

METODOLOGÍA PARA REHABILITAR REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

Óscar A. Fuentes Mariles¹, Martín Rubén Jiménez Magaña¹, Faustino de Luna Cruz¹, Ismene
Libertad A. Rosales Plascencia¹

Resumen: Se propone una metodología para aumentar los gastos de suministro a los usuarios de una red de distribución de agua potable para cubrir con el total de la demanda de agua. Se emplea un algoritmo genético para escoger varias tuberías que deben cambiarse por otras con diámetros mayores o aquellas en las que es necesario insertar válvulas, con la finalidad de que la carga de presión sea mayor a una mínima establecida en los nudos de salida del líquido y que el costo de las modificaciones en la red sea lo más bajo posible. Además, se define el orden en que conviene realizar los cambios requeridos para mejorar su funcionamiento hidráulico. Se describe un ejemplo de aplicación.

Abstract: A methodology for increase the exit flow rates of a pipe network to cover with the total of the demand of water is proposed. A genetic algorithm is used to choose several pipes that must change by others with greater diameters or those in which it is necessary to insert valves, to obtain that the pressure loads are greater to a minim established in the nodes of the pipe network with the minimum cost of the modifications. In addition, the order of the pipe changes to improve his hydraulic operation is defined. An application example is described.

Palabras clave: Rehabilitación de redes de tuberías, diseño de redes de tuberías, redes de abastecimiento de agua potable, algoritmo genético.

Keywords: Rehabilitation of pipe networks, design pipe networks, pipe networks of pipes, pipe networks of supplying potable water, genetic algorithm.

¹ Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Escolar s/n, Coyoacán, CP 04510, México D. F. Tel. (+52) 55 56 23 36 00 Ext. 8631. México. ofm@pumas.iingen.unam.mx, mjimenez@iingen.unam.mx, fluc@pumas.iingen.unam.mx

INTRODUCCIÓN

Las redes de distribución de agua potable que han estado en operación por varios años pueden dejar de entregar el total del gasto demandado a la misma, ya sea por el envejecimiento de sus tuberías, desgaste de sus accesorios, reparaciones de algunas de sus tuberías, o bien por el cambio, con respecto a las condiciones de diseño, de las cantidades demandadas en varias zonas de la red.

Para que las cantidades de agua que suministra la red cumplan con las demandas, es necesario emprender modificaciones en este sistema de distribución de agua.

Cuando la red de tuberías no proporciona completamente el gasto de demandado, se dice que no opera con la máxima eficiencia. Se considera que el gasto de demanda que no se dio a los usuarios de la red, se puede cuantificar en función de la carga de presión que existe en los nudos donde sale el agua.

Para aumentar los caudales que entrega la red, se pueden emprender acciones, como el cambio de tuberías o la inclusión de válvulas en ciertas conducciones de la red. También se podrían ampliar los sistemas de bombeo de la red o reubicar tanques de almacenamiento a elevaciones topográficas más altas, pero se considera que estas últimas son más difíciles de realizar y no garantizan que en toda la red se brinde la cantidad de agua requerida.

En este artículo se propone un método para escoger las tuberías que se deben cambiar por otras con diámetros mayores y en las que se tiene que instalar válvulas (para provocar cierta pérdida de carga de presión), para que se modifique el patrón de gastos en la red con la intención de aumentar las cargas de presión en algunas partes de la red y se cumpla con el total de la demanda.

En el método se considera que se satisface la demanda, cuando la carga de presión en los nudos donde se sale el agua para este fin, sea mayor o igual a una carga presión mínima establecida.

Con el método también se define un programa de obra en función de la cantidad de dinero disponible en ciertas fechas. El procedimiento emplea diámetros comerciales para las tuberías y busca que los cambios de tuberías o instalación de válvulas sea la más económica posible.

CÁLCULO DE LA RED DE TUBERÍAS

Se entiende por déficit, como aquella parte del gasto demandado que no es suministrada por que la carga de presión es menor a la carga mínima. Cuando en un nudo de egreso de agua hacia los usuarios, la carga de presión es mayor a la carga mínima, no existe déficit.

El Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México dispone de un método calcular las cargas de presión que existen en los nudos y los gastos que circulan en las tuberías de una red de distribución de agua potable (*Sánchez, et al, 1991*). De esta manera, al comparar, las cargas de presión en cada nudo con gasto de demanda con respecto a la carga mínima, se encuentran, si es que existen, gastos que no se pudieron proporcionar a los usuarios de la red.

En este método de cálculo de redes se considera flujo permanente y que el factor de fricción de Darcy se ajuste en de cada tubería de acuerdo con número de Reynolds que resulte de acuerdo con el gasto que fluye en su interior y su rugosidad relativa.

METODOLOGÍA

Con base en un Algoritmo Genético Simple (AGS), se plantea un método para escoger las tuberías que deben cambiarse por otras con diámetros mayores o aquellas en las que debe instalarse válvulas para modificar los gastos en las tuberías y que las cargas de presión resultantes sean mayores o iguales a una carga mínima establecida; de modo tal, que el costo de los cambios de las tuberías realizados sea el más bajo posible.

Los algoritmos genéticos son procedimientos basados en sistemas de analogías con el funcionamiento de la naturaleza y la evolución de la misma que son utilizados para resolver ecuaciones u optimar funciones sujetas a varias restricciones. Son técnicas robustas inspiradas en el proceso genético de los organismos vivos. Por ello, a lo largo de muchas generaciones, las poblaciones evolucionan de acuerdo con los principios de la selección natural y la supervivencia del más apto, como estableció Charles Darwin. Por imitación al proceso natural, los AGS son capaces de encontrar soluciones matemáticas, de algunas representaciones de los aspectos más relevantes de ciertos problemas de interés sobre todo cuando no existen técnicas específicas por aplicar para obtener su solución [Rodríguez V et al, 2004].

Los principios básicos de los AGS fueron establecidos por Holland [Holland, 1975]. Con su utilización no garantiza que se encuentre la solución global del problema, pero se ha verificado de modo empírico, que se obtienen soluciones aceptables, en un tiempo cómputo relativamente corto.

En los AGS se necesita una codificación de cada una de las posibles soluciones (población). Además, se requiere de una función de evaluación de aptitud de cada una de las soluciones (individuo). Durante la ejecución del algoritmo, las mejores soluciones son seleccionadas (padres) para obtener otras (reproducción); que son resultado de *cruza* de los padres y de la *mutación* de algunos de los hijos. De esta manera, se forma un conjunto de individuos más apto (valores más cercanos a la solución del problema), que constituyen la población de la siguiente generación.

En el método propuesto para rehabilitar una red se pretende obtener las tuberías y sus diámetros comerciales o la pérdida de carga que debe provocarse en algunas tuberías con válvulas para que sea mínimo el costo de la modificaciones (función objetivo) y se cumpla con el total de la demanda (restricciones).

Así, la función objetivo a minimizar es:

$$F = \sum C_j L_i \quad (1)$$

donde C_j es el costo por metro lineal de la tubería de diámetro j y L_i es la longitud de tubería i de la red. La suma se realiza para las tuberías que propician que en el funcionamiento hidráulico de la red se cumpla con las siguientes restricciones:

$$h_k - z_k \geq h_{\min}$$

para todos los nudos k de la red de tuberías donde existe un gasto de demanda. Siendo h_k el nivel piezométrico en el nudo k , z_k la elevación topográfica del terreno en el nudo k y $h_{\min}$ la carga mínima aceptable.

Codificación

Se establece el número de valores discretos que puede tomar el diámetro de cada tubería de la red. Debe ser un número igual a una potencia entera del 2, puede ser, 2, 4, 8, 16, 32, etc. La codificación consiste en escribir a los números naturales del 1 al número escogido en sistema binario y a cada uno de ellos asignarle un valor de diámetro. Por ejemplo, si fuera 4 el número de valores posibles, se establecen los números binarios 00, 01, 10 y 11 y posteriormente, se les asocia a cada uno de ellos los valores de diámetro 2, 2.5, 4 y 6 pulgadas respectivamente.

Por otra parte, se le llama *precisión* al número de dígitos necesarios para escribir en forma binaria el número de valores de diámetros (para el caso del 8, la precisión es 3, ya que con tres caracteres se escribe 8 en sistema binario).

Evaluación

Para encontrar los valores de los diámetros de las tuberías que hagan mínima la función objetivo (ecuación 1) se propuso como factor de aptitud a

$$f = \sum [100 - 1000q_k(b_k - h_{\min})]/C \quad (2)$$

donde q_k y b_k son el gasto de demanda y la carga de presión sobre el terreno del nudo k respectivamente. La carga de presión mínima aceptable, (en este caso fue de 10 metros columna de agua) y C es costo de los cambios de tuberías y de instalación de válvulas. En esta expresión:

$$b_k = h_k - z_k \quad (3)$$

La suma planteada en la ecuación 2 se realiza para todos los nudos de la red con gasto de demanda donde $b_k > h_{\min}$; cuando en un nudo no se cumple este requisito, a la suma se le resta una cantidad de multa, que en este caso fue de 1000.

De esta manera, aquel conjunto de tuberías que tiene la mayor aptitud corresponderá a el que tiene la suma de costos más pequeña y que permita a la red cumplir con el total de la demanda.

Selección

Una vez que se ha evaluado la aptitud de cada individuo, se procede a seleccionar parejas de ellos para llevar a cabo la cruce de modo que se mantenga fijo el número de individuos en las generaciones. El método de selección utilizado es el de la ruleta, dicho método asigna a cada individuo una parte de una ruleta proporcional a su aptitud. Esta clase de selección permite que los individuos más aptos tengan mayor probabilidad de ser seleccionados que los que no lo son; por lo que el AGS siempre converge a un resultado, que si no es el óptimo global, sí está cercano a él.

Cruza

Se ordenan por número de individuos y se relacionan individuos impares con los pares adyacentes y se combinan cierto número bits de ellos cuando se cumple la probabilidad de cruce. Generalmente la probabilidad de cruce (P_c) está entre 0.7 y 0.9, el valor depende del

problema por optimar, y de la cantidad de posibles soluciones que existan para él; en este caso, se usó el valor de 0.7 como probabilidad de cruza.

Mutación

Para cada uno de los descendientes obtenidos de la cruza, se puede cambiar algunos de sus dígitos que identifican al individuo en estudio. Para esto es necesario asignar la probabilidad de mutación (P_M). En este caso fue pequeña del orden de 0.03 (no es igual a cero para mantener la diversidad en la población). Para decidir si existe mutación en el individuo, se genera un número aleatorio entre cero y uno. Si este número es menor o igual que P_M , se aplicará el operador de mutación al individuo; de lo contrario, quedará sin cambio alguno. Una vez concluida esta etapa, con todos los descendientes se forma otra población y se comienza un nuevo ciclo.

Generación de la población inicial

Después de codificar los diámetros de las tuberías, se procede a formar la población inicial. Para esto se requieren dos datos: el número de individuos de la población y del número de dígitos de cada individuo (longitud del “cromosoma”). La longitud del “cromosoma” es igual al número de tuberías con posibilidad de ser cambiadas multiplicado por la precisión. Por ejemplo, para una red con 21 tuberías que pueden ser cambiadas y con 4 valores discretos de diámetro (su precisión es dos), esta longitud es 42. Por lo tanto, se generarán individuos con una longitud de 42 bits cada uno. En este caso, cada individuo de la población inicial se integró escogiendo 42 números aleatorios, y asignándole a cada uno de ellos, 0 si era menor o igual a 0.5 ó 1 si era mayor a 0.5 y menor que 1.

El número máximo de generaciones a considerar es la manera más común de detener el algoritmo. En el presente trabajo, se realizaron 600 y 100 generaciones con poblaciones de 50 y 100 individuos.

Para aplicar el método propuesto se escribió un programa de cómputo en QuickBasic.

ESTIMACIÓN DEL BENEFICIO/COSTO DE LOS CAMBIOS A LA RED

Una vez identificadas las tuberías que deben cambiarse para tener el costo mínimo y definidos sus diámetros para mejorar el funcionamiento hidráulico de la red (las cargas de presión sobre el terreno son mayores a la mínima establecida), se asigna el orden en que convendría realizar cada una de las modificaciones. Para cada conjunto de cambios de tubería se calculó el cociente entre gasto de suministro que se ganaba entre su costo.

Para estimar el gasto de suministro cuando la carga sobre el terreno era menor a la mínima se consideró que el gasto de demanda se obtenía a partir de la salida a través de un orificio en el nudo con demanda de modo que

$$q = C_d a_k \sqrt{2g} \sqrt{h_k - z_k} \quad (4)$$

Donde C_d es el coeficiente de descarga, a_k el área del orificio, h_k el nivel piezométrico y z_k elevación topográfica a la que se encuentra el orificio (se supuso igual a la del terreno), siendo $h_k > z_k$ y k indica que se trata de un nudo con demanda.

Se supuso que se cumplía con la demanda q_d cuando $h_k - z_k \geq h_{\min}$; por lo que, caso extremo de satisfacción del gasto de demanda ocurría cuando:

$$q_d = C_d a \sqrt{2g} \sqrt{h_{\min}} \quad (5)$$

Al despejar $C_d a \sqrt{2g}$ y sustituir en la ecuación 1 se obtiene:

$$q = q_d f \quad (6)$$

siendo

$$f = \sqrt{\frac{h_k - z_k}{h_{\min}}} \quad (7)$$

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se presenta un ejemplo de una red simple para facilitar la explicación de la metodología propuesta. La red consta de 21 tuberías con diámetros entre 2, 2 ½, 3, 4 y 6 pulgadas, con una longitud total de 3,000 metros. Tiene 16 nudos de los cuales se indica: elevación del terreno y el gasto de demanda. La red se abastece desde dos tanques de almacenamiento con carga constante, ubicados a diferente elevación topográfica. Un tanque está en el nudo 15 a la elevación topográfica de 72m y una carga hidráulica de 2.5m; el otro tanque está en el nudo 16 ubicado a la elevación topográfica de 70m y tiene una carga hidráulica de 2.5m.

La demanda total en los nudos es de 22.5 l/s y el funcionamiento hidráulico de la red, presenta déficits en la entrega de los gastos de demanda (tablas 1 y 5) del orden de 2.0743 l/s, ya que en los nudos 7, 8, 9, 10 y 13 las cargas de presión son menores a la carga mínima requerida para cumplir con el total de la demanda, que se consideró de 10 metros columna de agua (mca). En la tabla 2 aparecen los costos de las tuberías por metro lineal.

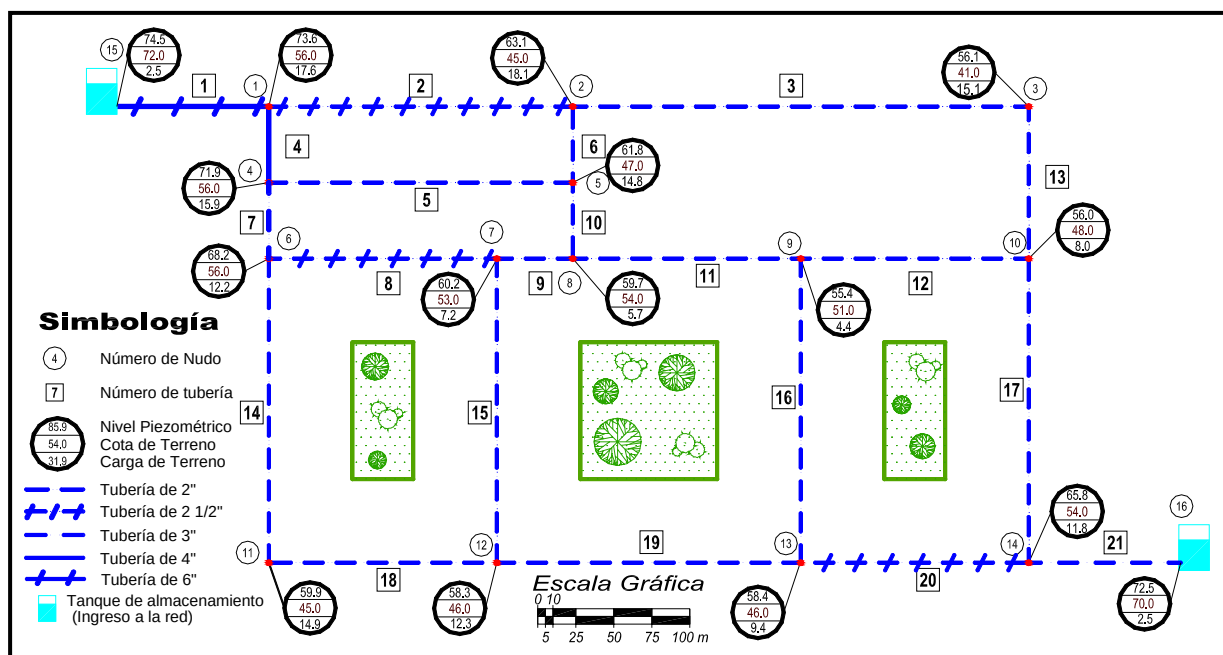


Figura 1 Red de tuberías antes de sus cambios para mejorar su funcionamiento hidráulico y algunos valores del mismo

Tabla 1 Funcionamiento hidráulico de la red de tuberías original

No Tubería	Sentido de flujo		Longitud (m)	Diámetro (pulg)	Rugosidad ϵ (mm)	Gasto (l/s)	Pérdida de energía (m)	Velocidad (m/s)	Número de Reynolds	f Fricción
	Del nudo	Al nudo								
1	15	1	100	6	1.25	15.600	0.886	0.856	130,000	0.0169
2	1	2	200	2.5	0.40	4.420	10.566	1.396	88,600	0.0183
3	2	3	300	2	0.40	1.602	6.982	0.791	40,200	0.0218
4	1	4	50	4	1.00	10.730	1.685	1.324	134,000	0.0168
5	4	5	200	2	0.40	2.388	10.170	1.179	59,900	0.0200
6	2	5	50	2	0.40	1.688	1.289	0.833	42,300	0.0216
7	4	6	50	3	1.00	7.442	3.764	1.633	124,000	0.0171
8	6	7	150	2.5	0.90	3.903	7.993	1.233	78,300	0.0188
9	7	8	50	2	0.80	0.927	0.493	0.458	23,200	0.0249
10	5	8	50	2	0.40	2.156	2.080	1.064	54,000	0.0204
11	8	9	150	2	0.70	1.623	4.248	0.801	40,700	0.0218
12	10	9	150	2	0.70	0.577	0.566	0.285	14,500	0.0281
13	3	10	100	2	0.40	0.252	0.069	0.124	6,320	0.0353
14	6	11	200	2	0.40	2.149	8.267	1.061	53,900	0.0204
15	7	12	200	2	0.40	1.016	1.922	0.501	25,500	0.0243
16	13	9	200	2	0.40	1.259	2.914	0.622	31,600	0.0231
17	14	10	200	2	0.90	2.055	9.828	1.014	51,500	0.0206
18	11	12	150	2	0.40	1.089	1.648	0.537	27,300	0.0239
19	13	12	200	2	0.40	0.205	0.095	0.101	5,150	0.0375
20	14	13	150	2.5	0.90	3.775	7.480	1.193	75,700	0.0190
21	16	14	100	3	1.10	6.890	6.675	1.512	115,000	0.0174

Se aplicó el método propuesto para 60 individuos y 600 generaciones. Posteriormente, para verificar sus resultados se empleó el método para otras combinaciones de número de individuos y de generaciones, llegando a resultados similares.

En la figura 2 se muestra como fue la variación de la máxima aptitud con respecto al número de generación. La máxima aptitud resultó ser de 7095.22.

En la figura 3 y tabla 3 se presenta como disminuyó el costo de los cambios de tubería en la red con relación al número de generaciones. Se encontró que el mínimo de la función objetivo es $F = \$17,055$, el cual se obtuvo en la generación 373, cuando se cambiaron 3 tuberías por otras de diámetros mayores, la 5 que pasa de 2 a 3 pulgadas, la 10 que de 2 se va a 4 pulgadas y la 11 que se modifica de 2 a 3 pulgadas.

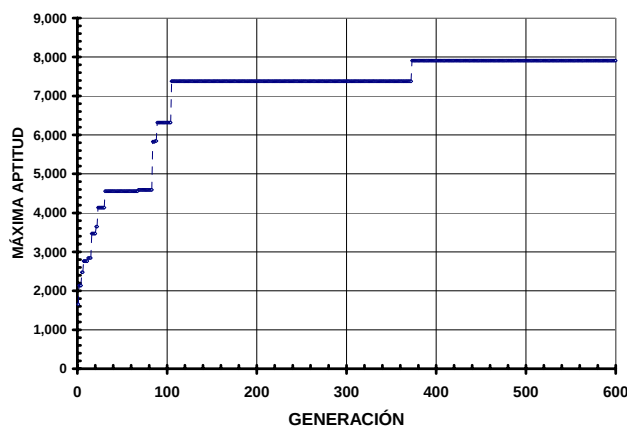


Figura 2 Valores de la máxima aptitud con respecto al número de generación

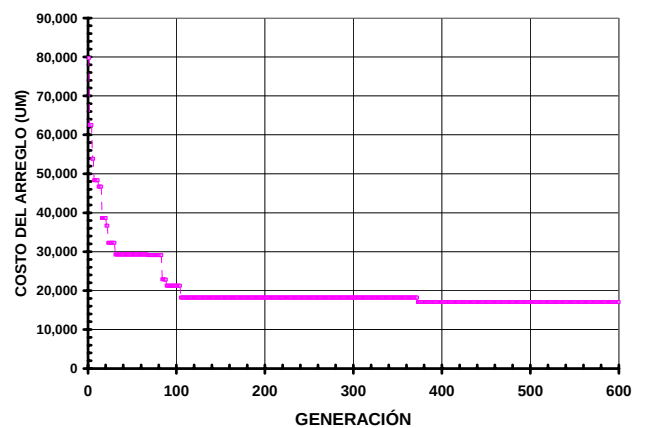


Figura 3 Costo de los cambios de tubería con respecto al número de generación

Tabla 2 Costos por metro lineal de tubería

Diámetro (pulg.)	Costo tubería (\$/m)
2	19.8
2 ½	29.9
3	40.0
4	61.1
6	133.7

Tabla 3 Costo de los cambios de tuberías en la red.

Número de generación	Numero de tuberías cambiadas	Costo (\$)
1	12	79680
2	10	62515
5	9	53850
7	8	48330
12	7	46685
16	8	38645
21	5	36665
31	4	29275
68	7	29100
84	4	22880
87	5	22815
89	4	21255
105	3	18200
373	3	17055

Para establecer un orden en los cambios de tubería se obtuvo la relación el beneficio-costo del cambio de una tubería (la 5, la 10 y la 11) y las combinaciones de cambio de dos tuberías (la 5 y la 10, la 5 y la 11, la 10 y la 11). Para ello se estimó el gasto de demanda que se recuperaba con cada cambio y se dividía entre el costo que ello implicaba.

Con base en la carga de presión sobre el terreno se obtuvo el factor f que aparece en la ecuación 6 y se estimó el gasto de demanda que se ganaba con el cambio planteado. Luego, con los costos por metro lineal se obtuvo la relación beneficio costo que aparece en las tablas 4 y 5.

Tabla 4 Relaciones beneficio-costos (b/c) para el cambio de una tubería

Nudo	Red inicial					Tubería 5 de 2" a 3"			Tubería 10 de 2" a 4"			Tubería 11 de 2" a 3"		
	Elevación de terreno (m)	Gasto demandado (l/s)	Carga de presión disponible (mca)	Factor*	q (1-factor)**	Carga de presión disponible (mca)	factor*	q (1-factor)**	Carga de presión disponible (mca)	factor*	q (1-factor)**	Carga de presión disponible (mca)	factor*	q (1-factor)**
1	56	0.45	17.61	1.000	0.0000	17.57	1.000	0.0000	17.61	1.000	0.0000	17.59	1.000	0.0000
2	45	1.13	18.05	1.000	0.0000	22.2	1.000	0.0000	17.41	1.000	0.0000	17.86	1.000	0.0000
3	41	1.35	15.07	1.000	0.0000	17.52	1.000	0.0000	15.25	1.000	0.0000	16.56	1.000	0.0000
4	56	0.9	15.93	1.000	0.0000	15.42	1.000	0.0000	15.94	1.000	0.0000	15.86	1.000	0.0000
5	47	1.92	14.76	1.000	0.0000	20.08	1.000	0.0000	13.75	1.000	0.0000	14.18	1.000	0.0000
6	56	1.39	12.16	1.000	0.0000	12.39	1.000	0.0000	12.35	1.000	0.0000	12.00	1.000	0.0000
7	53	1.96	7.17	0.847	0.2999	9.73	0.986	0.0274	7.95	0.892	0.2117	6.47	0.805	0.3822
8	54	1.46	5.68	0.754	0.3592	8.73	0.934	0.0964	6.68	0.817	0.2672	4.47	0.669	0.4833
9	51	3.46	4.43	0.666	1.1556	6.72	0.820	0.6228	4.84	0.696	1.0518	6.45	0.803	0.6816
10	48	1.73	8.00	0.894	0.1834	10.32	1.000	0.0000	8.22	0.907	0.1609	9.56	0.978	0.0381
11	45	1.06	14.90	1.000	0.0000	16.18	1.000	0.0000	15.27	1.000	0.0000	14.98	1.000	0.0000
12	46	2.31	12.25	1.000	0.0000	13.93	1.000	0.0000	12.70	1.000	0.0000	12.43	1.000	0.0000
13	49	2.31	9.35	0.967	0.0762	10.97	1.000	0.0000	9.74	0.987	0.0300	9.95	0.997	0.0069
14	54	1.06	11.83	1.000	0.0000	12.58	1.000	0.0000	11.97	1.000	0.0000	12.19	1.000	0.0000
					falta	2.0743		0.7466			1.7216			1.5921
					recupera			1.3277			0.3527			0.4822
					costo			8000			3055			6000
					b/c			0.1660			0.1154			0.0804

Tabla 5 Relaciones beneficio-costo para el cambio de dos tuberías

Red inicial				Tubería 5 de 2" a 3" y tubería 10 de 2" a 4"			Tubería 5 de 2" a 3" y tubería 11 de 2" a 3"			Tubería 10 de 2" a 4" y tubería 11 de 2" a 3"		
Nudo	Elevación de terreno (m)	Gasto demandado (l/s)	Carga de presión disponible (mca)	Carga de presión disponible (mca)	factor*	q (1-factor)**	Carga de presión disponible (mca)	factor*	q (1-factor)**	Carga de presión disponible (mca)	factor*	q (1-factor)**
1	56	0.45	17.61	17.54	1.000	0.0000	17.54	1.000	0.0000	17.58	1.000	0.0000
2	45	1.13	18.05	21.17	1.000	0.0000	22.06	1.000	0.0000	17.06	1.000	0.0000
3	41	1.35	15.07	18.24	1.000	0.0000	19.29	1.000	0.0000	17.21	1.000	0.0000
4	56	0.90	15.93	15.39	1.000	0.0000	15.30	1.000	0.0000	15.85	1.000	0.0000
5	47	1.92	14.76	18.74	1.000	0.0000	19.80	1.000	0.0000	12.68	1.000	0.0000
6	56	1.39	12.16	12.94	1.000	0.0000	12.13	1.000	0.0000	12.18	1.000	0.0000
7	53	1.96	7.17	12.18	1.000	0.0000	8.72	0.934	0.1294	7.28	0.853	0.2881
8	54	1.46	5.68	11.53	1.000	0.0000	7.47	0.864	0.1986	5.57	0.746	0.3708
9	51	3.46	4.43	7.96	0.892	0.3737	9.15	0.957	0.1488	7.25	0.851	0.5155
10	48	1.73	8.00	11.17	1.000	0.0000	12.23	1.000	0.0000	10.25	1.000	0.0000
11	45	1.06	14.90	17.22	1.000	0.0000	16.35	1.000	0.0000	15.48	1.000	0.0000
12	46	2.31	12.25	15.15	1.000	0.0000	14.25	1.000	0.0000	13.05	1.000	0.0000
13	49	2.31	9.35	12.14	1.000	0.0000	11.83	1.000	0.0000	10.53	1.000	0.0000
14	54	1.06	11.83	13.02	1.000	0.0000	13.06	1.000	0.0000	12.44	1.000	0.0000
				falta		0.3737			0.4767			1.1745
				recupera		1.7006			1.5976			0.8998
				costo		11055			14000			9055
				b/c		0.1538			0.1141			0.0994

En la figura 4 se muestra la relaciones beneficio costo obtenidas para cada uno de los cambios de tuberías analizados.

Al comparar los beneficios-costos de los cambios de tuberías se aprecia que conviene cambiar primero la tubería 5 (el mayor beneficio-costos del cambio de una tubería fue el de la 5 que es 0.1660 l/1000\$) y que después de la 10 (el mayor beneficio-costos del cambio de dos tuberías fue el de las tuberías 5 y 10 con un valor de 0.1538 l/1000\$). Finalmente, se tiene que la relación beneficio-costos del cambio de las tres tuberías es $2.0743/17055 = 0.1216$ l/1000\$.

También se podría señalar que si el presupuesto para los cambios se dispone en dos partes, una de \$10,000 y otra de \$7055, es preferible cambiar la tubería 5 únicamente (no realizar el cambio de las tuberías 10 y 11 porque tiene una relación beneficio costo menor) y esperar a contar con el total del dinero necesario para realizar los cambios de las tuberías 10 y 11.

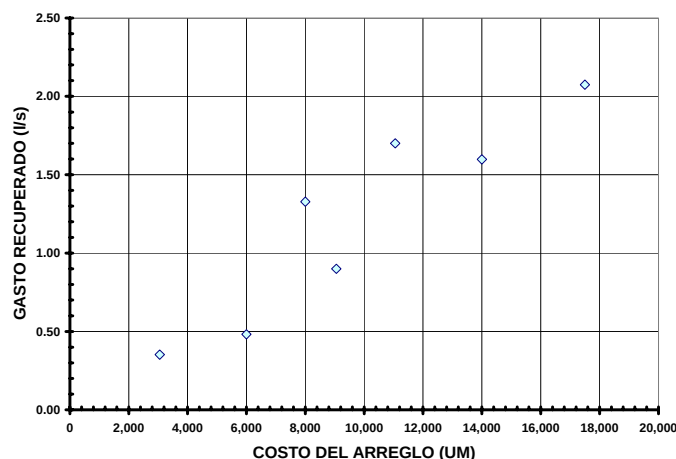


Tabla 6 Comparación de cargas de presión sobre el terreno entre la red original y la final

Red inicial				Tubería 5 de 2" a 3", tubería 10 de 2" a 4" y tubería 11 de 2" a 3"
Nudo	Elevación de terreno (m)	Gasto demandado (l/s)	Carga de presión disponible (mca)	Carga de presión disponible (mca)
1	56	0.45	17.61	17.48
2	45	1.13	18.05	20.78
3	41	1.35	15.07	21.04
4	56	0.90	15.93	15.20
5	47	1.92	14.76	17.79
6	56	1.39	12.16	12.72
7	53	1.96	7.17	11.45
8	54	1.46	5.68	10.48
9	51	3.46	4.43	11.30
10	48	1.73	8.00	14.08
11	45	1.06	14.90	17.92
12	46	2.31	12.25	16.16
13	49	2.31	9.35	13.59
14	54	1.06	11.83	13.81

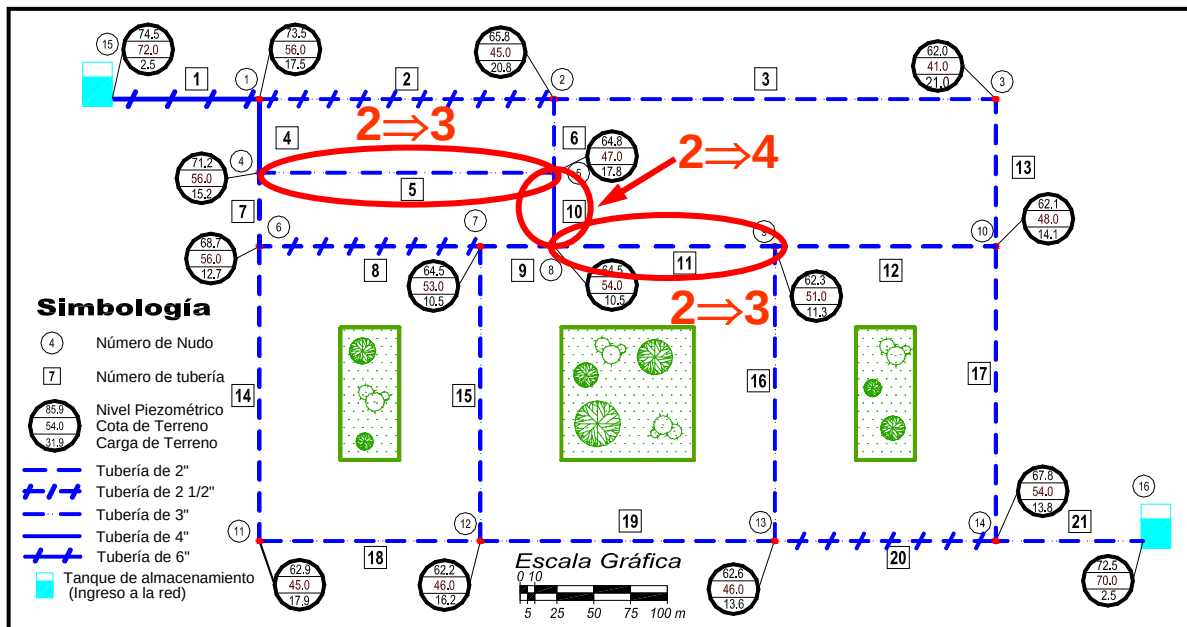


Figura 4 Tuberías de la red que fueron cambiadas para mejorar su funcionamiento hidráulico

CONCLUSIONES

El algoritmo genético utilizado es robusto y en el ejemplo de aplicación, permitió seleccionar las tuberías y sus diámetros para cumplir con el total de los gastos de demanda a un menor costo.

Como se trata de un método que se apoya en un proceso aleatorio, se puede obtener respuestas distintas y que no se garantiza que se haya llegado al óptimo global, conviene utilizarlo varias veces con diferentes combinaciones de número de generaciones y de tamaño de la población.

Con el método de rehabilitación propuesto, se cumple con la totalidad de los gastos de demanda, con el menor costo de los cambios.

Por otro lado, aun cuando estos resultados son alentadores, será necesario aplicar el procedimiento propuesto en redes de mayor tamaño para conocer su bondad.

Cuando no se dispone de la totalidad del costo de los cambios para llegar a cumplir con el 100% de los gastos de demanda, se puede cambiar alguna de las tuberías con cierto orden para obtener el máximo beneficio.

Tabla 7 Condiciones del flujo en las tuberías de la red final

No Tubería	Sentido de flujo		Longitud (m)	Diámetro (pulg)	Rugosidad ϵ (mm)	Gasto (l/s)	Pérdida de energía (m)	Velocidad (m/s)	Número de Reynolds	f Fricción
	Del nudo	Al nudo								
1	15	1	100	6	1.25	16.719	1.016	0.917	140,000	0.0167
2	1	2	200	2.5	0.40	3.765	7.708	1.190	75,500	0.0190
3	2	3	300	2	0.40	1.162	3.740	0.574	29,100	0.0235
4	1	4	50	4	1.00	12.504	2.284	1.543	157,000	0.0163
5	4	5	200	3	0.40	5.576	6.412	1.223	93,200	0.0181
6	2	5	50	2	0.40	1.473	0.988	0.727	36,900	0.0223
7	4	6	50	3	1.00	6.027	2.476	1.322	101,000	0.0178
8	6	7	150	2.5	0.90	2.845	4.273	0.899	57,000	0.0202
9	7	8	50	2	0.80	0.229	0.034	0.113	5,740	0.0363
10	5	8	50	4	0.40	5.129	0.304	0.633	64,300	0.0196
11	8	9	150	3	0.70	3.440	2.186	0.755	57,500	0.0201
12	10	9	150	2	0.70	0.354	0.222	0.175	8,870	0.0320
13	3	10	100	2	0.40	0.188	0.041	0.093	4,710	0.0386
14	6	11	200	2	0.40	1.793	5.799	0.885	44,900	0.0213
15	7	12	200	2	0.40	1.113	2.295	0.550	27,900	0.0238
16	13	9	200	2	0.40	0.374	0.287	0.184	9,370	0.0316
17	14	10	200	2	0.90	1.564	5.729	0.772	39,200	0.0220
18	11	12	150	2	0.40	0.733	0.770	0.362	18,400	0.0264
19	13	12	200	2	0.40	0.464	0.430	0.229	11,600	0.0297
20	14	13	150	2.5	0.90	3.147	5.219	0.994	63,100	0.0197
21	16	14	100	3	1.10	5.771	4.695	1.266	96,400	0.0180

REFERENCIAS

Holland, J.H. (1975), *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press

Sánchez J., Fuentes O. (1991), *Actualización de un método para calcular redes de tuberías funcionando a presión en régimen permanente*, Revista de Ingeniería, Vol. LXI, México D. F.

Sánchez B., Fuentes M. (1996), *Método para detectar fugas mayores en una red de agua potable*, Revista Ingeniería del Agua, Universidad Politécnica de Valencia, España, Vol. 3, No. 1, marzo 1996, ISSN 1134-2196.

Vela A., Martínez F., García-Serra J., Pérez R. (1994), *Estrategias óptimas para la reducción de pérdidas de agua en sistemas de abastecimiento*, Ingeniería del Agua, Vol. 1, No. 1, Valencia, España.

Luvizotto, E. y Ocampos, A. (2002). *Comparando os métodos de Levembenvereg e Nelder-Mead em modelos de detecção de fuga*, Seminario Hispano-Brasileiro sobre planificación, proyecto y operación de redes de abastecimiento de agua. Valencia, España. Págs. 451-463.

Fuentes M. O.A., Rodríguez V. K., Jiménez M. M. R., y De Luna C. F., (2004), *“Método para la detección de fugas en redes de distribución de agua potable utilizando el algoritmo genético simple”*, Memorias del 3er Seminario Hispano-Brasileño sobre Planificación,

Proyecto y Operación de redes de abastecimiento de agua, Universidad Politécnica de Valencia, España.

Rodríguez V. K., Jiménez M. M. R., Fuentes M. O. A. (2004), *Los algoritmos genéticos en la Ingeniería de los sistemas de abastecimiento ¿la modelación del futuro de las redes de distribución?*, XVIII Congreso Nacional de Hidráulica, San Luís Potosí, S. L. P., México, Tema 11: Agua potable y alcantarillado, 1533.

Chengchao Xu and Ian C. Goulter, *Reliability Based Optimal Design of Water Distribution Networks*, *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers ASCE, USA, 1999.

Jiménez, Martín (2004). “*Diseño óptimo de redes de distribución de agua potable utilizando un algoritmo genético*”. Tesis de Maestría en Ingeniería Hidráulica, DEPMI, UNAM.

Rosales I., *Cálculo de Redes de Agua Potable Estáticas que Incluyen la Estimación del Factor de Fricción*, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería UNAM, 1996.