

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**SUPERFICIE DE USO ÓPTIMO DE POTENCIA PARA EL DISEÑO DE
REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE**

Juan Saldarriaga, Felipe Hernández, María A. Escovar y Diego A. Páez

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados – Universidad de los Andes - Bogotá, Colombia

<jsaldarr , feli-her , ma-escov , da.paez27>@uniandes.edu.co

RESUMEN:

El diseño de mínimo costo para redes de distribución de agua potable (RDAP) es probablemente el problema de modelación más investigado en la ingeniería hidráulica. En las últimas décadas, diferentes técnicas de soft computing tales como algoritmos metaheurísticos, han sido aceptados como los métodos más efectivos para solucionar dicho problema. Sin embargo, dada su naturaleza estocástica, un alto número de simulaciones hidráulicas son requeridas antes de lograr hallar resultados aceptables. En este artículo se presenta una metodología alternativa, basada en el entendimiento del comportamiento hidráulico de los diseños óptimos. Esta metodología pretende reemplazar las búsquedas considerablemente largas de los algoritmos metaheurísticos. Para ello se concentra en establecer maneras eficientes de disipar energía y distribuir caudal. El algoritmo fue probado en dos redes de referencia llegando a resultados similares a los encontrados por investigaciones previas pero con una amplia reducción en el número de iteraciones requeridas. Esta nueva aproximación al problema muestra un alto potencias para otras aplicaciones relacionadas con los modelos matemáticos RDAPs.

ABSTRACT:

Water distribution system minimum-cost design is probably the most commonly addressed modeling problem in hydraulic engineering. In the last decades, soft computing techniques, such as metaheuristics, have been established as the most effective methods to solve this problem. However, because of their stochastic nature, a huge number of hydraulic simulations are needed before adequate results are found. An alternative soft approach, based on the understanding of the hydraulic behavior of optimal designs, is presented in this paper. It attempts to replace the tiresome search process undertaken by metaheuristics. The methodology focuses on establishing efficient ways in which energy is dissipated and flow is distributed. The algorithm was tested on two benchmark systems reaching similar results to those of previous works but in an amply reduced number of iterations. This novel approach shows plenty of potential in other water distribution mathematical modeling applications

PALABRAS CLAVES: Optimización, Diseño, Heurísticas.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua potable es esencial para el desarrollo de las actividades humanas. Sin embargo, millones de personas todavía no disponen de un adecuado servicio, especialmente en países en desarrollo. Adicionalmente, los recursos económicos para solucionar dicho problema son escasos, y es por ello que el problema de diseño optimizado de RDAPs ha sido estudiado por investigadores de diferentes partes del mundo. Si bien el diseño de una RDAP debe tener en cuenta otros criterios adicionales a los de costo, tales como la confiabilidad de la red y el impacto ambiental asociado (Walski, 2001; Todini, 2008), el criterio de mínimo costo continua siendo utilizado para la comparación de diferentes diseños. De hecho, usualmente, los algoritmos de diseño multiobjetivo que tienen en cuenta estos otros criterios, son extensiones de un algoritmo exitoso de diseño de minimización de costos (e.g., Laucelli et al., 2008; Tanyimboh et al., 2009; Wu et al., 2009).

El problema de diseño de RDAPs consiste en la determinación de los diámetros de las tuberías, de manera que se satisfagan los caudales demandados en cada nudo con una presión aceptable haciendo uso de los tamaños de tubería disponibles en el mercado. La formulación matemática del problema como un problema de optimización donde se minimizan los costos constructivos, se clasifica como un problema NP-Duro indicando que no se conocen algoritmos con complejidad de orden polinomial que puedan encontrar una solución exacta del mismo (Yates et al, 1984).

Los primeros intentos de solución del problema incluyeron técnicas de optimización como enumeración (Gessler, 1985), y programación lineal y no lineal (Alperovits & Shamir, 1977, Fujiwara & Kang, 1990). Con el paso del tiempo, los investigadores se han concentrado en el uso de metaheurísticas dada su facilidad de implementación, su amplio espacio de búsqueda, su baja dependencia de la configuración inicial del modelo y la capacidad de incorporar la restricción de diámetros discretos disponibles en el mercado.

Los algoritmos metaheurísticos son algoritmos basados en comportamientos observados en la naturaleza, que generan un gran número de posibles alternativas resultado, evaluando cada una, y generando muchas otras con base en la evaluación de las alternativas pasadas. La evaluación de cada alternativa incluye una comprobación de cumplimiento de las restricciones del problema y una evaluación de la función objetivo. Cada comprobación de las restricciones tiene asociada una ejecución hidráulica en el caso del problema de diseño de RDAPs, y por lo tanto buena parte del tiempo computacional requerido por un algoritmo corresponde a ejecuciones hidráulicas. Es por ello que en la comparación de metodologías no sólo se usa el costo mínimo alcanzado sino también el número de simulaciones hidráulicas requeridas para llegar a dicho resultado de mínimo costo.

Gracias a implementaciones de las mencionadas metodologías, en la actualidad se dispone de diseños considerablemente buenos que optimizan de manera aceptable la función objetivo, permitiendo a nuevos investigadores hacer un análisis de los resultados encontrados buscando y analizando patrones hidráulicos que siguen dichos diseños. Un análisis de esta naturaleza fue hecho por I-Pai Wu (1975) para tuberías principales de redes de riego localizado de alta frecuencia. Según I-Pai Wu, si se conoce la altura piezométrica a la entrada de una tubería en serie (LGH_{Max}), y la altura piezométrica mínima aceptable en los nudos de ésta (LGH_{Min}), es posible asignar una altura piezométrica objetivo a cada nudo de la tubería (LGH_x), de manera que el diseño correspondiente a las pérdidas objetivo asignadas y a los caudales que debe transportar cada segmento de la tubería, es de mínimo costo. Analizando las diferentes posibles asignaciones de alturas piezométricas, I-Pai Wu encontró que la mejor distribución correspondía a una línea de gradiente hidráulico (LGH) parabólica como la mostrada en la Figura 1 y cuya ecuación corresponde a la Ecuación 1:

$$LGH_x = 4 \cdot F \cdot \frac{LGH_{Max} - LGH_{Min}}{(L_{Tot})^2} \cdot X^2 - (1 + 4 \cdot F) \cdot \frac{LGH_{Max} - LGH_{Min}}{(L_{Tot})} \cdot X + LGH_{Max} \quad [1]$$

Donde L_{Tot} es la longitud total de la tubería en serie, F es la diferencia relativa entre la altura piezométrica asignada al punto del medio por una línea recta y por la línea parabólica, y X es la coordenada longitudinal de cada nudo donde se asignará la altura piezométrica. I-Pai Wu también encontró que en caso de que los nudos de demanda estén igualmente espaciados y con demanda igual para todos, la LGH que genera el mínimo costo es la línea parabólica con *flecha* (F) igual a 15%.

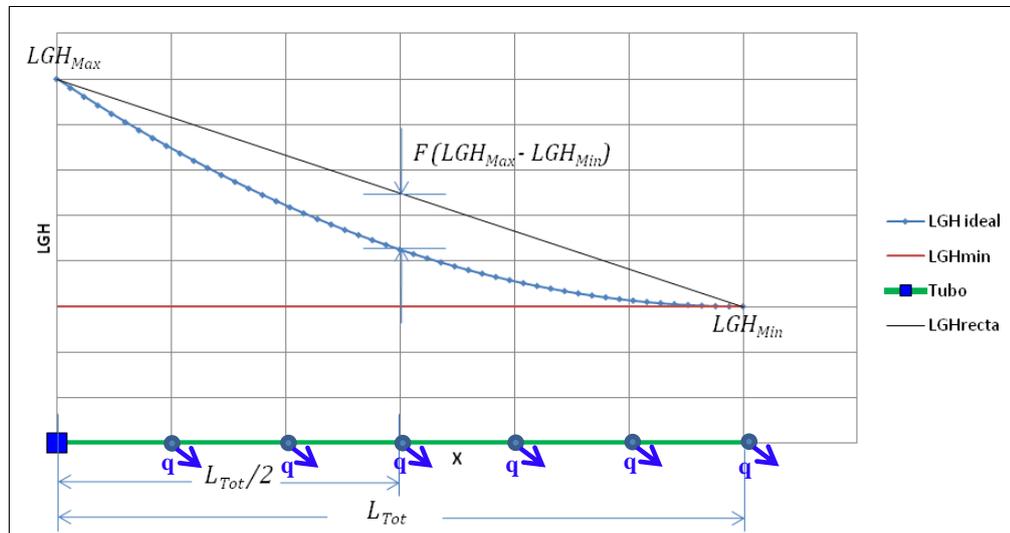


Figura 1.- Criterio de I-Pai Wu para la línea de gradiente hidráulico ideal o de mínimo costo.

En 1983, el profesor Ronald Featherstone de la Universidad de Newcastle en Reino Unido, propuso una extensión del criterio de I-Pai Wu para redes de acueducto usualmente cerradas. Esta idea fue planteada e investigada por Saldarriaga (1998) y tuvo grandes avances con los trabajos de Villalba (2004) y Ochoa (2009). Este artículo describe una metodología de diseño basada en la idea del profesor Featherstone utilizando algunos resultados de las investigaciones de Villalba y Ochoa, denominada Superficie de Uso Óptimo de Potencia (OPUS por sus siglas en inglés). Cada paso del algoritmo es descrito y analizado, y finalmente se presentan los resultados de la aplicación de OPUS en dos redes de referencia (Two-loop y Hanoi).

DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

En la Figura 2 se muestran los pasos o subprocesos de la metodología y el orden en que se realizan. El primer subproceso consiste en convertir la topología de la red, en una estructura de árbol o red abierta. Después se asigna a cada nudo, su altura piezométrica objetivo con base en la metodología desarrollada por Ochoa (2009), utilizando para ello, la estructura de árbol generada, y las características topológicas y de demanda de la red. A continuación se realiza una distribución de caudales, de manera que para cada nudo se asigna el porcentaje de caudal demandado que provendrá de cada tubo conectado a dicho nudo. Posteriormente se realiza el diseño, encontrando diámetros continuos como resultado, y requiriendo que dichos diámetros sean aproximados a algún diámetro discreto disponible en el mercado. Finalmente se realizan una serie de ejecuciones hidráulicas con el objetivo de asegurar que no se viole la presión mínima en los nudos y buscando una reducción en los costos mediante reducción de algunos de los diámetros.

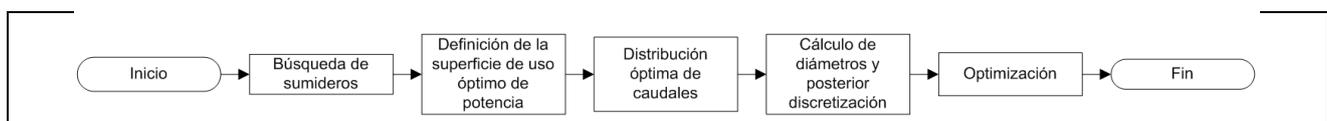


Figura 2.- Descripción de los subprocesos de la metodología OPUS.

Definición de la estructura de árbol (Búsqueda de sumideros):

Este subproceso se basa en dos principios. El primero radica en que un diseño de mínimo costo debe proveer agua a casa 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 todos 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 3.

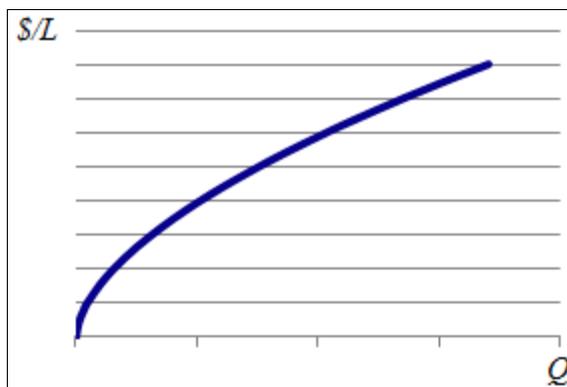


Figura 3.- Relación esquemática entre el caudal de diseño y el costo por unidad de longitud de la tubería.

De la Figura 3, 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 la 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. En el momento en que tiene más de una posibilidad de adición de una pareja tubería-nudo selecciona aquella cuya relación beneficio-costos (cociente entre la demanda del nudo y el costo marginal de conectarlo a la fuente) es mayor.

En el momento en que se han agregado todos los nudos de la red cerrada a la red abierta, se definen como sumideros, aquellos nudos son ningún nudo aguas abajo, y la estructura de árbol está completa. La complejidad computacional del algoritmo es $O(NN^2)$, donde NN es el número de nudos de la red, y por lo tanto el tiempo computacional de toda la metodología no se ve mayormente afectada por este paso.

Definición de la superficie de uso óptimo de potencia:

Este paso, que se considera el más importante de la metodología y le da el nombre a esta, está basado en el trabajo de I-Pai Wu (1975). El subproceso asigna una altura piezométrica a cada nudo de la red, de manera que las pérdidas totales de las tuberías quedan predefinidas como la diferencia entre las alturas piezométricas de sus nudos adyacentes. La manera de hacer esta asignación de alturas piezométricas de manera óptima se basa en los resultados de Ochoa (2009) para tuberías en serie con caudales y longitudes no homogéneas. Según Ochoa, la flecha (F) de la Ecuación 1, que minimiza los costos de la tubería resultante, depende de la distribución longitudinal de la demanda, del cociente entre los caudales y las longitudes de las tuberías y de la función de

costos. Así un diseño de una red abierta que minimice costos, consistirá en implementar estos resultados de cálculo de la flecha óptima a cada trayectoria que una los sumideros con la fuente.

Para ello, se define una altura piezométrica mínima en los nudos de la red con base en las regulaciones que existan en la ciudad de la RDAP. Después se calculan las distancias topológicas entre cada nudo del sistema y la fuente. Conociendo entonces la altura piezométrica disponible en la fuente (LGH_{Max}), la altura piezométrica mínima en cada sumidero (LGH_{Min}) y las distancias de cada trayectoria entre sumidero y fuente (L_{Tot}), se le asigna una LGH parabólica a cada trayectoria de flujo. Dado que algunas trayectorias compartirán segmentos aguas arriba, se recalcula la parábola modificando el valor de la flecha como un promedio ponderado de las flechas de las trayectorias encontradas, en donde el peso de cada valor será el caudal transportado por cada trayectoria. Finalmente es necesario revisar que no se violen las presiones mínimas en los nudos intermedios cuya elevación puede ser suficiente para que la altura piezométrica asignada, no cumpla con los requisitos. En dado caso, se modificarán las parábolas de las trayectorias aguas arriba de dicho punto.

Como resultado, cada nudo de la red tiene asignada una altura piezométrica objetivo o ideal de manera que se generará una superficie de alturas piezométricas sobre la red. Estas alturas piezométricas definen a su vez las pérdidas objetivo o ideales de cada tubería, de manera que al conocer el caudal de diseño, se puede utilizar una ecuación de fricción para flujo presurizado a fin de encontrar el diámetro continuo (i.e. diámetro cuyo valor pertenece a \mathbb{R}^+) que corresponde a ese caudal y a esas pérdidas por fricción.

Distribución óptima de caudales:

Si se supone que el conjunto de diámetros disponibles es \mathbb{R}^+ , una misma superficie de alturas piezométricas puede ser alcanzada con diferentes configuraciones de diámetros cuando la red es cerrada. Así, este subproceso busca seleccionar una manera de distribuir los caudales demandados en las tuberías de la red, de manera que se cumpla la conservación de masa en cada nudo, que se genere la superficie de alturas piezométricas determinada en el subproceso anterior y que se minimicen los costos asociados al diseño generado con esa combinación de caudales y pérdidas totales en las tuberías.

En este subproceso se hace uso de la red con geometría cerrada así como de los principios utilizados en el primer paso de la metodología. El procedimiento consiste en recorrer cada nudo de la red, desde aguas abajo hasta aguas arriba, asignando a cada tubo inmediatamente aguas arriba del nudo analizado una cierta fracción del caudal total demandado en el nudo y en sus nudos aguas abajo. La manera de distribuir ese caudal total entre los tubos aguas arriba puede hacerse de diferentes maneras, pero el criterio que minimiza costos es el que asigna a una única tubería una porción significativa del caudal, dejando para los demás tubos sólo el caudal correspondiente al diámetro mínimo disponible en el mercado.

La selección de la tubería a la cuál será asignada la mayor parte del caudal demandado, se hace calculando la función H/L^2 donde H son las pérdidas totales asignadas al tubo y L es su longitud, y seleccionando aquella tubería con mayor valor de la función. Para implementar este procedimiento se hace uso de un algoritmo recursivo iterativo con complejidad computacional $O(NN)$.

Cálculo de diámetros y discretización:

Como resultado de los dos pasos anteriores, cada tubería de la red tiene asignadas unas pérdidas totales objetivo y un caudal de diseño. Así, es posible hacer uso de una ecuación de fricción para flujo presurizado a fin de calcular el diámetro continuo necesario para transportar ese caudal con esas pérdidas. En caso de que la ecuación sea la de Hazen-Williams, este cálculo es explícito. En caso de que la ecuación sea la de Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrooke-White es necesario realizar un proceso iterativo relativamente simple.

Como resultado se tienen diámetros continuos asignados a cada tubería del sistema de manera que al ejecutar la hidráulica de la RDAP con este diseño, se obtendrían las alturas piezométricas objetivo en los nudos y los caudales asignados en los tubos. Sin embargo esta configuración de diámetros no se considera factible para el problema de optimización, dado que se están violando las restricciones que aseguran que a cada tubería se le debe asignar únicamente un diámetro disponible en el mercado local.

Para resolver este problema se requiere en un principio, una discretización de los diámetros encontrados ajustándolos a uno de los diámetros del conjunto de diámetros disponibles en el mercado. Dado que se dispone de un diámetro continuo, se debe disponer de dos diámetros discretos entre los que se encuentra el valor continuo. Así este paso consiste en seleccionar cuál de esos dos valores de diámetros discretos se asignará al tubo analizado.

El anterior procedimiento de discretización puede ser realizado de diferentes maneras, pero después de evaluar cuatro posibles alternativas, se encontró que la que produce mejores resultados, consiste en redondear al caudal equivalente más cercano. Para ello, se eleva el valor del diámetro continuo y de los diámetros disponibles a una potencia de 2.6 como una estimación de la función que relaciona el caudal que pasa por una tubería con el diámetro que ésta tiene. Finalmente se selecciona el diámetro cuya aproximación de caudal es más cercana a la aproximación de caudal del diámetro continuo.

Sin embargo al finalizar este subproceso, el comportamiento hidráulico de la red puede diferir significativamente del comportamiento objetivo (caudales y alturas piezométricas asignadas), y por lo tanto el diseño generado puede estar bastante alejado del óptimo, o inclusive puede no cumplir con la restricción de presión mínima en algunos de los nudos

Optimización (Reducción de costos y comprobación de diseño):

Este subproceso consiste en ejecutar un cálculo hidráulico de la red resultado del subproceso anterior, verificando las presiones en los nudos. En caso de que algún nudo presente una presión inferior a la mínima aceptable, se procede a aumentar diámetros de las tuberías aguas arriba hasta que se cumpla con la restricción. El orden en el que se aumentan los diámetros de dichas tuberías puede seleccionarse de diferentes maneras, pero se encontró que, si primero se aumentan los diámetros de las tuberías con mayor diferencia de pendiente entre la LGH objetivo y la LGH presente, se llega a diseños finales de menor costo.

Una vez se asegura que en la red no se presentan presiones inferiores a la mínima, se recorre la red de aguas arriba a aguas abajo y después en sentido contrario, reduciendo los diámetros de las tuberías, y evaluando las presiones en todos los nudos. En caso de que las presiones se reduzcan por debajo de la presión mínima, el cambio en los diámetros es reversado y se continúa con los tubos aguas abajo (o aguas arriba en caso de que ya se haya cambiado el sentido de avance). En caso de que la presión mínima no sea violada, el nuevo diámetro se mantiene y se continúa con el procedimiento en los siguientes tubos.

Este proceso de optimización es una heurística por sí misma y es similar a la utilizada por Todini (2000) con la diferencia de que la complejidad computacional del presente algoritmo es $O[NT \cdot O(SH)]$ en contraste con la complejidad computacional del algoritmo citado ($O[NT^2 \cdot O(SH)]$), donde NT es el número de tubos de la red y $O(SH)$ es la complejidad del algoritmo de simulación hidráulica del sistema.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

La metodología OPUS fue implementada en el software REDES desarrollado por CIACUA a fin de automatizar todos los subprocesos anteriormente mencionados. Esta implementación fue utilizada para diseñar dos redes de referencia: Two-loop y Hanoi (Alperovits & Shamir, 1977). Dado que el objetivo es comparar los resultados de la metodología con otros algoritmos de diseño, fueron utilizados los mismos valores de los diferentes parámetros de simulación hidráulica y

disponibilidad de diámetros que los reportados en otros estudios. Dentro de dichos parámetros se encuentra el uso de la ecuación de Hazen-Williams para calcular las pérdidas por fricción de un flujo presurizado, con un coeficiente de rugosidad $C=130$ (PVC – policloruro de vinilo) y con unos parámetros de la ejecución hidráulica con el método del gradiente de $\alpha = 1.852$ y $\beta = 4.871$.

Two-loop:

La red de Two-loop es una red de 8 tubos cuya geometría se presenta en la Figura 4. La presión mínima aceptable en cada nudo es de 30 m.c.a., mientras que la altura piezométrica disponible en la fuente es de 210 m.c.a. Además tiene un conjunto de 14 posibles diámetros cada uno con un costo por unidad de longitud conocido. Una descripción completa de la red puede ser encontrada en Alperovits & Shamir (1977).

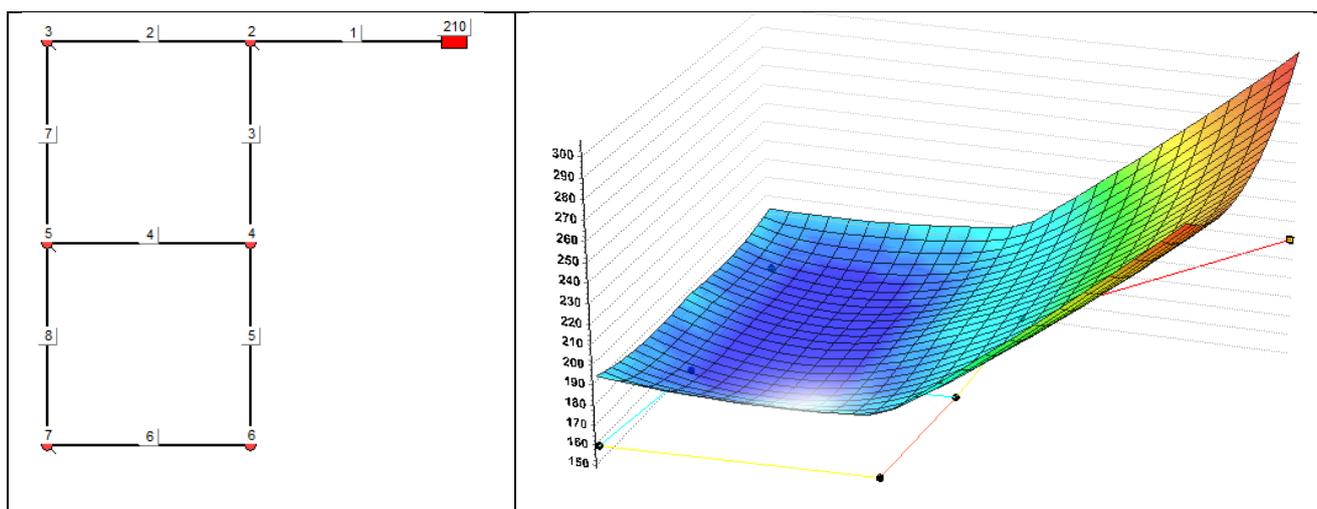


Figura 4.- Red de Two-loop. a) Geometría e IDs de los elementos, b) Superficie de uso óptimo de potencia.

Al ejecutar el algoritmo de diseño en esta RDAP hipotética, se alcanzó el costo mínimo reportado en la literatura para este problema (USD\$419.000) con un total de 51 simulaciones hidráulicas (ver Tabla 1). En la Figura 4 se muestra la superficie de uso óptimo de potencia encontrada con la metodología.

Tabla 1.- Red de Two-Loop. Comparación de resultados. (Resultados tomados de Geem, 2009).

Algoritmo	Costo de la red diseñada	Número de iteraciones
Algoritmos genéticos	\$419,000	65,000
Algoritmos genéticos	\$419,000	10,000
Algoritmos genéticos	\$419,000	7,467
Recocido simulado	\$419,000	25,000
Salto de rana barajado	\$419,000	11,155
Evolución compleja barajada	\$419,000	1,091
Búsqueda de armonía	\$419,000	1,121
Entropía cruzada	\$419,000	35,000
Búsqueda dispersa	\$419,000	3,215
Enjambre de partículas con búsqueda de armonía	\$419,000	204
OPUS (este estudio)	\$419,000	51

Hanoi:

La red de Hanoi es una red con 34 tubos cuya geometría se presenta en la Figura 5. La presión mínima aceptable en cada nudo también es de 30 m.c.a., mientras que la altura piezométrica

disponible en la fuente es de 100 m.c.a. Además tiene un conjunto de 6 posibles diámetros cada uno con un costo por unidad de longitud calculable como una función potencial del diámetro con un coeficiente de USD\$1.1/m y un exponente de 1.5. Una descripción completa de la red puede ser encontrada en Fujiwara & Kang (1990).

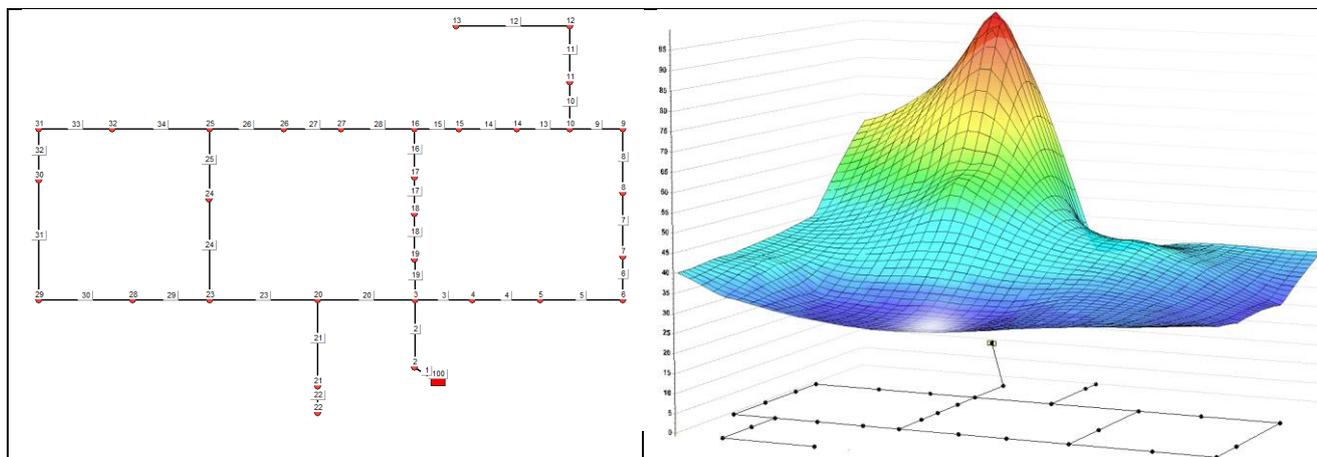


Figura 5.- Red de Hanoi. a) Geometría e IDs de los elementos, b) Superficie de uso óptimo de potencia.

El resultado de la ejecución de la metodología fue un diseño de la red con un costo de USD\$6'147,882.45 alcanzado tras 83 ejecuciones hidráulicas. Si bien el costo no iguala al mínimo reportado en la literatura, el número de iteraciones requeridas es inferior a los demás en tres órdenes de magnitud (ver Tabla 2). En la Figura 5 se muestra la superficie de uso óptimo de potencia encontrada con la metodología

Tabla 2.- Red de Hanoi. Comparación de resultados. (Resultados tomados de Geem, 2009).

Algoritmo	Costo de la red diseñada (millones)	Número de iteraciones
Evolución compleja barajada	\$6,220	25,402
Optimización por colonia de hormigas	\$6,134	35,433
Algoritmos genéticos	\$6,081	50,000
Algoritmos genéticos	\$6,173	26,457
Recocido simulado	\$6,333	26,457
Recocido simulado con búsqueda tabú	\$6,353	26,457
Búsqueda local con recocido simulado	\$6,308	26,457
Búsqueda de armonía	\$6,081	27,721
Entropía cruzada	\$6,081	97,000
Búsqueda dispersa	\$6,081	43,149
Enjambre de partículas con búsqueda de armonía	\$6,081	17,980
OPUS (este estudio)	\$6,148	83

Respecto a los resultados mostrados en la Tabla 2, cabe decir que mediante el análisis de la superficie de alturas piezométricas, se pudo concluir que los diámetros disponibles para solucionar el problema de la RDAP de Hanoi representan una restricción considerablemente importante al notar que las pérdidas totales por unidad de longitud en los tubos de más aguas arriba son mucho más altas que las asignadas por la superficie de uso óptimo de potencia y que cualquiera de los demás tubos del sistema. Esto, debido a que el conjunto de diámetros disponibles en el mercado tiene un máximo de 40" y dicho diámetro genera unas pérdidas mucho más altas que las ideales u objetivo para los tubos 1 y 2 (ver Figura 5). Dado que en este caso el subproceso *Cálculo de diámetros y discretización*, para estos dos tubos, encuentra un diámetro continuo mayor al máximo

disponible, el algoritmo de redondeo sólo dispone de una opción de aproximación y por lo tanto la metodología se ve limitada, indicando de esta manera que se debe considerar la opción de un diámetro disponible adicional para el problema, a fin de ajustar la superficie de alturas piezométricas a la ideal. A fin de sustentar la anterior afirmación, se ejecutó la metodología OPUS para la red Hanoi, con un diámetro disponible adicional de 50" y con costo por unidad de longitud correspondiente a la ecuación de costos descrita anteriormente. El costo alcanzado con esta nueva ejecución fue de USD\$5'342,840.13 demostrando así que el costo adicional de poner diámetros mayores en los tubos de más aguas arriba se ve superado por el beneficio alcanzado al reducir los costos de las demás tuberías.

Análisis

Los resultados encontrados en las dos RDAPs de referencia, muestran el potencial de la presente metodología para la solución del problema de diseño de mínimo costo. Por un lado, el diseño alcanzado para Two-Loop fue el óptimo conocido, y el número de simulaciones requeridas fue considerablemente menor que los demás estudios con implementación de metaheurísticas. Por otro lado, la red Hanoi requirió un número de iteraciones con una diferencia mucho más considerable que en el caso de Two-loop, representando una disminución de tres órdenes de magnitud y encontrando una solución con un sobre costo de 1.1% respecto a la solución óptima reportada.

Estos resultados demuestran la conveniencia del análisis hidráulico de los diseños de mínimo costo para su posterior aplicación en una metodología de diseño por sí misma que resulta mucho más eficiente que los demás algoritmos metaheurísticos. En este caso particular, la estrategia de analizar y predeterminar la superficie de alturas piezométricas que genera diseños aceptablemente buenos es una reducción eficiente del inmenso espacio de solución del problema que no sacrifica de manera importante la calidad de la solución final. Además esta ventaja se hace mucho más significativa a medida que la red a diseñar aumenta de tamaño, dado que los algoritmos metaheurísticos requerirán un aumento mucho mayor del número de simulaciones que la metodología OPUS.

Otra ventaja que debe ser notada, es el carácter determinístico de la metodología, que entregará siempre el mismo resultado cuando se usen los mismos parámetros. En contraste, los algoritmos estocásticos, como su nombre lo indica, generan diferentes resultados para diferentes ejecuciones, y por lo tanto los mejores resultados, son los mejores entre una serie de ejecuciones del algoritmo, haciendo que el número de ejecuciones hidráulicas total requerido para replicar los resultados de estas metodologías sea indeterminado y probablemente mayor que el reportado en las investigaciones.

Una desventaja de la metodología consiste en la aplicabilidad de la misma. Es posible que existan redes con condiciones hidráulicas que no permiten la implementación directa de la metodología y sea necesario ajustar la misma de alguna manera. Estos ajustes, y en general todos los análisis hidráulicos requeridos para el desarrollo de una metodología de esta naturaleza, requieren un esfuerzo importante para su desarrollo. Ello contrasta con la aplicabilidad prácticamente ilimitada de las metaheurísticas, que son aplicables a cualquier problema de optimización sin requerir un entendimiento específico de las condiciones del problema.

Finalmente es importante mencionar que el entender el comportamiento hidráulico puede permitir concluir de manera relativamente fácil medidas adicionales de optimización como en el caso de Hanoi, la inclusión de un diámetro máximo más grande. Adicionalmente en el caso de tener en cuenta otros términos en la función objetivo, tales como confiabilidad del sistema o minimización de fugas sólo se requiere evaluar el paso de la metodología donde mejor se puede procurar incluir el criterio adicional y la manera de hacerlo. Por ejemplo Todini (2008), propone que una RDAP que minimice fugas, debe minimizar las presiones en sus nudos sin violar la mínima aceptable. Así, en la metodología de OPUS, tener en cuenta un criterio de minimización de fugas sería probablemente implementado reformulando la manera de calcular la superficie de uso óptimo de potencia, seguramente afectando el parámetro F.

CONCLUSIONES

Se desarrolló e implementó una metodología de solución del problema de diseño de RDAPs de mínimo costo, denominada Superficie de Uso Óptimo de Potencia (OPUS). Su principal característica es su aproximación novedosa basada en el entendimiento de la hidráulica de los diseños óptimos y específicamente de las superficies de alturas piezométricas que estos generan. Gracias a esta aproximación de asignación de presiones y caudales de manera óptima, se logró reducir el espacio de solución considerablemente y sin generar una pérdida de calidad en la solución significativa. La metodología fue implementada en dos redes de referencia mundial denominadas Two-loop y Hanoi. Para la primera de ellas se llegó al diseño óptimo conocido en un número de iteraciones mucho menor que otros estudios de metodologías metaheurísticas. En la segunda red el costo mínimo reportado no fue alcanzado, llegando a un diseño con un sobrecosto de 1.1%, pero alcanzado con un número de cálculos hidráulicos menor en tres órdenes de magnitud respecto al resto de metodologías conocidas.

Los resultados encontrados permiten concluir que la metodología planteada, y en general la aproximación propuesta puede generar resultados similares a los encontrados mediante el uso de metaheurísticas, pero con una reducción importante del número de ejecuciones hidráulicas requeridas para ello. Por ello se considera apropiado estudiar posibles mejoras a cada subproceso de la metodología así como un posible ajuste de la aproximación para plantear metodologías de solución de otros problemas relacionados con RDAPs tales como calibración y operación de los sistemas.

REFERENCIAS

- Alperovits, E. and Shamir, U.,** (1977) Design of Optimal Water Distribution Systems, *Water Resources Research*, Vol.13, No.6, pp. 885-900.
- Fujiwara, O. and Khang, D.,** (1990) A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks, *Water Resources Research*, Vol.26, No.4, pp. 539-549.
- Geem, Z.,** (2009) Optimal cost design of water distribution networks using harmony search, *Engineering Optimization*, Vol.38, No.3, pp. 259-277.
- Gessler, J.,** (1985) Pipe network optimization by enumeration, *Proceedings of Special Conference on Computer Applications in Water Resources (New York), ASCE*.
- Laucelli, D., Giustolisi, O. and Todini, E.,** (2008) New concepts and tools for pipe network design, *Proceedings of the 10th Annual WDSA Conference*.
- Ochoa, S.,** (2009) *Diseño optimizado de redes de distribución de agua potable con base en el concepto energético de superficie óptima de gradiente hidráulico*, Dpto. de Ing. Civil y Ambiental, U. de los Andes.
- Saldarriaga, J.,** (1998 y 2007) *Hidráulica de Tuberías. Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos*, Editorial Alfaomega, Ediciones Uniandes.
- Tanyimboh, T., Ward, K., Prasad, T. Jarvis, E. and Kanyoza, A.,** (2009) Multiobjective optimization and multicriteria decision making for water networks, *Proceedings of the CCWI 'Integrating Water Systems'*.
- Todini, E.,** (2000) Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach, *Urban Water*, Vol.2, No.2, pp. 115-122.
- Todini, E.,** (2008) Design, expansion and rehabilitation of water distribution networks aimed at reducing water losses. Where are we?, *Proceedings of the 10th Annual WDSA Conference*.
- Villalba, G.,** (2004) *Algoritmos de optimización combinatoria aplicados al diseño de redes de distribución de agua potable*, Departamento de Ing. de Sistemas y Computación, U. de los Andes.
- Walski, T.,** (2001) The Wrong Paradigm - Why Water Distribution Optimization Doesn't Work, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol.127, No.4, pp. 203-205.
- Wu, I.,** (1975) Design of drip irrigation main lines, *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, Vol.101, No.4, pp. 265-278.
- Wu, W., Simpson, A. and Maier, H.,** (2009) Trade-off analysis between cost and reliability of water distribution systems using genetic algorithms, *Proceedings of the CCWI 'Integrating Water Systems'*.
- Yates, D., Templeman, A. and Boffey, T.,** (1984) The computational complexity of the problem of determining least capital cost designs for water supply networks, *E. Optimization*, Vol.7, No.2, pp. 142-155.