

Comentarios sobre el diseño fiable de sistemas de distribución de agua

Agustín Matías Sánchez

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Profesor en la Escuela Politécnica de Cáceres. UEx.

RESUMEN

El diseño de menor coste de los sistemas de abastecimiento de agua, es un asunto al que los investigadores hidráulicos han dedicado un gran esfuerzo. Aunque su aplicación práctica es muy reducida, debido a la complejidad de las metodologías empleadas y a sus limitaciones. Un comportamiento más flexible de las redes se obtiene aplicando el concepto todavía borroso de fiabilidad. Pero su aplicación incrementa la dificultad para la resolución del problema de diseño. Nuevas formulaciones serán necesarias para conseguir una aplicación práctica.

ABSTRACT

Least cost design of water supply systems is an area to which hydraulic researchers have dedicated a great effort. Although their practical application is very reduced due to the complexity of the employed methodologies and their limitations. A more flexible behavior of the networks can be obtained by applying the fuzzy concept of reliability. But its application increases difficulty for the solution of the design problem. New formulations will be necessary in order to make it suitable for practical application.

1. INTRODUCCIÓN

Un sistema de distribución de agua en su sentido más amplio, está constituido por: la captación, el tratamiento, el almacenamiento y la distribución del agua, desde las fuentes a los consumidores. En los comentarios que siguen, no haremos referencias a la captación y al tratamiento del agua.

El objetivo de un sistema o red de distribución de agua es, suministrar la cantidad requerida de agua, con una calidad específica y presión mínima, desde las fuentes a los consumidores.

Desde un punto de vista topológico, un sistema de distribución de agua (SDA), está constituido por líneas y nudos. Las líneas representan a las tuberías, bombas y válvulas, y los nudos se identifican con los puntos de consumo y entrada de agua, y con las conexiones entre líneas.

El estudio de un SDA, se puede realizar respecto a uno o varios de los siguientes aspectos: análisis, trazado, optimización económica, rehabilitación, fiabilidad, operación, etc. Para el análisis de un SDA se han desarrollado diversas técnicas como, los métodos de Hardy Cross, el método lineal o los métodos de Newton-Raphson. Respecto al trazado de la red en el abastecimiento a poblaciones, este se ve condicionado por los puntos de suministro y demanda, y por su ubicación en las calles. En cuanto a las operaciones de la red, estas se efectúan sobre sistemas existentes. Por tanto, en este artículo nos centraremos en el diseño fiable.

En principio nos referiremos al diseño económico de un SDA, considerándolo compuesto por tuberías, depósitos, bombas y válvulas. El dimensionado propuesto mediante algoritmos genéticos, puede aplicarse tanto a redes nuevas, como

a la ampliación de sistemas existentes, o a la rehabilitación de redes existentes.

También, se mencionaran algunos aspectos de la fiabilidad aplicada a los sistemas de distribución de agua (SDAs).

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE DISEÑO ÓPTIMO

El diseño óptimo de un SDA para un trazado dado, y un conjunto específico de modelos de demanda para los nudos, consiste en encontrar la combinación de tamaños de las tuberías y otros componentes, que proporcionen un coste mínimo del sistema, cumpliendo las restricciones impuestas.

La función objetivo a minimizar, la expresaremos como:

$$C_{Total} = a_t \cdot C_t + a_d \cdot C_d + a_b \cdot C_b + a_v \cdot C_v + C_e + C_m \quad (1)$$

sujeto a:

continuidad del flujo en los nudos (ecuación de continuidad)

$$\sum_i Q_{in} - \sum_i Q_{out} = q_i \quad (2)$$

pérdida de carga en las mallas (conservación de la energía)

$$\sum_m h_L = \sum_m E_p \quad (\text{si no hay bombas en las mallas } \sum_m h_L = 0) \quad (3)$$

límites de presión mínima y máxima en los nudos (restricción)

$$H_{min} \leq H_i \leq H_{max} \quad (4)$$

límites de velocidad mínima y máxima en las líneas (restricción)

$$V_{min} \leq V_j \leq V_{max} \quad (5)$$

donde:

coste de las tuberías (um), [um = unidad monetaria]

$$C_t = \sum_i c_i(\phi) \cdot L_i \quad (6)$$

coste de los depósitos (um)

$$C_d = \sum_j \alpha \cdot \Delta Z_j^\beta \quad (7)$$

coste de las válvulas (um)

$$C_v = \sum_h c_h(v) \quad (9)$$

coste energético (um)

$$C_e = \sum_m W_m^0 \cdot F \cdot e + \sum_m W_m \cdot t \quad (10)$$

coste del mantenimiento de la red (um)

$$C_m = b_1 \cdot C_t + b_2 \cdot C_d + b_3 \cdot C_b \quad (11)$$

con:

▼ q_i ≡ Demanda, Q_{in} ≡ caudal que entra en el nudo, Q_{out} ≡ caudal que sale del nudo.

▼ h_L ≡ Pérdida de carga en la malla

▼ E_p ≡ Energía de bombeo

$$a_i = \frac{(1+r_i)^{T_i} \cdot r_i}{(1+r_i)^{T_i} - 1}$$

a_i ≡ Factor de amortización (diferente para cada elemento: tuberías, depósitos, estaciones de bombeo y válvulas, según el interés (r_i en tanto por uno) y el periodo de amortización (T_i en años)).

▼ $\alpha, \beta, \dots, b_1, b_2, \dots$ etc. Parámetros

▼ $W = W^0 \cdot p$, Potencia contratada (kW), $p \geq 1$

$$W^0 = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\mu} \quad \text{Potencia de bombeo (kW)}$$

▼ L ≡ Longitud de la tubería (m)

▼ F ≡ Horas de funcionamiento anuales del bombeo (h)

▼ e ≡ Coste de la energía (um/kWh)

▼ t ≡ Tarifa de la potencia (um/kWh)

▼ γ ≡ Peso específico del agua (9810 N/m³)

▼ Q ≡ Caudal bombeado (m³/s)

▼ H ≡ Altura de bombeo (m)

▼ μ ≡ Rendimiento de las bombas.

Si no hay bombeo y no se considera el coste de mantenimiento, a partir de (1)

$$C_{Total} = C_t + C_d + C_v \quad (12)$$

y si no hay depósitos y se desprecian las válvulas, de (12)

$$C_{Total} = C_t \quad (13)$$

si consideramos los gastos de mantenimiento y no hay bombeo, sería de (1)

$$C_{Total} = a_t \cdot C_t + a_d \cdot C_d + a_v \cdot C_v + C_m \quad (14)$$

El conjunto de restricciones implícitas a las que estará sometido el sistema será:

$$\begin{aligned} L_j &> 0 && \text{(para las líneas)} \\ D_j &\geq 0 && \text{(para los diámetros)} \end{aligned}$$

El problema de diseño es difícil de resolver, debido a que:

▼ El problema contiene elementos discretos (i.e. diámetros de las tuberías) y variables continuas (i.e. altura de bombeo).

- ▼ La formulación resultante es no lineal (ecuación (3) de conservación de la energía en las mallas).
- ▼ Incluso los sistemas de tamaño moderado, resultan de gran dimensión y complejidad.

Los investigadores han propuesto numerosas metodologías para resolver el problema de optimización de una red, algunas de ellas son:

- ▼ Métodos que descomponen el problema de optimización en dos etapas y lo resuelven por la iteración entre ambas.
- ▼ Métodos de enumeración heurísticos.
- ▼ Técnicas de programación no lineales.
- ▼ Programaciones lineales, etc.

Muchos de estos modelos realizan un dimensionado parcial del sistema, estando limitados en cuanto al tamaño de la red, número de condiciones de carga, tipos de componentes de la red, o solución obtenida (i.e. diámetros continuos), etc.

3. APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS A LOS SDA

Los algoritmos genéticos (AGs) tratan de emular el comportamiento de la naturaleza en la adaptación, supervivencia y aprendizaje de los sistemas biológicos, mostrándose como una eficaz herramienta en los procesos de optimización de funciones complejas y en el aprendizaje.

Los AGs no necesitan el control directo del entorno, ni necesitan reconocer todo el espacio de búsqueda, y sin embargo, presentan una gran robustez en la búsqueda de la solución del problema. Se han aplicado satisfactoriamente en diversos campos, tales como, el diseño y control en ingeniería, investigación de operaciones, matemáticas, recursos del agua, etc.

Los algoritmos genéticos están especialmente indicados para aquellos problemas en los que aparecen funciones no derivables, óptimos y objetivos múltiples, variables enteras, etc. Se basan en la exploración del espacio de soluciones a partir de un conjunto de puntos aleatoriamente dispuestos (población), de forma que mediante una serie de operaciones (reproducción, cruzamiento, y mutación) se generan sucesivas poblaciones que mejoraran las aptitudes de las anteriores.

Para los genes utilizaremos el alfabeto binario (0, 1), por tanto un individuo estará formado por una cadena de ceros y unos, de una longitud determinada, representando una posible solución o alternativa de diseño. Algunos términos empleados en un simple algoritmo genético (AG) son:

▼ *Población.*

La población **tp** es un conjunto discreto y finito de individuos, estando asociado cada uno de ellos a una posible solu-

ción del problema. La población inicial se genera aleatoriamente.

▼ *El operador reproducción (selección).*

Los individuos de una población que poseen una mayor aptitud, es decir, que mejor cumplen las condiciones de contorno impuestas y consecuentemente sus correspondientes valores de la función objetivo se acercan al óptimo buscado, se seleccionan para reproducirlos un mayor número de veces en la siguiente población. Una forma de realizar la reproducción es a través de una selección proporcional, como el método de la ruleta. Supongamos que tenemos tres individuos en la población con aptitudes, f_1 , f_2 y f_3 , y con probabilidades de selección p_1 , p_2 y p_3 , que cumplen,

$$\sum_{i=1}^3 p_i = 1$$

con probabilidades acumuladas para cada individuo $q_1=p_1$, $q_2=p_1+p_2$ y $q_3=p_1+p_2+p_3$. Se generan tres números aleatorios na_1, na_2 y na_3 en el intervalo [0, 1]. Si $na_1 \leq q_1$ se reproduce el individuo 1, si $q_k < na_i \leq q_{k+1}$ entonces se reproduce el individuo $k+1$. Con este método los individuos con mayor aptitud se reproducen más de una vez, mientras los de menor aptitud pueden no ser seleccionados.

▼ *El operador cruce (cruzamiento).*

A continuación, según la probabilidad de cruzamiento p_c , se emparejan aleatoriamente los individuos de la población seleccionada, combinando los genes de cada pareja para obtener dos nuevos individuos hijos. Un ejemplo, de cruzamiento simple y doble se muestra a continuación:

TABLA 1. CRUZAMIENTO

| | PADRES | HIJOS |
|--------|----------------|-------|
| SIMPLE | 11 <u>00</u> 1 | 11010 |
| | 01 <u>11</u> 0 | 01101 |
| DOBLE | 1 <u>100</u> 1 | 11111 |
| | 0 <u>111</u> 0 | 01000 |

▼ *El operador mutación (mutación).*

Finalizado el proceso de cruzamiento, a la población cruzada se le aplica la mutación, que consiste en elegir aleatoriamente un gen mediante la probabilidad de mutación p_m de un individuo y cambiar su valor de 1 a 0 o viceversa.

TABLA 2. MUTACIÓN

| | |
|---------------|---------------|
| 0 <u>1</u> 10 | 00 <u>1</u> 0 |
|---------------|---------------|

▼ Número de generaciones.

El proceso anterior se repite un número de veces determinado, denominado número de generaciones **ng**, siendo por tanto, el número de diseños evaluados \equiv **tp.ng**

Para la realización de los tres procesos anteriores no hay reglas fijas, por tanto hemos implementado diversas formas de selección, cruzamiento y mutación. Los pasos que debemos utilizar para optimizar una red de tuberías mediante un simple AG, siguiendo a [Dandy et al (1996)] son:

- ▼ 1) Generación aleatoria de la población inicial, tp (100, 1000) individuos de soluciones potenciales.
- ▼ 2) Cálculo del coste de la red (decodificación de cada individuo).
- ▼ 3) Análisis hidráulico de cada red.
- ▼ 4) Cálculo del coste de penalización (por incumplimiento de las restricciones de presión, etc.).
- ▼ 5) Cálculo del coste total de la red [cosci = coste red (paso 2) + coste de penalización (paso 4)].
- ▼ 6) Cálculo de las idoneidades o aptitudes (la conveniencia de cada individuo f_i se toma como una función del coste total de la red, se eligió la inversa del coste total de la red que representa cada individuo

$$f_i = \frac{1}{\cos c_i}$$

▼ 7) Generación de una nueva población usando el operador selección (la probabilidad de selección es para el individuo i ,

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^{tp} f_i}$$

- ▼ 8) Operador cruzamiento (con probabilidad p_c).
- ▼ 9) Operador mutación (probabilidad de mutación p_m).
- ▼ 10) Producción de sucesivas generaciones (repetición del proceso desde el paso 2 hasta el 9, entre 100 y 1000 generaciones).

Para facilitar la implementación de un algoritmo genético simple se muestra su diagrama de flujo. (Figura 1).

Vamos a mostrar como se realiza la decodificación de los individuos, es decir, de las subcadenas de las soluciones potenciales.

Para las variables discretas tales como, diámetros de las tuberías nuevas, ubicación de un componente, u opciones de rehabilitación, la longitud de la subcadena que representa a estas variables será ld , que cumple, $2^{ld} \geq$ diámetros candidatos (opciones de rehabilitación). Para la ubicación sólo se necesitará un bit adicional (0 no colocar, 1 si colocar).

Si tenemos 8 diámetros candidatos y 8 opciones de rehabilitación, el tamaño de la subcadena binaria que los representará, será: $ld = 3$, pues, $2^3 = 8$ (se cumple $2^3 \geq 8$).

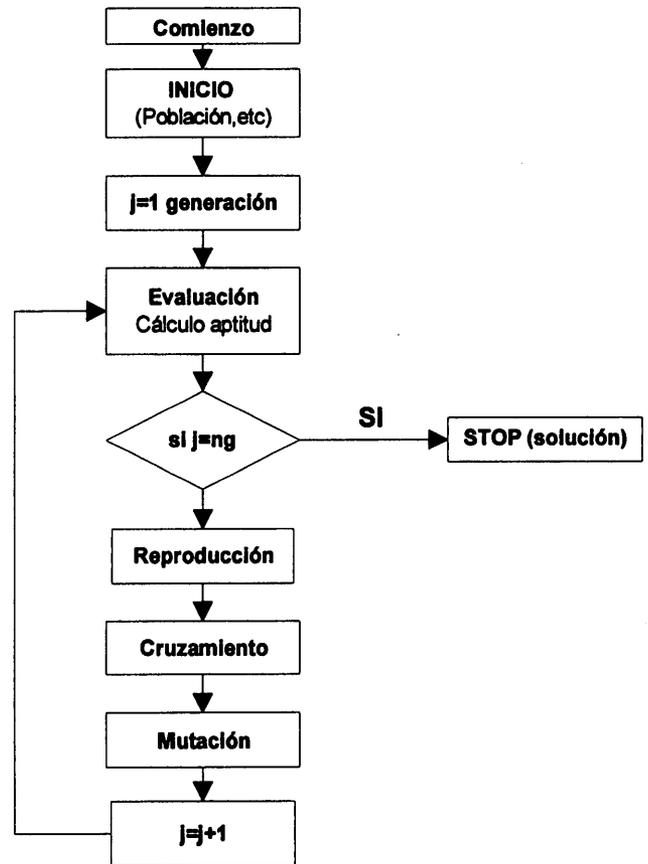


Figura 1. Diagrama de flujo de un simple algoritmo genético.

La tabla o esquema de decodificación utilizando código Gray, podría ser:

TABLA 3.
CÓDIGO GRAY PARA LAS VARIABLES DISCRETAS

| Código Gray | Tuberías nuevas (mm) | Opciones rehabilitación |
|-------------|----------------------|---------------------------|
| 000 | 0 | dejar como existe |
| 001 | 80 | duplicar con 100 mm |
| 011 | 100 | limpiar tubería existente |
| 010 | 150 | duplicar con 150 mm |
| 110 | 250 | duplicar con 200 mm |
| 111 | 300 | duplicar con 400 mm |
| 101 | 400 | reemplazar > |
| 100 | 500 | reemplazar = |

La representación mediante código Gray es tal que las subcadenas de código binario adjuntas se diferencian en un bit o están separadas por una distancia Hamming de 1.

Por tanto, si en la red a estudiar tenemos 3 tuberías a diseñar y 2 a rehabilitar, la decodificación de un individuo (solución potencial), representado por el cromosoma o cadena de bits 001111011001100 sería:

TABLA 4. SOLUCIÓN REPRESENTADA POR EL CÓDIGO GRAY

| | Subcadena | Descodificación |
|-------------------------|-----------|---------------------|
| tubería nueva 1 | 001 | 80 mm |
| tubería nueva 2 | 111 | 300 mm |
| tubería nueva 3 | 011 | 100 mm |
| tubería a rehabilitar 1 | 001 | duplicar con 100 mm |
| tubería a rehabilitar 2 | 100 | reemplazar = |

Con estos valores se analizará la red de distribución y se obtendrá su coste y su penalización si no cumple las restricciones impuestas.

Las variables continuas x , pueden ser las alturas de los bombeos H , los incrementos de alturas en los depósitos ΔZ , o las consignas de las válvulas (presión de tarado, etc.) VT , en estos casos, es necesario establecer unos límites mínimo y máximo para estas variables, y un salto máximo S en el intervalo que definen. Vamos a definir la longitud de la subcadena lc que represente a estas variables, suponiendo que la variable continua $x \in [a, b]$
 número mínimo de intervalos

$$N_m = \frac{b-a}{S} \quad (15)$$

longitud de la subcadena lc e intervalo de cálculo Δ

$$N_m \leq 2^{lc} - 1 \rightarrow lc \geq 1.44 \cdot \ln(N_m + 1) \rightarrow \Delta = \frac{b-a}{2^{lc} - 1} \quad (16)$$

valor de x ($H, \Delta Z, VT$)

$$x = a + \Delta \cdot (**..***) \dots \dots \dots * = 0/1 \quad (17)$$

Por ejemplo, si $a = 50$, $b = 68$ y $S = 3$, entonces número mínimo de intervalos, a partir de (15)

$$N_m = \frac{b-a}{S} = \frac{18}{3} = 6$$

longitud de la subcadena, a partir de (16)

$$lc \geq 1.44 \cdot \ln(6+1) = 2.80 \Rightarrow lc = 3$$

intervalo de cálculo, de (16)

$$\Delta = \frac{18}{2^3 - 1} = 2.5714$$

El esquema de decodificación, sería:

TABLA 5. DECODIFICACIÓN DE VARIABLES CONTINUAS

| Código Gray | Valor | Variable continua x |
|-------------|-------|--|
| 000 | 0 | $a + \Delta \cdot 0 = 50$ |
| 001 | 1 | $a + \Delta \cdot 1 = 50 + 2.5714 \cdot 1 = 52.57$ |
| 011 | 2 | $a + \Delta \cdot 2 = 55.14$ |
| 010 | 3 | $a + \Delta \cdot 3 = 57.71$ |
| 110 | 4 | $a + \Delta \cdot 4 = 60.29$ |
| 111 | 5 | $a + \Delta \cdot 5 = 62.86$ |
| 101 | 6 | $a + \Delta \cdot 6 = 65.43$ |
| 100 | 7 | $a + \Delta \cdot 7 = 68$ |

por tanto, la subcadena 101, se decodificaría con el valor 65.43, a sustituir en H, VT , etc. para analizar posteriormente el sistema.

El tamaño del individuo es función del número de variables de decisión del problema. $(nTuberías + nRehabilitacion) \cdot ld + nBombas \cdot lc_B + nDepositos \cdot lc_D + nVálvulas \cdot lc_V + nUbicacion$

Para el análisis hidráulico de los individuos de la población, en la metodología que estamos desarrollando se utiliza el programa de análisis de redes de abastecimiento EPANET, el cual se ha complementado con varios módulos nuevos (entrada de datos, selección, cruza, muta, coste, etc.), para implementar el diseño mediante AGs. El modelo admite el dimensionado de diversos componentes, (tuberías, bombas, alturas de los depósitos y estado de las válvulas), en redes nuevas, o en la ampliación o rehabilitación de redes existentes, considerando varios modelos de carga, ya que el ingeniero no puede saber a priori, cual es el modelo de demanda crítico.

4. ASPECTOS DE LA FIABILIDAD EN UN SDA

El diseño económico de un SDA, puede generar redes poco reales, que tengan diferentes secciones en una misma línea, con longitudes no aplicables en la práctica (por ejemplo, 995 m de diámetro 200 mm y 5 m de diámetro 150 mm). Mallas con secciones muy variables, que no permiten el funcionamiento del sistema cuando algún componente esta fuera de servicio, o incluso redes malladas que implícitamente funcionan como redes ramificadas. [Quindry et al (1981)] encontraron que cuando las redes malladas fueron optimizadas bajo un modelo de carga, con una base de coste, y sin limitaciones en el diámetro de las tuberías, el proceso de optimización del coste, reducía la capacidad redundante a cero y el diseño óptimo perdía las mallas, dejando solo una configuración ramificada.

Un avance en el diseño económico de un SDA, es la consideración de la fiabilidad, como una medida del funcionamiento de la red.

Tres problemas importantes se presentan al introducir la fiabilidad:

- ▼ 1. no hay una definición universalmente aceptada.
- ▼ 2. no hay una medida o formulación matemática adecuada.
- ▼ 3. no se conoce que nivel de fiabilidad es más apropiado para el aseguramiento de un buen diseño.

Además la fiabilidad de un SDA, es extremadamente compleja, porque depende de un gran número de parámetros:

- ▼ calidad y cantidad del agua en las fuentes.
- ▼ fallos de las bombas, tuberías y otros componentes.
- ▼ variación de la demanda.
- ▼ redundancia de la red.
- ▼ variación de la rugosidad de las tuberías.
- ▼ duración de las averías.
- ▼ construcción (cuidadosa, descuidada).
- ▼ mantenimiento y operación, etc.

Una posible definición de la fiabilidad es, la probabilidad de que el sistema funcione sin limitaciones específicas, para un determinado periodo de tiempo. La fiabilidad de una red de distribución de agua, es también definida por la probabilidad del fallo en el funcionamiento de la red, para cualquier fallo de uno o más de sus componentes, por ejemplo, tuberías o bombas, o debido a que la demanda en el sistema sea mayor que la propuesta en el diseño. La probabilidad de fallo y reparación de componentes (tuberías, válvulas, o bombas) o la fluctuación de la demanda creará una situación donde el sistema puede no ser capaz de responder a las demandas y requerimientos de presión.

Se han propuesto diversas metodologías para la consideración de la fiabilidad, siendo analizada e impuesta en los SDAs de diversas formas:

- ▼ Obligando a que cada nudo tuviese dos caminos independientes, ambos capaces de transportar la demanda requerida.
- ▼ Incluyendo la redundancia, cerrando las mallas con unos diámetros de sección mínima.
- ▼ Considerando la incertidumbre en las demandas y presiones de los nudos, y en los coeficientes de rugosidad de las tuberías.
- ▼ Mediante, la probabilidad de fallo en las tuberías y el exceso de demanda en los nudos.
- ▼ Empleando conjuntos de mínimo corte.
- ▼ Usando la simulación de Monte Carlo y un análisis modificado de duración-frecuencia.
- ▼ A través del concepto de "disponibilidad en un nudo", es decir, proporción de tiempo que los nudos tienen un sumi-

nistro adecuado bajo condiciones de funcionamiento anormal de la red.

- ▼ Considerando los fallos hidráulicos y mecánicos.
- ▼ Aplicando el concepto de entropía, etc.

Algunos de los problemas que afectan a estas aproximaciones de la medida de la fiabilidad en un SDA, pueden resumirse en:

- ▼ 1. Sólo se consideran algunos aspectos de la fiabilidad.
- ▼ 2. Las medidas propuestas son necesarias, pero no suficientes (p.e. la imposición de que exista siempre una conexión entre un nudo de demanda y una fuente, no implica que el agua llegue con la presión requerida al nudo).
- ▼ 3. Algunas medidas, no tienen un claro significado físico.
- ▼ 4. Sólo se analiza la fiabilidad en sistemas existentes.
- ▼ 5. En el caso de que se incluya la fiabilidad en el diseño, los requerimientos de cálculo son excesivos.
- ▼ 6. No admiten múltiples estados de carga, etc.

Una metodología más completa, incluiría la fiabilidad como una restricción en el diseño de la red, teniendo presente los fallos, por variación de la demanda (fallo del funcionamiento hidráulico), el fallo mecánico y el tiempo de reparación de la avería.

El fallo derivado de la variación de la demanda, puede resultar del incremento de la población y del aumento de consumos por cambios en el estilo de vida y por la disminución de la sección de las tuberías por corrosión y sedimentación. El fallo mecánico, relaciona las situaciones asociadas con fallos de los componentes del sistema, i.e., roturas de las tuberías y bombas, bloqueos de las válvulas, etc. El tiempo de reparación, es el necesario para arreglar un componente y recuperar el estado de funcionamiento normal.

5. CONCLUSIONES

El diseño económico de un SDA, es un asunto de extraordinaria complejidad, que ha suscitado el interés de muchos investigadores, los cuales han propuesto distintas aproximaciones matemáticas. Sin embargo, no hay una metodología generalmente aceptada. Y una prueba de ello es que en la práctica no hay aplicaciones informáticas de uso general para el diseño de SDAs.

Un aspecto interesante en el diseño de los SDAs es la fiabilidad. Pero la selección de las medidas apropiadas de la fiabilidad, no son sencillas, y actualmente, ni siquiera hay una definición de la fiabilidad, globalmente aceptada. Los métodos propuestos para el diseño fiable de SDA, carecen de una validación práctica real, incorporando sólo algunos aspectos de la fiabilidad del sistema.

Dado que el diseño fiable de una red, es un problema multiobjetivo, no lineal y que requiere un cierto número de restricciones, los algoritmos y metodologías propuestos resultan cada vez más complejos, surgiendo un cierto rechazo hacia su aplicación práctica, por parte de los ingenieros hidráulicos.

La metodología heurística que se propone se basa en la técnica de los algoritmos genéticos, algunas de cuyas ventajas son:

- ▼ 1. El algoritmo tiene una dependencia limitada del problema que pretende solucionar, básicamente sólo en la evaluación de la función objetivo y en la representación binaria de las variables.
- ▼ 2. La intervención del azar en su desarrollo, asegura una exploración exhaustiva del espacio de soluciones.
- ▼ 3. Puede obtenerse, un conjunto de soluciones idóneas.

Sin embargo, también presenta algunas desventajas:

- ▼ a) Dado su carácter aleatorio, es posible que no se alcance el óptimo global, aunque si suele obtenerse una buena aproximación.
- ▼ b) No es posible determinar de una forma general, la influencia de los parámetros básicos tales como, tamaño de la población, tasa de cruzamiento, tasa de mutación, etc.

La futura inclusión, en la implementación desarrollada, de algunos aspectos de la fiabilidad mejorará el diseño de los sistemas de abastecimiento, aportándoles una mayor flexibilidad y seguridad frente al funcionamiento en condiciones de fallo, lo que redundará en un mejor comportamiento en situaciones de funcionamiento real.

6. AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a la Consejería de Educación y Juventud, de la Junta de Extremadura por su colaboración económica, para una estancia en la Universidad de Newcastle Upon Tyne (UK), fruto de ello es este artículo. Y también al profesor Dr. Rafael Pérez García por sus sugerencias al respecto.

7. ALGUNAS REFERENCIAS

- Alperovits, E. and Shamir, U. (1977). **DESIGN OF OPTIMAL WATER DISTRIBUTION SYSTEMS**. Water Resources Research. 13 (6), 885-900.
- Cullinane, M. J., Lansley, K. E. and Mays, L. W. (1992). **OPTIMIZATION-AVAILABILITY BASED DESIGN OF WATER**

DISTRIBUTION NETWORKS. Journal of Hydraulic Engineering, 118 (3), 420-441.

- Dandy, G. C., Simpson, A. R. and Murphy, L. J. (1996). **AN IMPROVED GENETIC ALGORITHM FOR PIPE NETWORK OPTIMIZATION**. Water Resources Research. 32 (2), 449-458.
- Eiger, G. Shamir, U. Ben-Tal, A. (1994). **OPTIMAL DESIGN OF WATER DISTRIBUTION NETWORKS**. Water Resources Research, 30 (9), 2637-2646.
- Fujiwara, O. and De Silva, A.U. (1990). **ALGORITHM FOR RELIABILITY-BASED OPTIMAL DESIGN OF WATER NETWORKS**. Journal of Environmental-Engineering. 116 (3), 575-587.
- Golberg D. E. (1989) **GENETIC ALGORITHMS IN SEARCH, OPTIMIZATION AND MACHINE LEARNING**. Addison Wesley Publishing Company, Inc.
- Gupta, R. and Bhave, P. R. (1994). **RELIABILITY ANALYSIS OF WATER-DISTRIBUTION SYSTEMS**. Journal of Environmental Engineering, 120 (2), 447-460.
- Holland J. H. (1992) **ALGORITMOS GENÉTICOS**. Investigación y ciencia septiembre 1992, 38-45
- Kim, J. H. and Mays, L.W. (1994). **OPTIMAL REHABILITATION MODEL FOR WATER DISTRIBUTION SYSTEMS**. Journal of Water Resources Planning and Management, 120 (5), 674-692.
- Michalewicz Z. (1996) **GENETIC ALGORITHMS + DATA STRUCTURES = EVOLUTION PROGRAMS**. 3rd rev. and extended. Springer
- Ostfeld, A. and Shamir, U. (1996). **DESIGN OF OPTIMAL RELIABLE MULTIQUALITY WATER-SUPPLY SYSTEMS**. Journal of Water Resources Planning and Management. 122 (5), 322-333.
- Quindry, G. E., Brill, E. D. and Liebman, J.C. (1981). **OPTIMIZATION OF LOOPED WATER DISTRIBUTION SYSTEMS**. Journal of Environmental Engineering Division. 74 (11), 589-596.
- Savic, D. A. and Walters, G. A. (1997). **GENETIC ALGORITHMS FOR LEAST-COST DESIGN OF WATER DISTRIBUTION NETWORKS**. Journal of Water Resources Planning and Management. 123 (2), 67-77.
- Shamir, U. (1974). **OPTIMAL DESIGN AND OPERATION OF WATER DISTRIBUTION SYSTEMS**. Water Resources Research, 10 (1), 27-36.
- Wang Q. J. (1991) **THE GENETIC ALGORITHM AND ITS APPLICATION TO CALIBRATING CONCEPTUAL RAINFALL-RUNOFF MODELS**. Water Resources Research. 27(9), 2467-2471.
- Xu, C. and Goulter, Y. C. (1998). **PROBABILISTIC MODEL FOR WATER DISTRIBUTION RELIABILITY**. Journal of Water Resources Planning and Management. 124 (4), 218-228. ●