

## XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje

### “DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE POR MEDIO DE LA METODOLOGÍA OPUS E INICIO EN CALIENTE”

*López, L. (1), Cuero, P. (2), Díaz, O. (3), Páez, D. (4), Saldarriaga, J. (5)*

(1,2,3) Investigador(a), Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de Los Andes (CIACUA), Carrera 1 Este N° 19ª-40, Bogotá, Colombia, (+571) 3394949 Ext: 3520, ll.lopez28@uniandes.edu.co; pa.cuero38@uniandes.edu.co; or.diaz56@uniandes.edu.co

(4) Profesor Instructor, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de Los Andes (CIACUA), Carrera 1 Este N° 19ª-40, Bogotá, Colombia, (+571) 3394949 Ext: 3717, da.paez27@uniandes.edu.co

(5) Profesor Titular, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de Los Andes (CIACUA), Carrera 1 Este N° 19ª-40, Bogotá, Colombia, (+571) 3394949 Ext: 3520, jsaldarr@uniandes.edu.co

#### RESUMEN

Este documento describe una extensión de la metodología de Superficie de Uso Óptimo de Potencia (OPUS), que consiste en la post-optimización del diseño de una red previamente diseñada por OPUS por medio de un método meta-heurístico. Las metaheurísticas probadas fueron Algoritmos Genéticos (GA), Búsqueda de Armonía (HS) y Recocido Simulado (SA). La metodología propuesta es probada en tres problemas de referencia (Hanoi, Balerna, Taichung) y una cuarta de red denominada R28. Esta extensión de la metodología OPUS demuestra que tener en cuenta los principios hidráulicos en el proceso de diseño permite obtener resultados cercanos al óptimo, cuya mejora exige un considerable número de iteraciones, proporcionando un beneficio mínimo como la reducción en el costo solo del 1%.

**Palabras claves:** OPUS, inicio en caliente, algoritmos metaheurísticos, redes Benchmark.

#### ABSTRACT

This paper describes an extension to the Optimal Power Use Surface (OPUS) methodology, which consists in applying a metaheuristic post-optimization process to a network previously designed by OPUS. The metaheuristic tested were Genetic Algorithms (GAs), Harmony Search (HS) and Simulated Annealing (SA). The proposed methodology is tested on three benchmark problems (Hanoi, Balerna, Taichung) and fourth network called R28. This extension to the OPUS methodology proves that following hydraulic principles allows obtaining near-optimal results, whose improvement demands a considerable number of iterations, providing minimum benefit as the reduction in cost is only of 1% at the most.

**Key words:** OPUS, warm start, metaheuristic algorithms, Benchmark network.

#### SOBRE EL AUTOR PRINCIPAL

##### *Laura López:*

Ingeniera Ambiental de la Universidad de Los Andes, investigadora del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) y estudiante de Maestría en Ingeniería de Sistemas de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

## ANTECEDENTES E INTRODUCCIÓN

El problema de diseño óptimo de RDAPs ha ganado mucha importancia en las últimas décadas. Esto se debe a la limitación de fondos para resolver este asunto, el hecho de que el suministro de agua sea esencial para la vida humana y el rápido incremento de la demanda de este servicio, ya que la población mundial está creciendo cada vez a mayor velocidad. Por más de 40 años, muchos investigadores han estudiado el problema, dando como resultado diversas metodologías que ofrecen soluciones viables a este.

Uno de los criterios más comunes de comparación y validación de las diferentes metodologías de diseño es el costo de construcción, incluso si otros criterios como la confiabilidad, el impacto ambiental y la calidad del agua también son de gran importancia. Este tipo de diseño consiste en la determinación del conjunto de tamaños de diámetro de las tuberías que ofrezca el costo de capital mínimo, cumpliendo con las demandas de caudal y con una presión mínima requerida. No obstante el hecho de que los tubos se fabrican normalmente en tamaños de diámetro discreto, la cantidad de posibles configuraciones de tuberías es inmenso, lo que hace que el problema sea altamente indeterminado. Yates et al. (1984) demostró que es un problema NP-duro, lo que implica que sólo se puedan utilizar métodos aproximados exitosamente.

Las primeras aproximaciones al problema utilizaron técnicas de optimización tradicionales, como la enumeración, la programación lineal y no lineal. Sin embargo con el paso del tiempo diferentes algoritmos metaheurísticos comenzaron a ganar popularidad, debido a su facilidad de aplicación y ventajas adicionales como una búsqueda más amplia en el espacio de solución, una dependencia relativamente pequeña de la configuración inicial del sistema, y su capacidad de incorporar la restricción de diámetros discretos. Algunos intentos exitosos incluyen Algoritmos Genéticos por Savic y Walters (1997), Búsqueda de Armonía por Geem (2006), Búsqueda Dispersa por Lin et al. (2007), Entropía Cruzada por Perelman y Ostfeld (2007), recocido simulado por Reca et al. (2007), y el enjambre de partículas por Geem (2009).

Estas metaheurísticas consisten en la imitación de fenómenos o algoritmos evolutivos que generan al azar un gran número de posibles soluciones y evalúan su desempeño en términos de costos de calidad y de capital. Los resultados se mejoran progresivamente debido a la utilización de funciones

de aprendizaje genéricos. En el contexto de diseño de RDAPs, cada solución representa un diseño alternativo, es decir un conjunto diferente de tamaños de diámetro de las tuberías. Cada vez que un diseño alternativo se genera, una simulación hidráulica estática se debe realizar con el fin de evaluar su viabilidad; por lo tanto se requiere un gran número de iteraciones para llegar a la convergencia. Esto hace que las metaheurísticas sean muy exigentes en términos de esfuerzo computacional, independientemente de su flexibilidad y capacidad de lograr resultados casi óptimos.

Debido a esto, además del costo de la solución final, el número de simulaciones hidráulicas (o iteraciones) debe ser tomado en cuenta al medir y comparar la eficiencia de las diferentes metodologías. A pesar de las funciones de aprendizaje utilizadas en los algoritmos metaheurísticos, ninguno de estos hace uso de criterios hidráulicos lo que implica probar el rendimiento hidráulico de cada una de las posibles soluciones.

Como respuesta a los problemas de los algoritmos estocásticos, más recientemente algunos investigadores han utilizado nuevos enfoques hidráulicos en el diseño de RDAPs, basados en el uso de la energía disponible a lo largo del sistema.

Mientras las metaheurísticas tienen la intención de optimizar una función objetivo, tratando las variables de decisión simplemente como una serie de números que deben seguir cierta lógica, sin la comprensión de la maquinaria detrás de ésta; los nuevos enfoques tratan de caracterizar el comportamiento de las diferentes variables hidráulicas y entender su dinámica subyacente, enfocándose en la distribución óptima de la energía utilizada en la red.

En este sentido, I-PaiWu (1975) analizó el comportamiento de la función objetivo, la cual es la suma individual de los costos de cada tubería. Este análisis se llevó a cabo para sistemas simples, es decir sistemas compuestos por series de tubos con una demanda uniforme conocida en los nudos. Como resultado Wu encontró que la distribución de la altura de presión (carga) a lo largo de la red que minimiza los costos constructivos sigue una curva cuadrática, que es cóncava hacia arriba, y se separa de la línea recta que conecta la línea de gradiente hidráulico (LGH) en un valor del 15% del total de la pérdida de altura (H). Por lo tanto, los diseños óptimos pueden obtenerse por medio del cálculo de

unos valores de pérdida de altura objetivo para cada tubería, los cuales son derivados de la LGH obtenida haciendo uso del criterio de Wu.

La extensión del concepto básico de Wu fue propuesta por Ronald Featherstone en 1983, sugiriendo su aplicación a sistemas más complejos que los estudiados por Wu, como lo son las redes en circuito. Este concepto ha sido utilizado en modelos con demandas independientes de la presión en topologías abiertas y cerradas, y más recientemente en sistemas abiertos con demandas dependientes de la presión. La metodología de Superficie de Uso Óptimo de Potencia (OPUS) introducido por Takahashi et al. (2010), propone un enfoque hidráulico neto que sigue el criterio mencionado anteriormente, lo que demuestra que los criterios hidráulicos podrían ser utilizados como base en el diseño de RDAPs con el fin de sustituir la iteración intensiva requerida por las metaheurísticas.

Por otra parte, la aplicación de estos principios hidráulicos junto con formulaciones de programación lineal (programación lineal entera o ILP) se han utilizado en otros estudios presentados por Saldarriaga et al. (2012). Los resultados obtenidos utilizando estas metodologías son excepcionales no sólo en términos de la función objetivo, demostrando llegar a soluciones casi óptimas con pequeñas diferencias en comparación con los registros mundiales, sino también en términos del esfuerzo computacional requerido, el cual siempre es varios órdenes de magnitud menor que la mayoría de las soluciones comparables alcanzadas a través de diferentes metodologías. Además, este enfoque ofrece una visión más clara de la mecánica interna que rige el diseño RDAPs, lo que hace que sea fácil de entender y muy versátil para ser implementado, permitiendo su acoplamiento con herramientas tales como ILP con el fin de acelerar el proceso.

Teniendo en cuenta estos resultados y haciendo un análisis detallado de las diferencias entre los modelos obtenidos por medio de criterios hidráulicos y diseños óptimos globales, se encontró que estas diferencias son una consecuencia de la restricción de diámetro comercial. Esta restricción normalmente plantea dificultades en el diseño de RDAPs para metodologías hidráulicamente basadas como OPUS, que tienen pasos intermedios que calculan diseños continuos teóricamente óptimos, que luego son completamente afectados por la posterior aproximación de los diámetros continuos a diámetros comerciales (redondeo). Esto sucede porque la hidráulica del sistema puede cambiar

drásticamente después de las modificaciones en los diámetros de las tuberías. En este sentido, esta investigación implementa diseños obtenidos en la etapa final de la metodología OPUS como un "Inicio en Caliente" para las metodologías metaheurísticas típicamente utilizadas en el diseño de RDAPs, tales como Algoritmos Genéticos, Búsqueda de Armonía y Recocido Simulado. Esto se propone con el objetivo de mejorar los resultados ya alcanzados con criterios hidráulicos. Los resultados obtenidos en esta nueva etapa del desarrollo de metodologías basadas en el uso de energía para el diseño de RDAPs, se presentan en las tablas comparativas que representan los costos obtenidos, las ejecuciones hidráulicas (medición del esfuerzo computacional) para obtener dichos costos, y el Índice de Resiliencia de las soluciones de los diseños. La metodología propuesta se ha probado en diferentes problemas de referencia (Hanoi, Balerna y Taichung) y una cuarta red denominada R28, dando resultados muy cercanos a los registros globales, pero con una diferencia poco significativa en relación con la metodología OPUS. Además, el número de iteraciones aumenta sustancialmente con respecto a la metodología de OPUS, lo que implica que la mejora de los diseños hidráulicamente basados requiere un gran esfuerzo computacional adicional para una reducción mínima en los costos.

## BASE TEÓRICA: METODOLOGÍA OPUS

La metodología de diseño OPUS está compuesta por seis pasos diferentes. Estos se presentan en la Figura 1 en el orden en que deben ser ejecutadas. Cada uno de los procesos que se describen a continuación y el algoritmo detallado que cada uno de ellos sigue se explica en el trabajo desarrollado por Saldarriaga et al. (2012).

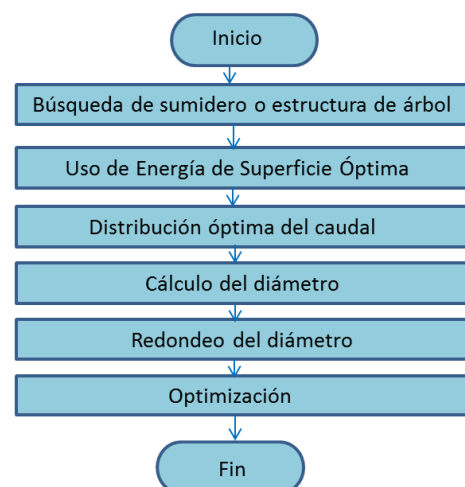


Figura 1. Metodología OPUS.

## Búsqueda de Sumideros o Estructura de Árbol

Este paso se basa en dos principios: el primero es que el diseño de menor costo debe abastecer la demanda de cada nudo mediante una única ruta desde la fuente de agua. La segunda, establece que a medida que aumenta el caudal de diseño de un tubo, su costo marginal disminuye. El primer principio viene del hecho de que la redundancia, aunque favorece la seguridad, es hidráulicamente ineficiente y por lo tanto las redes abiertas son mucho más baratas que las redes cerradas. El segundo principio proviene de la representación del caudal derivada de las ecuaciones de Colebrook-White y Darcy-Weisbach, en la cual al dejar constantes todos los demás parámetros, el caudal ( $Q$ ) presenta una relación aproximadamente proporcional con el diámetro a una potencia de 2,6. Suponiendo una ecuación estándar del costo de la tubería y reemplazando el diámetro de acuerdo con esta proporción, el costo por unidad de longitud de un tubo como una función de su caudal de diseño se comporta como se muestra en la Figura 2.

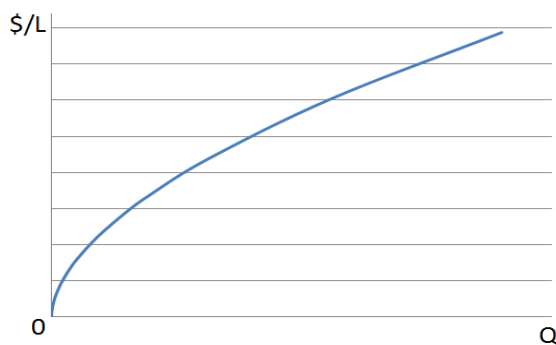


Figura 2. Relación esquemática entre el costo por metro de la tubería y el caudal.

Por lo tanto, el objetivo de este sub-proceso es descomponer una red cerrada en una estructura abierta (es decir, el agua sólo puede ser transportada a través de un camino desde la fuente a cualquier nudo en el sistema) con el fin de identificar los nudos sumideros, que son nudos con una altura de energía más baja a la de todos sus vecinos y por lo cual al convertirse en una red abierta son los nudos sin nudos aguas abajo. Una función de costo-beneficio se utiliza para establecer la red abierta, y una vez hecho esto, el paso del Uso de Energía de Superficie Óptima puede iniciar.

## Uso de Superficie Óptima de Energía

Esta etapa consiste en la asignación de una altura hidráulica objetivo a todos los nudos de la red y predefinir las pérdidas de altura de cada tubo. Este sub-proceso le da el nombre a toda la metodología,

ya que es aquí donde se aplica el concepto I-PaiWu de Línea Óptima de Gradiente de Energía. Mediante la asignación a todos los nudos sumideros de la presión mínima permitida, y conociendo la altura en el embalse, la altura de los nudos intermedios de cada ruta se calcula suponiendo una LGH parabólica como se muestra en la Figura 3. El valor óptimo de pandeo se puede estimar usando una metodología sugerida por Ochoa (2009), quien encontró que este depende de la distribución de la demanda, la tasa entre la demanda de caudal y la longitud de la tubería, y la función de costo. Como resultado del sub-proceso se ha asignado una altura objetivo a cada uno de los nudos de la red y por lo tanto se necesita un caudal de diseño para poder determinar el diámetro de cada uno de los tubos de la red.

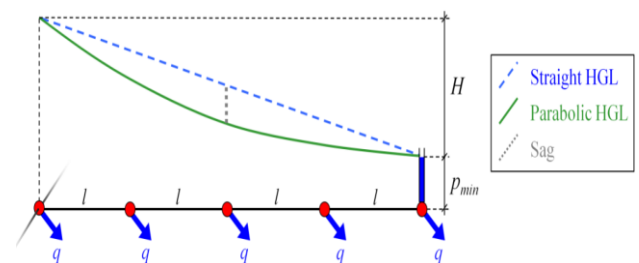


Figura 3. Criterio de I-PaiWu para predefinir la altura en cada nudo.

## Distribución óptima del caudal

Teniendo en cuenta que en una red en circuito una misma superficie de gradiente hidráulico se puede obtener a través de muchas configuraciones de diámetros, cuando el conjunto de diámetros permitidos es de  $R^+$  (números reales positivos), es necesario predefinir también el caudal objetivo para cada tubería con el fin de obtener una configuración de diámetros que minimice los costos. Por lo tanto, este sub-proceso pretende encontrar un esquema único de distribución de caudales que respete la conservación de la masa y se ajuste al uso de energía de superficie óptima previamente establecido. Para llevar a cabo esta tarea de manera que el resultado final minimice los costos, los principios utilizados en la primera etapa se utilizan una vez más y, como resultado, la metodología decide para cada nudo qué tubo de aguas arriba (en la red en circuito) es el principal, es decir, el tubo que transportará la mayor parte del caudal. Esto implica que el resto de los tubos transportarán el caudal correspondiente al diámetro mínimo. Para determinar la tubería principal, se evalúa la función  $h_f^2/L$  (donde  $h_f$  son las pérdidas por fricción y  $L$  es la longitud de la tubería) por cada tubo y se selecciona el que tenga el valor máximo. Al final de este paso, cada tubería del sistema debe haber sido asignada con un caudal de diseño.

### **Cálculo del diámetro**

Este subproceso calcula diámetros continuos para cada tubo con el resultado de los pasos anteriores. Como ya se conocen las pérdidas de altura objetivo y el caudal de diseño para cada tubo, el diámetro continuo necesario se puede obtener fácilmente a partir de un cálculo directo. Este cálculo es explícito cuando se utiliza la ecuación de Hazen-Williams e iterativo cuando se emplean las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White. El diseño continuo resultante es, en teoría, una RDAP completamente operacional, con un costo muy cerca del mínimo. Debido a la limitada disponibilidad de tamaños de diámetro comerciales, se requiere un siguiente paso para transformar este diseño "óptimo" en uno factible.

### **Redondeo de Diámetros**

Esta etapa consiste en la aproximación de cada diámetro continuo a un valor discreto de la lista de tamaños de diámetros disponibles comercialmente. Se encontró que el redondeo del valor de caudal equivalente más cercano ofrece los mejores resultados, a pesar de que se puede obtener después de varios criterios. La mejor manera de lograr esto es mediante la elevación de los valores de diámetro a una potencia de 2,6 y redondeando estos valores, tal como se explica en el paso de la estructura de árbol. Desafortunadamente, este paso afecta drásticamente el comportamiento hidráulico del sistema, sobre todo si todos los diámetros se redondean hacia arriba o hacia abajo.

### **Optimización**

Este paso final tiene dos objetivos principales: el primero es para asegurar que cada nudo tiene una presión mayor o igual a la mínima permitida. El segundo, es la búsqueda de posibles reducciones de costos. El primer objetivo se alcanza incrementando los diámetros (si es necesario) a partir de los que tienen mayor diferencia de pérdidas de altura entre los valores reales y objetivos, hasta que todo el sistema cumple con la restricción de presión. El segundo objetivo se alcanza a través de un doble recorrido a partir de las fuentes hasta los sumideros en la dirección del flujo, y luego hacia atrás. La reducción del diámetro de cada tubo se considera dos veces, y el diámetro se reduce de forma permanente si no se viola alguna restricción después del cambio. Para asegurarse que no se está violando la presión mínima se requieren numerosas simulaciones hidráulicas, ya que es necesario ejecutar una simulación hidráulica por cada modificación del diámetro de cada tubo individual.

La metodología de OPUS fue probada por Saldarriaga et al. (2012) en tres sistemas de referencia conocidos: Hanoi, Balerna y Taichung, así como en la red R28 que se presenta en este artículo. Los resultados alcanzaron costos cercanos a los óptimos con un número de iteraciones alrededor de tres órdenes de magnitud más pequeño que otros enfoques. Para la red de Hanoi, la metodología OPUS alcanzó un costo de \$ 6.147 millones después de 83 iteraciones, que es sólo un 1,5% por encima del récord mundial de \$ 6.056 millones obtenidos a través de diferentes metaheurísticas por Cunha y Sousa (1999), Geem (2002), Vairavamorthy (2005), Kadu (2008), entre otros. En adición a esto, la solución conseguida por OPUS para Hanoi obtuvo con un número de iteraciones de 3 órdenes de magnitud por debajo de estas. En el caso de la red de Balerna, se obtuvo un costo de € 2.040 millones después de 677 iteraciones. Este resultado presenta una diferencia de 5,1% en comparación con el costo más bajo reportado en trabajos anteriores, que es de € 1.940 millones, con 30'000.000 iteraciones obtenidos por Tolson (2009). La discrepancia en el número de iteraciones en este caso es de 5 órdenes de magnitud, lo que representa un esfuerzo computacional importante. En cuanto a la red de Taichung, la metodología OPUS dio un diseño con un costo de \$ 8.935 millones requiriendo 98 iteraciones. Este costo presenta una diferencia de 2,03% en comparación con el resultado reportado por Sung et al. (2007) obtenido a través de la Búsqueda Tabú de \$ 8.774 millones con 74.500 iteraciones.

Estos resultados se hacen más valiosos cuando se informa que la metodología de OPUS es determinística y por lo tanto un diseño idéntico puede ser encontrado por cualquier usuario después de emplear el mismo número de iteraciones, contrariamente a otros algoritmos con un componente estocástico. Esta metodología es más eficiente que las técnicas heurísticas y los esfuerzos realizados para comprender los principios hidráulicos están bien recompensados. La solución obtenida a través de OPUS ofrecerá una muy buena configuración inicial a los algoritmos no determinísticos, una reducción del número de iteraciones necesarias para llegar a resultados casi óptimos a través de los métodos iterativos y una búsqueda más amplia del espacio de soluciones. Este es el motivo conveniente para ser utilizado como un inicio en caliente para las metodologías metaheurísticas, con el objetivo de mejorar los resultados obtenidos mediante la aplicación de los principios hidráulicos.

## METODOLOGÍA DE INCIO EN CALIENTE

La metodología de Inicio en Caliente que se introduce en este documento combina el algoritmo hidráulicamente basado OPUS con un metaheurístico. El conjunto de diámetros obtenidos a través de OPUS se utiliza como la configuración inicial de la red para ser post-optimizada usando una técnica estocástica. Las metaheurísticas analizadas en esta investigación han sido adaptadas para el caso del diseño de RDAPs y se llevaron a cabo utilizando diferentes programas informáticos: REDES, MATLAB y GANetXL. REDES es un programa de modelación de RDAPs desarrollado en el CIACUA de la Universidad de los Andes, Colombia. MATLAB es un conocido software de alto nivel y entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización de superficies y la programación, desarrollado por MathWorks. Y por último GANetXL, es una herramienta de optimización programada sobre Microsoft Excel, que utiliza algoritmos genéticos para resolver problemas de optimización complejos y de búsqueda, desarrollado en el CWS (Center for Water Systems) de la Universidad de Exeter, Reino Unido. A continuación se describen las principales características de los algoritmos incluidos en este trabajo.

### REDES Algoritmos Genéticos

El AG implementado en REDES utiliza la **reproducción generacional** con **recombinación estándar**, y **selección rueda de ruleta** como el método de reproducción. Además, REDES utiliza serie de restricciones para evitar el estancamiento en mínimos locales, así como un algoritmo para reducir el error estocástico. Este software califica cada una de las soluciones y guarda un número limitado de las mejores soluciones de todas las generaciones. Esta lista de soluciones se guarda y reordena mediante el algoritmo SHAKE cada vez que se crea una nueva generación, de modo que cada nueva solución se pueda comparar con las soluciones en la lista, y por lo tanto se pueda actualizar correctamente. La calificación de cada solución y el reordenamiento de la lista realizado por REDES es una función inversa del costo y de penalizaciones por infringir la restricción de presión mínima. Esto causa que el número de simulaciones hidráulicas aumente en comparación con otros AGs. Es fundamental definir el tamaño de la población (PS), el número de generaciones (NG), la probabilidad de mutación (PMUT), el ajuste de probabilidad constante (PAC), que define una limitación para el número de descendientes para una solución dominante, y la

pena de déficit de presión (DPP), como parámetros iniciales del algoritmo.

### GANetXL Algoritmos Genéticos

El software GANetXL permite al usuario elegir entre un AG **multiobjetivo** o un **mono-objetivo**. Para este caso, se elige la segunda opción y la función a ser optimizada corresponde a la ecuación del costo de la red. El algoritmo de reproducción puede ser uno de los siguientes: **generacional**, donde todos los individuos de la población son producto de mutaciones aleatorias producidas en los individuos de la población anterior, **selección elitista**, similar al anterior algoritmo pero con la diferencia de que un número específico de mejores individuos (**EL**, el cual es elegido por el usuario) es perpetuado sin ninguna mutación a la siguiente generación, y el **estado de equilibrio**, donde sólo unos pocos individuos mutan antes de ser copiados en la nueva generación. Por último, la forma en que se realiza la recombinación debe ser seleccionada de alguna de las siguientes tres opciones: **punto simple**, que asigna los diámetros de uno de los padres a la mitad de los tubos de la red y los diámetros del segundo padre al resto a la otra mitad; **multi-puntos simples**, que divide la red en diferentes secciones y asigna de manera aleatoria los diámetros de uno de los padres a algunas de estas y los diámetros del otro padre al resto de secciones, y **al azar** en el que se decide aleatoriamente tubo por tubo el padre del cual va a transferir su tamaño del diámetro al nuevo individuo. La probabilidad de recombinación se define por el parámetro (pcross). Antes de ser asignados, los diámetros de los padres mutan de acuerdo con una probabilidad de mutación (PMUT), definido por el usuario.

### Algoritmo Genético MATLAB

El AG implementado en MATLAB hace una selección elitista generación por generación. Esto significa que la población en una generación no interactúa con la población en el siguiente. La única información que se comparte entre las generaciones posteriores es la de los mejores individuos, ya que ésta se copia de una generación a la otra sin ser modificada. El número de individuos copiados se determina por el parámetro **individuos élite** (el mismo **EL** anteriormente mencionado). El inicio en caliente puede estar dispuesto de dos maneras: tomando como la población inicial la configuración exacta de diámetros obtenidos a través de OPUS, o la asignación de un rango inicial de posibles diámetros de cada tubería en la red. El rango utilizado en este caso incluye 3 diámetros: el diámetro original asignado por OPUS, el diámetro discreto inmediatamente por debajo y el diámetro

discreto inmediatamente por encima, de la lista de diámetros disponibles de la red. Esta opción se seleccionó ya que evita que el algoritmo se atasque en un óptimo local. El proceso de mutación se realiza utilizando una función uniforme.

### Búsqueda de Armonía (HS) REDES

HS es un algoritmo evolutivo que imita el proceso de improvisación seguida por los músicos para crear una "fantástica" armonía. Se compone de tres pasos básicos, que se describen a continuación.

#### Preparar una Memoria Armónica

La memoria armónica (HM) es una matriz que almacena las mejores armonías. En el contexto de diseño de redes presurizadas, cada fila en HM es una configuración de diámetros de la red y cada columna indica el diámetro discreto que ha sido seleccionado para cada tubo de ella. El **tamaño de la memoria Armónica (HMS)**, que se define por el usuario, determina el número de configuraciones que se guardan en el HM. Cada uno de los posibles diseños son evaluados mediante la siguiente función objetivo:

$$f(D^j) = \sum C_i l_i + \sum [a(P_{\min} - P_k)^2 + b] \quad (1)$$

donde,  $f(D^j)$  es el valor de la función objetivo para la configuración de diámetros  $j$ ,  $NP$  es el número total de tubos en el sistema,  $C_i$  es el costo por unidad de longitud de la tubería  $i$ ,  $l_i$  es la longitud de la tubería  $i$ ,  $NN_{def}$  es el número de nudos que tienen un déficit de presión,  $P_k$  es la presión en el nudo  $k$ ; por último  $a$  y  $b$  son parámetros de la función de penalización, que puede tomar valores del orden de magnitud de 1.000 y 100.000, respectivamente. Para la metodología de inicio en caliente, el HM se inicializa con la configuración de diámetros obtenido a través de la metodología de OPUS. A continuación, se generan una serie de soluciones, hasta que el HMS se ocupe. Esto se hace mediante la asignación al azar a cada tubo de un diámetro cerca de la asignada por OPUS.

#### Improvisar una nueva Armonía

Las nuevas armonías se seleccionan basándose en el conjunto de configuraciones almacenadas en la HM. Por esta razón, el diámetro de una tubería se selecciona al azar de las configuraciones en la HM, a fin de crear nuevos diseños.

#### Actualización de la Memoria de Armonía

Si de acuerdo con la función objetivo de la última armonía generada ésta es mejor que el peor diseño en el HM, el diseño anterior se sustituye por el nuevo.

### Recocido simulado (SA) MATLAB

SA es un algoritmo metaheurístico introducido por Kirkpatrick et al. (1983), que fue diseñado para evitar el estancamiento en óptimos locales, como sucede con los enfoques tradicionales de ascenso. Consiste en una técnica de relajación estocástica inspirada por el proceso físico del recocido de un metal. En contraste con los AGs, SA utiliza una única solución durante el proceso de optimización. En SA, las mejores soluciones se aceptan en todos los casos, mientras que la aceptación de las soluciones en decadencia depende de un parámetro denominado **temperatura**, que indica la probabilidad de que esto ocurra. La temperatura inicial (**Tini**) disminuye en las siguientes interacciones a una tasa dada por el factor denominado tasa de enfriamiento (**Tcr**). La temperatura está incluida en la función de Metropolis introducida por Metropolis et al. (1953), controlando el número de iteraciones del algoritmo al mismo tiempo que define de la probabilidad de que una cierta solución sea aceptada. El proceso finaliza cuando la temperatura alcanza un determinado umbral, **Tstop**, que por lo general es cercano a cero. MATLAB permite dos formas diferentes de generar nuevos individuos para la siguiente iteración: **recocido rápido** y **recocido Boltzmann**. La primera de ellas genera una nueva población tomando medidas aleatorias, con tamaño proporcional a la temperatura. La segunda, toma medidas al azar con tamaño proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura. La manera en la que disminuye la temperatura se limita a una de las siguientes: de manera exponencial, que disminuye en  $0.95^{iteración=n}$ ; logarítmica, que disminuye en  $1/\log(iteración)$ , y lineal, la temperatura disminuye en  $\frac{1}{iteración} = n$ , donde iteración se refiere al número de iteración correspondiente.



### Balerna

Balerna corresponde a una red un distrito de riego en Almería, España. Fue introducido por primera vez por Reza y Martínez (2006). Se hace uso de la ecuación de pérdida de altura de Darcy-Weisbach. Los diámetros de tubería disponibles comercialmente para su diseño se fabrican exclusivamente en PVC, con una rugosidad absoluta de 0,0025 mm. La presión mínima permitida es de 20 metros y cuenta con 10 tubos disponibles en el mercado cuyos costos unitarios se indican en pares (diámetro en mm, costo en €/ m): 113, 7.22; 126.6, 9.1; 144.6, 11.92; 162.8, 14.84; 180.8, 18.38; 226.2, 28.6; 285, 45.39; and 361.8, 76.32. Cuenta con un total de 454 tubos y 443 nudos de consumo que son abastecidos por 4 embalses. La topología de la red se presenta en la Figura 5

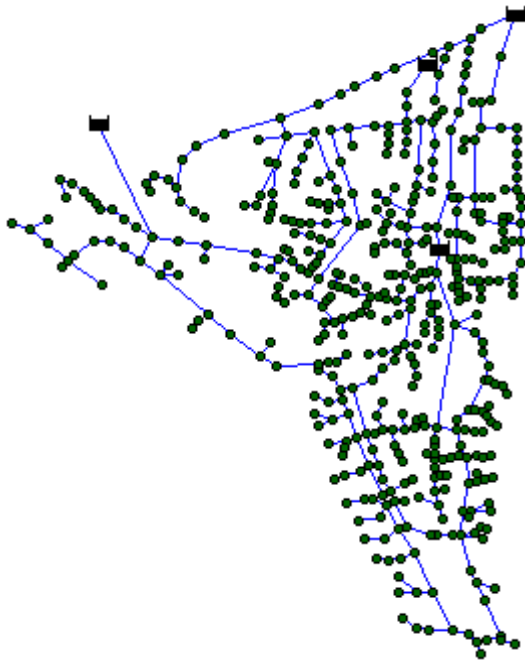


Figura 5. Topología de la red Balerna.

En la Tabla 3 se presentan todos los parámetros probados para cada una de las metaheurísticas presentadas, así como los valores específicos con las que se encontraron las soluciones de costo mínimo para Balerna. Los resultados obtenidos para esta red se presentan en la Tabla 4 y se comparan con los costos obtenidos a través de OPUS y el menor costo reportado en la red Balerna en trabajos anteriores.

### Taichung

La red Taichung fue presentada por primera vez por Sung et al. (2007) y corresponde a una RDAP ubicada en Taichung, Taiwán. La topología de la red se compone de 12 circuitos formados por 31 tubos y 20 nudos, que son abastecidos por un único embalse

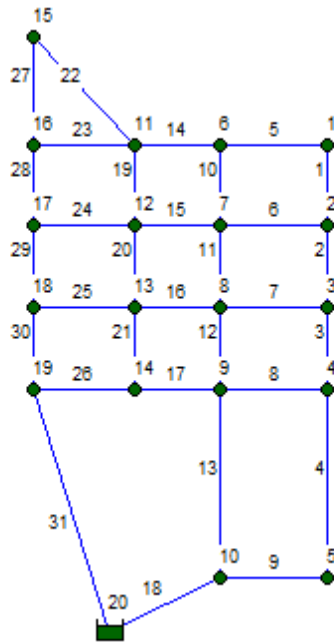
con una altura de 113,98 m. Por su diseño hay 13 diámetros de tubería disponibles comercialmente, cuyos costos unitarios se indican en pares (diámetro en mm, el costo en dólares / m): 100, 860; 150, 1160; 200, 1470; 250, 1700; 300, 2080; 350, 2640; 400, 3240; 450, 3810; 500, 4400; 600, 5580; 700, 8360; 800, 10400; y 900, 12800. La ecuación de la pérdida de altura utilizada es la de Hazen-Williams con un coeficiente de rugosidad (C) de 100 y la presión mínima para el escenario de diseño es de 15 m. La topología de la red se presenta en la Figura 6.

Tabla 3. Parámetros usados para la red Balerna.

Metaheurísticas	Parámetros	Valores probados	Valores(cost o mínimo)
GA REDES	PS	50, 100, 500, 1000, 2000	N/A
	NG	50, 200, 600, 1000	N/A
	Pmut	0.0001, 0.0005, 0.001, 0.1, 0.5	N/A
	PAC	1, 2, 4, 10, 50	N/A
	DPP	100, 1000, 5000, 10000, 100000	N/A
GA MATLAB	PS	50, 100, 200	200
	Pcross	0.8	0.8
	Pmut	0.1, 0.2, 0.3, 0.35, 0.4	0.2
	EL	10% del tamaño de la población	20
HS REDES	HMS	5, 10, 30, 50	N/A
	a	1000	N/A
	b	100000	N/A
SA MATLAB	Tini	50, 100	50
	Tstop	0.001	0.001
	Función Recocido	Rápido, Boltzman	Recocido Boltzman

Tabla 4. Resultados obtenidos para la red Balerna.

	Costo (M)	Iteraciones	Presión mínima (m)	RI	Diferencia costo con Record	Diferencia costo con OPUS
World Record by Tolson (2009)	€ 1.940	30'000,000	N/A	0.31	N/A	N/A
OPUS	€ 2,040	677	20.00	0.31	5.17%	N/A
OPUS 2	€ 2,015	833	20.07	0.36	3.89%	N/A
GA REDES (con OPUS2)	€ 2,015	22,334	20.07	0.36	3.89%	0.00%
GA MATLAB (con OPUS2)	€ 2,000	20,677	20.05	0.34	3.07%	-1.99%
HS REDES	€ 2,015	22,334	20.07	0.36	3.89%	0.00%
SA MATLAB	€ 2,018	5,677	20.07	0.32	4.03%	-1.08%



**Figura 6. Topología de la red Taichung.**

En la Tabla 5 se presentan todos los parámetros de la prueba para cada una de las metaheurísticas, así como los valores específicos con los que se encontraron las soluciones de costo mínimo. Los resultados obtenidos para la red Taichung se presentan en la Tabla 6 y se comparan los costos obtenidos a través de OPUS y el menor costo reportado para la red Taichung en trabajos anteriores.

**Tabla 5. Parámetros para la red Taichung.**

Metaheurísticas	Parámetros	Valores probados	Valores (costo mínimo)
GA REDES	PS	50, 100, 500, 1000, 2000	500
	NG	50, 200, 600, 1000	600
	Pmut	0.0001, 0.0005, 0.001, 0.1, 0.5	0.01
	PAC	1, 2, 4, 10, 50	2
	DPP	100, 1000, 5000, 10000, 100000	100
	GA GANetXL	PS	100, 200, 300, 400, 500
GA GANetXL	NG	10000	10000
	Pcross	0.75, 0.85, 0.95	0.75
	Pmut	0.85	0.85
	EL	2	2
	GA MATLAB	PS	50, 100, 200
GA MATLAB	Pcross	0.8	0.8
	Pmut	dxdxd	0.2
	EL	10% del tamaño de la población	20
	HS REDES	HMS	5, 10, 30, 50
HS REDES	a	1000	N/A
	b	100000	N/A
SA MATLAB	Tini	50, 100	50

Tstop 0.001 0.001

**Tabla 6. Resultados obtenidos para la red Taichung.**

	Costo (M)	Iteraciones	Presión mínima (m)	IR	Diferencia costo con Record	Diferencia costo con OPUS
World Record by Sung et al. (2007)	\$ 8.774	74,500	N/A	0.21	N/A	N/A
OPUS 1	\$ 8.952	74	15.42	0.28	2.03%	N/A
OPUS 2	\$ 8.935	98	15.16	0.28	1.85%	N/A
GA REDES	\$ 8.877	399,001	15.02	0.24	1.16%	-0.84%
GA GANetXL	\$ 8.844	10,074	15.18	0.24	0.80%	-1.02%
GA MATLAB (con OPUS2)	\$ 8.842	10,098	15.02	0.25	0.78%	-1.23%
HS REDES	\$ 8.952	10,098	15.42	0.28	2.03%	0.00%
SA MATLAB (con OPUS2)	\$ 8.844	10,098	15.17	0.24	0.80%	-1.21%

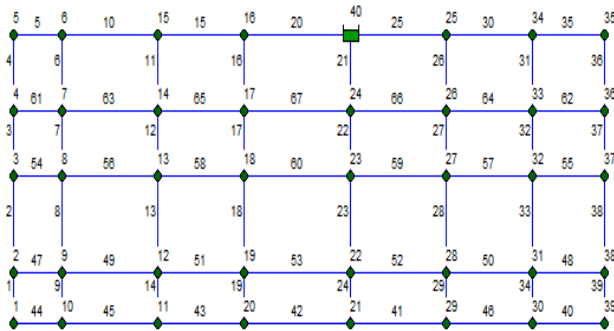
## R28

R28 es una red hipotética creada con fines de investigación en el Centro de Investigación de Acueducto y Alcantarillado (CIACUA) de la Universidad de Los Andes en Bogotá, Colombia. La topología de la red se compone de 28 circuitos formados por 67 tubos y 39 nudos que son abastecidos por un solo embalse, con una altura de 40 m. Todos los nudos están a la misma altura topográfica a excepción del embalse, el cual está 15 m sobre el nivel de estos. Esta red tiene la característica de tener una demanda con demandas de alta magnitud en el centro de la red y menor en la periferia. Las pérdidas por fricción se calculan con la ecuación de Darcy-Weisbach y el material de la tubería para toda la red es de PVC, con una rugosidad absoluta de 0,0015 mm. La presión mínima para el escenario de diseño es de 15 m. El sistema cuenta con 19 diámetros disponibles, que son: 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 750, 800, 1.000, 1.200, 1.400, 1.500 y 1.800 mm. El costo de las tuberías en millones de dólares por metro (\$ / m) se puede calcular utilizando una función potencial del diámetro (mm) con un coeficiente de 1,5 y un exponente de 1,45.

Las demandas de esta red se enumeran en orden de número de identificación de nudo 3, 7, 8, 7, 4, 12, 21, 24, 22, 8, 10, 28, 31, 27, 15, 24, 29, 33, 30, 10, 11, 31, 34, 30, 23, 27, 31, 28, 10, 9, 25, 27, 24, 13, 6, 11, 12, 11, 4 L/s.

La longitud de los tubos se enumeran en orden de tubo de número de identificación: 80, 150, 100, 120, 100, 120, 100, 150, 80, 200, 120, 100, 150, 80, 180, 120, 100, 150, 80, 220, 120, 100, 150, 80, 200, 120, 100, 150, 80, 180, 120, 100, 150, 80, 150, 120, 100, 150, 80, 150, 200, 220, 180, 100, 200, 180, 100, 150, 200, 180, 180, 200, 220, 100, 150, 200, 180, 180, 200, 220, 100, 150, 200, 180, 180, 200, 220, 100, 150, 200, 180, 180, 200, 220 metros.

La topología de la red se presenta en la Figura 7.



**Figura 7. Topología de la red R28. Las etiquetas muestran la identificación numérica de tuberías y nudos.**

En la Tabla 7 se presentan todos los parámetros de la prueba para cada una de las metaheurísticas, así como los valores específicos con los que se encontraron las soluciones de costo mínimo. Los resultados obtenidos para la red R28 se presentan en la Tabla 8 y se comparan con los costos obtenidos a través de la metodología OPUS y con el menor costo alcanzado para la red mediante AG MATLAB sin Inicio en Caliente.

**Tabla 7. Parámetros usados para la red R28.**

Metaheurísticas	Parámetros	Valores probados	Valores (costo mínimo)
GA REDES	PS	50, 100, 500, 1000, 2000	N/A
		50, 200, 600, 1000	N/A
	Pmut	0.0001, 0.0005, 0.001, 0.1, 0.5	N/A
		1, 2, 4, 10, 50	N/A
	DPP	100, 1000, 5000, 10000, 100000	N/A
GA GANetXL	PS	100, 200, 300, 400, 500	200

GA MATLAB	NG	10000 0.75, 0.85,	10000
	Pcross	0.95	0.85
	Pmut	0.85	0.85
	EL	2 50, 100, 200	2
	PS		200
HS REDES	Pcross	0.8 0.1, 0.2, 0.3, 0.35,	0.8
	Pmut	0.4 10% del tamaño de la población	0.2
	EL	5, 10, 30, 50	20
	HMS		N/A
	a	1000	N/A
SA MATLAB	b	100000	N/A
	Tini	50, 100	50
	Tstop	0.001 Rápido, Boltzman	0.001
	F. Recocido		Recocido Boltzman

**Tabla 8. Resultados obtenidos para la red R28.**

	Costo (M)	Iteraciones	Presión mínima (m)	IR	Diferencia costo con Record	Diferencia costo con OPUS
GA MATLAB sin Inicio en Caliente	\$14.792	180,000	15.00	0.34	N/A	N/A
OPUS	\$14.978	78	15.10	0.38	1.26%	N/A
GA REDES	\$14.978	10,751	15.14	0.38	1.26%	0.00%
GA GANetXL	\$14.978	20,078	15.00	0.38	1.26%	0.00%
GA MATLAB	\$14.825	10,078	15.20	0.34	0.23%	-0.01%
HS REDES	\$14.978	10,078	15.00	0.38	1.26%	0.00%
SA MATLAB	\$14.870	10,078	15.01	0.38	0.53%	-0.72%

## CONCLUSIONES

La metodología de Inicio en Caliente introducida en este documento hace uso del algoritmo de OPUS, que se basa enteramente en principios hidráulicos. Los diseños obtenidos a través de este algoritmo se utilizan como un Inicio en Caliente para la aplicación de un enfoque metaheurístico. En otras palabras, la red es re-diseñada después de que se ha aplicado la metodología de OPUS, pero la segunda

vez haciendo uso de un algoritmo metaheurístico que utiliza la solución anterior como la configuración inicial de la red. La metodología Inicio en Caliente combina el uso de principios de la hidráulica para obtener eficientemente diseños casi óptimos, con una búsqueda más amplia del espacio de solución propuesta por diferentes enfoques estocásticos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la metodología reduce consistentemente los costos obtenidos a través del algoritmo de OPUS en un porcentaje muy pequeño, hasta del 1%. En cuanto al número de iteraciones, estas aumentan sustancialmente en todos los casos, alrededor de 3 órdenes de magnitud. Además, los Índices de Resiliencia de las soluciones alcanzadas por el método de Inicio en Caliente son más pequeños en la mayoría de los casos en comparación con los requeridos por OPUS.

Esta metodología demuestra claramente que teniendo en cuenta las bases hidráulicas se logra la optimización del diseño de RDAPs reduciendo significativamente el número de iteraciones necesarias en comparación con los enfoques metaheurísticos y dando soluciones casi óptimas. Los resultados obtenidos a través de la metodología de Inicio en Caliente son significativamente cercanos a los registros, pero no presentan una mejora considerable con respecto a la metodología de OPUS. Además, el esfuerzo computacional requerido aumenta considerablemente, lo que implica que no vale la pena tratar de mejorar una solución que ya está muy cerca del mínimo óptimo y requiere un esfuerzo computacional y humano mínimo para ser alcanzada; teniendo en cuenta que el uso del conocimiento hidráulico para el diseño de RDAPs permite obtener excelentes resultados sin necesidad de un conocimiento experto en técnicas de optimización.

## BIBLIOGRAFÍA

- Cunha, M. (1999). "Water distribution network design optimization: Simulated annealing approach". *J. Water Resour. Plan. Manage.*, pp. 215-221.
- Fujiwara, O., Khang, D. (1990). "A two phase decomposition methods for optimal design of looped water distribution networks". *Water Resources Research*, 26 (4), pp. 539-549.
- Geem, Z. K., (2002). "Harmony search optimization: Application to pipe network design". *Int. J. Model. Simulat.* pp. 125-133.
- Geem, Z. K., (2006). "Optimal cost design of water distribution networks using harmony search". *Engineering Optimization*, 38 (3), pp. 259-277.
- Geem, Z. K., (2009). "Particle-swarm harmony search for water network design". *Engineering Optimization*, 41 (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.* pp 147-160.
- Kirkpatrick S, Gelatt CD, Vecchi MP, (1983). "Optimization by simulated annealing". *Science*, pp 220:671
- Lin, M., Liu, G., Chu, C., (2007). "Scatter search heuristic for least-cost design of water distribution networks". *Engineering Optimization*, 39 (7), pp. 857-876.
- Metropolis N, Rosenbluth A, RosenbluthM, Teller A, Teller E, (1953). "Equation of state calculations by fast computing machines". *Chem Phys* 21(6), pp.1087-1092
- 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. (In Spanish).
- Perelman, L., Ostfeld, A., (2007). "An adaptive heuristic cross entropy algorithm for optimal design of water distribution systems". *Engineering Optimization*, 39 (4), pp. 413-428.
- Reca, J., Martínez, J., (2006). "Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks". *Water Resources Research*, 44, W05416.
- Reca, J., Martínez, J., Gil, C., Baños, R., (2007). "Application of several meta-heuristic techniques to the optimization of real looped water distribution networks". *Water Resources Management*, 22 (10), pp. 1367-1379.
- Saldarriaga, J, Paez, D., Cuero, P., Leon, N., (2012). "Optimal power use surface for design of water distribution systems, 14th Water Distribution Systems Analysis Conference". Adelaide, South Australia, pp. 468-480.
- Savic, D., Walters, G., (1997). "Genetic algorithms for least cost design of water distribution networks". *J. Water Resour. Plan. Manage.* pp. 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*, pp. 177-187.
- Takahashi, S., Saldarriaga, S., Hernández, F., Díaz, D., Ochoa, S., (2010). "An energy methodology for the design of water distribution systems". *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 (3), pp. 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.
- Vairavamorthy, K., (2005). "Pipe index vector: A method to improve genetic-algorithm-based

pipe optimization". J. Hydraul. Eng., pp. 1117-1125.

Wu, I., 1975. Design of drip irrigation main lines. Journal of Irrigation and Drainage Division 101, pp. 265-278.