



**ACTAS DE LAS IV JORNADAS
DE INGENIERÍA DEL AGUA**
La precipitación y los procesos erosivos

Córdoba, 20 a 23 de octubre de 2015

Editores:

María Fátima Moreno Pérez
José Roldán Cañas

ACTAS DE LAS IV JORNADAS DE INGENIERÍA DEL AGUA

Fecha de aparición: 15/10/2015

Formato: Memoria USB

Editores

María Fátima Moreno Pérez

José Roldán Cañas

ISBN: 978-84-608-3043-6

C.25. “Gestión sostenible del agua y uso de aljibes domésticos, un binomio incompatible” E. Gómez, E. Cabrera, J. Soriano, M. Balaguer	859 - 868
C.26. “Gestión de las redes de abastecimiento. Control del Agua No Registrada (ANR)” J.A. Durán, J. Moral	869 - 880
C.27. “Análisis conjunto de riesgos hidrológicos y desarrollo urbano en la ciudad de Tegucigalpa (Honduras)” J. Rojo, E. García-Alonso, D. Rubio, M. Alvarez, C. Alvarez, B. Tejerina, F. González	881 - 884
C.28. “Avances en la medición del consumo de agua para la identificación de usos finales” F. Arregui, J. Soriano, R. Cobacho, M. Balaguer	885 - 886
C.29. “Técnica para la obtención del campo de velocidad del flujo superficial en proximidad de rejillas de alcantarillado” J. Tellez, M. Gómez, B. Russo	887 - 896
C.30. “Estudio de la erosión de un sedimento orgánico en la red de alcantarillado” M. Gómez, L. Pouget, A. Cabello, D. Sunyer, B. Russo	897 - 906
C.31. “Tecnologías de Biosensores en la medida de la calidad de agua” A. Ortega, A. Acero, J. Lorén, O. Ruiz, B. Russo	907 - 918

TEMA D – Estructuras Hidráulicas

D.1. “Aplicación web para la evaluación de diseños de escalas de peces de hendidura vertical” M. Bermúdez, A. Rico, A. Rodríguez, L. Pena, J.R. Rabuñal, J. Puertas, L. Balairón, A. Lara, E. Aramburu, F. Morcillo, M. Castillo	921 - 930
D.2. “Influencia de la aireación del flujo en rápidas y en el rendimiento de amortiguación de energía en cuencos de resalto” D. López, R. Díaz, J.J. Rebollo	931 - 940
D.3. “Optimización del reparto de caudales de suministro en redes de distribución de agua con múltiples sistemas de bombeo” C.F. León, P.L. Iglesias-Rey, F.J. Martínez-Solano	941 - 950
D.4. “Sistema de regulación de compuertas para balsas de acuicultura semi-intensiva basado en LabVIEW” M. Márquez, I. Pulido, J.C. Gutiérrez, I. de la Rosa	951 - 960
D.5. “Un modelo de almenara con multicompuertas para la regulación de canales de regadío” J. Soler, M. Gómez, E. Bautista	961 - 970
D.6. “Estimación del riesgo ante la rotura de un depósito de agua en entorno urbano” A. Lastra, L. Garrote	971 - 982
D.7. “Sea Water Intake Pumping Station II at Sohar Industrial Port Area. Estudio del comportamiento hidráulico mediante modelo físico a escala reducida” J.J. Rebollo, L. Balairón, V. Elviro, L. Turrero	983 - 992
D.8. “Medición experimental de flujos con agua clara y gravas sobre sistemas de captación de fondo. Determinación del índice de huecos efectivo y de la longitud de reja requerida” L.G. Castillo, J.T. García, J.M. Carrillo	993 - 1004
D.9. Sustitución de bombes aspirando de depósitos de rotura de carga por bombes con aspiración directa de red. El caso de la estación de bombeo de Absudia-Cabanes (Jávea)” V.B. Espert, J.LI. Henarejos, E. Cabrera, P. Ladrón de Guevara	1005 - 1014
D.10. “Redacción de los proyectos de implantación de los planes de emergencia en las presas y embalses de titularidad estatal en la cuenca del Guadalquivir” A. Pastor, J. del Campo, R. Bella, J.M. Pérez Quintanilla	1015 - 1024
D.11. “Análisis experimental de tuberías ovoides para la mejora de la eficiencia de las redes de alcantarillado” J. Naves, M.A. Regueiro-Picallo, J. Anta, J. Puertas, J. Suárez	1025 - 1034
D.12. “GoRoSoBo: Un algoritmo predictivo de control para canales de riego en tiempo real” E. Bonet, M. Gómez, J. Soler	1035 - 1044
D.13. “Generación de resaltos hidráulicos de alto número de Froude a partir de regímenes rápidos emulsionados. Una investigación experimental” F.J. Vallés, B. Nácher, A. Bayón, P.A. López, J.B. Marco	1045 - 1052
D.14. “Modelado matemático de flujo no aireado en aliviaderos escalonados mediante OpenFOAM” A. Bayón, J. Matos, P.A. López	1053 - 1060

Optimización del reparto de caudales de suministro en redes de distribución de agua con múltiples sistemas de bombeo

C. F. León Celi, P. Iglesias Rey, F. J. Martínez Solano
Dpto. Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Universitat Politècnica de València
Camino de Vera s/n - 46022 Valencia
email: piglesia@upv.es

1. Introducción

El crecimiento que presentan los núcleos urbanos hoy en día requiere de unas demandas cada vez mayores tanto de recursos hídricos como de recursos energéticos para su suministro. Desde este punto de vista las ciudades requieren aumentar progresivamente sus fuentes de abastecimiento al mismo tiempo que se optimizan al máximo los consumos energéticos. Uno de los principales problemas que presenta la adición de un nuevo punto de suministro a una red existente es que puede modificar el funcionamiento hidráulico de la misma. Estas modificaciones pueden generar variaciones en el funcionamiento de los sistemas de suministro existentes originando que un sistema originalmente eficiente aunque insuficiente en capacidad pase a ser suficiente pero ineficiente.

El objetivo del presente trabajo es definir una metodología de optimización para el reparto de caudales de las fuentes de suministro de una red de distribución mallada de agua por bombeo. De forma genérica se considera que se dispone de un modelo matemático de la red existente razonablemente preciso. A partir de este modelo se analiza el reparto de caudales que debe realizarse desde cada una de las fuentes de suministro para garantizar las presiones y caudales de suministros necesarios, al mismo tiempo que se busca el mínimo de consumo energético.

El método desarrollado parte del concepto de curva de consigna de una determinada red de abastecimiento con un único punto de suministro. Este concepto es sumamente sencillo de calcular con la ayuda de un modelo matemático. Posteriormente se plantea una metodología válida para generalizar el concepto de curva de consigna para el caso en el que se dispone de múltiples fuentes de suministro. De esta forma, mediante el modelo matemático y el concepto de curva de consigna se puede definir, para una demanda determinada global de la red y un reparto de dicha demanda entre los diferentes puntos de producción, cuál es el coste energético asociado al suministro considerado.

Para encontrar el mínimo coste energético se requiere emplear un algoritmo de optimización, para lo cual se ha utilizado el algoritmo de Hooke & Jeeves (1961). Este algoritmo se acopla a los requerimientos de la función de optimización, la cual es multidimensional, con restricciones, y de la cual no se puede obtener una solución analítica.

Es importante mencionar que para la solución del problema de optimización este se ha dividido en dos niveles (Ostfeld & Tubaltzev, 2008). El nivel inferior el cual a través del software EPANET (Rossman, 2000) permite obtener el valor de las variables hidráulicas: presiones, caudales, etc., y el nivel superior que involucra la función objetivo y mediante el cual se obtienen las variables de diseño: alturas de bombeo, caudales.

2. Curva de consigna

La curva de consigna se puede definir como una curva teórica de la red de distribución, que indica la mínima energía necesaria proporcionada como altura de presión que debe existir en cabecera (depósito, estación de bombeo), para que el sistema cumpla con las restricciones de presión impuestas en todos los nudos de demanda. Su determinación tiene algunas implicaciones, dependiendo de si se trata de una o varias fuentes de abastecimiento, de consumos dependientes o no dependientes de la presión.

De forma general el procedimiento para su obtención comienza con la introducción de una altura de cabecera (H_{Cab}) arbitraria a la fuente de abastecimiento simbolizada como embalse en EPANET. En caso de existir más de una fuente de abastecimiento, las fuentes adicionales se representarán como nudos y el caudal suministrado tendrá signo negativo. El modelo de análisis EPANET nos dará como resultado la altura de presión de cada nudo, por lo que es importante que en el modelo conste la cota del nudo de suministro. Dicho modelo debe contar además con las demandas de los nudos de consumo (Q_j), permitiendo de esta forma determinar la demanda total de la red para ese escenario j específico (Q_j). En el caso de más de una fuente de abastecimiento se procede a fijar el caudal a suministrar (Q_{f,N_f}) por todas las fuentes (N_f).

Preparado el modelo se determina la presión en el nudo crítico de la red ($P_{j,min}$). Dicha presión se compara con la presión mínima requerida ($p_{k,min}$). De esta forma se procede a la obtención del déficit o exceso de presión en el nudo crítico (ΔH_j), con lo cual se realiza la corrección de la altura de cabecera (H_j). En caso de que se trate de consumos no dependientes de la presión, esta corrección se realizará una sola vez. En el caso de nudos con consumos dependientes de la presión este proceso es iterativo ya que la modificación de las presiones modifica los caudales demandados por los nudos. Este proceso iterativo termina cuando la presión en el nudo crítico es igual a la presión mínima requerida.

Otra consideración importante en el caso de consumos dependientes de la presión, es que en cada interacción el caudal total demandado varía en función de la altura de cabecera del embalse, por lo que en el caso de emplear más de una fuente de suministro es necesario definir nuevamente el reparto de caudales.

Los datos representativos de la curva de consigna estarán dados en el caso del depósito, por la altura de presión ($HP_{cab,j}$) y el caudal suministrado (Q_{cab}), en tanto que el resto de fuentes se representarán por la presión en el nudo ($P_{f,Nf}$) y el caudal de reparto para dicha fuente ($Q_{f,Nf}$). La curva tendrá tantos puntos como escenarios (j) se analicen.

El procedimiento indicado se esquematiza en la figura 1. Los detalles de la obtención de la curva de consigna con una o varias fuentes de suministro pueden seguirse en Iglesias-Rey et al (2007).

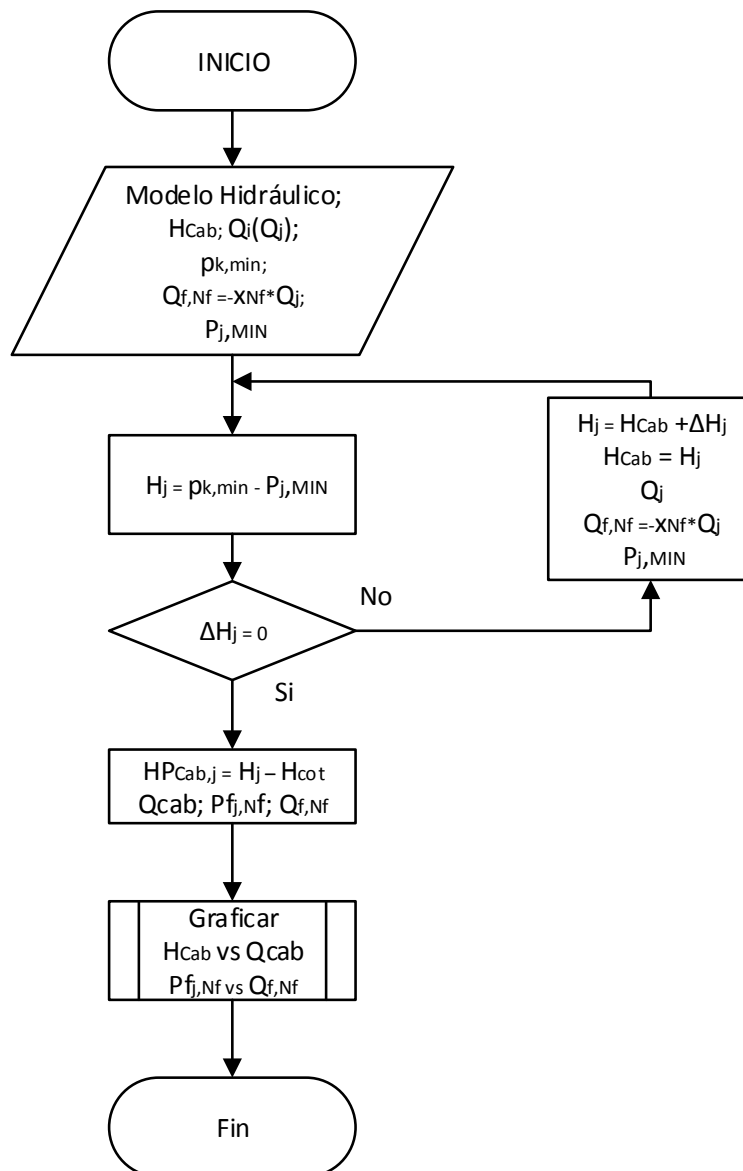


Figura 1. Flujoograma para la obtención de la curva de consigna

3. Metodología de determinación del reparto de caudales

3.1 Función objetivo a optimizar

La metodología de reparto de caudales planteada se basa en la metodología para obtener la curva de consigna para redes de distribución con más de una fuente de suministro (Iglesias-Rey et al, 2007). Tal y como se mencionó anteriormente la curva de consigna representa la mínima energía que se debe emplear en una red para cumplir con los requisitos de presión deseados. El problema de optimización surge cuando se desea conocer cuál es el reparto de caudales asociado al menor consumo energético. A diferencia del procedimiento empleado para la obtención de la curva de consigna, el reparto de caudales no es un dato conocido, por ende se puede determinar de dos formas:

- Probar todas las combinaciones posibles de repartos de caudal dentro de un conjunto finito de posibilidades.
- Utilizar un algoritmo de optimización, en este caso Hooke & Jeeves que permita encontrar el óptimo sin necesidad de probar todas las combinaciones posibles de repartos.

En el este trabajo se analiza el caso correspondiente al uso del algoritmo de optimización.

3.1 Función objetivo a optimizar

Para poder abordar el problema es necesario plantear la función a minimizar, la cual no expresa más que la suma de las energías inyectadas desde cada fuente y que se relacionan con el producto del caudal y la altura, como sucede normalmente en un régimen de bombeo. Matemáticamente la función objetivo se representa como:

$$f(x)_{c,j} = \sum_{n=1}^{Nf-1} (x_{n,c} QTD_j * Pf_{n,j}^c) + (1 - \sum_{n=1}^{Nf-1} x_{n,c}) * QTD_j * HP_{Cab,j}^c \quad [1]$$

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

donde, $x_{n,c}$ es la proporción de caudal que suministra la fuente n a la red respecto de la combinación c de todas las fuentes, QTD_j es el caudal total demandado por la red para el escenario de análisis j, $Pf_{n,j}^c$ y $HP_{Cab,j}^c$ son las alturas de presión de las Nf fuentes de suministro en el escenario j, para cada combinación c, Nf es el número de fuentes de suministro que hay en la red de distribución, Ne es el número de escenarios a considerarse, Nc es el número de combinaciones de reparto para las fuentes de suministro.

Esta función está sometida a algunas restricciones exteriores de tipo físicas, y que limitarán la búsqueda del óptimo:

- La suma del reparto de caudales entre todas las fuentes siempre será igual a 1

$$\sum_{n=1}^{Nf} x_{n,c} = 1 \quad [2]$$

- El caudal proporcionado por cada fuente podrá tomar un valor mínimo de cero y un valor máximo de uno, con lo cual el rango de búsqueda de la función siempre será positivo y estará entre cero y uno.

$$0 \leq x_n \leq 1 \quad [3]$$

Existen restricciones adicionales que corresponden al modelo hidráulico como son las restricciones de conservación de la masa y la energía o las restricciones de no negatividad de algunas de las variables.

Algunas consideraciones adicionales son que las combinaciones de repartos obtenidas, serán las mismas en todos los escenarios j . Adicionalmente el caudal demandado QTD por la red será el mismo para todas las combinaciones siempre que se trate de consumos no dependientes de la presión.

3.2 Aplicación del algoritmo de optimización a la función de reparto

La metodología a aplicar para la optimización de la función de reparto se obtiene combinando el algoritmo de optimización de Hooke & Jeeves conjuntamente con el procedimiento para la obtención de la curva de consigna.

Se empieza por definir los parámetros característicos del método de Hooke & Jeeves: dimensión del problema que corresponde al número de fuentes de suministro (N_f), factor de control de parada (E), longitud de paso (D), y punto inicial de partida para la búsqueda (X_0).

Así mismo se debe contar con un modelo hidráulico suficientemente preciso de la red en análisis, de la cual se deberá diferenciar la siguiente información: altura piezométrica inicial del embalse, cotas de las fuentes de suministro, presión mínima de referencia ($p_{k,min}$), factor de demanda (FD) para el escenario de análisis.

Dependiendo del número de fuentes se asume un punto inicial de búsqueda que corresponde a un reparto de caudales, el cual servirá como un punto de búsqueda inicial al método de Hooke & Jeeves. Si se posee consumos dependientes de la presión es necesario además, asignar al modelo los valores correspondientes a: coeficiente emisor y exponente emisor.

Antes de aplicar el método de Hooke & Jeeves es necesario definir el número de escenarios para los cuales se va a realizar el análisis, con lo cual cada escenario consta de un factor de demanda distinto. A partir de aquí se realiza la evaluación de la función objetivo aplicando la metodología para la obtención de la curva de consigna en base al primer reparto asumido, y siempre que se requiere según indique el algoritmo de optimización.

El método de Hooke & Jeeves cuenta con dos movimientos: uno exploratorio y otro conocido como movimiento patrón, que requiere de la adición de las restricciones de la función objetivo explicadas anteriormente. Cada vez que se realice el movimiento exploratorio es necesario reevaluar el valor de la función. Una vez que se han terminado de explorar todas las direcciones respecto del reparto para cada una de las fuentes de abastecimiento, se debe decidir si es conveniente empezar el movimiento patrón del método de Hooke & Jeeves, o si se realiza una vez más el movimiento exploratorio, pero variando la longitud de paso de la búsqueda. Esta condición estará sujeta a si se ha encontrado o no un mejor valor para la función de reparto.

Si se inicia con el movimiento exploratorio, se generará un nuevo punto de búsqueda, luego de lo cual se procederá nuevamente a evaluar la función. Si el valor obtenido con el nuevo punto, no es mejor que el generado por el anterior, se inicia nuevamente el movimiento exploratorio tomando el punto anterior como punto de partida. Si por el contrario, el nuevo punto genera un mejor resultado para la función de reparto, será este el punto de partida con el cual se empezará una vez más el movimiento exploratorio. El proceso es iterativo, y se realiza hasta que ya no es posible generar mejores resultados para la función de reparto, en cuyo caso el proceso finaliza siempre y cuando se cumpla con la condición de parada. En caso contrario, la búsqueda continúa para una longitud de paso menor.

Finalmente de todo el proceso se obtienen los datos del caudal, altura de presión y el óptimo reparto de la función para el escenario analizado. El proceso se realiza para todos los escenarios requeridos, variando el factor de demanda.

Un resultado característico de este tipo de optimización es el que recoge la Figura 2. Dicha figura recoge el resultado de la optimización energética de una cierta red de distribución desde tres fuentes de suministro diferentes.

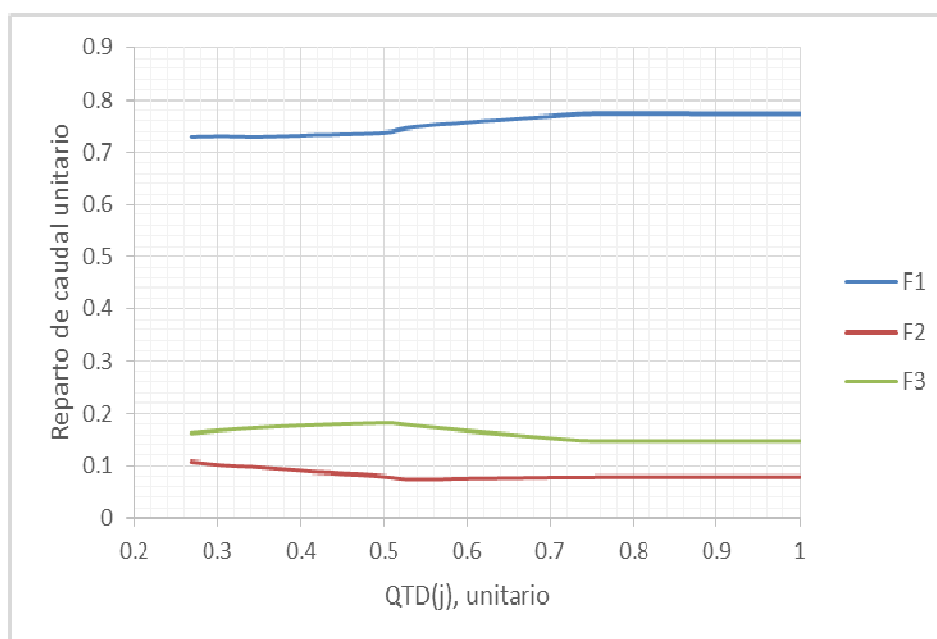


Figura 2. Reparto de caudales en una red con tres fuentes.

Como puede apreciarse en la Figura 2, en el eje de abscisas se recoge el caudal total suministrado. En este caso dicho caudal máximo suministrado $QTD(j)$ se representa como una proporción del caudal máximo demandado. Por el contrario en el eje de ordenadas se reparte el caudal unitario aportado desde cada fuente. Es decir, representa la proporción del caudal suministrado que proviene de cada una de las fuentes. tal como puede apreciarse en la figura, dicho reparto puede bien mantenerse constante o por el contrario variar en función de la demanda de la red.

3. Aplicación a un caso de estudio

A fin de ilustra la metodología desarrollada se planea un caso práctico de aplicación, consistente en analizar el potencial funcionamiento del sector sur de la red de distribución de la Cooperativa el Plantío y la Cañada (ver figura 3).

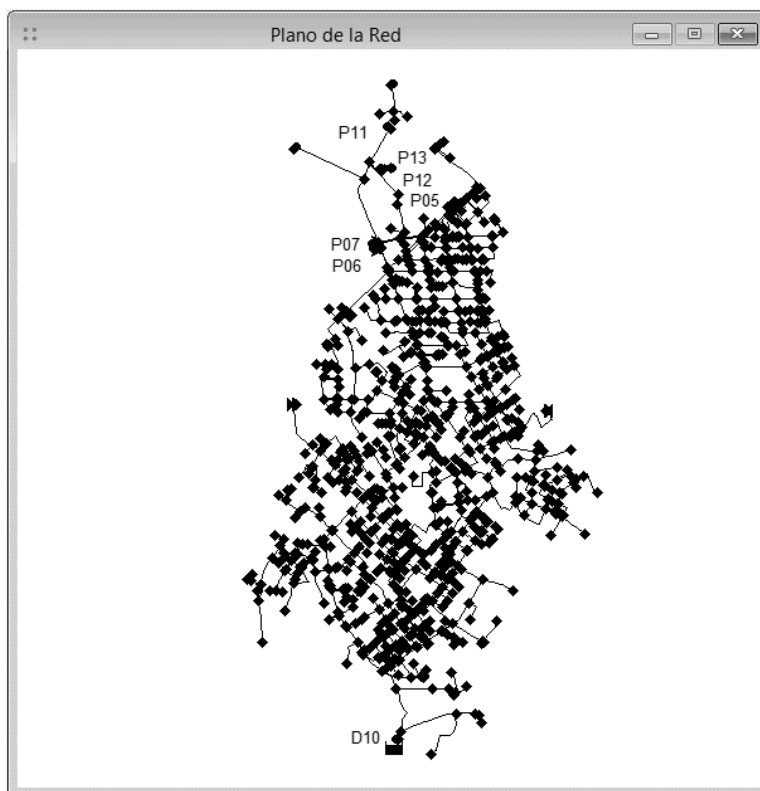


Figura 3. Red sur Cooperativa el Plantío y la Cañada

La red considerada análisis consta de siete potenciales fuentes de suministro las cuales funcionan en régimen por bombeo, y de las que seis son pozos y una séptima corresponde a una captación de un río con un grupo de presión que bombea el agua a la red. En este caso se ha considerado la restricción física respecto del caudal máximo que puede suministrar cada fuente, tal y como se muestra en la tabla 1.

Los consumos de la red son dependientes de la presión por lo que se respetan los coeficientes emisores que están ya ingresados en el modelo. La presión mínima de referencia $p_{k,min}$ así como el resto de parámetros adoptados se muestran en la interfaz de la aplicación informática desarrollada para la optimización de los cálculos a través de la herramienta TOOLKIT de EPANET (ver figura 4).

ID	Q_{\max} (l/s)
P05	9
P06	3
P07	7
P11	17
P12	15
P13	15
D10	80

Tabla 1. Caudal máximo de las fuentes de suministro

OPTIMIZACIÓN DEL REPARTO (MÉTODO CONTINUO)

ID_Embalse (Variable): D10

Altura en cabecera inicial (HCab): 100

Emisores:
 Sin coeficientes emisores
 Con coeficientes emisores

Cota Embalse (Hcot): 77.20

Número Total de Fuentes (Nf): 6

pk_min: 20

CALCULAR

FDmax: 2

FDmin: 0.05

Parámetros de Hooke and Jeeves:
Factor de control de pare (E) = 0.01
Longitud de paso inicial (D) = 0.1
Factor de convergencia (α) = 2

Incremento de FD: 0.05

Incremento para $x_{(n,c)}$: 0.1

Figura 4. Aplicación informática con los parámetros adoptados para la optimización del reparto

Una vez realizado el análisis se obtiene el reparto óptimo tal y como se muestra en la figura 5. En esta figura se observa el reparto óptimo en función de las distintas fuentes de suministro de la red. Como puede apreciarse algunas fuentes alcanzan su capacidad máxima de bombeo. Esto origina que al alcanzar su capacidad máxima de bombeo, el resto de pozos vayan sumándose a la contribución de suministro de agua demandada por la red.

Le metodología de optimización empleada en este caso permite no solo la optimización del reparto lograda buscando la situación energéticamente más económica, sino que además presente como valor añadido el establecer el funcionamiento programado que debe establecerse desde las distintas fuentes de suministro. Adicionalmente pone de manifiesto aquellas fuentes de suministro que no conviene que participen en el bombeo a menos que la demanda requiera estrictamente su suministro.

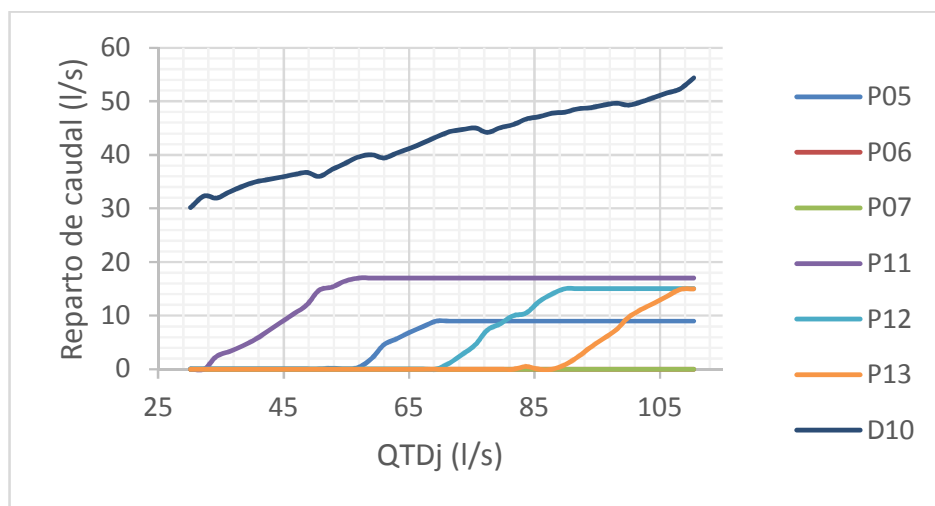


Figura 4. Reparto óptimo de caudales para la red sur Cooperativa el Plantío y la Cañada

4. Conclusiones

Del trabajo desarrollado y del ejemplo de aplicación presentado pueden extraerse una serie de conclusiones principales:

- El concepto de curva de consigna resulta imprescindible para abordar el estudio del suministro de redes de distribución de agua mediante grupos de bombeo. Este concepto de curva de consigna junto con el empleo de la metodología de optimización presentada permite determinar la altura de presión y el rango de caudales de cada una de las fuentes de suministro que supone un menor consumo energético global del sistema.
- La utilización de un algoritmo de optimización (Hooke & Jeeves) se ha mostrado mucho más eficaz desde el punto de vista computacional que la utilización de una matriz con todas las potenciales soluciones del problema. Aunque el algoritmo de Hooke & Jeeves presenta problemas de bloqueo en óptimos locales, el uso de restricciones que limiten las direcciones de búsqueda ha permitido superar las dificultades y dar como resultado un algoritmo válido para la solución del problema deseado.
- La aplicación de la metodología planteada a un caso real ha permitido responder a preguntas tales como: ¿qué fuente es la que asume mayor reparto?, ¿cuál es la influencia de la configuración de las fuentes de suministro respecto del consumo energético de la red?, ¿cuál es la influencia de los consumos dependientes de la presión?, ¿cómo influye la capacidad máxima de suministro que posee cada fuente de abastecimiento?, etc.

- Adicionalmente se puede rescatar destacar como valor añadido del método que no solo permite obtener el reparto óptimo de caudales, sino que permite conocer cuando son necesarias y cuando no.

Por último, cabe mencionar que la metodología puede generalizarse para incluir restricciones que a lo largo del trabajo no se han considerado, tales como: válvulas, depósitos, tarifas eléctricas, costos de operación y mantenimiento, patrones de demanda variables, etc. Todos estos parámetros pueden tener influencia sobre el reparto óptimo de caudales y pueden ser incluidos en la función de optimización. No obstante, la metodología presentada continuaría siendo válida y podría ser adaptada fácilmente para incluir cualquiera de estas consideraciones.

Referencias

Hooke, R. & Jeeves, T.A., 1961. Direct search solution of numerical and statical problems. *Journal of the ACM*, 8(April), pp.212–229.

Iglesias Rey, P.L.; Martínez, F. Javier; Fuertes, Vicente; López, Gonzalo (2007). Utilización de la curva de consigna de un abastecimiento de agua para determinar el régimen de explotación más eficiente. *Tecnología del agua*, 286(Julio), pp.50–55.

Ostfeld, A., & Tubaltzev, A. (2008). Ant colony optimization for least-cost design and operation of pumping water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* (ISSN: 0733-9496), 134(2), 107-118. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:2(107).

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