

Diseño Óptimo de Redes de Distribución de Agua Usando Un Software Basado En Microalgoritmos Genéticos Multiobjetivos

Pino V. Edwin, Valle C. Angely, Condori P. Franz, Mejia M. Jesus, Chavarri V. Eduardo & Alfaro R. Luis

To cite this article: Pino V. Edwin, Valle C. Angely, Condori P. Franz, Mejia M. Jesus, Chavarri V. Eduardo & Alfaro R. Luis (2017) Diseño Óptimo de Redes de Distribución de Agua Usando Un Software Basado En Microalgoritmos Genéticos Multiobjetivos, Ribagua, 4:1, 6-23, DOI: [10.1080/23863781.2017.1317087](https://doi.org/10.1080/23863781.2017.1317087)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/23863781.2017.1317087>



© 2017 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group on behalf of the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR)



Published online: 26 May 2017.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 8279



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

Diseño Óptimo de Redes de Distribución de Agua Usando Un Software Basado En Microalgoritmos Genéticos Multiobjetivos

Pino V. Edwin ^a, Valle C. Angely^a, Condori P. Franz^a, Mejia M. Jesus^b, Chavarri V. Eduardo^b and Alfaro R. Luis^a

^aUniversidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú; ^bUniversidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

RESUMEN

Las redes de distribución de agua son un sistema que busca llevar este líquido vital a cada usuario según la función de su uso. La infraestructura necesaria para llevar a cabo este objetivo requiere una inversión financiera significativa; por lo tanto, proveer el diseño óptimo de estas redes es muy importante. No solo el aspecto económico es primordial; además de él, hay otros como el comportamiento hidráulico, que se refiere a las presiones y velocidades máximas, la disponibilidad de tuberías, la calidad del agua, la distribución de la demanda, la fiabilidad de la red, el funcionamiento del sistema, los que complican aún más un análisis integral conducente a un diseño óptimo.

La optimización de una red de agua, por su complejidad, está asociada al problema combinatorio llamado NP-Duro, lo que significa que no es posible utilizar un método determinístico para resolverlo, sino que requiere de metodologías especiales que haciendo uso de un tiempo computacional razonable permita obtener una configuración de diámetros que cumpla con las limitaciones (velocidad y presión), así como en alcanzar valores aceptables en los objetivos que se buscan (menor costo y mayor confiabilidad). El uso de algoritmos genéticos multiobjetivos permite solucionar este tipo de problemas combinatorios NP-Duro; consecuentemente, optimiza una red de agua.

Para encontrar un conjunto óptimo de soluciones, se desarrolló un programa de ordenador llamado Magmoredes, que se basa en el uso de un microalgoritmo genético multiobjetivo, propuesto por Coello y Toscano [1], adaptado para la aplicación de redes de distribución de agua, que fue desarrollado para cumplir con las exigencias económicas, y bajo los límites de presión y velocidad según la normativa peruana. El programa de ordenador se ha desarrollado en el lenguaje de programación Java. Finalmente se procedió a comprobar la eficacia del algoritmo propuesto en la red de Hanoi (Fujiwara y Khang, [2]). Se trata de una red que tiene una sola fuente, con tres circuitos básicos, treinta y uno nodos, un reservorio y treinta y cuatro tuberías. Los nodos se encuentran en la misma elevación y no se consideran las pérdidas menores en las tuberías.

Optimum Design of Water Networks Using A Micro Software Based Genetic Algorithms Multiobjective

ABSTRACT

Water distribution networks are a system that searches for water and brings it to each user according to what they use the water for. The infrastructure needed to achieve this goal requires significant financial investment; therefore, providing the optimal design of these networks is very important. Not only is the economic aspect essential; in addition to it, there are others such as hydraulic behaviour, which refers to maximum pressures and speeds, availability of pipes, water quality, demand distribution, network reliability, system performance which further complicates an integral analysis leading to an optimal design.

The optimization of a water network, due to its complexity, is associated to the combinatorial problem called NP-HARD, which means that it is not possible to use a deterministic method to solve it, but requires special methodologies that make use of a reasonable computational processing time. This is necessary to obtain a configuration of diameters complying with the limitations (speed and pressure), as well as achieving acceptable values in the objectives (lower cost and higher reliability). Using multiobjective genetic algorithms can solve this type of NP-HARD combinatorial problems; and consequently, optimizes the water network.

To find an optimal set of solutions, we developed a computer program called Magmoredes, which based on the use of a multiobjective genetic microarray, proposed by Coello and Toscano [1], adapted for the application of water distribution networks. To comply the economic demands, under pressure and speed limits according to Peruvian regulations a program in the Java programming language was developed. Finally, verification of the proposed algorithm on the efficiency of the Hanoi water network is performed (Fujiwara and Khang, [2]). This water network has a single source with 3 basic circuits, 31 nodes, 1 reservoir and 34 pipes. The nodes are at the same elevation and minor losses in the pipes are not considered.

ARTICLE HISTORY

Received 5 May 2016
Accepted 28 November 2016

PALABRAS CLAVES

Agua; algoritmos genéticos; multiobjetivo; optimización; redes de agua

KEYWORDS

Water; Genetic Algorithm; Multi-objective; optimization; water networks

1. Introducción

Las redes de distribución de agua (RDA) están compuestas por varios elementos como son reservorios, tuberías, válvulas, entre otros, que se encuentran conectados formando un sistema que busca conducir este recurso hídrico a cada usuario final y de acuerdo a su uso (poblacional, riego, etc.). La infraestructura para cumplir este objetivo requiere de una inversión económica significativa, por lo cual el proveer un diseño óptimo económicamente es muy relevante. De igual manera son relevantes aspectos como el comportamiento hidráulico, que determinan el buen servicio, referido a presiones y velocidades máximas, la disponibilidad de tuberías, la calidad de agua, la distribución de la demanda, la confiabilidad de la red, operación del sistema, los que complican realizar un análisis integral. En la actualidad, es común el diseño clásico de redes de distribución de agua en el cual se busca cumplir el funcionamiento hidráulico, teniéndose presiones mínimas en los nodos de servicio de acuerdo a la normatividad de cada país, así como velocidades máximas de circulación en las tuberías definidas por el tipo de material. El diseño clásico no tiene en cuenta un mayor análisis en cuanto a los costos que involucran la construcción de las RDA planteadas, ni tampoco la búsqueda de una red que pueda seguir funcionando a pesar de problemas que puedan presentarse durante su tiempo de diseño, como son roturas de tuberías, variación de caudales debido a fugas, etc.

El diseño de las RDA debe realizarse desde el punto de vista económico de inversión y con base en la confiabilidad que esta pueda brindar. Por lo general, es determinado según la elección de diámetros de las tuberías que componen el sistema. Pero al tenerse en cuenta que la configuración de diámetros es una variable discreta, al haber una limitación de acuerdo a su disponibilidad comercial, guarda una relación no lineal con el resto de características de la red. Se denominan a estos problemas combinatorios NP-Duro, lo cual significa que no es posible determinarse una solución directamente debido al gran universo de soluciones (por ejemplo, una red con treinta tuberías presenta un universo de solución igual a 30!). Debido a la complejidad del problema, no es posible utilizar un único método determinístico para resolverlo.

Es así que se propone el uso de una metodología especial, como es el uso de algoritmos genéticos, los cuales permiten obtener soluciones para este tipo de problemas combinatorios (NP-Duro), inspirados en

la evolución, modelándose el problema como la estructura de datos de un cromosoma, teniéndose un grupo de soluciones iniciales (denominados pobladores) al cual se le aplica operadores como son los de selección, cruza, mutación y elitismo, a fin de obtener una nueva población evolucionada, sobreviviendo los mejores pobladores y descartando el resto.

Inicialmente los modelos de optimización se basaron en la búsqueda de la combinación de diámetros para obtener redes más económicas para satisfacer las demandas de consumo. Con el paso del tiempo se han ampliado los requerimientos de optimización. Entre los primeros trabajos que se conocen se cuenta los de Sun et al. [17]), Ilich y Simonovic [3], hasta estudios más recientes como son los de McCormick y Powell [5], Vasan y Simonovic [20]. En el caso de optimización mediante el empleo de algoritmos genéticos se posee como primeros trabajos los de Murphy y Simpson [7], Savic y Walters [16], y más recientes el de Matías [4], Pimentel et al. [11].

Los algoritmos genéticos son un campo propio y con aplicaciones generales, los cuales han ido evolucionando, siendo el más conocido NSGA (Nondominated sorting genetic algorithm), que fue mejorado con el denominado NSGA II, el cual presenta diversas variantes como puede ser el NSGA II considerando elitismo, las cuales buscan acelerar el proceso de convergencia hacia el resultado más óptimo y disminuir el tiempo de cálculo computacional.

El problema propuesto se ha modelado con base en la optimización multiobjetivo, siendo elegidos dos objetivos de solución, considerados los más importantes, los cuales son: el menor costo de la red y la mayor confiabilidad del servicio; adicionalmente, para garantizar límites de comportamiento hidráulicos, se introdujeron restricciones en cuanto a velocidad de circulación en las tuberías y la presión de servicio en los puntos de salida.

El cálculo requerido para llegar al conjunto de soluciones, a pesar de su simplificación ante el uso de algoritmos genéticos, es extenso, por lo que se ha desarrollado un programa de ordenador en lenguaje Java, llamado Magmoredes, para la búsqueda de soluciones, basado en el uso de un tipo de algoritmo genético, denominado microalgoritmo genético multiobjetivo, propuesto por Coello y Toscano [1], el cual se ha modificado y adaptado para su aplicación en redes de distribución de agua, pues el algoritmo empleado permite un menor requerimiento de memoria y de tiempo de cálculo computacional (Toscano [19]) en comparación con otras técnicas que vienen siendo

desarrolladas como son el NSGA II y PAES. El menor tiempo computacional fue fundamental en la elección del algoritmo planteado, debido a que el *software* elaborado se diseñó desde un inicio para que pueda modelar redes de cualquier tamaño, siendo su tamaño proporcional al tiempo de solución requerido, se buscó plantear el empleo de un algoritmo genético que genere el menor número de cálculos de red. El límite del tamaño máximo de la red lo define la memoria del computador (computadores con mayor memoria son cada vez más accesibles). Además, se buscó optimizar el cálculo de cada red mediante el uso del método del gradiente por su facilidad de sistematización y cálculo para computadores, a pesar de requerir un procedimiento de convergencia en la solución (alturas piezométricas y pérdidas de carga). Para el cálculo de la pérdida de carga por fricción, se empleó la ecuación de Darcy-Weisbach.

Finalmente se comprobó la eficacia del algoritmo propuesto en la red de Hanoi (Fujiwara y Khang [2]), la cual es un estándar para la comprobación de métodos de diseño de RDA, permitiendo el contraste de soluciones obtenidas. La red de Hanoi tuvo una sola fuente; con tres circuitos básicos, treinta y uno nodos, un reservorio y treinta y cuatro tuberías. Los nodos se encontraron en la misma elevación y no se consideraron las pérdidas menores en las tuberías.

La ventaja del modelo propuesto permitirá impulsar el diseño de redes de distribución de agua basadas en la optimización, debido a que se ha conseguido el empleo de un algoritmo que permite lograr resultados satisfactorios en la búsqueda de obtener redes confiables en su servicio (comportamiento hidráulico) para un costo viable, con un tiempo computacional reducido, el cual se plasmó en un *software* para el modelado de cualquier red y funcional en computadores promedio.

El *software* ha sido diseñado para ser intuitivo y claro, con el fin de ser distribuido y empleado por los diseñadores de RDA.

2. Funciones objetivo

Las funciones objetivo que se buscará optimizar son: función de confiabilidad y función de costo.

2.1 Función de confiabilidad

La función de confiabilidad es expresada por el índice de resiliencia de una red de agua (I_r) [18], que se define como la capacidad de un sistema de reacción ante un estado de esfuerzos o como el incremento de la redundancia energética y decrecimiento de la energía disipada internamente en una red. Esto se

puede representar en las RDA como la presión adicional promedio de todos los nudos sobre la presión mínima de diseño que permita soportar los decrementos de presión ocasionados al avanzar los años de vida de la red, por el aumento de la demanda de consumo de agua, aumento de rugosidad en las paredes internas de la tubería o situaciones eventuales como fugas por rotura de tuberías y consecuentes pérdidas de presión. Un alto índice de resiliencia permite tener una RDA más confiable evitando se afecte el servicio a los usuarios durante su operación. Además del índice de resiliencia propuesto por Todini [18], existen otros indicadores que permiten evaluar la confiabilidad de la red como son: la potencia unitaria de una tubería (Saldarriaga et al [15]) que representa la potencia (caudal) por la unidad de peso (presión) que pierde el fluido al cruzar por cada tramo de tubería de la RDA, el superávit mínimo de energía propuesto (Xu & Goulter [22]) que representa el mínimo exceso de presión respecto a la presión mínima de servicio en cada nodo de la RDA, entre otros. En el presente trabajo se tendrá en cuenta lo propuesto por Prasad & Park [12], los cuales adicionan al índice de resiliencia, el concepto de uniformidad de conexiones el cual se representará con el coeficiente de conectividad, debido a ser un indicador más completo que permite evaluar las RDA tanto en su redundancia por presión adicional en los nodos así como la menor variación de diámetros. El índice de resiliencia no tiene en cuenta el cumplimiento de los límites de velocidad.

El coeficiente de conectividad (C_j) representa el nivel de variación de los diámetros de las tuberías en las conexiones (nudos), siendo las redes más confiables las que representen una menor variación de diámetros. Está representada por la siguiente ecuación [1]:

$$C_j = \frac{\sum_{i=1}^{NT} NT_j D_i}{NT \cdot \max D_i} \quad (1)$$

donde C_j es el coeficiente de conectividad del nudo j ; NT_j es el número de tuberías que llegan a un nudo en particular j ; D_i es el diámetro de tubería que llega a un nudo en particular j ; $\max D_i$ es el máximo diámetro que llega a un nudo en particular j .

De los dos conceptos anteriores se puede decir que la confiabilidad final de una red de agua en función de la resiliencia y el coeficiente de conectividad [12] está dada por la ecuación [2]:

$$I_r = \frac{\sum_{j=1}^{n} nu C_j Q_j (H_j - H_j^*)}{\sum_{e=1}^{ne} ne Q_e H_e - \sum_{j=1}^{n} nu Q_j H_j^*} \quad (2)$$

donde I_r es el índice de Resiliencia; Q_j es el caudal demandado en cada nudo; Q_e es el caudal entregado

por el reservorio; H_e es el altura piezométrica del reservorio; H_j es el altura piezométrica real; H_j^* es el altura piezométrica ideal; nu es el número de nudos; ne es el número de reservorios.

2.2 Función de costo

La infraestructura para la instalación de redes de agua está sujeta principalmente al costo de las tuberías y accesorios a instalarse, los cuales varían exponencialmente de acuerdo al diámetro de la tubería así como el costo de instalación de los mismos. La función costo se puede representar por la ecuación [3]:

$$C_T = \sum_{nt}^{i=1} K_1 L_i D_i^{k_2} \quad (3)$$

donde C_T es el costo total de la red; K_1 es el constante en unidades monetarias determinada por regresión; L_i es el longitud de la tubería en particular; D_i es el diámetro de una tubería en particular; k_2 es el constante adimensional determinada por regresión; nt es el número de tuberías de la red.

3. Optimización multiobjetivo

3.1 Dominancia

Se designa dominancia de una solución sobre otra, si se cumple las siguientes condiciones:

- La primera solución es mejor que la segunda en todos los objetivos.
- La primera solución es estrictamente mejor que la segunda en al menos uno de los objetivos.

En la [Figura 1](#) se muestra las relaciones de dominancia entre un conjunto de soluciones, teniéndose en evaluación dos objetivos que tienen como límite de valores de 0 a 1, siendo 0 el mejor valor y 1 el peor. Tomando como referencia la solución mostrada en color rojo, se puede encontrar su relación con diferentes soluciones mostradas en color negro, algunas dominadas por ella, otras soluciones que la dominan y otras soluciones indiferentes, siendo el conjunto de soluciones unidas mediante la línea continua el conjunto de soluciones no dominadas, llamándose la curva del Frente de Pareto.

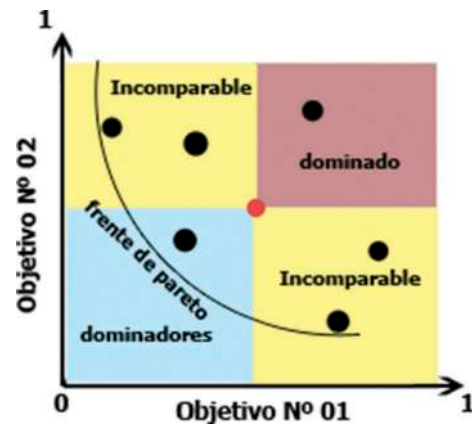


Figura 1. Relación de dominancia – Frente de Pareto.

3.2 Frente de Pareto

Para la optimización de un problema con múltiples objetivos, no existe una única solución, sino un conjunto de soluciones no dominadas, en la cual no existen soluciones mejores en todos los objetivos del problema; a este conjunto de soluciones se les denomina frente de Pareto ([Figura 1](#)), nombrado en honor al economista que lo desarrolló (Pareto [8]).

4. Microalgoritmo genético multiobjetivo (MAGMO)

El MAGMO ha sido desarrollado por Coello y Toscano [1], quienes le dan su denominación basada en que se toma una población muy reducida, fundamentada en el elitismo y la búsqueda de obtener un frente de Pareto con un menor costo computacional y con la mejor calidad en las soluciones.

Una población es un conjunto de pobladores. En el caso de las RDA, un poblador es la misma RDA. Cada poblador posee una configuración de diámetros para cada uno de sus tramos de tubería de la red.

La ventaja del método propuesto (MAGMO) frente a otros, radica principalmente en su eficacia, ya que:

El MAGMO en su concepción original ha sido modificado y aplicado a las RDA, basando su funcionamiento en los siguientes cuatro aspectos:

- La memoria de la población,
- los ciclos de Microalgoritmo Genético Multiobjetivo,
- el filtro y
- la memoria externa.

El algoritmo, se puede representar según el diagrama de la [Figura 2](#).

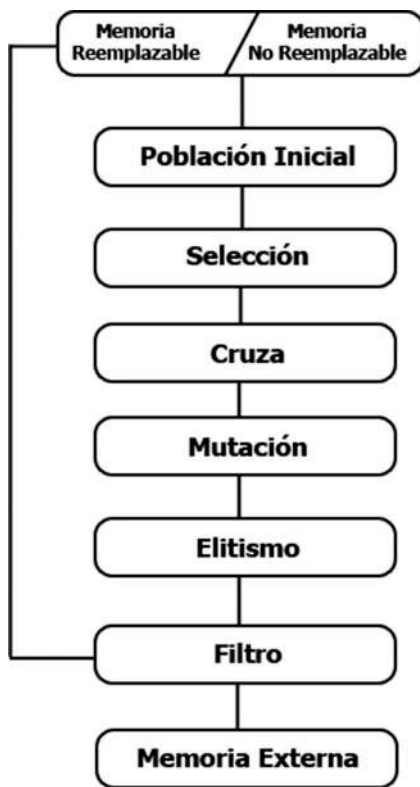


Figura 2. Diagrama del Microalgoritmo Genético Multiobjetivo. Coello y Toscano [1].

4.1 La memoria de la población

Es necesario inicializar la memoria de la población mediante la generación de pobladores. Cada poblador

es generado mediante la elección aleatoria de diámetros para cada tramo de tubería; los diámetros disponibles para ser elegidos son lo que se han definido previamente en el universo de diámetros.

La generación aleatoria de pobladores se realiza solo por primera vez, la cual es insertada en la memoria de población, y está dividida en dos partes: la memoria de población reemplazable (MPR) y la memoria de población no reemplazable (MPNR). La división se puede ver representada en la Figura 3. El número de pobladores para cada población es definido dentro de los parámetros de inicialización del MAGMO.

La MPNR no se modifica y permite mantener la diversidad de soluciones; en cambio, la MPR irá evolucionando con los ciclos del MAGMO.

Además, para cada poblador generado se realiza el cálculo de sus características hidráulicas mediante el método del Gradiente, también de sus objetivos y número de restricciones mediante el módulo respectivo. Dichos valores son almacenados como propiedades de cada poblador para usarlos directamente en los procesos siguientes y no realizar repetitivamente el proceso de cálculo (principalmente el módulo del método del Gradiente).

La memoria de población solo permitirá la inserción de nuevos pobladores en la memoria de población reemplazable mediante la sustitución de un poblador existente, cuando se cumpla la condición de que el postulante a ingresar domine al poblador existente.

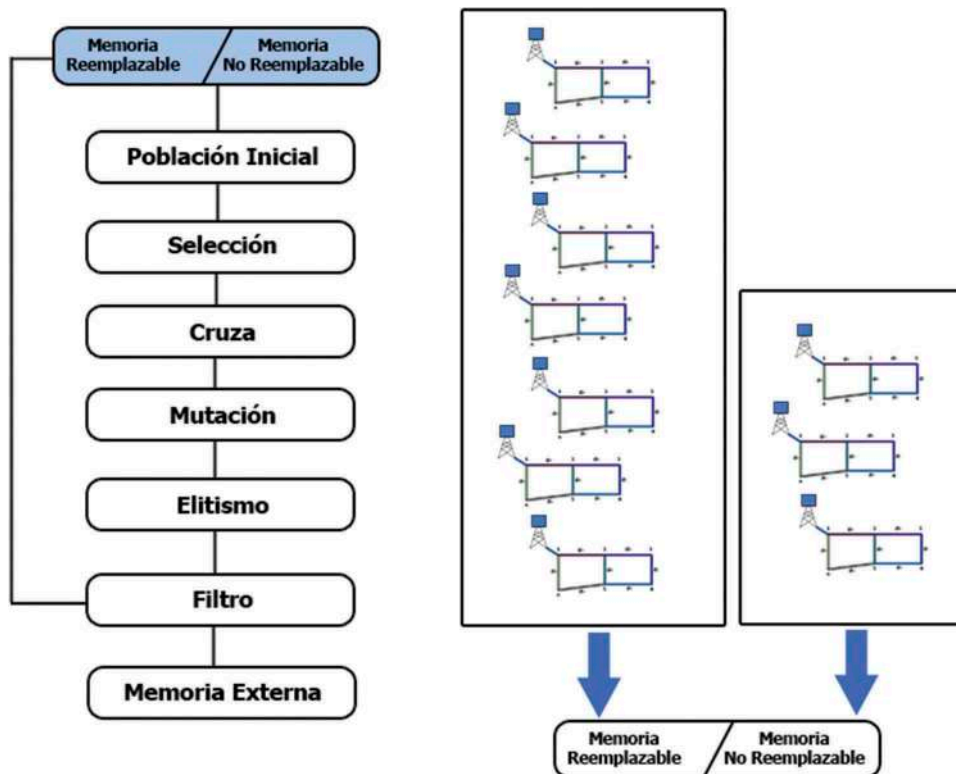


Figura 3. Diagrama del microalgoritmo genético multiobjetivo: Memoria de la población.

Para la determinación de dominancia entre pobladores, se emplea el concepto de dominancia indicado en 3.1, donde el empleo del término solución viene a ser equivalente a un poblador.

La población reemplazable irá siendo modificada continuamente, de acuerdo a los pobladores que vayan evolucionando los ciclos del microalgoritmo genético multiobjetivo.

4.2 Los ciclos del microalgoritmo genético multiobjetivo

Un ciclo de MAGMO, está compuesto por el siguiente proceso:

- Población Inicial: Para cada ciclo de MAGMO se inicializa una población, eligiendo cuatro pobladores al azar de la memoria de población, siendo la elección indistinta de si pertenece a la MPR o MPNR, lo cual está representado en la [Figura 4](#). Esta población inicial será sometida a operadores genéticos (selección, cruza, mutación y elitismo).
- Selección: Una vez determinado los cuatro pobladores, se procede a la selección de dos padres mediante la metodología de torneo, en la cual los pobladores se dividen en dos pares y cada par es sometido a contienda (ver [figura 5](#)). El ganador de cada torneo es determinado en primera instancia de acuerdo al número de restricciones incumplidas respecto a los límites de presión mínima y velocidad

máxima; siendo ganador el que tenga menor número de incumplimientos. En caso de que ambos tengan el mismo número de incumplimientos de restricciones, se pasa a una segunda instancia donde el ganador se define según el criterio de dominancia; esta es verificada de acuerdo a sus dos objetivos. Si no se puede determinar la dominancia de uno sobre otro, se elegirá al azar a uno de ellos como ganador del torneo. Del operador genético de selección, resultan dos pobladores padres. La primera evaluación del operador genético de selección basada en el incumplimiento de las restricciones, tiene en cuenta el número de incumplimientos de velocidades límite y presión mínima, más no el nivel de cada uno de ellos (la mayor o menor diferencia respecto a la presión mínima o velocidad mínima y máxima), se ha considerado de esta manera en la metodología propuesta a fin de acelerar ligeramente el proceso de convergencia hacia soluciones que cumplan restricciones pero manteniéndose en un segundo nivel de evaluación el criterio de dominancia, lo que permite no ser estrictos y evitar ocasionar un entrapamiento de la evolución, ya que el proceso de selección solo se encarga de elegir el par de padres a evolucionar en base a la MPR, siendo esta última la más importante, ya que irá evolucionando con el pasar de los ciclos del MAGMO y siendo cada vez menos importante la selección de los padres en cada ciclo puesto que la MPR irá albergando pobladores más cercanos al óptimo de Pareto.

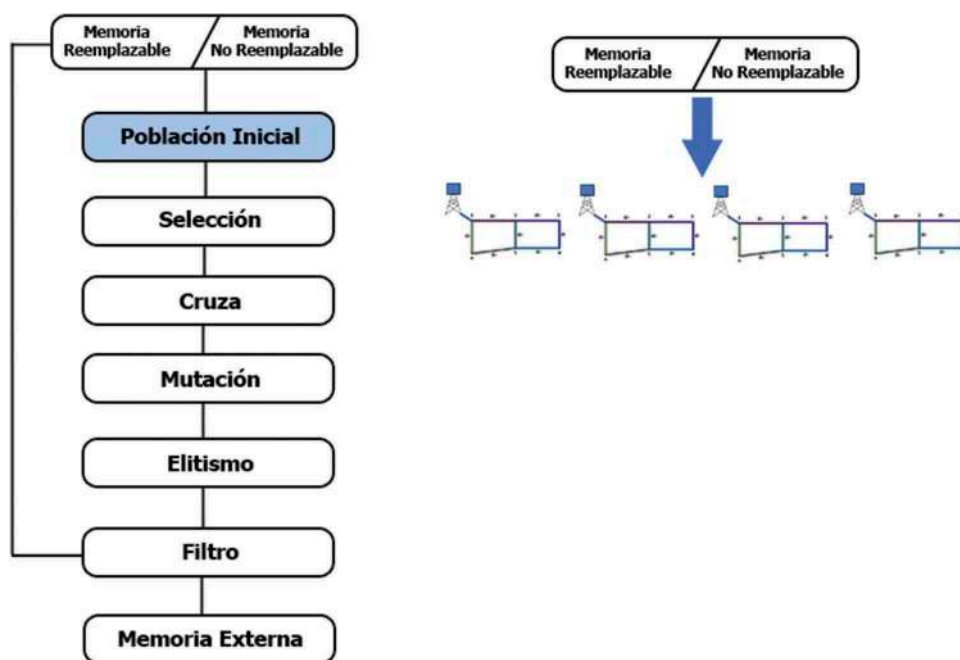


Figura 4. Diagrama del microalgoritmo genético multiobjetivo: Población inicial.

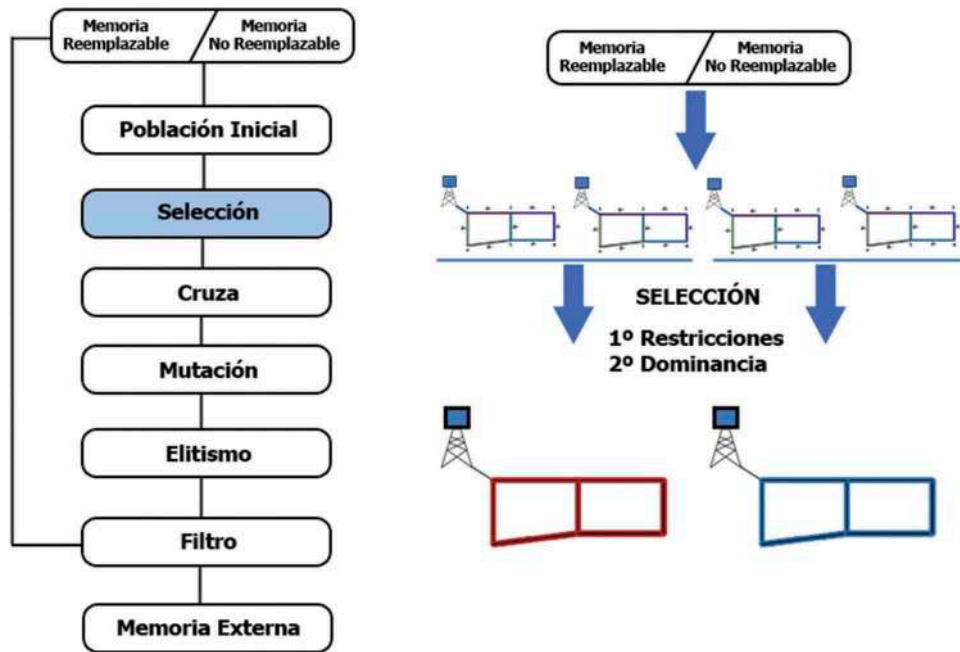


Figura 5. Diagrama del microalgoritmo genético multiobjetivo: Selección.

En los primeros ciclos del MAGMO gran porcentaje de los pobladores de la MPR incumplirán las restricciones impuestas debido a la aleatoriedad de la población inicial, además, de todo el universo de soluciones de la RDA solo un reducido porcentaje de pobladores cumplirán totalmente las restricciones, siendo el MAGMO a través de todos sus procesos en conjunto el encargado de llegar a estas respuestas óptimas a través de la evolución de los pobladores (MPR).

- Cruza: Los dos padres resultantes anteriormente, son sometidos al operador genético de cruza para la obtención de dos hijos, lo cual está representado en la Figura 6. El proceso para la obtención de un hijo consiste en la combinación de sus genes (diámetros de cada tramo de tubería). El método que se ha empleado es la combinación de N puntos aleatoria, donde para cada tramo se obtuvo un número al azar que determinó si se heredará el diámetro del padre N°

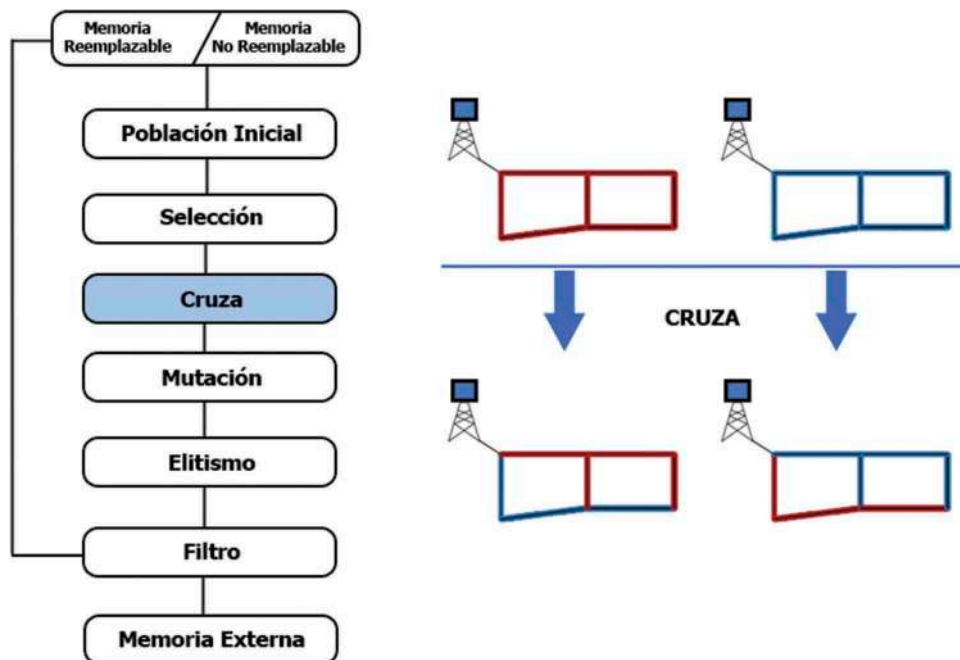


Figura 6. Diagrama del microalgoritmo genético multiobjetivo: Cruza.

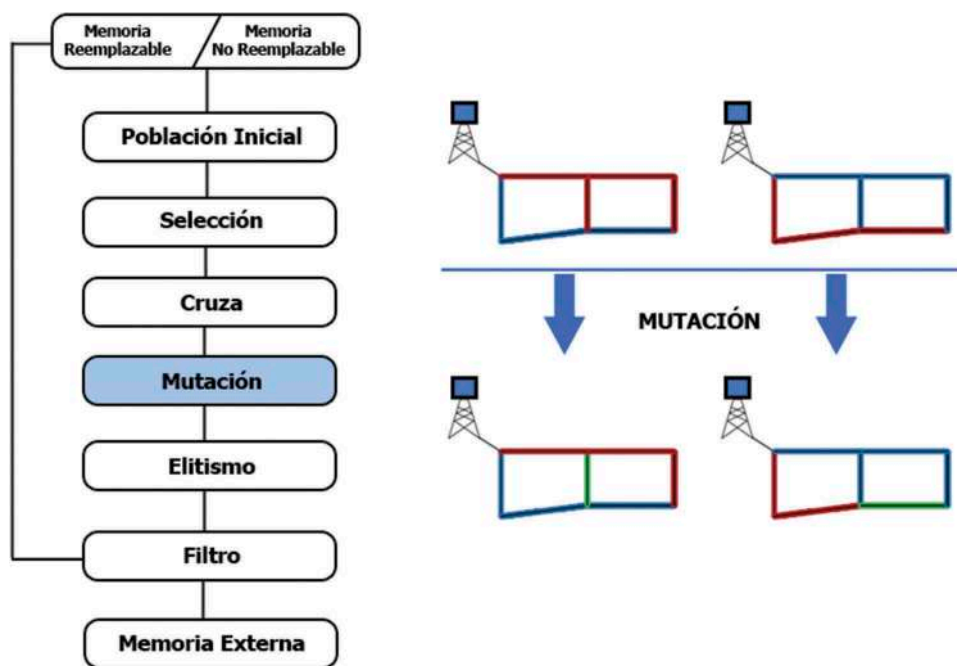


Figura 7. Diagrama del microalgoritmo genético multiobjetivo: Mutación.

- 1 o Nº 2. El proceso del operador genético se repite para la obtención de los dos hijos.
- Mutación: Completado el operador genético de cruza, los hijos resultantes serán sometidos al operador genético de mutación. Dicho operador consiste en la probabilidad de cambio aleatorio en uno de sus genes, lo que representa que el diámetro de uno de los tramos de tubería cambiará a otro que se encuentre en el universo de diámetros definido (Ver Figura 7).
 - Elitismo: Los hijos luego de ser afectados por el operador genético de mutación, son sometidos al de elitismo. Este operador determina la dominancia entre los hijos, siendo necesario para ello primero el cálculo de sus características mediante el módulo del método del gradiente γ , segundo, el cálculo de sus objetivos mediante el módulo funciones objetivos del programa realizado (Ver Figura 8).

Con los parámetros hallados se verifica la dominancia, es así que si uno de los hijos domina al otro, el dominado es eliminado, teniéndose como respuesta al dominante; en caso no se pueda determinar la dominancia de uno sobre otro, ambos se darán como respuestas del ciclo del microalgoritmo genético multiobjetivo y pasarán a los procesos de filtro y memoria externa.

4.3 El filtro

El proceso de filtro realiza la evaluación de los pobladores resultantes de un ciclo del MAGMO para su inserción en la memoria de población reemplazable. En la evaluación, se

emplea la metodología de torneo entre un poblador elegido aleatoriamente de la MPR y uno de los pobladores resultantes de un ciclo del MAGMO, lo cual se muestra en la Figura 9; dicho poblador original de la MPR solo es reemplazado en caso sea dominado en los objetivos que están en evaluación (confiabilidad y costo). Para tal efecto no se tiene en cuenta el cumplimiento de las restricciones, con el objetivo de poder dar mayor oportunidad de seguir evolucionando; y como se explicó en la definición del operador de selección, el imponer la evaluación de acuerdo al número de restricciones incumplidas, no evalúa el nivel de cumplimiento. Sin embargo, en cada ciclo los pobladores resultantes serán sometidos al proceso de memoria externa, el cual si tendrá en cuenta el cumplimiento de restricciones para el almacenaje de las soluciones.

4.4 La memoria externa

El proceso de memoria externa permite almacenar las respuestas correspondientes al óptimo de Pareto y solo si cumplen con las restricciones impuestas (Ver Figura 10). La memoria externa posee un límite de tamaño, el cual es determinado en los parámetros iniciales, así mismo estará compuesto por dos dimensiones, determinados por el número de divisiones indicadas como parámetros iniciales. Una vez concluido el proceso de guardado de las respuestas que conforman el óptimo de Pareto, se volverá a iniciar desde el proceso del ciclo de microalgoritmo genético multiobjetivo en un número de generaciones o ciclos del MAGMO determinado en los parámetros iniciales.

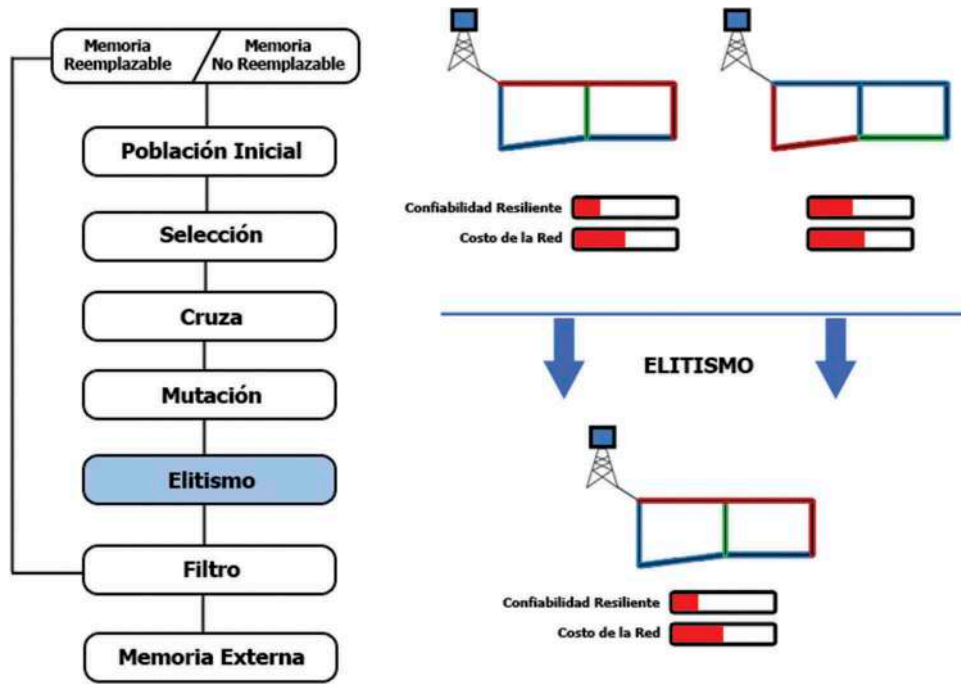


Figura 8. Diagrama del microalgoritmo genético multiobjetivo: Elitismo.

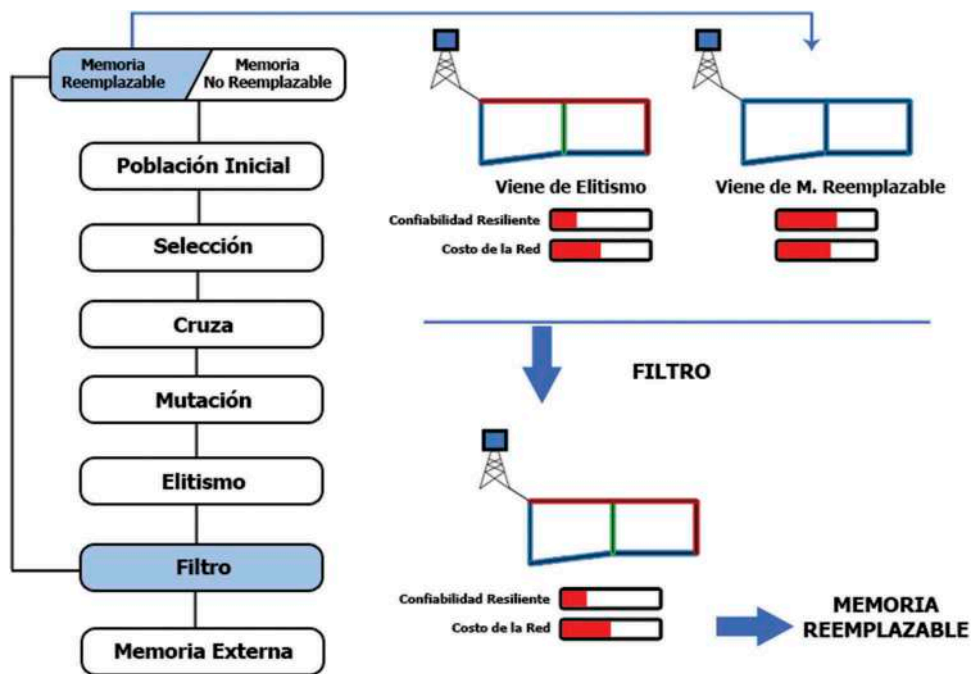


Figura 9. Diagrama del microalgoritmo genético multiobjetivo: Filtro.

5. Normatividad peruana

La normatividad peruana para el diseño de redes de distribución de agua para consumo humano está dado por el Reglamento Nacional de Edificaciones en su norma OS.050, la cual indica para la presión de servicio un mínimo de 10 m.c.a. También se indica

una velocidad máximas de 3.00 a 5.00 m/s; además, dicha normativa no indica las consideraciones para un diseño óptimo, por lo que para su aplicación en el presente trabajo se tomará solo la consideración de cumplir con una presión mínima de 10 m.c.a. en cada punto de servicio de la red.

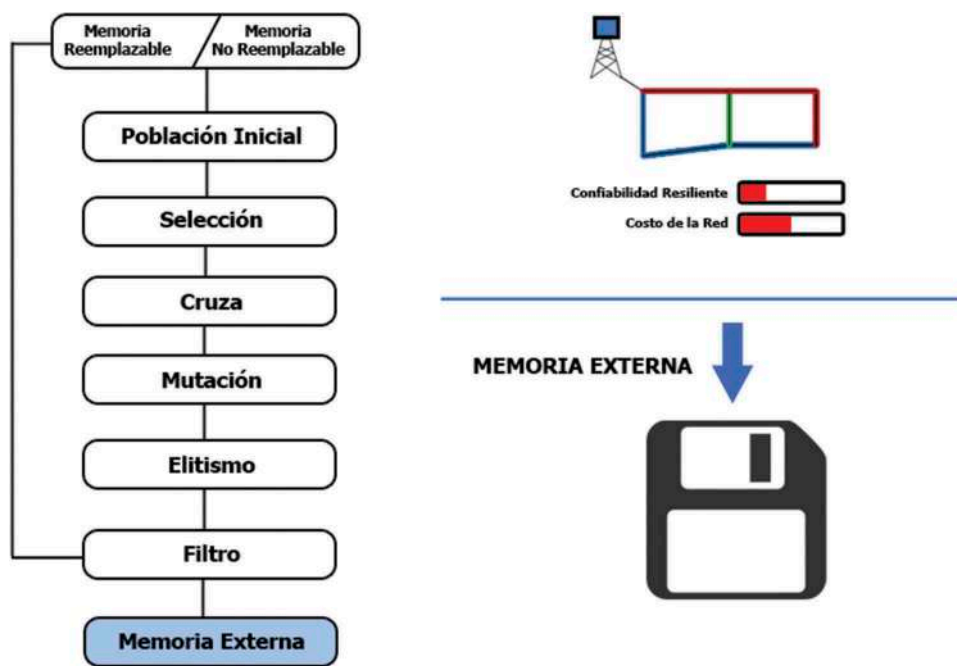


Figura 10. Diagrama del micro algoritmo genético multiobjetivo: Memoria externa.

6. Programación del magmo en JAVA

Java es un lenguaje orientado a objetos, esto quiere decir que se basa en la concepción que cada objeto es una entidad que tienen un determinado “estado” (propiedades), “comportamiento” (métodos) e identidad (identificador). El principal beneficio de Java es su funcionamiento multiplataforma, debido a que opera basado en una máquina virtual, la cual se encarga de adaptar la ejecución de la programación para cada sistema operativo.

Para el presente trabajo se han empleado diversas librerías elaboradas por terceros como son:

- SQLiteConexion: la cual permite realizar una interacción con la base de datos SQLite, que almacena tanto la información del planteamiento del problema como los resultados que se obtienen.
- ojAlgo: es una librería que permite el cálculo matemático, algebra lineal, optimización, entre otros; es gratuita y de código fuente abierto. Ha sido empleada principalmente por su potencia de cálculo matricial, en la resolución de las características hidráulicas de cada red calculada por el método del gradiente.
- JMathPlot: es una librería gratuita y de código fuente abierta, que permitió la gráfica de los resultados.

Para la programación se ha tenido en cuenta la separación en módulos, siendo los principales:

- Cálculo hidráulico: fue desarrollado por la programación del método del gradiente, el cual alimenta de información al segundo módulo en cuanto a sus funciones objetivos.
- MAGMO: este módulo se encarga de ejecutar los ciclos del MAGMO, así como llamar al primer módulo a fin de obtener los valores resultantes de la evaluación de sus objetivos.

7. Metodología de optimización propuesta en una red de agua mediante el empleo del software magmoredes

Para la comprobación del uso de la metodología, se ha planteado su aplicación en la red de Hanoi (Figura 11), que fue propuesta por Fujiwara y Khang [2]. La red de Hanoi se encuentra ubicada en Vietnam y es usada comúnmente para realizar comprobaciones sobre los métodos de diseño para RDA, permitiendo el contraste de resultados. Originalmente consta de tres mallas, treinta y dos nudos de consumo, treinta y cuatro tuberías de conducción y una única fuente de alimentación, la presión mínima requerida en los nodos es 30 m.c.a.; siendo 6 los diámetros comerciales disponibles, el número de soluciones posibles es de 6^{34} . La red de Hanoi está planteada para solucionarse por la ecuación de Hazen-Williams, con un coeficiente de rugosidad $C=130$.

Las modificaciones que se harán a la red de Hanoi original descrita son:

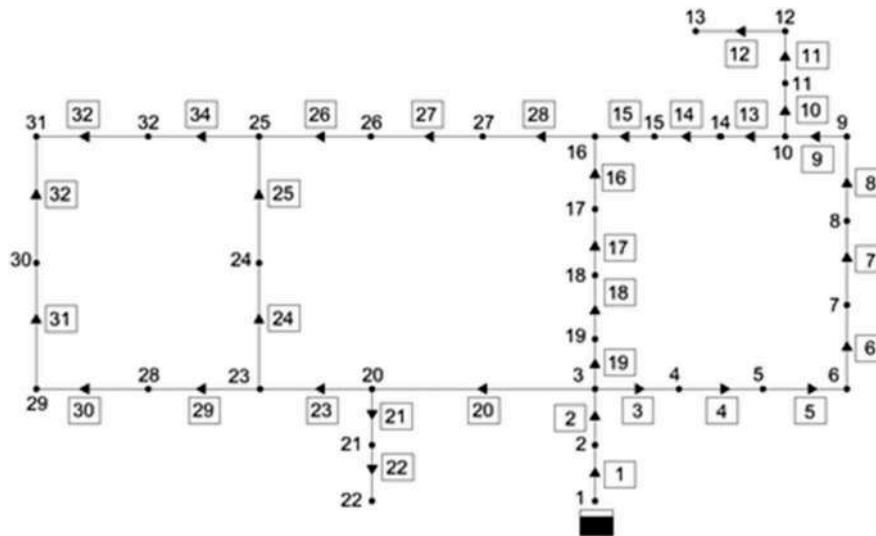


Figura 11. Red de agua planteada.

- El empleo del método de solución del Gradiente junto a las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White, en vez del empleo de la ecuación de Hazen Williams y su respectivo coeficiente de rugosidad. El valor de rugosidad absoluta considerado es de $1,5 \times 10^{-6} \text{ m}$ y viscosidad del fluido de $1,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.
- El cambio de la presión mínima requerida en los nodos por la indicada en la normativa peruana de 10 m.c.a.

Tabla 1. Longitudes de tuberías – Red planteada.

Tubería	Longitud (m)	Tubería	Longitud (m)	Tubería	Longitud (m)
1	100	13	800	25	1300
2	1350	14	500	26	850
3	900	15	550	27	300
4	1150	16	2730	28	750
5	1450	17	1750	29	1500
6	450	18	800	30	2000
7	850	19	400	31	1600
8	850	20	2200	32	150
9	800	21	1500	33	860
10	950	22	500	34	950
11	1200	23	2650		
12	3500	24	1230		

Tabla 2. Datos de los nudos – Red planteada.

Nudo	Cota	Demanda	Nudo	Cota	Demanda	Nudo	Cota	Demanda
	(m)	(m ³ /h)		(m)	(m ³ /h)		(m)	(m ³ /h)
1	100	-19940	12	0	560	23	0	1045
2	0	890	13	0	940	24	0	820
3	0	850	14	0	615	25	0	170
4	0	130	15	0	280	26	0	900
5	0	725	16	0	310	27	0	370
6	0	1005	17	0	865	28	0	290
7	0	1350	18	0	1345	29	0	360
8	0	550	19	0	60	30	0	360
9	0	525	20	0	1275	31	0	105
10	0	525	21	0	930	32	0	805
11	0	500	22	0	485			

Los datos son ingresados al *software* Magmoredes (Figura 12 y 13), el cual fue elaborado con el fin de calcular y diseñar óptimamente redes de agua. Permite el modelamiento de reservorios, nodos, tuberías, válvulas reductoras de presión y bombas; por otro lado, para el diseño, la optimización acorde a dos o tres objetivos. Para la red en estudio, se empleó la optimización según dos objetivos, por lo cual se procedió a modelar la red, ingresar los datos respectivos e iniciar el proceso de diseño.

Los parámetros para la optimización del microalgoritmo genético multiobjetivo introducidos en Magmoredes fueron los siguientes:

- Número de generaciones : 10 000
- Número de genes de los pobladores : 34
- Tamaño de memoria de población : 50
- Porcentaje de la memoria no reemplazable (%) : 25
- Tamaño de memoria externa : 100
- División malla adaptativa – Objetivo 1 : 25
- División malla adaptativa – Objetivo 2 : 25

Tabla 3. Diámetros comerciales disponibles – Red planteada.

Línea	Diámetro (mm)	Costo (\$)
1	304,8	45,73
2	406,4	70,40
3	508,0	98,38
4	609,6	129,33
5	762,0	180,75
6	1016,0	278,28

- Intervalo malla adaptativa – Historial : 1 000
- Porcentaje de mutación : 5

Los parámetros de las funciones objetivo y sus restricciones considerando alternativas de establecer función de costos por metro lineal o función de costos por coeficientes fueron los siguientes:

- Presión mínima de servicio : 10 m.c.a.
- Estimación de costo : por metro lineal de tubería
- Velocidad Máxima : 10 m/s

El *software* Magmoredes elaborado fue ejecutado en un computador con una capacidad de cómputo media, con las siguientes características:

- Procesador : Intel Core I5 3570 3.4 Ghz – 3.8 Ghz
- Memoria RAM : 8.00 GB
- Sistema : 64 bits

El proceso de optimización de la red, una vez ingresados los datos, fue de un promedio de un minuto.

8. Resultados

El resultado del procesamiento se presenta en la [Figura 14](#), la cual muestra la gráfica de la población de respuestas, además se puede observar el óptimo de Pareto basado en las soluciones que cumplen las restricciones impuestas.

Con el fin de mejorar la representación de las soluciones, la función de confiabilidad se ha transformado para ser una función de minimización, siendo el 0 el valor más óptimo; así mismo el costo de la red es representado por un coeficiente que va desde 0 a 1, que representa el menor y mayor costo posibles respectivamente.

En la [figura 15](#) se ve el proceso de evolución almacenada en la memoria externa, la cual tiende a la minimización de las funciones objetivo, siendo la última generación de soluciones la número 10 000, que arrojo un total de 60 soluciones.

Se han obtenido resultados satisfactorios, los cuales se muestran en la [Tabla 4](#), teniéndose un índice de resiliencia (confiabilidad) de hasta 0,497 y costo mínimo de \$ 4 773 755,20. Los resultados máximos fueron de 0,671 y \$ 6 072 417,00 para la confiabilidad y costo respectivamente.

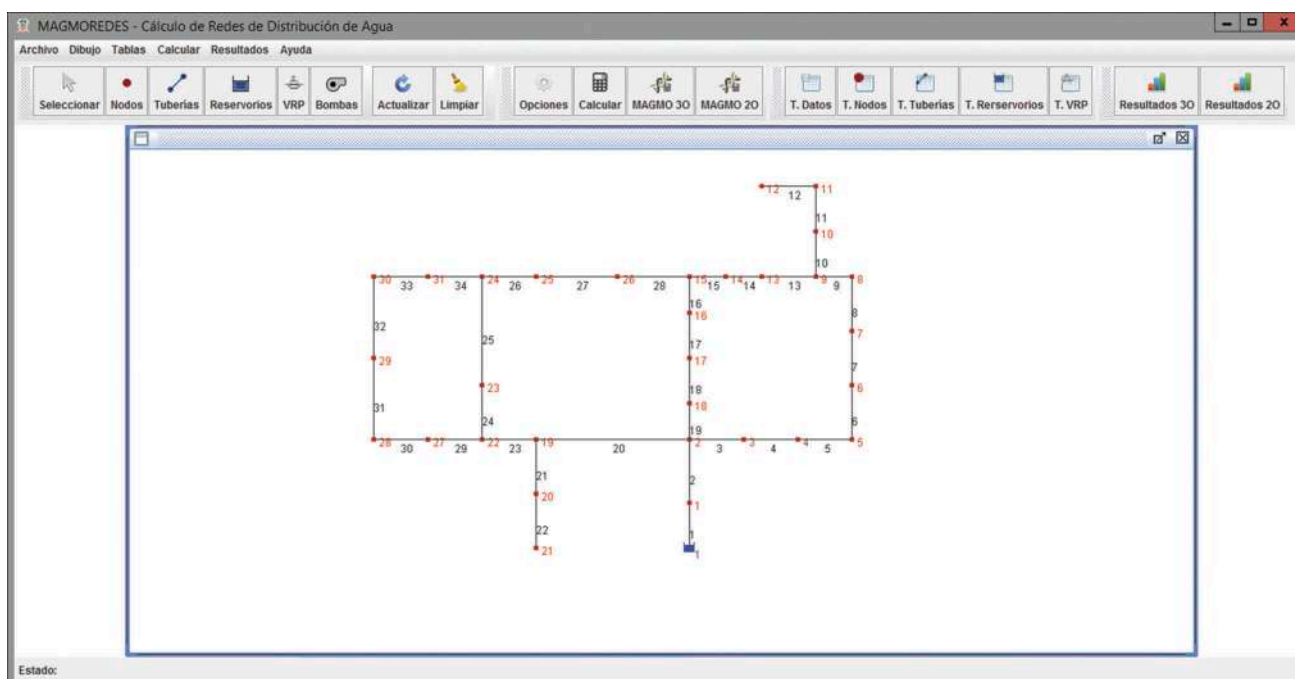


Figura 12. Ventana principal - *Software* Magmoredes.


```

609 this.OmatrizA11P = PrimitiveMatrix.FACTORY.rows(this.matrizA11P);
610 this.OmatrizA11 = PrimitiveMatrix.FACTORY.rows(this.matrizA11);
611
612 this.OmatrizHi1 =
613 ( ( (
614     (this.OmatrizA21.multiplyRight(
615         (this.OmatrizN.multiplyRight(this.OmatrizA11P.transpose())
616         ).invert()
617     )
618     ).multiplyRight(OmatrizA12)
619     ).invert()
620     ).negate()
621     ).multiplyRight(
622         (this.OmatrizA21.multiplyRight(
623             (this.OmatrizN.multiplyRight(this.OmatrizA11P.transpose())
624             ).invert()
625         )
626         ).multiplyRight(
627             (this.OmatrizA11.multiplyRight(this.OmatrizQ)).add(this.OmatrizA10.multiplyRight(this.OmatrizHo))
628             ).subtract(
629                 (this.OmatrizA21.multiplyRight(this.OmatrizQ)
630                 ).subtract(this.Omatrizq)
631             )
632         )
633     );
634
635
636 this.OmatrizQi1 =
637 (
638     (this.OmatrizI.subtract(
639         (
640             (this.OmatrizN.multiplyRight(this.OmatrizA11P)).invert()
641             ).multiplyRight(this.OmatrizA11)
642         )
643     )
644     ).multiplyRight(this.OmatrizQ)
645     ).subtract(
646         (
647             (this.OmatrizN.multiplyRight(this.OmatrizA11P)).invert()
648             ).multiplyRight(
649                 (this.OmatrizA12.multiplyRight(this.OmatrizHi1)).add(
650                     this.OmatrizA10.multiplyRight(this.OmatrizHo)
651                 )
652             )
653         )
654     );
655
656 diferenciaQ = 0;
657 for (int i=0;i<this.numTubos;i++){
658     caudalesi1Proceso[i] = this.OmatrizQi1.get(i, 0).doubleValue();
659     diferenciaCalc = Math.abs(caudalesi1Proceso[i]-caudalesTubos[i]);
660     if(diferenciaCalc > diferenciaQ){

```

Figura 13. Código fuente – Software Magmoredes.

No existió una única solución, sino un conjunto de las mismas; por lo tanto, el diseñador deberá de elegir la que considere más adecuada, apoyado en los resultados gráficos (elección preliminar) y numéricos. La elección de la red del grupo de redes resultantes finales, siempre será una red optimizada al estar ubicadas todas las respuestas en el frente de Pareto, pudiendo elegirse la que tenga el menor costo posible con la contrapropuesta de una baja confiabilidad, la de mayor confiabilidad que generaría un alto costo para su implementación, o elegir una red con características intermedias. Para la elección gráfica de los resultados permite una elección preliminar.

Basados en el último criterio mencionado, se ha tomado como respuesta la solución 1 de la Tabla 4, teniéndose un índice de resiliencia de 0,497 y un costo de \$ 6 072 417,00.

Las velocidades resultantes están fuera de lo recomendado en la norma técnica peruana (Tabla 5); sin embargo, se debe al planteamiento de la red, el cual no permite la validación dentro de un rango aceptable de velocidad para todos los tramos de tubería. Uno de los casos evidentes es la tubería N° 01, obteniéndose como respuesta el máximo diámetro posible y siendo la única y primera conexión a la salida del reservorio; alcanza una velocidad de 6,59 m/s, siendo mayor a la normativa peruana (5,00 m/s).

En la Tabla 6 se muestran los valores en los objetivos de dos investigaciones anteriormente desarrolladas donde se emplean una metodología de solución de la red de Hanoi mediante algoritmos genéticos. Se evidencia que la red resuelta por Liong y Atiquzzaman [04] tiene una mejor confiabilidad en 0,014 que la

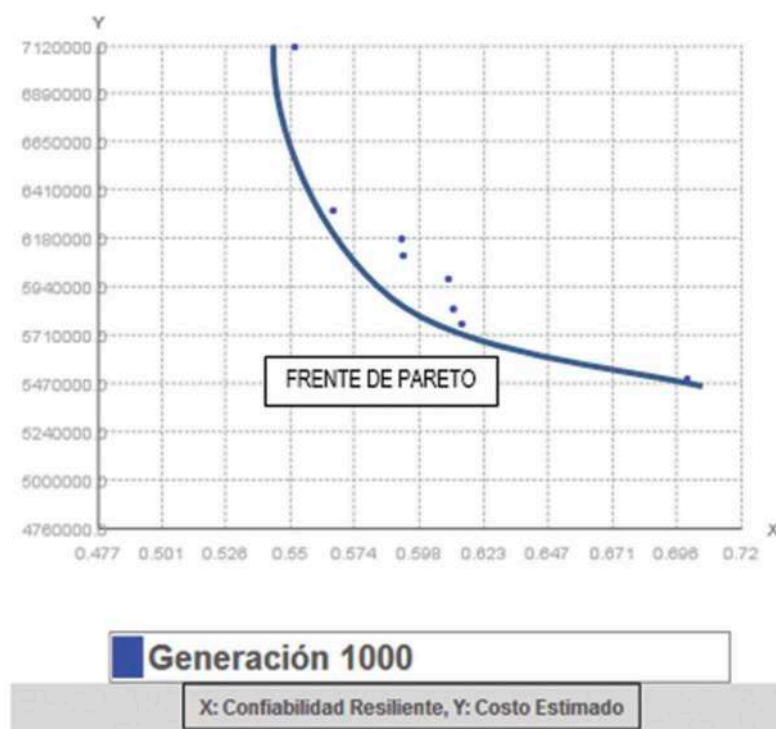


Figura 14. Población inicial y primera descendencia.

obtenida por MAGMO; pero tiene un costo mayor en 0,152 millones de dólares americanos. Comparando la solución obtenida por MAGMO con la obtenida por Lenhsnet [11], la primera tiene mejores valores de confiabilidad en 0,006 en tanto que la segunda menor costo en 0,343 millones de dólares. La confiabilidad y costo de las tres redes han sido calculados por el *software* elaborado Magmoredes, basados en los diámetros de tuberías dados como solución.

En la misma Tabla 6, se aprecia que las menores velocidades las tiene la red solución de Lenhsnet con 6,42 m/s; en segundo lugar, la solución de MAGMO con 6,59 m/s; y por último, la solución de Liong y Atiquzzaman 6,83 m/s. Si bien las metodologías de solución de las redes se han realizado con parámetros hidráulicos similares, no son iguales, pero permiten validar los resultados de la solución por MAGMO con propuestas similares.

En la Tabla 7 se muestra la comparación de las presiones resultantes en los nodos de la red de Hanoi, ante las propuestas de solución mediante MAGMO y las obtenidas por Liong y Atiquzzamn [04] y Lenhsnet [11]. Teniéndose que la presión mínima para MAGMO se da en el nodo N° 30 con un valor de 42,090 m.c.a.; en la solución de Liong y Atiquzzamn es en el nodo N° 29 con un valor de 30,05 m.c.a.; por último, en la solución de Lenhsnet en el nodo N° 29 con un valor de 30,31 m.c.a. La solución

con MAGMO ha tenido un valor de presión mínima muy por encima de las otras dos soluciones.

A diferencia de la solución de Liong y Atiquzzam, y Lenhsnet, que se resolvieron teniendo como único objetivo el menor costo de la red con las restricciones impuestas; la solución mediante MAGMO tuvo dos objetivos: el menor costo de la red y el obtener la mayor confiabilidad posible en la misma.

9. Conclusiones

El empleo de algoritmos genéticos en la solución de las RDA ha permitido lograr obtener un conjunto de soluciones, del cual el diseñador finalmente deberá decidir según su criterio la solución a adoptar, realizándose la elección dentro de un grupo de redes de distribución de agua optimizadas en confiabilidad y costo.

La utilización del MAGMO en la búsqueda del frente de Pareto, puede llegar a tener una convergencia rápida antes de la generación máxima (número de ciclos del MAGMO) indicada para el cálculo.

La utilización de modelos matemáticos para la determinación de las características hidráulicas que eran requeridas para el diseño de una RDA, se plasmó en la elaboración de un algoritmo de cálculo bajo el método del Gradiente Hidráulico, en la cual es posible introducir un número suficiente de datos,

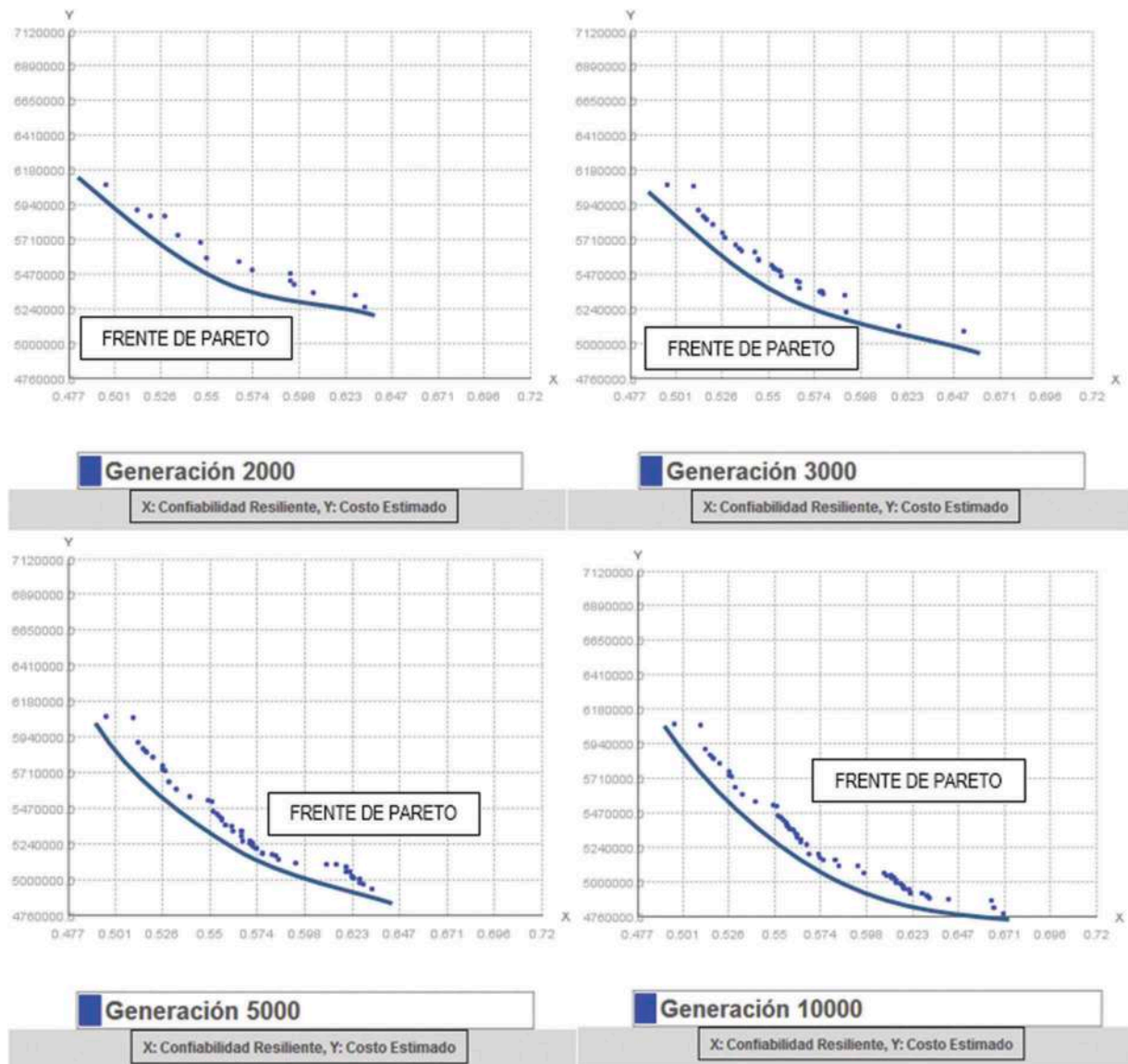


Figura 15. Evolución de los objetivos en las generaciones.

prácticamente solo limitado por la memoria del computador.

Se ha aplicado un algoritmo genético basado en dos funciones objetivos, los cuales son la minimización del costo y la maximización de la confiabilidad, teniendo como facilidad de cálculo la restricción de su universo de soluciones inicial. Esto ha generado una mejora en la convergencia de las soluciones.

El programa de cómputo elaborado permitió la optimización de la red de Hanoi, la cual es un estándar para la verificación de las metodologías de diseño. Se ha tenido resultados aceptables mediante la aplicación del MAGMO, como son una confiabilidad de la red con un valor de 0,497 (el menor valor numérico genera una mayor confiabilidad), frente a la confiabilidad de las redes de comparación de Liong y

Atiquzzaman [04] y de la metodología Lenhsnet [11], de 0,483 y 0,503 respectivamente. En la función objetivo de costo se ha obtenido una mejor solución en la comparación con los otros autores; la solución con MAGMO tiene un costo menor de 6,072 millones de dólares, en contraste con costos de 6,224 y 6,416 millones de dólares para las redes de Liong y Atiquzzam [04] y de Lenhsnet [11] respectivamente. Se concluye que se ha realizado el diseño de una red de agua optimizado en sus funciones con un costo menor a la calculada por otros algoritmos como el de Lion and Atiquzzaman [04] y Lenhsnet [11]; y con un índice de confiabilidad aceptable que es un elemento importante a tener en cuenta en el diseño de redes de distribución de agua.

La comparación de la metodología propuesta en los cálculos realizados por Liong y Atiquzzaman, y

Tabla 4. Datos de las soluciones obtenidas por MAGMO.

Nº Solución	Objetivo 01	Objetivo 02	Costo de la red (\$)	Nº Solución	Objetivo 01	Objetivo 02	Costo de la red (\$)
1	0,497	0,466	6072417,0	31	0,559	0,388	5356953,3
2	0,513	0,447	5898829,8	32	0,56	0,386	5344618,3
3	0,517	0,441	5847616,9	33	0,582	0,364	5141539,3
4	0,511	0,465	6068115,4	34	0,614	0,347	4984334,2
5	0,516	0,443	5862322,2	35	0,628	0,339	4912968,7
6	0,526	0,431	5749862,2	36	0,632	0,336	4880897,7
7	0,527	0,427	5716814,2	37	0,618	0,344	4959872,7
8	0,521	0,436	5802813,2	38	0,631	0,338	4900633,7
9	0,518	0,440	5832250,2	39	0,642	0,335	4874699,2
10	0,526	0,427	5721124,8	40	0,621	0,342	4937638,7
11	0,533	0,413	5590529,5	41	0,609	0,353	5039351,2
12	0,529	0,419	5640163,8	42	0,608	0,354	5051477,7
13	0,540	0,408	5541663,3	43	0,614	0,349	5001008,7
14	0,551	0,404	5506360,8	44	0,622	0,34	4917902,7
15	0,549	0,405	5515219,8	45	0,618	0,345	4962100,2
16	0,554	0,395	5426504,8	46	0,619	0,343	4949973,7
17	0,552	0,397	5446240,8	47	0,617	0,347	4981836,2
18	0,594	0,360	5104516,3	48	0,613	0,351	5020744,7
19	0,555	0,393	5409100,8	49	0,612	0,353	5039007,7
20	0,556	0,392	5394433,8	50	0,612	0,351	5022972,2
21	0,567	0,376	5246630,8	51	0,597	0,354	5051477,7
22	0,562	0,383	5311113,3	52	0,584	0,360	5105767,8
23	0,556	0,391	5389364,8	53	0,576	0,364	5142772,8
24	0,558	0,388	5357293,8	54	0,617	0,346	4978774,7
25	0,564	0,379	5279042,3	55	0,574	0,367	5162508,8
26	0,553	0,397	5439923,0	56	0,665	0,335	4869187,2
27	0,562	0,381	5294090,8	57	0,568	0,369	5186970,3
28	0,564	0,377	5262019,8	58	0,671	0,324	4773755,2
29	0,557	0,389	5372342,3	59	0,573	0,369	5184742,8
30	0,561	0,384	5324882,3	60	0,666	0,329	4815725,2

Tabla 5. Datos en tuberías – Red solución Nº 1.

Tubería	Diámetro (mm)	Velocidad (m/s)	Caudal (m3/s)	Tubería	Diámetro (mm)	Velocidad (m/s)	Caudal (m3/s)
1	1016	6,585	5,338	18	1016	1,559	1,264
2	1016	6,280	5,091	19	1016	2,020	1,638
3	1016	2,036	1,650	20	1016	2,041	1,655
4	1016	1,991	1,614	21	508	1,912	1,550
5	1016	1,743	1,413	22	508	1,939	0,393
6	762	2,488	1,134	23	609,6	0,666	0,135
7	609,6	2,602	0,759	24	406,	2,752	0,803
8	609,6	2,078	0,606	25	304,8	2,041	0,265
9	609,6	1,578	0,460	26	304,8	0,504	0,037
10	762	1,219	0,556	27	304,8	1,291	0,094
11	609,6	1,429	0,417	28	762	4,717	0,344
12	508	1,288	0,261	29	508	0,981	0,447
13	609,6	0,828	0,242	30	406,4	1,226	0,248
14	508	2,035	0,413	31	406,4	1,291	0,167
15	609,6	1,681	0,491	32	406,4	0,520	0,067
16	762	2,245	1,024	33	406,4	0,251	0,033
17	1016	6,585	5,338	34	609,6	0,474	0,062

Lenhsnet, permiten obtener una red de mayor costo en comparación con la obtenida por el MAGMO; para los primeros se obtiene una confiabilidad menor y para Lenhnet una confiabilidad mayor a la propuesta, además de demostrar que el empleo del MAGMO en las redes de distribución de agua es posible, pudiendo conseguirse soluciones aceptables en el campo de la optimización multiobjetivo, con costos computacionales inferiores a los usualmente empleados (Toscano [19]). El algoritmo siempre es mejorable según un análisis de los parámetros que lo conforman.

El tiempo de procesamiento depende no solo del algoritmo genético, sino de su programación, debiéndose siempre buscar la optimización del mismo, la programación en Java basada en objetos permite guardar un orden lógico para su comprensión y posibilidad de reuso. Un lenguaje multiplataforma, como lo es Java, permite la ejecución de la aplicación Magmoredes en la mayoría de sistemas operativos (Windows, Linux, MAC OS, etc).

La aplicación del *software* desarrollado Magmoredes, permite a los actuales diseñadores el uso libre y gratuito

Tabla 6. Comparación de soluciones respecto a sus objetivos.

Tubería	Diámetro Solución			Tubería	Diámetro Solución		
	MAGMO (mm)	Liong y Atiquzzaman (2004) (mm)	Lenhsnet (2009) (mm)		MAGMO (mm)	Liong y Atiquzzaman (2004) (mm)	Lenhsnet (2009) (mm)
1	1016,0	1016,0	1016,0	18	1016,0	762,0	508,0
2	1016,0	1016,0	1016,0	19	1016,0	762,0	508,0
3	1016,0	1016,0	1016,0	20	1016,0	1016,0	1016,0
4	1016,0	1016,0	1016,0	21	508,0	508,0	508,0
5	1016,0	1016,0	1016,0	22	508,0	304,8	304,8
6	762,0	1016,0	1016,0	23	609,6	762,0	1016,0
7	609,6	1016,0	1016,0	24	406,4	762,0	762,0
8	609,6	762,0	1016,0	25	304,8	609,6	609,6
9	609,6	762,0	1016,0	26	304,8	304,8	406,4
10	762,0	762,0	1016,0	27	304,8	508,0	508,0
11	609,6	762,0	1016,0	28	762,0	609,6	609,6
12	508,0	609,6	609,6	29	508,0	406,4	406,4
13	609,6	406,4	609,6	30	406,4	406,4	304,8
14	508,0	304,8	609,6	31	406,4	304,8	304,8
15	609,6	304,8	609,6	32	406,4	406,4	406,4
16	762,0	609,6	304,8	33	406,4	508,0	406,4
17	1016,0	762,0	406,4	34	609,6	609,6	609,6
					Velocidad máxima(m/s)	6,59	6,42
					Costo (millones de dólares)	6,072	6,416
					Confiabilidad	0,497	0,503

Tabla 7. Comparación de respuestas respecto a presión en los nodos.

Nodo	Presión en los nodos (mca)			Nodo	Presión en los nodos (mca)		
	Solución MAGMO	Liong y Atiquzzaman (2004)	Lenhsnet (2009)		Solución MAGMO	Liong y Atiquzzaman (2004)	Lenhsnet (2009)
1	100,000	100,000	100,000	17	69,244	48,64	31,02
2	98,071	97,14	97,14	18	71,600	54,00	44,20
3	74,219	61,67	61,67	19	73,335	59,07	55,66
4	72,240	57,54	56,28	20	69,907	53,62	51,76
5	69,811	52,43	49,59	21	63,121	44,27	42,41
6	67,412	47,13	42,45	22	62,798	39,11	37,24
7	65,411	45,92	40,73	23	51,492	38,79	46,62
8	60,083	44,55	38,60	24	43,546	36,37	42,36
9	56,558	40,27	36,85	25	42,612	33,16	34,97
10	54,555	37,24	35,53	26	45,957	33,44	30,62
11	53,413	35,68	35,14	27	58,586	34,38	30,66
12	50,906	34,52	34,86	28	48,555	32,64	40,57
13	43,411	30,32	30,65	29	42,952	30,05	30,31
14	55,172	34,08	32,45	30	42,090	30,10	30,39
15	57,645	34,08	31,58	31	42,111	30,35	30,64
16	59,191	36,13	31,01	32	42,504	31,09	32,89

de la herramienta, pudiendo así diseñarse redes óptimas sin excusa. Su distribución es de un tamaño reducido (no supera los 10 MB) y fácil de transportarse, por lo que acompañado de un manual de uso, no tendría problemas en distribuirse libremente, siendo las instituciones públicas y privadas que desarrollan proyectos de Redes de Distribución de Agua las llamadas a usarlo.

ORCID

Pino V. Edwin  <http://orcid.org/0000-0001-7432-4364>

Referencias bibliográficas

- [1] Coello C, Toscano G. "Multiobjective optimization using a micro-genetic algorithm". Proceedings of the genetic and evolutionary computation conference. México. 2001: 274–282.
- [2] Fujiwara O, Khang DB. "A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks". Water Resources Research. 1990.
- [3] Ilich N, Simonovic SP. "Evolutionary algorithm for minimization of pumping cost." Journal of computing in civil engineering. 1998: 232–240.
- [4] Liong SY, Atiquzzaman M. "Optimal design of water distribution network using shuffled complex evolution". Journal of the Institution of Engineers. Singapore. Vol.44 Issue 1. 2004.
- [5] McCormick G, Powell RS. "Optimal pump scheduling in water supply systems with maximum demand charges". Journal of water resources planning and management. 2003: 372–379.
- [6] Mendoza FL, Saldarriaga JG "Diseño optimizado de redes de distribución de agua incluyendo análisis de costo mínimo versus resiliencia de la red". XXIV

- Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay. Noviembre de 2010. XIX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Bogotá, Colombia. Abril de 2011.
- [7] Murphy LJ, Simpson AR. Pipe optimization using genetic algorithms, Research Report No. R93, Department of Civil Engineering, University of Adelaide. Australia. 1992.
- [8] Pareto V. Cours D'Economie Politique. vol. I, II. F. Rouge, Lausanne. 1986.
- [9] Peñuela CA, Granada M. "Optimización multiobjetivo usando un algoritmo genético y un operador elitista basado en un ordenamiento no dominado". (NSGA-II). Scientia et Technica. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia. 2007.
- [10] Peña JJ. "Desarrollo de un Applet en Java del micro algoritmo genético usando optimización multiobjetivo". Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida. Yucatán. 2002.
- [11] Pimentel H, Tarso S, Oliveira P, Menezes M. "Optimal dimensioning model of water distribution systems". Laboratory of Power and Hydraulics Efficiency in Water Supply, ISSN 0378-4738 = Water SA Vol. 35 No. 4, Federal University of Paraíba, Joao Pessoa, Paraíba, Brasil. 2009.
- [12] Prasad & Park, "Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks. Journal of Water Resources Planning and management. 2004.
- [13] Reglamento Nacional de Edificaciones, Norma Técnica OS 050 Redes de distribución de agua para consumo humano. Decreto Supremo N° 011-2006-Vivienda. 2006.
- [14] Rodríguez K, Fuentes O, Jiménez M, De Luna F. Diseño óptimo de redes de distribución de agua potable utilizando un algoritmo genético. Joao Pessoa, Brasil. 2006.
- [15] Saldarriaga J, Nieto L, Ochoa S, Córdoba R, García S. "Esqueletización en redes de distribución utilizando los conceptos de resiliencia y potencia unitaria". XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay. 2010.
- [16] Savic DA, Walters GA. "Genetic algorithms for least-cost design of water distribution systems". Journal of Water Resources Planning and Management, Vol 125. N° 2, 67-77. 1997.
- [17] Sun YH, WG, Yeh W, Hsu NS, Louie PW. "Generalized network algorithm for water-supply-system optimization." Journal of Water Resources Planning and Management, 392-398. 1995.
- [18] Todini E. "Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach". Urban Water. 2000.
- [19] Toscano G. "Optimización multiobjetivo usando un micro algoritmo genético". Universidad Veracruzana - LANIA, Veracruz. México. 2001.
- [20] Vasan A, Simonovic SP. "Optimization of water distribution network design using differential evolution." Journal of Water Resources Planning and Management, 136(2),279-287. 2010.
- [21] Villalba G, Saldarriaga JG, Takahashi. S "Algoritmos de optimización combinatoria aplicados al diseño de redes de distribución de agua potable". Conferencia Internacional del Agua. Zaragoza. 2005.
- [22] Xu, C., Goulter, I.C. "Reliability Based Optimal Design of Water Distribution Networks". Journal of Water Resources Planning and Management. 1999.