

XIX SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA

DISEÑO OPTIMIZADO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE INCLUYENDO ANÁLISIS DE COSTO MÍNIMO VERSUS RESILIENCIA DE LA RED

F.L. Mendoza¹, J.G. Saldarriaga²

¹Investigador, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA–, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia; email: fl.mendoza84@uniandes.edu.co

²Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental - Director, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA–, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia; email: jsaldarr@uniandes.edu.co.

RESUMEN

En la investigación descrita en este artículo se diseñó y probó una metodología para el diseño de redes de distribución de agua potable, la cual está basada en la comprensión del comportamiento hidráulico y energético de la red y busca encontrar diseños no solo económicos sino también confiables. Uno de los principales parámetros de confiabilidad en una red es el índice de resiliencia.

En todas las redes diseñadas se obtuvo que con respecto a la red de mínimo costo, la confiabilidad aumentó entre un 36% y 57% generando un aumento en los costos de tan solo entre el 6 % y 11%. Los beneficios encontrados oscilaron entre cuatro y siete veces los costos generados.

ABSTRACT

The research project described in this article designed and proved a methodology for the design of water distribution networks, which is based on an understanding of the hydraulic and energy network behavior and seeks to find not only economic but also reliable designs. One of the main parameters of reliability in a network is the resilience index.

The results showed that all networks designed obtained that the reliability increased 36% to 57% generating a low increase in costs (only 6% to 11%). Found benefits varied between four and seven times the costs.

PALABRAS CLAVES

Redes de distribución, Resiliencia, diseño de mínimo costo, confiabilidad.

INTRODUCCIÓN

El diseño de redes de distribución de agua potable (RDAP) es un tema de gran importancia. El suministro de agua potable, servicio que presta una RDAP, es prioritario para el desarrollo y buen funcionamiento de la sociedad. A través del tiempo se han desarrollado e implementado metodologías que buscan optimizar el diseño desde la perspectiva de costo mínimo. Este método de optimización busca encontrar un punto óptimo (donde los costos sean mínimos) en el cual se satisfagan ciertas condiciones de demanda y presión requeridas. En una RDAP cualquier falla puede generar múltiples consecuencias en términos de confiabilidad, generando problemas para satisfacer la demanda y presión requerida. Es por esto que es necesario analizar si el diseño optimizado de redes debe sesgarse únicamente al análisis de costo mínimo o por el contrario debe ser multicriterio, integrando el concepto de resiliencia de la red, teniendo en cuenta la confiabilidad de la RDAP.

Dado que los recursos para la construcción de RDAP son limitados es necesario encontrar diseños óptimos, es decir, económicos pero además, con un grado de confiabilidad aceptable. El problema de optimización económica en el diseño de RDAP, es prácticamente un problema resuelto. Inicialmente se usaron técnicas de optimización tradicionales, como la Programación Lineal y No Lineal, la mayoría de estas técnicas además de requerir un esfuerzo computacional enorme, eran difíciles de implementar presentando numerosas dificultades (e.g. el redondeo de diámetros continuos a discretos en algunas de ellas). Posteriormente, se plantearon meta heurísticas derivadas de la naturaleza y aplicables al diseño de RDAP, entre las más destacadas están, Algoritmos Genéticos, Enjambre de Partículas, Búsqueda de Armonía, entre otras. Cabe resaltar que estas metodologías de diseño necesitan de un motor de cálculo, que verifique la hidráulica de los diseños obtenidos. Sin embargo ninguno de ellos está basado en analizar las características topológicas e hidráulicas de la RDAP para la obtención del diseño óptimo. La única aproximación hidráulica para la solución del problema de diseño de RDAP fue propuesta por I Pai Wu en 1975. Aunque el criterio de Wu se desarrolló para el diseño de la línea principal en sistemas de irrigación (i.e. tuberías en serie), posteriormente, el profesor Ronald Featherstone aplicó el criterio de Wu al diseño de RDAP. Adicionalmente, Okitsugu Fujiwara comprobó que la extensión de tal criterio al diseño de RDAP si fuera posible.

Con base en esas investigaciones, El Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) desarrolló una metodología la cual calculaba la superficie óptima de presiones (SOP) (Villalba, 2004). Esta metodología probó funcionar bien para redes con una topología uniforme y con una sola fuente de abastecimiento. Finalmente se desarrolló una nueva metodología, la cual se llamó Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico (SOGH) (Ochoa, 2009), la cual complementa y mejora SOP. Sin embargo, hallar la RDAP de mínimo costo no garantiza hallar una RDAP con un nivel de resiliencia aceptable (capacidad de superar condiciones de estrés o fallas en la red, superávit de energía en la red). La elección de la RDAP de mínimo costo, no necesariamente genera el correcto diseño de una RDAP confiable, ya que, la función objetivo no incorpora el concepto de confiabilidad adecuadamente, el cual es la principal razón por la cual se diseñan RDAP con circuitos y no en forma de árbol (i.e. redes abiertas) (Todini, 2000). Esta investigación desarrolló una metodología de diseño que incluya el análisis del costo mínimo y el índice de resiliencia (principal parámetro de confiabilidad en una RDAP).

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El diseño de una Red de Distribución de Agua Potable (RDAP) consiste en determinar los diámetros de las tuberías que componen la red. Para ello se necesitan como datos de entrada; 1. Los caudales

demandados en cada nodo, y 2. La presión mínima (la cual se presenta en las horas de máximo consumo, generalmente fijado por una norma local). Sin embargo, este tipo de problema es muy complejo ya que el número de incógnitas a hallar es muy superior al número de ecuaciones disponibles. Se ha demostrado que la solución a este problema con todas sus restricciones incluidas es un problema NP –DURO (Yates, 1984). Cabe resaltar que además de conocer los caudales demandados y la presión mínima en cada nodo, es necesario conocer también la topología de la red (i.e. sus coordenadas X,Y,Z), la conectividad entre los nodos de la red y las características físicas de las tuberías como lo son: la rugosidad absoluta, longitud y coeficiente de perdidas menores. Además es necesario conocer la línea piezométrica de cada una de las fuentes de abastecimiento (e.g. tanques). (Saldarriaga, 2007). Tradicionalmente los diseños de RDAP se han resuelto mediante ensayo y error, usando la experiencia e intuición del diseñador. Aunque los diseños resultantes son factibles, están muy lejos de ser la solución más económica y mucho menos la más *confiable*. En otras palabras, este método de diseño no cuenta con ningún criterio de optimización.

El problema de diseño óptimo multicriterio de una RDAP se define de la siguiente manera: Conociendo el trazado de la RDAP (i.e. su topología y su conectividad), además de las demandas de caudales en cada nodo, encontrar la combinación de diámetros que minimice el costo constructivo del sistema pero que al mismo tiempo alcance niveles de confiabilidad aceptables.

Matemáticamente, la función objetivo puede expresarse como:

$$\text{Función Objetivo } Z = \begin{cases} \text{Minimizar } C \\ \text{Maximizar } R \end{cases} \quad [1]$$

donde C es el costo constructivo de una RDAP y R es la confiabilidad de la red, cuyo parámetro principal es el índice de resiliencia I_R .

Función de Costos

El costo constructivo incluye el valor comercial de las tuberías más su costo de instalación. La función de costos generalmente se puede expresar mediante una relación potencial del diámetro así:

$$C = \sum_{i=1}^{NT} k \cdot L_i \cdot D_i^x \quad [2]$$

donde NT es el número de tuberías que conforman la RDAP, L_i y D_i son la longitud y el diámetro del i -ésimo tubo de la red, k y x son parámetros que se determina por regresión teniendo en cuenta los costos de determinado material en función del costo.

Confiabilidad en una RDAP

A continuación se describirán algunas de los parámetros de confiabilidad que se usarán en este estudio.

- *Índice de Resiliencia (I_R)*

Este índice fue propuesto por el Ingeniero Ezio Todini. Básicamente este índice calcula la relación que existe entre la potencia por unidad de peso de operación del sistema y la potencia por unidad de peso máxima que el sistema puede tener. En otras palabras calcula el superávit de potencia por unidad de peso existente en la red. A continuación se explicará la deducción del índice de resiliencia I_R . En una RDAP la potencia total disponible (P_{tot}) puede expresarse como:

$$P_{tot} = \sum_{i=1}^{ne} Q_i H_i \quad [3]$$

donde n_e es el número de embalses, Q_i y H_i son el caudal y la altura piezométrica de entrada respectivamente. También existe la siguiente relación:

$$P_{tot} = P_{dis} + P_{sal} \quad [4]$$

donde P_{dis} es la potencia disipada en las tuberías y P_{sal} es a potencia entregada a los usuarios en cada uno de los nodos.

La potencia entregada a los usuarios en cada uno de los nodos (P_{sal}), puede ser la *ideal* (P_{sal}^*) o la *real* (P_{sal}).

$$P_{sal}^* = \sum_{j=1}^{mu} Q_j H_j^* \quad [5]$$

donde mu es el número de uniones (i.e. nodos), Q_j es el caudal demandado en cada nodo y H_j^* es la presión mínima requerida en cada nodo. Se define el índice de resiliencia (I_R) como:

$$I_R = 1 - \frac{P_{dis}}{P_{dis}^*} \quad [6]$$

teniendo en cuenta que:

$$\begin{aligned} P_{dis} &= P_{tot} - P_{sal} = P_{tot} - \sum_{j=1}^{mu} Q_j H_j \\ P_{dis}^* &= P_{tot} - P_{sal}^* = P_{tot} - \sum_{j=1}^{mu} Q_j H_j^* \end{aligned} \quad [7]$$

En la ecuación 8 se puede notar que básicamente la diferencia entre P_{dis} y P_{dis}^* es que en la primera se usan las presiones *reales* y en la segunda las presiones *ideales* o mínimas. Finalmente el I_R se puede reescribir como (Todini, 2000):

$$I_R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{ne} Q_i H_i - \sum_{j=1}^{mu} Q_j H_j}{\sum_{i=1}^{ne} Q_i H_i - \sum_{j=1}^{mu} Q_j H_j^*} = \frac{\sum_{j=1}^{mu} Q_j (H_j - H_j^*)}{\sum_{i=1}^{ne} Q_i H_i - \sum_{j=1}^{mu} Q_j H_j^*} \quad [8]$$

- *Coficiente de Conectividad en la RDAP (Cj)*

Las redes de distribución de agua potable con circuitos son más confiables y más practicas si los diámetros de las tuberías conectadas a un nodo no varían ampliamente (Prasad, 2004). Si D_1 , D_2 y D_3 (donde $D_1 \geq D_2 \geq D_3$) son los diámetros de tres tuberías conectadas a un nodo j , el coeficiente de conectividad que expresa la uniformidad en cuanto las conexiones en ese nodo, está dado por la siguiente ecuación (Prasad, 2004):

$$C_j = \frac{(D_1 + D_2 + D_3)}{3D_1} \quad [9]$$

en forma generalizada,

$$C_j = \frac{\sum_{i=1}^{NT_j} D_i}{NT_j \cdot \max\{D_i\}} \quad [10]$$

donde NT_j es el número de tuberías conectadas al nodo j . El valor de C_j es igual a uno ($C_j = 1$) cuando las tuberías conectadas a un nodo tienen el mismo diámetro, o si tan solo una tubería se conecta al nodo. El valor de C_j será menor que uno ($C_j < 1$) si las tuberías conectadas a un nodo presentan diámetros diferentes. El objetivo entonces es propender por valores de C_j iguales o cercanos a uno. Esto con el fin de evitar conexiones poco prácticas (e.g una tubería de 10 pulgadas conectada a una de 2 pulgadas). Con base el coeficiente de conectividad (Ecuación 2-10), el índice de resiliencia puede reescribirse de la siguiente forma (Prasad, 2004):

$$I_R'' = \frac{\sum_{j=1}^{mu} C_j Q_j (H_j - H_j^*)}{\sum_{i=1}^{ne} Q_e H_e - \sum_{j=1}^{mu} Q_j H_j^*} \quad [11]$$

- *Potencia Unitaria (PUTi)*

La potencia unitaria de cierta tubería i se define como el caudal que fluye por la tubería i multiplicado por la diferencia entre la altura piezométrica de los nodos inicial y final. Los iniciales y finales dependen de la dirección del flujo (Saldarriaga, 2010). Corresponde a una potencia por unidad de peso.

$$P_{UTi} = qi(h_{i,ini} - h_{i,fin}) \quad [12]$$

- *Superávit Mínimo de Energía (I_m)*

El superávit de energía en un nodo es igual a la diferencia entre la altura piezométrica actual y la altura piezométrica mínima requerida. Este superávit indica la energía disponible a ser disipada bajo un ambiente de fallas. Maximizar el superávit de energía disponible en los nodos más deprimidos mejorará la confiabilidad de la RDAP. El índice de superávit mínimo de energía se define como (Prasad, 2004):

$$I_m = \min\{H_j - H_j^*\} \quad j = 1, 2, \dots, mu \quad [13]$$

Este índice se usó como indicador de los beneficios obtenidos en la investigación realizada por Walski y Gessler en 1999.

- *Superávit Total de Energía (I_t)*

Otro índice que puede ser usado para medir la confiabilidad de la RDAP es la suma de los superávit de energía en todos los nodos de la red. El superávit total de energía se puede expresar como:

$$I_t = \sum_{j=1}^{nu} (H_j - H_j^*) \quad [14]$$

METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE RDAP

La metodología de diseño que se usó para el diseño de RDAP es una aproximación heurística y recursiva. Esta nueva metodología usó el programa REDES (CIACUA, 2008), dado que este programa cuenta con numerosas funciones y procedimientos que facilitaron probarla en diferentes RDAP teóricas. Además se usó Microsoft Excel como hoja de cálculo acompañada de rutinas elaboradas en Visual Basic, con el fin de validar los resultados obtenidos con el programa REDES.

Las etapas que conforman la metodología propuesta se describen a continuación. Cabe resaltar que como se describió en el Capítulo 2, es necesario contar con los siguientes parámetros de diseño: trazado de la RDAP, presión mínima, función de costos, diámetros comerciales disponibles, ecuación de resistencia fluida (e.g. Darcy-Weisbach). En la Figura 1 se presenta la metodología propuesta.

1. Hallar la red de mínimo costo usando la metodología superficie optima de gradiente hidráulico, SOGH (Ochoa, 2009). A la red hallada calcularle el índice de resiliencia y el costo.
2. Seleccionar el nodo con menor coeficiente de conectividad. Si existen varios nodos con el mismo índice mínimo de conectividad, se seleccionaran todos los que tengan el mínimo índice de conectividad.
3. Calcular la potencia unitaria de cada una de las tuberías conectadas al nodo (o nodos) seleccionado en la etapa 2-
4. Calcular el costo que tendría cambiar cada una de las tuberías conectadas al nodo seleccionado en la Etapa 2, al aumentarles su diámetro al siguiente diámetro comercial.
5. Calcular la relación entre la potencia unitaria (Etapa 3) y el costo por aumento de diámetro (Etapa 4) para cada una de las tuberías conectadas al nodo seleccionado en la Etapa 2.
6. Seleccionar la tubería con la mayor relación encontrada en la Etapa 5 (i.e. mayor relación $P_{UTI} / Costo$).
7. Aumentar el diámetro de la tubería seleccionada en la etapa 6 al siguiente diámetro comercial.
8. Correr la hidráulica de la red, calcular el nuevo costo y el nuevo índice de resiliencia.
9. Calcular el porcentaje de aumento del índice de resiliencia con respecto a la iteración anterior.
10. Calcular el porcentaje de aumento del costo de la red con respecto a la iteración anterior.
11. Calcular la relación entre el porcentaje de aumento de la resiliencia (Etapa 9) y el porcentaje de aumento del costo (Etapa 10), es decir la relación beneficio –costo. Si la relación beneficio – costo calculada en esta etapa es mayor que 2 (i.e. los beneficios marginales son iguales o mayores al doble que los costos marginales) regresar a la Etapa 2 para iniciar una nueva iteración, sino el proceso finaliza.si la relación costo-beneficio es menor que dos no se justifica continuar con el proceso, ya que por un aumento de confiabilidad dado (i.e. beneficios) los costos aumentan demasiado.
12. Calcular todos los parámetros de confiabilidad propuestos y verificar el desempeño del proceso.

RESULTADOS

La metodología propuesta se aplicó a tres RDAP las cuales son: red de dos circuitos, red de Apulian y red R28. Además fue necesario crear un modelo hidráulico en el programa REDES de cada una de las redes probadas.

Red de dos Circuitos

La red de dos circuitos (Figura 2) se usó por primera vez en 1977 por Alperovits y Shamir. Está conformada por ocho tubos, dos circuitos, seis nodos de demandas y un embalse con una altura piezométrica favorable de 210 m que alimenta la red por gravedad. La red resultante después de aplicar la metodología se comparó con la red de mínimo costo reportada en la literatura. En la Tabla 1 en las columnas 2 y 3 se presenta cómo el índice de resiliencia (indicador principal de confiabilidad en la red) cambio a la vez que lo hacían los costos después de cada iteración. En las columnas 4 y 5 se presenta el porcentaje de aumento del índice de resiliencia y de los costos en relación con la iteración anterior. Finalmente en las columnas 6 y 7 se presenta la relación beneficio – costo con respecto a la iteración anterior y si esta es mayor o igual a dos (i.e. los beneficios son iguales o mayores al doble de los costos). En la última fila se presenta la iteración en la cual el proceso se detuvo (la ultima iteración no hace parte de la solución) y en la primera fila los datos de la red de mínimo costo. Como se puede observar, después de la séptima iteración la relación beneficio – costo es menor que dos; seguir realizando el proceso no tendría ningún sentido ya que para un aumento de confiabilidad obtenido el costo se incrementa notablemente.

En la Figura 3 se puede observar como en la iteración 8 los beneficios netos marginales (zona sombreada) son muy bajos, razón por la cual el proceso iterativo finaliza. Así mismo, en la Figura 4 se puede observar como en las primeras iteraciones del proceso un aumento del I_R no involucraba aumentos grandes en el costo (por esto las pendientes son más bajas al inicio). Por el contrario en las ultimas iteraciones, un leve aumento del I_R generaba aumentos considerables en el costo.

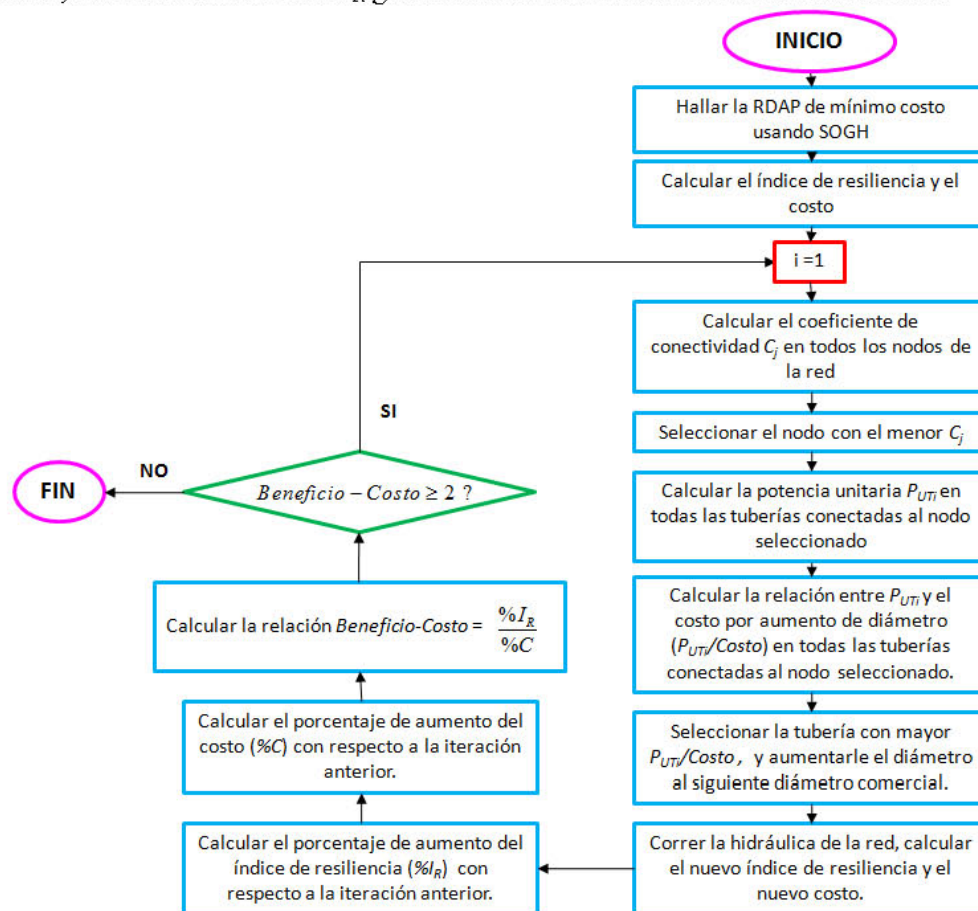


Figura 1.- Metodología propuesta para el diseño de RDAP incluyendo análisis de costo mínimo versus resiliencia de la red.

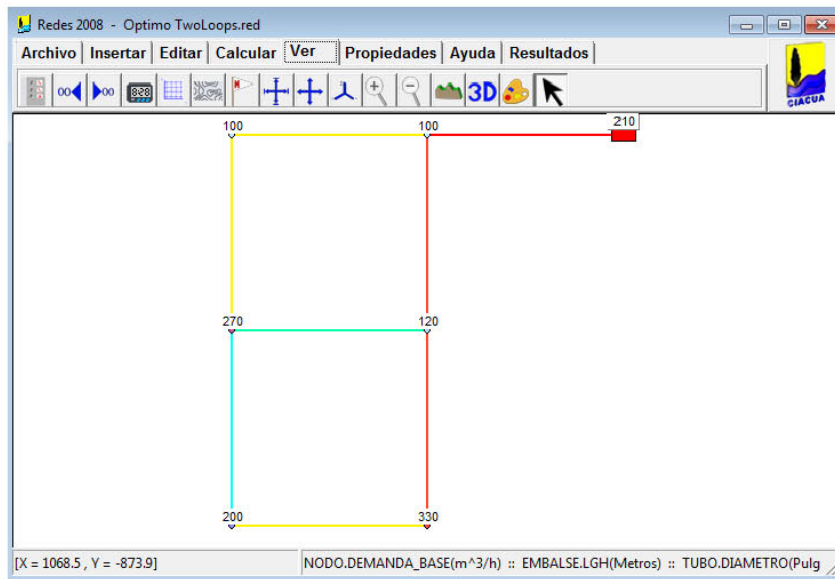


Figura 2.- Red de dos circuitos.

Tabla 1.- Resultados obtenidos para la red de dos circuitos.

Iteración	I_R	Costo	% Aumento I_R	% Aumento Costo	Beneficio-costos I_R/Costo	$I_R/\text{Costo} > 2$
Red mínimo costo	0,210	419000	--	--	--	--
1	0,26	424000	23,81	1,19	19,95	SI
2	0,278	427000	6,92	0,71	9,78	SI
3	0,289	430000	3,96	0,70	5,63	SI
4	0,298	433000	3,11	0,70	4,46	SI
5	0,306	438000	2,68	1,15	2,32	SI
6	0,317	445000	3,59	1,60	2,25	SI
7	0,33	454000	4,10	2,02	2,03	SI
8	0,338	462000	2,42	1,76	1,38	NO

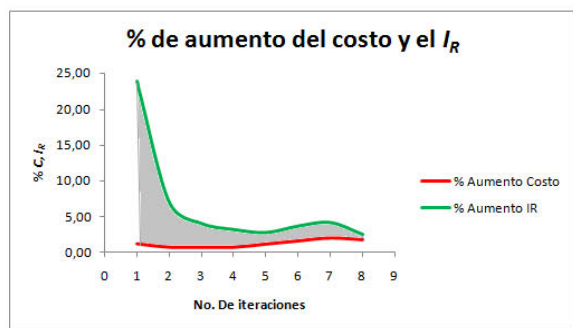


Figura 3.- Porcentaje de aumento del costo y del I_R para cada iteración.

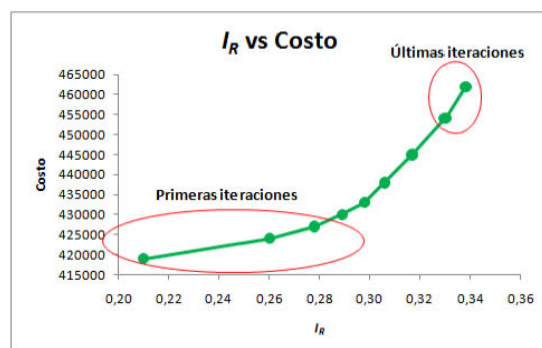


Figura 4.- Comportamiento del costo y el I_R en las primeras y últimas iteraciones.

Al finalizar el proceso iterativo (séptima iteración) se pudo observar que el índice de resiliencia aumentó de 0.21 a 0.33, es decir en un 57.14 % y el costo aumentó de 419000 a 454000 es decir en un 8.35%. La relación Beneficio – Costo total fue de 6.84. Se evaluó también el coeficiente de conectividad promedio de la red. Se obtuvo que el coeficiente de conectividad de la red de mínimo costo fuera de 0.738 (con un valor mínimo de 0.50, es decir, el nodo con menor coeficiente de conectividad fue de 0.5), mientras que después de aplicar la metodología el coeficiente de conectividad promedio fue de 0.86 (con un valor mínimo de 0.80). Se evaluó el superávit mínimo de energía I_m . Se obtuvo que en la red de mínimo costo fue de 0.45 metros columna de agua (mca), después de aplicar la metodología fue de 1.181 mca, es decir se obtuvo un aumento de 0.731 mca en el nodo mas deprimido de la red. Del mismo modo se evaluó el superávit total de energía I_t . Se obtuvo que para la red de mínimo costo fue de 41.96 mca, después de aplicar la metodología fue de 57.81 mca, es decir se obtuvo un aumento de 15.85 mca. Finalmente en la Tabla 2 se presentan los resultados de todos los parámetros propuestos, obteniéndose en todos ellos un aumento significativo, lo que involucra que la red obtenida presente una alta confiabilidad.

Tabla 2.- Resultados obtenidos para los parámetros evaluados. Red de dos circuitos.

Parámetro	Red mínimo costo	Después de aplicar la metodología	% Aumento
I_R	0,21	0,33	57,1
C_j promedio	0,738	0,86	16,5
C_j mínimo	0,5	0,8	60,0
I_m (m.c.a)	0,45	1,181	162,4
I_t (m.c.a)	41,96	57,81	37,8

Finalmente se presentan las superficies de presiones antes y después de aplicar la metodología. Aunque no se observa un cambio fuerte se puede observar que después de aplicar la metodología se obtuvo una superficie un poco más uniforme tal como se muestra en la Figura 5.

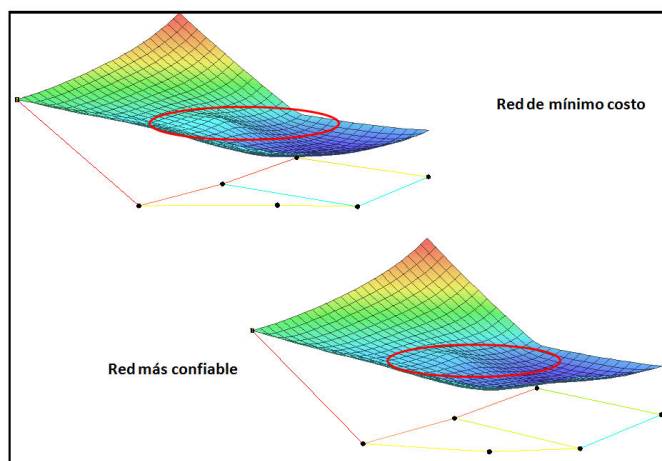


Figura 5.- Superficie óptima de presiones en la red de mínimo costo y después de aplicar la metodología.

Red de Apulian

La red de Apulian (Figura 6) se ha usado recientemente por Giustolisi y Laucelli en 2009. Su nombre se debe a la localidad ubicada en el sur de Italia. Está conformada por 34 tubos, 11 circuitos, 23 nodos de demandas y una altura piezométrica favorable de 36.4 m que alimenta la red por gravedad. Se pueden observar la demanda base en cada nodo y la línea de gradiente hidráulico en el embalse alimentador.

La red resultante después de aplicar la metodología se comparó con la red de mínimo costo. En la Tabla 3 en las columnas 2 y 3 se presenta cómo el índice de resiliencia (indicador principal de confiabilidad en la red) cambió a la vez que lo hacían los costos después de cada iteración. En las columnas 4 y 5 se presenta el porcentaje de aumento del índice de resiliencia y de los costos en relación con la iteración anterior. Finalmente en las columnas 6 y 7 se presenta la relación beneficio – costo con respecto a la iteración anterior y si esta es mayor o igual a 2 (i.e. los beneficios son iguales o mayores al doble de los costos). En la última fila se presenta la iteración en la cual el proceso se detuvo (la ultima iteración no hace parte de la solución) y en la primera fila los datos de la red de mínimo costo.

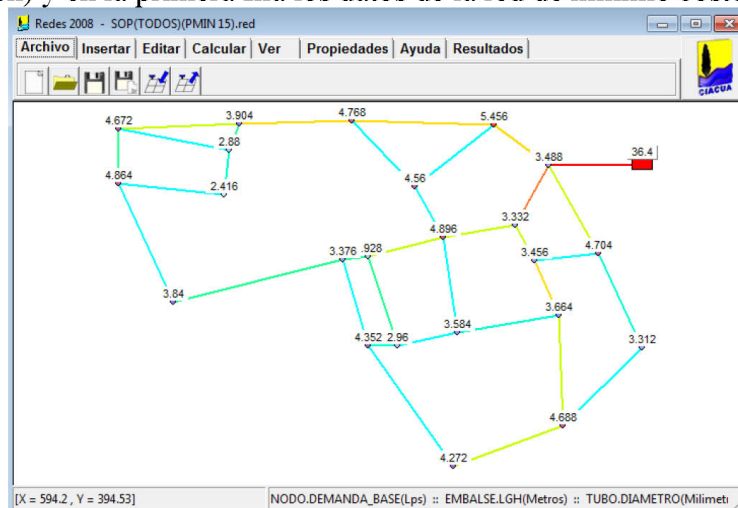


Figura 6.- Modelo hidráulico de la red de Apulian en el programa REDES.

Iteración	I_R	Costo	% Aumento I_R	% Aumento Costo	Beneficio-costo I_R/Costo	$I_R/\text{Costo} > 2$
Red mínimo costo	0,437	265082,96	--	--	--	--
1	0,480	268689,28	9,84	1,36	7,23	SI
2	0,542	273287,35	12,92	1,71	7,55	SI
3	0,565	275053,00	4,24	0,65	6,57	SI
4	0,574	277117,46	1,59	0,75	2,12	SI
5	0,597	282280,76	4,01	1,86	2,15	SI
6	0,617	288591,76	3,35	2,24	1,50	NO

Tabla 3.- Resultados obtenidos para la red de Apulian.

Como se puede observar, después de la quinta iteración la relación beneficio – costo es menor que dos. Seguir realizando el proceso no tendría ningún sentido ya que para un aumento de confiabilidad obtenido el costo se incrementa notablemente. En la Figura 7 se puede observar como en la iteración 6 los beneficios netos marginales (zona sombreada en gris) son muy bajos, razón por la cual el proceso iterativo finaliza. Así mismo, en la Figura 8 se puede observar como en las primeras iteraciones del proceso un aumento del I_R no involucraba aumentos grandes en el costo (pendientes bajas al inicio), por el contrario en las últimas iteraciones, un leve aumento del I_R generaba aumentos considerables en el costo.

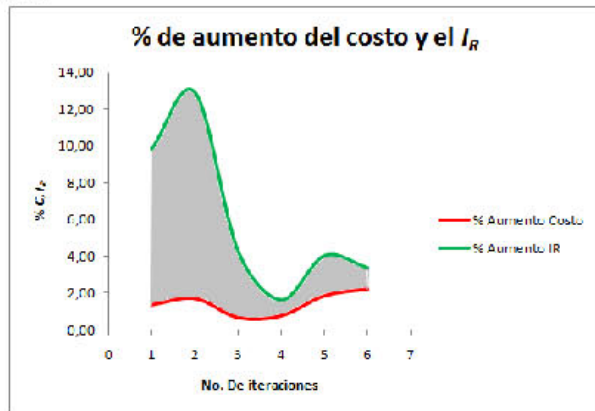


Figura 7.- Porcentaje de aumento del costo y del I_R para cada iteración.

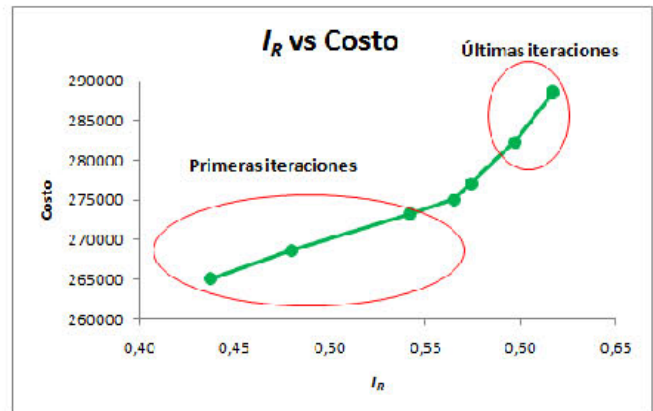


Figura 8.- Comportamiento del costo y el I_R en las primeras y últimas iteraciones.

Al finalizar el proceso iterativo (quinta iteración) se pudo observar que el índice de resiliencia aumentó de 0.437 a 0.597, es decir en un 36.61 % y el costo aumentó de 265082.96 a 282280.76 es decir en un 6.49%. La relación Beneficio – Costo total fue de 5.64. Se evaluó también el coeficiente de conectividad promedio de la red. Se obtuvo que el coeficiente de conectividad de la red de mínimo costo fuera de 0.75 (con un valor mínimo de 0.67, es decir, el nodo con menor coeficiente de conectividad fue de 0.67), mientras que después de aplicar la metodología el coeficiente de conectividad promedio fue de 0.78 (con un valor mínimo de 0.71). Se evaluó el superávit mínimo de energía I_m . Se obtuvo que en la red de mínimo costo fue de 0.24 mca después de aplicar la metodología fue de 1.09 mca, es decir se obtuvo un aumento de 0.85 mca en el nodo mas deprimido de la red. Del mismo modo se evaluó el superávit total de energía I_t . Se obtuvo que para la red de mínimo costo fue de 122.94 mca, después de aplicar la metodología fue de 158.63 mca, es decir se obtuvo un aumento de 35.69 mca. Finalmente en la Tabla 4 se presentan los resultados de todos los parámetros propuestos, obteniéndose que en la mayoría de ellos se produjo un aumento significativo, lo que involucra que la red obtenida presente una alta confiabilidad.

Tabla 4.- Resultados obtenidos para los parámetros evaluados. Red de Apulian.

Parámetro	Red mínimo costo	Después de aplicar la metodología	% Aumento
I_R	0,437	0,597	36,6
C_j promedio	0,75	0,78	4,0
C_j mínimo	0,67	0,71	6,0
I_m (m.c.a)	0,24	1,09	354,2
I_t (m.c.a)	122,94	158,63	29,0

Finalmente se presentan las superficies de presiones antes y después de aplicar la metodología. Se observa un cambio significativo en el nodo más deprimido de la red, ya que después de aplicar la metodología se obtuvo un superávit de energía en ese punto (Ver Figura 9).

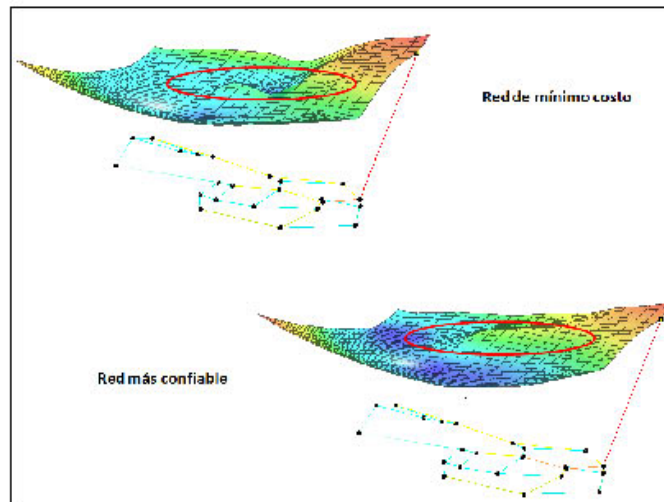


Figura 9.- Superficie óptima de presiones en la red de mínimo costo y después de aplicar la metodología.

Red R28

La red R28 es una red RDAP propuesta por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados CIACUA. Su nombre se debe a que presenta 28 circuitos. Fue usada recientemente por Saldarriaga en 2010. Está constituida por 67 tuberías, 39 nodos y un embalse con 100 metros de altura piezométrica que alimenta la red por gravedad. En la Figura 10 se presenta una vista en planta de la red. Se pueden observar la demanda base en cada nodo y la línea de gradiente hidráulico en el embalse alimentador.

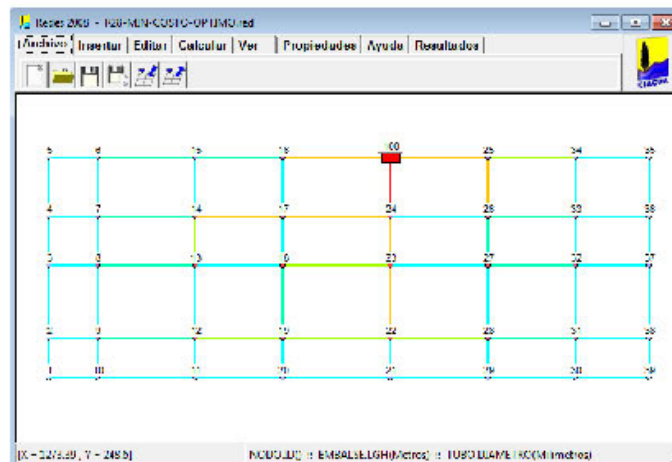


Figura 10.- Modelo hidráulico de la red R28 en el programa REDES.

La red resultante después de aplicar la metodología se comparó con la red de mínimo costo. En la Tabla 5 en las columnas 2 y 3 se presenta cómo el índice de resiliencia (indicador principal de confiabilidad en la red) cambió a la vez que lo hacían los costos después de cada iteración. En las columnas 4 y 5 se presenta el porcentaje de aumento del índice de resiliencia y de los costos en relación con la iteración anterior. Finalmente en las columnas 6 y 7 se presenta la relación beneficio – costo con respecto a la iteración anterior y si esta es mayor o igual a dos (i.e. los beneficios son iguales o mayores al doble de los costos). En la última fila se presenta la iteración en la cual el proceso se detuvo (la ultima iteración no hace parte de la solución) y en la primera fila los datos de la red de mínimo costo.

Iteración	I_R	Costo	% Aumento I_R	% Aumento Costo	Beneficio-costo I_R/Costo	$I_R/\text{Costo} > 2$
Red mínimo costo	0,376	84506,15	--	--	--	--
1	0,406	84934,05	7,98	0,51	15,76	SI
2	0,434	85704,26	6,90	0,91	7,61	SI
3	0,449	86711,81	3,46	1,18	2,94	SI
4	0,467	87482,03	4,01	0,89	4,51	SI
5	0,478	88031,38	2,36	0,63	3,75	SI
6	0,491	89038,94	2,72	1,14	2,38	SI
7	0,504	89588,29	2,65	0,62	4,29	SI
8	0,514	90444,09	1,98	0,96	2,08	SI
9	0,519	90993,44	0,97	0,61	1,60	NO

Tabla 5.- Resultados obtenidos para la red R28.

Como se puede observar, después de la octava iteración la relación beneficio – costo es menor que 2. Seguir realizando el proceso no tendría ningún sentido ya que para un aumento de confiabilidad obtenido el costo se incrementa notablemente. En la Figura 11 se puede observar como en la iteración 9 los beneficios netos marginales (zona sombreada en gris) son muy bajos, razón por la cual el proceso iterativo finaliza. Así mismo, en la Figura 12 se puede observar como en las primeras iteraciones del proceso un aumento del I_R no involucraba aumentos grandes en el costo (pendientes más bajas al inicio), por el contrario en las ultimas iteraciones, un leve aumento del I_R generaba aumentos considerables en el costo.

Al finalizar el proceso iterativo (octava iteración) se pudo observar que el índice de resiliencia aumentó de 0.376 a 0.514, es decir en un 36.70 % y el costo aumentó de 84506.15 a 90444.09 es decir en un 7.03 %. La relación Beneficio – Costo total fue de 5.22. Se evaluó también el coeficiente de conectividad promedio de la red. Se obtuvo que el coeficiente de conectividad de la red de mínimo costo fuera de 0.82 (con un valor mínimo de 0.58, es decir, el nodo con menor coeficiente de conectividad fue de 0.58), mientras que después de aplicar la metodología el coeficiente de conectividad promedio fue de 0.83 (con un valor mínimo de 0.63). Se evaluó el superávit mínimo de energía I_m .

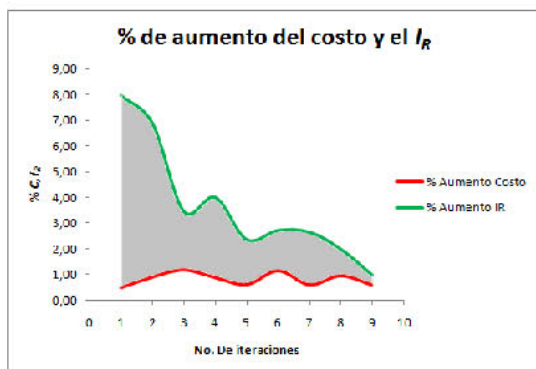


Figura 11.- Porcentaje de aumento del costo y del I_R para cada iteración.

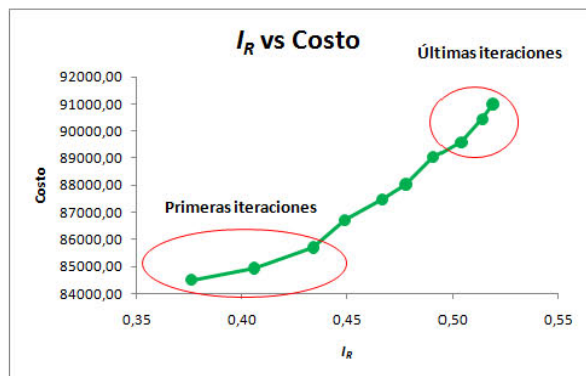


Figura 12.- Comportamiento del costo y el I_R en las primeras y últimas iteraciones.

Se obtuvo que en la red de mínimo costo fue de 0.4 mca, después de aplicar la metodología fue de 19.31 mca, es decir se obtuvo un aumento de 18.91 mca en el nodo más deprimido de la red. Del mismo modo se evaluó el superávit total de energía I_t . Se obtuvo que para la red de mínimo costo fue de 996.5 mca, después de aplicar la metodología fue de 1510.7 mca, es decir se obtuvo un aumento de 514.16 mca. Finalmente en la Tabla 6 se presentan los resultados de todos los parámetros propuestos, obteniéndose en la mayoría de ellos un aumento significativo, lo que involucra que la red obtenida presente una alta confiabilidad.

Tabla 6.- Resultados obtenidos para los parámetros evaluados. Red R28.

Parámetro	Red mínimo costo	Después de aplicar la metodología	% Aumento
I_R	0,376	0,514	36,7
C_j promedio	0,82	0,83	1,2
C_j mínimo	0,58	0,63	8,6
I_m (m.c.a)	0,4	19,31	4727,5
I_t (m.c.a)	996,5	1510,7	51,6

Finalmente se presentan las superficies de presiones antes y después de aplicar la metodología. Se observa un cambio significativo en el superávit total de energía, el cual se evidencia en ciertas zonas de la superficie (Ver Figura 13).

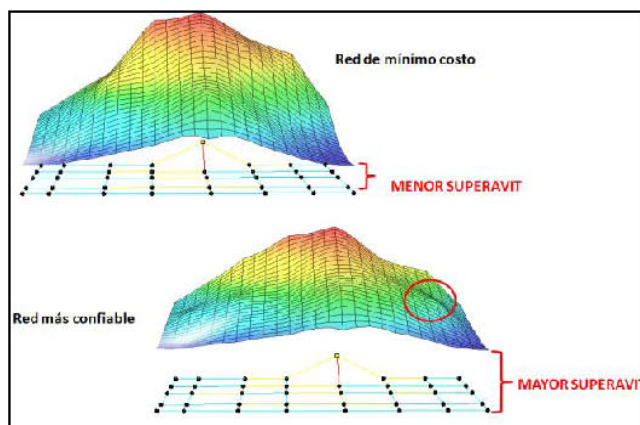


Figura 13.- Superficie óptima de presiones en la red de mínimo costo y después de aplicar la metodología.

CONCLUSIONES

En esta investigación se desarrolló y se probó con éxito una metodología de diseño de redes de distribución de agua potable (RDAP) que complementa el trabajo realizado en investigaciones anteriores por diferentes centros de investigación internacionales y el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de Los Andes.

La metodología propuesta mejora los resultados de las investigaciones anteriores porque obtiene diseños no solo económicos sino también confiables. Toda la metodología se basa en la comprensión del comportamiento hidráulico y energético de la RDAP.

El problema de optimización económica en el diseño de RDAP, es prácticamente un problema resuelto. Para encontrar la RDAP de mínimo costo existen numerosas heurísticas que no están basadas en la comprensión de las características hidráulicas y topológicas propias de una RDAP (e.g. algoritmos genéticos, búsqueda de la armonía) y metodologías que sí están basadas en la comprensión de las características hidráulicas de la red (e.g. SOGH).

El trazado de una RDAP en forma de circuitos, se realiza principalmente debido a criterios de confiabilidad. Este tipo de trazados permite redundancia en las RDAP, generando diferentes caminos para que el suministro de agua llegue a un punto (nodo). La redundancia generada por el trazado de la red en forma de circuitos permite generar RDAP más confiables. Sin embargo, en el caso de presentarse una falla en la red, además de la redundancia en la RDAP, se requiere la disponibilidad de energía suficiente (i.e. presión) para que el suministro llegue a los nodos afectados.

Encontrar el diseño de una RDAP de mínimo costo, no garantiza encontrar un nivel de confiabilidad deseable. En la mayoría de los casos, las RDAP de mínimo costo presentan índices de resiliencia muy bajos (i.e. confiabilidad baja), es decir, no cuentan con un superávit de energía suficiente que garantice el suministro en caso de presentarse una falla.

Es necesario diseñar RDAP de mínimo costo, ya que los recursos económicos son limitados. Sin embargo, se debe garantizar un nivel de confiabilidad aceptable, de lo contrario no tendría ningún sentido trazar las RDAP en forma de circuitos.

En un RDAP se debe procurar porque su conectividad sea práctica, es decir, que las tuberías conectadas a un nodo no varíen ampliamente en diámetro (e.g. un tubo de dos pulgadas conectado a uno de diez pulgadas sería una conexión poco práctica). Los diseños de mínimo costo generalmente presentan conectividades poco prácticas. La metodología desarrollada fue aplicada a tres RDAP ampliamente usadas en la literatura: Red de dos circuitos (Two Loops), Red de Apulian y Red R28. En todas estas redes se encontraron diseños económicos y confiables.

Los resultados obtenidos muestran que en todas las RDAP se logró aumentar la confiabilidad entre un 36% y 57% (en comparación con la red de mínimo costo) generando un aumento en los costos de tan solo entre el 6 % y 11%. Los beneficios encontrados oscilaron entre cuatro y siete veces los costos generados. Esto prueba que la metodología presentó un buen desempeño.

REFERENCIAS

Alperovits, E., & Shamir, U. (1977). "Design of Optimal Water Distribution Systems". *Water Resources Research*, 885-900.

- Bhave, P., & Sonak, V. (1992).** A Critical study of the linear programming gradient method for optimal design of water supply networks. *Water Resources Research* , 1577-1584.
- CIACUA, U. d. (2007).** *REDES 2007*, Manual del Usuario. Bogotá.
- Dandy, G., Simpson, A., & Murphy, L. (1996).** An improved genetic algorithm for pipe network optimization. *Water Resources Research* , 449-458.
- Fujiwara, O., & Khang, D. (1990).** A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks. *Water Resources Research* , 539-549.
- Geem, Z. (2006).** Optimal cost design of water distribution networks using harmony search. *Engineering Optimization* , 259-277.
- Geem, Z. (2009).** Particle-swarm harmony search for water network design. *Engineering Optimization* , 297-311.
- Geem, Z., Kim, J., & Loganathan, G. (2002).** Harmony search optimization: application to pipe network design. *International Journal of Modelling and Design* , 125-133.
- Gupta, I., Bassin, J., Gupta, A., & Khama, P. (1993).** Optimization of water distribution system. *Environmental Modelling and Software* , 101-113.
- Kadu, S., Gupta, R., & Bhave, P. (2008).** Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space. *Journal of water Resources Planning and Management* , 147-160.
- Kessler, A., & Shamir, U. (1989).** Analysis of the linear programming gradient method for optimal design of water supply networks. *Water Resources Research* , 1469-1480.
- Ochoa, S. (2009).** “Diseño optimizado de acueductos mediante la superficie óptima de gradiente hidráulico.” Bogotá: Universidad de los Andes.
- Quindry, G., Brill, E., & Liebman, J. (1981).** Optimization of looped water distribution systems. *Journal of the Environmental Engineering Division* , 665-679.
- Reca, J., & Martinez, J. (2006).** Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks . *Water Resources Research* , W05416.
- Saldarriaga, J. (2007).** *Hidráulica de Tuberías. Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos*. Bogotá: Alfaomega.
- Saldarriaga, J. (2010).** Prioritized rehabilitation of water distribution networks using dissipated power concept to reduce non-revenue water. *Urban Water Journal*, 1-20.
- Savic, D., & Walters, G. (1997).** Genetic algorithms for least cost design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* , 67-77.
- Todini, E. (2000).** Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water* , 115-122.
- Varma, K., Narashiman, S., & Bhallamudi, S. (1997).** Optimal design of water distribution systems using an NLP method. *Journal of Environmental Engineering* , 381-388.
- Walters, G., Halhal, D., Savic, D., & Ouazar, D. (1999).** Improved design of 'Anytown' distribution network using structured messy genetic algorithms. *Urban water* , 23-38.
- Wu, I. (1975).** Design of drip irrigation main lines. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* , 265-278.