UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA

UN METODO PARA REHABILITAR REDES DE DISTRIBUCION DE AGUA POTABLE BASADO EN UN ALGORITMO GENETICO

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

CIVIL - HIDRAULICA

P R E S E N T A :

JOSE ALBERTO SANCHEZ CRUZ

TUTOR:
DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES

2007

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dr. Ramón Domínguez Mora
Secretario:	Dr. Jesús Gracia Sánchez
Vocal:	Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles
1$^{er.}$ Suplente:	Dr. Carlos Agustín Escalante Sandoval
2$^{do.}$ Suplente:	M.I. Víctor Franco

Lugar donde se realizó la tesis:

FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles

FIRMA

Agradecimientos:

Esta tesis es sólo una muestra del trabajo realizado con el apoyo académico del conjunto de profesores de la Facultad de Ingeniería. Gracias por el respaldo que con gusto ofrecen a los alumnos de esta honorable institución.

Un reconocimiento especial al Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles, quien supo guiar a buen destino el trabajo de tesis que aquí se presenta.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, más que una casa de estudios, un refugio para la expresión y formación integral del individuo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo otorgado al programa de maestría en el que estuve inscrito.

Dedicatoria:

A Esther Cruz Flores y Faustino Sánchez Hernández, las personas que me dieron la vida y la oportunidad de valorarla.

A María Esther, María del Rocío y Fausto Alejandro. Independientemente de sus grandes aptitudes, sus actitudes han sido mis ejemplos a seguir.

A César Augusto y Azul Anaíd, dos nuevos individuos que esperan simplemente lo mejor.

Índice General

INTRODUCCIÓN

El funcionamiento adecuado de los sistemas de abastecimiento de agua potable es esencial para el bienestar de los hombres dentro de su núcleo social. Estos sistemas captan y conducen el agua desde las fuentes de abastecimiento para su posterior distribución sobre una zona ocupada por un conjunto de personas ávidas del servicio. Debido a que las demandas se entregan en lugares puntuales como los predios particulares, es conveniente que la distribución se realice a través de un conjunto de tubos o red de tuberías, considerando para el análisis de dichos sistemas que las demandas son satisfechas en ciertos puntos que representan la unión o bifurcación de las conducciones (redes cerradas).

El comportamiento hidráulico de una red se estudia a partir de ecuaciones de continuidad y conservación de la energía. En todo caso, el dar solución a una red cerrada implica determinar las cargas piezométricas en las uniones entre tuberías (nudos), y calcular los gastos y sentidos del flujo. Para estimar el valor de las incógnitas citadas es necesario resolver un sistema de ecuaciones tan grande como la cantidad de tuberías que compongan la red en estudio. Por esta razón, esfuerzos importantes se han encaminado para la obtención de soluciones de los sistemas de ecuaciones no lineales mediante el empleo de computadoras digitales, utilizando métodos numéricos de rápida convergencia.

En el pasado, el diseño de redes se basaba en la experiencia, pues el objetivo consistía únicamente en satisfacer los requerimientos de presión y gasto en el sistema. En las últimas décadas, conscientes de que los recursos económicos tienen un límite, se busca que los montos de las inversiones para la construcción, operación y mantenimiento estén asociados a una solución que considere aspectos técnicos y económicos.

Toda vez que se conozca el funcionamiento hidráulico de una red de tuberías, se está en posibilidad de juzgar si tal sistema cumple o no con las demandas a las que está sujeto.

Como consecuencia del funcionamiento prolongado de una red, es común que en algunas zonas de la misma ya no se satisfagan los requerimientos de carga o gasto. Se sabe que la carga de presión disminuye, entre otras causas, por la pérdida de energía debida a la fricción en las paredes de las conducciones; por esta razón, la pérdida de presión se manifiesta gravemente cuando el diámetro interno de los tubos disminuye y la rugosidad aumenta por la acumulación de depósitos en sus paredes. Adicionalmente, el aumento en el número de personas que solicitan agua de una misma red incrementa la demanda en los nudos, y el sistema es incapaz de satisfacer tales requerimientos.

Desde el punto de vista de la ingeniería, la problemática descrita debe resolverse implantando una solución fundamentada en el conocimiento de las circunstancias físicas en las que opera la red, además de la situación económica del organismo responsable del abastecimiento de agua potable. Existen opciones para modificar las condiciones de flujo de una red e incrementar la carga de presión en sus nudos. Por ejemplo, la limpieza o sustitución de tramos de tuberías por otras de igual longitud pero de diferente diámetro son mecanismos de rehabilitación. Asimismo, pueden emplearse sistemas de bombeo para el incremento de carga, instalando válvulas para la regulación de presión en ciertos puntos. Otra posibilidad es la reubicación de tanques hacia niveles más elevados. De cualquier manera, la demanda puede considerarse satisfecha cuando la carga de presión en cada nudo supera un valor mínimo.

En general, los métodos de optimización para el diseño o rehabilitación de redes no pretenden establecer la mejor disposición de las tuberías, pues esto requeriría la programación de un algoritmo complicado, además de que la ubicación de los tubos sobre el terreno está directamente relacionada con la disposición de los caminos ya trazados. Se ha desarrollado un número importante de métodos de optimización, como aquellos que utilizan programación lineal, programación dinámica, y métodos heurísticos como técnicas basadas en los procesos de evolución de las especies.

En este trabajo de tesis se presenta una metodología que permite determinar las tuberías que conviene sustituir en una red cuya carga de presión en algunos nudos con demanda es relativamente baja. Se utiliza un algoritmo genético simple, mismo que al estar basado en analogías sobre la naturaleza y evolución de organismos, intenta optimizar funciones sujetas a ciertas restricciones.

La tesis se compone de cinco capítulos. En el primero se explica la teoría y el método que se utilizará para resolver redes de tuberías como sistemas de distribución de agua potable. En el capítulo dos, se describen algunas métodologías útiles para establecer los diámetros más adecuados de los conductos que forman parte de una red de distribución. En el tercer capítulo, se introduce un algoritmo para rehabilitar redes basado en analogías sobre la naturaleza y evolución de los seres vivos, el cual tiene por objetivo la determinación del conjunto de tubos que conviene sustituir en un sistema que ha dejado de satisfacer los requerimientos de carga o gasto que se demandan de él. Además, teniendo en cuenta que los recursos económicos destinados al mejoramiento de los servicios públicos son francamente limitados, en el mismo capítulo tres se presenta un método para establecer el orden en la instalación de los conductos definidos por el algoritmo genético, de manera que a la brevedad se satisfagan las demandas requeridas por el mayor número de usuarios. En el capítulo cuatro, se muestran algunos ejemplos de aplicación del método propuesto. En el capítulo cinco, se desarrollan las conclusiones y comentarios relativos a los resultados obtenidos en este trabajo. Por último, se listan las referencias y bibliografía adicional.

RESUMEN

El envejecimiento de los sistemas de distribución de agua potable, en particular de las redes de tuberías, es un problema que afecta el bienestar de una comunidad que demanda el suministro de dicho recurso. Dado que resulta inadecuada la modificación de todos los tubos de una red con déficit en el suministro o baja carga de presión en el sistema, se presenta una metodología para identificar las tuberías que conviene reemplazar por conductos de mayor diámetro. El método empleado se basa en analogías con la evolución de seres vivos que intercambian información genética, que para el caso de rehabilitación de redes, se trata diámetros comerciales. El algoritmo propone una solución próxima a la óptima global del problema, y al ser considerada como la alternativa más adecuada, también define el orden en que deben reemplazarse las tuberías. Con la solución de dos problemas de rehabilitación, se muestra la bondad de la metodología presentada.

Capítulo 1

ANÁLISIS DE REDES PARA CONDUCCIÓN DE AGUA

El abastecimiento de agua potable representa uno de los servicios más importantes que debe ofrecerse a toda comunidad. La entrega de la dotación de agua necesaria para los individuos de una población exige realizar distintas actividades. Se inicia con la captación y conducción del agua desde una fuente principal hasta la zona en que iniciará su distribución. Posteriormente, para que el agua llegue a cada domicilio, se utiliza un conjunto de tubos que se conoce como red de tuberías.

Para su estudio, las redes pueden considerarse abiertas (ramificadas), o cerradas (de mallas). Por red abierta se conoce a una sucesión de tubos que se ramifica sin intersecarse en punto alguno; i.e, las tuberías no forman circuitos. Por el contrario, las redes cerradas están constituidas por conductos que se intersecan en ciertos puntos o nudos, formando circuitos.

En algunos trabajos se ha mostrado que las redes diseñadas para una sola condición de carga , que impliquen el más bajo costo, suelen ser sistemas de redes abiertas [15]. No obstante, este tipo de sistemas son más susceptibles al incumplimiento de la demanda bajo condiciones de falla en uno o más de sus tubos. Esta es la razón por la que se ha optado por incrementar la redundancia de los sistemas por medio de circuitos cerrados. Entonces, una de las ventajas de las redes cerradas es su capacidad para cumplir con la demanda aun bajo condiciones adversas provocadas por fallas en bombas o roturas en las tuberías.

En la solución de una red cerrada se consideran tres aspectos primordiales:

* La continuidad en los nudos.

* La continuidad en las tuberías.

* La conservación de la energía en los tubos.

1.1 CONTINUIDAD EN LOS NUDOS DE LA RED

Para dar solución a una red cerrada es necesario garantizar la continuidad en todos los nudos del sistema. Apoyado en el principio de conservación de la masa que entra en un volumen de forma y dimensiones constantes, y considerando un flujo permanente e incompresible, es posible establecer la invariabilidad del gasto en cualquier sección transversal al flujo dentro del volumen de estudio. Así pues, la continuidad en cada nudo i de un sistema de tuberías implica lo siguiente [21]:

$$\Sigma Q_j + q_i = 0 \tag{1.1}$$

donde Q_j es el gasto que va del nudo s al nudo i a través del tubo j, con la convención de ser negativo si llega al nudo i, y positivo en caso contrario; q_i es el gasto que sale del sistema por el nudo i. La suma advierte sobre la necesidad de considerar en el cálculo a todos los tubos conectados al nudo en cuestión.

Conviene hacer notar que la continuidad es aplicable también a los nudos que, sin ser puntos de demanda, se convierten en bifurcaciones del gasto para la distribución del agua en la red; es decir, aquellos donde el gasto q_i de la Ec. 1.1 es cero.

1.2 CONTINUIDAD EN LAS TUBERÍAS

La ley de conservación de la masa establece que la diferencia entre la masa que sale y entra a un volumen de control por unidad de tiempo, es igual a la variación de la masa en el interior del volumen de control por unidad de tiempo [21].

Si se considera como volumen de control a una tubería que transporta el agua entre dos nudos (secciones transversales s e i), bajo la condición de que el flujo es permanente e incompresible, el gasto que circula es constante en el tiempo. Lo anterior es aplicable al problema del análisis de redes que es motivo de esta tesis, pues en lo sucesivo se considerará que a lo largo de las tuberías no se presentan fugas de agua. La continuidad en las tuberías implica entonces:

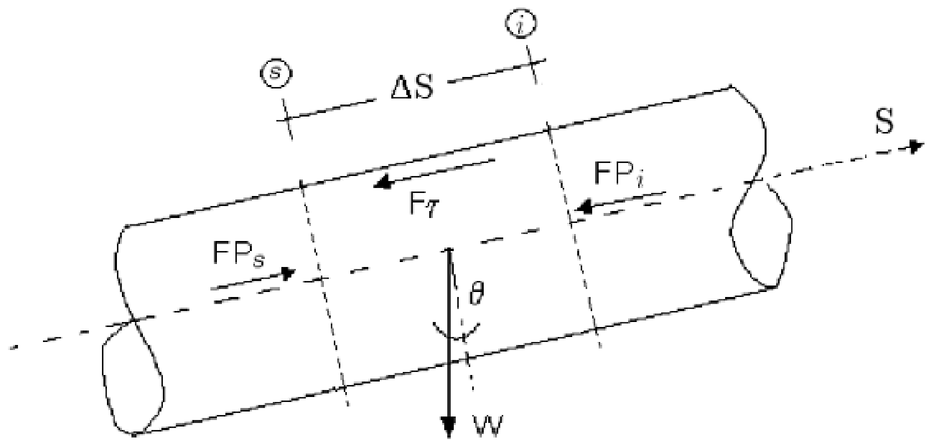
$$Q_j = V_s A_s = V_i A_i$$

$$Q_j = V_j A_j \tag{1.2}$$

donde V_j es la velocidad media del agua que fluye entre las secciones s e i, y A_j es el área interna de la sección transversal de una tubería de diámetro constante que transporta el gasto Q_j.

1.3 CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA EN LOS TUBOS

La primera ley de la termodinámica establece que la suma del calor y el trabajo que atraviezan las paredes de un sistema es igual a la variación de la energía dentro de dicho sistema [4]. Lo anterior se ha tomado en cuenta para análizar el movimiento del agua



Figura~1-1: Flujo desarrollado entre dos secciones de una vena líquida.

dentro de una tubería. Así, para conocer la variación de la energía que posee una masa de agua que circula por los conductos de una red de tuberías, se hará referencia a dos tipos de pérdida de energía: por fricción y locales.

1.3.1 PÉRDIDA DE ENERGÍA POR FRICCIÓN

La cantidad de energía que se disipa en forma de calor por efecto de la fricción en las paredes de una conducción es irrecuperable y se considera perdida. Para determinar la magnitud de esta pérdida, se establece una ecuación donde queda representada la energía por unidad de peso de un elemento diferencial de líquido, que fluye entre dos secciones transversales identificadas. Este modelo matemático es la ecuación de conservación de la energía, que puede obtenerse aplicando la 2a Ley de Newton en la dirección del flujo de una vena líquida, donde el movimiento está relacionado con fuerzas de presión, de gravedad y cortantes (Fig. 1-1). Para efectos de simplificación, no se trabaja con la distribución de velocidades de cada sección; en su lugar se toman en cuenta las velocidades medias. Asimismo, se considera que el flujo es permanente y la aceleración local es nula [21]. Por todo esto, la ecuación de la energía entre las secciones s e i se expresa como:

$$z_s + \frac{p_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} = z_i + \frac{p_i}{\gamma} + \frac{V_i^2}{2g} + \int_s^i \frac{\tau P}{\gamma A} d\mathrm{S} \tag{1.3}$$

donde:

- z : energía potencial por unidad de peso.
- $\frac{p}{\gamma}$: energía correspondiente al trabajo mecánico ejecutado por las fuerzas debidas a la presión por unidad de peso.
- $\frac{V^2}{2g}$: energía cinética de toda la vena líquida por unidad de peso.

La integral que aparece en la Ec. 1.3 representa la pérdida de carga por fricción en la pared de un conducto (h_f). Obsérvese que esta pérdida depende del esfuerzo cortante que ejercen las paredes de los tubos, del peso específico del líquido transportado, y de las características geométricas de la tubería. Al considerar que el esfuerzo cortante está relacionado con las propiedades del fluido, las condiciones del flujo y las características del conducto, se puede realizar un análisis dimensional a partir de la relación dimensionalmente homogénea siguiente [23]:

$$F\left(\tau, \rho, V, \mu, D, \varepsilon\right) = 0 \tag{1.4}$$

donde τ es el esfuerzo cortante en las paredes de la conducción, ρ es la densidad del líquido, V es la velocidad media del agua en una sección de tubería con longitud L y diámetro constante, μ es la viscosidad dinámica del líquido, D es el diámetro interno del tubo, y ε es la rugosidad absoluta de la tubería.

Si se eligen como variables repetitivas a ρ, V y D (propiedad del fluido, parámetro cinemático del flujo y longitud característica), se obtiene la relación:

$$\frac{\tau}{\rho V^2} = F_1\left(\mathrm{Re}, \frac{\varepsilon}{D}\right) \tag{1.5}$$

donde Re es el número de Reynolds, $\frac{\varepsilon}{D}$ es la rugosidad relativa del tubo.

Del desarrollo anterior se concluye que $\tau \propto \rho V^2$. Introduciendo una constante de proporcionalidad [14]:

$$\tau = \frac{f}{8}\left(\rho V^2\right) \tag{1.6}$$

siendo f un factor de fricción que depende de Re y de $\frac{\varepsilon}{D}$.

Al relacionar la Ec. 1.6 con la integral que aparece en la ecuación de la energía, se obtiene una expresión adecuada para el cálculo de pérdidas por fricción. El resultado para un flujo desarrollado en un conducto recto de sección constante es el siguiente:

$$h_f = \left(\frac{\rho V^2 f}{8}\right)\left(\frac{P}{\gamma A}\right)\left(\int_s^i d\mathrm{S}\right) \tag{1.7}$$

donde la integral del miembro derecho resulta igual a la longitud de tubería L con diámetro constante D.

Procediendo con la reducción de términos, la pérdida de carga por fricción en la pared de un conducto queda expresada como:

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \tag{1.8}$$

El modelo anterior se conoce como ecuación de Darcy-Weisbach, y resulta válido para el análisis de flujos laminares y turbulentos, siempre que se conozca f. Finalmente, si el diámetro, la longitud y la rugosidad de un tubo son conocidos, entonces la pérdida de carga entre las secciones s e i puede expresarse como una función del gasto:

$$\begin{aligned} h_{is} &= C_j Q_j^2 \\ C_j &= \left(\frac{8 f_j L_j}{\pi^2 g D_j^5}\right) \end{aligned} \tag{1.9}$$

1.3.2 PÉRDIDA DE ENERGÍA LOCAL

Los accidentes del terreno y la disposición de las calles sobre las que se ubica una red de tuberías, así como los cambios geométricos que sufren las conducciones, y la presencia de dispositivos para el control del movimiento del agua, son causales del decremento de la energía. Estas pérdidas, a diferencia de las ocurridas por efectos de fricción, son locales porque su efecto ocurre en la proximidad de un cambio de geometría o modificación del flujo. La magnitud de una pérdida local se expresa como una porción de la carga de velocidad, justo aguas abajo de la singularidad que provocó dicha pérdida. La expresión general es [21]:

$$h_L = \mathrm{K}\left(\frac{V^2}{2g}\right) \tag{1.10}$$

donde h_L es la pérdida de carga local, K es un coeficiente adimensional que depende del tipo de singularidad, del número de Reynolds y rugosidad del tubo, $\frac{V^2}{2g}$ es la carga de velocidad aguas abajo del sitio donde se alteró el flujo, salvo aclaración contraria.

1.4 SOLUCIÓN DE REDES CERRADAS

Cuando se utilizan las ecuaciones 1.1 y 1.9 para dar solución a una red de tuberías, se genera un sistema de ecuaciones no lineales que puede resolverse utilizando métodos iterativos. En estos métodos se procede de tal forma que los valores de gasto y carga en los nudos de la red se aproximan a la solución por medio de iteraciones sucesivas, partiendo de valores iniciales supuestos.

1.4.1 BALANCE DE CARGAS POR CORRECCIÓN DE GASTOS. MÉTODO DE CROSS.

Se utiliza un proceso de tanteos directos conocido como método de Hardy Cross. Para iniciar, se distinguen las características de cada uno de los circuitos elementales que conforman a la red cerrada en estudio. Se propone una distribución de gasto para cumplir con la continuidad en los nudos, considerando que las demandas se suponen localizadas en la intersección de ciertos conductos.

Se calculan las pérdidas de carga correspondientes a cada tramo de la red. A continuación, se hace el recorrido de cada circuito, siguiendo un contorno cerrado en el sentido de las manecillas del reloj. Se consideran positivas las pérdidas ocurridas en un tramo donde el sentido del flujo coincide con el del recorrido, y negativas en caso contrario. Si los gastos supuestos son la solución de la red, la suma algebraica de pérdidas Δh en cada circuito será nula, cumpliéndose así que la pérdida de energía entre dos nudos de la red (independientemente del recorrido que se elija para llegar de uno a otro), es la suma algebraica de las pérdidas ocurridas en los tramos que los unen. Sin embargo, como la estimación inicial de gastos fue arbitraria, Δh será diferente de cero e igual a la diferencia entre las pérdidas sucedidas en ductos recorridos en el sentido de las manecillas del reloj, y las pérdidas correspondientes a los ductos recorridos en sentido contrario. Tal diferencia proviene de un error ΔQ en los gastos Q_j supuestos en el circuito [18].

Durante el cálculo del error en los gastos estimados, la magnitud ΔQ es la misma para cada tubo de un mismo circuito, conservándose así la continuidad. Para que la suma algebraica de las pérdidas en un circuito recorrido por completo sea cero, hay que cumplir con lo siguiente:

$$\Sigma h_{is} = 0 = \Sigma C_j \left(Q_j + \Delta Q\right)^2 \tag{1.11}$$

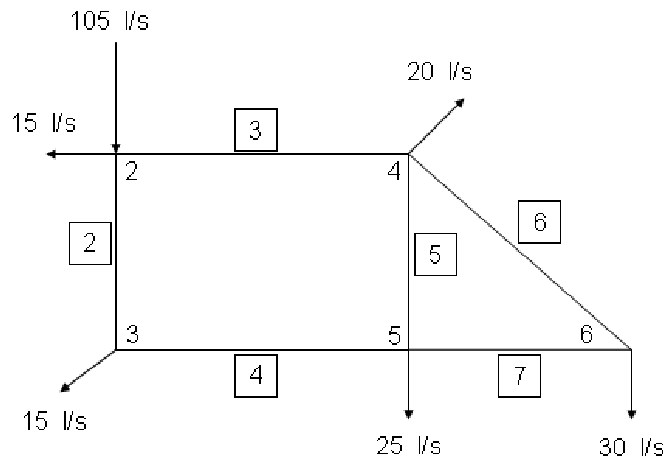
Desarrollando la expresión 1.11, y tomando en cuenta que ΔQ^2 es pequeño comparado con Q_j :

$$0 = \Sigma \left(C_j Q_j^2\right) + 2 \cdot \Delta Q \cdot \Sigma \left(C_j Q_j\right) \tag{1.12}$$

La corrección que debe aplicarse al gasto es [21]:

$$\Delta Q = -\frac{\Sigma h_{is}}{2\Sigma \left(|C_j Q_j|\right)} \tag{1.13}$$

donde el numerador es la suma algebraica de las pérdidas de carga en un circuito.



Figura~1-2: Red de tuberías. Disposición de tubos y nudos. Gastos de entrada y salida.

Nótese que para cumplir la *ecuación de circuito* (1.11), ΔQ ha de sumarse al gasto cuya dirección coincide con la del recorrido, y restarse en caso contrario. Como el binomio de la ecuación de circuito considera ΔQ con un mismo signo para todos los tubos, el denominador de la Ec. 1.13 se toma como el valor absoluto de la sumatoria [3].

La rapidez en la convergencia del método depende de la primera estimación de gastos en las tuberías, así como del tamaño y complejidad de la red [5]. El proceso finaliza cuando la magnitud ΔQ es pequeña, del orden de 0.1 l/s.

APLICACIÓN DEL MÉTODO

Considere la red de dos circuitos que se presenta en la Fig. 1-2. El gasto de entrada ocurre en el nudo 2 y es igual a 105 litros por segundo. La demanda en los nudos internos que debe satisfacerse también se presenta en la Fig. 1-2. Todos los nudos del sistema se encuentran a la elevación 70 m. La red está formada por tubos con rugosidad ε de 0.022 mm; las geometrías se describen a continuación.

Tubo	L [m]	D [m]
2	300	0.25
3	500	0.30
4	500	0.25

Tubo	L [m]	D [m]
5	300	0.25
6	500	0.25
7	400	0.20

El procedimiento comienza con el cálculo de los valores que asume la variable C_j para cada uno de los tramos del primer circuito (rectangular). De acuerdo con la Ec. 1.9 se tiene:

$$C_j = 0.0826 \frac{L_j}{D_j^5} f_j \tag{1.14}$$

Como una aproximación inicial, para cada tramo de tubería se considera un factor f de fricción igual a 0.022. En cálculos posteriores, f se determina con la ecuación que Swamee y Jain propusieron en 1976, que expresa lo siguiente [22]:

$$f = \frac{0.25}{\left(\log\left[\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.75}{\mathrm{Re}^{0.9}}\right]\right)^2} \tag{1.15}$$

Se propone una distribución de gastos para los tramos analizados. Realizando los productos de C_j por Q_j de la manera como lo sugiere la Ec. 1.13, se obtiene un valor ΔQ para el circuito rectangular.

Tramo	C_j $\left[\frac{\mathrm{s}^2}{\mathrm{m}^5}\right]$	Q_j $\left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}\right]$	ΔQ $\left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}\right]$
2-4	373.909	0.055	-0.00149
4-5	558.243	0.015	-0.00149
5-3	930.406	-0.02	-0.00149
3-2	558.243	-0.035	-0.00149

Se procede ahora con el cálculo del valor ΔQ asociado al segundo circuito (triangular). Se calculan los C_j y Q_j correspondientes, así como sus productos.

Tramo	$C_j \left[\frac{s^2}{m^5}\right]$	$Q_j \left[\frac{m^3}{s}\right]$	$\Delta Q \left[\frac{m^3}{s}\right]$
4-6	930.406	0.02	-0.00044
6-5	2271.5	-0.01	-0.00044
5-4	558.243	-0.015+0.00149	-0.00044

Obsérvese que el Q_j del tramo 5-4 está afectado por la corrección ΔQ correspondiente a ese mismo tubo (tramo 4-5), y que se calculó para el circuito rectangular.

Antes de proceder al cálculo de los gastos corregidos, se modifica el valor ΔQ del tramo 4-5 del circuito rectangular, aplicando la corrección ΔQ obtenida en el circuito triangular. Es decir, para el tramo 4-5 se tiene un ΔQ igual a -0.00105. Así, los gastos corregidos para ambos circuitos son:

Tramo	$Q_j \left[\frac{m^3}{s}\right]$
2-4	0.05350
4-5	0.01394
5-3	-0.02149
3-2	-0.03649

Tramo	$Q_j \left[\frac{m^3}{s}\right]$
4-6	0.01955
6-5	-0.01044
5-4	-0.01394

El procedimiento descrito se repite, con la diferencia de que ahora es posible obtener valores del coeficiente f a partir de los gastos conocidos y la Ec. 1.15. En el cálculo del número de Reynolds se utilizó una viscosidad cinemática de $1 \times 10^{-6}\ \frac{m^2}{s}$, que corresponde al agua a una temperatura de $20°C$ [21]. La aplicación de esta metodología proporcionó los valores de gasto, velocidad, número de Reynolds y coeficiente de fricción que se presentan enseguida.

Tubo	$Q\left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}\right]$	Sale del nudo	$V\left[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right]$	Re	f
2	0.03609	2	0.735	183809.44	0.0165
3	0.05391	2	0.763	228797.34	0.0158
4	0.02109	3	0.430	107415.06	0.0181
5	0.01401	4	0.285	71368.27	0.0196
6	0.01990	4	0.405	101329.37	0.0183
7	0.01010	5	0.322	64324.22	0.0201

1.4.2 BALANCE DE GASTOS POR CORRECCIÓN DE CARGAS. MÉTODO DE CORNISH.

El primer paso consiste en asignar las direcciones de los gastos en las tuberías, acción que permite suponer valores iniciales de carga piezométrica en los nudos de la red. La pérdida de carga para cada tubería se calcula como la diferencia de cargas entre los nudos a los que está conectado dicho tubo. Si se utiliza la Ec. 1.9 para el cálculo de la pérdida de carga se tendrá:

$$Q_j = \left(\frac{h_{is}}{C_j}\right)^{1/2} \tag{1.16}$$

Dado que la continuidad es una condición a cumplir en todos los nudos a los cuales llegan o salen gastos, el problema queda representado por un sistema de ecuaciones no lineales cuyas expresiones tienen la forma:

$$\Sigma\left(\frac{h_{is}}{C_j}\right)^{1/2} + q_i = 0 \tag{1.17}$$

Para que las cargas piezométricas sean la solución, se necesita que las ecuaciones de continuidad sean satisfechas de manera simultánea. Cuando esto no ocurre, existe un error ΔQ en cada punto de unión, indicando que las cargas necesitan ajuste. Representando a la cantidad de ajuste de carga para el nudo i como ΔH_i, la continuidad en cualquier etapa del proceso iterativo puede escribirse como:

$$\Sigma\left(\frac{h_{is}+\Delta H_i}{h_{is}/Q_j^2}\right)^{1/2}+q_i=0 \tag{1.18}$$

Después de realizar algunas simplificaciones de modo que no se consideren términos en los que aparezcan potencias de ΔH_i, se obtiene una ecuación útil para el cálculo del ajuste de carga en el nudo i [21]:

$$\Delta H_i=-2\left(\frac{q_i+\Sigma Q_j}{\Sigma\left(Q_j/h_{is}\right)}\right) \tag{1.19}$$

Con las nuevas cargas piezométricas se pueden calcular nuevos valores de pérdida de carga y gastos. El proceso se repite tantas veces como sea necesario, hasta que los errores en los gastos se reduzcan a un nivel aceptable, digamos del orden de 0.1 l/s.

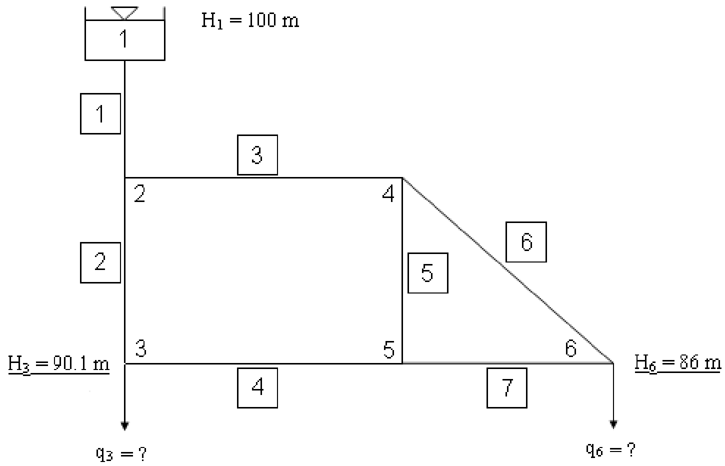
APLICACIÓN DEL MÉTODO

Se desea resolver la red de dos circuitos presentada en la Fig. 1-3. Todos los nudos del sistema se encuentran a la elevación 70 m. La carga piezométrica en el nudo 1 (tanque) es igual a 100 m. Por su parte, las cargas piezométricas en los nudos 3 y 6 son conocidas e iguales a 90.1 y 86 metros, respectivamente. La red está formada por tubos con rugosidad de 0.022 mm. Su geometría es la siguiente.

Tubo	L [m]	D [m]
1	1500	0.25
2	500	0.15
3	800	0.20
4	800	0.15

Tubo	L [m]	D [m]
5	500	0.20
6	640.312	0.15
7	400	0.15

El procedimiento de solución comienza por el cálculo de los valores C_j para todos los



Figura~1-3: Red de tuberías. Disposición de tubos y nudos. Cargas piezométricas conocidas.

tramos de tubería unidos al nudo 2. Para realizar lo anterior se utiliza la Ec. 1.14, suponiendo un valor de f igual a 0.022. Inmediatamente después se plantea una estimación de las pérdidas en los tramos ya citados. Con los valores determinados se calcula el gasto mediante la Ec. 1.16. Por último, se utiliza la expresión 1.19 para obtener el valor ΔH_i que servirá para ajustar las pérdidas supuestas.

Tramo	$C_j \left[\frac{\mathrm{s}^2}{\mathrm{m}^5}\right]$	h_{is} [m]	$Q_j \left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}\right]$	ΔH_i [m]
1-2	2791.219	-5.5	-0.04438	-0.8352
3-2	11965.102	4.4	0.01917	-0.8352
4-2	4543	5	0.03317	-0.8352

Se procede entonces al cálculo del valor ΔH_i que corresponde a los tubos conectados al nudo 4. Para esto se obtienen los coeficientes C_j y las pérdidas h_{is}, útiles para el cálculo de los gastos Q_j.

Tramo	$C_j \left[\frac{s^2}{m^5}\right]$	h_{is} [m]	$Q_j \left[\frac{m^3}{s}\right]$	ΔH_i [m]
2-4	4543	-5+0.8352	-0.03027	0.0993
5-4	2839.375	0.5	0.01327	0.0993
6-4	15322.797	3.5	0.01511	0.0993

Obsérvese que el h_{is} del tramo 2-4 está afectado por la corrección ΔH_i correspondiente a esa misma tubería, y que se obtuvo al analizar el nudo 2 (tramo 4-2). A continuación, se procede a determinar la corrección ΔH_i para los tubos conectados al nudo 5. Primero se obtendrán los coeficientes C_j y las pérdidas h_{is}, requeridos para el cálculo de los gastos Q_j.

Tramo	$C_j \left[\frac{s^2}{m^5}\right]$	h_{is} [m]	$Q_j \left[\frac{m^3}{s}\right]$	ΔH_i [m]
3-5	19144.164	-1.1	-0.00758	0.2379
4-5	2839.375	-0.5-0.0993	-0.01452	0.2379
6-5	9572.082	3	0.01770	0.2379

Nótese que el h_{is} del tramo 4-5 está afectado por la corrección ΔH_i correspondiente a ese mismo tubo, y que se determinó al analizar el nudo 4 (tramo 5-4).

Antes de corregir las pérdidas de carga para la siguiente iteración se modifica el valor ΔH_i del tramo 4-2 del nudo 2, utilizando la corrección ΔH_i obtenida para el mismo tubo durante el análisis del nudo 4 (tramo 2-4). Asimismo, se modificará el valor ΔH_i del tramo 5-4 del nudo 4, utilizando la corrección ΔH_i obtenida para el mismo tramo durante el análisis del nudo 5 (tramo 4-5). Por lo anterior, las pérdidas de carga se corregirán utilizando, para el tramo 4-2, un ΔH_i igual a -0.9346, y para el tramo 5-4 se utilizará un ΔH_i igual a -0.1385.

Las pérdidas de carga corregidas como primera iteración se presentan ahora.

Tramo	$h_{is}[m]$
1-2	-6.3352
3-2	3.5647
4-2	4.0653

Tramo	$h_{is}[m]$
2-4	-4.0653
5-4	0.3614
6-4	3.5993

Tramo	$h_{is}[m]$
3-5	-0.8620
4-5	-0.3614
6-5	3.2379

El procedimiento descrito se repite, con la diferencia de que ahora es posible obtener valores del coeficiente f considerando los gastos ya calculados. Una solución aproximada de la red de tuberías indica que los gastos de entrega en los nudos 3 y 6 son 14.91 y 40.13 litros por segundo, respectivamente. La solución se presenta enseguida.

Tubo	$Q[m^3/s]$	Sale del nudo	$V[m/s]$	Re	f	$h_{is}[m]$
1	0.05501	1	1.121	280184.30	0.0154	5.940
2	0.02065	2	1.168	175250.31	0.0170	3.960
3	0.03438	2	1.094	218849.67	0.0162	3.966
4	0.00574	3	0.325	48728.21	0.0214	0.616
5	0.01600	4	0.509	101879.25	0.0184	0.610
6	0.01839	4	1.041	156105.08	0.0173	4.094
7	0.02174	5	1.230	184555.96	0.0169	3.484

1.4.3 MÉTODO DESARROLLADO EN EL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM

Como se ha mostrado en este capítulo, resolver una red de tuberías es una tarea que exige la solución ágil y precisa de una gran cantidad de operaciones aritméticas. Por esta razón, los esfuerzos se han encaminado a solucionar los sistemas de ecuaciones no lineales mediante el empleo de computadoras digitales. El objetivo es determinar las magnitudes de los gastos y cargas de presión implicados, utilizando métodos numéricos de rápida convergencia.

Se desea analizar una red de la que se conocen sus características geométricas y los gastos que entran o salen de ciertos nudos que así lo requieren. Además, es necesario cumplir las condiciones particulares del sistema, tales como niveles piezométricos correspondientes a tanques con espejo de agua constante.

Considérese la pérdida de carga entre dos nudos como una función del gasto:

$$f(Q) = H_s - H_i = C\,|Q|\,Q \tag{1.20}$$

siendo $H_s - H_i$ la diferencia de cargas piezométricas entre los nudos s e i. En esta expresión se respeta el sentido del flujo al representar a Q^2 como el producto del gasto por su magnitud; es decir, cuando $Q > 0 \Rightarrow |Q|\,Q = Q^2$. Si $Q < 0 \Rightarrow |Q|\,Q = -Q^2$.

De la serie de Taylor de la función del gasto $f(Q)$, hasta la primera derivada, se puede escribir lo siguiente [12]:

$$f'(Q) = \frac{f(Q + \Delta Q) - f(Q)}{\Delta Q} \tag{1.21}$$

Para el caso en que $Q > 0$, la derivada de $f(Q)$ es igual a $2CQ$. Así pues:

$$f(Q + \Delta Q) = CQ^2 + 2CQ\Delta Q \tag{1.22}$$

Como el problema se resolverá utilizando un proceso iterativo, es conveniente que en la Ec. 1.22 se introduzcan términos k que representen la iteración correspondiente.

$$f\left(Q^{k+1}\right) = C\left(Q^k\right)^2 + 2CQ^k\left(Q^{k+1} - Q^k\right) \tag{1.23}$$

donde el término izquierdo de la ecuación representa la pérdida de carga entre dos secciones en la iteración $k + 1$. Una ecuación equivalente es:

$$H_s^{k+1} - H_i^{k+1} = -C\left(Q^k\right)^2 + 2CQ^kQ^{k+1} \tag{1.24}$$

El gasto en la iteración $k+1$ puede conocerse mediante la ecuación:

$$Q^{k+1} = \frac{H_s^{k+1} - H_i^{k+1}}{2CQ^k} + \frac{Q^k}{2} \tag{1.25}$$

Para el caso en que $Q < 0$, también se puede encontrar una ecuación del gasto Q^{k+1}. Este modelo tiene la forma de la Ec. 1.25, con la diferencia de que el primer término del lado derecho es negativo. Para evitar ambigüedades, el método propone calcular el gasto en cada tubería j utilizando la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
Q_j^{k+1} &= \alpha_j^k\left(H_s^{k+1} - H_i^{k+1}\right) + \frac{Q_j^k}{2} \\
\alpha_j^k &= \frac{1}{2C_j\left|Q_j^k\right|} \\
C_j &= 0.0826\frac{L_j}{D_j^5}f_j
\end{aligned} \tag{1.26}$$

Dado que la solución de la red de tuberías es aquella que cumple la condición de continuidad de manera simultánea en todos los nudos, entonces conviene formar un sistema de ecuaciones lineales utilizando el modelo 1.26 en la expresión de continuidad de cada nudo. Este sistema tiene tantas ecuaciones como cargas piezométricas desconocidas.

Inicialmente se supone un valor de gasto distribuido por los conductos Q_j^k, acción que permitirá calcular los α_j^k de cada tubo. Cabe mencionar que los factores de fricción requeridos serán calculados por medio de la ecuación explícita de Swamee y Jain (Ec. 1.15). Se formará un sistema de ecuaciones cuyas incógnitas son las cargas H^{k+1}. La solución de este sistema proporcionará la información necesaria para calcular los gastos Q_j^{k+1}, a partir de la Ec. 1.26. Si para todas las tuberías, la diferencia entre los gastos Q_j^k supuestos y Q_j^{k+1}calculados es cero, o se empata con un valor previamente establecido, se habrá alcanzado la solución de la red en estudio.

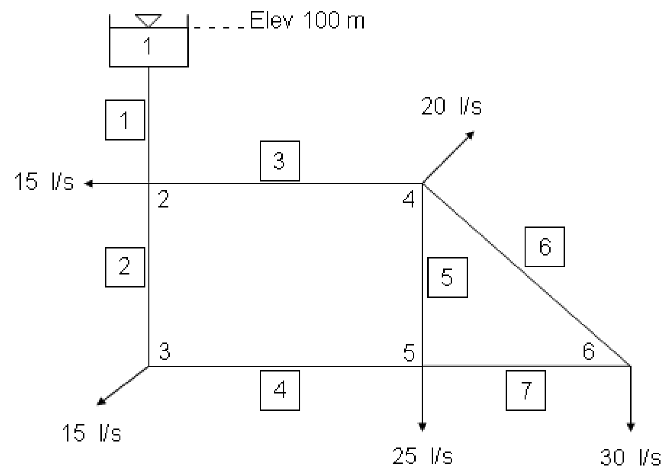
APLICACIÓN DEL MÉTODO

Con la intención de resolver redes de manera ágil y precisa, el Dr. Óscar Fuentes[1] desarrolló un código que permite estimar los gastos en las tuberías, además de las cargas piezométricas en los nudos. El programa, que lleva por nombre REDESO, está escrito en el lenguaje BASIC para computadora. Los datos requeridos se listan a continuación:

- Número de tubos.
- Asignación de números de orden para relacionar un tubo con los nudos a los cuales se conecta.
- Longitud y diámetro de los conductos.
- Rugosidad absoluta de cada tubería.
- Número de tanques y asignación de un número para relacionar cada tanque con un nudo particular.
- Nivel piezométrico de cada tanque.
- Número de bombas y fugas en el sistema.
- Número de nudos y el valor de la cota del terreno para cada uno de ellos.
- El gasto de salida en cada nudo.

Para verificar que la solución de una red obtenida con el programa REDESO es similar a la calculada mediante procedimientos como el método de Cross, enseguida se muestran los resultados que el programa arroja como solución a los ejemplos presentados anteriormente.

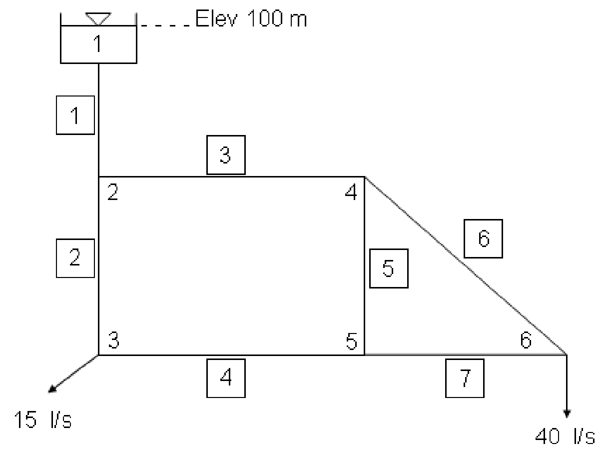
[1] Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles es profesor e investigador del Instituto de Ingeniería de la UNAM.



Figura~1-4: Red de tuberías. Disposición de tubos y nudos. Gastos de salida.

PRIMER EJEMPLO (PROBLEMA RESUELTO EN LA SUBSECCIÓN 1.4.1). Resuélvase la red mostrada en la Fig. 1-4. Se sabe que la elevación de todos los nudos es igual a 70 m. La elevación del agua en el tanque es 100 m. Si la red está constituida por tubos de rugosidad absoluta igual a 0.022 mm, con el programa REDESO se obtienen los resultados que se muestran enseguida.

Tubo	$Q[m^3/s]$	Sale del nudo	$V[m/s]$	Re	f	$h_{is}[m]$
1	0.105	1	0.836	334220	0.0141	0.131
2	0.036	2	0.734	183360	0.0158	0.544
3	0.054	2	0.764	229170	0.0151	0.784
4	0.021	3	0.428	106970	0.0176	0.339
5	0.01405	4	0.286	71540	0.0192	0.098
6	0.01995	4	0.407	101600	0.0178	0.309
7	0.01005	5	0.320	63980	0.0197	0.210



Figura~1-5: Red de tuberías. Disposición de tubos y nudos. Gastos de salida.

SEGUNDO EJEMPLO (PROBLEMA RESUELTO EN LA SUBSECCIÓN 1.4.2). Refiérase a la red mostrada en la Fig. 1-5. Se sabe que la elevación de todos los nudos es igual a 70 m. La elevación del agua en el tanque es de 100 m. Los tubos de la red son tales que su rugosidad absoluta es igual a 0.022 mm. Con el programa REDESO se determinan los valores que se muestran a continuación.

Tubo	$Q[m^3/s]$	Sale del nudo	$V[m/s]$	Re	f	$h_{is}[m]$
1	0.055	1	1.121	280110	0.0146	5.942
2	0.02066	2	1.170	175390	0.0159	3.967
3	0.03434	2	1.094	218600	0.0153	3.958
4	0.00566	3	0.321	48070	0.0210	0.601
5	0.016	4	0.510	101870	0.0178	0.610
6	0.01834	4	1.038	155640	0.0163	4.074
7	0.02166	5	1.227	183890	0.0158	3.464

OBSERVACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ejemplos, el programa REDESO permite resolver una red de tuberías de manera satisfactoria. Los gastos y pérdidas de carga estimados por el programa son similares a los valores calculados mediante procedimientos iterativos de balance de cargas o gastos en las redes analizadas. En lo sucesivo se utilizará este programa con la finalidad de obtener la solución de redes de manera expedita.

Capítulo 2

EL PROBLEMA DE REHABILITACIÓN

A lo largo de la vida útil de los sistema de distribución de agua, ocurre con frecuencia que los requerimientos de carga o gasto ya no se satisfacen adecuadamente en todos los puntos de entrega (nudos con demanda). Se mencionó en el capítulo anterior que la carga de presión disminuye durante la conducción a consecuencia de las pérdidas de energía por fricción y locales. El aumento de las pérdidas por fricción ocurrirá por la acumulación de depósitos sobre las paredes de los conductos, ya que esto reducirá el diámetro interno e incrementará las rugosidades. A su vez, la disminución en el gasto entregado suele presentarse por fugas de agua, pues aunque las tuberías se fabriquen para brindar servicio durante una vida útil relativamente amplia, existen factores que favorecen el rompimiento o degradación de estos elementos [6]:

- Calidad de los tubos, incluyendo conexiones y piezas especiales.
- Ambiente dentro del cual se ubica una tubería, incluyendo el tipo de suelo y cargas externas a las que está expuesta.
- La calidad de mano de obra empleada para la instalación del sistema.
- Las condiciones de operación y servicio.

Resulta evidente que la necesidad de cumplir con los requerimientos de agua potable para una sociedad contemporánea es imperiosa; sin embargo, el desarrollo económico y social de cada grupo es determinante para definir el tipo de soluciones que pueden implementarse. Así pues, un país francamente desarrollado se enfrenta al envejecimiento de su infraestructura, y simultáneamente, planea estrategias para el cumplimiento de los requerimietos futuros. Por otro lado, en aquella sociedad donde el crecimiento de su población es desproporcionado con el grado de desarrollo que experimenta, un objetivo primordial será la ampliación del servicio para la entrega de agua en las zonas descentralizadas, es decir, los nuevos poblados que se asientan lejos del lugar que primero se urbanizó. En estos casos, pueden inclusive adoptarse soluciones que permitan la entrega de un gasto reducido, y sólamente durante las horas de mínima demanda.

Existen diferentes opciones para modificar las condiciones de flujo de una red y con ello provocar un incremento de carga sobre los nudos. Una opción para los sistemas que funcionan a gravedad es la reubicación de los tanques de almacenamiento a elevaciones topográficas superiores, aunque físicamente se trata de un artificio complicado que no garantiza la modificación suficiente de los niveles de carga en los nudos que más lo requieren. Cuando se desea incrementar la carga en algunos sectores, independientemente de las modificaciones a los conductos, el empleo de equipos de bombeo es una posibilidad. Esta alternativa resulta útil siempre que el costo por utilizar energía eléctrica se compare adecuadamente con la inversión que representa el mejoramiento del estado físico de la red misma. Por último, ya que el solo incremento del diámetro interno de los conductos para la satisfacción de cierta demanda reduciría las pérdidas por fricción, la sustitución de tuberías es una solución al problema de la carga de presión insuficiente.

En la literatura especializada se han presentado diferentes metodologías para mejorar el funcionamiento de los sistemas de distribución de agua. Generalmente los algoritmos desarrollados tiene por objeto la determinación de las tuberías que conviene sustituir o rehabilitar, y en algunos casos, intentan establecer los horarios de operación más convenientes para equipos de bombeo.

Los métodos que proponen sustituir tuberías buscan identificar los conductos que, por lo reducido de sus diámetros o el grado de rugosidad que presentan, no permiten que la carga de presión en los nudos con demanda sea superior a un valor mínimo establecido. Por otro lado, en los artículos especializados se conoce como rehabilitación al tratamiento que beneficia el estado y desempeño de una tubería en malas condiciones, ya sea por reducción en su diámetro interno o agrietamiento. Selvakumar *et al.* (2002) discuten sobre las ventajas de algunos métodos. En dicho trabajo se subraya la importancia de limpiar las tuberías para la remoción de material incrustado sobre las paredes, actividad previa a la colocación de un material anticorrosivo para la prevención de roturas e incremento de la vida útil de los tubos. Asimismo, mencionan que un método simple y económico, además de ser el más antiguo para la rehabilitación, consiste en colocar tuberías nuevas dentro de los conductos defectuosos. Sin embargo, con tal procedimiento también se asegura una reducción en la capacidad del sistema, misma que dependerá de los diámetros utilizados.

Por lo que se ha mencionado, el costo de rehabilitación o reemplazo está asociado a un conjunto de factores tales como la longitud total del proyecto, los diámetros involucrados, el material que da forma a los tubos, el acceso a las tuberías (remoción de pavimento o excavación), la obstrucción que puedan presentar algunos elementos esenciales para el funcionamiento de otros servicios, etc. En el trabajo de Clark *et al.* (2002) se ofrecen algunos modelos matemáticos para la estimación de costos por reparación de redes. Con el empleo de estas ecuaciones se pretende conocer el costo por unidad de longitud que sería necesario invertir en beneficio del funcionamiento de una red, por lo que sus autores sugieren su aplicación como parte de un algoritmo para la optimización de recursos.

Ante la necesidad de encontrar soluciones económicas que permitan el funcionamiento adecuado de sistemas de distribución de agua potable, a través de los años se han desarrollado estrategias útiles para enfrentar estos problemas. En las secciones de este capítulo se describirán algunos métodos cuyo objetivo principal será lograr la satisfacción de la demanda, cumpliendo los requerimientos de carga de presión en los puntos de entrega.

2.1 LA PROGRAMACIÓN LINEAL COMO HERRAMIENTA

En el año de 1977, Alperovits y Shamir presentaron una metodología para el diseño óptimo de sistemas de distribución de agua. Dicho texto hace referencia a la programación lineal como un algoritmo útil para la optimación de funciones objetivo que se apeguen al cumplimiento de restricciones expresadas como ecuaciones lineales. Años más tarde, Domínguez *et al.* (1983) definieron un algoritmo adecuado para el diseño de redes de agua potable, mismo que se describirá a continuación.

Al definir una función objetivo utilizando los costos de tuberías para el armado de una red, y considerando que tanto las longitudes de los tramos entre nudos, las cargas de presión requeridas en dichos puntos, y el cumplimiento de ecuaciones de circuito son restricciones válidas, se pueden calcular las longitudes de tuberías con diferentes diámetros que permitan la conexión entre dos nudos de una red cerrada.

Como la disposición de tubos en una red particular está condicionada por el trazo de las calles sobre las que se asienta, entonces la longitud de los tramos de tubería necesarios para conectar los nudos con demanda son conocidos [17]. La función a minimizar puede expresarse como un polinomio, cuyas variables lineales representan longitudes de tramos de tuberías, correspondientes a diferentes diámetros comerciales. Dependiendo de los valores que tomen las variables, el valor óptimo de la función objetivo será un número real que represente el costo total de la red (caso de diseño), esto debido a que cada término del polinomio es el producto del costo por unidad de longitud de un conducto de cierto diámetro comercial, multiplicado por una longitud de tubería.

Dada la necesidad de conocer el funcionamiento hidráulico de una red propuesta para la satisfacción de las demandas, se requiere estimar las pérdidas de carga en las conducciones. La ecuación de Manning es un modelo útil para obtener la pendiente de fricción en las tuberías; así pues [21]:

$$\begin{aligned} S &= kQ^2 \\ k &= 10.29 \left(\frac{\mathrm{n}^2}{D^{16/3}} \right) \end{aligned} \tag{2.1}$$

donde S es la pendiente de la línea de energía que posee una masa de agua fluyendo en una tubería con diámetro interno D; Q es el gasto que circula entre dos nudos, en $\frac{m^3}{s}$; D es el diámetro interno de una tubería, en m; **n** depende de la superficie interna del conducto.

De acuerdo con la Ec. 2.1, para cada tramo entre dos nudos conviene determinar tantas pendientes de fricción S como diámetros comerciales candidatos se consideren al optimizar la red. En este sentido, nótese que el gasto circulante entre dos nudos unidos por tuberías es requerido en la misma ecuación; esto implica la necesidad de definir, como condición inicial, una distribución de gastos que cumpla con la continuidad en los nudos de manera simultánea. Por lo anterior, y tomando en cuenta la continuidad en las tuberías, los diámetros candidatos a unir cada par de nudos pueden restringirse en función de las velocidades permisibles en el sistema. Así pues, para calcular la pérdida de carga en un tramo cuyo diámetro es D, se realiza el producto de la longitud del tramo por la pendiente S relacionada con el mismo diámetro.

Las restricciones de longitud establecen que la suma de longitudes correspondientes a tubos de diferente diámetro, que unidos conectan a dos nudos con demanda, es igual a la longitud total del tramo que separa dichos nudos. Nótese que en un problema de optimación se tendrán tantas restricciones de longitud como parejas de nudos unidos por tuberías existan.

Las restricciones de carga se expresan como desigualdades. Se busca que la pérdida por fricción entre un tanque de alimentación y cada punto de demanda sea tal que la carga de presión en los nudos supere un valor mínimo. En una desigualdad se tendrá, de un lado del signo, la suma algebraica de la carga total en un tanque más las pérdidas por fricción en las tuberías que lo conectan con cierto nudo en consideración, mientras del otro lado de la desigualdad se encuentra la carga piezométrica mínima requerida en el mismo nudo. Siendo así, cuando sólamente se pretenda un diseño que satisfaga las demandas con una carga de presión mínima, se tendrán tantas desigualdades como nudos con demanda existan en el sistema. Si se desea restringir el diseño para que la carga de presión no sea excesiva, entonces también hay que establecer una desigualdad por cada nudo a restringir en carga máxima; de un lado del signo aparecerá la suma algebraica de carga total en un tanque más las pérdidas por fricción que se habían precisado anteriormente, del otro lado se encontrará la carga piezométrica máxima permitida en el nudo restringido.

Por último, es necesario establecer tantas restricciones hidráulicas como circuitos integren la red cerrada. Al sumar algebraicamente las pérdidas de carga ocurridas en cada circuito, partiendo y llegando a un mismo nudo que lo integre, el resultado debe ser igual a cero (ecuación de circuito). En estos casos puede utilizarse la convención de que las pérdidas son positivas si el flujo de agua es en el sentido de las manecillas del reloj, y negativas en caso contrario.

El problema de optimación planteado puede resolverse utilizando herramientas similares al programa LINDO para computadora. Como solución se tendrá, de cada tramo que conecta a dos nudos con demanda, las longitudes de tubería de diferente diámetro comercial que unidas constituyen cada uno de dichos tramos. Desde luego, siempre que la carga total en el tanque de alimentación sea suficiente para cumplir los requerimientos de presión, considerando alguna combinación de los diámetros candidatos, se conocerá el costo de los conductos requeridos. Nótese que esta inversión será la mínima para cumplir las demandas y restricciones, pero como propuesta está condicionada a la distribuición de gastos definida inicialmente.

La crítica que recibe este método, en términos generales, se refiere a la propuesta de unir tramos entre dos nudos por medio de tuberías de diferente diámetro. Estas soluciones resultarán inadecuadas si implican la forzosa unión de conductos muy diferentes, ya sea en diámetro y/o longitud. Por otro lado, si se desea resolver un problema de rehabilitación y reemplazo de tubos deficientes, será difícil sino imposible determinar la solución óptima. En este tipo de problemas se requiere tomar en cuenta el funcionamiento de la red con sus tubos originales, para despúes determinar cuáles modificaciones resultan convenientes hidraulica y económicamente. La solución que requiera la unión de conductos de diferente diámetro, difícilmente será comparable con el arreglo existente.

2.2 EL DIÁMETRO EQUIVALENTE Y LAS TUBERÍAS PARALELAS

Cuando se ha determinado que una red necesita la modificación de algunos de sus diámetros para provocar un incremento en la carga de presión sobre sus nudos, la alternativa de colocar tuberías en paralelo a las conducciones existentes puede implementarse.

Para determinar las condiciones hidráulicas de una red a la que se han integrado algunos conductos en paralelo, conviene tomar en cuenta el siguiente concepto: se dice que una tubería es equivalente cuando la pérdida de carga relacionada con un gasto que circula dentro de ella, es igual que la ocurrida en la(s) tubería(s) que sustituye [13]. Luego entonces, en el análisis de redes no se considera que el agua fluye por dos conductos en paralelo, sino que se desplaza a través de una tubería con diámetro equivalente.

El diámetro equivalente se calcula tomando en cuenta dos características de un sistema de tubos en paralelo: el gasto transportado por dos tuberías en paralelo es igual al gasto que circula justo antes de ingresar a la ramificación (bifurcación); la pérdida de carga por cualquiera de los conductos, desde la separación hasta la unión de tuberías, es igual a la difererencia de carga total entre los puntos de bifucación y unión del sistema en paralelo. A partir de la ecuación de Darcy-Weisbach (Ec. 1.8), y asumiendo que las longitudes y factores de fricción de las tuberías existente-paralela-equivalente son las mismas, el diámetro equivalente se define como:

$$D_E = \left(D_e^{2.5} + D_p^{2.5}\right)^{0.4} \tag{2.2}$$

donde D_E es el diámetro equivalente, D_e es el diámetro de un tubo existente en la red, y D_p es el diámetro de una tubería a instalar en paralelo.

El método consiste en instalar tuberías en paralelo a algunos conductos existentes, de modo que se cumpla la carga de presión requerida en todos los nudos con demenada. Para calificar el funcionamiento de una red propuesta como solución, utilícese un *factor de eficiencia en el servicio* definido por [13]:

$$\begin{aligned}
FES &= \left(\frac{Q_d - Q_f}{Q_d}\right) \text{ x } 100 \qquad (2.3)\\
Q_d &= \sum_{i=1}^{\mathrm{N}} q_i\\
Q_f &= \sum_{i=1}^{\mathrm{N}} \left(\frac{h_{\min} - h_i}{h_{\min}}\right) q_i \quad si \quad h_i < h_{\min}
\end{aligned}$$

siendo FES el factor de eficiencia en el servicio, en %; Q_d el gasto total demandado de la red, Q_f el gasto no entregado por la red, q_i el gasto demandado en el nudo i, $h_{\min}$ la carga de presión mínima requerida en los puntos de demanda, h_i la carga de presión en el nudo i, N el total de nudos con demanda en el sistema.

Por lo anterior, la modificación de los conductos de una red se justifica cuando el FES es menor al 100%. La metodología que Hernández (2005) presenta en su trabajo sugiere los pasos siguientes:

- Agregar una tubería paralela, con el mayor diámetro disponible, a una tubería existente. Se determinará el FES que corresponda a la nueva red. Esto se practicará con cada uno de los tubos existentes (uno a la vez).

- Si el FES de cada opción de cambio agregando una tubería resulta menor al 100%, estudiar el funcionamiento de posibles soluciones que impliquen la instalación de conductos paralelos a dos tuberías originales. De nueva cuenta, es recomendable instalar tuberías paralelas con el mayor diámetro disponible. En caso de que ninguna opción de cambio al agregar tubos a dos conductos originales provoque un FES igual al 100%, se necesitará analizar el funcionamiento de redes tras la instalación de tuberías paralelas a 3 conductos originales.

- Al identificar una red cuyo FES sea igual al 100%, independientemente de ser un arreglo que considere la instalación de un tubo paralelo a uno o más conductos originales, se analizarán otras opciones al reducir el diámetro de uno de los conductos agregados para alcanzar el 100%. Así pues, se busca una combinación que corresponda a un FES adecuado, pero que implique una inversión mínima.

La deficiencia principal de este método está relacionada con su mejor característica: la rapidez con que se determinan los diámetros para satisfacer las demandas se debe, principalmente, a que en principio se analiza el funcionamiento de redes con los diámetros más grandes disponibles. Como consecuencia inmediata se tiene la determinación de soluciones costosas. La metodología advierte sobre la necesidad de estudiar, en un momento dado, el comportamiento de redes con diámetros menores; sin embargo, no existe una sugerencia respecto a las combinaciones que entre díametros conviene analizar, es decir, no hay restricciones que provoquen una búsqueda estratégica. Por el contrario, los únicos indicadores de la bondad de una red son el costo de los tubos paralelos y el FES. A este respecto, nótese cómo el factor de eficienca no es un indicador suficiente, esto porque califica con 100% a todas las redes que cumplen con la demanda, independientemente de los excesos de carga en un sistema. Al final, estos excesos se relacionan con una solución costosa, pero el método no permite apreciar este detalle importante en cada arreglo.

2.3 EL NÚMERO DE REYNOLDS COMO PARÁMETRO

Una opción para incrementar la carga de presión en los nudos de una red es sustituir algunas tuberías del sistemas original por otras de diámetro mayor. Ahora bien, siendo poco factible e innecesario el reemplazo de todas las tuberías que forman parte del sistema, conviene utilizar una metodología útil en la identificación de los tramos que deben adecuarse para cumplir con las cargas y demandas exigidas. Del mismo modo, es poco realista el intento de revisar el funcionamiento hidráulico de la red, bajo el ideal de considerar todas las combinaciones entre diámetros comerciales disponibles y conductos existentes. Luego entonces, el espacio de soluciones ha de explorarse con la intención de encontrar, a la brevedad, una solución que si no es la óptima en el aspecto económico, sí justitifique la inversión con base en el beneficio que se obtendrá.

A partir del funcionamiento hidrálico de los conductos que originalmente integren la red a modificar, los números de Reynolds correspondientes a dichos tubos puede utilizarse para establecer cuál modificación tubería-diámetro conviene analizar en primera instancia [11]. La información que se requiere de la red original es la siguiente:

- Factor de eficiencia en el servicio (en %):

$$\mathrm{FES} = 100 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} q_i - \sum_{i=1}^{N} q_s}{\sum_{i=1}^{N} q_i} \right) \mathrm{x}\ 100 \tag{2.4}$$

siendo q_s el gasto suministrado en la ubicación del nudo i.

Para estimar el gasto suministrado en los nudos se tomará en cuenta a la ecuación general de los orificios. Un *factor de gasto* se define ahora como el cociente de los caudales suministrado y demandado en el nudo i [10]:

$$F_q = \frac{q_s}{q_i} = \sqrt{\frac{h_i}{h_{\min}}} \tag{2.5}$$

donde el factor de gasto F_q se considera igual a 1 si $h_i > h_{\min}$.

- El costo del arreglo de tuberías en la red original. Considérese el costo que implicaría una red nueva cuyos tubos en longitud y diámetro son iguales a los de la red existente.

- Coeficientes para establecer prioridad de análisis hidráulico. Se obtienen como el cociente de dos números de Reynolds, el correspondiente a una tubería j dividido entre el máximo calculado en el análisis de la red.

$$R_j = \frac{\mathrm{Re}_j}{\mathrm{Re}_{\max}} \tag{2.6}$$

Se ordenarán de manera decreciente los coeficientes R_j; la tubería correspondiente al Reynolds máximo ($R_j = 1$) será justamente el primer conducto que se modificará en diámetro, aumentando a la medida comercial inmediata. Lo anterior se justifica con el razonamiento siguiente: al disminuir el número de Reynolds en una tubería aumentándole el diámetro, implícitamente se disminuyen las velocidades, reduciendo así las pérdidas de energía debidas a la fricción [11].

Con el cambio de una tubería se hace necesario el análisis hidráulico de la nueva red. Utilizando la Ec. 2.4, se calculará el FES correspondiente a la opción de cambio que se está calificando. El costo de este arreglo de tuberías también se calculará. Finalmente, en la evaluación de esta opción de cambio, como parte de una primera iteración del método, se utiliza la siguiente relación *Beneficio/Costo*:

$$\textit{Beneficio/Costo} = \frac{\frac{\mathrm{FES}_j - \mathrm{FES}_{ref}}{\mathrm{FES}_{ref}}}{\frac{c_j - c_{ref}}{c_{ref}}} \tag{2.7}$$

donde FES_j es el factor correspondiente a la red cuyo funcionamiento se está evaluando, análisis motivado por el cambio en su tubería j; FES_{ref} es un factor de referencia, que por tratarse de la primera iteración, es el FES relacionado con el funcionamiento de la red original; c_j es el costo del arreglo de tuberías, incluido el cambio del tubo j; c_{ref} es el costo de referencia, que en la primera iteración es igual al costo del arreglo original.

Se continúa con la determinación de relaciones *Beneficio/Costo*, cada valor asociado con el funcionamiento de una red modificada, respecto al arreglo original, por el aumento en diámetro de un solo conducto. Como ya se mencionó, el orden en que se analizan las opciones de cambio en cada conducto está dictado por la prioridad establecida con los coeficientes R_j. El final de la primera iteración ocurre cuando se han estudiado todas las opciones de cambio, es decir, cuando se obtengan tantas relaciones *Beneficio/Costo* como tubos en la red (cada relación asociada con el cambio de una tubería).

La red con mayor relación *Beneficio/Costo* se considera como sistema de referencia para la siguiente iteración, tanto en costo como en factor de eficiencia (FES). Hasta este momento se incrementó el diámetro de uno de los conductos de la red original, de ahí que esta nueva red funcionará como referencia para la siguiente iteración. Del funcionamiento hidráulico de la red de referencia se calcularán los coeficientes $R_{j,}$ estableciendo así el orden en que se analizarán las opciones de cambio para la segunda iteración.

La solución propuesta por este método se alcanza cuando la red, modificada en algunos de sus diámetros, es capaz de suministrar el gasto demandado en cada uno de los nudos que la integran (FES igual al 100%).

El resultado que este método entrega es un arreglo económico, aunque se deriva de una búsqueda limitada. El problema radica en que la sustitución de tuberías, una por una, siempre está condicionada por el funcionamiento de un sistema de referencia. Ahora, debido a que el método utiliza la relación *Beneficio/Costo* como índice definitivo en la elección del tubo a modificar, el objetivo principal en cada iteración es la búsqueda de diámetros que provoquen un máximo FES, aunque esto implique un costo importante. Hecha la primera modificación, el método continúa bajo la misma filosofía de integrar una tubería costosa, que provoque un FES máximo, y permita obtener la mayor relación *Beneficio/Costo*. Por ejemplo, el algoritmo promueve el reemplazo de tubos que provoquen relaciones *Beneficio/Costo* mayores a uno, ignorando opciones donde la relación sea menor a la unidad, pero la magnitud de la diferencia tienda a cero. Si así lo hiciera, es posible que al paso de algunas iteraciones se encontraran opciones de cambio que cumplan con las demandas, sin caer en excesos de carga de presión y costo en la inversión.

2.4 UN ÍNDICE DE IMPORTANCIA COMO CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN

En el trabajo de Arulraj *et al.* (1995) se introduce el concepto de índice de importancia, utilizado como criterio de optimización para rahabilitar redes de distribución de agua. El índice está defiido como sigue:

$$SI = \frac{LQ}{CD} \tag{2.8}$$

donde L es la longitud de un conducto, en metros; Q es el gasto en la tubería, en $\frac{m^3}{s}$; D es el diámetro del tubo, en metros; y C es el coeficiente de la ecuación propuesta por Hazen-Williams para determinar pérdidas de energía en las conducciones.

Así mismo, se define como tubería crítica de una red a aquel conducto que, al aumentar en diámetro o coeficiente C, permite un incremento máximo en la carga de presión sobre los nudos del sistema [2]. Entonces, con la modificación de una tubería crítica en una red se tendría lo siguiente:

$$\sum_{i=1}^{N} (h_i - h_{ir}) \text{ es un máximo} \tag{2.9}$$

siendo $h_i - h_{ir}$ la diferencia entre cargas de presión en el nudo i, antes y después de la modificación de una tubería crítica.

De acuerdo con lo anterior, para obtener un incremento máximo en las cargas, la modificación de tuberías críticas resulta esencial. El método que se está describiendo sugiere el empleo del índice SI como identifiador de tuberías críticas. La modificación progresiva de los conductos se llevará a cabo de acuerdo con los pasos siguientes:

- 1. Realizar el análisis hidráuilico de la red existente bajo la solicitación del gasto máximo diario. Si el funcionamiento en estas condiciones es adecuado, las demandas y cargas de presión requeridas en condiciones menos desfavorables también se cumplirán.

- 2. Calcular índices SI para todos los tubos. El tubo crítico es aquel para el cual se obtiene el máximo SI.
- 3. Estimar el costo que implique el reemplazo de una tubería crítica (costo por incrementar el diámetro o disminuir la rugosidad).
- 4. Si el costo calculado es menor que el capital disponible, entonces proceder al reemplazo de la tubería. Bajo estas condiciones, realizar una nuevo análisis hidráulico para averiguar si los requerimientos son cubiertos.
- 5. Si las cargas en los nudos todavía no son satisfactorias, repetir los pasos 2 a 4 con la red modificada. Esto continúa hasta que los requerimientos hidráulicos son satisfechos.

Como conclusión de su trabajo, Arulraj y Rao (1995) reconocen que el método presentado es muy simple, pues no pretenden determinar el arreglo óptimo, sino proponer rápidamente una solución satisfactoria. Esto sí se logra, pues al utilizar el índice SI se modifican primero las tuberías encargadas de distribuir un mayor caudal; además, de acuerdo con la posición que guardan el coeficiente C y el diámetro D en la Ec. 2.8, se mejoran las condiciones de los tubos con mayor rugosidad y/o menor diámetro. El inconveniente de la solución es su costo, consecuencia de la modificación de tuberías críticas que generalmente implican una inversión grande.

2.5 LA TRANSMISIÓN DE LA CULTURA EN LOS ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN

En las secciones de este capítulo se han presentado algunas metodologías útiles en la identificación de los diámetros requeridos por las tuberías de una red, con miras a la satisfacción de las demandas, a un bajo costo. Sin embargo, los resultados que pueden ofrecer estas herramientas son limitados, esto debido a que su búsqueda en el espacio de soluciones no es exhaustiva. Con la intención de encontrar la solución más económica al problema planteado, Eusuff *et al.* (2003) proponen un método apoyado en el concepto *meme,* introducido por Richard Dawkins en 1976. Así pues, sugieren una búsqueda basada en la transmisión de la información y habilidades que posee una alternativa como solución del problema, analogía con el desarrollo y difusión de la cultura en una sociedad con objetivos definidos.

El método que se describirá enseguida está relacionado con la siguiente idea: El objetivo principal de una rana que habita en un pantano es posarse sobre la roca más cercana a la mayor cantidad de comida. Para lograrlo tendrá que acercarse estratégicamente, y lo hará de acuerdo con la información que recibida de otras ranas que habitan el mismo sector del pantano. Como es cuestión de tiempo para que esta información se transmita hasta el lugar habitado por las ranas más alejadas del objetivo, será importante que nuestro individuo logre su cometido a la brevedad, pues otro grupo de ranas estarán en camino del lugar referido para saciar su hambre.

Ahora se definirán tres conceptos importantes:

- Meme. Es la unidad mínima de transmisión de la herencia cultural. En el método de optimización se refiere a la ubicación temporal de una rana, que referido al problema de tuberías, es una combinación de diámetros que puede considerarse como alternativa de solución.

- Memotipo. Es cada uno de los diámetros que conforman un meme. Durante el algoritmo se codifican y decodifican de manera conveniente.

- Memeplex. Es un conjunto de memes, que siendo parte de una población de ranas virtuales, intercambian la información de que disponen.

Para comenzar se genera una población de ranas virtuales (memes). Los memes se obtendrán de manera aleatoria, pero utilizando diámetros comerciales dispuestos como candidatos. Se analizará el funcionamiento hidráulico de las redes generadas, determinándose el costo total de cada una de ellas. Este valor se calcula como la suma del costo de las tuberías que constituyen un sistema, más un costo de penalización cuando la red no cumpla con las cargas de presión requeridas. Por último, y con base en la información disponible, las cualidades de los memes se califican (aptitudes). La aptitud se define como el recíproco del costo total; de ahí que las redes con menor costo total son mejores soluciones al problema.

Luego de calificar los memes iniciales, estos se organizarán de manera decreciente en aptitud (arreglo X). El arreglo se particionará en m memeplexes Y, cada uno formado por n ranas; por ejemplo, para $m = 3$, la mejor rana del arreglo X formará parte del memeplex Y^1, la segunda mejor rana irá al memeplex Y^2, la tercer rana del arreglo X será parte del memeplex Y^3, la cuarta mejor rana se integrará al memeplex Y^1, etc. La rana con mejores características del arreglo X es el elemento que encabeza la lista del memeplex Y^1; esta solución se llamará Dx.

La evolución de cada memeplex es independiente; la manera en que ocurre se comenta enseguida:

- 1. Elegir, aleatoriamente, q de las n ranas de un memeplex. El método sugiere una selección tal que las ranas con mejor aptitud tengan mayor probabilidad de resultar elegidas. Las q ranas formarán un arreglo Z o submemeplex.

- 2. El ranas del submemeplex se organizarán de manera decreciente conforme a su aptitud. La intencion de este nuevo arreglo es comparar los diámetros de las ranas mejor y peor evaluadas de Z (DS_B y DS_W).

- 3. Como resultado de la comparación se propondrá un incremento de magnitud en los diámetros DS_W. Si las medidas propuestas son diámetros candidatos, calcular la aptitud correspondiente a este arreglo (de otra manera ir al paso 4). Si la aptitud mejoró, sustituir a DS_W por el nuevo arreglo e ir al paso 6. De otro modo, continuar con el paso 4.

- 4. Dado que el paso 3 no produjo una mejor solución, entonces se probará incrementar los diámetros de la peor rana tomando como base la diferencia entre DS_W y Dx. Si los incrementos generan diámetros candidatos, calcular la aptitud de este arreglo (de otro modo ir al paso 5). Si la aptitud mejoró, sustituir DS_W por el nuevo arreglo e ir al paso 6. En caso contrario, continuar con el paso 5.

- 5. En vista de que no fue posible mejorar las condiciones de DS_W, su intervención como elemento de búsqueda es frenada. El elemento es señalado como defectuosos y se remplaza por otra rana de mejor aptitud, elegida de manera aleatoria.

- 6. Después de mejorar las características del peor elemento del submemeplex analizado, el arreglo Z tomará la posición que le corresponde dentro del memeplex Y estudiado; es decir, los memes del memeplex modificado se reacomodarán de manera decreciente respecto a su aptitud.

- 7. Se repiten los pasos 1 a 6, tantas veces como el usuario del método lo considere conveniente.

Debido a que la población de ranas X está formada por m memeplexes, para cada uno de ellos habrá que reperir el procedimiento de 7 pasos descrito. Cuando todos los memeplexes han evolucionado, es momento de que compartan la información que cultivaron de manera independiente. Las ranas se acomodarán en un nuevo arreglo X (de manera decreciente conforme su aptitud), se formarán nuevos memeplexes, se distinguirá a la rana Dx, y la evolución continuará hasta que se satisfaga un criterio. En el método propuesto por Eusuff *et al.* (2003) se aplican dos criterios: 1) cuando el intercambio de información entre memeplexes se realizó un número determinado de ocasiones, y 2) cuando la rana Dx no mejora con el intercambio de información entre memeplexes, de manera repetitiva.

De acuerdo con los autores de la metodología descrita en esta sección, el uso correcto del algoritmo ofrece soluciones satisfactorias a ciertos problemas de diseño y rehabilitación. En el mismo texto donde presentan su método, Eusuff y Lansey también muestran los resultados que obtuvieron al enfrentar ejemplos ampliamente discutidos en la literatura especializada (red de Alperivits y Shamir, la red Hanoi presentada por Fujiwara y Khang, y la red de la ciudad de Nueva York descrita por Schaake y Lai). El logro que manifiestan es haber encontrado soluciones conocidas por trabajos previos, pero requiriendo un número reducido de evaluaciones. Por otro lado, admiten que su algotirmo necesita una cantidad importante de parámetros dependientes del problema que se quiera resolver. Finalmente, manifiestan que el método es sensible tanto al número de memeplexes como al número de ranas por memeplex; en otras palabras, al incrementar uno de los parámetros mejora la probabilidad de encontrar la solución óptima, aunque esto demande una mayor cantidad de evaluaciones.

2.6 EMPLEO DE UN ALGORITMO GENÉTICO

El método presentado en esta tesis permite identificar el conjunto de tuberías a sustituir en una red ineficiente; la intención es incrementar la carga de presión en los nudos con déficit de gasto, a un bajo costo. Se utiliza un *Algoritmo Genético Simple* (AGS), que siendo un procedimiento cimentado en analogías sobre la naturaleza y evolución de los seres vivos, tiene por objetivo la optimización de funciones sujetas a restricciones.

Los fundamentos teóricos de los algoritmos genéticos fueron planteados por Holland en 1975 [20]. El procedimiento consiste en la progresiva modificación de las características de cierta población de individuos o soluciones alternativas a un problema en estudio. Los seres vivos se distinguen por algunos aspectos que los hacen únicos, detalles adquiridos vía herencia genética, así como por la interacción con el medio al que están expuestos. Dependiendo de sus cualidades, un individuo será más o menos apto para desenvolverse en su propio ambiente, y bajo ciertas condiciones, dejar una huella de su talento al relacionarse con otro elemento también adaptado a las circunstancias que lo exigen. Como resultado puede obtenerse un nuevo individuo que esté integrado por la combinación de las características de sus progenitores. Es de esperarse que el nuevo elemento manifieste un desempeño satisfactorio al formar parte de una generación posterior. Entonces, con el reemplazo total de individuos entre generaciones, las mejores características prevalecen dando lugar a nuevos elementos cuyo alto nivel de adaptación los señala como soluciones próximas a la óptima de un problema.

Los algoritmos genéticos exigen, para su correcta aplicación, una representación o codificación adecuada del problema por analizar. Además, para evaluar de manera objetiva el desempeño de los individuos como soluciones generadas, también es necesario un modelo matemático denominado *función de aptitud*.

El objetivo principal del método es determinar las tuberías que conviene sustituir por otras de diferente diámetro para incrementar las cargas en los nudos de una red. Entonces, la codificación del problema consiste en la asignación de un número binario a cada uno de los diámetros elegibles para sustitución (diámetros comerciales). Realizado lo anterior, se procede a generar la población inicial. Esta población está constituida por un grupo de individuos tan grande como la complejidad o magnitud de la red lo amerite. Cada individuo representa fielmente las características de una red propuesta (diámetros), y es analizada para determinar su funcionamiento hidráulico y conocer su aptitud.

Una vez que se ha conformado la población inicial, se realiza el análisis hidráulico de cada individuo. La magnitud de la carga de presión en los nudos es el parámetro para discriminar si la demanda se satisface completamente o no. La aptitud de cada individuo se califica considerando dos parámetros, la entrega con al menos 10 m de carga en todos los nudos, y los costos que implican la sustitución de tuberías en la red original. Lo anterior señala a los individuos que poseen las mejores cualidades para la entrega de los gastos solicitados con mínimos costos. A partir de la población inicial, identificada como la primera generación, se elige de manera aleatoria a los individuos que han de *reproducirse* para formar la segunda generación. La selección de los individuos se realiza aplicando un método basado en una "ruleta proporcional", por lo que los individuos con mejor aptitud tienen mayor probabilidad de resultar elegidos.

Los individuos seleccionados para reproducción se ordenan formando parejas que intercambiarán información o se cruzarán. El operador de cruza sirve para establecer los diámetros que serán intercambiados entre las parejas, y que darán lugar a los nuevos individuos (dos por pareja). Los individuos que no resulten seleccionados para cruza se tomarán en cuenta para aplicarles un operador de mutación.

Es importante advertir que en la naturaleza suelen aparecer individuos que han sufrido alteraciones en la estructura de su material genético, y por lo tanto, poseen características impropias de los seres que los procrearon. Para considerar esta situación, los individuos generados con el operador de cruza se ven afectados por un operador de mutación, mismo que modifica ciertos diámetros de un individuo seleccionado para este efecto.

Finalmente, cuando el operador de mutación termine de modificar las caractetísticas de los individuos seleccionados para mutar, la segunda generación estará en condiciones de ser analizada. El proceso hasta ahora descrito se repite; es decir, se resuelven las redes de la segunda generación, se calculan las aptitudes correspondientes, y se procede a seleccionar elementos para cruza y mutación de individuos. El algoritmo se detiene cuando se analizó un número de generaciones suficientemente grande. La solución, próxima a la óptima del problema, es el individuo que alcanzó la mayor aptitud al paso de las generaciones.

Capítulo 3

LA REHABILITACIÓN DE REDES BASADA EN UN ALGORITMO GENÉTICO

De acuerdo con lo presentado en el capítulo sobre análisis de redes, con la solución de un sistema de tuberías se determinan el flujo o gasto que circula por los conductos, así como las cargas de presión que imperarían en los nudos de una red propuesta. Para el caso de una red que distribuye y entrega agua, se considera que la satisfacción total de la demanda ocurre cuando la carga de presión en cada nudo de entrega supera un valor determinado. En este trabajo de tesis se estableció a 10 m como la carga mínima a superar, esperando así poder entregar el agua en un depósito ubicado sobre la parte alta de una edificación de dos niveles, por ejemplo.

Aunque la metodología propuesta por Fuentes *et al.* (1991) permite resolver redes de tuberías evaluando pérdidas de energía locales (ampliación y reducción de diámetros, cambios de dirección, bifurcaciones, válvulas, etc), en esta tesis se rehabilitaron redes cuyas pérdidas de energía se deben únicamente a la fricción en las paredes de sus tubos.

En lo que se refiere al gasto, al diseñar una red se espera que el sistema sea capaz de abastecer las demandas de un conjunto de personas. El número de individuos que serán beneficiados se estima a partir de una proyección del crecimiento de la población en el sitio particular. Luego entonces, una vez que la cantidad de personas calculada en la proyección es superada, no es posible entregar la cantidad de agua que toda la población requiere. En los ejemplos numéricos que se estudiarán, el nivel de agua en los tanques de alimentación se supondrá constante, por lo que la demanda de agua se puede satisfacer cuando los conductos son adecuados. El gasto entregado a los usuarios se estima con la ecuación general de orificios, y la demanda se considera satisfecha si la carga de presión en los nudos emisores supera el valor mínimo de 10 m.

En lo sucesivo, *se considera rehabilitada a la red* que cumple los requerimientos mínimos de carga de presión en sus nudos, condición alcanzada al modificar el diámetro de algunos de sus conductos. La rehabilitación comienza por la codificación del problema. Inicialmente se define la cantidad de diámetros comerciales que se considerarán para sustitución (candidatos). Esta cantidad, siendo un entero positivo, se elige de modo que resulte igual a una potencia de 2. Posteriormente, a cada candidato se le asigna un número natural para identificarlo durante la ejecución del algoritmo (en orden creciente, a partir de la unidad). Finalmente, los números naturales se codifican en sistema binario.

3.1 GENERACIÓN DE LA POBLACIÓN INICIAL

Tras la codificación de los diámetros se procede a formar la población inicial. El número de individuos que conforman esta población depende de cuán exhaustivo sea el rastreo que el usuario del método pretenda realizar. Se consideran las características propias de cada problema, lo que condiciona al número de posibles soluciones. En el caso de rehabilitación, el número de soluciones es una fracción del total de combinaciones entre el número de tubos que pueden modificarse, y el número de diámetros comerciales considerados para sustitución.

Una característica importante de un individuo es la longitud de la cadena cromosómica que lo representa (lc). Esta longitud se define como el producto del número de tuberías que pueden sustituirse por la precisión. En este caso, la precisión se refiere al número de dígitos necesarios para la codificación, en sistema binario, de la cantidad de diámetros comerciales para sustitución.

Cada individuo de la población inicial se obtiene generando tantos números aleatorios como la longitud del cromosoma. Estos números se consideran de la siguiente manera: se designa como 0 al aleatorio que resulte menor que 0.5, y se considera como 1 al aleatorio que resulte mayor o igual que 0.5. Entonces, una cadena cromosómica contiene la información de un individuo al componerse de lc dígitos binarios que, de manera ordenada, representan a los números naturales utilizados en la codificación de los diámetros comerciales.

3.2 EVALUACIÓN DE LA APTITUD DE INDIVIDUOS

Una vez que se cuenta con la población inicial se procede al cálculo de la aptitud de los individuos que la conforman. Para lograrlo, se lleva a cabo la revisión hidráulica de las redes apenas generadas. En esta etapa se determinan las cargas piezométricas en los nudos con demanda, así como el costo total de las tuberías que deban sustituirse para modificar la red original e igualarla con una red simulada numéricamente. Esta evaluación se hace para cada una de las redes, y la aptitud de cada individuo es un número real no negativo que se obtiene bajo las siguientes consideraciones:

- La rehabilitación de la red original, mediante el cambio de tramos de tubería, permite que el flujo de agua se desarrolle sin pérdidas que imposibiliten el cumplimiento de una carga de presión mínima en los puntos de demanda.

- El costo debido a la sustitución de tuberías de la red original debe ser tan bajo como la disponibilidad de diámetros comerciales lo permita.

La evaluación de un individuo comienza con la solución de la red de tuberías que representa. Conocidas sus condiciones hidráulicas se calcula un número denominado *sh*. Éste es el resultado de una suma que depende de las cargas de presión y las demandas en los nudos. Para obtener *sh* sólo se consideran aquellos nudos que cumplen con la carga mínima de presión. El criterio es el siguiente:

- El número *sh* es menor cuando la carga mínima es superada ampliamente; es decir, la carga de presión es excesiva. Adicionalmente, *sh* disminuye cuando la demanda en el nudo con carga excesiva es más grande.

La manera en que se calcula la aptitud de un individuo depende del número de nudos que no cumplen con la carga mínima de presión. Se tienen dos posibilidades:

- Cuando el individuo no cumple con los requerimientos de carga en todos sus nudos, la evaluación que se le asigna depende de la aptitud media de la generación anterior a la que pertenece, y del número de nudos con baja carga que existan en su sistema.

- Una red que cumple con los requerimientos de carga en todos sus nudos se evalúa considerando el número *sh* que le corresponde, y el costo por sustitución de tuberías que requiere. Para que un incremento en el costo por sustituciones afecte negativamente a la aptitud, éste aparece en el denominador de un número racional que se aplica como exponente del valor *sh* correspondiente. El resultado así obtenido se considera como la aptitud de la red estudiada (SA).

La **función de aptitud** propuesta en este trabajo de tesis se describe a continuación:

sh = 0

sh2 = 0

En cada nudo con demanda

Si la carga de presión es mayor que la carga de presión mínima requerida ($h_i > h_{\min}$)

sh = sh + A - (q_i) (h_i - $h_{\min}$)

De otra manera, contar el número de nudos con déficit de carga (sh2)

sh2 = sh2 + 1

Concluye el ciclo (suma), con la determinación de un valor sh

Si sh $\leqslant$ 0 entonces sh = 0

Si sh2 $\geqslant$ 1 entonces SA = $\left(\frac{\mathrm{S}}{\mathrm{NI}}\right)\left(\frac{1}{\mathrm{sh2}}\right)$

Si sh2 = 0 entonces SA = sh ^ $\left(\frac{\mathrm{B}}{\mathrm{SCO}}\right)$

Como puede observarse, en el cálculo de la aptitud se involucra un conjunto de variables y constantes. Los valores de estos elementos se definen considerando los siguientes aspectos:

- Constante A. Es un número entero positivo al cual se le restará una cantidad relacionada con el gasto solicitado y la carga excedente en los nudos con demanda. Elíjase A de modo que la resta no sea un número negativo; pueden utilizarse cantidades como 1, 10, 100, 1000, etc. En caso de que el valor final de sh resulte negativo, la función de aptitud considerará que sh es igual a cero.

- Constante B. De acuerdo con la postura que el costo por sustitución de tuberías guarda en la función de aptitud, los mejores individuos implican un costo bajo. Una buena opción consiste en igualar a la constante B con el costo de una solución calculada previamente en un procedimiento de prueba y error. De esta manera, cuando se analicen individuos con un costo similar o menor a B, dichas soluciones tendrán un incremento importante en su aptitud.

- Variable $\left(\frac{\mathrm{S}}{\mathrm{NI}}\right)$. Es la aptitud media de la generación anterior a la que se está evaluando. Cabe señalar que esta variable es igual a cero durante la evaluación de los individuos de la primera generación. Si ningún individuo de dicha generación cumple con la carga mínima en todos sus nudos, entonces la aptitud media de la primera generación resultará igual a cero. Como esta posibilidad existe, y es un inconveniente en los cálculos que el programa realiza para la selección de los individuos que formarán parte de la generación siguiente (ruleta proporcional), en estos casos conviene sumar a la variable $\left(\frac{\mathrm{S}}{\mathrm{NI}}\right)$ un número pequeño, por ejemplo $1{\times}10^{-6}$. Este artificio permitirá que la segunda generación se desarrolle y, eventualmente, se generen individuos que sí cumplan con la carga mínima en todos sus nudos.

- Variable SCO. Para que el comportamiento de la red original sea el mismo que el de una red con igual disposición de tuberías pero con diferentes diámetros, es necesario adquirir un conjunto de tubos cuyo costo total es igual a SCO.

3.3 SELECCIÓN DE INDIVIDUOS PARA CRUZA

Conocida la aptitud de los individuos de la población inicial, se seleccionan las redes que formarán parejas para reproducirse y crear nuevos elementos. El método utilizado promueve una selección proporcional, pues de manera aleatoria se eligen individuos representados como la porción de una ruleta. Así pues, hay que partir de una concepción gráfica circular en donde la suma de las aptitudes obtenidas se representa como el área total de un círculo.

Se genera un número aleatorio por cada individuo de la población. El número aleatorio sirve para seleccionar un individuo de acuerdo con su ubicación dentro la ruleta. En otras palabras, la ubicación del número aleatorio sobre la ruleta se define al sumar, de manera ordenada, las aptitudes de los individuos representados como porciones de ruleta.

Resulta válido destacar que un individuo puede ser elegido para cruza en más de una ocasión, durante la selección proporcional; esto depende de la porción de ruleta que le corresponde (su aptitud).

3.4 CRUZA DE INDIVIDUOS

Los elementos recién seleccionados formarán parejas. De acuerdo con el orden en el que fueron seleccionados por la ruleta, los individuos impares se relacionarán con los pares adyacentes. Nótese que cuando el número de individuos de una población es impar, el último individuo seleccionado por la ruleta no tendrá pareja, y en tal caso, dicho elemento formará parte automáticamente de la siguiente generación. Esta es la razón por la que se sugiere trabajar con un número de generaciones par.

Antes de aplicar el operador de cruza, decídase sobre cuáles parejas éste ha de influir. La probabilidad de cruza se encuentra entre 0.6 y 1.0, dependiendo del problema por optimizar. Así, por cada pareja se genera un número aleatorio y se concluye lo siguiente: si el número es menor o igual que la probabilidad de cruza que se haya fijado para cierto problema de rehabilitación, entonces el operador se aplica sobre la pareja correspondiente; en caso contrario, el operador de cruza no afecta a la pareja de individuos.

El operador de cruza se aplica de esta manera:

- Genérese un número aleatorio por cada pareja. Inmediatamente después, obténgase un número entero al redondear el producto del número aleatorio generado por la longitud del cromosoma. El número entero servirá para ubicar el punto de cruza, es decir, el lugar donde cada cadena cromosómica se romperá en dos partes.

- El primer descendiente estará constituido por la parte del cromosoma que se ubica a la izquierda del punto de cruza del primer padre, y de la parte del cromosoma a la derecha del punto de cruza del segundo padre. El segundo descendiente se formará con las partes de cromosoma aún disponibles de sus progenitores.

3.5 MUTACIÓN DE INDIVIDUOS

La mutación de un individuo consiste en la modificación de algunos de sus diámetros. El operador de mutación funciona de la siguiente manera:

- Para cada individuo obtenido con el operador de cruza (incluidos los que formaron pareja y no se cruzaron), generar tantos números aleatorios como dígitos integren una cadena cromosómica. Recuérdese que cada diámetro comercial de una red está representado por un conjunto de dígitos del sistema de numeración binario.
- Los números aleatorios sirven para decidir si los dígitos de un cromosoma mutarán (0 por 1 ó viceversa). Como cada número aleatorio se relaciona con un sólo dígito, cuando el aleatorio resulte menor que cierta probabilidad de mutación que se haya fijado, el dígito en cuestión mutará. Para que la información genética no se altere de manera radical, la probabilidad de mutación es baja, del orden de 0.03.

3.6 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

En el momento que concluye el proceso de mutación, los individuos formados son la segunda generación. Como se mencionó, la metodología se repite hasta finalizar el analisis de una gran cantidad de generaciones. La solución del problema, próxima a la óptima, es la red que obtuvo la mayor aptitud durante la ejecución del algoritmo. Nótese que la naturaleza aleatoria del método no permite asegurar que el mejor individuo de la última generación analizada sea exactamente el individuo que obtuvo la mayor aptitud al paso de las generaciones. Es por esto que resulta importante llevar un registro del mejor individuo identificado durante el desarrollo del procedimiento descrito.

3.6.1 CÓDIGO NUMÉRICO

El algoritmo descrito en las secciones anteriores de este capítulo fue programado en lenguaje BASIC por el Dr. Óscar Fuentes [9]. Para utilizar dicha herramienta es necesario contar con la siguiente información:

- Disposición de las tuberías que conforman la red.
- Las características de las tuberías, incluyendo diámetros, longitudes y rugosidades.
- Las demandas puntuales solicitadas en los nudos de la red.
- Los niveles o cotas del terreno en los nudos del sistema.
- Ubicación y nivel de los tanques para la satisfacción de las demandas.
- Los diámetros comerciales candidatos para la sustitución de tuberías.
- Carga de presión mínima para que el gasto entregado sea igual al demandado.

3.6.2 RESTAURACIÓN DE UNA RED DEFICIENTE

La comparación entre la red original de tuberías con funcionamiento deficiente y la red obtenida como solución del algoritmo genético permite identificar los conductos que se deberán sustituir. Sin embargo, como los recursos económicos generalmente son escasos, conviene establecer un orden o secuencia óptima para el reemplazo de las tuberías. En virtud de satisfacer la demanda requerida por la mayoría de los beneficiarios de una misma red, se pueden considerar las relaciones entre los beneficios ganados y los costos generados por la sustitución de una o varias tuberías (combinaciones en el orden de instalación de tubos) [10]. El *Beneficio* se define ahora como la diferencia entre el déficit de gasto en la red original y el déficit que pudiera subsistir tras el reemplazo de algunos conductos. Desde luego, al concluir los trabajos de rehabilitación se cumplirá con el total de la demanda.

Para satisfacer en corto plazo la demanda solicitada por el mayor número de beneficiarios, es útil determinar cuáles sustituciones provocan un incremento de carga más generalizado sobre el sistema. Para este propósito es importante estimar el gasto suministrado en los nudos emisores. Si el gasto emitido a través de un nudo se estima con la ecuación general de los orificios, entonces para cada nudo existe un factor de gasto como el de la expresión 2.5. El déficit o gasto que no se entrega en el nudo i se calculará con la siguiente ecuación:

$$q_f = (1 - F_q)(q_i) \tag{3.1}$$

Como principio, conviene estudiar los cambios que presenta el funcionamiento hidráulico de la red cuando se integran las tuberías sugeridas por el *Algoritmo Genético Simple* (combinaciones en el orden de las sustituciones). De la información obtenida al resolver una red, se calcula el déficit en el suministro proporcionado por dicho sistema. Al final, las relaciones Beneficio/Costo sirven de fundamento para programar los trabajos de sustitución.

A continuación se describe el modo en que las relaciones Beneficio/Costo, (B/C), son tomadas en cuenta para definir el orden de los reemplazos. Este método se incorporó al programa en lenguaje BASIC para rehabilitar redes, desarrollado por el Dr. Óscar Fuentes.

- Primero se establece la tubería que conviene sustituir al final de los trabajos de rehabilitación. Si SVAL es el número de conductos a modificar, primero se define cuál de los tubos es la sustitución número SVAL. Para lograrlo se obtienen las relaciones B/C de las redes con SVAL - 1 sustituciones hechas. En esta etapa se comparan SVAL relaciones B/C. La combinación de tuberías que resulte con mayor B/C está relacionada con la red que mantuvo con su diámetro original al conducto que representa la sustitución número SVAL. Se ha determinado entonces la tubería que conviene sustituir al final. A continuación se procede al cálculo de nuevas relaciones B/C, manteniendo el "tubo sustitución" número SVAL con su diámetro original en los sucesivos análisis de fucionamiento hidráulico.

- Se procede a obtener las relaciones B/C de redes con SVAL - 2 sustituciones hechas. Se comparan las B/C (un total de SVAL - 1 relaciones), encontrando la combinación de tubos con mayor relación. De esta combinación se distingue a la tubería que mantuvo su diámetro original. Este último tubo es la sustitución número SVAL - 1, y en los cálculos sucesivos mantendrá su diámetro original.

- El proceso descrito continúa hasta definir al tubo sustitución número 2, y en ese momento la sustitución número 1 también es identificada.

- Al concluir la instalación de todos los conductos, la demanda en los nudos será satisfecha con una carga de presión igual o superior a los 10 metros.

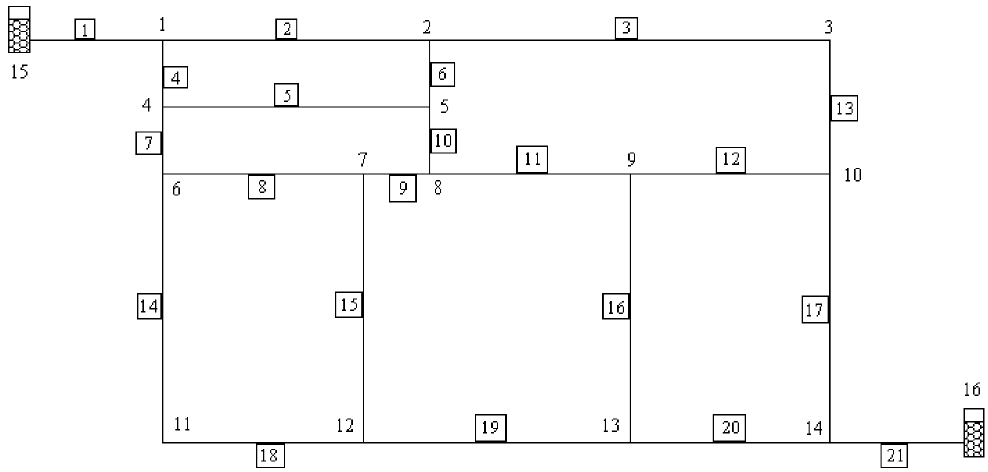
Capítulo 4

EJEMPLOS DE REHABILITACIÓN MEDIANTE UN ALGORITMO GENÉTICO

4.1 EJEMPLO PRIMERO

En el trabajo de Fuentes *et al.* [10] se presenta un ejemplo de rehabilitación para una red que consta de 21 tuberías cuyos diámetros varían entre 2, 2.5, 3, 4 y 6 pulgadas. Se trata de una red cerrada con una longitud total de 3000 m utilizada para distribuir agua proveniente de dos tanques de almacenamiento con carga constante, y satisfacer la demanda de 14 nudos. La Fig. 4-1 muestra la disposición de la red con gasto máximo diario de 22.49 l/s. Nótese que los nudos 15 y 16 representan a los tanques de agua, con carga piezométrica de 74.5 y 72.5 metros, respectivamente.

Los datos correspondientes a los nudos se presentan ahora:



Figura~4-1: Red de tuberías para rehabilitación en ejemplo primero.

Nudo	Elevación [m]	Demanda $\left[\frac{l}{s}\right]$
1	56	0.45
2	45	1.13
3	41	1.35
4	56	0.9
5	47	1.92
6	56	1.39
7	53	1.96

Nudo	Elevación [m]	Demanda $\left[\frac{l}{s}\right]$
8	54	1.46
9	51	3.46
10	48	1.73
11	45	1.06
12	46	2.31
13	49	2.31
14	54	1.06

El análisis hidráulico del sistema por rehabilitar muestra que en los nudos numerados como 7, 8, 9, 10 y 13 no se cumple con la demanda, i.e. la carga de presión en estos puntos es menor a 10 metros. El gasto que no se entrega en cada nudo se calculó con la Ec. 3.1; el déficit en la red original es aproximadamente 2.12 l/s. Las características de los tubos originales y las cargas de presión en los nudos con demanda se muestran en las tablas siguientes.

Tubo	L [m]	D [pulg]	ε [mm]
1	100	6	1.25
2	200	2.5	0.4
3	300	2	0.4
4	50	4	1
5	200	2	0.4
6	50	2	0.4
7	50	3	1
8	150	2.5	0.9
9	50	2	0.8
10	50	2	0.4
11	150	2	0.7

Tubo	L [m]	D [pulg]	ε [mm]
12	150	2	0.7
13	100	2	0.4
14	200	2	0.4
15	200	2	0.4
16	200	2	0.4
17	200	2	0.9
18	150	2	0.4
19	200	2	0.4
20	150	2.5	0.9
21	100	3	1.1

Nudo	h_i [m]
1	17.61
2	18.05
3	15.07
4	15.93
5	14.76
6	12.16
7	7.17

Nudo	h_i [m]
8	5.68
9	4.43
10	8.00
11	14.90
12	12.25
13	9.35
14	11.83

El algoritmo genético se utilizó para resolver el problema planteado. Los diámetros comerciales candidatos considerados fueron cuatro. Los costos y la codificación en sistema binario correspondientes a cada uno de ellos se muestran enseguida.

Diámetro [pulg]	Costo [$ / m]	Binario
2	19.8	00
2.5	29.9	01
3	40.0	10
4	61.1	11

En este caso pueden modificarse 21 conductos en total, y como se necesitan 2 dígitos binarios para representar uno de los cuatro diámetros candidatos, la longitud de una cadena cromosómica es igual a 42. Cabe señalar que el análisis se llevó a cabo de manera que los tubos unidos a un tanque mantienen su diámetro original (tubos 1 y 21). El artificio empleado para este fin consiste en utilizar un sólo diámetro comercial como candidato para dichos tubos (6 y 3 pulgadas según sea el caso). El número de individuos de una generación y la probabilidad de cruza para este ejemplo se consideraron como 60 y 0.7, respectivamente. Se realizaron los intentos necesarios para alcanzar una solución satisfactoria del problema. Una solución adecuada se obtuvo utilizando las siguientes constantes en la función de aptitud:

A	B
100	24000

El individuo con mejores características sugiere la sustitución de tres tuberías, a saber:

Tubo 5.- Cambio de 2 a 3 pulgadas.
Tubo 10.- Cambio de 2 a 4 pulgadas.
Tubo 11.- Cambio de 2 a 3 pulgadas.

Las condiciones hidráulicas del sistema rehabilitado se muestran en las siguientes tablas:

Nudo	h_i [m]
1	17.48
2	20.77
3	21.02
4	15.20
5	17.78
6	12.72
7	11.44
8	10.47
9	11.28
10	14.06
11	17.91
12	16.13
13	13.57
14	13.80

Tubo	Q $\left[\frac{l}{s}\right]$	h_{is} [m]
1	16.72	1.017
2	3.77	7.715
3	1.16	3.750
4	12.51	2.285
5	5.58	6.423
6	1.48	0.992
7	6.03	2.478
8	2.85	4.282
9	0.23	0.033
10	5.13	0.304
11	3.45	2.192

Tubo	Q $\left[\frac{l}{s}\right]$	h_{is} [m]
12	0.35	0.221
13	0.19	0.040
14	1.80	5.813
15	1.12	2.306
16	0.38	0.291
17	1.57	5.744
18	0.74	0.774
19	0.47	0.437
20	3.15	5.231
21	5.77	4.699

Resulta claro que la solución propuesta es satisfactoria porque en cada uno de los nudos con demanda se tiene una carga de presión superior a 10 metros. Es importante señalar que este arreglo es igual al que se reporta en el trabajo de Fuentes *et al.* [10]; sin embargo, la cantidad de generaciones estudiadas para obtener el mismo individuo en aquel trabajo es relativamente alta. Al utilizar la función de aptitud citada en la referencia [10], los autores de ese trabajo informan que requirieron analizar 373 generaciones. Con el modelo sugerido en esta tesis, el mismo resultado se obtuvo a partir de la generación 47.

El procedimiento aplicado no permite asegurar que el resultado encontrado es la solución óptima al problema estudiado, aunque la opción propuesta es económica y concuerda con la conclusión obtenida mediante el empleo de otra función de aptitud. La alternativa de rehabilitación más conveniente se encuentra de manera eventual a consecuencia de un manejo adecuado de la función de aptitud, en particular de la elección del valor de sus constantes. Para el ejemplo que se ha citado, el algoritmo se ejecutó considerando diferentes grupos de constantes. Durante el proceso para mejorar la solución presentada, el mismo individuo aparecía frecuentemente como la mejor alternativa. Lo anterior trae consigo dos conclusiones:

- Dado que la generación de individuos ocurre de manera aleatoria, y la función de aptitud no impide la creación y el análisis hidráulico de alternativa alguna, es razonable pensar que un individuo que repetidamente aparece como solución al problema de rehabilitación es una alternativa próxima a la óptima.

- El procedimiento utilizado para calificar la aptitud de los individuos es adecuado, pues una buena solución se obtuvo con diferentes combinaciones de constantes propuestas. Esto significa que la necesidad de probar distintas constantes en el modelo permite localizar soluciones económicas siguiendo diferentes trayectorias.

Como el objetivo de esta tesis es presentar una metodología para enfrentar el problema de rehabilitación, conviene mostrar los diferentes grupos de constantes probados en la función de aptitud, y para los cuales se encontró que la mejor solución implica un costo de $17,055.

A	B	Generación
100	24000	47
10	20000	56
100	18000	65
10	29000	66
10	21000	88

Una vez que se determinaron los conductos a sustituir, hay que establecer la secuencia de los cambios. Se comienza por definir el tubo sustitución # 3. La tabla siguiente muestra la información necesaria.

Tuberías modificadas	Beneficio $\left[\frac{l}{s}\right]$	Costo [$]	B/C (x 10^{-3})
10 y 11	0.925	9055	0.102
5 y 11	1.623	14000	0.115
5 y 10	1.731	11055	0.156

La mayor relación B/C ocurre con la modificación de los tubos 5 y 10, lo cual significa que estos conductos son los primeros que conviene reemplazar. Por lo tanto, la sustitución # 3 será el tubo 11.

El procedimiento continúa para definir el tubo sustitución # 2. En la siguiente tabla se presenta la información proporcionada por el programa de computadora.

Tuberías modificadas	Beneficio $\left[\frac{l}{s}\right]$	Costo [$]	B/C (x 10^{-3})
5	1.351	8000	0.168
10	0.357	3055	0.116

Dado que la relación B/C más grande se presenta con la modificación del tubo 5, la sustitución # 2 corresponde al tubo 10. Finalmente, resulta claro que la sustitución # 1 es la modificación del tubo 5.

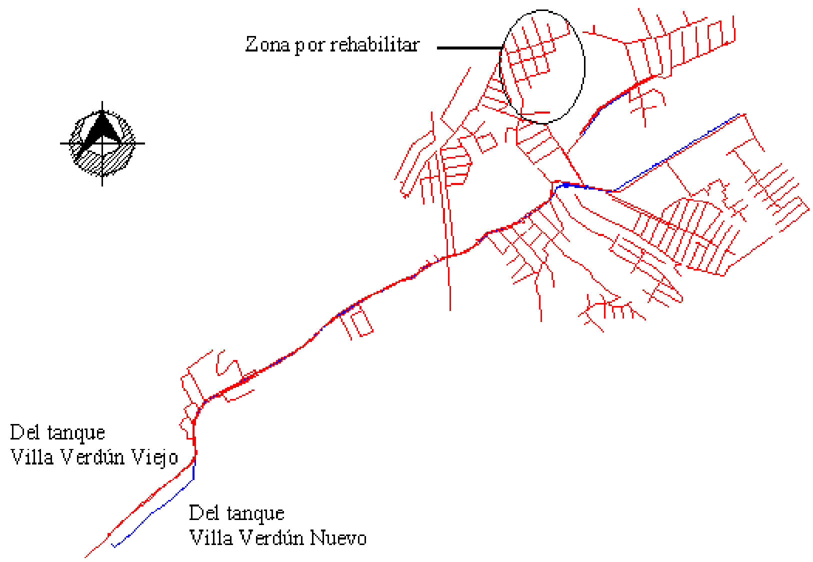
4.1.1 FUNCIONAMIENTO BAJO MÍNIMA DEMANDA

Tomando en cuenta que el gasto demandado por los usuarios de un sistema de agua potable no es constante en el transcurso de un día, es conveniente estimar la carga de presión a la que estarán sometidas las tuberías en un horario de mínima demanda. Las condiciones hidráulicas de la red rehabilitada se calcularon entonces para observar el incremento de la carga de presión en los nudos con demanda, modificación que se espera debido a la disminución del gasto a través de las tuberías. Este efecto es consecuencia de la disminución de la pérdida por fricción en los conductos que ocurre cuando decrece la velocidad del flujo en las tuberías. Se supone que la carga piezométrica en los tanques es la misma que se consideró al resolver la red exigida por el gasto máximo diario.

El funcionamiento bajo mínima demanda se estimó a partir de lo siguiente: la demanda mínima es el 60% del gasto mínimo diario, mismo que a su vez representa el 80% del gasto medio diario. Si el gasto máximo diario es 1.2 veces mayor que el gasto medio diario, entonces las demanda mínima es sólamente el 40% del gasto máximo diario. En estas condiciones, el análisis hidráulico revela que la instalación de tuberías diseñadas para una presión de trabajo mayor a 4 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ será suficiente. Los gastos solicitados, así como las cargas de presión estimadas para el horario de mínima demanda se presentan ahora.

Nudo	Q $\left[\frac{l}{s}\right]$	h_i [m]
1	0.18	18.30
2	0.45	27.70
3	0.54	30.73
4	0.36	17.84
5	0.77	25.50
6	0.56	17.34
7	0.78	19.43

Nudo	Q $\left[\frac{l}{s}\right]$	h_i [m]
8	0.58	18.43
9	1.38	20.84
10	0.69	23.72
11	0.42	27.05
12	0.92	25.81
13	0.92	22.80
14	0.42	18.13



Figura~4-2: Sector AOB14 - Centenario (Región Poniente), México D.F.

4.2 EJEMPLO SEGUNDO

La metodología propuesta es aplicable a la rehabilitación de redes con mayor número de nudos. La Fig. 4-2 presenta la disposición del Sector AOB14 - Centenario (Región Poniente), que forma parte de los trabajos de sectorización en la red de distribución de agua potable del Distrito Federal, en el año 2006. El sector se extiende sobre un área de 2.41 km^2, con una población al año 2000 de 31,770 habitantes. Como la dotación debe ser igual a 225 l/hab/día, los gastos medio y máximo diarios son 83 y 100 l/s, respectivamente. Por último, considerando que la entrega ocurre en 314 nudos (intersecciones entre las tuberías que constituyen al sector), el gasto a suministrar en cada punto se calcula como el cociente del gasto máximo diario entre 314. En efecto, la demanda de los ususarios se satisface con la entrega de 0.32 l/s en cada nudo; es decir, se acepta el análisis simplificado que considera a las demandas ubicadas en los cruces, y no a lo largo de las tuberías, como realmente sucede [16].

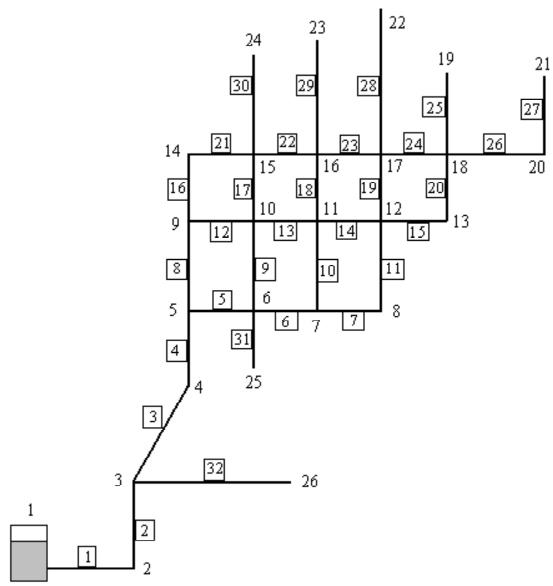
Una manera de resolver un sistema tan grande consiste en fragmentar el sector. Como se trata de redes cerradas, el problema es elegir los conjuntos de nudos que darán lugar a redes más simples, y decidir cuáles nudos se considerarán tanques de almacenamiento (tanques ficticios). La rehabilitación de las redes se realiza de aguas arriba hacia aguas abajo, iniciando por la red que se alimenta con tanques de agua reales. Cuando se ha resuelto el subsector inicial se continúa con su inmediato y se considera que el ingreso de agua a este último ocurre en la ubicación de los nudos que ambos subsectores comparten, pues la carga de presión en tales nudos es conocida. Este proceso continúa hasta rehabilitar todas las redes generadas.

Con carácter meramente demostrativo del procedimiento para rehabilitar redes, se trabajó una parte del Sector AOB14 - Centenario. La Fig. 4-3 muestra la disposición de tubos de la red menor que se analizó. Se trata de un sistema de 1898.88 m de longitud, compuesto por 26 nudos enlazados por 32 tubos de polietileno de alta densidad (ε = 0.0015 mm). Las longitudes y diámetros de los tubos, así como las cotas en los nudos se muestran enseguida.

Tubo	L [m]	D [pulg]
1	6.42	4
2	23.66	4
3	85.95	4
4	57.73	4
5	50.76	2
6	49.20	2
7	50.36	2
8	71.43	4
9	71.04	2
10	70.94	2
11	70.58	2

Tubo	L [m]	D [pulg]
12	50.07	2
13	50.08	2
14	49.82	2
15	50.75	2
16	49.51	2
17	51.20	2
18	50.66	2
19	50.39	2
20	50.62	2
21	50.25	2
22	50.19	2

Tubo	L [m]	D [pulg]
23	49.87	2
24	49.95	2
25	63.98	2
26	75.06	2
27	58.91	2
28	112.74	2
29	88.12	2
30	77.12	2
31	44.32	2
32	117.2	2



Figura~4-3: Red de tuberías para rehabilitación en ejemplo segundo.

Nudo	Cota [m]
1	2500
2	2500
3	2497
4	2494
5	2504
6	2495
7	2479
8	2460
9	2505

Nudo	Cota [m]
10	2500
11	2493
12	2480
13	2463
14	2498
15	2495
16	2492
17	2483
18	2471

Nudo	Cota [m]
19	2476
20	2459
21	2467
22	2473
23	2479
24	2483
25	2483
26	2478

Se resolvió la red de tuberías considerando que la carga piezométrica en el tanque es de 2517 m (nudo 1). Si se considera una carga de presión mínima requerida de 10 m, los diámetros de la red original resultan adecuados, pues inclusive en el nudo más elevado (nudo 9), se tiene una carga de presión igual a 10.59 m. Sin embargo, un incremento en la demanda de agua es factible y en consecuencia resulta de gran importancia estudiar el comportamiento de la red si se le solicitara un gasto de 0.64 l/s en cada nudo, lo cual equivale a duplicar la demanda de diseño. Bajo estas condiciones, las cargas de presión en los nudos con demanda del sistema a rehabilitar son:

Nudo	h_i [m]
1	17.00
2	16.80
3	19.13
4	20.04
5	8.75
6	13.25
7	27.38

Nudo	h_i [m]
8	45.64
9	7.09
10	8.16
11	13.24
12	25.20
13	41.53
14	11.53

Nudo	h_i [m]
15	12.74
16	14.07
17	21.98
18	33.27
19	28.09
20	44.57
21	36.41

Nudo	h_i [m]
22	31.67
23	26.82
24	24.53
25	25.13
26	37.81

De acuerdo con la solución de la red, los nudos más elevados (5, 9 y 10) no cumplen la carga mínima de presión. Mediante la Ec. 3.1 se obtuvieron los gastos no suministrados en los nudos; posteriormente se determinó que el déficit de la red original era aproximadamente igual a 0.21 l/s. El algoritmo genético se aplicó para determinar el grupo de tuberías que convendría sustituir. Los costos y la codificación binaria de los conductos comerciales utilizados como candidatos se presentan ahora:

Diámetro [pulg]	Costo [$ / m]	Binario
2	19.8	00
3	40.0	01
4	61.1	10
6	133.7	11

Como existen 32 conductos que pueden modificarse, la longitud de la cadena cromosómica es 64. El número de individuos de una generación y la probabilidad de cruza utilizados para este ejemplo son, respectivamente, 80 y 0.7. Las constantes aplicables a la función de aptitud que permitieron alcanzar un costo mínimo se presentan ahora:

A	B
100	23000

El mejor individuo se encontró a partir de la generación 54, a un costo de $20,068.37. Cabe señalar que la función de aptitud utilizada para resolver este problema se simplificó. En efecto, dado que el gasto demandado en todos los nudos de la red es el mismo, el valor q_i de la función de aptitud se igualó con la unidad. Los cambios de tuberías sugeridos son los siguientes:

Tubería 1 .- Cambio de 4 a 6 pulgadas.
Tubería 3 .- Cambio de 4 a 6 pulgadas.
Tubería 4 .- Cambio de 4 a 6 pulgadas.

Las condiciones hidráulicas de la red rehabilitada son:

Nudo	h_i [m]
1	17.00
2	16.97
3	19.30
4	22.00
5	11.82
6	16.31
7	30.44

Nudo	h_i [m]
8	48.70
9	10.15
10	11.22
11	16.29
12	28.25
13	44.58
14	14.59

Nudo	h_i [m]
15	15.80
16	17.12
17	25.03
18	36.32
19	31.14
20	47.62
21	39.46

Nudo	h_i [m]
22	34.72
23	29.88
24	27.59
25	28.19
26	37.97

Tubo	Q $\left[\frac{l}{s}\right]$	h_{is} [m]
1	16.00	0.028
2	15.38	0.674
3	14.09	0.297
4	13.45	0.184
5	4.55	4.505
6	2.84	1.876
7	1.66	0.741
8	8.26	0.663
9	0.43	0.097
10	0.54	0.143
11	1.02	0.440

Tubo	Q $\left[\frac{l}{s}\right]$	h_{is} [m]
12	4.25	3.938
13	2.85	1.922
14	2.02	1.038
15	1.57	0.672
16	3.37	2.567
17	1.19	0.416
18	0.72	0.172
19	0.84	0.223
20	0.93	0.266
21	2.73	1.788
22	2.64	1.678

Tubo	Q $\left[\frac{l}{s}\right]$	h_{is} [m]
23	2.08	1.089
24	1.64	0.715
25	0.64	0.177
26	1.28	0.696
27	0.64	0.162
28	0.64	0.311
29	0.64	0.243
30	0.64	0.213
31	0.64	0.123
32	0.64	0.323

Para concluir el ejemplo, hay que establecer la secuencia de los cambios. Primero se define el tubo sustitución # 3. La tabla siguiente muestra los detalles.

Tuberías modificadas	Beneficio $\left[\frac{l}{s}\right]$	Costo [$]	B/C (x 10^{-3})
3 y 4	0.204	19210.02	0.010
1 y 4	0.131	8576.85	0.015
1 y 3	0.173	12349.87	0.014

La mayor relación B/C ocurre cuando se han modificado los tubos 1 y 4, lo cual indica que son éstas las primeras dos tuberías a reemplazar. Entonces, la sustitución # 3 será el tubo 3.

El procedimiento continúa para definir el tubo sustitución # 2. En la tabla siguiente aparecen detalles de la información.

Tuberías modificadas	Beneficio $\left[\frac{l}{s}\right]$	Costo [$]	B/C (x 10^{-3})
1	0.018	858.35	0.021
4	0.115	7718.50	0.014

La relación B/C más grande ocurre al modificar la tubería 1, por lo que la sustitución # 2 corresponde al tubo 4. Por último, la sustitución # 1 es la modificación del tubo 1.

4.2.1 FUNCIONAMIENTO BAJO MÍNIMA DEMANDA

La red rehabilitada se resolvió considerando que el gasto requerido en las horas de mínima demanda, en cada nudo, es igual a 0.26 l/s. Las cargas de presión calculadas se muestran enseguida.

Nudo	h_i [m]
1	17.00
2	16.99
3	19.87
4	22.81
5	12.77
6	20.90
7	36.53
8	55.38
9	11.64

Nudo	h_i [m]
10	15.88
11	22.50
12	35.30
13	52.16
14	18.14
15	20.79
16	23.47
17	32.25
18	44.11

Nudo	h_i [m]
19	39.07
20	55.97
21	47.94
22	42.19
23	36.42
24	32.75
25	32.87
26	38.80

De acuerdo con las cargas de presión obtenidas, será necesario adquirir tuberías diseñadas para una presión de trabajo mayor a 4 $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{cm}^2}$.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

El buen funcionamiento de los sevicios públicos en una sociedad es necesario para el desarrollo adecuado de la vida. Entre estos servicios, la satisfacción de las demandas de agua potable, en cualquier momento del día, es de suma importancia. El diseño de los sistemas de distribución se realiza de modo que las redes de tuberías sean capaces de transportar el gasto demandado en los puntos de entrega, cumpliendo además una carga de presión mínima requerida. Sin embargo, aun cuando los sistemas se diseñen adecuadamente, garantizar el cumplimiento de los requerimientos solicitados por los ususarios, a través de los años, es un compromiso que sólamente se cumple si las condiciones físicas de la red son adecuadas. Así pues, la necesidad de mejorar las condiciones de los sistemas que no satisfacen las demandas que le son solicitadas, utilizando la menor cantidad de recursos económicos, es la motivación principal del trabajo de tesis presentado.

El problema planteado se solucionó al modificar los conductos de una red, buscando incrementar la carga de presión en los nudos donde se concentra la demanda, a un mínimo costo. Para efectos de tesis, el reemplazo de tubos por conductos nuevos de diferente diámetro, fue el mecanismo para mejorar el funcionamiento de un sistema ineficiente.

La cantidad de posibles modificaciones a la red original es muy grande porque depende de la combinación entre tuberías susceptibles de cambio y el número de diámetros comerciales considerados como candidatos para sustitución. No obstante, es importante advertir que sólamente una fracción del espacio total de modificaciones constituye una solución al problema, esto porque una alternativa de solución adecuada debe cumplir las condiciones de carga de presión establecidas. De cualquier manera, como no es factible identificar una combinación como solución sin el análisis hidráulico de la red modificada, resulta necesario explorar el espacio de combinaciones de tubos con la intención de encontrar, a la brevedad, una solución que si no es la óptima en el aspecto económico, sí justifique la inversión con base en el beneficio que se obtendrá con su implantación.

El algoritmo de búsqueda de alternativas para rehabilitar redes fue programado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM hace algún tiempo. El procedimiento se fundamenta en analogías con la naturaleza de la evolución de los seres vivos, buscando optimizar funciones objetivo. Este método promueve la generación de posibles soluciones al problema de rehabilitción planteado, alternativas que son calificadas objetivamente al utilizar una función de aptitud adecuada. Desde luego, los mejores individuos o soluciones son aquellos que cumplen los requerimientos de carga sobre sus nudos, al menor costo de sustitución de tuberías.

El proceso comienza por la codificación de los diámetros candidatos considerados. En este sentido, como los dígitos binarios constituyen el abecedario más simple, la codificación se realiza utilizando este tipo de elementos. El programa de computadora se encarga, mediante una rutina, de generar una serie de números aleatorios que representan los diámetros comerciales del arreglo de tuberías de la red en rehabilitación. Es así como la naturaleza aleatoria de la generación de individuos permite la creación de cualquier alternativa del espacio de búsqueda.

El número de elementos o individuos generados de manera aleatoria lo define el usuario del método. A este respecto, no existe una condición que defina la cantidad de individuos más conveniente para enfrentar un problema determinado; por el contrario, este parámetro se establece de acuerdo con lo exhaustivo del análisis que se pretenda realizar. Por ejemplo, cuando el número de individuos de una generación es relativamente pequeño, el número de soluciones generadas es reducido. En el caso anterior, el algoritmo realiza una búsqueda limitada, y al final del proceso, la solución encontrada es invariablemente un óptimo local.

Los individuos generados se consideran miembros de una primera generación. Como cada individuo es una opción y no una solución, se hace necesario resolver la red de tuberías representada. Para evaluar el funcionamiento hidráulico de cierta alternativa, se utiliza una función de aptitud que toma en cuenta la carga de presión en los nudos de la red, además del costo de los tubos necesarios para igualar las redes original y simulada numéricamente.

La función de aptitud presentada en esta tesis evalúa una alternativa dependiendo del número de nudos que hayan superado la carga mínima de presión requerida por el usuario. De esta manera, sólo cuando las condiciones de presión son satisfechas en todos los puntos de demanda, la evaluación considera los costos por sustitución de tubos. En el caso de los sistemas que tienen uno más nudos con baja carga, la evaluación se realiza de modo que la reproducción de esos elementos se ve frenada. La manera de lograrlo es asignándoles una aptitud relativamente baja, por ejemplo, el valor medio obtenido por los individuos de una generación previa a la del elemento en evaluación. Este artificio resulta satisfactorio porque las características de dichas alternativas no son desechadas, sino que tienen la oportunidad de participar en el proceso de búsqueda.

Para el caso de los individuos que cumplen las condiciones de presión en todos sus nudos, la evaluación depende de dos aspectos, el exceso de carga en la red y el costo por sustitución de conductos. La aptitud se reduce especialmente cuando la carga excesiva ocurre en nudos con mayor demada. En lo que se refiere al costo por sustitución de tuberías, SCO, este valor funciona como denominador del exponente de un número *sh,* obtenido al considerar las presiones en los nudos de la red. Luego entonces, la función ejercida por la variable SCO es diferente a la propuesta común en los artículos especializados del mismo tema, donde el costo es el denominador de un número relacionado con las condiciones de carga de la red. Del resultado obtenido en el primer ejemplo de rehabilitación descrito, se piensa que esta diferencia entre las funciones de aptitud motivó la disparidad entre el número de generaciones analizadas para encontrar una misma solución.

Otro comentario relativo a la función de aptitud propuesta se refiere nuevamente a la manera de evaluar las redes que no cumplen con las condiciones de carga en todos los puntos de entrega. La función que asigna una aptitud igual o menor a la obtenida por una generación anterior a la del elemento evaluado es adecuada y conveniente por los siguientes motivos. En general, las aptitudes medias de dos generaciones sucesivas son similares, siendo útil entonces el considerar al valor medio de la primera de ellas para evaluar a los indiviuos que son su descendencia. Por otra parte, cuando se emplea un valor medio para calificar a los individuos que tienen un solo nudo con carga menor a la requerida, durante el proceso de búsqueda no se presenta el problema de calificar con una aptitud grande a un elemento que implique un costo SCO muy bajo. Esta situación es frecuente si todos los individuos de una generación se califican mediante una misma ecuación. En los artículos sobre algoritmos genéticos es común encontrar funciones de aptitud que castigan el desempeño de redes a través de coeficientes elegidos “convenientemente”, que como productos o sustraendos, dan preferencia a los individuos que son una solución. Resulta claro que el problema es asignar un valor adecuado a tales coeficientes. En la función de aptitud presentada en esta tesis es necesario definir dos constantes, con la diferencia de que estos valores participan como elementos de búsqueda, no como herramientas para restringir la reproducción de elemento alguno.

Conocida la aptitud de la primera generación, se procede a la selección de individuos para constituir una segunda población. La selección se realiza utilizando un método de ruleta proporcional, donde los elementos con mejor aptitud tienen mayor probabilidad de continuar participando en la búsqueda de la alternativa óptima global. Dado que el número de individuos entre generaciones debe mantenerse, los elementos seleccionados por la ruleta se relacionan por parejas e intercambian información. Este artificio se realiza por medio de un operador de cruza, el cual aplica en algunas parejas que resultan seleccionadas para ese fin. La cruza ocurre cuando un número aleatorio, generado especialmente para una pareja, resulta mayor que un índice conocido como probabilidad de cruza. Aunque esta probabilidad la define el usuario dependiendo de su inquietud por analizar diferentes alternativas, basta utilizar un valor del orden de 0.7 porque no frena la reproducción, ni tampoco provoca la pérdida de información ganada con los individuos que han evolucionando de manera adecuada al paso de las generaciones.

Los individuos generados por el operador de cruza se someten a cambios que sobre ellos pueda provocar un operador de mutación. Estas modificaciones benefician a la búsqueda porque las redes sufren variaciones en sus diámetros, mismas que son aleatorias pues no dependen de la aptitud del individuo, y no están relacionadas con las características de sus progenitores. La mutación de cierto diámetro ocurren si un número aleatorio, generado exclusivamente para dicho conducto, es menor que un parámetro denominado probabilidad de mutación. Esta probabilidad es pequeña, del orden de 0.03. De esta manera, las modificaciones permiten explorar el espacio de combinaciones, pero se trata de una búsqueda más bien localizada.

Las redes generadas con el operador de mutación constituyen a la segunda generación de individuos del algoritmo genético. Con estos elementos se repite el procedimiento de evaluar aptitudes, para posteriormente seleccionar a los individuos que se cruzarán y mutarán. El número de generaciones que conviene analizar lo determina el usuario del método, pero estará de acuerdo con el tamaño de la red.

Cabe resaltar la importancia de conocer, durante el proceso de búsqueda, las características de los individuos estudiados al paso de las generaciones. Resulta interesante saber, por ejemplo, el número de nudos con baja carga de una red, la aptitud y el costo del mismo individuo, así como la aptitud media de cada generación analizada. Si en todo momento se conoce esta información, el usuario es testigo de la evolución de los elementos, y puede detener el análisis en una de dos situaciones: cuando la mayoría de las redes de una generación tienen las mismas características, o cuando la mayoría de los individuos no son soluciones practicables. En el primero de los casos se presume que el método encontró una solución óptima, que siendo global o local, se ha reproducido de modo que no permite conocer nuevas alternativas. Por otro lado, cuando la aptitud media de generaciones sucesivas dismunye progresivamente, ha ocurrido que los individuos de aptitud grande son minoría porque comenzaron a desaparecer, cediendo su lugar a redes poco adecuadas.

Teniendo en cuenta lo expresado con anterioridad, se afirma en este momento que el algoritmo genético no asegura la localización de la opción óptima global. Bajo esta premisa, el método debe practicarse repetidamente considerando que existen dos variables en la función de aptitud que pueden modificarse para un análisis diferente. Con la misma intención, es válido modificar el número de individuos de cada generación, además de las probabilidades de cruza y mutación. Funcionando de esta manera, la métodología se convierte en una herramienta sistemática para la búsqueda de opciones en el espacio de combinaciones entre tuberías y diámetros candidatos.

De acuerdo con los resultados del primer ejemplo de rehabilitación, la solución más adecuada se establece cuando el algoritmo ha encontrado el mismo individuo bajo diferentes combinaciones de las constantes apenas referidas. Esta red se compara con el sistema original para establecer los diámetros a modificar, así como los costos por sustitución que implique su puesta a punto.

Una vez que los conductos a reemplazar son conocidos, es muy importante definir el orden más conveniente para los trabajos de sustitución. En este caso se desea mejorar las condiciones del servicio para el mayor número de usuarios, utilizando los recursos económicos disponibles de la mejor manera. Se pensó que las relaciones *Beneficio/Costo* son un buen parámetro para establecer una secuencia adecuada, partiendo de que el *Beneficio* es la diferencia entre el déficit de gasto en la red original y el déficit que subsiste con la modificación de alguna(s) tubería(s). Al comparar las relaciones obtenidas como consecuencia del reemplazo de sólo algunos tubos definidos por el algoritmo genético (combiación entre sustituciones), se define el orden a través del cual la integración de un nuevo conducto siempre signifique la mayor relación *Beneficio/Costo* del sistema.

Para finalizar, se hace la observación de que el programa utilizado para rehabilitar redes carece de una rutina por medio de la cual, al modificar el diámetro de cierto tramo, también se asigne al mismo conducto la rugosidad que le corresponde como pieza nueva. En los ejercicios de rehabilitación presentados se consideró que las rugosidades absolutas en los tramos modificados, eran iguales que las correspondientes a los conductos de la red original deficiente. Como se espera que los tramos adquiridos para rehabilitación sean nuevos, entonces las simulaciones deben realizarse empleando rugosidades menores. No obstante que los resultados son útiles porque al emplear rugosidades excesivas se obtienen diámetros más grandes que los requeridos, resulta conveniente que en trabajos posteriores se integre al programa una rutina que tome en cuenta lo apenas señalado. Con la misma intención, sería positivo que el algoritmo considerara la opción de rehabilitar tuberías modificando las condiciones internas de los conductos existentes, evitando así la sustitución de un tramo completo.

Las conclusiones y comentarios llegan a este punto para dar fin al trabajo de tesis desarrollado. Sólo resta sugerir la puesta en práctica de las metodologías como la aquí presentada, pues resulta claro que es necesario mejorar las condiciones de los servicios prestados a la comunidad, utilizando los recursos económicos que ya se saben limitados. Los métodos pueden mejorarse utilizando de manera más eficiente los recursos tecnológicos disponibles, pero su implantación requiere de un cambio en la cultura de resolver los problemas que a todos atañen.

Bibliografía

[1] Alperovits, E., Shamir, U. Design of optimal water distribution systems. Water Resources Research, Vol. 13, No. 6, AGU, 1977.

[2] Arulraj, G., Rao, H. Concept of significance index for maintenance and design of pipe networks. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 121, No. 11, ASCE, 1995.

[3] Bhave, P. Analysis of flow in water distribution networks. Technomic Publishing Company, Inc., USA, 1991.

[4] Cengel, Y., Boles, M. Termodinámica, Tomo 1. Editorial McGraw-Hill, México, 1996.

[5] César, E. Abastecimiento de agua potable. Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 1991.

[6] Clark, R., Sivaganesan, M., Selvakumar, A., Virendra, S. Cost models for water supply distribution systems. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 128, No. 5, ASCE, 2002.

[7] Domínguez, R., Peña, P. Algoritmo para el diseño óptimo de redes de agua potable. Informe del Instituto de Ingeniería al Departamento del Distrito Federal, UNAM, México, 1983.

[8] Eusuff, M., Lansey, K. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 129, No. 3, ASCE, 2003.

[9] Fuentes, O. Método de detección de fugas empleando un algoritmo genético. Informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 2003.

[10] Fuentes, O., Jiménez, M., de Luna, F., Rosales, I. Metodología para rehabilitar redes de distribución de agua potable. Informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 2004.

[11] Fuentes, O., Rosales, I., de Luna, F. Metodología para rehabilitar redes de distribución de agua potable. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, 2004.

[12] Fuentes, O., Sánchez, J. Actualización de un método para calcular redes de tuberías funcionando a presión en régimen permanente. Revista Ingeniería, Vol. LXI, Num. 4, UNAM, México, 1991.

[13] Hernández, E. Método para la rehabilitación de redes de distribución. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Acatlán, UNAM, México, 2005.

[14] Larock, B., Jeppson, R., Watters, G. Hydraulics of pipeline systems. CRC Press LLC, USA, 2000.

[15] Prasad, T., Park, N. Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 130, No. 1, ASCE, 2004.

[16] Rodríguez, A., Rosales, I., Carrillo, J., Fuentes, O. Cálculo de redes de tuberías y consideraciones sobre los sitios donde egresan los gastos de demanda. Seminario Hispano-Brasileño sobre Planificación, Proyecto y Operación de Redes de Abastecimiento de Agua, SEREA, 2002.

[17] Savic, D., Walters, G. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 123, No. 2, ASCE, 1997.

[18] Schlag, A. Hidráulica. Editorial Limusa - Wiley, México, 1966.

[19] Selvakumar, A., Clark, R., Sivaganesan, M. Cost for water supply distribution system rehabilitation. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 128, No. 4, ASCE, 2002.

[20] Simpson, A., Dandy, G., Murphy, L. Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 120, No. 4, ASCE, 1994.

[21] Sotelo, G. Hidráulica General. Volumen 1. Editorial Limusa, México, 1999.

[22] Swamee, P., Jain, A. Explicit equations for pipe-flow problems. Journal of the Hydraulic Division, Vol. 102, No. HY5, ASCE, 1976.

[23] White, F. Mecánica de Fluidos. Editorial McGraw-Hill, México, 1995.