Matemática: Una publicación del ICM – ESPOL
2017, Vol. 15, No.1 **Publicado: 2017-04-03**

APLICACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE UNA RED MALLADA DE AGUA POTABLE CON UN ALGORITMO GENÉTICO, PARTIENDO DE UNA SOLUCIÓN TIPO ITERATIVA.

APPLICATION FOR THE OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF A MESHED NETWORK OF DRINKING WATER WITH A GENETIC ALGORITHM, BASED ON AN ITERATIVE TYPE SOLUTION

Pedro Ramos De Santis[1], Johni Bustamante Romero[2]

Resumen. *Una de las grandes inequidades sociales del mundo es la distribución del agua potable; este trabajo presenta una aplicación que permite optimizar la distribución de un recurso tan preciado, tomando como referencia una localidad real de la Provincia del Guayas y mediante la utilización de información real obtenida del municipio respectivo, los principios de la hidráulica y la aplicación de un algoritmo genético a partir de una solución inicial obtenida por el método de Hardy-Cross; se desarrolla una aplicación que permite el dimensionamiento económico de redes malladas de agua potable, aplicación que sirve de base para la planificación estratégica de cualquier gobierno autónomo descentralizado.*
Palabras Claves: Agua potable, Hidráulica, Algoritmo Genético, Hardy-Cross, Planificación Estratégica..

Abstract. *One of the great social inequities in the world is the distribution of potable water; this paper presents an application that allows to optimize the distribution of such a precious resource, taking as reference a real locality of the Province of Guayas and through the use of real information obtained from the municipality, the principles of hydraulics and the application of a genetic algorithm, starting from an initial solution obtained by the Hardy-Cross method; an application is developed that allows the economic dimensioning of meshed networks of potable water, application that serves as the basis for the strategic planning of any decentralized autonomous government.*
Keywords: Potable water, Hydraulics, Genetic Algorithm, Hardy-Cross, Strategic Planning.

Recibido: Enero, 2017
Aceptado: Marzo, 2017

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PROBLEMÁTICA SOCIAL

El agua es el recurso natural que mayores facilidades presenta para su manejo y aglutina a todos los demás recursos, razón por la cual toda gestión de recursos naturales debe partir de una gestión integral del agua, de tal forma que a futuro se pueda organizar toda temática ambiental en función de este recurso, superando así la barrera impuesta por los límites político-administrativos.

"El suministro óptimo de agua potable a una población es una de las competencias básicas de las autoridades locales en prácticamente todo el mundo, esto resulta totalmente lógico, más allá de la importancia vital del agua, cuando existe una mínima conglomeración humana que satisfacer. Debido a que las redes de agua potable tienen características dependientes de su topología, de caudales de diseño, de demandas de consumo, etc., se hace importante disponer de un modelo que permita optimizar la distribución del recurso hídrico, tomar decisiones a nivel de empresa para el mantenimiento y expansión de la red y así asegurar el flujo necesario para satisfacer la demanda." [5]

Debido a que no existen en nuestro país modelos matemáticos que optimicen el flujo de agua potable a través de las redes de distribución en función de características tan importantes como presiones, diámetros de tuberías, topología de la red, etc., y a los numerosos problemas que enfrentan los gobiernos autónomos descentralizados que redundan en conflictos entre usuarios y sectores de actividad demandantes de agua el análisis de esta aplicación.

1.2. METODOLOGÍA DE LAS SOLUCIONES

Definición de Algoritmo Genético.

Los algoritmos genéticos son algoritmos de búsqueda y optimización que emulan computacionalmente los mecanismos de la evolución natural: operan sobre poblaciones, selección natural y variación genética. Generalmente se presentan a los individuos como cadena de bits, también se pueden usar puntos flotantes, códigos alfabéticos, etc.

Algunos algoritmos evolutivos se usan paralelamente con algoritmos de tipo paralelo (poblaciones), glotones o voraces (greedy) y aleatorios. En lo que respecta a la implementación, su representación se puede realizar mediante cadenas binarias (algoritmos genéricos), arreglos reales (estrategias evolutivas) y programas (programación genética). Los operadores genéticos se clasifican en dos tipos: operadores de selección y operadores de variación, entre estos los más importantes son los

[1] *Ramos De Santis Pedro, M.Sc., Profesor de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL); (e-mail: pramos@espol.edu.ec)*
[2] *Bustamante Romero Johni, Ph.D.., Profesor de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL); (e-mail: jobustam@espol.edu.ec)*

de cruce (selección) y los de mutación y flujo genético (variación).

El esquema general de un algoritmo genético es:

1. Inicializar aleatoriamente una población de soluciones a un problema, representadas por una estructura de datos adecuada.
2. Evaluar cada una de las soluciones y asignarle una puntuación o fitness según lo bien que lo hayan hecho.
3. Escoger de la población la parte que tenga una puntuación mayor.
4. Mutar (cambiar) y entrecruzar (combinar) las diferentes soluciones de esa parte escogida, para reconstruir la población.
5. Repetir un número determinado de veces o hasta que se haya encontrado la solución deseada.

Definición de red mallada con varios nudos de altura.

En este tipo de redes, al contrario de las redes ramificadas con un solo nudo de altura conocida, los caudales que circulan por la línea de la red no pueden ser determinados únicamente a partir de los caudales consumidos y aportados, sino que dependen también de las características hidráulicas de las líneas y de las alturas piezométricas en los nudos.

De hecho, un sistema de continuidad está compuesto por N-1 ecuaciones, pero incluye como incógnitas L caudales de línea q_{ij}. En el caso particular de una red de topología ramificada con varios nudos de altura conocida se cumple que

L = N – 1, pero por cada nudo de altura conocida aparece una nueva incógnita que es el caudal aportado o consumido en el nudo Q.

Toda red mallada puede ser formulada de las siguientes formas:

Formulación por líneas (ecuaciones en q):

Consiste en el planteamiento de sistemas de ecuaciones compuestas por las N-1 ecuaciones independientes de continuidad en los nudos, más M ecuaciones independientes de malla. Si suponemos un sistema con un único nudo de altura conocida, el sistema de ecuaciones será:

$$\begin{cases} \sum_{j\in A_i} q_{ij} = Q_t \ ; & i = 1,2,\ldots, N-1 \\ \sum_{(ij)\in B_k} (\pm)_{ij}\, h_{ij}\; q_{ij} = 0 \ ; & k = 1,\ldots, M \end{cases} \tag{1.1}$$

Donde h_{ij} es la pérdida de carga unitaria o pendiente hidráulica en la línea ij, A_i es el conjunto de nudos directamente conectados al nudo i, mientras que B_k es el conjunto de líneas que componen la malla k y el término $(\pm)_{ij}$ representa el sentido de circulación de q_{ij} en el sentido de la malla (+1 si coinciden y -1 si es lo contrario).

En el caso de que las líneas solo contengan tuberías o elementos resistentes, puesto que en general $h_{ij} = R_{ij} q_{ij}^n$, donde R_{ij} es la resistencia hidráulica en la línea ij, el sistema anterior puede escribirse como:

$$\begin{cases} \sum_{j\in A_i} q_{ij} = Q_t \ ; & i = 1,2,\ldots, N-1 \\ \sum_{(ij)\in M_k} (\pm)_{ij}\, R_{ij}\, q_{ij}^n = 0 \ ; & k = 1,\ldots, M \end{cases} \tag{1.2}$$

Dado que las únicas incógnitas que intervienen en la formulación son los L caudales de la línea q_{ij} , esta formulación se conoce también como “sistema de ecuaciones en q”.

El sistema planeado cuenta de M+(N-1)=L ecuaciones y aún en el caso de que no exista nodo alguno de altura conocida, posee solución única, puesto que el conjunto de incógnitas posee únicamente caudales.

Cuando la red cuenta con más de un nodo de altura conocida, aparecerán como nuevas incógnitas tantos caudales de nudos Q_i como nudos de altura conocidos menos uno, pero también es cierto que entre cada par de nudos de altura conocida aparecerá una línea ficticia que dará lugar a una ecuación de malla ficticia que resulta independiente del resto de ecuaciones de malla y por esta razón se sigue conservando el balance entre ecuaciones e incógnitas.

Formulación por nudos (ecuaciones en H):

Está basada en el sistema de N-1 ecuaciones de continuidad del sistema; el sistema de continuidad de ecuaciones es insuficiente para resolver las incógnitas de los caudales de línea q_{ij} , sin embargo reformulando dichas ecuaciones en términos de las alturas piezométricas en los nudos H_i conseguimos un sistema de N-1 ecuaciones independientes con N-1 incógnitas.

La formulación nodal es la preferida por la mayoría de los investigadores por las siguientes razones: el planteamiento de ecuaciones de la formulación nodal exige un conocimiento mínimo de la topología de la red y la resolución está orientada a proporcionar el valor de las alturas piezométricas y presiones en los nudos, siendo estas variables las de mayor interés en el análisis de una red hidráulica de distribución.

Formulación por mallas (ecuaciones en q):

La formulación por mallas está basada en una redefinición de las incógnitas del problema de análisis para reducir su número a M (número de mallas). Las nuevas incógnitas, conocidas como

caudales correctores de malla Δq, aparecen al plantear independientes de malla las M ecuaciones. Esta formulación por mallas supone el establecimiento de una hipótesis de caudales, lo que implica asignar un caudal a todas las líneas de la red, de forma arbitraria, pero verificando las ecuaciones de continuidad en todos los nudos, lo que en la práctica no representa mayor dificultad.
Aunque los caudales propuestos verifiquen las ecuaciones de continuidad en los nudos, lo más probable es que dichos caudales no sean compatibles con el principio de la conservación de la energía expresado en las ecuaciones de malla y por eso será necesario corregirlos.
Los caudales correctores deberán tener un valor único por cada malla y para su determinación, suponiendo que la red está constituida por tuberías y elementos resistentes, se puede reformular el sistema de ecuaciones de la siguiente manera:

$$\sum_{(ij)\in B_k} (\pm)_{ij} R_{ij} \left(q_{ij}^{*} + \sum_{r\in M_{ij}} (\pm)_{ij}^{r} \Delta q_r \right)^{n} = 0$$

$$; k = 1, \dots, M \qquad (1.3)$$

Donde:
B_K: conjunto de líneas que forman la malla k
q_{ij}^{*} : caudal hipotético de la línea ij
$(\pm)_{ij}^{r}$: coeficiente que adopta el valor $+1$, cuando el caudal q_{ij}^{*} sigue el sentido de circulación definido por la malla r y -1 en caso contrario.
Una vez calculados definitivamente los caudales circundantes q_{ij}, las pérdidas h_{ij}, las alturas piezométricas H_i se determinan estableciendo el balance de pérdidas de carga en un trayecto desde un nudo de altura conocida hasta el nudo en cuestión. [3]

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. ENFOQUES DE ALGUNOS MÉTODOS DE SOLUCIONES PARA REDES MALLADAS

Cuando un sistema presenta un sistema de equilibrio físico definido, puede decirse que la solución matemática también existe, pero esto depende de la fidelidad del modelo. Para que exista una solución al problema es necesario que el número y la distribución de las incógnitas en la red permitan la formulación de un número adecuado de ecuaciones independientes.
Si ocurre que las incógnitas se concentran en una zona de la red y los datos en otra, es muy probable que el sistema sea inconsistente debido a la incompatibilidad de los datos. No obstante, en lo que sigue admitiremos que la solución existe y es única y nos centraremos en algunos de los posibles métodos de solución de los sistemas de ecuaciones propuestos.
Entre los métodos iterativos de Gauss-Seidel y Jacobi, tenemos el método de Hardy-Cross; entre los de linealización de ecuaciones tenemos el método de Newton-Raphson y el método de la teoría lineal. En el primer caso la resolución implica una simplificación en la que solo interviene una incógnita por cada una de las ecuaciones, las cuales son resueltas secuencialmente obteniendo el valor de una incógnita cada vez; mientras que los métodos de linealización consisten en la transformación de ecuaciones no lineales en un sistema lineal que es resuelto para todas las incógnitas en conjunto.
Este trabajo utiliza el método de Hardy-Cross para obtener una solución inicial que sirve de punto de partida para el algoritmo genético evolutivo que optimice económicamente el dimensionamiento de una red mallada de agua potable.

Método de Hardy-Cross

Representaron el primer intento para resolver manualmente el sistema de ecuaciones planteado y por sus excelentes resultados, aunque sea en pequeña escala, fueron ampliamente adoptados para el cálculo de redes a partir del año 1936 hasta que empezaron a aparecer los primeros computadores digitales a inicios de los años sesenta.
Hardy-Cross presentó dos alternativas a utilizar, una para formulación por mallas y otra para formulación por nudos. Generalmente cuando se hace referencia a este método, se refiere implícitamente al que aplica a la formulación por mallas, debido al menor número de ecuaciones que se maneja.
En la formulación por mallas este método simplifica el sistema de ecuaciones introduciendo una única incógnita por ecuación, que es el caudal corrector de la malla correspondiente a la ecuación en cuestión. El sistema de ecuaciones representado en (3) se simplifica en este caso de la siguiente forma:

$$\sum_{(ij)\in B_k} (\pm)_{ij} R_{ij} \left(q_{ij}^{*} \, (\pm)_{ij} \Delta q_k \right)^{n} = 0$$

$$; k = 1, \dots, M \qquad (2.1)$$

Para despejar la incógnita Δq_k de cada ecuación, esta se linealiza primeramente mediante un desarrollo de Taylor de la ecuación, en el cual se eliminan los términos en Δq_k de grado mayor que uno, esto es:

$$\sum_{(ij)\in B_k}(\pm)_{ij}\, R_{ij}\left(q_{ij}^{*}\right)^{n} n\Delta q_k \sum_{(ij)\in B_k}(\pm)_{ij}\, R_{ij}\left(q_{ij}^{*}\right)^{n-1} + \ldots\ldots\ldots\ldots \approx 0\,;\; k = 1, \ldots\ldots\ldots\ldots, M \qquad (2.2)$$

De donde resulta la conocida ecuación:

$$\Delta q_k = -\frac{\sum_{(ij)\in B_k}(\pm)_{ij}\, R_{ij}\left(q_{ij}^{*}\right)^{n}}{n\,\sum_{(ij)\in B_k}(\pm)_{ij}\, R_{ij}\left(q_{ij}^{*}\right)^{n-1}} \qquad (2.3)$$

En el cual se observa que el denominador es > 0, ya que se han considerado explícitos todos los signos.
En el trabajo original de Hardy-Cross, el cálculo de los sucesivos Δq_k se lleva a cabo siguiendo el método de Jacobi, de tal forma que primero se obtienen todos los caudales correctores y a continuación se realizan las correcciones de caudal, todas a la vez, antes de empezar la siguiente iteración.
La ecuación (5) se generaliza sin dificultad ante la presencia de bombas en algún circuito y también para las mallas ficticias, de la siguiente forma:

$$\Delta q_k = -\frac{\sum_{(ij)\in B_k}(\pm)_{ij}\, R_{ij}\left(q_{ij}^{*}\right)^{n} \pm h_b q_b^{*} \pm (H_a - H_b)}{n\sum_{(ij)\in B_k} R_{ij}\left(q_{ij}^{*}\right)^{n-1} + |h_b' q_b^{*}|} \quad (2.4)$$

En la cual h_b es la altura de la bomba, que adoptará un signo negativo si el caudal que la atraviesa q_b^* sigue el sentido de la malla y positivo si es lo contrario, H_a y H_b son las alturas y los nudos extremos de la línea ficticia, siendo el nudo a anterior al nudo b, en el sentido del recorrido de la malla y $|h_b' q_b^*|$ representa el valor absoluto de la derivada de la altura de bombeo para el caudal hipotético.

3. DIMENSIONAMIENTO DE LA RED Y PLANTEAMIENTO DEL MODELO MATEMÁTICO

3.1 DIMENSIONAMIENTO ECONÓMICO DE UNA RED MALLADA

En el caso de mallas cerradas, el equilibrio hidráulico de la red puede hacerse por cualquier método que permita el cierre o diferencia de presiones entre la entrada y la salida de la malla, menor a 0,1 mca. Los métodos tradicionales de cálculo son Hardy-Cross y longitudes equivalentes.
Actualmente existen varios programas comerciales que permiten la modelización y optimización de redes combinadas (abiertas y cerradas): Kypipe, WaterCAD, Epanet, Cybernet y Redes, entre otros.
El método de Hardy-Cross es el que balancea la red, manteniendo fijos los datos de diámetros (cromosomas), longitudes, etc.

Tradicionalmente el diseño de distribución de redes de agua se lo realiza a base de "prueba y error". Una vez definida la topología de la red y los caudales de diseño se procede al dimensionamiento de los componentes de la red (selección de tuberías de distinto diámetro y material, bombas, válvulas, tanques y demás elementos) que tienen como finalidad la configuración del sistema que cumple con las condiciones físicas y técnicas. [2]

El procedimiento es el siguiente:

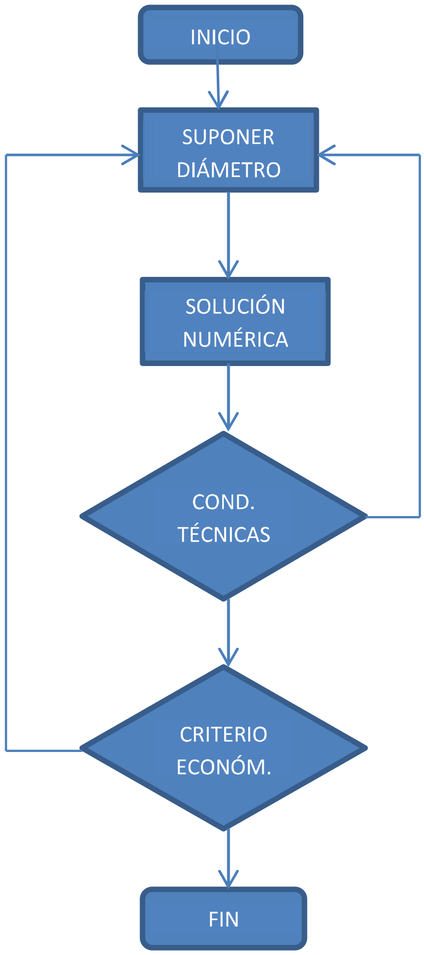


Fig. 1. Flujograma de proceso de diseño económico tradicional de una red mallada.

3.2 SIMPLIFICACIÓN DEL MODELO

Tomando en cuenta el método de Hardy-Cross, llamado también de relajamiento o pruebas y errores controlados, el cual supone que se han seleccionado previamente los caudales iniciales y los diámetros en los diferentes tramos de la red;

por medio de un proceso iterativo, se corrigen los caudales de tal manera que el cierre de la malla (diferencia de presiones entre un ramal y otro de la red cerrada) no exceda un valor límite que según la norma debe ser menor a 0,1 mca.
Si la red mostrada en la siguiente figura se encuentra en funcionamiento, la pérdida de carga a través de los nodos 1, 2, 3, 4 y 5 será exactamente igual a la pérdida de carga ocurrida entre los nodos 1, 6, 7, 8 y 5. Como inicialmente no se conocen los caudales reales, al suponer unos iniciales, esta diferencia de presiones será mayor que la aceptable y será necesario ajustar la hipótesis inicial de los caudales. Se observa también en la figura que a las pérdidas de carga se les asigna un signo de acuerdo con una convención que debe respetarse durante todo el proceso iterativo.

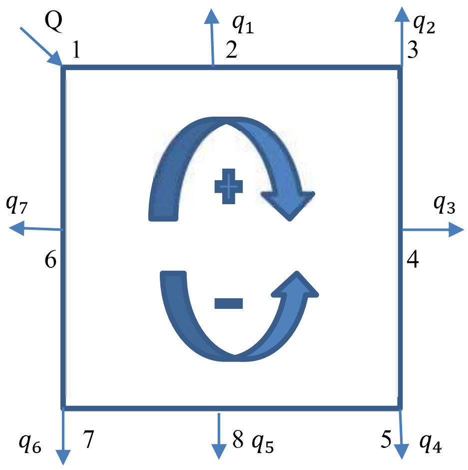


Fig. 2. Malla para aplicación del método Hardy-Cross

Si se tiene una red contigua a la anterior, existirá por lo menos un tramo en común, el cual tendrá una doble corrección de caudales debido a que pertenece a las dos redes.
La ecuación básica de este modelo es la ecuación de Hazen-Williams:

$$Q = 0{,}2785CD^{2{,}63}J^{0{,}54} \quad (3.1)$$

Dónde:

Q: caudal del tramo.
C: coeficiente de rugosidad del material de la tubería.
D: diámetro de la tubería.
J: pérdida de carga unitaria en el tramo.
H: pérdida de carga total en el tramo.
L: longitud del tramo.

La pérdida de carga unitaria J será:

$$J = \left(\frac{Q}{0{,}2785CD^{2{,}63}}\right)^{\frac{1}{0{,}54}} \quad (3.2)$$

En donde los siguientes términos son constantes:

$$n = \frac{1}{0{,}54} = 1{,}85 \qquad k = \left(\frac{Q}{0{,}2785CD^{2{,}63}}\right)^{\frac{1}{0{,}54}} \quad (3.3)$$

Por lo tanto, la ecuación 3.2 queda así:

$$J = kQ^n = \frac{H}{L} \quad (3.4)$$

Y la pérdida de carga total será:

$$H = kLQ^n \quad (3.5)$$

Llamando $r = kL$ y reemplazando en la ecuación 3.5, se tiene:

$$H = rQ^n \quad (3.6)$$

La ecuación 3.6 indica la pérdida de carga total en un tramo cualquiera para unas condiciones dadas.
Adoptando la convención de que las pérdidas en el sentido horario son positivas y las antihorario son negativas, se debe cumplir que:

$$\sum H = 0 \quad (3.7)$$

Como la hipótesis inicial de distribución de caudales no es correcta, no se cumplirá la ecuación 3.7, es decir:

$$\sum H \neq 0 \quad (3.8)$$

Y reemplazando la carga total en el tramo H, expresada en la ecuación 3.6, se tiene:

$$\sum rQ^n \neq 0 \quad (3.9)$$

Para que se cumpla la condición de cierre habrá que corregir los caudales, manteniendo constantes los términos D, L y C. Entonces la ecuación 3.9 queda así:

$$\sum [r(Q + \Delta Q)^n] = 0 \quad (3.10)$$

Cuyo desarrollo por Binomio de Newton, es:

$$(Q + \Delta Q)^n = Q^n + nQ^{n-1}\Delta Q + \frac{n(n-1)}{2!}Q^{n-2}\Delta Q^2 + \dots \dots \dots \dots . + \Delta Q^n \quad (3.11)$$

Tomando solamente los dos primeros términos del desarrollo ya que las potencias mayores de la corrección del caudal (si este es pequeño), son despreciables, se tiene:

$$(Q + \Delta Q)^n \approx Q^n + nQ^{n-1}\Delta Q \qquad (3.12)$$

Y reemplazando este término en la condición de cierre de malla expresada en la ecuación 3.10, se obtendrá la corrección del caudal:

$$\sum r(Q^n + nQ^{n-1}\Delta Q) = 0$$

$$\sum rQ^n + \sum rnQ^{n-1}\Delta Q = 0$$

$$\sum rQ^n + n\Delta Q \sum rQ^{n-1} = 0$$

Y despejando el término de la corrección de caudal:

$$\Delta Q = \frac{-\sum rQ^n}{n\sum rQ^{n-1}} = \frac{-\sum rQ^n}{n\sum r\frac{Q^n}{Q}} = \frac{-\sum H}{n\sum \frac{H}{Q}} \qquad (3.13)$$

Finalmente, la corrección del caudal será:

$$\Delta Q = \frac{-\sum H}{1{,}85\sum \frac{H}{Q}} \qquad (3.14)$$

Cuando la condición de cierre se cumpla (ecuaciones 3.7 y 3.10), la malla estará equilibrada hidráulicamente y los caudales obtenidos serán los reales. Posteriormente se deben verificar las presiones en cada uno de los nodos, teniendo en cuenta la presión mínima de servicio adoptada para el diseño mediante la ecuación 3.5. De igual manera deberá verificarse que las velocidades en los tramos cumplan con la norma adoptada. [4]

3.3 DISEÑO DE LA LÍNEA MATRIZ

La línea matriz o tubería de conducción entre el tanque de almacenamiento y la red de distribución funciona a presión por gravedad. El diseño de la línea matriz que se muestra a continuación es teórico y simplificado. El diseño debe ser completo, teniendo en cuenta el perfil real de la tubería, los accesorios, las pérdidas menores correspondientes y la verificación del golpe de ariete. La diferencia conceptual en el diseño radica en la imposibilidad de utilizar, en este caso, la máxima carga hidráulica disponible, debido a que hay que cumplir con los requerimientos de presión mínima.

Partiendo de las condiciones de diseño de la matriz: caudal de diseño, material de la tubería, coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams, cota de nivel de agua mínima en el tanque, cota de proyecto en el nodo de entrada y la longitud real de conducción; se pueden obtener los valores hidráulicos de la línea matriz:

- Cota piezométrica a la entrada de la red
- Carga hidráulica disponible H
- Pérdida de carga unitaria J
- Diámetro de la tubería (que debe ser aproximado al diámetro comercial).

Para todo lo indicado anteriormente se deben depreciar las pérdidas menores por accesorios.

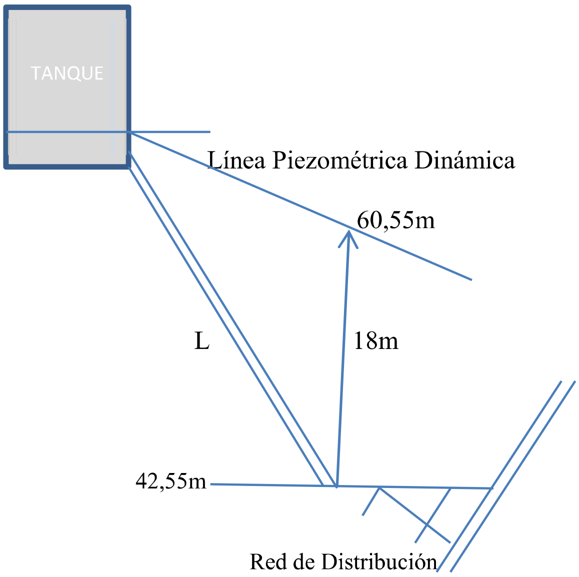


Fig. 3. Ejemplo de diseño de una línea matriz

3.3 DISTRIBUCIÓN DE CAUDALES EN LA RED

Un problema persistente en la mayoría de las poblaciones es la falta de planeación, por lo tanto suponemos un crecimiento uniforme de la población y una distribución del caudal proporcional a la longitud de la tubería alimentada. La hipótesis de distribución adoptada puede estar de acuerdo a las condiciones topográficas del proyecto, como se indica en la figura 4.

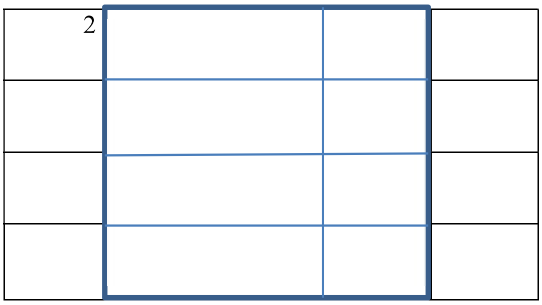
Se supone inicialmente un sentido de flujo en la tubería principal. Después mediante alguna convención, se debe indicar cual tramo de red es alimentado por cada tramo de red principal.

El caudal que hay repartir proporcionalmente a la longitud, es el caudal máximo horario:

$$q = \frac{Q}{L_{total}} \qquad (3.15)$$

Así, se puede obtener las demandas resultantes en el extremo final de cada tramo, multiplicando el caudal unitario por la longitud total alimentada, como se muestra en la tabla No. 1.

Los hidrantes que se usan para la modelación se colocan en los extremos más desfavorables de la red, en el caso del ejemplo nuestro en los nodos 4 y 5. También se obtienen el caudal total demandado en cada uno de los nodos de acuerdo



con la hipótesis de distribución de caudales, tal como se muestra en la tabla No. 2.

Para definir el caudal circulante por cada uno de los tramos, es necesario tener en cuenta el balance de masas en cada uno de los nodos y cuando del nodo salen dos tramos, se debe asumir una proporción de caudales de tal forma que se puedan suplir las demandas agua abajo.

En la tabla No. 3 se muestra la distribución inicial de caudales en cada tramo, que posteriormente será corregida. [4]

Tramo	Longitud propia (m)	Longitud alimentada (m)	Longitud total (m)	Caudal (m^3/s)
1 - 2	300,00	900,00	1.200,00	7,4
1 - 3	424,26	1.500,00	1.924,26	11,9
3 - 2	300,00	600,00	900,00	5,6
3 - 4	300,00	800,00	1.100,00	6,8
2 - 5	300,00	800,00	1.100,00	6,8
5 - 4	300,00	1.100,00	1.400,00	8,7
Sumat.	1.924,26	5.700,00	7.624,26	47,3

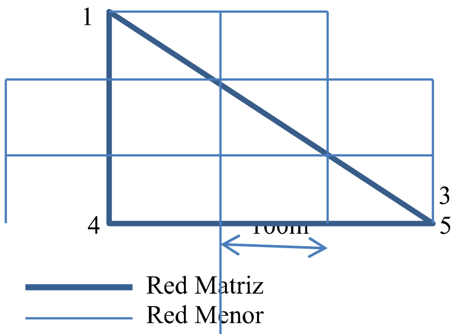
Tabla 1. Distribución de caudal proporcional a la longitud

Nudo	Dom. (L/s)	Inc. (L/s)	Q (L/s)
1			-57,3
2	7,4 + 5,6		13,0
3	11,9		11,9
4	6,8 + 8,7	5,00	20,5
5	6,8	5,00	11,8
Sumat.	47,3	10,00	0,00

Tabla 2. Demanda en los nodos de la red

Tramo	Hipótesis de distribución	Q (L/s)
1 - 3	70% (57,3)	40,1
3 - 2	65% (40,1 - 11,9)	18,3
1 - 2	30% (57,3)	17,2
2 - 5	17,2 + 18,3 – 13,0	22,5
5 - 4	22,5 – 11,8	10,7
3 - 4	40,1 – 18,3 – 11,9	9,9

Tabla 3. Caudales en los tramos de la red principal



Punto 1: cota rasante 43,55 m., cota proyecto 42,55 m.
Punto 2: cota rasante 42,60 m., cota proyecto 41,60 m.
Punto 3: cota rasante 42,71 m., cota proyecto 41,71 m.
Punto 4: cota rasante 41,51 m., cota proyecto 40,51 m.
Punto 5: cota rasante 41,88 m., cota proyecto 40,88 m.

Fig. 4. Ejemplo de diseño de una línea matriz

3.3 CÁLCULO DE MALLAS POR EL MÉTODO DE HARDY-CROSS

Las dos variables de entrada al método de Hardy-Cross son el caudal inicial y el diámetro en cada uno de los tramos; como resultado del proceso iterativo se deben obtener el caudal final en cada tramo y la presión en cada nodo. El diámetro de la red principal se determina suponiendo una línea piezométrica paralela al terreno.

Tramo	H m.	L m	Q L/s	D m.	Dc pulg	Di m.
1 - 3	0,84	424,6	40,1	0,26	10	259,7
3 - 2	0,11	300,0	18,3	0,27	8	208,4
1 - 2	0,95	300,0	17,2	0,17	6	160,0
2 - 5	0,72	300,0	22,5	0,20	8	208,4
5 - 4	0,37	300,0	10,7	0,17	6	160,0
3 - 4	1,20	300,0	9,9	0,13	4	108,7

Tabla 4. Definición de diámetros en la red principal.

La red inicial quedaría conformada de la siguiente forma:

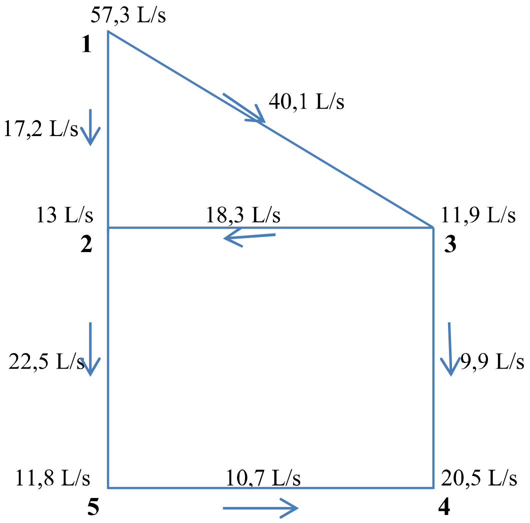


Fig. 5. Red de distribución inicial para el cálculo método de Hardy-Cross.

Luego de haberse elaborado todo el proceso iterativo de Hardy-Cross se obtienen los resultados definitivos. A continuación se muestran estos resultados para el tramo 1 – 2:
Longitud: 300,00 m.
Diámetro: 6 pulgadas.
Caudal: 0,0173 m^3/s.
Velocidad: 0,86 m/s.
Condición: OK
Caída H: 1,23 m.
Elevación Piezométrica
Nudo inicial: 41,60 m.
Nudo final: 56,96 m.
Altura de presión: 18,4 m.

Habitualmente, las observaciones más importantes luego de realizado este trabajo, son:

- La pérdida de carga J , se calcula con el diámetro interno real.
- Hay ocasiones en que el proceso se puede detener en la primera iteración, ya que los valores $\sum H_i$ pueden resultar menores que 0,1 m. según la norma.
- Todas las velocidades siempre cumplen con la recomendación de velocidades mínima y máxima.
- Las cotas piezométricas se calculan a partir de la cota piezométrica ya establecida en el nodo 1, restando de ella la pérdida de carga en el tramo correspondiente.
- La presión en el nodo extremo aguas abajo del tramo se calcula como la diferencia entre la cota piezométrica y la cota del proyecto, llamada también lomo de tubería. [4]

4. APLICACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DIMENSIONAMIENTO ECONÓMICO DE LA RED MALLADA

El algoritmo genético que es implementado en el programa Mathematica en tipo solver, básicamente consta de cinco etapas, a saber: ingreso de datos, inicialización de datos, generación, selección (estos dos últimos, como cuerpo mismo del algoritmo genético) y por último los resultados finales, tal como se muestra en la siguiente figura:

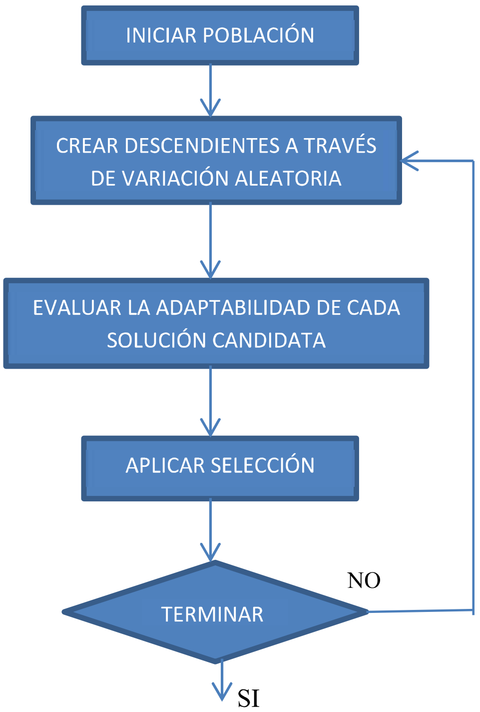


Fig. 6. Estructura de un algoritmo evolutivo

Los algoritmos genéticos establecen una analogía entre el conjunto de soluciones de un problema, llamado fenotipo y el conjunto de individuos de una población natural, codificando la información de cada solución en una cadena generalmente binaria, llamada cromosoma. Los símbolos que forman la cadena son los genes, en nuestro caso específico, el diámetro de las tuberías. Cuando la representación de los cromosomas se hace con cadenas de dígitos binarios se le conoce como genotipo. Los cromosomas evolucionan a través de iteraciones, llamadas generaciones. En cada generación, los cromosomas son evaluados, usando alguna media de aptitud. Las siguientes generaciones (nuevos cromosomas), llamada descendencia, se forman utilizando dos operadores, cruzamiento y mutación.

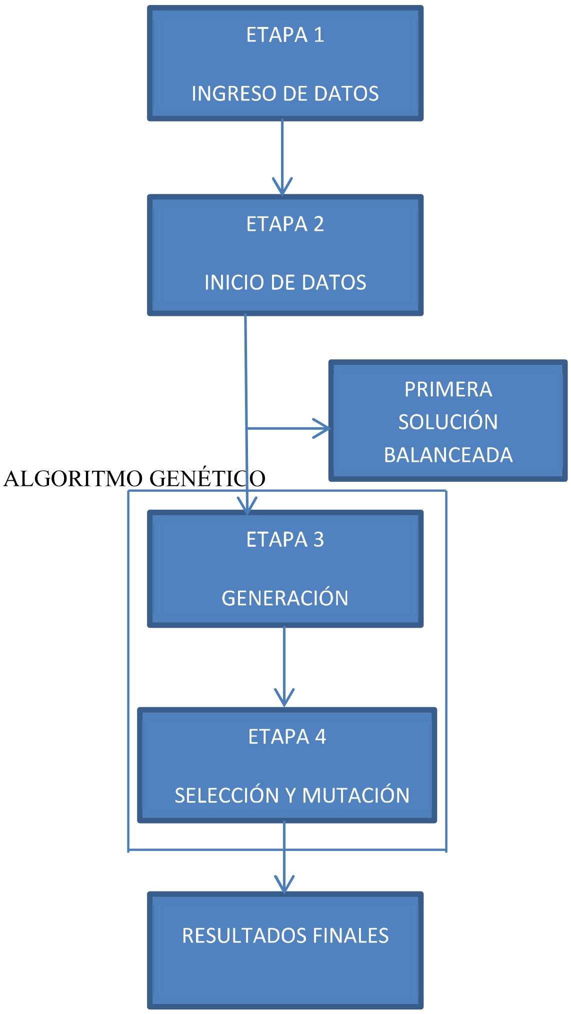


Fig. 7. Diagrama de flujo del proceso de implementación del modelo.

Se dispone de los siguientes nombres y variables usados en la programación:

diametro: que puede ser constante (dato inicial) o variable (dato variable de la población).
nn2: cantidad de arcos, constante.
matrizVertices: dato inicial fijo, constante.
n: cantidad de nodos, constante.
demanda: positiva si es nodo de consumo, negativa si es nodo de aporte; constante.
cotaProyecto: cota o altura del nodo, dato real y constante.
cotaReferencia: cota o altura del tanque, dato real y constante.
velocidadMinimaDato: velocidad mínima en la red (m/s), constante.
velocidadMaximaDato: velocidad máxima en la red (m/s), constante.
presionMinimaDato: presión mínima en la red, mca, constante.
presionMaximaDato: presión máxima en la red, mca, constante.
caminoInicial: camino inicial para establecer un flujo inicial de distribución del agua (constante), luego este camino cambia (variable).
mallasRed: las mallas formadas en la red, en valore relativos son iguales siempre (constante), pero el signo cambia de acuerdo a la dirección del flujo (variable).
nn1: cantidad de mallas en la red, constante.
longitud: longitud de los arcos, constante.
signoFlujo: variable o auxiliar, depende del balanceo, es decir, por el método de Hardy-Cross el balanceo se realiza y sufre cambio en la dirección del flujo.
arcos: se determina por medio de una función denominada datosArco, constante.

La lista de funciones y procedimientos es la siguiente:

datosArcos[a_]: esta función determina los arcos existentes entre nodos, calculando a partir de las mallas ingresadas en mallasRed.
matrizIncidencia[a_]: determina la matriz de incidencia indicando la dirección de los arcos, es decir, no es matriz simétrica.
flujoMatriz[mi,mv]: realiza el grafo flujoMatriz[caudal, matrizVertices].
datosCaudalInicial[a_]: determina el primer flujo necesario para comenzar el balanceo según Hardy-Cross.
AsociadoArco[vector,a]: por ejemplo, al aplicar AsociadoArco[diametro,1] se obtiene la matriz vectorArco//MatrixForm.
devectoAmatriz[matrizArco]: convierte un arco tipo vectorArco en matriz.
calculoCaudal[nn,diametroArco]: determina el caudal que se distribuye en la red utilizando como distribución inicial del caudal el calculado en datosCaudalInicial[a_], luego se aplica el método iterativo de balance de flujos por el método de Cross, vale la pena indicar que mientras se realiza este balanceo existen cambios de dirección del flujo y el método iterativo converge muy rápido, la cantidad de iteraciones hasta obtener el

balanceo se encuentra entre N/2 y N, donde N es la cantidad de arcos.
calculoVelocidad[1]: calcula la velocidad que circula en cada arco o tubería, este cálculo se realiza luego del balanceo del flujo.
calculoPresion[ ]: calcula la presión en cada nodo, este cálculo se realiza luego del balanceo del flujo.
calculoFitness[ ]: calcula el costo de la red basado en el costo de las tuberías, de acuerdo al diámetro y longitud del arco. Por ello se puede realizar en cualquier momento luego de tener determinado el tipo de tubería de la red.
inicioDatos[a_]: carga los datos, matriz de incidencia, Arcos, longitudArco, diametroArco, Caudal, caudalArco, CaudalArcoPrimero. Esta función solo se aplica una vez, luego los cálculos se almacena y no es necesario volverla a ejecutar.
caudalVelocidadPresion[diametro,inter]: calcula el caudal, la velocidad y presión utilizando el método de Cross siempre con el dato inicial calculado anteriormente.
generacion[nn_]: esta función crea la primera generación de individuos, su creación es aleatoria, es decir, el cromosoma está representado por los arcos y los alelos representan el diámetro de la tubería misma, los cuales en primera instancia se generan aleatoriamente entre el mínimo y el máximo diámetro de tuberías permitido en el modelo. Estos individuos o cromosomas se presentan como vectores.
tipoPueblo[nn]: esta función clasifica a los individuos como aptos de acuerdo a las restricciones del sistema. Además aquí se calcula el fitness o capacidad de fortaleza del individuo.
generacionMejorada[a]: este procedimiento es un algoritmo glotón, muy sencillo e intuitivo; como su nombre lo indica mejora a los individuos de la generación.
puebloNuevo[nn]: esta función realiza la selección natural en el algoritmo genético.
Comienzo[diametro_,imprimir_]: esta función permite analizar y comparar resultados conocidos de otros trabajos. Además los resultados los imprime en archivos de texto, si la variable imprimir vale 0, imprime el primer dato; si vale 1, imprime los resultados del mejor individuo calculado.
genetico[tiempoCorrida_]: este programa contiene el cálculo de generación tras generación y también la mejora en cada generación, este cálculo depende del tiempo de corrida.
verResultados[a]: si a=1 realiza el cálculo solo con el diámetro de inicio y si a=2 realiza el cálculo para los elementos de la generación.
grafoExport[arcoDato_,a_]: esta función grafica y exporta el grafo con diámetros, con velocidad en cada arco y con caudales en cada arco.
caminoExport[a_]: esta función grafica y exporta el grafo del camino inicial ingresado como dato.
GraficaTendencia.nb: este procedimiento realiza la gráfica de los individuos aptos en cada generación y el fitness; siendo el eje X para el orden de la generación y el eje Y para el respectivo fitness.
Además realiza el gráfico de los mejores individuos en las generaciones, es decir, a medida que aparecen más individuos (generaciones) en cada una de ellas existe un individuo de menor fitness.

5. RECURSOS COMPUTACIONALES EMPLEADOS

En el trabajo realizado para encontrar una solución al problema del dimensionamiento económico de redes malladas de agua potable, se crea un algoritmo genético bajo nuevos conceptos de evolución y mutación que permite mejorar las soluciones obtenidas a partir de una solución inicial generada por el método de Hardy-Cross. Posteriormente se implementa el algoritmo genético en el Software Mathematica tipo solver y con el fin de poder ingresar los datos de una manera amigable y enlazar el kernel de Mathematica con para que el cálculo de resultados se realice en forma interna en el computador y luego sean presentados de manera visual, se implementa un módulo informático.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

1. El método de Hardy-Cross utilizado para obtener la solución inicial del problema, previo al proceso de optimización con el algoritmo genético, es un método iterativo, cuya convergencia, que es bastante rápida, depende de los caudales de hipótesis iniciales.
2. La teoría de redes presurizadas hidráulicas involucra una serie de ecuaciones de tipo empíricas, tales como las que presentan las pérdidas de carga, factores de fricción, etc., las cuales por su propia naturaleza son muy sensibles a pequeñas variaciones, por tal motivo no debe ser causa de preocupación encontrar bajo los mismos datos iniciales en cualquier aplicación del planteo de este modelo u otro similar, diferencias en los

resultados, ya que dependen básicamente de muchos coeficientes y diferentes formulaciones.
3. En lo referente a la consideración del modelo es importante concluir que las variaciones porcentuales en todas las comparaciones que se puedan realizar en este trabajo, dependen en su gran mayoría de que el modelo no considera factores como la disipación de calor en las tuberías y las pérdidas producidas en elementos como uniones y codos en las tuberías.
4. El algoritmo genético empleado en la estructura del modelo es recomendable utilizarlo en su aplicación en no más de 10 generaciones, situación que parecería contraproducente para la gran mayoría de los algoritmos genéticos. La razón radica en que el hecho de que en este algoritmo genético el cruce se lo realiza entre elementos de la población definidos como aptos y no aptos, es decir, se caracteriza porque toma elementos factibles y no factibles, lo que hace que la convergencia del problema sea mucho más rápida.

6.2. RECOMENDACIONES

1. La herramienta presentada en este trabajo permite la inclusión de un sistema integrado que pueda realizar cálculos para redes mixtas (ramificadas y malladas) y la detección de pérdidas, ya sea por fuga o por pérdidas negras, por lo que su aplicación se vuelve recomendable para empresas que estén comprometidas con el mejoramiento continuo de su gestión, basados en estos importantes factores de ahorro y control.
2. Implementar en el programa la búsqueda de buenas soluciones con la topología de red variable, es un proceso que tomaría mucho tiempo de ejecución, pero se lo puede realizar a partir de esta propuesta, es decir, continuar haciendo una heurística sencilla, partir de una topología completa de la red y luego de "optimizar", tomar la tubería con menor velocidad y suprimirla.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y ELECTRÓNICAS

[1]. http://es.wikipedia,org/wiki/Algoritmos_gen%/C3%A9ticos. Algoritmo genético – Wikipedia, la Enciclopedia Libre.

[2]. **JOSÉ MARÍA VELÁSQUEZ BERMÚDEZ, DANILO ABRIL HERNÁNDEZ, GERMÁN GAVILÁN LEÓN. PATRICIA JARAMILLO ÁLVAREZ (2003).** "*Diseño de redes de distribución de agua*" DecisionWare Ltda., Colombia jvelasquez@decisionware-ltd.com

[3]. **RAFAEL PÉREZ GARCÍA (1993).** "*Dimensionamiento óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando los elementos de regulación*". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.

[4]. **RICARDO ALFREDO LÓPEZ CUALLA (2006).** "*Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*". Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Segunda edición.

[5]. http://bases,colnodo,org.co/reloc/docs/ecuador/cendoc_ecuador02.htm. Estrategia para el manejo de los recursos hídricos del Ecuador, documento borrador para pre-talleres. Mayo de 1998.

[6]. **SHIE-YUI LIONG AND Md. ATIQUZZAMAN (2004).** "*Optimal design of water distribution network using Shuffled Complex Evolution*". Journal of the Institution of Engineers. Singapore. Vol. 44 Issue 1.

[7]. **ALPEROVITZ Y SHAMIR (1977).** "*Design of optimal water distribution systems, Water Resources*". Research, Ago., Vol. 13, No. 6, p. 885-900.