/s12053-008-9010-1>
- Fernández García, I., Montesinos, P., Camacho Poyato, E., & Rodríguez Díaz, J. A. (2015). Energy cost optimization in pressurized irrigation networks. *Irrigation Science*. <http://doi.org/10.1007/s00271-015-0475-3>
- Fernández García, I., Montesinos, P., Camacho, E., & Rodríguez Díaz, J. A. (2014). Methodology for Detecting Critical Points in Pressurized Irrigation Networks with Multiple Water Supply Points. *Water Resources Management*, 28(4), 1095–1109. <http://doi.org/10.1007/s11269-014-0538-x>
- Fernández-García, I., Rodríguez-Díaz, J. A., Camacho, E., & Montesinos, P. (2013). Optimal operation of pressurized irrigation networks with several supply sources. *Water Resour Manag.*, (27), 2855–2869.
- Hooke, R., & Jeeves, T. A. (1961). Direct search solution of numerical and statical problems. *Journal of the ACM*, 8(April), 212–229.
- Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., Mora-Melia, D., & Ribelles-Aguilar, J. V. (2012). The battle water networks II: Combination of meta-heuristic technics with the concept of setpoint function in water network optimization algorithms. *WDSA 2012: 14th Water Distribution Systems Analysis Conference, 24-27 September 2012 in Adelaide, South Australia (P. 510)*., *Engineers*.
- Lingireddy, S., & Wood, D. J. (1998). Improved Operation of Water Distribution Systems Using Variable-Seed Pumps. *J. Energy Eng.*, 124(3), 90–103.
- López-Luque, R., Reça, J., Camacho, E., Roldán, J., & Alcaide, M. (1995). Valoración energética y diseño óptimo de impulsiones con caudal variable. *Ingeniería Del Agua*, 2.
- Martínez-Solano, F. J., Iglesias-Rey, P. L., Mora-Meliá, D., & Fuertes-Miquel, V. S. (2014). Using the Set Point Concept to Allow Water Distribution System Skeletonization Preserving Water Quality Constraints. *Procedia Engineering*, 89, 213–219. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.179>
- Nelder, J. A., & Mead, R. (1965). A Simplex Method for Function Minimization. *The*

Computer Journal, 7(4), 308–313. <http://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>

Prasad, T. D. (2010). Design of Pumped Water Distribution Networks with Storage. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(1), 129–132.

Rossman, L. A. (2000). *Epanet 2 User Manual*. CINCINNATI, OH 45268.

Viholainen, J., Tamminen, J., Ahonen, T., Ahola, J., Vakkilainen, E., & Soukka, R. (2013). Energy-efficient control strategy for variable speed-driven parallel pumping systems. *Energy Efficiency*, 6(3), 495–509. <http://doi.org/10.1007/s12053-012-9188-0>

Yin, M., Andrews, J., & Stenstrom, M. (1996). Optimum Simulation and Control of Fixed-Speed Pumping Stations. *Journal of Environmental Engineering*, 122(3), 205–211.