

DOPRHAG, UN PROGRAMA PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE REDES HIDRÁULICAS INTERIORES EN EDIFICIOS

RAMIRO MARBELLO PÉREZ

Ingeniero Civil y Sanitario

Magister en Ingeniería Ambiental, Doctorado en Ingeniería de la Contaminación Medio Ambiental

Profesor Asociado

Escuela de Geociencias y Medio Ambiente

Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín

rvmarbel@unalmed.edu.co

JAIME PATIÑO MÁRQUEZ

Ingeniero Civil.

Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín

japatino@unalmed.edu.co

Preparado para presentación en el
XVI Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología
Sociedad Colombiana de Ingenieros
Sociedad de Ingenieros del Quindío
Universidad del Quindío
Corporación Autónoma Regional del Quindío
Armenia 29, 30 y 31 de octubre de 2004

Resumen. El presente trabajo constituye un potente aporte a la solución del problema del diseño óptimo de redes hidráulicas, que aplica la técnica del algoritmo genético. El método se basa en la teoría de la evolución de las especies, y busca el mejoramiento de la solución en cada iteración del mismo.

Se ha formulado un algoritmo genético con reproducción asexual, el cual elimina el cruce como medio de reproducción, con la ventaja de que converge más rápidamente hacia la mejor solución. Se destaca que trabaja con variables de decisión de tipo discreto.

Tres casos particulares de redes de tuberías se pueden optimizar con este algoritmo; ellos son:

1. Redes interiores de suministro de agua en edificios: Aplicando los métodos del Factor de Simultaneidad, el de Hunter, el de Hunter Modificado (exigido por las Normas ICONTEC NTC-1500) y el de la Certeza Total.
2. Redes ramificadas abastecidas a través de un único nodo de entrada
3. Redes cerradas puras, cuyo balance de caudales se realiza con el Método de Hardy Cross.

Producto del presente trabajo, se ha desarrollado una aplicación llamada DOPRHAG, Diseño Óptimo de Redes Hidráulicas, empleando la técnica de optimización Algoritmo Genético, la cual permite la búsqueda de la red óptima, basándose en el costo de la misma y en el cumplimiento de las restricciones hidráulicas, debidas, principalmente, a valores máximos y mínimos que pueden tomar las presiones en los nudos, y las velocidades de flujo.

Se ha aplicado el modelo a la solución de varios problemas, encontrándose excelentes resultados. Las soluciones obtenidas, comparadas con las reportadas por otros autores, evidencian reducciones en el costo de las redes del orden del 14%, con tiempos de cómputo realmente bajos. Además, es destacable en el programa la introducción de los métodos de estimación de caudales en redes interiores de edificios.

DOPRHAG, UN PROGRAMA PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE REDES HIDRÁULICAS INTERIORES EN EDIFICIOS

1. INTRODUCCIÓN.

Según su topología, una red de abastecimiento de agua potable puede clasificarse en *ramificada* o *mallada*. Una red *ramificada* o abierta, posee forma arborescente y se caracteriza porque un par de nudos cualesquiera sólo pueden ser conectados por un único trayecto. Redes domiciliarias de abasto y algunas redes de riego de cultivos, pertenecen a este grupo. Una red *mallada* o cerrada, está constituida por tramos que forman circuitos cerrados y se caracteriza porque un par de nudos pueden ser conectados por múltiples trayectos. A este grupo pertenecen las grandes redes de acueducto de las ciudades.

Cuando se habla de *diseño* de una red topológicamente definida, sea *ramificada* o *mallada*, se trata de determinar los diámetros de las tuberías que deberán conducir un determinado caudal, desde los puntos de abastecimiento hasta cada uno de los puntos de demanda, de tal forma que se garantice el cumplimiento mínimo de dichos consumos, y que las presiones generadas en los nudos sean adecuadas.

En redes domiciliarias (*ramificadas*), la asignación de los caudales a los tramos es de carácter probabilístico, ya que es poco factible que todos los artefactos sanitarios, abastecidos por la red, estén funcionando de manera simultánea. Existen diferentes métodos, basados en probabilidades, para estimar tales caudales; entre ellos están: el método del *Factor de Simultaneidad*, el de *Hunter* y el de *Hunter Modificado*. Este último, es el indicado por la NTC-1500 para el diseño de redes domiciliarias de agua potable, en Colombia. Existe un cuarto método, conocido como método de la *Certeza Total*, que se emplea cuando se tiene plena seguridad de que todos los artefactos estarán funcionando al mismo tiempo. En el caso de redes *malladas*, la distribución de los caudales en los tramos depende, entre otras cosas, de los diámetros seleccionados para las tuberías. El método más difundido para determinar tal distribución, es el método de *Hardy Cross*.

Ahora bien, se habla de *diseño óptimo* de una red, cuando a los requerimientos de demanda y presión se añade algún criterio de optimización establecido previamente. El criterio más común suele ser el de minimización del costo total de la red. De manera intuitiva, tal costo podría reducirse seleccionando diámetros pequeños para todas las tuberías que componen la red. Sin embargo, esto no siempre es factible, si se tiene en cuenta que es poco probable que, con tal configuración, todos los consumos sean satisfechos y los límites máximo y mínimo, para las presiones en todos los nudos, sean respetados. En este caso, el *diseño óptimo* consiste en determinar la combinación de diámetros más pequeños posibles para una red dada, vigilando el cumplimiento de las restricciones hidráulicas.

Adicionalmente, la aplicación de los principios y ecuaciones de la hidráulica a la solución del problema, conduce al planteamiento de sistemas de ecuaciones altamente no lineales, para los que no se ha

establecido un método que permita conocer, de manera certera, la mejor solución o solución óptima. Por otra parte, como los diámetros de las tuberías constituyen las variables del sistema y sólo pueden tomar valores correspondientes a diámetros comerciales, se trata de un problema con variables discretas.

2. EL ALGORITMO GENÉTICO.

Creado a mediados del siglo XX por John Holland, el Algoritmo Genético (A.G.) es un método heurístico de optimización que emplea búsqueda estocástica (aleatoria) para determinar la mejor solución de un problema. Está basado en una analogía con la *Teoría de la Evolución de las Especies* de Darwin, en la que se destacan los mecanismos de *selección natural* (supervivencia del más fuerte), *cruce* (reproducción para perpetuar la especie) y *mutación* (modificación de algunas características para adaptarse al medio).

Sus parámetros fundamentales son el *número de individuos* de la *especie* y el *número de generaciones* en las que ésta evolucionará: el primero representa el número de soluciones que el algoritmo estudiará en cada iteración del mismo, y sobre las que aplicará los tres mecanismos evolutivos; el segundo es el número de iteraciones del que dispondrá el algoritmo para encontrar el mejor *individuo* o solución óptima. Cada *individuo*, a su vez, posee un *código genético*, que consiste en un vector que guarda los valores de todos los parámetros (variables) que tiene asignados en cada momento del proceso, y una *aptitud*, que depende del valor de la *función objetivo* evaluada en los valores almacenados en su *código*, y de la *función de penalización* que refleja el cumplimiento de las restricciones del problema.

El mecanismo de *selección* opera comparando las *aptitudes* de los *individuos* y eligiendo a los mejores para combinar sus *códigos genéticos* mediante el mecanismo de *cruce* y crear la siguiente *generación*. Finalmente, sobre los nuevos *individuos* se opera el mecanismo de *mutación*, que consiste en cambiar aleatoriamente algunos de los valores almacenados en su *código*, con base en una *probabilidad de mutación* dada. Este proceso se lleva a cabo tantas veces como *generaciones* se especifiquen, momento en el que se espera se haya encontrado el *individuo óptimo*.

Una formulación más reciente del A.G. (González, 1997) elimina el mecanismo de *cruce* como elemento fundamental del mismo, dejando en la *mutación* toda la responsabilidad del mejoramiento de la *especie*; tal formulación se conoce como Algoritmo Genético Asexual y presenta una convergencia más rápida que la formulación tradicional. Es esta la formulación empleada en el presente trabajo.

La gran diversidad de problemas de optimización que pueden ser abordados por medio del A.G. lo convierten en un método altamente flexible. Problemas de diseño óptimo de estructuras, electrificación rural, explotación de yacimientos de gas, diseño de vías, asignación de recursos y diseño de redes hidráulicas, entre otros, son algunos de los problemas que han sido afrontados por este método.

Dentro de las ventajas que posee el A.G., una de las más relevantes es la de revisar varias posibles soluciones del problema de forma simultánea, lo que le permite explorar varias regiones del espacio de búsqueda al mismo tiempo. Asimismo, permite trabajar con variables discretas, cuyos valores puede tomar de una lista predefinida.

3. MÉTODO PROPUESTO: ALGORITMO GENÉTICO ASEXUAL.

Se presenta aquí un método para el diseño óptimo de redes hidráulicas que aplica la técnica del Algoritmo Genético Asexual. Se considera que la red tiene una topología definida con anterioridad y que el material de las tuberías está determinado. Los diámetros candidatos para formar la red corresponden a diámetros comerciales. Para el caso de redes *ramificadas*, se deben indicar los consumos localizados en los nudos y el método probabilístico a usar, para el cálculo de los caudales en los tramos. Para redes *malladas* se debe especificar una distribución inicial de caudales en la red. Finalmente, debe especificarse el *número de individuos* a considerar en la *especie*, y el *número de generaciones* a desarrollar. La primera *generación* se crea aleatoriamente.

3.1. Código genético.

El *código genético* de cada *individuo* corresponde a un vector que posee tantas entradas como tramos tenga la red a optimizar. En cada una de sus entradas se almacena un número entero, el cual está asociado a un diámetro de la lista de diámetros comerciales especificada. Dicho código es el que identifica a cada uno de los *individuos* de la *especie*, por medio del cual se calculan sus características, y sobre el cual operan los mecanismos evolutivos del algoritmo.

3.2. Función objetivo.

El proceso de optimización busca determinar los diámetros para cada una de las tuberías de la red, de tal forma que se minimice el *costo total* de la misma. Cada diámetro disponible tiene asociado un costo particular, cuyo valor está dado por unidad de longitud de tubería. De esta forma, el *costo total* de la red se calcula con la siguiente expresión:

$$CT = \sum_{i=1}^{NT} C_i L_i \quad (1)$$

Donde C_i es el costo por unidad de longitud de la tubería i , cuyo diámetro comercial es D_i , y L_i es su longitud. NT es el número de tuberías que conforman la red.

3.3. Función de penalización.

La *función de penalización*, también conocida como *factor de penalización*, mide el cumplimiento de las restricciones hidráulicas impuestas al problema para que el sistema funcione adecuadamente. Así, por ejemplo, las *presiones* desarrolladas en los nudos deben ser superiores a un valor dado de *presión mínima*, que garantice que el líquido llegue a todos los puntos de consumo, e inferiores a una *presión máxima*, para

evitar la rotura de las tuberías. La velocidad de flujo es otro aspecto importante, y debe limitarse a un valor máximo que impida el desgaste excesivo del interior de las tuberías, y que reduzca el efecto de fenómenos como el *golpe de ariete* o la *cavitación*; además, debe superar un valor mínimo que garantice el arrastre de pequeñas partículas sólidas. En orden a estas consideraciones, se calcula la *función de penalización* con la siguiente expresión:

$$FP = \sum_{i=1}^{NN} \left| \frac{(P_i - P_{m\acute{a}x})}{P_{m\acute{a}x}} \right| + \sum_{i=1}^{NN} \left| \frac{(P_i - P_{m\acute{i}n})}{P_{m\acute{i}n}} \right| + \sum_{j=1}^{NT} \left| \frac{(V_j - V_{m\acute{a}x})}{V_{m\acute{a}x}} \right| + \sum_{j=1}^{NT} \left| \frac{(V_j - V_{m\acute{i}n})}{V_{m\acute{i}n}} \right| \quad (2)$$

Donde P_i es la presión en el nudo i , $P_{m\acute{a}x}$ y $P_{m\acute{i}n}$ son las presiones máxima y mínima admisibles en los nudos, respectivamente, V_j es la velocidad de flujo en el tramo j , $V_{m\acute{a}x}$ y $V_{m\acute{i}n}$ son las velocidades de flujo máxima y mínima tolerables en los tramos respectivamente, NN es número total de nudos y NT es el número total de tramos.

3.4. Función de Aptitud.

La *aptitud* de cada individuo depende de los valores que éste tenga de la *función objetivo* y de la *función de penalización*, y debe ser más alta, cuanto más apto sea el individuo estudiado. En este sentido, se define la *aptitud* con la siguiente expresión:

$$A_i = K - (CT)_i (FP)_i \quad (3)$$

Donde CT_i es el costo total o función objetivo del *individuo* i , FP_i es la función de penalización del *individuo* i , y K es una constante tan grande como para garantizar que la aptitud de cualquier *individuo* no sea negativa. Con esta definición de *aptitud* se garantiza que, cuanto más bajos sean el costo y la penalización de un *individuo*, más apto será y tendrá mayor probabilidad de pasar a la siguiente *generación*.

3.5. Selección y mutación.

Una vez calculadas las *aptitudes* de los *individuos*, se procede a determinar sus *aptitudes escaladas* con el fin de favorecer adicionalmente a los *individuos* más aptos, y cuyo valor depende de las *aptitudes promedio* y *máxima* obtenidas en la *generación* evaluada. El mecanismo de *selección* compara tales *aptitudes* para elegir a los pocos *individuos* que pasarán a la siguiente instancia del proceso, copiándose tantas veces como sea necesario, hasta reemplazar a los *individuos* no aptos. En ese momento se inicia el proceso de *mutación*, que modifica aleatoriamente el *código genético* de los nuevos *individuos*.

Además, se definió una *probabilidad de mutación* del 1% (se muta un parámetro de cien), o de $1/NP$, donde NP es el número de parámetros de un *individuo*, si éste tiene menos de cien parámetros.

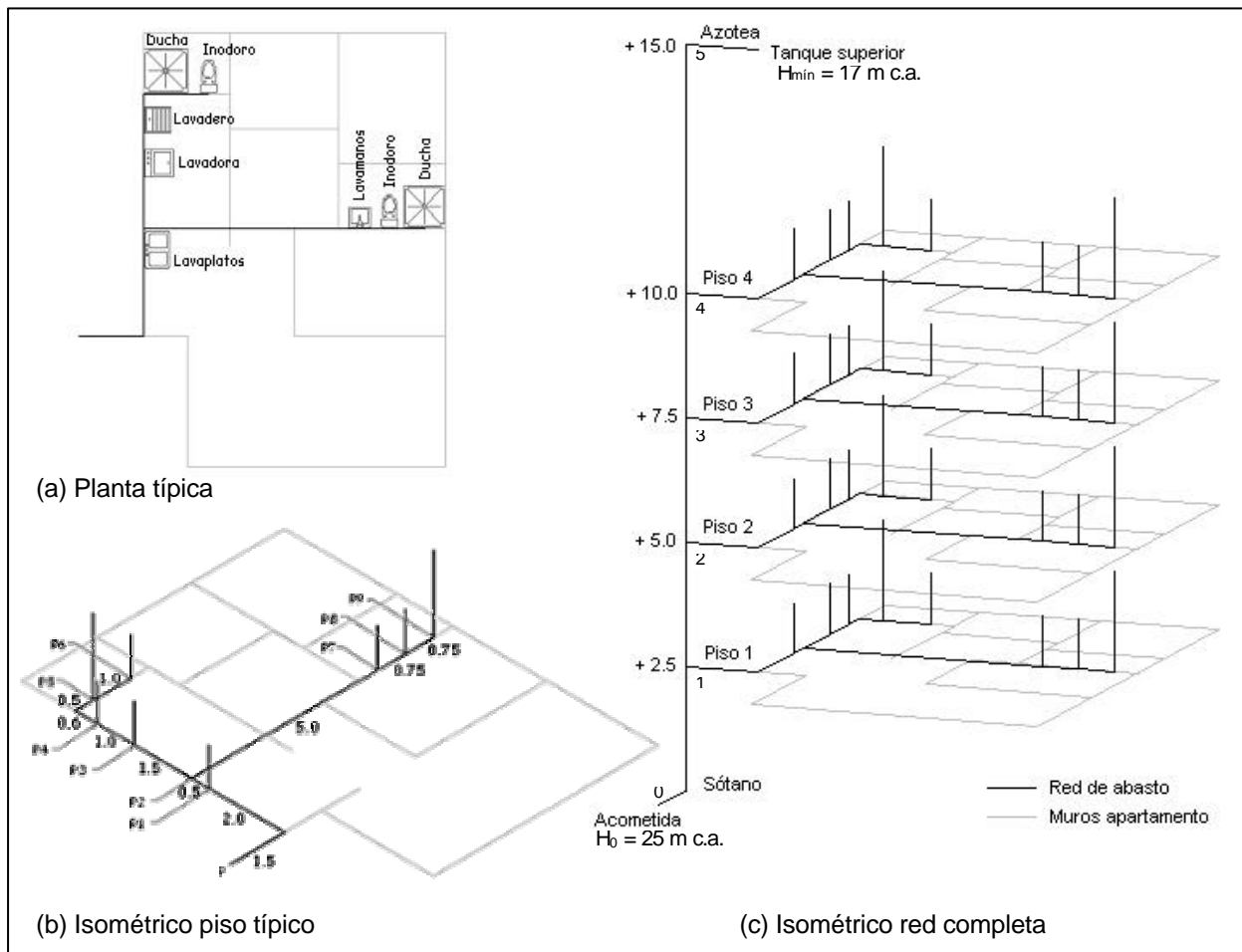


Figura 2. Esquema de la red domiciliaria a optimizar.

En la Tabla 1 se resumen los requerimientos mínimos, para cada artefacto, de presión y caudal (medido en *unidades de abasto*, de acuerdo con el *método de Hunter Modificado*, indicado por la Norma ICONTEC NTC-1500 para el diseño de redes interiores de edificios).

Tabla 1. Requerimientos de caudal y presión para diferentes artefactos sanitarios.

Artefacto Sanitario	Inodoro de tanque	Lavamanos	Ducha	Lavaplatos	Lavadero	Lavadora
Unidades de Abasto	3	1	2	2	3	3
Presión mínima [m c.a.]	2.0	2.0	1.5	2.0	2.0	2.0

La lista de diámetros comerciales disponibles, así como sus respectivos costos, por unidad de longitud, aparecen en la Tabla 2.

Tabla 2. Diámetros disponibles y su costo por metro lineal.

Diámetro [mm]	12.7	19.1	25.4	31.8	38.1	50.8	63.5	76.2	101.6
Costo [$\times 10^3$ \$/m]	6.0	11.0	18.0	25.0	33.0	51.0	72.0	96.0	149.0

Como se explicó previamente, el objetivo del diseño es asignar los diámetros a los tramos que componen toda la red, de tal forma que el costo total de la misma sea el más bajo posible. Para ello, se ejecutó el método propuesto en el presente trabajo. Los resultados obtenidos se reportan en la Tabla 3. Los caudales en los tramos se calcularon en función de las *unidades de abasto* que éstos conducen, tal y como lo indica el método de *Hunter Modificado* (NTC 1500). Las pérdidas de carga - h_f - se estimaron usando la ecuación de Hazen-Williams con $C = 140$. La *altura piezométrica* mínima - H_{min} - de cada nudo final, corresponde a la suma de su cota y la presión mínima de servicio, indicada en la Tabla 1, requerida por el artefacto sanitario ubicado en dicho nudo. Adicionalmente, se limitó la velocidad de flujo a un valor máximo de 3.0 m/s. La nomenclatura de los nudos es la indicada en la Figura 2(b), sustituyendo el prefijo “P” por el número del piso correspondiente.

Tabla 3. Resultados del AG para la red domiciliaria de la Figura 2.

Número de individuos : 20; Número de Generaciones : 350							
Tramo i - j	Longitud [m]	Caudal [$\times 10^3$ m ³ /s]	Diámetro [mm]	Velocidad [m/s]	$h_{f\ i-j}$ [m]	H_j [m c.a.]	$H_{j, \text{mín}}$ [m c.a.]
0-1	4,00	2,387	31,8	3,01	1,24	23,8	2,5
1-11	3,50	0,881	25,4	1,74	0,51	23,3	4,5
11-12	0,50	0,812	25,4	1,60	0,06	23,2	2,5
12-13	1,50	0,589	19,1	2,06	0,42	22,8	4,5
13-14	1,00	0,499	19,1	1,74	0,20	22,6	4,5
14-15	1,10	0,333	12,7	2,63	0,78	21,8	4,0
15-16	1,00	0,214	12,7	1,69	0,31	21,5	4,5
12-17	5,00	0,389	12,7	3,07	4,70	18,5	4,5
17-18	0,75	0,333	12,7	2,63	0,53	18,0	4,5
18-19	0,75	0,151	12,7	1,19	0,12	17,8	4,0
1-2	2,50	2,026	31,8	2,55	0,57	23,2	5,0
2-21	3,50	0,881	19,1	3,09	2,07	21,1	7,0
21-22	0,50	0,812	19,1	2,85	0,25	20,9	5,0
22-23	1,50	0,589	19,1	2,06	0,42	20,4	7,0
23-24	1,00	0,499	19,1	1,74	0,20	20,2	7,0
24-25	1,10	0,333	12,7	2,63	0,78	19,5	6,5
25-26	1,00	0,214	12,7	1,69	0,31	19,2	7,0
22-27	5,00	0,389	12,7	3,07	4,70	16,2	7,0
27-28	0,75	0,333	12,7	2,63	0,53	15,6	7,0
28-29	0,75	0,151	12,7	1,19	0,12	15,5	6,5
2-3	2,50	1,524	25,4	3,01	1,01	22,2	7,5
3-31	3,50	0,881	25,4	1,74	0,51	21,7	9,5
31-32	0,50	0,812	25,4	1,60	0,06	21,6	7,5
32-33	1,50	0,589	25,4	1,16	0,10	21,5	9,5
33-34	1,00	0,499	19,1	1,75	0,21	21,3	9,5
34-35	1,10	0,333	12,7	2,63	0,78	20,5	9,0
35-36	1,00	0,214	12,7	1,69	0,31	20,2	9,5
32-37	5,00	0,389	12,7	3,07	4,70	16,9	9,5
37-38	0,75	0,333	12,7	2,63	0,53	16,4	9,5
38-39	0,75	0,151	12,7	1,19	0,12	16,3	9,0
3-4	2,50	0,948	25,4	1,87	0,42	21,8	10,0
4-41	3,50	0,881	19,1	3,07	2,05	19,7	12,0

Número de individuos : 20; Número de Generaciones : 350							
Tramo i - j	Longitud [m]	Caudal [$\times 10^{-3}$ m ³ /s]	Diámetro [mm]	Velocidad [m/s]	$h_{f\ i-j}$ [m]	H_j [m c.a.]	$H_{j, \min}$ [m c.a.]
41-42	0,50	0,812	19,1	2,83	0,25	19,5	10,0
42-43	1,50	0,589	19,1	2,07	0,42	19,0	12,0
43-44	1,00	0,499	19,1	1,74	0,20	18,8	12,0
44-45	1,10	0,333	12,7	2,63	0,78	18,1	11,5
45-46	1,00	0,214	12,7	1,69	0,31	17,8	12,0
42-47	5,00	0,389	12,7	3,07	4,70	14,8	12,0
47-48	0,75	0,333	12,7	2,63	0,53	14,2	12,0
48-49	0,75	0,151	12,7	1,19	0,12	14,1	11,5
4-5	6,50	0,151	12,7	1,19	1,06	20,7	17,0
Costo Total de la red = \$ 850.400							

Se obtuvo un valor total de la red de \$850.400. Como puede observarse en los resultados, mostrados en la Tabla 3, el diseño final contiene diámetros comprendidos entre los 12.7 mm y 31.8 mm. Es importante resaltar que las *alturas piezométricas* mínimas fueron respetadas en todos los nudos de la red. En cuanto a las velocidades de flujo en los tramos, debe decirse que, en su mayoría, están por debajo del límite establecido como máximo admisible (3.0 m/s), y que sólo en algunos tramos fue sobrepasada por fracciones que no superan el 3% de dicho valor.

4.2. Red cerrada.

La Figura 3 presenta un ejemplo de una red cerrada o mallada. Allí se indica, para cada nudo, su cota y la demanda requerida; se especifica también la presión de entrada para el nudo de abastecimiento (nudo 2), así como la presión mínima necesaria en todos los nudos del sistema. Nuevamente, se aplicará el método del *algoritmo genético asexual* para determinar los diámetros de las tuberías, de tal forma que se cumplan tales requerimientos y que, además, el costo total de la red sea mínimo.

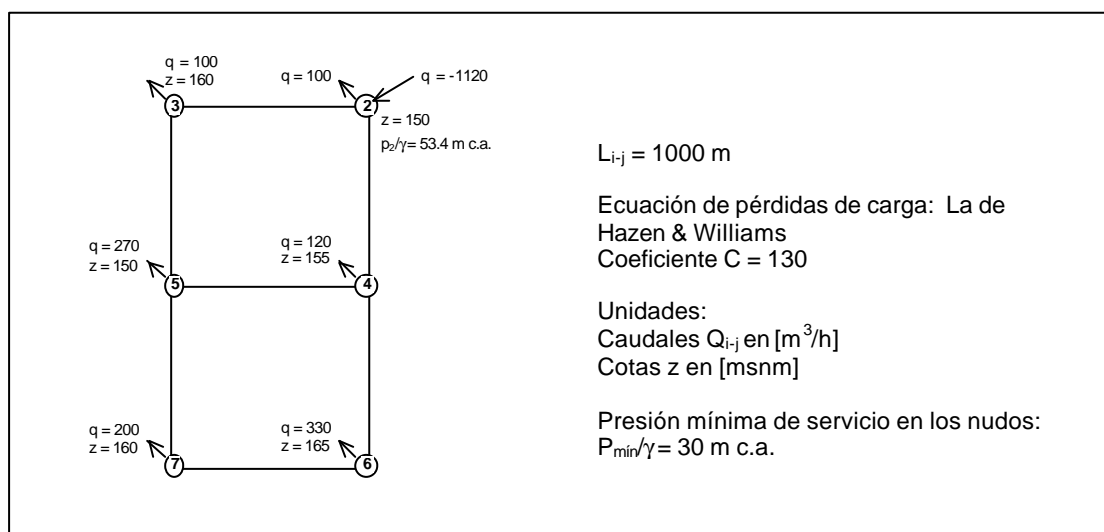


Figura 3. Esquema de la red cerrada a optimizar.

Este problema fue resuelto por *Alperovits y Shamir (1977)*, usando *programación lineal por gradiente (LPG)*¹ y los resultados se muestran en la Tabla 4. El sistema original contaba con un tramo adicional que conectaba las mallas con un tanque de abastecimiento; este tramo fue remplazado, para la aplicación del método propuesto, por un caudal de entrada y una presión conocida en el nudo 2.

Tabla 4. Resultados obtenidos por *Alperovits y Shamir* aplicando LPG.

Tramo (i-j)	2-3	2-4	4-5	4-6	6-7	3-5	5-7
Diámetro (mm)	254 - 203	457	152 - 203	406	305 - 254	152	152 - 102
Longitud (m)	3.6 - 996.4	1000	680.6 - 319.4	1000	785 - 215	1000	991 - 9
Costo Total Red = \$ 339.285							

La expresión usada para estimar las pérdidas de carga fue la ecuación Hazen - Williams, con un coeficiente $C=130$. La lista de diámetros disponibles empleada por los autores se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Lista de diámetros disponibles y costos unitarios.

Diámetro [mm]	76	102	152	203	254	305	356	406	457	508
Costo [\$/m]	8.0	11.0	16.0	23.0	32.0	50.0	60.0	90.0	130.0	170.0

En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos para una ejecución del *algoritmo genético*. En ella se indican los diámetros asignados a cada tramo, así como las velocidades de flujo, pérdidas unitarias de carga y pérdidas totales de carga por fricción desarrolladas en ellos. Para los nudos se reporta el valor de la presión de servicio.

Tabla 6. Resultados del AG para la red de *Alperovits y Shamir*, en dos ejecuciones diferentes.

Número de individuos: 15 ; Número de Generaciones : 100						
Tramo i-j	Diámetro [mm]	Caudal [m ³ /h]	Velocidad [m/s]	J [m/m]	h_f [m]	Presión de servicio nudo j [m c.a.]
2-3	254	-293.3	-1.61	-0.0086	-8.6	34.8
4-2	406	726.7	1.56	0.0047	4.7	53.4
5-4	203	155.7	1.34	0.0079	7.9	43.7
6-4	356	451.0	1.26	0.0037	3.7	43.7
7-6	203	121.0	1.04	0.0050	5.0	30.0
3-5	254	-193.3	-1.06	-0.0040	-4.0	40.8
5-7	254	-79.0	-0.43	-0.0008	-0.8	30.0
Costo Total de la red = \$ 292.000						

En la Tabla 7, se presenta un resumen de los diámetros y costos totales obtenidos por *Alperovits y Shamir*, y por el *algoritmo genético asexual*.

¹ La técnica LPG empleada por *Alperovits y Shamir* supone un tramo compuesto por varios segmentos de tubería de diferente diámetro. Por ello, en la Tabla 4 se reportan, para algunos tramos, dos diámetros con sus respectivas longitudes.

Tabla 7. Comparación de resultados.

Método de optimización	Diámetro [mm]							Costo total de la red
	Tramo 2-3	Tramo 4-2	Tramo 5-4	Tramo 6-4	Tramo 7-6	Tramo 3-5	Tramo 5-7	
Alperovits-Shamir	254 - 203	457	152 - 203	406	305 - 254	152	152 - 102	\$ 339.285
Algoritmo Genético	254	406	203	356	203	254	254	\$ 292.000

Como se puede observar, aplicando el AG asexual se logró reducir el costo de la red determinado por los autores, mediante su proceso de LPG, en cerca del 14%. Adicionalmente, el método propuesto aquí asigna una única tubería a cada tramo, lo que no logra la técnica de *Alperovits y Shamir*. Además, es importante anotar que, en la solución encontrada, todas las restricciones de presión de servicio mínima en los nudos son satisfechas. Las velocidades de flujo también están dentro de los límites admisibles.

5. CONCLUSIONES.

El método propuesto para el diseño óptimo de redes hidráulicas permite determinar el conjunto de diámetros para los tramos, de tal forma que se logre el costo mínimo de la red, cumpliendo con todos los requerimientos de tipo hidráulico impuestos sobre el sistema. Posee la ventaja de asignar los diámetros de una lista predefinida de diámetros elegibles, evitando el empleo de técnicas de refinamiento, requeridas por métodos que usan variables continuas en el proceso de diseño. Otra de las ventajas que posee el método propuesto es la de evaluar simultáneamente varias posibles soluciones del sistema en cada iteración del mismo, en lugar de considerar una sola, lo que garantiza una búsqueda amplia en el espacio de soluciones.

Con las herramientas computacionales existentes en la actualidad, la dificultad de resolver sistemas grandes y complejos por medio del *algoritmo genético* ha desaparecido prácticamente. Este factor también se ha contrarrestado con la adopción de la formulación *asexual* del mismo, que reduce el tiempo de cómputo requerido por la formulación *tradicional*.

El método propuesto ha demostrado ser competente en la solución de sistemas de redes, tanto ramificadas como cerradas puras, proporcionando mejores soluciones que las determinadas por otros métodos de diseño óptimo existentes.

Aunque no existe una pauta que permita predecir el *número de individuos* y el *número de generaciones* apropiados, en función de la magnitud o de la complejidad del sistema estudiado, la aplicación del método con el uso de computador, facilita la obtención de varias soluciones, variando dichos parámetros, de tal manera que pueda elegirse la mejor de ellas.

6. REFERENCIAS

ALPEROVITS, E. y SHAMIR, U. Design of optimal water distribution systems. En : Water Resources Research. Vol. 13, No. 6 (1977); p. 885-900.

CARRILLO, S.J., ISLAS, U., GÓMEZ, H.A. y VEGA, B.E. Selección de las tuberías de una red de distribución de agua potable para que sea eficiente y económica. En : XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Oaxaca, México. (oct. 1998).

GALEANO PARAMERO, Haiver. Estudio e implementación de un prototipo de un sistema de optimización para el dimensionamiento de redes hidráulicas. Santafé de Bogotá, 1999, 194 p. Trabajo de grado (Magíster en Ingeniería de Sistemas). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería.

GESSLER, J. Pipe network optimization by enumeration. En : *Proc., Computer Applications for Water Resources*, ASCE, New York, N.Y. (1985); p. 572-581.

GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, Carlos. Una nueva formulación del Algoritmo Genético aplicado al diseño óptimo de estructuras. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín, 1997, 2 v.

HOLLAND, John H. Algoritmos Genéticos. En : *Investigación y Ciencia*. (Sep. 1992) Barcelona (España); p. 38 – 45.

_____. Genetic Algorithms. En : *Scientific American*, (Sep. 1992)

LOGANATHAN, G.V., GREENE, J.J. y AHN, T.J. Design heuristic for globally minimum cost water-distribution systems. En : *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 121, No. 2 (mar. - apr. 1995); p. 182 – 192.

PÉREZ GARCÍA, Rafael. Dimensionado óptimo de redes de distribución de agua ramificadas, considerando los elementos de regulación. Valencia (España), 1993, 587 p. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Facultad de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.

SANVICENTE, S. H. y FRAUSTO SOLÍS, J. Determinación óptima de diámetros en redes de distribución de agua, con algoritmos de búsqueda estocástica. En : XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina. (oct. 2000).

_____. Optimización de diámetros de las tuberías de una red de distribución de aguas mediante algoritmos de recocido simulado. En : *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XVIII, No. 1 (ene. – mar. 2003); p. 105-118.

SAVIC, D.A. y WALTERS, G.A. Stochastic optimization techniques in hydraulics engineering and management. En : *Seventh IAHR International Symposium*, Mackay, Australia. (july, 1996).