

LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE VÁLVULAS REDUCTORAS DE PRESIÓN EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE UTILIZANDO UN ALGORITMO GENÉTICO MULTI OBJETIVO

Katya Rodríguez Vazquez¹; Faustino de Luna Cruz²; Martín Rubén Jiménez Magaña²;
Óscar Arturo Fuentes Mariles²

Resumen Se presenta un método para realizar la localización óptima de válvulas reductoras de presión en redes de distribución de agua potable con la finalidad de disminuir las presiones disponibles para reducir fugas así como evitar fallas por altas presiones en las tuberías; para ello se hace uso de una herramienta de la computación evolutiva como lo es el Algoritmo Genético, en este caso visto como una técnica de optimización multiobjetivo.

Abstract A method to make an optimal location of pressure reducing valves in water network systems is shown in this paper, the goal is to reduce pressures to avoid leakages and failures in the pipes. A tool from evolutionary computing, called genetic algorithm, is used in other to reach the goal, in this case using it as an evolutionary algorithm for solving multi-objective problems.

Palabras clave: Algoritmo genético, multiobjetivo, válvulas reductoras de presión.

Keywords: Genetic algorithm, multi-objective, pressure reducing valves.

¹ Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar s/n, Coyoacán, 04510, México D.F. Tel. (+52) 55 56 22 35 55. México. ² Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México Circuito Escolar s/n, Coyoacán, 04510, México D.F. Tel. (+52) 55 56 23 36 00 Ext. 8631. México.
e-mail: katya@uxdea4.iimas.unam.mx , fluc@pumas.iingen.unam.mx , mjimenezm@iingen.unam.mx , ofm@pumas.iingen.unam.mx

INTRODUCCIÓN

El agua utilizada para suministro urbano lleva un valor añadido considerable debido a los costos del energético empleado para su transporte y tratamiento para su uso doméstico e industrial.

En México son muchos los sistemas de distribución de agua donde las fugas de agua representan un porcentaje importante del consumo. En un estudio realizado en 23 ciudades distintas de la República Mexicana (Arreguín, Ochoa y Fernández, 1997) se encontró que en promedio las fugas representaban el 37.8% de la demanda, de ellas, el 24.3 % ocurría en tomas domiciliarias y el 13.5 % en las tuberías; adicionalmente, se tenía un 1.1% por mala medición.

Una fuga es una salida de agua no controlada de cualquier parte de los elementos del sistema de distribución de agua potable, uniones de tuberías (por fallas en la hermeticidad de las mismas), válvulas, codos, roturas de tuberías, etc. Ellas representan una parte de la pérdida física del agua que no es facturada por el sistema contable del organismo operador.

En las tuberías de la red, las fugas se presentan como consecuencia de agrietamiento transversal, aplastamiento y agrietamiento longitudinal; el primero se debe a esfuerzos y vibraciones producidas por cargas superficiales; el segundo a la construcción defectuosa y el tercero, a la fatiga de materiales, defectos de fabricación o golpe de ariete. Otros fenómenos como la corrosión, la unión defectuosa de tubos o fallas en válvulas, favorecen la incidencia de las fugas.

Numerosas poblaciones de la República Mexicana se asientan sobre accidentadas topografías. Debido a los desniveles en la elevación del terreno existe una gran variación en los valores de las cargas de presiones referidas a la superficie del suelo dentro de las tuberías. Durante las horas de la noche, cuando los consumos de agua disminuyen, se llegan a presentar cargas de presión hasta de 100 mca (metros columna de agua, 10 kg/cm^2), provocando esfuerzos excesivos en las tuberías que producen roturas en las tuberías, dislocación de las uniones de tuberías, malos ajustes en los accesorios instalados en estos conductos y caudales de fuga excesivos.

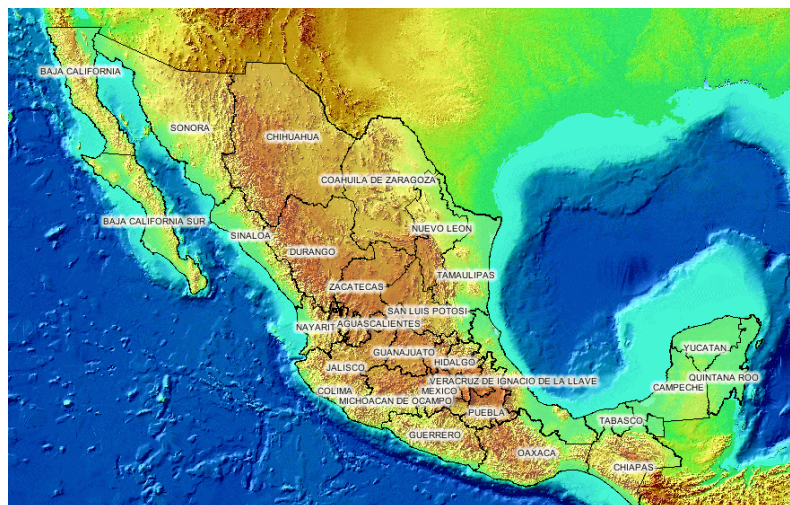


Figura 1 Vista aérea de México

La detección de las fugas, sobre todo las no visibles, es una tarea que representa dificultades para los responsables de la operación de las redes. En ocasiones, la identificación y la reparación de fugas no es suficiente para aumentar la disponibilidad del agua del sistema de distribución, ya que al ser mayor la cantidad de líquido en las tuberías, la presión interna se incrementa; lo que puede aumentar las fallas en las tuberías que componen el sistema de distribución de agua. Por ello, se requiere controlar o regular la presión en toda una zona, de un modo integral, para evitar que las cargas de presión alcancen valores que excedan a los permitidos. Muchas de estas acciones la realiza el personal de operación de las redes de modo empírico, mediante maniobras de apertura y cierre de válvulas de seccionamiento, o bien con métodos de cálculo de redes mediante prueba y error que no garantizan que sean las más adecuadas para el buen funcionamiento hidráulico de la red.

Durante la noche, las condiciones hidráulicas en la red empeoran, ya que al disminuir la demanda se incrementan las cargas de presión, y no se suele realizar maniobras de apertura y cierre de válvulas, por lo que se presentan presiones, y en consecuencia, caudales de fuga mayores.

Existen en el mercado varios tipos de válvula (Figura 2) que independientemente de la carga de presión que tengan a su entrada proporcionan una carga de presión constante a su salida y se denominan válvulas reductoras de presión (VRP).

Para reducir los caudales de las fugas conviene disminuir las cargas de presión en todo un sector de la red de distribución sin dejar de cumplir con las demandas. Una manera de hacerlo es mediante la instalación de VRP en las tuberías de la red donde más convenga.



Figura 2 Válvulas reguladoras de presión

El objetivo de este trabajo es escoger las tuberías de una red de distribución en las que la instalación de VRP para nos ayuden a disminuir las cargas de presión, de tal forma que no se afecte la entrega de agua a los usuarios y se hagan menores los caudales de fugas.

Para seleccionar las tuberías que tendrían una VRP y determinar la magnitud de reducción de presión que ésta provocaría se emplea un algoritmo genético multiobjetivo junto con un programa de simulación hidráulica.

OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO

Optimización multi-objetivo (o multicriterios) se define como el problema de encontrar un vector de variables de decisiones el cual satisface el conjunto de restricciones y optimiza el vector de funciones cuyos elementos representan la función objetivo. Estas funciones, generalmente, están en conflicto unas con otras. De aquí, el término *optimizar* significa encontrar una solución que nos proporcione valores *aceptables* en todos los objetivos.

Matemáticamente se expresa como:

Encontrar el vector

$$\bar{x}^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T$$

el cual satisface las m restricciones de desigualdad

$$g_i(\bar{x}) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

las p restricciones de igualdad

$$h_i(\bar{x}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, p$$

y optimiza el vector de funciones

$$\bar{f}(\bar{x}) = [f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_k(\bar{x})]$$

donde

$$\bar{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$$

es el vector de variables de decisión.

El conjunto de restricciones define la región factible X y cualquier punto x en X, es una solución factible. Las k componentes del vector $\bar{f}(\bar{x})$ representan los objetivos en conflicto a evaluar. Las funciones $g_i(\bar{x})$ y $h_i(\bar{x})$ representan las restricciones impuestas a las variables de decisión. El vector $\bar{x}^*$ denota el conjunto de soluciones óptimas.

Desde el punto de vista tradicional de las matemáticas, el concepto de optimización es imposible cuando múltiples criterios están involucrados. De aquí se deriva el hecho de que la solución en un problema multi-objetivo es un conjunto de soluciones alternativas más que una única solución. Este concepto se conoce como Óptimo de Pareto (Coello et al, 2002).

Definición 1. Óptimo de Pareto. Una solución $x_u \in U$ es un óptimo de Pareto si y sólo si no existe ninguna $x_v \in U$ para la cual $v = f(x_v) = (v_1, \dots, v_n)$ domina a $u = f(x_u) = (u_1, \dots, u_n)$.

El óptimo de Pareto generalmente produce no una solución única, sino un conjunto de soluciones, conocidas también como soluciones no-dominadas o no-inferiores.

Definición 2. No dominancia. Un vector $u = (u_1, \dots, u_n)$ domina al vector $v = (v_1, \dots, v_n)$ si y sólo si u es parcialmente menor a v ($u \prec v$). Esto es,

$$\forall i \in \{1, \dots, n\}, \quad u_i \leq v_i \quad \exists i \in \{1, \dots, n\} : u_i < v_i$$

Estos dos conceptos pueden ejemplificarse de manera gráfica como se muestra en la Figura 3. Basados en una función de dos objetivos, las soluciones marcadas con "cero" forman la curva de Pareto y todas ellas forman el conjunto de soluciones no-dominadas, o no-inferiores. Esto es, no existe ninguna otra solución que sea mejor en ambos objetivos.

Tomando en consideración las soluciones f_u y f_v , podemos observar que la solución f_u es una solución no-dominada. En el caso de f_v , existen tres soluciones que son mejores que f_v en ambos objetivos. En otras palabras f_v es dominada con un rango de tres.

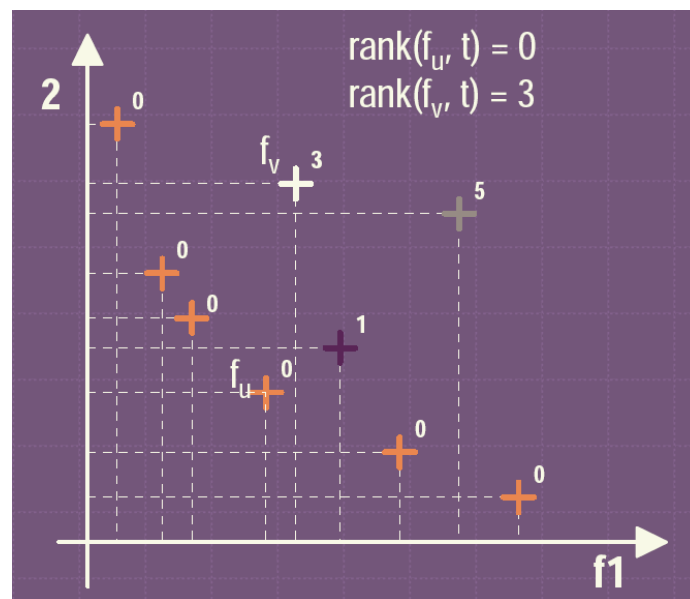


Figura 3 Óptimo de Pareto y No-Dominancia

En nuestro caso particular, deseamos optimizar en forma simultánea el costo de instalar válvulas reductoras de presión, así como la reducción en las presiones. Una solución directa podría ser la instalación de válvulas en cada tramo para regular las presiones y mantenerlas en el rango. Sin embargo, el costo sería elevado. Es importante, por lo tanto, estimar el número mínimo de válvulas a instalar y los tramos en los que se instalarán para reducir el costo y mantener las presiones en rango. Este es claramente un problema multi-objetivo con dos objetivos en conflicto ya que el minimizar el costo no garantiza mantener las presiones en rango. Partiendo de la Figura 2, podemos substituir f_1 y f_2 por las funciones a optimizar en nuestro problema como se observa en la Figura 4.

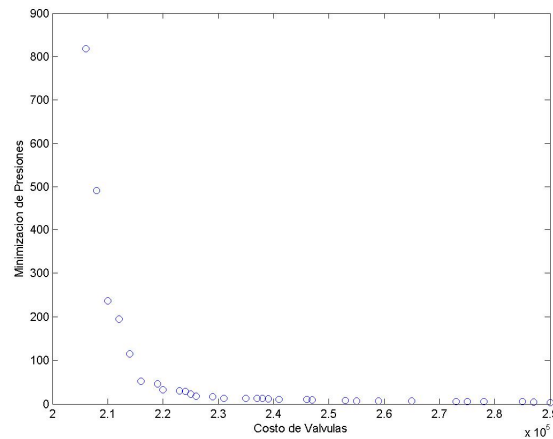


Figura 4 Dos objetivos a evaluar, minimización de presiones y costo de válvulas.

METODOLOGÍA UTILIZADA

Para realizar los cálculos de las cargas de presión y los gastos de los flujos de agua que circulan en el sector de la red de distribución se necesita contar con información de la infraestructura hidráulica de abastecimiento de agua potable, como son las tuberías y el nodo en que están conectadas, los planos del trazo de la red, la topografía de la zona cubierta por la red, válvulas, tanques, zona de distribución, puntos de extracción, etc.

También es fundamental disponer de datos de los consumos (demanda), gastos de entrada y salida al sector de la red y cargas de presión en las tuberías principales. De la comparación de los volúmenes de agua de entrada a la red con los volúmenes de consumo, y de salida, en su caso, se obtiene un balance hidráulico que permite la evaluación de los volúmenes de agua que se pierden por fugas.

Generalmente no se cuenta con información de consumos y se recurre a factores índice, basados en las características socioeconómicas existentes en la zona de estudio y suponiendo consumos similares a otras donde se dispone de mediciones.

La instalación de VRP en las tuberías, causan una pérdida local de la energía. Estas pérdidas ocurren debido a cualquier disturbio del flujo provocado por curvaturas, cambios en la sección y accesorios de las tuberías. Experimentalmente se ha demostrado que la magnitud de las pérdidas locales es proporcional al cuadrado de la velocidad del movimiento del agua. Por lo que las pérdidas se expresan como:

$$h_L = K \frac{V^2}{2g}$$

Donde h_L es la pérdida local, K el coeficiente de pérdida local, V velocidad media del flujo y g la aceleración de la gravedad. Los valores de K para distintos tipos de accesorio pueden ser encontrados en manuales y textos de mecánica de fluidos e hidráulica.

La pérdida de energía total se obtiene al sumar a la debida a la fricción (h_f) la local.

$$h_T = h_f + h_L$$

Al tomar en cuenta que la pérdida por fricción puede obtenerse con la fórmula de Darcy-Weisbach

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

La pérdida local producida por la válvula se puede considerar igual a la que se desarrollaría por fricción en una tubería con un diámetro menor al original, por lo que al igualar las expresiones de ambas clases de pérdida, se tiene

$$h_L = K \frac{V^2}{2g} = f \frac{L}{d_{equiv}} \frac{V^2}{2g}$$

por lo tanto, se obtiene la expresión

$$K = f \frac{L}{d_{equiv}}$$

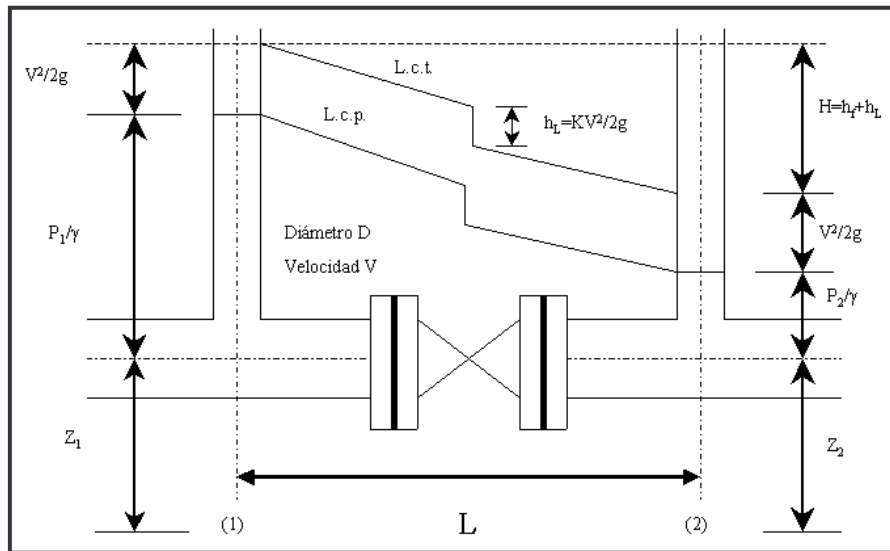


Figura 5 Tubería con pérdidas de energía de fricción y local

Así, con base en la equivalencia entre pérdidas de carga debidas a la fricción del fluido con el material de las tuberías y la pérdida local producida por una válvula se puede representar en el método de cálculo de redes a las VRP.

El primer paso en el método propuesto es generar nodos ficticios en cada uno de los tramos de tubería de la red, de tal manera que ahí se pueda simular la presencia de una VRP.

Una vez hecho lo anterior, el algoritmo genético genera aleatoriamente diámetros equivalentes que representan a las VRP, los ubica en la red de distribución y evalúa la aptitud de cada individuo mediante dos funciones objetivo, una que se refiere al costo de instalación de las válvulas y la otra que evalúa las presiones que se presentan en los nodos con cierta combinación de válvulas. Dicha presión debe estar dentro del rango determinado por el usuario, es decir que existe una presión mínima y una máxima. El objetivo general es minimizar ambas funciones, si la función del costo es mínima, quiere decir que el algoritmo determinó la cantidad mínima de válvulas a instalar. La función relacionada con las presiones

debe minimizar la diferencia entre las presiones generadas en los nodos y las establecidas como mínima y máxima.

Entonces las funciones son:

$$f_1(\Phi, \$, No. VRP)$$

$$f_2(p)$$

Se hizo un programa en Matlab, apoyado en una caja de herramientas desarrollada en la Universidad de Sheffield, con el cual se realizaron las simulaciones pertinentes.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

En la red de tuberías mostrada en la Figura 6 se tiene un tanque de almacenamiento donde el nivel piezométrico es de 102.5 m. La red tiene las características consignadas en la Tabla 1.

A partir de los datos se pretende escoger varias tuberías de la red en donde la instalación de una VRP resulte ser la más conveniente para la disminución de las cargas de presión a valores cercanos a los recomendados y así, reducir los caudales de las fugas y el posible deterioro de las tuberías de la red. Para este caso se establecieron como mínima y máxima presión, 20 y 50 mca, respectivamente.

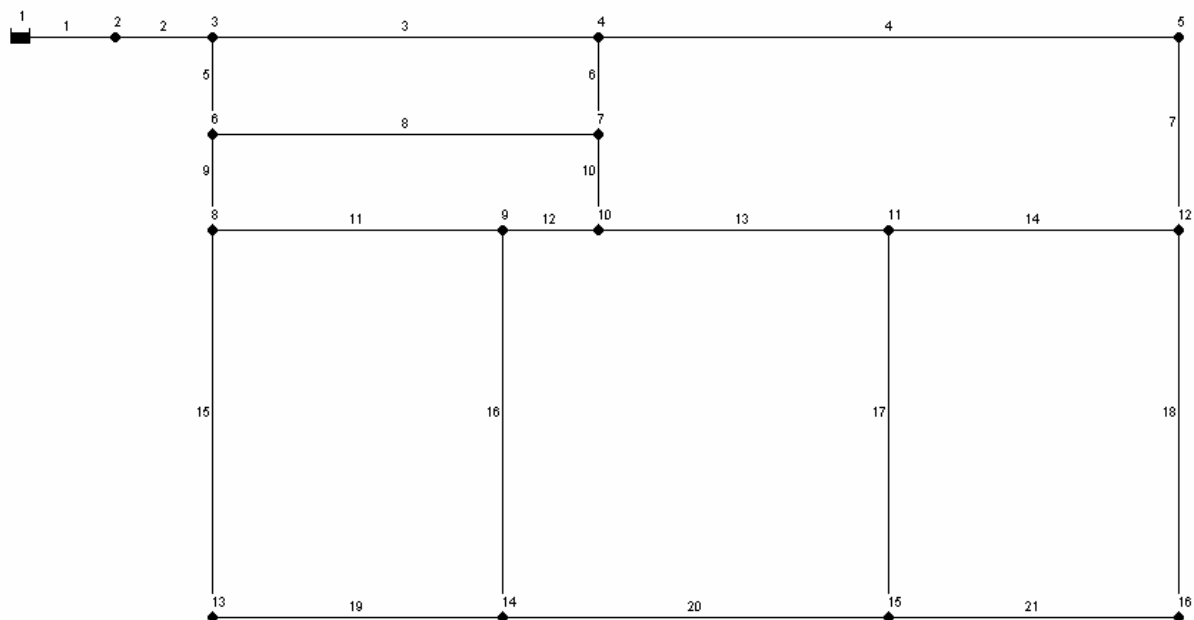


Figura 6 Trazo de la red utilizada como ejemplo

Tubo	Longitud (m)	D (plg)	Nodo	Elevación (m)	Demanda (lps)
1	50	6	2	60	0
2	50	6	3	34	0.300733
3	200	3	4	33	0.7518
4	300	2	5	29	0.902133
5	50	4	6	36	0.601467
6	50	2	7	39	1.278067
7	100	2	8	44	0.9292
8	200	2	9	51	1.305133
9	50	3	10	52	0.974333
10	50	2	11	47	2.309533
11	150	3	12	36	1.1548
12	50	2	13	33	0.703667
13	150	2	14	34	1.542733
14	150	2	15	36	1.542733
15	200	2	16	32	0.703667
16	200	2			
17	200	2			
18	200	2			
19	150	2			
20	200	2			
21	150	2.5			

Tabla 1. Datos de la red utilizada como ejemplo

Se realizaron simulaciones con 50 y 100 individuos durante 20, 50 y 100 generaciones, no se muestran todos los resultados por cuestión de espacio, pero en la Tabla 2 se presenta la solución propuesta para esta red, según la cual es necesario instalar VRP en las tuberías 1, 2, 5, 9, 11, 13 y 21. Como se muestra en la Figura 7.

Nodo	H (mca) RED-ORI	H (mca) RED-VAL	P(mca) RED-ORI	P(mca) RED-VAL
2	102.25	91.82	42.25	31.82
3	101.99	81.15	67.99	47.15
4	98.48	76.36	65.48	43.36
5	89.74	66.68	60.74	37.68
6	101.14	79.18	65.14	43.18
7	97.38	74.31	58.38	35.31
8	99.05	75.70	55.05	31.70
9	96.52	71.29	45.52	20.29
10	95.78	71.17	43.78	19.17
11	88.72	65.44	41.72	18.44
12	88.67	65.40	52.67	29.40
13	93.87	70.05	60.87	37.05
14	92.10	68.03	58.10	34.03
15	88.58	65.21	52.58	29.21
16	88.51	65.14	56.51	33.14

Tabla 2. Cargas y presiones para la red original y la red con 7 VRP

Tubo	Q (lps) RED-ORI	Q (lps) RED-VAL	V (m/s) RED-ORI	V (m/s) RED-VAL	hf RED-ORI	hf RED-VAL
1	15.00	15.00	0.82	0.82	0.2541	0.1016
2	15.00	15.00	0.82	0.82	0.2541	0.1016
3	4.77	5.63	1.05	1.24	3.5148	1.6765
4	2.16	2.29	1.07	1.13	8.7339	3.2261
5	9.93	9.07	1.23	1.12	0.8471	0.2861
6	1.85	2.60	0.91	1.28	1.0919	0.8163
7	1.26	1.38	0.62	0.68	1.0725	0.5099
8	1.71	1.96	0.84	0.97	3.7599	1.7018
9	7.62	6.50	1.67	1.43	2.0958	0.6244
10	2.28	3.28	1.13	1.62	1.6060	1.2581
11	4.66	3.44	1.02	0.76	2.5333	0.4819
12	1.50	0.56	0.74	0.28	0.7366	0.0477
13	2.80	2.86	1.38	1.41	7.0553	2.4485
14	0.20	0.17	0.10	0.09	0.0534	0.0136
15	2.03	2.13	1.00	1.05	5.1821	1.9777
16	1.86	1.58	0.92	0.78	4.4180	1.1408
17	0.29	0.38	0.14	0.19	0.1446	0.0825
18	0.31	0.40	0.15	0.20	0.1561	0.0907
19	1.33	1.42	0.65	0.70	1.7691	0.6721
20	1.65	1.46	0.81	0.72	3.5184	0.9877
21	0.40	0.30	0.13	0.10	0.0646	0.0129

Tabla 2. Continuación. Gastos, velocidades y pérdidas presentadas en la red original y en la red con 7 VRP

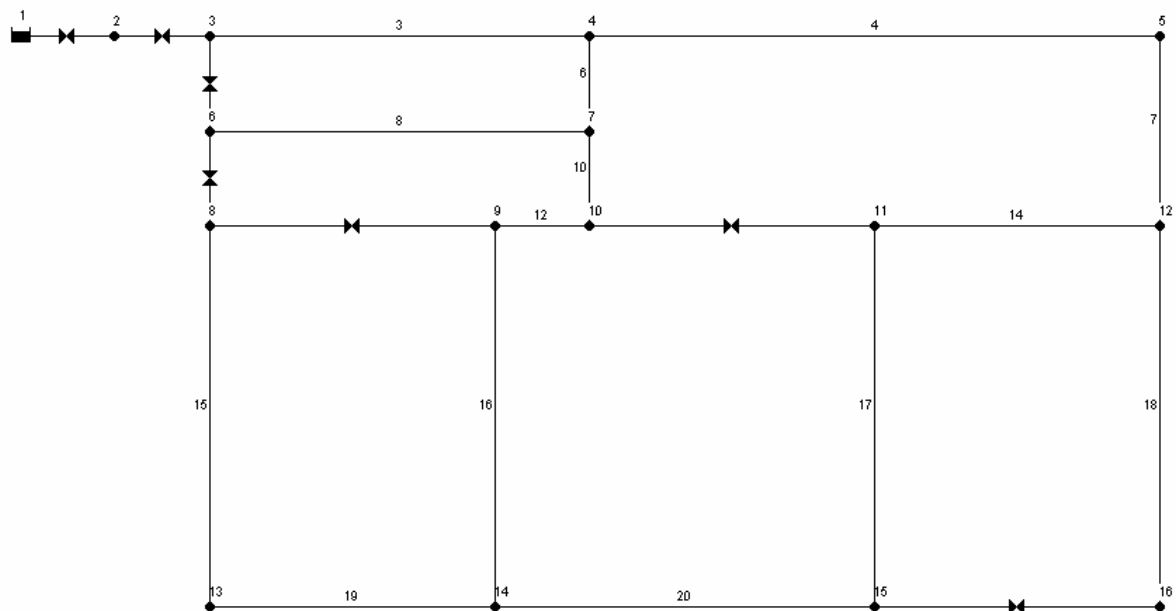


Figura 7 Red con la ubicación de 7 VRP

Los resultados mostrados son los obtenidos para una simulación de 100 individuos y 100 generaciones, el tiempo de cómputo de dicha simulación fue de catorce minutos.

CONCLUSIONES

Se ha presentado una metodología sencilla que pretende ser una herramienta para el ingeniero encargado de la rehabilitación u operación de una red de distribución de agua potable, que le será útil en la toma de decisiones para ubicar o maniobrar, en el caso de que ya existan, válvulas reductoras de presión o seccionamiento.

Utilizar un algoritmo genético multiobjetivo permite evaluar una gran cantidad de opciones en muy poco tiempo, entregándonos no sólo una sino varias soluciones factibles, a diferencia de utilizar un algoritmo genético simple que nos entrega una única solución, a pesar de ello, será responsabilidad del personal la toma de decisión final.

En el caso del ejemplo mostrado es evidente que aunque el programa nos indica la necesidad de colocar 7 VRP, se puede hacer un análisis posterior y notar que las válvulas ubicadas en la tubería 1 y 2, pueden reducirse a colocar solamente una; lo mismo sucede para el caso de las válvulas ubicadas en las tuberías 5 y 9. También sería posible no tomar en cuenta la VRP en la tubería 21, puesto que sólo afecta a un solo nodo.

De la Tabla 2 se puede observar que, salvo los nodos 11 y 12, todos los demás están dentro del rango de presiones establecidas como mínima y máxima, a pesar de ello, están muy cerca del límite inferior.

Se sigue trabajando para “afinar” la metodología y que en un futuro, no muy lejano, sea posible utilizarla en una red real.

AGRADECIMIENTOS

A la M en I. Ismene Rosales porque además del cariño siempre ha mostrado interés en que uno de los autores de este trabajo vaya creciendo, aunque sea un poco, profesionalmente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chipperfield, A., Fleming, P., Pohlheim, H., Fonseca C. (2002). “*Genetic Algorithm Tool Box*”. Department of Automatic Control and Systems Engineering, University of Sheffield, England.

Coello, C; Van Veldhuizen, D y Lamont, G. (2002). “*Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*”. Kluwer Academic Publishers.

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

Michalewicz, Z. (1994). “*Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*”, 2nd edition, Springer-Verlag, Heidelberg.

Todini, E, and Pilati, S. (1987). “*A gradient method for the analysis of pipe networks*”. International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution, Leicester Polytechnic, UK.

