

EXTENSIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE CON PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA PARA REDES CON CIRCUITOS

“XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje”

Juan Saldarriaga (1), Diego Páez (2), Laura Lopez (3), Natalia León (4)

(1) Profesor Titular, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA), Carrera 1 Este No. 19^a-40, Bogotá, Colombia. Email: jsaldarr@uniandes.edu.co. Teléfono: 3394949 Ext: 2810

(2) Profesor Instructor, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA), Carrera 1 Este No. 19^a-40, Bogotá, Colombia. Email: da.paez27@uniandes.edu.co. Teléfono: 3394949 Ext: 2810

(3, 4) Investigador, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA), Carrera 1 Este No. 19^a-40, Bogotá, Colombia. Email: ll.lopez28@uniandes.edu.co, n.leon40@uniandes.edu.co, Teléfono: 3394949 Ext: 2819

RESUMEN

El problema de diseño optimizado de redes de distribución de agua potable (RDAPs) ha sido estudiado desde hace más de 40 años. Para redes con topología abierta y un único embalse, el óptimo global puede ser alcanzado mediante Programación Lineal Entera (PLE). Dado que las RDAP típicas no cumplen con dichas condiciones, se desarrolló una metodología de diseño basada en la división de redes cerradas en redes abiertas que puedan ser diseñadas con PLE para después ajustar las demás tuberías de la red haciendo uso de criterios hidráulicos. La metodología fue probada en tres redes benchmark presentando resultados de bajo costo en un tiempo de cálculo significativamente menor respecto a otras aproximaciones.

Palabras claves: Diseño optimizado, Redes de distribución, Programación lineal entera.

ABSTRACT

Optimized design of water distribution systems (WDS) has been studied for over 40 year now. When the system has an open topology and only one reservoir, the global optimum can be reached with Integer Linear Programming (ILP). Considering that typical WDS don't fulfill those conditions, a new design methodology was developed, based on the decomposition of looped networks into open networks that can be designed with ILP and then adjust the other pipes of the network using hydraulic criteria. The methodology was tested in three benchmark networks reaching results of low cost with a significantly reduced computational time in regard to other approximations.

Key words: Optimized design, Water distribution systems, Integer Linear Programming.

SOBRE EL AUTOR PRINCIPAL

Juan Saldarriaga: Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes. Área de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Coordinador del Centro de Investigación Estratégica del Agua (CIE-AGUA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes. Director del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados CIACUA del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes.

INTRODUCCIÓN

El problema de diseño optimizado de redes de distribución de agua potable (RDAPs) es uno de los problemas más estudiados a nivel mundial en relación con los sistemas de abastecimiento de agua. Esto, a razón de que el agua es un recurso esencial para la vida y el desarrollo humano y que los recursos para proveer del servicio a la población son usualmente escasos.

Si bien el diseño de RDAP puede involucrar diferentes criterios además de los costos constructivos (e.g. resiliencia, impacto ambiental y calidad de agua), es este criterio el más utilizado y usualmente del cual se parte para proponer metodologías que incluyan algún otro criterio. De esta manera el planteamiento formal del problema es:

$$\text{Minimizar } \sum_{p \in P} (\text{Costo}(d_p) \cdot L_p) \quad (1)$$

sujeto a:

$$A_i^t \geq A_{\min}^t \quad \forall i \in N; \forall t \in T \quad (2)$$

$$d_p \in D \quad \forall p \in P \quad (3)$$

donde P = conjunto de tuberías de la red; d_p = diámetro asignado a la tubería p ; L_p = longitud de la tubería p ; $\text{Costo}(d)$ = costo por unidad de longitud de una tubería con diámetro d ; A_i^t = valor de una variable de interés A en el nudo i bajo la condición de demanda t ; A_{\min}^t = valor mínimo admisible de la variable A bajo la condición de demanda t ; N = conjunto de nudos de la red; T = conjunto de escenarios de demanda a ser analizados; y D = conjunto de diámetros disponibles en el mercado. Usualmente la variable de interés A es la presión en el nudo aunque para algunos casos se ha incluido algún término de calidad como cloro residual (Dandy & Hewitson, 2004) y T sólo tiene escenarios de demanda extremos (e.g. hora pico o caudales de incendio).

Yates et al. (1984) demuestran que dicho problema es NP-DURO y por lo tanto solo puede ser resuelto de manera aproximada en un tiempo computacional aceptable. Es por ello que investigaciones recientes han hecho uso de metaheurísticas para encontrar soluciones aceptables al problema dada la facilidad de implementación de dichas técnicas, la robustez que han presentado en otros problemas de optimización y la capacidad de considerar la restricción de diámetros discretos. Algunos ejemplos de estos algoritmos son Algoritmos Genéticos (Savic & Walters, 1997), Búsqueda de Armonía (Geem,

2006), Scatter Search (Lin et al., 2007), Entropía Cruzada (Perelman & Ostfeld, 2007), Recocido Simulado (Reca et al., 2007), Enjambre de Partículas (Geem, 2009) entre otros.

Todas estas metodologías metaheurísticas son algoritmos inspirados en comportamientos observados en la naturaleza a partir de los cuales se generan un gran número de posibles soluciones al problema de manera aleatoria, cada una de las cuales es evaluada tanto con la función objetivo como con todas las restricciones del problema. Esto implica que para el caso de diseño de RDAP cada posible solución es una configuración de diámetros de la red que debe ser revisada mediante una ejecución hidráulica, para asegurar que se cumplan con las restricciones y, dada la cantidad de ejecuciones hidráulicas que llegan a ser necesarias, el tiempo computacional requerido por estas metodologías llega a ser considerable.

Como alternativa a este tipo de soluciones se han considerado criterios hidráulicos basados en el trabajo de I-Pai Wu (1975), según el cual, para una tubería en serie con demandas homogéneas en todos sus nudos, el diseño óptimo del sistema genera un línea de gradiente hidráulico (LGH) parabólica separada de una LGH recta un valor equivalente al 15% de la energía disponible entre el embalse y el nudo más alejado, en el punto medio de la trayectoria. Así, dicho concepto fue extendido por Villalba (2004) y Ochoa (2009) llegando a proponer la metodología OPUS (Optimal Power Use Surface) de uso de criterios hidráulicos para diseño de RDAP (Takahashi et al., 2010).

Así, este trabajo presenta los resultados del continuo perfeccionamiento que se hace a la metodología OPUS, esta vez haciendo uso de los pasos iniciales de separación de las redes cerradas en redes abiertas para después aplicar Programación Lineal Entera (PLE) que, como ya lo describen Alperovits & Shamir (1977), encuentra los óptimos globales del problema para redes abiertas con un único embalse.

METODOLOGÍA

La metodología de diseño propuesta puede ser dividida en 5 subprocesos independientes según lo presentado en la Figura 1. Los pasos *Búsqueda de Sumideros* y *Optimización* de la metodología propuesta son pasos heredados de la metodología OPUS mencionada anteriormente (Takahashi et al., 2010). Sin embargo los pasos intermedios representan una variación importante en el algoritmo especialmente el *Diseño con PLE*.

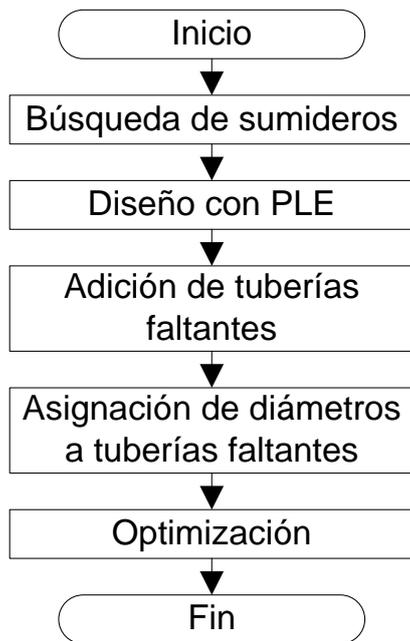


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

Búsqueda de sumideros

En este subproceso se toma la red cerrada original y, haciendo uso de dos principios hidráulicos y de minimización de costos, se genera una red abierta (i.e., entre dos puntos cualesquiera de la red existe un único camino que los una) adjunta a cada fuente de agua de la red original. El primer principio indica que un diseño de mínimo costo debe proveer agua a cada nudo de demanda a través de una única ruta o trayectoria de flujo. Esto debido a la ineficiencia hidráulica asociada con la redundancia de tuberías (Saldarriaga, 1998). Así, redes abiertas pueden ser considerablemente menos costosas que redes cerradas (aunque también resultan menos confiables (Todini, 2000)). De esta manera, este subproceso busca la manera de transformar la geometría de la red para generar una red abierta (usualmente denominadas estructuras de árbol por su parecido con las ramificaciones) mediante la identificación de nudos sumideros (nudos con altura piezométrica menor que todos sus vecinos).

El segundo principio se deriva de las ecuaciones de pérdidas por fricción en tuberías con flujo presurizado (Darcy-Weisbach & Colebrooke-White o Hazen-Williams). Suponiendo que todas las demás variables de la ecuación permanecen constantes, es posible encontrar una relación biunívoca entre el caudal de diseño (Q) y el diámetro requerido. Además, si se conoce la relación entre el diámetro de la tubería y el costo por unidad de longitud de la misma, es posible encontrar una relación entre Q y

el costo por unidad de longitud de la tubería, tal y como se muestra en la Figura 2.

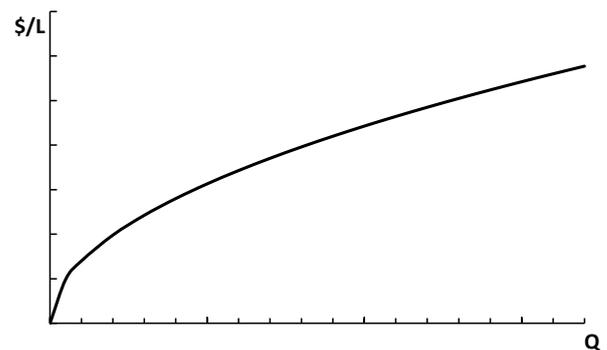


Figura 2. Relación esquemática entre el caudal de diseño (Q) y el costo por unidad de longitud de tubería (\$/L).

En la Figura 2, es posible notar que a medida que aumenta el caudal de diseño, el costo marginal de la tubería decrece. Es decir que agregar caudales en unos pocos tubos reduce el costo total de la red. De esta manera, teniendo en cuenta los dos principios analizados, se diseñó un algoritmo recursivo de definición de la estructura de árbol. Este algoritmo inicia en cada fuente o embalse de la red y recorre las tuberías hacia aguas abajo agregando a la red abierta un tubo y nudo a la vez. El conjunto de parejas tubo-nudo que pueden ser agregados en cada iteración se denomina ‘frente de avance’, y cada una de dichas parejas se le asigna un valor de una función Beneficio/Costo (Ecuación 4) que permite seleccionar la pareja más conveniente para ser agregada a la red.

$$B/C(i, p) = \frac{QD_i}{C(p, QD_i) + \sum_{\text{AguasArriba}} \Delta C(QD_i)} \quad (4)$$

donde $B/C(i, p)$ = función Beneficio/Costo evaluada para el nudo $i \in N$ y para el tubo $p \in P$; QD_i = caudal demandado en el nudo i ; $C(p, QD_i)$ = costo de mover el caudal QD_i por la tubería p (es igual al producto de la longitud de p y el valor de costo por unidad de longitud de acuerdo a la evaluación numérica de la función de la Figura 2); y $\Delta C(QD_i)$ = costo adicional o marginal de mover el caudal QD_i por cada tubería aguas arriba del nudo i .

A manera de ejemplo se puede tomar la red benchmark Hanoi (Figura 3) y ver los primeros pasos de la metodología. Iniciando desde el embalse (ID=1), la única pareja tubo-nudo que puede ser agregada es la del tubo 1 y el nudo 2 (<1,2>). Después la pareja <2,3> es agregada.

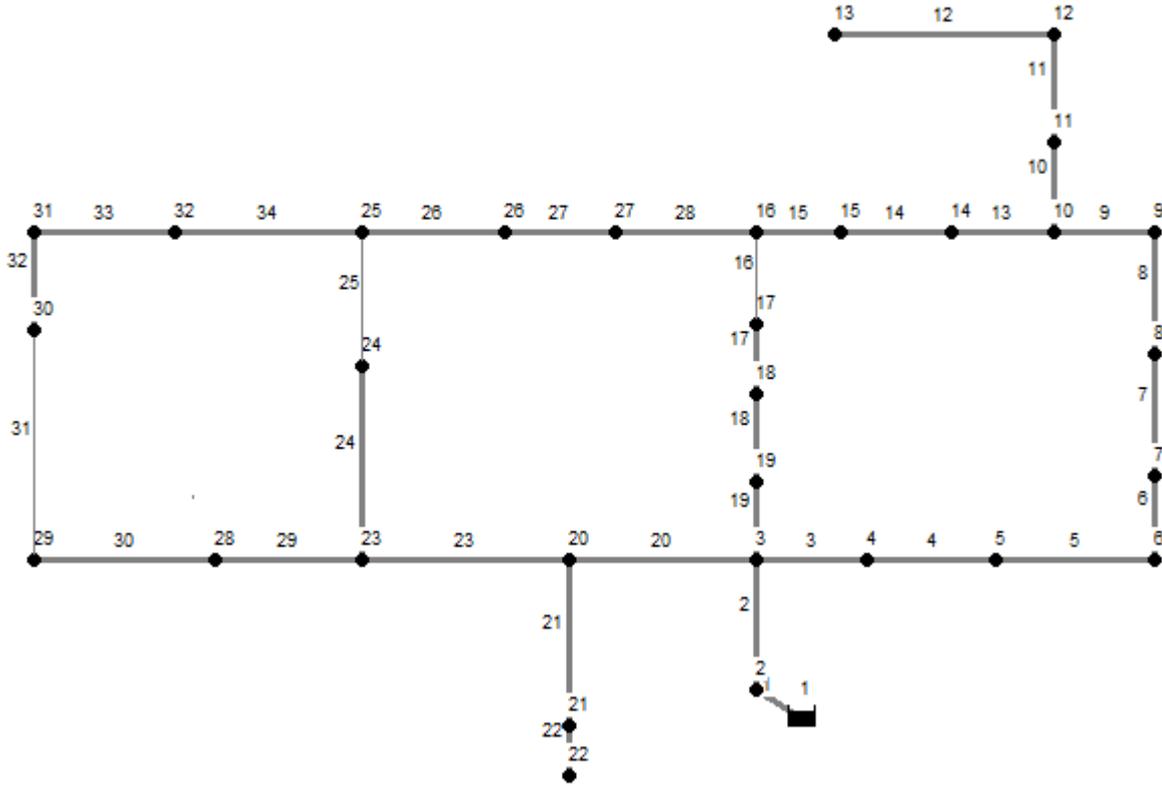


Figura 3. Geometría de la RDAP Hanoi. Etiquetas con ID de tubos y nudos de la red.

En esta iteración, el Frente de Avance se compone de las parejas $\langle 3,4 \rangle$, $\langle 19,19 \rangle$ y $\langle 20,20 \rangle$, y por lo tanto la función Beneficio/Costo debe ser evaluada para cada una de las tres. Como resultado de dicha evaluación se selecciona la pareja $\langle 19,19 \rangle$ dado su mayor Beneficio/Costo. De nuevo se redefine el Frente de Avance, que ahora tiene a las parejas $\langle 3,4 \rangle$, $\langle 18,18 \rangle$ y $\langle 20,20 \rangle$ y se continúa el mismo procedimiento. En la Figura 3 se presentan resaltadas las tuberías que al final de procedimiento fueron agregadas a la red abierta, siendo entonces las tuberías finas aquellas que no hacen parte de la misma (Tuberías 16, 25 y 31).

Diseño con PLE

En este procedimiento se plantea el diseño de cada red abierta generada en el proceso anterior, como un problema de optimización lineal para después resolver el problema mediante el software Xpress IVE el cual implementa métodos de solución como Simplex y Branch and Bound.

El problema linealizado tiene entonces las siguientes variables de decisión binarias:

$$X_{ijd} = \begin{cases} 1 & \text{si la sección entre } i \in N \text{ y } j \in N \\ & \text{tiene el diámetro } d \in D \\ 0 & \text{d.l.c.} \end{cases}$$

de manera que X_{ijd} representa la decisión de poner o no el diámetro d en la tubería que va del nudo i al nudo j .

Por otro lado, las restricciones del problema son formuladas de manera lineal respecto a X_{ijd} como se presenta en la Ecuación 5 y la Ecuación 6 para el caso de la restricción de presión mínima en los nudos y la Ecuación 7 para asegurar que la solución del problema asigne un único diámetro a cada tubería:

$$LGH_i \geq LGH_{\min_i} \quad \forall i \in N \quad (5)$$

donde LGH_{\min_i} = altura piezométrica total mínima admisible en el nudo i (corresponde a la suma de la presión mínima del problema y la cota del nudo); y LGH_i = altura piezométrica total en el nudo i que es calculada mediante la Ecuación 6:

$$LGH_j = LGH_i - \sum_{d \in D} dp_{ijd} \cdot X_{ijd} \quad (6)$$

$$\forall i, j \in N | \exists w(i, j)$$

donde dp_{ijd} = pérdidas totales de energía en el tubo que va del nudo i al nudo j cuando éste tiene el diámetro d ; y $w(i, j)$ = función que asegura que la

restricción únicamente aplique cuando el nudo j esta inmediatamente aguas abajo del nudo i . Y finalmente:

$$\sum_{d \in D} X_{ijd} = 1 \quad \forall i, j \in N | \exists w(i, j) \quad (7)$$

que asegura que solo una de las variables de decisión tome el valor de 1.0 para cada tramo de tubería existente.

Asimismo, la función objetivo se escribe de manera linealizada respecto a X_{ijd} , calculando a priori los costos de poner cada posible diámetro en cada posible tubería de la red abierta:

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{d \in D} C_{ijd} \cdot X_{ijd} \quad (8)$$

donde C_{ijd} = costo de poner el diámetro d en la tubería que va del nudo i al nudo j .

Los parámetros de la formulación lineal dp_{ijd} y C_{ijd} generan matrices de $|P| \times |D|$ que para el caso de las pérdidas totales de altura piezométrica en cada tubo pueden ser calculados mediante una ejecución hidráulica de la red abierta por cada diámetro disponible en D . Por otro lado los valores de la matriz de costos pueden ser calculados como el producto de los costos por unidad de longitud de cada diámetro disponible en D y la longitud de cada tubo p .

Una vez conocidos todos los parámetros de la formulación lineal, el programa Xpress IVE soluciona el problema de manera óptima, determinando así los valores de X_{ijd} que minimizan los costos constructivos.

Adición de tuberías faltantes y asignación de diámetros a éstas

Dado que la red a diseñar es una red cerrada a la cual no se le pueden quitar tuberías (i.e. el diámetro cero no pertenece a D), es necesario volver a incluir las tuberías no consideradas en el procedimiento anterior para entregar un diseño completo del sistema.

Si se considera una red con un único embalse, que ya ha pasado por lo anteriores subprocesos de la metodología, se tendría una red abierta ya diseñada que cumple con las restricciones de presiones en cada nudo del sistema. Si a esta red se le agregan las

demás tuberías con un diámetro mínimo, las presiones en la red serán mayores o iguales dada la mayor capacidad hidráulica de la red.

Teniendo esto en cuenta, en este procedimiento se agregan las tuberías no diseñadas en el procedimiento anterior con un diámetro igual al mínimo disponible. Sin embargo, dado que existen redes con más de un embalse y en las cuales agregar una tubería que conecte dos redes abiertas puede generar problemas con las presiones, se hace necesaria una revisión de las presiones posterior a este paso.

Optimización

El objetivo de este procedimiento es, por un lado asegurar que el diseño final cumpla efectivamente con la restricción de presión mínima en cada nudo de la red, y por otro lado, buscar una minimización adicional de los costos mediante una búsqueda local con un Algoritmo Semivoraz (Semigreedy Algorithm).

El primer objetivo es alcanzado mediante una primera ejecución hidráulica de la red para revisar las presiones con el diseño obtenido mediante los anteriores procedimientos. Solo en caso de que algún nudo presente déficit de presión se ejecutará el algoritmo de aumento de diámetros mostrado en la Figura 4.

Los posibles criterios hidráulicos H que pueden ser seleccionados en el subprocedimiento de aumento de diámetros son S_f ; h_f ; $(Q \cdot h_f)$; ΔS_f ; Δh_f ; y $\Delta(Q \cdot h_f)$; donde S_f = pendiente de fricción; h_f = pérdidas por fricción; Q = Caudal en el tubo; y el operador Δ = diferencia entre el valor con el diámetro actual de la tubería y el valor con el diámetro siguiente.

Respecto al segundo objetivo del procedimiento, éste se consigue mediante un doble barrido por la red reduciendo diámetros. Así, el algoritmo se ubica en la tubería más aguas arriba de la red, reduce el diámetro al inmediatamente anterior y ejecuta la hidráulica revisando la restricción de presión mínima. En caso de que no cumpla, se reversa el cambio. Después se avanza a la siguiente tubería aguas abajo y se continúa el procedimiento hasta llegar a la totalidad de las tuberías. Una vez recorrida la red en dicho sentido, se vuelve a ejecutar el procedimiento para esta vez iniciando por las tuberías más aguas abajo y finalizando con las tuberías más aguas arriba.

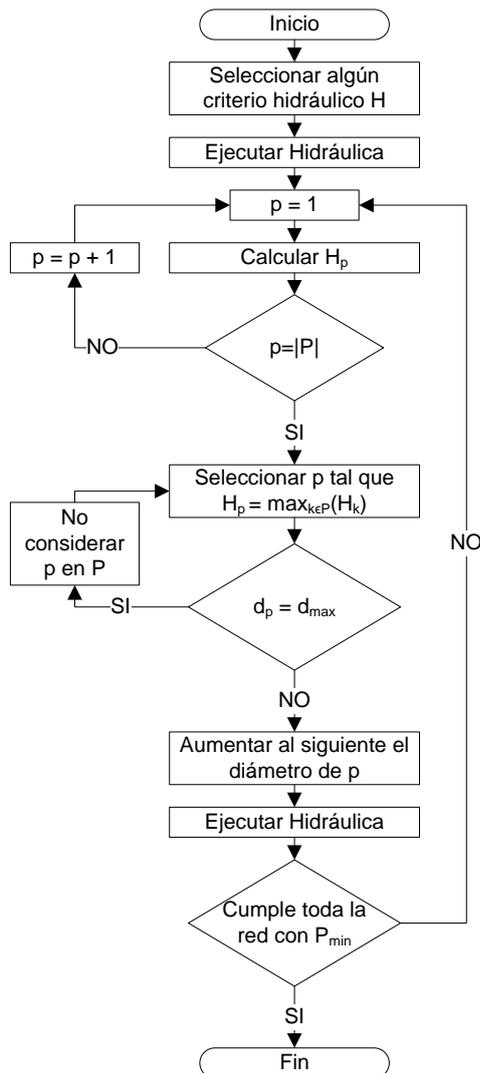


Figura 4. Diagrama de flujo del subprocedimiento para aumentar diámetros.

RESULTADOS

La metodología presentada es utilizada en tres RDAP benchmark: Hanoi, Balerna y Taichung.

Hanoi

La red de Hanoi fue presentada por primera vez por Fujiwara y Khang (1990) y al igual que Two-Loop (Alperovits & Shamir, 1977), se ha convertido en una de las más conocidas y utilizadas RDAP para el problema de diseño. La ecuación de pérdidas por fricción típicamente utilizada es Hazen-Williams con un $C=130$. La presión mínima requerida en todos los nudos es de 30 m y los costos por unidad de longitud de cada diámetro puede ser hallado con un coeficiente de \$1.1/m y exponente para el diámetro en pulgadas de 1.5.

Al aplicar la metodología propuesta se llega a un diseño con un costo de \$6'163 754 requiriendo 119

ejecuciones hidráulicas. A pesar de que este no es el menor costo alcanzado a nivel mundial, el número de ejecuciones hidráulicas necesario para llegar a este resultado es tres órdenes de magnitud menor que la mayoría de las demás aproximaciones como se puede ver en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados reportados para Hanoi.

Algoritmo	Costo (millones)	E.H.*
Algoritmos Genéticos (Savic & Walters, 1997)	\$6.073	1,000,000
Recosido Simulado (Cunha & Sousa, 1999)	\$6.056	53,000
Búsqueda de Armonía (Geem, 2002)	\$6.056	200,000
Salto de Rana Barajada (Eusuff & Lansey, 2003)	\$6.073	26,987
Evolución Compleja Barajada (Liong & Atiquzzaman, 2004)	\$6.220	25,402
Algoritmos Genéticos (Vairavamorthy, 2005)	\$6.056	18,300
Colonia de Hormigas (Zecchin et al., 2006)	\$6.134	35,433
Algoritmos Genéticos (Reca & Martínez, 2006)	\$6.081	50,000
Algoritmos Genéticos (Reca et al., 2007)	\$6.173	26,457
Recosido Simulado (Reca et al., 2007)	\$6.333	26,457
Recosido Simulado con búsqueda Tabú (Reca et al., 2007)	\$6.353	26,457
Búsqueda Local con Recosido Simulado (Reca et al., 2007)	\$6.308	26,457
Búsqueda de Armonía (Geem, 2006)	\$6.081	27,721
Entropía Cruzada (Perelman & Ostfeld, 2007)	\$6.081	97,000
Búsqueda Dispersa (Lin et al., 2007)	\$6.081	43,149
AG Modificados 1 (Kadu, 2008)	\$6.056	18,000
AG Modificados 2 (Kadu, 2008)	\$6.190	18,000
Enjambre de Partículas y B. de Armonía (Geem, 2009)	\$6.081	17,980
Aproximación Heurística (Mohan S. a., 2009)	\$6.701	70
Evolución Diferencial (Suribabu C. , 2010)	\$6.081	48,724
Honey-bee mating optimization (Mohan S. a., 2010)	\$6.117	15,955
Aproximación Heurística (Suribabu C. , 2012)	\$6.232	259
SOGH (Ochoa, 2009)	\$6.337	94
OPUS (Saldarriaga, Páez, Cuero, & León, 2012)	\$6.173	83
Esta metodología	\$6.163	119

E.H.: Ejecuciones Hidráulicas de la red

Los diámetros asignados a las tuberías fueron: 40, 40, 40, 40, 40, 40, 40, 40, 40, 30, 30, 24, 20, 16, 12, 12, 16, 20, 20, 40, 20, 12, 40, 30, 30, 20, 12, 12, 16, 16, 12, 12, 16 y 24 pulgadas (diámetros presentados en el orden de los ID de las tuberías).

Dentro del proceso de análisis de resultados se observó cómo la lista de diámetros disponible para el problema tiene un límite superior altamente restrictivo que no permite una reducción de costos considerable. Así, se realizó el mismo ejercicio de diseño pero agregando a la lista un diámetro de 50" que de acuerdo con la función de costos tendría un costo unitario de \$388.91/m. Al resolver el problema nuevamente, se encuentra la siguiente configuración de diámetros: 40, 50, 40, 40, 40, 40, 30, 30, 30, 24, 24, 20, 16, 12, 12, 12, 16, 16, 20, 40, 16, 12, 30, 30, 30, 20, 12, 12, 16, 12, 12, 12, 16, y 20; que implica un costo constructivo de \$5'414 077, mostrando así lo inconveniente de la lista real de diámetros disponibles para Hanoi.

Balerna

La RDAP de Balerna representa un distrito de irrigación en Almería, España. Dentro de la definición del problema se especifica la disponibilidad de diámetros de PVC con un coeficiente de rugosidad absoluta de 0.0025 mmm, y por lo tanto la ecuación de fricción debe ser Darcy-Weisbach, una presión mínima de 20 m y una función de costos potencial con un exponente de 2.06. La topología de la red es mostrada en la Figura 5.

Al aplicar la metodología propuesta se llega a un diseño con un costo constructivo de €2.148 millones el cual es comparado con los resultados de otras aproximaciones en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados reportados para Balerna.

Algoritmo	Costo (millones)	E.H.*
Algoritmos Genéticos (Reca & Martínez, 2006)	€2.302	1.0E07
Búsqueda de Armonía (Geem, 2006)	€2.601	45,400
Búsqueda de Armonía (Geem, 2006)	€2.018	1.0E07
Algoritmos Genéticos (Reca et al., 2007)	€3.738	45,400
Recosido Simulado (Reca et al., 2007)	€3.476	45,400
Recosido Simulado con B. Tabú (Reca et al., 2007)	€3.298	45,400

Búsqueda Local con Recosido Simulado (Reca et al., 2007)	€4.310	45,400
Hybrid discrete dynamically dimensioned search (Tolson, 2009)	€1,940	3.9E07
Búsqueda de Armonía with particle swarm (Geem, 2009)	€2.633	45,400
SOGH (Ochoa, 2009)	€2.100	1,779
Algoritmo Memético (Baños, 2010)	€3,120	45,400
Genetic heritage evolution by stochastic transmission (Bolognesi, 2010)	€2,002	250,000
Evolución Diferencial (Zheng, 2012)	€1,998	2,400,000
Evolución Diferencial Autoadaptativa (Zheng, 2012)	€1,983	1,300,000
OPUS (Saldarriaga, Páez, Cuero, & León, 2012)	€2.040	957
Esta metodología	€2.148	826

E.H.: Ejecuciones Hidráulicas de la red



Figura 5. Topología y topografía de la RDAP Balerna.

En este caso resulta más evidente la ventaja de la metodología en términos del tiempo computacional requerido, que es considerablemente menor que las aproximaciones metaheurísticas, y con un sobrecosto constructivo respecto al record mundial de cerca de 10%.

Taichung

Sung, Lin, Lin & Liu (2007) presentan por primera vez la RDAP de Taichung, Taiwan. La red se compone de 20 nudos y 31 tuberías organizados en 12 circuitos. La red tiene una lista de diámetros disponibles presentada en la Tabla 3. La ecuación de fricción a utilizar es Hazen-Williams con una rugosidad $C=100$ para todos los tubos. La presión mínima es 15 m y la topología es mostrada en la Figura 6.

Tabla 3. Costos Unitarios para la red de Taichung.

Diámetro (mm)	Costo (NT Dollar m^{-1})
100	860
150	1160
200	1470
250	1700
300	2080
350	2640
400	3240
450	3810
500	4400
600	5580
700	8360
800	10400
900	12800

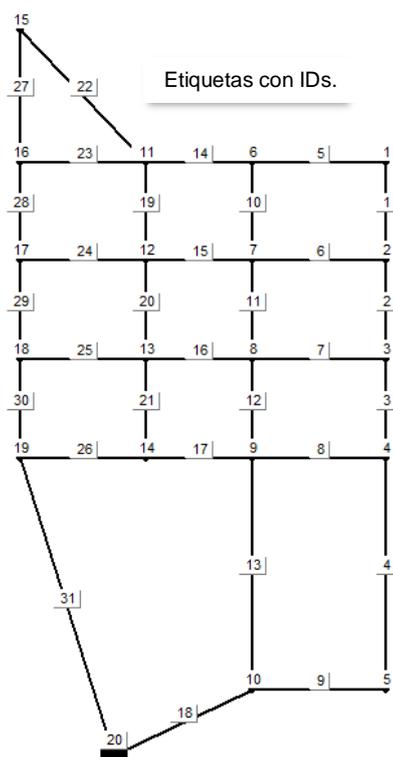


Figura 6. Topología de la RDAP de Taichung

La metodología propuesta alcanza, para este caso, un costo constructivo de \$8'966 900 en 48 ejecuciones hidráulicas. La configuración de diámetros final es: 250, 100, 150, 100, 100, 200, 100, 200, 150, 100, 250, 300, 350, 100, 100, 100, 100, 400, 150, 100, 100, 100, 200, 100, 150, 100, 200, 250, 250, y 300 milímetros (diámetros presentados en el orden de los ID de las tuberías).

Para este caso de estudio no existen diseños adicionales al reportado por Sung, Lin, Lin & Liu (2007) de \$8'774 900 en un número no reportado de ejecuciones hidráulicas haciendo uso de la metaheurística Búsqueda Tabú. Esto implica que la metodología propuesta llega a un resultado solo un 2.2% por encima del actual record.

CONCLUSIONES

Se presentó una metodología de diseño optimizado de RDAP que hace uso de criterios hidráulicos para redefinir el problema como un problema de PLE. Esta metodología es una modificación de la metodología OPUS (Takahashi et al., 2010) anteriormente desarrollada por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA)..

Los resultados de aplicar la metodología desarrollada en redes benchmark, muestran cómo el uso de criterios hidráulicos permite llegar a diseños de alta calidad en términos de minimización de costos constructivos, con un número de ejecuciones significativamente menor que aproximaciones metaheurísticas tradicionales que además incluyen un componente estocástico importante.

Se recomienda utilizar esta metodología para llegar a un primer diseño de calidad el cual pueda ser mejorado mediante una posible postoptimización con metaheurísticas. Esto podría permitir reducir aún más la diferencia, en términos de costos, con los record mundiales.

REFERENCIAS

- Alperovits, E., and Shamir, U. (1977) Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research*, Vol.13, No.6, pp. 885-900.
- Baños, C. G. (2010). A memetic algorithm applied to the design of water distribution networks. *Applied Soft Computing*, 261-266.
- Bolognesi, A. e. (2010). Genetic Heritage Evolution by Stochastic Transmission in the optimal

- design of water distribution networks. Advances in Engineering Software, 792-801.
- Cunha, M. a. (1999). Water distribution network design optimization: Simulated annealing approach. J. Water Resour. Plan. Manage. , 215-221.
- Dandy, G. and Hewitson, C. (2000) Optimizing Hydraulics and Water Quality in Water Distribution Networks Using Genetic Algorithms. Building Partnerships: pp. 1-10.
- Eusuff, M. a. (2003). Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. J. Water Resour. Plan. Manage. , 210-225.
- Fujiwara, O. and Khang, D. (1990). A two phase decomposition methods for optimal design of looped water distribution networks. Water Resources Research, Vol.26, No. 4, pp. 539-549.
- Geem, Z. K. (2002). Harmony search optimization: Application to pipe network design. Int. J. Model. Simulat. , 125-133.
- Geem, Z. K. (2006). Optimal cost design of water distribution networks using harmony search. Engineering Optimization, Vol.38, No.3, pp. 259-277.
- Geem, Z. K. (2009). Particle-swarm harmony search for water network design. Engineering Optimization, Vol.41, No.4, pp. 297-311.
- Kadu, M. R. (2008). Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space. J. Water Resour. Plan. Manage. , 147-160.
- Lin, M., Liu, G. and Chu, C., (2007) Scatter search heuristic for least-cost design of water distribution networks, Engineering Optimization, Vol.39, No.7, pp. 857-876.
- Liong, S. and Atiquzzaman, M. (2004) Optimal design of water distribution network using shuffled complex evolution. Journal of the Institution of Engineers, Vol.44, No.1, pp. 93-107.
- Mohan, S. a. (2009). Water distribution network design using heuristics-based algorithm. J. Comput.Civ. Eng., 249-257.
- Mohan, S. a. (2010). Optimal water distribution network design with Honey-Bee mating optimization. J. Water Resour. Plan. Manage., 117-126.
- Ochoa, S. (2009). Optimal design of water distribution systems based on the optimal hydraulic gradient surface concept. MSc Thesis, dept. of Civil and Environmental Engineering, Universidad de los Andes, Bogotá, Col.
- Perelman, L. and Ostfeld, A. (2007). An adaptive heuristic cross entropy algorithm for optimal design of water distribution systems. Engineering Optimization, Vol.39, No.4, pp. 413-428.
- Reca, J. & Martínez, J. (2006). Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks. Water Resources Research, Vol.44, W05416.
- Reca, J., Martínez, J., Gil, C. and Baños, R. (2007). Application of several meta-heuristic techniques to the optimization of real looped water distribution networks. Water Resources Management, Vol.22, No.10, pp. 1367-1379.
- Reca, J., Martínez, J., Gil, C. and Baños, R. (2007). Application of several meta-heuristic techniques to the optimization of real looped water distribution networks. Water Resources Management, Vol.22, No.10, pp. 1367-1379.
- Saldarriaga, J. (1998 and 2007). Hidráulica de Tuberías. Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos. Ed. Alfaomega. Ed. Uniandes. ISBN: 978-958-682-680-8.
- Saldarriaga, J., Páez, D., Cuero, P., & León, N. (2012). Optimal power use surface for design of water distribution systems. XIV Water Distribution Systems Analysis Conference. Tucson, Arizona, USA.
- Savic, D. and Walters, G. (1997). Genetic algorithms for least cost design of water distribution networks. J. Water Resour. Plan. Manage., 67-77.
- Sung, Y.-H., Lin, M.-D., Lin, Y.-H. L., & Liu, Y.-L. (2007). Tabu search solution of water distribution network optimization. Journal of Environmental Engineering and Management, 177-187.
- Suribabu, C. (2010). Differential evolution algorithm for optimal design of water distribution networks. J. of Hydroinf., 66-82.
- Suribabu, C. (2012). Heuristic Based Pipe Dimensioning Model for Water Distribution Networks. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 45 p.
- Takahashi, S., Saldarriaga, S., Hernández, F., Díaz, D. and Ochoa, S. (2010). An energy methodology for the design of water distribution systems. In Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2010, ASCE.
- Todini, E. (2000). "Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach". Urban Water, 2(2), 115-122.
- Tolson, B. A. (2009). Hybrid discrete dynamically dimensioned search (HD-DDS) algorithm for

- water distribution system design optimization. Water Resources Research, 45 p.
- Vairavamoorthy, K. a. (2005). Pipe index vector: A method to improve genetic-algorithm-based pipe optimization. J. Hydraul. Eng., 1117-1125.
- Villalba, G. (2004). Optimal combinatory algorithms applied to the design of water distribution systems. MSc Thesis, dept. of Systems and Computation Engineering, Universidad de los Andes.
- Wu, I. (1975). Design of drip irrigation main lines. Journal of Irrigation and Drainage Division, Vol.101, No.4, pp. 265-278.
- Yates, D., Templeman, A. and Boffey, T. (1984). The computational complexity of the problem of determining least capital cost designs for water supply networks. Engineering Optimization, Vol. 7, No.2, pp. 142-155.
- Zecchin, A., Simpson, A., Maier, H., Leonard, M., Roberts, A., and Berrisfors, M. (2006) Application of two ant colony optimization algorithms to water distribution system optimization. Mathematical and Computer Modeling, Vol.44, No. 5-6, pp. 451-468.
- Zheng, F. e. (2012). A Self-Adaptive Differential Evolution Algorithm Applied to Water Distribution System Optimization. Journal of Computing in Civil Engineering, 45 p.