

# Optimización de costos de bombeo en redes de distribución de agua con capacidad de almacenamiento mediante el uso del concepto de curva de consigna

Christian F. León-Celi<sup>a1</sup>, Pedro L. Iglesias-Rey<sup>a2</sup> y F. Javier Martínez-Solano<sup>a3</sup>

<sup>a</sup> Departamento de hidráulica y medio ambiente. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia 46022, España. E-mail: <sup>a1</sup>clnival@yahoo.es, <sup>a2</sup>piglesia@upv.es, <sup>a3</sup>jmsolano@upv.es

Línea temática B | Hidrología, usos y gestión del agua. Riegos. Energía hidroeléctrica.

---

## RESUMEN

La optimización de los costos de bombeo continúa siendo una prioridad al momento de optimizar los costos de operación en redes de distribución. Para ello, es conveniente encontrar los puntos de operación óptimos independientemente de las restricciones de caudal y altura de los sistemas existentes. Así, el objetivo de este trabajo es encontrar la curva de mínima energía o curva de consigna con el menor costo asociado que debe seguir cada estación de bombeo para mantener la presión nodal al mínimo posible y los niveles de los tanques dentro de un rango especificado. Los costos considerados comprenden el bombeo, la producción de agua y costos de penalización por incumplimiento de presión y de niveles de almacenamiento. La función objetivo se evaluó con el algoritmo *Differential Evolution*. Como caso de estudio se ha utilizado la red Anytown. Los resultados muestran el máximo ahorro posible mediante el uso de la curva de consigna.

**Palabras clave** | curva de consigna, optimización de costos, bombeo, redes de agua.

---

## INTRODUCCIÓN

Una de las prioridades para la disminución de los costos de operación en redes de distribución es la minimización de los costos del bombeo, esto se debe principalmente a los altos costos de la energía hoy en día. Varias son las alternativas que existen para la reducción de dichos costos: a) disminución ya sea de la descarga o la altura de bombeo, b) mejora de la eficiencia del sistema, c) bombeo de agua y almacenamiento en puntos altos durante horas con bajas tarifas de energía, d) selección de la mejor combinación de bombas entre aquellas disponibles, e) incremento de la vida útil de los sistemas de bombeo mediante el control de encendidos y apagados de las bombas. Aunque algunas de estas estrategias usualmente se aplican conjuntamente, la mayoría de las investigaciones desarrolladas hasta el momento se enfocan mayormente en la selección de la combinación de bombas que produzca el menor costo. No obstante, para lograr mayores ahorros primero es necesario encontrar la descarga óptima y la mínima altura de bombeo que cada estación debe suministrar durante el periodo de simulación para cumplir con los requerimientos de presión y de almacenamiento de la red sin el uso de ningún sistema de bombeo preseleccionado, lo cual se constituye como el objetivo principal del presente trabajo.

En términos generales, el menor costo de operación se encuentra asociado a la programación del bombeo de menor costo. Esta se puede calcular bien sea de forma directa o indirectamente. En enfoque directo se refiere al momento y la duración en que cada bomba debe estar encendida durante el periodo de simulación. Indirectamente la programación de bombeo se puede encontrar como función de otras variables: la descarga (o altura de bombeo) de cada bomba, y la trayectoria de menor costo de los niveles de almacenamiento de los tanques reservorios. De esta forma las variables de decisión pueden ser el tiempo, el caudal, la altura de bombeo y los niveles de los tanques. Para encontrar estas variables se han implementado diversos métodos de optimización. Algunos de los primeros son la programación lineal, programación dinámica, y programación no lineal (Ormsbee y Lansey 1994). Sin embargo, la mayoría de ellos están sujetos al cumplimiento de ciertas condiciones como grandes

simplificaciones de la red, así como el número de tanques y el número de bombas que son capaces de manejar. Esto debido principalmente a las limitaciones de cálculo computacional de la época. A medida que estas limitaciones se han ido superando nuevos y complejos algoritmos se han ido implementado, tales como algoritmos genéticos, colonia de hormigas, lógica difusa, entre otros (Vamvakeridou-Lyroudia et al. 2005; López-Ibáñez et al. 2008; Abkenar et al. 2015). Estos algoritmos son más efectivos contra los problemas de mínimos locales y se centran además en la optimización de la velocidad de búsqueda, por lo tanto, algunas veces se realizan combinaciones entre ellos tal y como se observa en los algoritmos híbridos. Adicionalmente, otros métodos incluyen además del menor costo de bombeo otros beneficios hidráulicos (p.e. gestión de la presión) por lo que se introduce los criterios multiobjetivo (Giacomello et al. 2013; De Paola et al. 2016). Aunque hoy en día es posible admitir un gran número de variables en lo que respecta al número de bombas (p.e. caudal y altura de presión), resulta más conveniente generar políticas de bombeo para cada estación en lugar de para cada bomba. De esta forma, la programación del bombeo se puede discretizar luego en problemas más pequeños dando lugar a la optimización de cada estación por separado. Por otra parte, los criterios multiobjetivo hacen que el problema sea más complejo y algunas veces se pueden introducir implícitamente, por lo que resulta innecesarios.

Un aspecto común de una gran parte de las metodologías es que dependen de las curvas de las bombas instaladas. Por lo tanto, cuando se encuentra el mínimo costo que resulta de la optimización, se desprecia la posibilidad de encontrar una mejor solución con un sistema de bombeo diferente. Esto se traduce en la posibilidad de que algunas de las estaciones de bombeo se encuentren sobredimensionadas o subdimensionadas. En este contexto, este trabajo presenta un nuevo enfoque que trata con tres inconvenientes: a) reducción de las variables de decisión en las estaciones de bombeo, b) criterio multiobjetivo implícito, y c) uso de bombas cuyas curvas no se encuentran predefinidas.

La función objetivo a minimizar toma en consideración cuatro términos. Los dos primeros son los costos de bombeo calculados sobre una tarifa eléctrica con una estructura diaria y los costos de producción de agua. Los costos adicionales son costos de penalización relacionados con la presión nodal y con las restricciones del volumen de almacenamiento de los tanques. Es importante enfatizar que los costos de bombeo son calculados con base en el concepto de curva de consigna (Iglesias-Rey et al. 2012; León-Celi et al. 2016). La curva de consigna o curva de mínima energía es una curva teórica que para una descarga dada permite definir la mínima altura de bombeo requerida para cumplir con la demanda, la mínima presión nodal, y la recurrencia de los niveles de los tanques de almacenamiento al final del periodo de simulación. Para ese propósito, se asume que las estaciones de bombeo se comportan como nudos, es decir, que no tienen limitaciones ni de caudal ni de presión. Por tanto, los datos de entrada del modelo de optimización serán las descargas de cada estación de bombeo y los datos de salida serán las mínimas alturas de presión requeridas.

La optimización de la función objetivo se ha llevado a cabo mediante el algoritmo *Differential Evolution* (Storn y Price 1997) el cual está diseñado para tratar con problemas no lineales, es fácil de programar y admite un gran número de variables. La programación del método se ha realizado mediante la plataforma Visual Studio 2012 y el Toolkit de Epanet.

Finalmente, la metodología ha sido aplicada a la red de distribución Anytown (Walski et al. 1987), la cual ha sido ampliamente estudiada en cuanto a problemas de optimización se refiere. Por lo que se ha tomado como punto de referencia una solución previamente optimizada (Vamvakeridou-Lyroudia et al. 2005), lo cual permite entender de mejor manera las ventajas que resultan de la metodología formulada en este trabajo. Los resultados y las conclusiones se muestran al final del documento.

---

## MÉTODO

### Curva de consigna

La curva de consigna se puede entender como la mínima energía (p.e. caudal y altura de bombeo) requerida por cada estación de bombeo para cumplir con los consumos de agua de la red durante el periodo de simulación. Al mismo tiempo, se debe mantener la mínima presión permitida en el nudo crítico de la red (p.e. nudo con la presión más baja). La mínima presión es una restricción externa la cual depende de las especificaciones de diseño de la red. Para calcular la curva de consigna se deben asumir las siguientes premisas: a) las estaciones de bombeo se comportan como nudos que suministran agua a la red, b)

V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

cada fuente de agua tiene una estación de bombeo asociada, aunque la relación inversa no está sujeta a las estaciones de bombeo, c) el modelo hidráulico es suficientemente representativo de la red. La manera más sencilla de calcular la curva de consigna es dentro del entorno del software Epanet, que se corresponde con la descripción que se presenta a continuación. El proceso será diferente dependiendo del número de estaciones de bombeo y de si la red tiene o no capacidad de almacenamiento.

Cuando existe solamente una estación de bombeo y no hay tanques de almacenamiento, la estación de bombeo es representada como reservorio, es decir. con capacidad ilimitada de agua. En este caso, el análisis de la red será de tipo estático ya que no existe capacidad de almacenamiento y las demandas dependen directamente del sistema de bombeo. Por tal motivo, la curva de consigna se construirá sobre cada cambio de demanda que corresponde a un punto de la curva. Como primer paso se debe asignar un valor inicial a la altura total del reservorio. Luego, el modelo hidráulico se resuelve y se encuentra tanto el nudo crítico como su altura de presión. El siguiente paso consisten en la comparación entre la presión del nudo crítico y la mínima presión requerida y luego se presentan dos alternativas. La primera es que la presión en el nudo crítico sea mayor que la mínima presión requerida, en tal caso, el valor de la altura del reservorio deberá ser disminuida. La segunda alternativa es que el valor de la presión sea menor, por lo que la altura del reservorio deberá incrementarse. La convergencia se alcanza cuando ambos valores (p.e. presión del nudo crítico y presión mínima requerida) son iguales. Finalmente, se obtiene como resultado la altura de caudal necesaria en el reservorio y el caudal definido para mantener un valor específico de la presión en el nudo crítico. Se resalta el hecho de que la curva de consigna tendrá tantos puntos como cambios de demanda existan durante el periodo de análisis.

En redes con más de una estación de bombeo, pero aún sin capacidad de almacenamiento el proceso es un poco diferente. Solamente una de las estaciones de bombeo (p.e. puede ser cualquiera) será representada como reservorio y las estaciones de bombeo restantes se representarán como nudos de abastecimiento. Como en el caso anterior, se debe dar un valor inicial a la altura total de reserva. No obstante, se debe incluir información adicional. Dicha información corresponde al caudal que debe ser abastecido por cada nudo (p.e. estación de bombeo) a la red para satisfacer todos los consumos durante el periodo de simulación. Una vez que se ha resuelto el modelo hidráulico, la presión de agua en el nudo crítico se corrige cambiando la altura del reservorio según convenga. De esta forma, las salidas del proceso son el caudal suministrado por el reservorio y la altura de presión de las estaciones de bombeo representadas como nudos.

El último caso se refiere a la inclusión de la capacidad de almacenamiento de la red, por lo tanto, el análisis deberá realizarse en periodo extendido. En este caso, todas las estaciones de bombeo se representarán como nudos con demanda negativa, por lo tanto, la presión en el nudo crítico no se podrá ajustar variando la altura del reservorio como en los casos anteriores. Esto se debe principalmente a que el llenado de los tanques requiere mayor presión en los nudos que la mínima necesaria, por otra parte, si no existe ninguna bomba en funcionamiento la presión dependerá enteramente de los tanques en lugar de las bombas. En este sentido el objetivo ya no es mantener la mínima presión en el nudo crítico, sino mantener la mínima presión posible que podrá ser igual o mayor a la mínima presión requerida. Por otro lado, la descarga de las estaciones de bombeo tiene que satisfacer no solo las demandas de los nudos de consumo sino también la demanda de los tanques. El caudal a ser suministrado por cada estación de bombeo se puede enunciar mediante la Ecuación (1).

$$Q_{j,i} = x_{j,i} \cdot K \cdot Qmd \quad (1)$$

donde  $Q_{j,i}$  es el caudal de la estación de bombeo  $j$  en el periodo de simulación  $i$ ;  $x_{j,i}$  es la variable de decisión que define la cantidad de caudal a ser suministrada por la estación de bombeo  $j$  en el periodo  $i$ , y que puede tomar un valor entre cero y uno (0,1),  $K$  es un valor constante que indica el caudal punta durante el periodo de simulación, y  $Qmd$  es el caudal medio diario demandado en la red.

Los valores de  $x_{j,i}$  deben mantener la mínima presión posible en el nudo crítico para cada periodo de simulación y satisfacer tanto las demandas de agua de los nudos de consumo como los requerimientos de los tanques de almacenamiento. Ya que dichos valores son desconocidos es necesario realizar un proceso de optimización. Sin embargo, si se considera solamente el caudal y la altura de presión obtenidas de la curva de consigna el análisis resultaría únicamente en la optimización energética de la red, por tanto, se debe tomar en consideración las tarifas eléctricas así como otros costos adicionales tal y como se explica en la siguiente sección.

## Función objetivo

El coste total (CT) de la función objetivo es el resultado de la suma de dos términos generales (Ecuación (2)). El primer término se refiere a los costos totales de operación (CTO) y el segundo abarcan los costos totales de penalización (CTP).

$$\text{Min } (CT) = (CTO + CTP) \quad (2)$$

Los CTO (Ecuación (3)) comprenden la suma de los costes de bombeo y los costos asociados con la producción de agua. La suma final se realiza tanto para el número total de estaciones de bombeo ( $Neb$ ) como para la cantidad total de periodos de simulación ( $Nps$ ).

$$CTO = \sum_{i=1}^{Nps} \sum_{j=1}^{Neb} \left( \frac{\gamma \cdot Q_{j,i} \cdot H_{j,i}}{\eta_j} \cdot t_i \cdot TE_{j,i} + Q_{j,i} \cdot CP_j \cdot t_i \right) \quad (3)$$

donde  $\gamma$  es el peso específico del agua;  $H_{j,i}$  es la altura de presión de la estación de bombeo  $j$  en el periodo  $i$ ;  $\eta_j$  es la eficiencia de la estación de bombeo  $j$ ;  $t_i$  es el tiempo de bombeo del periodo  $i$ ;  $TE_{j,i}$  es la tarifa eléctrica en la estación de bombeo  $j$  en el periodo  $i$ ; y  $CP_j$  es el costo de producción de agua expresado como coste por volumen de agua producido. El segundo término de la suma solo se considera y la estación de bombeo se encuentra asociada a una fuente de agua y si hay más de una fuente de agua en la red.

Los CTP (Ecuación (4)) son costos derivados del incumplimiento de dos restricciones: a) la presión en el nudo crítico debe ser igual o mayor a la mínima permitida, y b) los niveles de los tanques de almacenamiento al final del periodo de simulación deben ser igual o mayores a los niveles de los tanques al inicio del periodo de simulación.

$$CTP = \omega_1 \cdot \sigma_1 \cdot \sum_{i=1}^{Nps} (Hr - Hc_i) + \omega_2 \cdot \sigma_2 \cdot \sum_{d=1}^{Ndt} (l_{1,d} - l_{Tf,d}) \quad (4)$$

donde,  $\omega_1$  es una variable discreta que solo puede tomar dos valores, cero o uno. Cuando  $Hr$  (mínima presión requerida) es mayor o igual que  $Hc_i$  (presión en el nudo crítico en el periodo  $i$ ) toma el valor de cero, de otra forma, será uno y por tanto hay un costo de penalización añadido;  $\sigma_1$  es un factor de conversión que transforma la diferencia entre presiones en costo;  $\omega_2$  tiene la misma función que  $\omega_1$  pero su valor será cero cuando el nivel del tanque  $d$  al final del periodo de simulación ( $l_{Tf,d}$ ) sea mayor o igual que su nivel inicial ( $l_{1,d}$ ), pero si la condición no se cumple se asumirá un valor igual a la unidad;  $\sigma_2$  es el factor de conversión que transforma la diferencia de niveles en costos y  $Ndt$  es el número total de tanques reservorios de la red.

Se puede notar que la función objetivo no persigue solamente minimizar los costos de bombeo sino también mantener la presión nodal tan baja como sea posible, así como los niveles de los tanques dentro de un rango preestablecido. De esta manera, no hay necesidad de incluir criterios de búsqueda adicionales o multiobjetivo ya que se pueden considerar en la función siempre y cuando estos sean expresados como costos.

## Algoritmo de optimización

Para minimizar la función objetivo se ha empleado el algoritmo *Differential Evolution* (Storn y Price 1997), el cual es un método de búsqueda directa diseñado para evaluar funciones no lineales y no diferenciables, y que resulta fácil de programar.

El primer paso para la aplicación del método consiste en generar aleatoriamente una población inicial de  $NP$  vectores de parámetros, cada uno con un total de  $Nd$  elementos, es decir el número de dimensiones.  $Nd$  está dado por el producto entre el número de estaciones de bombeo ( $Neb$ ) y la cantidad de periodos de simulación ( $Nps$ ). En el caso del presente trabajo se ha

tomado el valor de  $NP$  igual al de  $Nd$ . Se debe evaluar cada uno de los  $NP$  vectores. Las nuevas generaciones o poblaciones serán el resultado de tres procesos: *mutación*, *cruce* y *selección*.

La *mutación* se puede realizar a través de distintos planteamientos; no obstante, para el problema de estudio los mejores resultados se han obtenido de la aplicación de la Ecuación (5). El proceso se debe repetir  $NP$  veces.

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (5)$$

donde  $v_{i,G+1}$  es el vector  $i$  de  $Nd$  dimensiones de la generación  $G+1$ ;  $x_{r1,G}$ ,  $x_{r2,G}$  y  $x_{r3,G}$  son vectores aleatorios y no iguales de la generación  $G$ ; y  $F$  es el factor que controla la escala de la variación diferencial, para el cual se asume un valor de 0.5.

El proceso de *cruce* se hace entre los individuos de cada vector de la generación  $G+1$  y la generación  $G$ . Para tal propósito se deben seguir las condiciones que se describen en la Ecuación (6).

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1}, & \text{si } rand(j) \leq CR \text{ o } j = rand(i) \\ x_{ji,G}, & \text{si } rand(j) > CR \text{ y } j \neq rand(i) \end{cases} \quad (6)$$

Donde  $u_{ji,G+1}$  es el elemento  $j$  del vector  $i$  de la generación  $G+1$  luego del *cruce* de elementos;  $v_{ji,G+1}$  es el elemento  $j$  del vector mutado  $i$  de la generación  $G+1$ ;  $x_{ji,G}$  es el elemento  $j$  del vector  $i$  de la generación  $G$  sobre el que se realiza la *mutación*;  $rand(j)$  es un número aleatorio entre cero y uno;  $rand(i)$  es un número aleatorio entero entre cero y el número de dimensiones ( $Nd$ ), y  $CR$  es el factor de *cruce* que ha asumido como 0.8.

Finalmente, si el vector  $u_{ji,G+1}$  genera un mejor resultado de la función que el vector  $x_{i,G}$ , este se convertirá en miembro de una nueva generación de la población como  $x_{i,G+1}$  pero si el valor obtenido es peor, entonces  $x_{i,G+1}$  será igual a  $x_{i,G}$ . Este proceso se conoce como *selección*, el cual consiste en la elección de los nuevos miembros de la población bajo los criterios explicados previamente. Una vez conformada la nueva población, el análisis se repite la veces que sea necesario hasta que se cumpla el criterio de parada que se haya establecido previamente.

## CASO DE ESTUDIO

### Red de distribución “Anytown”

Para la aplicación de la metodología de estudio se ha utilizado la red de prueba Anytown (Figura 1). El enunciado del problema original pretende mejorar la operación de la red con el mínimo coste mediante cualquiera de las siguientes acciones: 1) selección de tuberías nuevas, 2) instalación de nuevas bombas, 3) instalación de mayor capacidad de almacenamiento, y 4) rehabilitación de tuberías existentes (Walski et al. 1987; Centre for Water Systems 2017). Ya que el presente trabajo se enfoca únicamente en la optimización de los costes de bombeo, se utilizará como referencia una solución optimizada previamente como es el caso de Vamvakeridou-Lyroudia et al. (2005) en donde se presentan dos soluciones; para efectos del estudio se utilizará aquella solución denominada “*crisp solution*”. Debido a que la información de la red (p.e. diámetros, longitudes, rugosidades, etc.) se encuentra en las referencias mencionadas previamente, simplemente se introducirá aquella información que sea relevante al problema de estudio.

La solución de partida cuyo esquema se presenta en la Figura 1 (a) cuenta con un total de cuatro tanques de almacenamiento (T65, T150, T165 y T170) y una estación de bombeo compuesta por tres bombas idénticas, es decir, con la misma curva característica de bombeo y con un valor de la eficiencia del 65%. La tarifa eléctrica 0.12 \$/kWh se mantiene constante durante todo el periodo de simulación de 24 h. El esquema utilizado para la aplicación de la metodología de optimización es el de la Figura 1 (b), en el cual se conservan los mismos datos de la red con la excepción de que la estación de

bombeo se encuentra representada por un solo nudo (P10) que comprende todo el sistema de bombeo con una cota de 3.04 m que es la misma cota del reservorio.

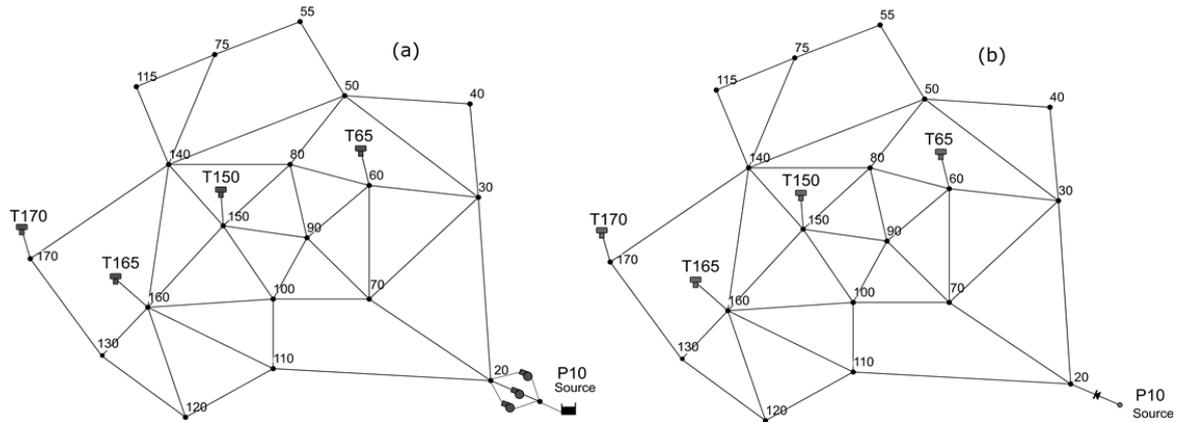


Figura 1 | (a) Esquema de la solución de partida de la red Anytown; (b) Esquema de la red Anytown previo el proceso de optimización

Respecto de los tanques reservorios el planteamiento del problema original prevé un volumen de protección contra incendios el cual se corresponde con el nivel mínimo, aunque su valor sea nulo. Los datos de los tanques se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 | Información de los tanques reservorios.

	Tanques				
	P10	T65	T150	T165	T170
<b>Cota (m)</b>	3.04	68.60	70.25	68.60	66.00
<b>Nivel inicial (m)</b>	-	1.41	0.28	5.55	2.56
<b>Nivel mínimo (m)</b>	-	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Nivel máximo (m)</b>	-	7.60	4.10	7.60	4.05
<b>Diámetro (m)</b>	-	10.89	15.94	10.89	9.85

Para el proceso de optimización se ha realizado tratando de conservar las condiciones iniciales de la solución de partida, por lo que no se ha realizado la optimización de los niveles iniciales de los tanques. Una vez que se ha aplicado el proceso de optimización el coste mínimo alcanzado fue de  $75.76 \cdot 10^4$  \$/año frente a los  $82.21 \cdot 10^4$  \$/año de la solución de partida por lo que el ahorro conseguido es de un 7.85%. Para entender mejor de donde viene el ahorro obtenido se puede observar la Figura 2 en la cual se representan los puntos de la curva de consigna (CC) resultantes del proceso de optimización y su tendencia. Adicionalmente se ha graficado las curvas características del sistema de bombeo, así como los puntos de operación de la solución de referencia. La gráfica muestra claramente el rango de operación de la solución de referencia en el cual hay un exceso de energía por parte del sistema de bombeo instalado y por consiguiente el costo de operación es mayor. Aunque la metodología aplicada conduce a mayores ahorros, estos sólo pueden alcanzarse mediante la regulación de la altura de bombeo del sistema instalado o cambiando el sistema de bombeo por uno que se ajuste de mejor forma a la curva de consigna. Por lo tanto, con la información obtenida será más fácil conocer el número de bombas necesario en la estación como el tipo de bombas (p.e. bombas de velocidad fija o bombas de velocidad variable). Además, se podrán adoptar estrategias para regular el caudal y la altura de bombeo de tal forma que se pueda incrementar la eficiencia de operación de las bombas y por consiguiente mayores ahorros.

La Figura (3) indica que los niveles finales de los tanques reservorios al término del periodo de simulación son los mismos que los niveles iniciales. Sin embargo, se puede observar que el único tanque que realmente participa del ciclo de la demanda es el tanque T165. Este hecho sugiere que dado que el costo de la tarifa eléctrica se mantiene constante, el uso de

cuatro tanques de almacenamiento podría ser excesivo ya que en este caso resulta más costoso bombear agua a puntos elevados que mantener la presión mínima en la red. De este modo almacenar agua en los tanques T65, T150 y T170 no representa mayor ahorro. Por tanto del análisis se desprende la posibilidad de optimizar el uso de la capacidad de almacenamiento de la red, lo cual puede traducirse en ahorros adicionales.

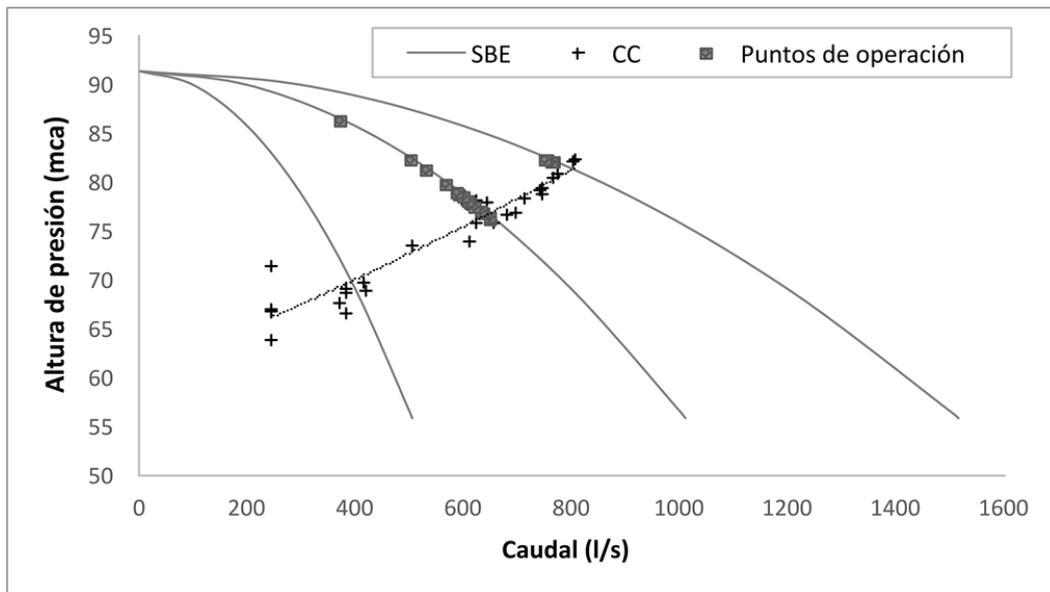


Figura 2 | Puntos de la curva de consigna (CC) vs puntos de operación del sistema de bombeo instalado

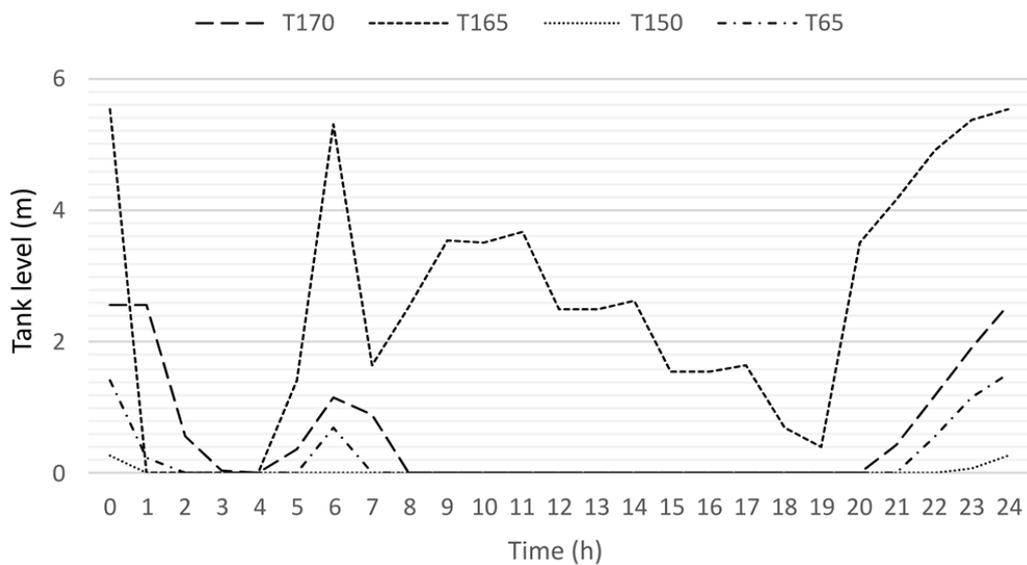


Figura 3 | Niveles de los tanques reservorios durante el periodo de simulación (24 h).

## CONCLUSIONES

Se ha presentado un nuevo enfoque para la minimización de costos por bombeo basado en el concepto de la curva de consigna. El método radica en encontrar los puntos de operación óptimos (p.e. caudal y altura de bombeo) de cada estación de bombeo mientras se mantiene la mínima presión posible en el nudo crítico de la red. Para tal propósito, se asume que para el

modelo de optimización de costos las bombas se comportan como nudos de inyección de caudal siendo las entradas del modelo las descargas de las estaciones de bombeo y las salidas las mínimas alturas de presión requeridas.

Para el cálculo de costos se han considerado dos términos generales, los costos de operación y los costos de penalización. Los costos de operación comprenden los costos de bombeo con una estructura diaria de la tarifa de energía y los costos de producción de agua. Por otra parte, los costos de penalización dependen de las restricciones de presión y almacenamiento de los tanques de la red.

La evaluación de la función objetivo se ha realizado por medio del algoritmo *Differential Evolution*. Este algoritmo está diseñado para responder a problemas no lineales, no diferenciables, y multidimensionales como es el caso del presente estudio. Se debe resaltar que el objetivo del trabajo no es testear diferentes algoritmos de optimización sino más bien probar la utilidad de la metodología que ha sido formulada. No obstante, el algoritmo aplicado es lo suficientemente robusto para tratar con un gran número de variables, es fácil de programar y es capaz de superar problemas de óptimos locales.

Como caso de estudio se ha utilizado la red de prueba Anytown. Los resultados muestran que es posible alcanzar mayores ahorros (p.e. 7.85%) siempre que se ajusten las curvas de funcionamiento del sistema de bombeo tan cerca como sea posible de la curva de consigna obtenida o mediante la selección de un sistema de bombeo más apropiado. La información obtenida muestra de forma más visual los puntos de operación del sistema de bombeo en los cuales hay un exceso o déficit de energía. Por lo tanto, es posible saber si la estación de bombeo está sobredimensionada o subdimensionada.

Este método sin duda será de utilidad para seleccionar sistemas de bombeo bajo condiciones prestablecidas de presión y capacidad de almacenamiento de la red. Además, ayudará a crear programas de bombeo de alta eficiencia. Por otra parte, aspectos como el uso de una estructura tarifaria más compleja, así como el dimensionamiento de los tanques reservorios pueden ser incluidos en el análisis. Sin embargo, para ello se requiere realizar una mayor investigación.

---

## REFERENCIAS

- Abkenar, S.M.S. et al., 2015. Evaluation of genetic algorithms using discrete and continuous methods for pump optimization of water distribution systems. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 8, pp.18–23.
- Centre for Water Systems, 2017. Anytown Water Distribution Network. Available at: <https://emps.exeter.ac.uk/engineering/research/cws/resources/benchmarks/expansion/anytown.php> [Accessed June 9, 2017].
- Giacomello, C., Kapelan, Z. y Nicolini, M., 2013. Fast Hybrid Optimisation Method for Effective Pump Scheduling. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(2), pp.175–183.
- Iglesias-Rey, P. et al., 2012. The Battle of Water Networks II: Combination of meta-heuristic techniques with the concept of setpoint function in water network optimization algorithms. In *WDSA 2012: 14th Water Distribution Systems Analysis Conference*. pp. 510–523.
- León-Celi, C. et al., 2016. A Methodology for the Optimization of Flow Rate Injection to Looped Water Distribution Networks through Multiple Pumping Stations. *Water*, 8(12), p.575.
- López-Ibáñez, M., Prasad, T.D. y Paechter, B., 2008. Ant Colony Optimization for Optimal Control of Pumps in Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(4), p.337.
- Ormsbee, L.E. & Lansley, K.E., 1994. Optimal Control of water supply pumping systems. *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 120(2), pp.237–252.
- De Paola, F. et al., 2016. An Application of the Harmony-Search Multi-Objective (HSMO) Optimization Algorithm for the Solution of Pump Scheduling Problem. In *Procedia Engineering*. pp. 494–502.
- Storn, R. y Price, K., 1997. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), pp.341–359.

Vamvakieridou-Lyroudia, L., Walters, G. & Savic, D., 2005. Fuzzy Multiobjective Optimization of Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(6), pp.467–476.

Walski, T.M. et al., 1987. BATTLE OF THE NETWORK MODELS: EPILOGUE. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113(2), pp.191–203.