

Trabajo para optar por el Título de
Master en Ingeniería Hidráulica y
Medio Ambiente

Valencia, 6 de noviembre de 2008

Diseño óptimo de sistemas de distribución de agua mediante Particle Swarm



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA

Autor:

Ing. Idel Montalvo Arango

Directores:

Dr. Joaquín Izquierdo Sebastián

Dr. Rafael Pérez García

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE



Título: Diseño óptimo de sistemas de distribución de agua mediante Particle Swarm Optimization

Autor:

Ing. Idel Montalvo Arango

Directores:

Dr. Joaquín Izquierdo Sebastián

Dr. Rafael Pérez García

Este trabajo ha sido posible gracias al Ministerio de Asuntos Exteriores y Cooperación y a la Agencia Española de Cooperación Internacional, que ha concedido una beca para el autor, dentro del programa II-A, convocatoria 07-08, de las Becas MAEC-AECI, aceptando también la prórroga de dicha beca, dentro del programa II-E, convocatoria 08-09.

Los primeros pasos no hubieran sido logrados sin el apoyo del señor Rolando Armas Novoa, del Departamento de Ingeniería Civil de la CUJAE, de la Organización de Estados Iberoamericanos, del señor Gustavo Cobreiro Suárez y especialmente de los señores Pedro Pérez Carreras, Emilio García Moreno y Francisco José Morán Anglada.

Muchas de las ideas presentadas son fruto del intercambio con prestigiosos investigadores del Centro de Investigaciones Hidráulicas de la CUJAE, entre los que se destacan los doctores José Bienvenido Martínez Rodríguez y Armando D. Hernández Rossié. Una excepcional referencia utilizada fue el trabajo de la Dr. Cristina Chiong. Muy importante ha sido también el intercambio con varios investigadores del Centro Multidisciplinar de Modelación de Fluidos de la Universidad Politécnica de Valencia, que han trabajado en temas similares. De inestimable valor ha sido el consejo profesional de mis directores, Joaquín Izquierdo Sebastián y Rafael Pérez García. Ellos han sido un factor clave en el desarrollo de esta investigación. Especial mención tienen además los especialistas de varias empresas de proyecto y personalidades que gustosamente han intercambiado ideas con este autor. Para todos, el mayor de los agradecimientos.

Valencia, 25 de septiembre de 2008

...la necesidad de compaginar las intenciones es lo que hace a la inteligencia colectiva superior...

A mis padres, a Joaquín Izquierdo Sebastián, a mi adorada esposa, a mi familia,
a todos los que me han enseñado, a mis estudiantes,
a los que buscan un mundo mejor,
a los amigos, y a los enemigos.

Gladys Arango Viciado, Idelfonso Montalvo Fraga, Stefanie Angela Fenchel, Graciela Viciado, Pedro Arango Cabrera, Ana Julia Fraga, José Montalvo, Jose Antonio Montalvo Fraga, Walter Schlegel, Jutta Schlegel, Oma Else, Oma Frida, Reinhard Fenchel, Dorothy Fenchel, Rolando Armas Novoa, Departamento de Ingeniería Civil de la CUJAE, José Bienvenido Martínez Rodríguez, Armando Hernández Rossié, Cristina Chiong, Joaquín Izquierdo Sebastián, Rafael Pérez García, Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos de la Universidad Politécnica de Valencia, Mario Tavera, Pedro L. Iglesias, Angeles, Marta, Centro de Investigaciones Hidráulicas de la CUJAE, Pedro Pérez Carreras, Gustavo Cobreiro, Mari Carmen Chornet, Sabine Bachman, Doris Bachman, Carlos Luis Pérez Lantigua, Yoan Sanchez Bayona, Lisbeth Ponce de León Brídón, Melanie Martin, Rolier Cabrejas, Rolando Cabrejas, Rolando Cabrejas (hijo), Maria Esquijarosa, Julia, Alexander Reig, Graciela, Diuris Ruiseco, Alfredo Alarcón, Luis Felipe, Daniel Mora, Carlos D. Alonso, Tom Walski, Andrew Templeman, Wu, Koelle, Vicente E., Xitlali, Chucho, Miguel Sánchez, Chiara, Miguel, Manuel Herrera, Félix Dilla, Mercedes, Manuel, Viego, Linioska, Emma, María del Carmen, Celia, Danay L., Danay, Elaine, Norberto Marrero, Norberto Delgado, Driggs, Ruth Gonzalez Alonso, Carlos (programación pre), Maité Lazo, Alexis Landa, Reina, Yanelis, Bashkiria, Zenia, Miriam Mesa, Yosvany Aguila, Alberto, Wilder, Leanne, Tato, Bilideivis, Ulises Ojeda, Yanelis, Neysis, Yaima Pérez, Yakira, Nino, Yosneibis, Michael, David, Yerobis, Rosaura, Yanet Francis, Angel, Cobarrubias, Angelito, Danilo, Carlos Uranga, Yaquelin (decanato), William Cobelo, Ania Pino, Adria, Lázaro Alfredo Gutierrez, Nancy Arango, Alfredo Gutierrez, Cosset Campa, Daysi Arango, Mhya Suárez, Dayán Suárez, Kleiner, Amhed Leandro, Lázaro Terry Montalvo, Michel Planes Montalvo, Anaysis de la Rosa Montalvo, Gilberto Caraffini, Gustavo Montalvo, Gustavito Montalvo, Ayisel Montalvo, Jainelis Morales, Anadelis Montalvo, Daysi Montalvo, Idalmis Montalvo, Jorge, Alexei del Río, Yordanys, Leanne Areas, Yeni (Catalina), Luisa, Benancio, Ariel, Miguel Angel, Maximilian, Emilia, Manuela, Thomas, Angelica, Maximilian, Nanet, Stevan, Pau, Salva, Susana, Ico, Rubén Artola, Yasser, Ronnie, Eric, Yasset, Yaquelin, Harold, Daismel, Huberlandis, Evio Alegret, Rafael Pardo Gómez, Marlene Fornaguera, Marta, Maray, Luis Córdova, Elisa, Juan, Ofelia, Miguelito (GECA), Gerva, Paco, Gonzalo, Javi, Vicente, Jose, Pedro Pablo (el loco), Doris, Jose Luis, Hermes Guerra, Xiomara, Leonila, Pedro Pablo (Papo), Carmen, Jose Antonio, Piedad, Gerardo, Gonzalo, Nancy Montalvo Fraga, Daisy Montalvo Fraga, Jorge Luis Montalvo Fraga, Quintana, Kenia, El Piro, El Pata, Grosлами, Milagros, Caridad, Matías, Yaya, Isidro, José, Victor, Concha, Xenón, Juana, los Jimaguas, Ulises, Carlos, Davide, Julianne, Amparo, Luna, José Fernández, Jose Luis Huerta, Fernando Martínez, Diosdado Pérez Franco, Fernando Pérez, Enrique Cabrera, Enrique Jr., Ricardo Cobacho, Vicente, Juan Marco, Ostfeld, Nelson Díaz, la Gallega, Maciá, Miguel Enrique, Jorge (Aguas de la Habana), Ariel Ventura, Dayán, Belarmino, Mayumi, Yadisleidys, Lourdes, Dennis, Nelson, Díaz, Emil Lima, Ian, Nils, JJ, Ernesto, Gabriela, Alain Laborde, Walkiria, Luis Pelipe, Henry, Irving, la Justa, Didier, Pochet, Anadelys, Sonny, Daniel (Haití), Cynthia, Cristina, Enrique, Raidel, Roberto, Chorot, Joel Martínez, Modesto, Joel Morejón, Panqui, José Javier, Fifi, Armando Hernández Valdés, Jorge, Gladys, Edilia, Pedro, Pedrito, Olivia, Coralia, Jorgito, Gadelay, Coca, Merci, Annet, Daimaris, Samibelis, Clarita, Leanne, Mary, Isis, Paulitín, Raulito, Mariví, Concha, Cheché, Pipi, Gonzalo, Manuel, Abelito, Isabel, Rosa, Salgado, Ponce, Amparo, Raquel, Yemén, Geidys, Ruperto, Andrea, Manuel, Liudmila, Lismayvis, Liz, Carla, Roberts, Conchi, Meritxell Auleada, Meritxell Patufa, Elena, Guillem, Eva, Antonio Rogers, Jorge García-Serra, Alexander Sánchez, Cathy, Laura, Cristina, Albert Casas, Jorge Gotay, María de los Angeles, David Marón, Carlos García, Inda, Jimenez, Gisselle, Tony, Yunier, Idialis, Ingrid, Kency, Keyla, Ligia, Ludwig, Milagros Flores, Luis Oscar, Piña, Sayling, Socarrás, Romillo, Jose A. Dequero, Juanito, Madeline, Raul Santander, Rossette, Neli, José Sánchez, Tahimy, Yassiel, Fustes, Walbis, Vilma, William Campa, Michael Tung, Osbel Lugo, Orestes, Norelkis, Norma, Nieves, Oslides, Ana Julia (Guantánamo), Emilio García Moreno, Francisco José Morán Anglada, Liesner, Trujillo, Yordanka, Yanelis, Yanet, Adonis Jimenez, Tomás, Adel, Alexei, César Calabrés, Estela, Magdiel, Jacinto, Sunilda Díaz, Germán San Pedro, Dueñas, Dania, Aimee, Yanel Llanes, Evaristo Baños, Evelyn Prado, Florentino, Kaibil, Ignacio Allende, Mayelín Conrad, Guillermo, Irene Kleindorf, Manuela Hernández, Mara Rocamora, Ramón Ruano, Sjouke, Yusaima, Melina, Daimay, Daisy, Nayla, Juan Carlos, Ana Karell, Isnodis Fleitas, Yosvany Pérez, Otoniel, Peter D. Hayes, Yenilén, Yanmir, Llerena, Gema, Pili, Meredith Lafferty, Taylor Kondora y los que no están y deberían estar.

Diseño óptimo de sistemas de distribución de agua mediante Particle Swarm Optimization

Resumen

La necesidad de hacer eficientes y económicamente viables las grandes inversiones necesarias para la construcción y el mantenimiento de las redes de abastecimiento de agua, hace que se preste especial atención al diseño de este tipo de redes. Concebir soluciones económicamente optimizadas y que garanticen un adecuado funcionamiento de los sistemas de distribución de agua (SDA), tomando en cuenta la fiabilidad de la red para ofrecer sus servicios, incluso ante posibles condiciones de fallo, es uno de los grandes retos que han tenido desde hace muchos años varios hombres y mujeres de ciencias que han trabajado el tema. Se impone obtener los mayores beneficios con los menores costes.

La función objetivo a utilizar diferirá en dependencia del problema que se aborde: ampliación, rehabilitación, nuevo diseño, operación. No puede decirse que exista actualmente una única función objetivo, ni que las existentes sean definitivamente las más convenientes, incluso para abordar el mismo problema. Esto hace que se muestre útil el uso de técnicas de optimización que puedan adaptarse directamente a cualquier función objetivo.

En los últimos 10 años, varios investigadores se han desviado de las técnicas tradicionales de optimización basadas en la programación lineal y no lineal, para dirigirse hacia la implementación de Algoritmos Evolutivos. En esta investigación se proponen soluciones para el diseño óptimo de SDA basadas en el empleo de un algoritmo evolutivo conocido como Particle Swarm Optimization (PSO).

El algoritmo PSO fue desarrollado por Kennedy y Eberhart en el año 1995, y está inspirado en el comportamiento social de un grupo de pájaros migratorios tratando de alcanzar un destino desconocido. Cada pájaro está dotado de inteligencia personal pero, también, existe una comunicación gremial que da origen a la inteligencia colectiva con que se mueve la bandada. El movimiento de cada pájaro en el espacio de soluciones se calcula de acuerdo a su historial reciente, a su percepción personal y a la influencia que sobre él ejerce el líder (el pájaro que mejor posición haya encontrado en el espacio). El proceso de búsqueda se detiene luego de satisfecha alguna condición de terminación. El movimiento se realiza en un espacio multi-

dimensional con tantas dimensiones como variables tenga el problema; el vector de posición de un pájaro en dicho espacio representa una solución potencial.

El trabajo que se presenta transforma el algoritmo original PSO para que pueda ser aplicado al diseño óptimo de SDA, introduciéndose también varias mejoras que pueden ser aplicadas igualmente a problemas de diferente naturaleza al tratado en esta investigación. Estas transformaciones están basadas fundamentalmente en a) la posibilidad de trabajar tanto con variables continuas como discretas, b) el mantenimiento de la diversidad de la población de soluciones con que trabaja el algoritmo y c) el tratamiento de los parámetros involucrados, que está fundamentado en una filosofía multiagente.

El diseño de dos ejemplos de benchmarking clásicos permitió comparar los resultados del algoritmo con soluciones encontradas por otros autores. Se comprobó que, efectivamente, el algoritmo, con la introducción de las citadas modificaciones, tiene un desempeño excelente. Posteriormente, fueron resueltos otros casos que correspondían a situaciones reales de diseño. Desde el punto de vista hidráulico, las soluciones son mejoradas a partir de la introducción de una reciente formulación publicada en (Martínez, 2007) para la evaluación económica de los resultados de diseño. En el trabajo se manifiesta cómo estas mejoras posibilitan la obtención de soluciones que presentan una mayor fiabilidad en el funcionamiento ante posibles condiciones de fallo. En los ejemplos que se han abordado en este trabajo, las mejoras en la fiabilidad no implicaron un aumento excesivo de los costes de inversión inicial. Por otra parte, el enfoque multi-agente que se ha dado al algoritmo de optimización deja las puertas abiertas hacia formulaciones multi-objetivo del problema de diseño de los SDA. El mecanismo de cálculo de la propuesta de PSO, unido al motor de EPANET2 para el análisis hidráulico de soluciones, ha estado soportado por la implementación de una aplicación informática que permite a los profesionales dedicados al diseño de SDA el empleo de la investigación que se presenta en su actividad práctica.

Optimal design of water distribution system using Particle Swarm Optimization

Abstract

The investment required for construction and maintenance of water distribution systems (WDS) should be efficient and viable from an economical point of view because of the big amount of money normally being involved. One of the big challenges that engineers, mathematicians, economists and politicians have faced for years, is to find optimal solutions for the design of WDS, taking into consideration the plurality of objectives related to the problem. It is necessary to obtain the biggest benefits at the lowest costs, and solutions should be reliable enough to deal with possible failure situations in WDS.

Depending on the problem at hand (new design, expansion, rehabilitation, operation), objective functions will be different. It can be said that there is not a unique objective function, and even for the same problem, objective functions that already exist are not the most convenient. As a consequence, using optimization techniques that can be directly adapted to any kind of objective function is something very desirable to find good design solutions.

For the last decade, many researchers in the field have changed direction, leaving aside traditional optimization techniques based on linear and nonlinear programming and embarked on the implementation of Evolutionary Algorithms. In this work, design solutions of WDS are addressed by using an evolutionary algorithm known as Particle Swarm Optimization (PSO).

PSO was developed by Kennedy and Eberhart in 1995 and is based on the behaviour of a flock of birds in their endeavour to reach, when flying through the field (search space), their unknown destination (fitness function), e.g. the location of food resources. Initially a number of particles are randomly generated. Then, particles evolve in terms of their recent history, their individual perception and the social influence exerted by the leader: the bird in the best position. Flock movements are carried out in a multi-dimensional space with as many dimensions as decision variables are in the problem. In PSO, each bird of the flock can be referred to as a particle; its position vector in the multi-dimensional space represents a potential solution of the problem.

In this work, the original PSO algorithm is transformed to be efficiently applied to the design of WDS. At the same time, several modifications are proposed that improve the performance of the algorithm itself even when applied to problems of different nature. These modifications basically allow a) joint work with continuous and discrete variables, b) increase of swarm diversity and c) self-adaptive treatment of the involved parameters based on a multi-agent philosophy.

The design of two classical benchmark problems allowed comparisons among the results herein obtained and those obtained by other authors. The obtained solutions are among the best known results but required a significantly lower number of iterations. Then, other real world problems were also addressed. From a hydraulic point of view, the improvement must be directly associated to a recent formulation (Martínez, 2007) based on an economical evaluation of the design. This formulation makes it possible to embody higher reliability into the system even under certain failure conditions. Interestingly, the system improvement in terms of reliability implies only moderate increase regarding the initial investment costs. On the other hand, the multi-agent approach that permeates the optimization algorithm constitutes an open-door environment for multi-objective formulations regarding the design of WDS. The optimization mechanism together with EPANET2 engine for hydraulic analysis have been implemented in a computer application intended to provide professionals in the WDS field with a powerful tool ready to be used in real world projects.

Disseny òptim de sistemes de distribució d'aigua mitjançant *Particle Swarm Optimization*

Resum

Les grans inversions necessàries per la construcció i manteniment de les xarxes d'abastiment d'aigua, que han de ser viables i eficients, fan que es preste una atenció especial al disseny d'aquest tipus de xarxes. Un dels grans reptes a què s'han enfrontat els homes i les dones que s'han dedicat al tema és crear solucions econòmicament optimitzades que puguin garantir, a més, un funcionament adequat dels sistemes de distribució d'aigua (SDA), tenint en compte la fiabilitat de la xarxa per a oferir servei, fins i tot, en condicions de fallada. És important obtenir, amb un cost mínim, els màxims beneficis possibles.

La funció objectiu a utilitzar variarà segons el problema que s'aborde: ampliació, rehabilitació, nou disseny o operació. Actualment no es pot dir que existeix una única funció objectiu, ni que les que existeixen siguin definitivament les més convenientes, fins i tot, per a abordar el mateix problema. Això fa que siga útil utilitzar tècniques d'optimització que es puguin adaptar directament a qualsevol funció objectiu.

Durant els últims 10 anys, diversos investigadors s'han desviat de les tècniques tradicionals d'optimització, fonamentades en la programació lineal i no lineal, i s'han dirigit cap a la implementació d'algoritmes evolutius. En aquesta investigació es proposen solucions per al disseny òptim de SDA, fonamentades en la utilització d'un algoritme evolutiu anomenat *Particle Swarm Optimization* (SPO).

L'algoritme PSO, desenvolupat per Kennedy i Eberhart l'any 1995, està inspirat en el comportament social d'un grup d'ocells migratoris que es dirigeixen cap a un punt desconegut. Cadascun dels ocells té una intel·ligència pròpia, però, a més, existeix una comunicació gremial que origina la intel·ligència col·lectiva amb què es mou la bandada. El moviment de cada ocell en l'espai de solucions es calcula tenint en compte el seu historial recent, la seua percepció personal i la influència que rep del líder (l'ocell que ha trobat una millor posició en l'espai). El procés de recerca s'atura quan s'arriba a alguna condició de terminació. El moviment es du a terme en un espai multidimensional, amb tantes dimensions com variables tinga el problema. El vector de posició d'un ocell en l'esmentat espai representa una solució potencial.

Aquest treball que es presenta transforma l'algoritme original PSO perquè pugui aplicar-se al disseny òptim de SDA, alhora que s'introdueixen diverses millores que

poden ser aplicades igualment a problemes d'una natura diferent a la que es tracta en aquesta investigació. Aquestes transformacions es fonamenten, sobretot, en: a) la possibilitat de treballar amb variables contínues i discretes, b) el manteniment de la diversitat de la població de solucions amb què treballa l'algoritme i c) el tractament dels paràmetres involucrats, fonamentat en una filosofia multiagent.

El disseny de dos exemples clàssics de *benchmarking* va permetre comparar els resultats amb resultats anteriors trobats per altres autors. Es va comprovar que, efectivament, l'algoritme, amb la introducció de les citades modificacions, té un funcionament excel·lent. Posteriorment, es varen resoldre uns altres casos que corresponien a situacions reals de disseny. Des del punt de vista hidràulic, les solucions es milloren a partir d'una formulació publicada recentment (Martínez, 2007) per a l'avaluació econòmica dels resultats de disseny. En aquest treball es manifesta com aquestes millores possibiliten l'obtenció de solucions que presenten major fiabilitat en el funcionament enfront de possibles condicions de fallada. En els exemples que s'han abordat en aquest treball, les millores en la fiabilitat no varen implicar un augment excessiu dels costos d'inversió inicial. D'altra banda, la perspectiva multi-agent que s'ha donat a l'algoritme d'optimització deixa les portes obertes cap a formulacions multi-objetiu del problema de disseny dels SDA. El mecanisme de càlcul de la proposta de PSO, juntament amb el motor de EPANET2 per a l'anàlisi hidràulic de solucions, ha estat suportat per la implementació informàtica que fa que la investigació que ací es presenta, en la seua utilització pràctica, siga útil per als professionals que es dediquen al tema.

Diseño óptimo de sistemas de distribución de agua mediante Particle Swarm Optimization

Resumen extendido

Introducción.

La necesidad de hacer eficientes y económicamente viables las grandes inversiones para llevar a cabo la construcción y el mantenimiento de las redes de abastecimiento de agua, hace que se preste especial atención al diseño de este tipo de redes. Concebir soluciones económicamente optimizadas y que garanticen un adecuado funcionamiento de los sistemas de distribución de agua (SDA), tomando en cuenta la fiabilidad de la red para ofrecer sus servicios incluso ante posibles condiciones de fallo, es uno de los grandes retos que han tenido desde hace muchos años varios hombres y mujeres de ciencias que han trabajado el tema. Se impone obtener los mayores beneficios con los menores costes.

Objetivos del trabajo

Objetivo principal:

- Proponer e implementar un algoritmo para el diseño económicamente óptimo de SDA, que pueda ser utilizado en la práctica de la solución de problemas reales de diseño.

Objetivos específicos:

- Estudiar la formulación del problema de diseño económicamente óptimo de SDA, contemplando elementos relacionados con la fiabilidad de dichos sistemas.
- Proponer una formulación para evaluar económicamente los diseños de SDA, cuya fiabilidad de funcionamiento ha de tomarse en cuenta.
- Estudiar y modificar convenientemente la técnica de optimización evolutiva que se conoce con el nombre de Particle Swarm Optimization (PSO), para ser aplicada al diseño óptimo de SDA.

- Implementar en una aplicación informática, el algoritmo resultante del ensamblaje de a) las modificaciones realizadas a la PSO, b) la formulación propuesta para evaluar económicamente los diseños de SDA, y c) un simulador que permita conocer el funcionamiento hidráulico de las soluciones frente a diferentes estados de carga y condiciones de funcionamiento.
- Evaluar la bondad del algoritmo propuesto, mediante su aplicación a casos tomados de la literatura científica y a casos reales de diseño de SDA

Comentarios

El problema de optimización de sistemas SDA puede definirse como la combinación de menor coste de la disposición y dimensionamiento de sus nuevos componentes, la rehabilitación o sustitución de componentes existentes y la forma de hacer que funcione todo el sistema en su conjunto con vista a lograr la satisfacción de las demandas de agua y las restricciones de diseño, incluso bajo la ocurrencia de determinadas situaciones de fallo. En la práctica, esta optimización puede tomar muchas formas debido a que son varios los tipos de componentes que pueden encontrarse en un sistema de distribución y son diversos, además, los criterios de funcionamiento y de diseño para dichos sistemas. Por otra parte, a diferencia de otros problemas de optimización, la factibilidad de las soluciones puede ser estimada solamente luego de haber sido construida totalmente la solución, requiriéndose el uso de simuladores para poder contemplar el análisis del sistema frente a diferentes estados de carga y condiciones de funcionamiento. El método de optimización que se emplee deberá ser capaz de manejar satisfactoriamente esta singular característica.

La función objetivo a utilizar diferirá en dependencia del problema que se aborde (ampliación, rehabilitación, nuevo diseño, operación); no puede decirse que exista actualmente una única función objetivo ni que las existentes sean definitivamente las más convenientes, incluso para abordar el mismo problema. Esto hace que se muestre útil el uso de técnicas de optimización que puedan adaptarse directamente a cualquier función objetivo.

En los últimos 10 años, varios investigadores se han desviado de las técnicas tradicionales de optimización basadas en la programación lineal y no lineal, para dirigirse hacia la implementación de Algoritmos Evolutivos. Entre las ventajas que han propiciado el uso creciente de los algoritmos evolutivos en el diseño óptimo de SDA, pueden citarse las siguientes:

1. Tienen facilidades para tratar problemas de forma discreta, lo cual permite, a diferencia de otros métodos de optimización, la utilización de diámetros comerciales directamente en el diseño.
2. Trabajan sólo con la información de la función objetivo y evitan las complicaciones asociadas a la determinación de las derivadas u otras informaciones auxiliares.
3. Son procedimientos genéricos de optimización, en el sentido de que pueden adaptarse directamente a cualquier función objetivo.
4. Debido a que trabajan con una población de soluciones, podrían obtener varias soluciones óptimas, o numerosas soluciones con un valor de función objetivo cercano al óptimo, que pueden ser de gran valor desde el punto de vista de la ingeniería.
5. Se puede incluir el análisis de los sistemas frente a diferentes estados de carga, dentro del proceso de diseño óptimo.

En este trabajo se ha utilizado un algoritmo evolutivo que ha demostrado ser potente frente a la solución del problema de diseño óptimo de SDA; el algoritmo es conocido como Particle Swarm Optimization (PSO), fue desarrollado por Kennedy y Eberhart en el año 1995, y está inspirado en el comportamiento social de un grupo de pájaros migratorios tratando de alcanzar un destino desconocido. El algoritmo simula una bandada de pájaros que se comunican mientras vuelan. Cada pájaro está dotado de inteligencia personal pero, también, existe una comunicación gremial mediante la que el pájaro líder, el que está en la mejor posición, es identificado. En la simulación los pájaros evolucionan coordinadamente. La evolución de cada pájaro se calcula de acuerdo a su historial reciente, a su percepción personal y a la influencia que sobre él ejerce el líder; desde la nueva posición que alcance, investiga el espacio de búsqueda y el proceso se repite nuevamente hasta que quede satisfecha la condición de terminación del algoritmo. El movimiento se realiza en un espacio multi-dimensional con tantas dimensiones como variables tenga el problema; el vector de posición de un pájaro en dicho espacio, representa una solución potencial.

El algoritmo PSO en cuestión, ha sido modificado convenientemente para ser aplicado al diseño óptimo de SDA. La variante de la PSO que se presenta en este trabajo supera dos de los problemas clásicos del algoritmo: 1) permite la consideración de variables discretas, ya que de esa naturaleza son los diámetros involucrados en el diseño; 2) introduce diversidad añadida en la población, por lo

que permite encontrar la solución óptima o soluciones quasi-óptimas de manera mucho más eficiente. Necesitar un número menor de generaciones es esencial para sistemas reales, especialmente si se incluye fiabilidad, pues un número excesivamente elevado de ejecuciones del algoritmo y de evaluaciones hidráulicas haría inviable la solución. Los resultados obtenidos valoran muy positivamente la capacidad de convergencia del algoritmo y su capacidad de proporcionar diseños mejorados de los sistemas de distribución de agua.

Al igual que otras técnicas evolutivas, la PSO cuenta con un conjunto de parámetros, cuya acertada elección tiene una marcada influencia en la eficiencia y la convergencia del algoritmo. El ajuste de los parámetros supone una inversión de recursos inicial, que en ocasiones redundante en tediosas tareas de ensayo y error, sobre todo cuando no se tiene idea de qué valores utilizar para la solución de un problema concreto. En este trabajo se presenta una propuesta en la que el algoritmo PSO es capaz de autogestionar todos sus parámetros con excepción del tamaño de la población, permitiendo esto que el diseñador pueda desentenderse de estas tareas y se concentre mucho más en la parte del diseño en cuestión.

Con independencia de la técnica de optimización empleada, la existencia de mallas en las redes de distribución proporciona una dificultad mayor a los métodos de diseño que tratan de encontrar la variante de menor coste de inversión inicial. Estos métodos, debido a su propia naturaleza, intentan eliminar la redundancia o las mallas “innecesarias” durante la búsqueda de la variante económicamente más ventajosa cuando sólo se considera el coste de los elementos a colocar. Esto, sin dudas, limita la fiabilidad del funcionamiento de las soluciones obtenidas. Considerar explícitamente dicha fiabilidad, dentro de los métodos de optimización que pueden ser usados para diseñar SDA, es una de las tareas más difíciles a las que se enfrentan los investigadores que trabajan el tema. Una mayor fiabilidad de las redes de distribución puede obtenerse normalmente, en un sentido determinístico, proporcionando redundancia a la incorporación de mallas dentro de una red de distribución. En algunos casos el problema se ha tratado de solucionar introduciendo diámetros mínimos permisibles para las tuberías; a pesar de que esta solución garantiza que efectivamente ninguna tubería quede eliminada, la redundancia, en términos de que exista un flujo adecuado e independiente hacia cada nodo, no está garantizada, y la red resultante pudiera operar como implícitamente ramificada. Todavía son polémicas las soluciones planteadas porque no existe una metodología completamente acertada y aceptada por todos los especialistas en el tema. Son varios los intentos realizados basados en similares principios pero con alcances y objetivos diferentes. En este trabajo, se ha tomado como referencia una formulación que ha

sido publicada recientemente y que valora económicamente mucho mejor el hecho de que haya mallas en la red que permitan una mayor fiabilidad en el funcionamiento.

Aportaciones Principales

- Se ha definido un algoritmo de optimización, basado en PSO, que es capaz de trabajar de manera equilibrada con variables continuas y discretas y que puede ser utilizado en el diseño de sistemas de distribución de agua.
- Se ha implementado una aplicación informática basada en el algoritmo de optimización propuesto, que facilita el diseño de sistemas de distribución de agua.
- Se ha aplicado satisfactoriamente el algoritmo propuesto en diferentes ejemplos de benchmarking y casos reales de diseño de sistemas de distribución de agua.
- Se presentan gráficos de la probabilidad con que son obtenidas buenas soluciones, usando el algoritmo propuesto, para algunos casos de los estudiados.
- Se propone el uso de una formulación del problema de diseño óptimo de sistemas de distribución de agua que considera económicamente la fiabilidad de dichos sistemas y que trabaja satisfactoriamente con el algoritmo de optimización que se presenta en el trabajo.
- Se evidencian, a través de oportunas comparaciones, las ventajas de considerar elementos de fiabilidad dentro de la función objetivo a emplear.

Novedades Científicas

- El hecho de concebir los parámetros del algoritmo PSO como variables adicionales del problema con un tratamiento que no es diferente básicamente del mismo tratamiento que recibe el resto de las variables involucradas.
- La inclusión de una modificación del algoritmo PSO, que ayuda a resolver en buena medida las dificultades del algoritmo original para mantener niveles de diversidad adecuados en la población de soluciones potenciales con las que trabaja.

- El trabajo conjunto de la formulación propuesta para el diseño óptimo y el método de optimización utilizado.

Principales conclusiones

- El algoritmo presentado puede ser usado en el diseño óptimo de sistemas de distribución de agua reales.
- La modificación propuesta para elevar los niveles de diversidad de la población del algoritmo de optimización utilizado mejora significativamente el desempeño de dicho algoritmo.
- La auto-gestión de parámetros que se propone, constituye una gran ayuda para el proceso de optimización, principalmente cuando no se tiene idea de los valores más convenientes que deben ser usados para los parámetros.
- La función objetivo, correspondiente a la formulación propuesta del problema de optimización, permite la obtención de diseños bien concebidos en contraste con las deficiencias resultantes de considerar sólo costes de inversión inicial.

Recomendaciones para trabajos futuros

Los trabajos futuros han de ir encaminados a continuar mejorando la eficiencia del algoritmo utilizado, en el sentido de que sea alta la probabilidad de que encuentren buenas soluciones con un tiempo de ejecución lo más pequeño posible. También debe considerarse el estudio de ejemplos adicionales de diseño, que involucren el trabajo con variables continuas y discretas. El acercamiento a las condiciones y necesidades reales de diseño de los sistemas de distribución de agua es algo que no debe detenerse y ha de ser amplio el intercambio con especialistas dedicados al tema para adicionar mejoras en este sentido tanto a nivel del algoritmo empleado como a nivel de la aplicación informática resultante. Es conveniente la ampliación de las posibilidades de análisis hidráulico de las soluciones para tomar en cuenta todos los elementos o detalles que sean necesarios en las evaluaciones que se realicen. Finalmente, con el objetivo de poder solucionar grandes problemas en el menor tiempo posible, se aconseja la paralelización y/o distribución del algoritmo. Este autor se inclina más hacia una distribución y hacia el uso de computación concurrente asincrónica.

Índice

Índice

1. Introducción	25
1.1 Preámbulo	25
1.2 Estado del Arte.....	28
1.3 Objetivos.....	44
1.4 Esquema del documento	45
2. Diseño óptimo de sistemas de distribución de agua.....	49
2.1 Fundamentos teóricos del diseño de sistemas de distribución de agua.	49
2.2 Modelos matemáticos de análisis y el diseño de sistemas de distribución de agua.	56
2.3 Aspectos sobre la formulación del problema del diseño óptimo de sistemas de distribución de agua.....	60
2.4 La función objetivo.....	65
3. Algoritmo PSO y su aplicación al diseño de sistemas de distribución de agua	75
3.1 Introducción.....	75
3.2 Algoritmo PSO en el diseño de sistemas de distribución de agua.....	78
3.3 Modificaciones propuestas para el algoritmo de optimización	79
3.4 Consideraciones sobre los parámetros a utilizar.....	83
4. Casos de estudio y análisis de resultados	91
4.1 Introducción.....	91
4.2 Red de Hanoi	94
4.3 Red de New York	100

4.4 Análisis estadístico de obtención de soluciones.....	105
4.5 Elementos del comportamiento paramétrico auto-adaptativo y sensibilidad paramétrica.....	112
4.6 Red del sector 1.....	117
4.7 Red del sector 2.....	121
4.8 Red del sector 3.....	125
5. Implementación de la aplicación	131
5.1 Introducción	131
5.2 Entrada de datos	132
5.3 Opciones de cálculo	145
5.4 Salida de resultados.....	149
5.5 Principales limitaciones de la aplicación	151
6. Conclusiones y recomendaciones.....	155
Bibliografía	165

Capítulo 1. Introducción

...la perfección...No es un fin, sino un camino.

José Ingenieros

1. Introducción

1.1 Preámbulo

El alto coste asociado a los sistemas de distribución de agua ha hecho que sean grandes y numerosos los esfuerzos por obtener diseños económicamente más favorables de estos sistemas, tratando de garantizar satisfactoriamente la entrega de agua en cantidad y calidad necesarias a todos los consumidores conectados. Se impone obtener los mayores beneficios con los menores costes.

El problema de optimización del diseño de nuevos Sistemas de Distribución de Agua (SDA) es abiertamente definido como la selección de la combinación de menor coste de sus componentes y la mejor manera de operarlos de forma que queden satisfechas las demandas de agua y las restricciones de diseño, incluso bajo la ocurrencia de determinadas situaciones de fallo. En la práctica, esta optimización puede tomar muchas formas debido a que son varios los tipos de componentes que pueden encontrarse en un sistema de distribución y son diversos, además, los criterios de funcionamiento y restricciones de diseño para dichos sistemas.

A pesar de la importancia de poder optimizar el diseño de nuevos SDA, en realidad, no son muchos los casos en que debe enfrentarse el diseño de un nuevo sistema si se compara con el número de casos en los que debe enfrentarse más bien la ampliación de uno existente, la rehabilitación o, simplemente, la búsqueda de la variante de operación más conveniente que garantice un funcionamiento adecuado.

Un planteamiento más generalizado del problema de optimización de sistemas de distribución de agua puede definirse como la combinación de menor coste de la disposición y dimensionamiento de sus nuevos componentes, la rehabilitación o sustitución de componentes existentes y la forma de hacer que funcione todo el sistema en su conjunto con vista a lograr la satisfacción de las demandas de agua y las restricciones de diseño, incluso bajo la ocurrencia de determinadas situaciones de fallo.

Las restricciones que deben ser tomadas en cuenta en el problema del diseño de SDA tienen una naturaleza especial, a diferencia de otros problemas de optimización: la factibilidad de las soluciones puede ser estimada solamente luego de haber sido construida totalmente la solución, requiriéndose el uso de simuladores para poder contemplar el análisis del sistema frente a diferentes estados de carga y condiciones de funcionamiento. Consecuentemente, algunas restricciones no pueden ser explícitamente tomadas en cuenta durante la construcción de la solución.

Debe considerarse también que normalmente hay variables discretas que considerar en el problema, como es el caso de los diámetros de tubería, que varían en un rango finito y discreto de valores comerciales. Esto constituye una dificultad añadida cuando el método de optimización que se utiliza no es capaz de trabajar directamente con variables discretas. Análogamente, también tendrán dificultades añadidas los métodos que no sean capaces de trabajar con variables continuas cuando el caso lo requiera.

La función objetivo a utilizar en la optimización de sistemas de distribución de agua diferirá en dependencia de las restricciones y criterios para el diseño que se pretenda realizar y según el problema que se aborde (ampliación, rehabilitación, nuevo diseño, operación). No puede decirse que exista actualmente una única función objetivo ni que las existentes sean definitivamente las más convenientes, incluso para abordar el mismo problema. Esto hace que se muestre útil el uso de técnicas de optimización que puedan adaptarse básica y fácilmente a cualquier función objetivo, incluyendo el caso de varias funciones objetivo simultáneamente (programación multi-objetivo).

Durante la última década, muchos investigadores, incluyendo los del campo del agua, han empezado a hacer uso de modernas técnicas evolutivas de optimización, dejando atrás otros métodos más tradicionales. Refiriéndonos exclusivamente al campo del agua, los algoritmos genéticos han sido los más utilizados (Savic y Walters, 1997; Wu y Simpson, 2001; Matías, 2003; Wu y Walski, 2005), aunque también han sido incorporadas otras técnicas, como las basadas en las colonias de

hormigas (ACO, Ant Colony Optimization) (Zecchin et al., 2006; Montalvo et al., 2007a); Simulated Annealing, también denominada ‘recocido simulado’ (Cunha y Sousa, 1999); Shuffled Complex Evolution (Liong y Atiquzzama, 2004); Harmony Search o búsqueda de la armonía (Geem, 2006); Particle Swarm Optimization (PSO), basada en la inteligencia colectiva de los sistemas de partículas, (Montalvo et al., 2008d; Montalvo et al., 2008e).

El algoritmo PSO, es uno de los que ha mostrado gran potencial para resolver importantes problemas de optimización en campos muy diversos (Dong et al., 2005; Liao et al., 2007; Díaz et al., 2008; Herrera et al., 2008; Izquierdo et al., 2008a; Izquierdo et al., 2008d; Izquierdo et al., 2008e; Montalvo et al., 2008a; Montalvo et al., 2008c). Aplicado al diseño óptimo de SDA, no se encontraron referencias del uso del algoritmo PSO en el momento en que fueron publicados los primeros trabajos de este autor. La inteligencia colectiva (swarm) es una categoría relativamente nueva de algoritmo estocástico, basado en la evolución de poblaciones y que está íntimamente relacionado con los mecanismos evolutivos que imitan la evolución natural. La inteligencia colectiva se inspira en el comportamiento gremial y en la inteligencia emergente que surge de y entre los distintos agentes de una población socialmente organizada.

Entre las ventajas que han propiciado el uso incremental de los algoritmos evolutivos en el diseño óptimo de sistemas de distribución de agua, pueden citarse las siguientes:

1. Tienen facilidades para tratar problemas de forma discreta, lo cual permite, a diferencia de otros métodos de optimización, la utilización de diámetros comerciales directamente en el diseño.
2. Trabajan sólo con la información de la función objetivo y evitan las complicaciones asociadas a la determinación de las derivadas u otras informaciones auxiliares.
3. Son procedimientos de optimización generales en el sentido de que pueden adaptarse básica y fácilmente a cualquier función objetivo.
4. Debido a que trabajan con una población de soluciones, podrían obtener varias soluciones óptimas, o numerosas soluciones con un valor de función objetivo cercano al óptimo, que pueden ser de gran valor desde el punto de vista de la ingeniería.

5. Se puede incluir el análisis de los sistemas frente a diferentes estados de carga dentro del proceso de diseño óptimo.

Como producto de la naturaleza iterativa de la generación de soluciones de dichos algoritmos, estos pueden verse intuitivamente como algoritmos que continuamente buscan a través del espacio de soluciones usando eficazmente el conocimiento de las soluciones encontradas hasta el momento, para guiar la búsqueda. El comportamiento de los algoritmos evolutivos puede ser caracterizado a través de dos aspectos fundamentales (Colorni et al., 1996):

- Exploración, que es la habilidad del algoritmo para buscar ampliamente a través del espacio de soluciones.
- Explotación, que es la habilidad del algoritmo para buscar más específicamente en la vecindad local donde han sido encontradas buenas soluciones previamente.

1.2 Estado del Arte

El diseño y construcción de los sistemas de distribución de agua ha captado el ingenio y la dedicación de varios hombres de ciencias. El problema del diseño se ha resuelto cada vez de forma más abarcadora en la medida en que se han ido considerando un mayor número de aspectos en su concepción, producto de las necesidades impuestas por la vida práctica de estos sistemas. Este problema adquiere una relevancia mayor a partir de que se pretendió obtener diseños con el menor costo económico posible y que pudieran satisfacer los requerimientos necesarios para que el sistema brinde un funcionamiento adecuado.

Intuitivamente, los ingenieros han usado por años el método de prueba y error, basado en el sentido común y la experiencia, para intentar mejorar progresivamente sus soluciones. La introducción de la computación dirigida al diseño en ingeniería y el desarrollo de varias técnicas de optimización han permitido sustanciales mejoras en el proceso de búsqueda de buenas soluciones. Cuando los ordenadores apenas estaban naciendo, a inicios de la década del 50, ya eran utilizados para resolver problemas de redes hidráulicas (Walski, 2006).

Una importante propuesta en la historia del diseño óptimo de sistemas de distribución de agua fue hecha en (Alperovits y Shamir, 1977). Este trabajo se aprovechaba del uso de la computación y, según sus autores, por primera vez se

incorporaba la solución del flujo a través de la red dentro del proceso de optimización. El algoritmo que utilizaron tomaba como bases a la programación lineal y al método del gradiente; se presentaba como Linear Programming Gradient (LPG). El proceso de solución quedó dividido en dos etapas: primero determinaban qué caudal debía fluir por cada tramo de la red y luego calculaban el valor óptimo de los diámetros para el flujo encontrado en la etapa primera. Inicialmente asumían unos flujos que cumplían con las ecuaciones de continuidad en los nodos y calculaban los diámetros usando la programación lineal. El flujo era modificado usando el método del gradiente, calculándose la solución de diámetros nuevamente luego de cada modificación del flujo. En su trabajo reconocían que tras aplicar el proceso de optimización se obtenían siempre redes ramificadas, a no ser que fuera definido un diámetro mínimo para cada tramo de tubería. Estuvieron de acuerdo en que la fiabilidad de los sistemas de distribución implicaba mantener una configuración mallada de los mismos. También consideraron no conveniente forzar el diseño para que las redes mantuvieran una configuración mallada y proponían realizar futuros trabajos al respecto que incluyeran una mejor forma de expresar la fiabilidad. Debe señalarse, adicionalmente, que Alperovits y Shamir, en su trabajo ya tomaban en cuenta diferentes estados de carga a la hora de concebir sus diseños y opinaban que las decisiones de diseño (dimensionamiento de elementos) no podían separarse de las decisiones de operación.

En (Gessler, 1982), se presentaba un trabajo que apostaba por el análisis de las diferentes combinaciones de diámetros como método de diseño óptimo de sistemas de distribución de agua. Gessler criticó los métodos de optimización basados en el gradiente que no hacían un tratamiento discreto de los diámetros. Argumentó que la necesidad de traducir valores continuos del dimensionamiento de conductos en valores comerciales, en función del método que se utilice, provoca una verificación adicional del cumplimiento de las restricciones del problema y que no siempre había garantía de que realmente se obtuviese la solución de diámetros discretos más conveniente. Refiriéndose también el método del gradiente, decía que sólo podía encontrar mínimos locales, en contrapartida con el método que proponía en su trabajo, que era capaz de encontrar un valor de mínimo global. Gessler enfrentó el problema del número elevado de combinaciones de diámetros, definiendo grupos de tuberías que tendrían igual dimensionamiento. A su vez, no verificaba las restricciones para todas las posibles soluciones sino sólo para aquellas cuyo coste era menor que el de la mejor solución encontrada hasta el momento. Esta idea partía del hecho de que probar las restricciones era mucho más costoso computacionalmente que la evaluación económica de la solución. En su trabajo reconocía que la forma de

agrupar tuberías podría ser determinante en los resultados obtenidos. Por otra parte, reconocía también que incluir la consideración de diámetro cero convertía en ramificadas a las redes malladas durante el proceso de optimización, y que el agrupamiento de tuberías de igual diámetro que hacía, contribuía en alguna medida a la redundancia del sistema, evitando que en ocasiones, dependiendo de la forma en que los tubos quedaban agrupados, fueran eliminadas algunas mallas de la red. En su trabajo se hacía mención de la solución al problema de la red de New York y comparaba sus resultados con otras soluciones obtenidas utilizando el método del gradiente.

(Morgan y Goulter, 1982) incluían dentro del proceso de diseño óptimo de SDA, la búsqueda del trazado menos costoso basándose en el método de programación lineal. Opinaban que era posible incluir restricciones que impusieran la utilización de un diámetro mínimo en cada tubería para evitar la obtención de redes ramificadas en lugar de malladas, pero que estas restricciones no garantizaban la eliminación de tramos de tuberías excesivamente costosos e innecesarios. Por tanto, utilizaron como restricción que un nodo quedará conectado por al menos dos tuberías. Así su algoritmo podría eliminar los conductos innecesarios garantizando, al mismo tiempo, que no se perdiera la configuración mallada de las redes. En su trabajo no fue contemplada de manera explícita la posibilidad de que sólo la conexión topológica de los nudos no sea suficiente para garantizar un funcionamiento fiable de la red ante posibles condiciones de fallo.

Un trabajo dirigido a la evaluación de la fiabilidad en redes de distribución de agua es el presentado en (Tung, 1985). Tung presenta la descripción de varios métodos para evaluar la fiabilidad y muestra resultados numéricos para una red de ejemplo. Define la fiabilidad de los SDA como la probabilidad de que el flujo alcance a los puntos de demanda en la red. En las conclusiones de su trabajo hace un señalamiento interesante: el fallo de uno de los componentes en un SDA incrementa la carga sobre el resto de los componentes del sistema, lo cual aumenta las posibilidades de fallos de otros componentes. La solución para este señalamiento no es abordada en su trabajo.

En (Lansey y Mays, 1989) se propone un método de optimización que intenta superar las deficiencias de varios trabajos anteriores. Se utiliza, en el proceso de búsqueda de soluciones, el software de simulación de SDA KYPIPE, desarrollado en la Universidad de Kentucky (Wood, 1980). Lansey y Mays identifican tres trabajos de marcada importancia que les han precedido (Alperovits y Shamir, 1977; Quindry et al., 1981; Morgan y Goulter, 1985). Vieron, como elemento positivo en

(Alperovits y Shamir, 1977), la posibilidad de considerar varios componentes en los SDA a diseñar, pero consideraron que en ese trabajo el tamaño del sistema y el número de estados de carga a analizar estaban muy limitados, por lo que se dispusieron a mejorar este aspecto. En este sentido, reconocían los avances en (Quindry et al., 1981) para trabajar con SDA más grandes, pero criticaban de ese trabajo la imposibilidad de analizar diferentes estados de carga. Adicionalmente, se refirieron de manera positiva al trabajo de (Morgan y Goulter, 1985) con respecto a las posibilidades de analizar diferentes estados de carga, pero criticaron que sólo se podía considerar el dimensionamiento de los tubos y no de otros elementos del sistema dentro del proceso de diseño. La propuesta de Lansey y Mays estaba basada en el método del gradiente y brindaba como resultado valores de diámetros que eran continuos, frente a lo cual, argumentaban sus autores, que el método propuesto debía ser considerado como una herramienta de guía y no como una solución definitiva sin posteriores revisiones. Un elemento a resaltar en (Lansey y Mays, 1989) es que consideraban el diseño de nuevas redes y la ampliación de redes existentes, tomando en cuenta la posibilidad de incluir mejoras (limpieza o recubrimiento) en tramos de conductos en existencia. En el trabajo no se trata explícitamente el problema de la fiabilidad de los SDA, aunque la inclusión de varios estados de carga ayuda a la obtención de diseños más fiables.

Considerar explícitamente la fiabilidad del funcionamiento de las redes de distribución de agua dentro de los métodos de optimización que pueden ser usados para diseñar estas redes con el menor costo posible, es una de las tareas más difíciles a las que se enfrentan los investigadores que trabajan el tema. Una mayor fiabilidad de las redes de distribución puede obtenerse normalmente, en un sentido determinístico, proporcionando redundancia a la incorporación de mallas dentro de una red de distribución. No obstante, la existencia de las mallas proporciona una dificultad mayor a los métodos de diseño que tratan de encontrar la variante de menor coste, los cuales, debido a su propia naturaleza, intentan eliminar la redundancia o las mallas innecesarias durante el proceso de solución (Templeman, 1982). En varios casos, el problema se ha tratado de solucionar introduciendo diámetros mínimos permisibles para las tuberías. A pesar de que esta solución garantiza que efectivamente todas las tuberías queden habilitadas, la redundancia, en términos de que exista un flujo adecuado e independiente hacia cada nodo, no está garantizada, y la red resultante pudiera operar como implícitamente ramificada. Este problema se intentó resolver con un mejor grado de aproximación, distribuyendo inicialmente los gastos que circularán por cada una de las tuberías de la red. (Chiong, 1982) propone una solución para la distribución óptima de flujos en la red que luego

es utilizada para la obtención de los diámetros económicamente más favorables. Los modelos de (Rowell y Barnes, 1982) y (Morgan y Goulter, 1985) solucionan el problema de la redundancia parcialmente a partir de la consideración de un amplio rango de condiciones de carga y combinaciones de fallo de tubería de forma que cada tubo, en al menos una condición de diseño, forme parte del camino que recorre el flujo. El mejoramiento en las condiciones de redundancia que aporta este método implica un alto coste computacional. A pesar de todo, todavía faltaban factores críticos por tomar en cuenta en la forma en que estos modelos consideraban la fiabilidad de la red, ya que esta no sólo estaría determinada por la probabilidad de que falle alguno de sus elementos sino, también, entre otras razones, por la probabilidad de que en algún momento la demanda de agua exceda el valor que fue asumido para el diseño.

La experiencia en el diseño de las redes de distribución conducía cada vez con más fuerza a que se introdujeran aspectos relacionados con la fiabilidad del funcionamiento de la red. Goulter y Coals desarrollaron en (Goulter y Coals, 1986) dos intentos cuantitativos para incorporar medidas de fiabilidad que se apoyaban en la programación lineal para la obtención de las soluciones económicamente más ventajosas. El primer intento se dirige a separar un nodo a través de simultáneos fallos en todas las tuberías directamente conectadas a él. Este intento tiene una debilidad teórica puesto que considera que un nodo es capaz de proporcionar un suministro adecuado siempre que exista al menos una tubería que lo una a la red, lo cual es un razonamiento demasiado optimista. El segundo intento trata de reconocer la redundancia a través de la minimización de las desviaciones en la fiabilidad de todos los tubos conectados a cada nodo de la red. En ambos casos, la probabilidad de fallo de un tubo individual se modela usando la distribución de probabilidad de Poisson.

En (Goulter y Bouchart, 1990), tomando como base las ideas de (Alperovits y Shamir, 1977), se propone una metodología que incorpora consideraciones sobre la fiabilidad de la red dentro de un modelo de diseño que optimiza económicamente redes de distribución de agua. En esencia, la metodología se basa en ir haciendo cambios en la red mientras la fiabilidad de la misma no sea satisfactoria. El modelo de optimización toma como restricción la probabilidad de fallo en cada tubo y la probabilidad de que existan mayores demandas que las de diseño en cada nodo. Ambas probabilidades se combinan dentro de una única medida de fiabilidad: la probabilidad de que no haya fallo en un nodo.

(Duan et al., 1990) propone un método de optimización que contempla el diseño de las tuberías y la determinación del número, localización y dimensionamiento de tanques y bombas, considerando elementos de fiabilidad. El fallo mecánico de los tubos no fue tomado en cuenta; sólo fueron considerados posibles fallos en bombas y tanques. El problema de diseño óptimo es dividido en dos partes: la primera y más general es donde se determinan los aspectos relacionados a las bombas y los tanques; en la segunda se resuelve la obtención de la red más conveniente económicamente. La primera parte es concebida como un modelo de programación entera que es resuelto por enumeración. El subproblema de dimensionamiento de la red es resuelto a partir del método del gradiente. En el trabajo se utilizó el programa KYPIPE para realizar el análisis hidráulico de las posibles soluciones. Según los autores, por primera vez se presentaba una propuesta basada en la fiabilidad del efecto significativo que tenía el número y dimensionamiento de las bombas en los sistemas de distribución de agua. Entre las conclusiones del trabajo se menciona que la optimización que sólo busca la variante de menor coste no garantiza por sí misma la fiabilidad del funcionamiento de la solución obtenida. También se plantea que los diferentes requerimientos de fiabilidad que puedan usarse causarán diferencias significativas en el coste de la solución obtenida, por lo que se requiere tomar en cuenta un aceptable requerimiento de fiabilidad para acometer los diseños.

También en el año 1990, se presenta en (Bao y Mays, 1990) un modelo para evaluar la fiabilidad de sistemas de distribución de agua que podía ser utilizado dentro de los procesos de optimización. La metodología de cálculo estaba basada en la simulación de Monte Carlo para la evaluación de la fiabilidad. En este trabajo se tomaron en cuenta, a diferencia de otros que le antecieron (Tung, 1985; Quimpo y Shamir, 1987), las incertidumbres asociadas a las demandas futuras y a los valores de rugosidad de las tuberías. Los autores argumentan que ignorar estas incertidumbres podría causar una sobreestimación de la fiabilidad real que tiene un sistema y que su metodología podía ser expandida para que se consideraran otros elementos como válvulas, bombas y tanques.

La fiabilidad y la flexibilidad en cuanto a las condiciones de fallo son aspectos implicados con la redundancia de las redes de distribución de agua, según se plantea en (Awumah et al., 1991). Estos autores consideran que, en su sentido más fundamental, la redundancia en una red de distribución de agua se entiende como la característica de la red que permite que los puntos de demanda tengan caminos alternativos de suministro de agua en caso de que alguna de las tuberías de la red quede fuera de servicio. El diseño de las redes de distribución de agua generalmente debe incluir cierta cantidad de redundancia para asegurar la fiabilidad de la red.

Tradicionalmente, esta redundancia se manifiesta por la provisión de mallas en lugar de ramas en la red. La enumeración de todos los posibles caminos completamente independientes y parcialmente dependientes, desde un punto de demanda hasta la fuente, no es práctica desde el punto de vista computacional. La interacción entre las tuberías, el grado en que las tuberías contribuyen al suministro de un nodo y la multiplicidad de los caminos candidatos son factores que pueden aumentar considerablemente el número de soluciones candidatas, al punto de hacer inviable el análisis de todas ellas. Estos autores han expuesto una medida de la redundancia inherente al trazado de la red de distribución de agua, desarrollada usando una aproximación axiomática basada en las propiedades de redundancia deseada. La redundancia local en un nodo y la redundancia consecuente de nodos adyacentes (redundancia global) son consideradas dentro de la medida. El trabajo realizado estuvo dirigido a la cuantificación de la fiabilidad a partir de la redundancia existente, de forma que se pueda tener una medida que efectivamente pueda ser usada en el diseño de redes de distribución. Esta medida de redundancia se utilizó dentro de una formulación de optimización económica, sustituyendo la restricción del diámetro mínimo de tubería por la restricción de un mínimo valor de entropía que manifestaba la redundancia en el sistema; la formulación realizada limitaba la consideración de la fiabilidad/redundancia al fallo de tuberías, aunque hay otros elementos como las bombas y el almacenamiento, por ejemplo, que debieron ser considerados. Por otro lado, el trabajo mostró una forma de evaluar la redundancia en una red de distribución, pero no deja claro el valor de redundancia con que deberían diseñarse los sistemas de forma óptima. En el trabajo se muestra para un caso de estudio, que los diseños con mayores valores de entropía presentaban un número más elevado de mallas y, por tanto, una mayor redundancia, lo cual era interpretado como un primer paso para obtener diseños más fiables. El uso de la expresión de redundancia posibilitaba que se obtuviera una solución conveniente de flujos en la red a partir de la cual se obtendría el dimensionamiento óptimo de los elementos que la constituyen.

(Quimpo y Shamsi, 1991) muestra el cálculo de una superficie de fiabilidad a partir de las probabilidades de que el agua esté disponible en los diferentes puntos de demanda del sistema, usando la fiabilidad de los componentes individuales de la red y de la red en general basada en conceptos de conectividad con variación en el tiempo. Esta superficie se calculaba con el objetivo de localizar las áreas con una baja fiabilidad, lo que podía identificar en un sistema las partes que necesitaban prioridad en el mantenimiento. En una red existente, los componentes específicos que necesitaban ser reparados o reemplazados se podían determinar usando un

criterio de importancia del componente que mide el efecto de su reparación sobre todo el sistema. El procedimiento fue aplicado a un sistema de distribución de agua hipotético y a otros dos sistemas reales. La idea básica de estos autores fue definir un nivel de fiabilidad del sistema que sea económicamente aceptable, y que se realicen tareas de mantenimiento y reparación a partir de que el sistema esté por debajo de ese nivel. La aplicabilidad de la técnica es clara y ha sido demostrada, pero en ella se utilizan como datos el tiempo en que puedan fallar y el tiempo en el que deben ser reparados los componentes de los sistemas de distribución de agua en dependencia de su durabilidad. Estos valores son estimados y no son concluyentes puesto que todavía han de realizarse estudios al respecto. Por otro lado, el punto más débil está en que los autores analizan la fiabilidad de un sistema de distribución relacionada con que siempre exista al menos un camino para llevar el agua desde los puntos de suministro hasta los puntos de demanda en la red, y no se analiza que la fiabilidad también está determinada por la llegada de la cantidad de agua requerida, confiable y con la presión necesaria a los puntos de demanda. Esto, sin duda, ofrece una limitante básica.

(Cullinane et al., 1992) plantea un modelo de optimización basado en la disponibilidad, tanto de los elementos del sistema de distribución desde un punto de vista físico, como del agua necesaria en caso de que se produzca un incremento de la demanda. La metodología propuesta es una extensión de (Lansey y Mays, 1989) y permite sea incluido el análisis de los fallos físicos en cualquier tipo de componente de los SDA (tanques, bombas, tuberías).

(Jowitt y Chengchao, 1993) brinda una vía práctica de estimar el impacto de varias condiciones de fallo de tuberías en redes de distribución de agua. Sus autores estimaron la vulnerabilidad de la red en cuanto al fallo de una de sus tuberías y proporcionaron una idea cuantitativa del impacto que se produce en los nodos de demanda, así como del funcionamiento después del fallo de los nodos fuentes y las tuberías. La implementación del método que propusieron sólo requiere conocer la configuración de la red y un conjunto de elementos relacionados con el funcionamiento que pueden ser obtenidos del análisis de la red intacta. En el método se ha evitado cubrir todas las posibles condiciones de fallo. Los resultados pueden ser combinados con las probabilidades de fallo de tubería para proporcionar una medida de la fiabilidad de la red.

(Ostfeld y Shamir, 1996) contempla tres aspectos diferentes incorporados en un mismo esquema para el diseño óptimo de sistemas de suministro de agua por los que circulan aguas con calidades diferentes: la fiabilidad, el diseño óptimo y la calidad.

Ellos propusieron una metodología para que el sistema diseñado fuera capaz de soportar escenarios de fallos, como por ejemplo el fallo aleatorio de algún componente, y mantener el nivel deseado de servicio en términos de cantidad, calidad y presión en el suministro a los consumidores. La metodología propuesta por estos autores está constituida por cuatro elementos fundamentales:

- Formulación del problema de diseño óptimo para un sistema que distribuye aguas de diferentes calidades cuya función objetivo sea el costo total del sistema. Las restricciones están relacionadas con la continuidad del flujo y la conservación de la energía, las cargas de presión y los consumos en los nodos, la longitud de cada línea de tubería (este es un resultado de la formulación matemática del modelo en la que cada tubo se compone de la unión de un número determinado de segmentos), la energía de las estaciones de bombeo y las concentraciones de alguna sustancia en el agua. Las variables de decisión son: el vector de flujo en todos los tubos para las condiciones de demanda, las cargas de bombeo para cada estación y condiciones de demanda, las longitudes de los segmentos de tuberías, la máxima energía para cada estación de bombeo y las capacidades de las facilidades de tratamiento, así como las relaciones de remoción.
- Identificación de los subsistemas de resguardo (backup subsystems) los cuales mantendrán un nivel predefinido de servicio en los casos de ocurrencia de fallos en el sistema. Un subsistema de resguardo está determinado por un subconjunto de tuberías que completan el sistema. Pueden definirse dos resguardos de forma que si una de las tuberías de la red falla, uno de los dos resguardos sobreviva de forma que garantice el funcionamiento apropiado del sistema. Se necesitarían más de dos resguardos en los casos en que se consideren fallos simultáneos de varias tuberías en el sistema. El análisis en el artículo se restringe sólo al fallo de una tubería en el sistema porque es el que tiene una mayor probabilidad de ocurrencia.
- Las leyes hidráulicas y las demandas de los consumidores son formuladas de forma separada para cada uno de los subsistemas de resguardo y para las condiciones de demanda, con el objetivo de definir en cada caso los niveles de servicio requeridos.
- Los modelos de los sistemas de resguardo son adicionados al modelo total del sistema, y se resuelve entonces el modelo de optimización.

Las ideas presentadas por Ostfeld y Shamir son una extensión del trabajo (Alperovits y Shamir, 1977) para tomar en cuenta la presencia de aguas de diferentes calidades en el sistema. La selección de los sistemas de resguardo que proponen tiene como inconveniente que sólo tomaba en cuenta la conectividad en el sistema.

(Xu y Goulter, 1998) muestra una metodología de dos fases para estimar la fiabilidad del funcionamiento de una red de distribución de agua, reconociendo incertidumbres en las demandas de los nodos, capacidades de los tubos, niveles en los tanques y disponibilidad de los elementos del sistema. En la primera fase, las funciones de distribución de probabilidad para las cargas en los nodos se derivan de un modelo hidráulico linealizado y están sobre la base de funciones de distribución de probabilidad conocidas de los nodos de demanda, la rugosidad de las tuberías y el nivel en los tanques. El efecto de la no linealidad del modelo hidráulico de la red se toma en cuenta en este paso partiendo la demanda de los nodos en un número de categorías o intervalos. Se asume que los niveles en los tanques y la rugosidad de las tuberías son variables normalmente distribuidas. La segunda fase relaciona la probabilidad de fallo del suministro obtenida, con las probabilidades de ocurrencia de diferentes estados de carga del sistema para generar una medida general de la fiabilidad del sistema o de un área particular de este.

En el diseño de redes de distribución, se ha continuado trabajando en el intento de utilizar metodologías que permitan buscar soluciones económicamente aceptables a partir de probar diferentes variantes que cumplan con los requerimientos de diseño y que de forma lógica pudieran ser consideradas. En este sentido, (Strafaci, 2001) propone la modelación de redes de distribución, con el objetivo de llevarla a cabo para poder realizar, de forma conveniente, ampliaciones a sistemas de distribución de agua. Estas ampliaciones serían diseñadas de manera óptima a partir de la modelación de diferentes escenarios de posibilidades entre los que se escogería el más conveniente. En la práctica tradicional de la modelación usando softwares como, por ejemplo, EPANET (Rossman, 2000), el usuario dependería en buena medida de su experiencia previa en la tarea para encontrar soluciones satisfactorias dentro de los escenarios que considere evaluar. Si se analizara el caso en que un ingeniero quisiera evaluar todos los escenarios posibles que puedan existir en una red de 20 tuberías, en la que a cada tramo de tubería pudiera asignársele un diámetro entre diez diámetros posibles, se necesitarían más de cuatro meses para evaluar todos los posibles escenarios en una computadora que fuera capaz de evaluar un millón de escenarios por minuto; sería demasiado tiempo, incluso en los casos en que se contara con mayor capacidad de cómputo; tómesese en cuenta que la cantidad de escenarios que pueden ser citados en el caso hipotético que se planteó, no incluía la adición de

bombas, válvulas y otros elementos importantes presentes en cualquier sistema de distribución de agua. Incluso en el caso de un ingeniero experimentado, sería muy difícil lograr la solución óptima de la ampliación de una red usando los métodos de modelación tradicionales. Para llevar a cabo el análisis de los diferentes escenarios, de forma que se encuentre una solución óptima al problema planteado, es necesario utilizar un método que haga una selección de los escenarios que se evalúen, siendo este subconjunto seleccionado considerablemente más pequeño que el conjunto total de posibilidades. Resolver esta situación ha sido uno de los elementos iniciales que ha potenciado el uso de algoritmos evolutivos para resolver el problema de optimización de SDA.

Dentro de la gama de algoritmos evolutivos, han sido los algoritmos genéticos los más utilizados en el campo del agua. (Simpson et al., 1994) comparaba esta técnica de optimización con otras anteriormente utilizadas para el diseño de redes hidráulicas. (Dandy et al., 1996) presenta la incorporación de algunas mejoras. Posteriormente, (Savic y Walters, 1997) expone aportes adicionales. Otros cambios son introducidos en (Montesinos et al., 1999); de manera general, han sido numerosos los aportes. (Matías, 2003) resume en una investigación doctoral una excelente recopilación del estado del arte en el diseño óptimo de redes hidráulicas y se enfoca en el uso de los algoritmos genéticos para resolver el problema contemplando criterios de fiabilidad.

(Sousa y Cunha, 1998) aplica recocido simulado. Como casos de estudio fueron utilizados el de la red de Hanoi y el de la red de New York por lo que los resultados pueden ser comparados con otros métodos utilizados en la literatura para resolver los mismos problemas. Posteriormente, en (Cunha y Sousa, 1999) también se mostraron resultados para una de las redes utilizadas en (Alperovits y Shamir, 1977). En estos trabajos no se hizo mención a elementos que evalúen la fiabilidad del funcionamiento de los SDA para las soluciones obtenidas ni la posible ocurrencia de situaciones de fallo.

(Eusuff y Lansey, 2003) muestra el diseño de las redes de distribución agua a partir del uso de un algoritmo evolutivo llamado “Shuffled Frog Leaping”. Este algoritmo está concebido para el trabajo con variables discretas y tiene algunos puntos en común con el funcionamiento de Particle Swarm Optimization (Kennedy y Eberhart, 1995) y Shuffled Complex Evolution (Duan et al., 1992). Durante la búsqueda de soluciones, se utiliza EPANET (Rossman, 2000) para llevar a cabo el análisis de las soluciones potenciales. El problema de optimización fue planteado sin la consideración de elementos relacionados con la fiabilidad de las redes. Sólo fue

considerado el dimensionamiento de las tuberías y no fue contemplado el diseño de otros elementos del sistema de distribución. Como casos de estudio se tomaron la red de Hanoi, una de las redes presentadas en (Alperovits y Shamir, 1977) y la red de New York. Varias comparaciones se hicieron con los resultados obtenidos por otros autores; de ellas se puede inferir que el algoritmo ha tenido un buen desempeño en la búsqueda de soluciones.

(Wu y Simpson, 2002) utiliza un algoritmo genético modificado y presentan una forma de hacer evolucionar el factor de penalización dentro del mismo esquema del algoritmo. Muestran, para el caso de la red de New York, las ventajas de usar un factor de penalización autoadaptativo en lugar de uno fijo. La frontera entre la región de soluciones factibles y la de no factibles no está clara en los problemas de diseño óptimo de SDA. Usar valores muy pequeños del factor de penalización hacía que el algoritmo genético que utilizaban dirigiera más la búsqueda hacia regiones no factibles del espacio de soluciones, mientras que el uso de elevados valores del factor de penalización restringía demasiado la búsqueda sólo al espacio factible limitando la posibilidad de encontrar soluciones muy pegadas a la región no factible. El factor de penalización era autoadaptado cada 20 generaciones y se controlaba por un ratio mínimo y uno máximo de soluciones factibles. Un trabajo posterior relacionado con la posibilidad de autoadaptar el factor de penalización aparece en (Wu y Walski, 2005), donde se comparan diferentes técnicas para manejar las restricciones y se evidencia la sensibilidad de los algoritmos genéticos utilizados ante el uso de diferentes factores de penalización. También en (Farmani et al., 2005) se presentan ideas para el tratamiento autoadaptativo de la función objetivo en problemas de optimización con restricciones, específicamente aplicado al caso del diseño óptimo de sistemas de distribución de agua. (Afshar y Mariño, 2007) introduce un tratamiento autoadaptativo de la forma en que se tratan las penalizaciones que no requiere de ningún parámetro adicional ni del establecimiento a priori de ningún límite, como en el caso de (Wu y Simpson, 2002). (Jin et al., 2008) propone un método de solución basado en algoritmos genéticos pero con un enfoque de optimización multi-objetivo que evita el hecho de tener que incluir las restricciones del problema a través de penalizaciones directas en la función objetivo.

(Broad et al., 2005) mostraba el uso de un algoritmo genético aplicado a un metamodelo para el análisis de las soluciones potenciales del problema de diseño óptimo de SDA. Este metamodelo estaba basado en la implementación de una red neuronal para estimar los resultados del análisis hidráulico del sistema de distribución de agua. En lugar de usar un simulador de redes hidráulicas como EPANET (Rossman, 2000), en el trabajo se usaba este metamodelo y se argumentaba

que favorecía la reducción del tiempo necesario para realizar los numerosos análisis de soluciones que requería el algoritmo genético.

(Jayaram y Srinivasan, 2008) propone una formulación multiobjetivo para el diseño óptimo y la rehabilitación de redes de distribución de agua minimizando el coste del ciclo de vida y maximizando el buen desempeño de la red. En su trabajo utilizan un algoritmo heurístico combinado con una variante de algoritmo genético. El coste del ciclo de vida lo definen como la suma de los costes de: inversión inicial de las tuberías, reemplazo de viejos tubos por nuevos, limpieza y recubrimiento interno de tubos existentes, el coste de reparación de roturas, y descuentan el valor económico que es recuperado por el reemplazo de las tuberías. Como medida del buen desempeño de la red se utiliza una modificación hecha al índice de resiliencia propuesto por (Todini, 2000) para poder ser utilizado en redes con múltiples fuentes. Los costes son evaluados tomando en cuenta un período de vida útil de la red; no se hace referencia explícita a la inclusión del resto de los elementos de los SDA dentro del proceso de optimización. El índice de resiliencia propuesto es una medida de la capacidad de la red de manejar incertidumbre, pero en el trabajo no aparece un análisis de las afectaciones que realmente pudieran tener los consumidores conectados a una red ante posibles condiciones de fallo de sus elementos, para los valores de resiliencia que se han obtenido, ni hasta qué punto estos valores de resiliencia garantizan un comportamiento fiable del sistema de distribución de agua.

Otro algoritmo evolutivo utilizado en el diseño óptimo de SDA ha sido la optimización de colonia de hormigas (ACO). Diferentes trabajos han hecho uso de esta propuesta (Maier et al., 2003; Zecchin et al., 2006). Los algoritmos ACO están basados en el sistema de hormigas (Dorigo et al., 1996), inspirado en la forma en la que un grupo de hormigas encuentra el camino más corto entre el hormiguero y las fuentes de comida.

En (Reca y Martínez, 2008) se muestra una comparación entre cuatro algoritmos evolutivos utilizados para el diseño óptimo de redes de distribución de agua: Algoritmos genéticos, recocido simulado, búsqueda local iterativa con recocido simulado y por último una mezcla de recocido simulado y búsqueda tabú. Sólo se consideró en el trabajo el coste de la inversión inicial en tuberías y el cumplimiento de restricciones de diseño. No se utilizó ninguna medida de la fiabilidad de las soluciones puesto que el trabajo iba encaminado solamente a la comparación de los algoritmos evolutivos mencionados. Dos redes fueron utilizadas como ejemplos: la red de Hanoi, que fue ejecutada diez veces y la red de Balerna (no se encontraron otros trabajos similares referenciando a esta red) que se ejecutó una sola vez, según

se infiere de los resultados mostrados. Se estableció un número fijo de iteraciones a realizar para cada algoritmo con el objetivo de ponerlos en igualdad de condiciones. Los resultados mostraron que para la red de Hanoi, los algoritmos genéticos obtuvieron la mejor solución, sin embargo, el promedio de las 10 soluciones obtenidas mostró su peor valor también en el caso de los algoritmos genéticos. Para la red de Balerna, que era considerablemente más grande, la mejor solución se obtuvo mediante la mezcla de recocido simulado y búsqueda tabú.

Un algoritmo para el diseño a largo plazo, la rehabilitación y la actualización de redes de distribución de agua, ha sido propuesto recientemente en (Tanyimboh y Kalungi, 2008). En este caso no se han utilizado algoritmos evolutivos sino que se parte de un flujo en la red para el cual se busca luego la solución óptima de diseño de tuberías. La idea de buscar cuál sería la distribución más conveniente de los flujos en una red ha sido utilizada con anterioridad por varios autores (Chiong, 1982; Qi y ZiFang, 1996). Tanyimboh y Kalungi en su trabajo, retoman una vez más la idea del uso de la entropía, y, a partir de maximizar su valor, obtienen la distribución de flujos por los conductos de la red. Diferentes trabajos anteriores han hecho uso también de la entropía para la obtención de los flujos deseados en los sistemas de distribución (Awumah et al., 1990; Awumah et al., 1991; Tanyimboh y Templeman, 1993a; Tanyimboh y Templeman, 1993b; Yassin-Kassab y Templeman, 1999; Wah y Jowitt, 2005). La obtención de la solución de diseño, una vez que han quedado definidos los flujos por cada tubería, hace uso de la programación lineal y de la programación dinámica. Son varios los trabajos de Tanyimboh donde se maximiza el valor de entropía de la red para obtener valores de flujo en las tuberías. Un mayor valor de entropía es interpretado como una mayor fiabilidad del funcionamiento de la red pero, concretamente, no hay una interpretación económica del valor de entropía obtenido. En (Tanyimboh y Setiadi, 2008) también se usa el valor de la máxima entropía pero, adicionalmente, también es usada una medida de la fiabilidad del funcionamiento de los SDA. Uno de los inconvenientes que tiene el uso del cálculo de la entropía es la necesidad de definir a priori el sentido de circulación del flujo para cada tramo de tubería. En (Tanyimboh y Setiadi, 2008) se reconoce que la elección de los sentidos de circulación tiene una influencia decisiva en los resultados finales obtenidos.

(Geem et al., 2001) utilizaron un algoritmo de optimización heurístico, llamado búsqueda de la armonía, que utiliza como analogía el proceso de improvisación del jazz. (Geem, 2006) presenta mejoras adicionales en la aplicación del algoritmo de búsqueda de la armonía. (Kim et al., 2004) utilizaron también este algoritmo pero

para el caso de la rehabilitación de redes hidráulicas; en su trabajo presentan una gran variedad de funciones objetivos para resolver el problema.

Con respecto a la optimización de los sistemas de distribución de agua, todavía son polémicas las soluciones planteadas porque no existe una metodología completamente acertada y aceptada por los especialistas en el tema. Son varios los intentos realizados basados en similares principios pero con alcances y objetivos diferentes, pero hay puntos en común en la mayoría de ellos. Es generalizado el determinante uso de los ordenadores para llevar a cabo el proceso de solución. Las soluciones son obtenidas a través de procesos iterativos, en los que en ocasiones intervienen varias etapas que subdividen el problema original y que interactúan entre sí. Es evidente también que, prácticamente desde los primeros trabajos que han sido analizados y que iban dirigidos al dimensionamiento óptimo de SDA, los autores se percataban de que la búsqueda de la variante de solución más económica convertía a las redes malladas en redes ramificadas, eliminando los tramos redundantes e incapacitando a la solución de brindar un funcionamiento fiable y de garantizar el servicio ante posibles condiciones de fallo o deterioro físico y ante condiciones de trabajo no previstas, como posibles incrementos de la demanda en algún momento. A pesar de que los resultados de los procesos de optimización tenían una preferencia por las redes ramificadas, la práctica ingenieril indicaba la preferencia por soluciones de redes malladas que brindaran una mayor fiabilidad en su funcionamiento. Consecuentemente, fueron introducidas, directa o indirectamente, medidas de la fiabilidad de los SDA dentro de los procesos de búsqueda de la solución de diseño económicamente más conveniente. Las tendencias actuales proponen el uso de un planteamiento de problema de optimización multiobjetivo donde pudiera llegarse a un acuerdo entre intereses divergentes o simplemente donde se brinde una gama de posibles soluciones en concordancia con lo que se quiere del diseño (Vamvakeridou-Lyroudia et al., 2005; Jin et al., 2008).

La optimización de los SDA ha seguido dos tendencias básicas:

1. La determinación a priori de los flujos de la red para luego determinar el dimensionamiento de los elementos implicados en el diseño.
2. La determinación directa del dimensionamiento de los elementos que se van a diseñar, quedando los flujos subordinados a ella.

Está demostrado que para una distribución de caudales en la red, puede obtenerse la solución óptima global de dimensionamiento de las tuberías implicadas en el diseño

(Chiong, 1982). Ambas tendencias incorporaron, según pudo verse en la literatura revisada, elementos que intentaban garantizar cierto grado de fiabilidad en el funcionamiento de los sistemas. Las propuestas estuvieron centradas fundamentalmente en:

1. La adopción de un diámetro mínimo para favorecer una configuración mallada al menos topológicamente, pero que no necesariamente resultaba en una red con buenas prestaciones en su funcionamiento ante condiciones de fallo.
2. El planteamiento de medidas de fiabilidad, que tomaron diferentes formas según la mano de su autor, pero que carecían de una estimación certera de con qué valor de fiabilidad acometer un determinado diseño, y de cómo decidir entonces si era mejor hacer una red con un poco más o con un poco menos de alguno de los índices de fiabilidad.
3. La determinación de caudales de flujo en la red de una manera que se favoreciera el carácter fiable del funcionamiento de la red.

Una idea de diseño óptimo que parte de un establecimiento conveniente de caudales en la red pero que incorpora algunos elementos novedosos en su formulación es la presentada en (Martínez, 2007). En este trabajo se incluye la novedad de intentar cuantificar económicamente el coste de los SDA no de la manera tradicional con que se había hecho con anterioridad sino de una forma en la que quedara plasmada la ventaja económica que pudiera tener una configuración mallada de red frente a una configuración ramificada.

La idea de cuantificar económicamente la bondad de un diseño ante posible situaciones de fallo es, en sí misma, un paso superior al planteamiento de un índice de fiabilidad para ser usado en un proceso de optimización. La cuantificación certera y total de la economía de un diseño, más que un índice de fiabilidad a seguir, podrá proporcionar una conclusión sobre hasta qué punto puede ser económicamente factible el incremento del grado de fiabilidad en el funcionamiento que brindaría un diseño robusto ante situaciones anómalas de trabajo. En la investigación que se presenta en este documento, se ha usado la idea básica de cuantificación económica presentada en (Martínez, 2007), pero sin partir de la obtención de una distribución de caudales de circulación inicialmente. Dicha cuantificación económica ha sido considerada dentro de la función objetivo con que trabajará el algoritmo evolutivo que se propone en el capítulo 3 de este documento.

El algoritmo evolutivo que se propone en este trabajo ha demostrado ser potente frente a la solución de varios problemas de optimización (Montalvo et al., 2007b; Izquierdo et al., 2008c; Izquierdo et al., 2008e; Montalvo et al., 2008a; Montalvo et al., 2008b). Su planteamiento fundamental se basa en el algoritmo conocido como Particle Swarm Optimization (PSO), desarrollado por Kennedy y Eberhart en el año 1995, e inspirado en el comportamiento social de un grupo de pájaros migratorios tratando de alcanzar un destino desconocido. En el momento en que se llevaron a cabo los trabajos (Montalvo et al., 2008d; Montalvo et al., 2008e), no se encontraron publicadas por otros autores, aplicaciones de la PSO al problema del diseño óptimo de sistemas de distribución de agua. El algoritmo simula una bandada de pájaros que se comunican mientras vuelan a través de un espacio multi-dimensional, con tantas dimensiones como variables tenga el problema. El vector de posición de un pájaro en dicho espacio, representa una solución potencial del problema.

La búsqueda de soluciones a partir del empleo del algoritmo evolutivo propuesto, proporciona una elevada flexibilidad para el planteamiento de la función objetivo del problema de optimización. Esto representa una gran ventaja para poder enriquecer la forma en que económicamente son cuantificados los diseños de SDA.

1.3 Objetivos

Objetivo principal:

- Proponer e implementar un algoritmo para el diseño económicamente óptimo de SDA, que pueda ser utilizado en la práctica de la solución de problemas reales de diseño.

Objetivos específicos:

- Estudiar la formulación del problema de diseño económicamente óptimo de SDA, contemplando elementos relacionados con la fiabilidad de dichos sistemas.
- Proponer una formulación para evaluar económicamente los diseños de SDA, cuya fiabilidad de funcionamiento ha de tomarse en cuenta.

- Estudiar y modificar convenientemente la técnica de optimización evolutiva que se conoce con el nombre de Particle Swarm Optimization (PSO), para ser aplicada al diseño óptimo de SDA.
- Implementar en una aplicación informática el algoritmo resultante del ensamblaje de a) las modificaciones realizadas a la PSO, b) la formulación propuesta para evaluar económicamente los diseños de SDA, y c) un simulador que permita conocer el funcionamiento hidráulico de las soluciones frente a diferentes estados de carga y condiciones de funcionamiento.
- Evaluar la bondad del algoritmo propuesto, mediante su aplicación a los casos obtenidos en la literatura científica y a casos reales de diseño de SDA.

1.4 Esquema del documento

Este capítulo 1 ofrece una introducción general al contenido del trabajo tratando de dejar claras algunas ideas preliminares de forma introductoria y especificando los objetivos que han sido perseguidos en el desarrollo que se presenta. También se muestra una síntesis del estado del arte referente al tema que se trata para recrear una visión global de lo que se ha hecho por otros autores y ubicar en ese contexto las líneas de investigación seguidas en el trabajo.

En el capítulo 2 se muestran los principales fundamentos teóricos relacionados con el diseño óptimo de los sistemas de distribución de agua, abarcando aspectos de diseño y optimización, y algunos detalles sobre la función objetivo a utilizar. Luego de la información presentada en esta sección, aparecen en el capítulo 3 los aspectos esenciales del algoritmo de optimización utilizado (PSO) y la forma básica en que este puede ser aplicado al diseño óptimo de sistemas de distribución de agua sin perder de vista cada uno de los fundamentos presentados en el capítulo antecesor. Adicionalmente son expuestas varias modificaciones concebidas en esta investigación, para la aplicación de la PSO en el diseño óptimo de sistemas de distribución de agua. Dichas modificaciones han sido aplicadas a varios casos de estudio presentes en la literatura científica y también a diferentes redes reales cuyo tamaño es significativamente mayor. Los resultados obtenidos son presentados en el capítulo 4, donde también se encuentran algunas soluciones propuestas por otros autores para los mismos problemas abordados, que son comparadas para cada caso estudiado con las soluciones obtenidas en la presente investigación. Un quinto capítulo es añadido para describir todo el soporte informático que se implementó para poder llevar a cabo los cálculos realizados; dicho soporte convierte a la teoría

expuesta en una herramienta aplicable para los profesionales que trabajan el tema de diseño de SDA. A partir de los resultados y las comparaciones realizadas se elaboran las conclusiones y recomendaciones que constituyen el sexto y último capítulo de este trabajo. Toda la bibliografía consultada se muestra al final del documento.

Capítulo 2. Diseño óptimo de sistemas de distribución de agua

La duda no es un estado demasiado agradable, pero la certeza es un estado ridículo.

Voltaire

2. Diseño óptimo de sistemas de distribución de agua

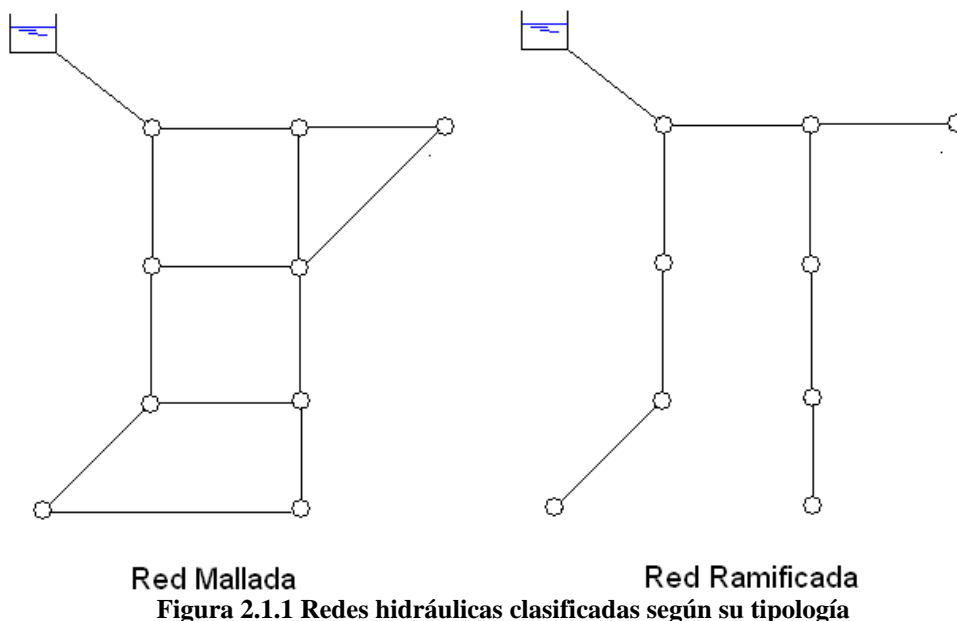
2.1 Fundamentos teóricos del diseño de sistemas de distribución de agua.

Un sistema de distribución de agua está formado por elementos de transmisión (tuberías), elementos de almacenamiento (tanques reguladores / distribuidores), elementos para hacer variar la energía en el flujo (estaciones de bombeo / rebombeo), elementos de control (válvulas), elementos de medición (manómetros, caudalímetros) y un conjunto de reglas de operación. Todos estos elementos y el agua que fluye a través de ellos, son susceptibles de fallos que provocan que no se satisfagan en toda su magnitud los objetivos para los cuales fue concebido el sistema, ya sea en una parte de él o en su totalidad. Susceptibles de cambios son también los niveles de consumo y número de los usuarios conectados al sistema.

En este trabajo, el término de red hidráulica se utiliza para denominar a la parte física de los SDA. Según su tipología, dichas redes pueden ser clasificadas como básicamente malladas o ramificadas. Con independencia de que en su forma básica las redes puedan tener una aproximación mallada o ramificada, lo más usual (con excepción prácticamente de las redes de riego) es que se encuentren redes mixtas donde una parte es mallada y otra tiene una topología ramificada.

En las redes ramificadas (o en sectores ramificados en los extremos de redes mixtas), la determinación de los caudales que deben circular por las tuberías, se puede realizar utilizando solamente los consumos de la red y aplicando la ecuación de continuidad. No es necesario conocer un dimensionamiento previo de los conductos por donde pasa el agua; esto hace que el diseño de estas redes se torne más sencillo que el de las

redes malladas y que con mayor facilidad puedan obtenerse métodos que optimicen económicamente estos diseños.

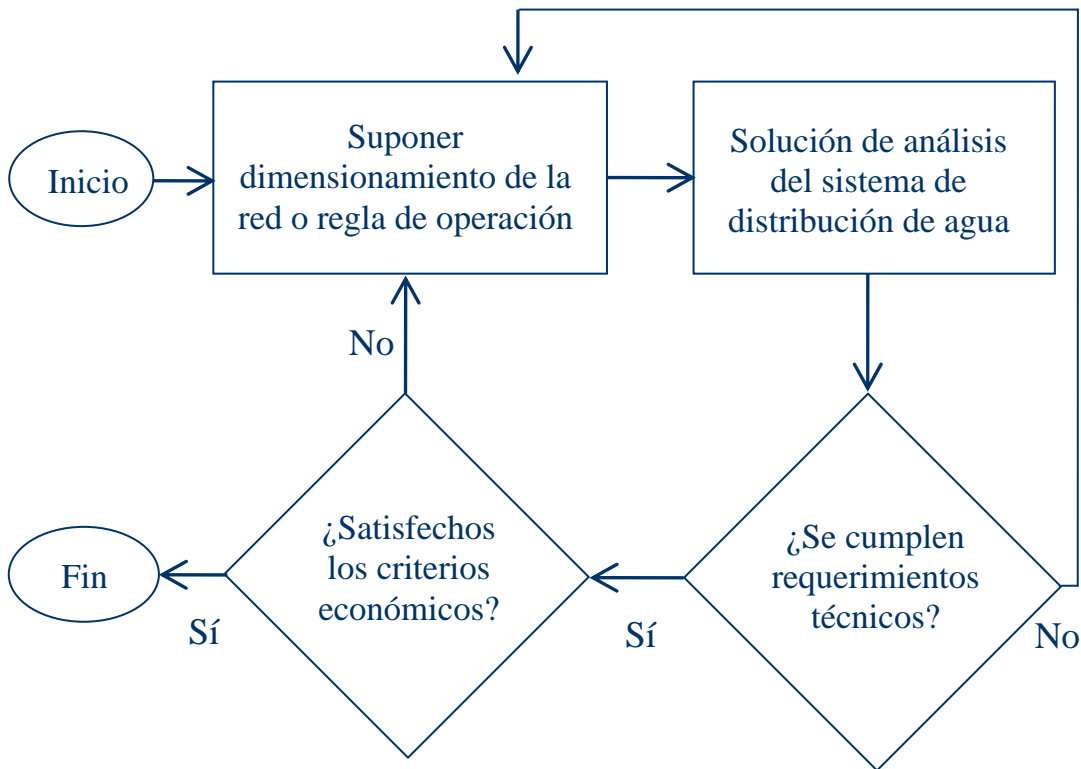


Las redes malladas por su parte, son un poco más complejas a la hora de determinar el caudal circulante por sus conductos. No es suficiente con la ecuación de continuidad pues se hace necesario también el uso de ecuaciones de energía. La evaluación de las ecuaciones de energía, requiere del conocimiento previo de las dimensiones de la red, lo cual hace que el diseño sea más complicado para este tipo de redes. No se podrá dimensionar un elemento de la red a partir de haber calculado inicialmente el caudal que por él circula, pues para determinar dicho caudal, se han de haber dimensionado todos los elementos de la red. Como resultado, muchos proyectistas llevan a cabo las labores de diseño de redes malladas a través de procesos de prueba y error en el que se hacen suposiciones iniciales para el dimensionamiento de los elementos, luego se calculan los caudales y, finalmente, se comprueban los requerimientos técnicos de diseño (presiones, velocidades de circulación, etcétera). El proceso se repite varias veces con el objetivo de lograr una reducción económica en la solución que se obtiene, cumpliendo con los requerimientos técnicos que se hayan planteado. Un esquema que representa el proceso de diseño en redes malladas y que puede ser usado para redes de cualquier

topología, es el que se muestra en la figura 2.1.2. De manera similar a este esquema trabajan los algoritmos evolutivos. Dichos algoritmos tratan de tomar decisiones “inteligentes” para el dimensionamiento de la red y hacen uso de algún código de programa para el análisis de los resultados. El análisis de los diseños que se obtienen se basa en un modelo matemático que permite estimar las presiones y caudales en todos los elementos. A los modelos matemáticos de análisis se hará referencia con más detalle en el epígrafe 2.2.

Figura 2.1.2 Esquema general de diseño de un sistema de distribución de agua

Entre las ideas que se pueden utilizar para el dimensionamiento de los conductos de



la red pueden citarse dos formas de diseño funcional conocidas:

1. El uso de una velocidad de circulación deseada en las tuberías.
2. Utilizar una pendiente hidráulica uniforme para todos los conductos.

Ambas formas permiten relacionar el gasto que circula por una tubería con su diámetro. Es usual, también, el uso de la experiencia práctica de proyectistas para hacer estimaciones iniciales de valores para el dimensionado de las redes.

El esquema de la figura 2.1.2 reproduce la esencia básica de una de las tendencias utilizadas para el diseño óptimo de los SDA. La otra línea de tendencia, según se vio en el epígrafe 1.2 de este trabajo, va encaminada a la suposición de valores de caudales circulantes en las tuberías, y luego, a partir de ellos, se obtiene el diseño de la red. Esta segunda tendencia, también puede quedar representada en el esquema de la figura 2.1.2, pero el cuadro que indica la suposición del dimensionamiento de la red y de reglas de operación quedaría sustituido por la representación de la figura siguiente:

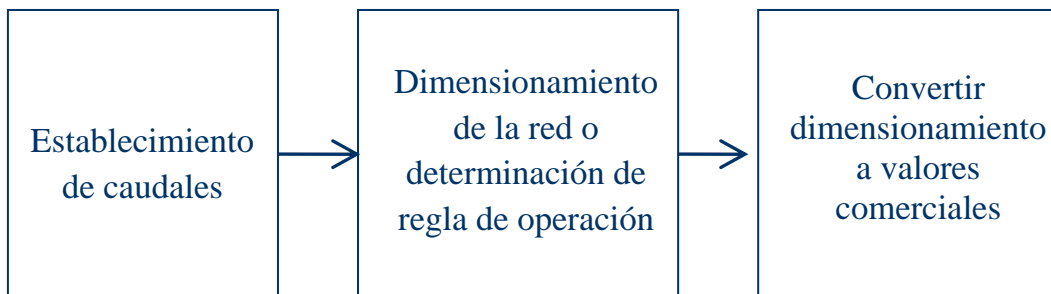


Figura 2.1.3 Esquema complementario de diseño a partir de estimación de caudales circulantes

Existen diferentes metodologías para el establecimiento de los caudales circulantes, a partir de los cuales se realiza luego el diseño de la red. Dos trabajos recientes que utilizan esta tendencia de diseño son (Martínez, 2007; Tanyimboh y Kalungi, 2008).

Dentro de los requerimientos técnicos, además de la comprobación de que las presiones, velocidades de circulación, calidad de las aguas y otros indicadores estén en los rangos deseados, los ingenieros a cargo del diseño necesitan estimar las vulnerabilidades con respecto a la ocurrencia de fallos. Esta estimación implica el establecimiento de alguna medida de la fiabilidad de la red para ofrecer un buen servicio a los consumidores conectados a ella. Las predicciones del comportamiento de la red, tanto en circunstancias normales como en circunstancias anormales de funcionamiento, tienen gran importancia para las prioridades de inversiones capitales y para determinar las respuestas operacionales requeridas en los casos de fallos locales en alguno de los elementos.

En el caso de los trabajos (Martínez, 2007; Tanyimboh y Kalungi, 2008), la forma en que se establecen los flujos en la red, es en sí misma una manera de agregar cierta fiabilidad a la solución final de diseño. En (Tanyimboh y Kalungi, 2008) los caudales son establecidos en función de obtener un valor de entropía máximo. En uno de los primeros trabajos publicados donde se ha visto el uso de la entropía como medida de la distribución de caudales en la red, (Awumah et al., 1991), la estimación del valor de entropía en la red se hace a través de:

$$\hat{S} = \sum_{j=1}^N \frac{Q_j}{Q_0} S_j - \sum_{j=1}^N \frac{Q_j}{Q_0} \ln \frac{Q_j}{Q_0} \quad (2.1.1)$$

donde:

- S_j – es el valor de la entropía nodal, y se calcula a partir de la fórmula:

$$S_j = - \sum \frac{q_{ij}}{Q_j} \ln \frac{q_{ij}}{Q_j}$$

- Q_j – es la suma de los caudales circulantes de todas las tuberías que se unen en el nodo j : $Q_j = \sum_{i=1}^{n(j)} q_{ij}$
- Q_0 – es la suma de los caudales circulantes por todas las tuberías de la red

Según (Awumah et al., 1991) el valor de la entropía se maximizaba cuando existían iguales valores de $\frac{q_{ij}}{Q_j}$ para las tuberías. Las ecuaciones anteriores representan las ideas iniciales en el uso de la entropía para el diseño de SDA. Varias modificaciones fueron agregadas posteriormente para mejorar esta formulación; ver por ejemplo (Yassin-Kassab y Templeman, 1999).

En el caso de (Martínez, 2007), la estimación inicial de caudales está basada en las propuestas que se presentaron en (Chiong, 1982). La idea es minimizar el valor de la varianza calculado según:

$$V_Q = N \sum_{i=1}^N Q_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N Q_i \right)^2, \quad (2.1.2)$$

donde N es el número de tuberías de la red y Q_j es el caudal que pasa por cada tubería. El término Q_j tendrá un signo correspondiente al sentido de circulación del agua en la tubería según la convención de signos representada en la figura siguiente:

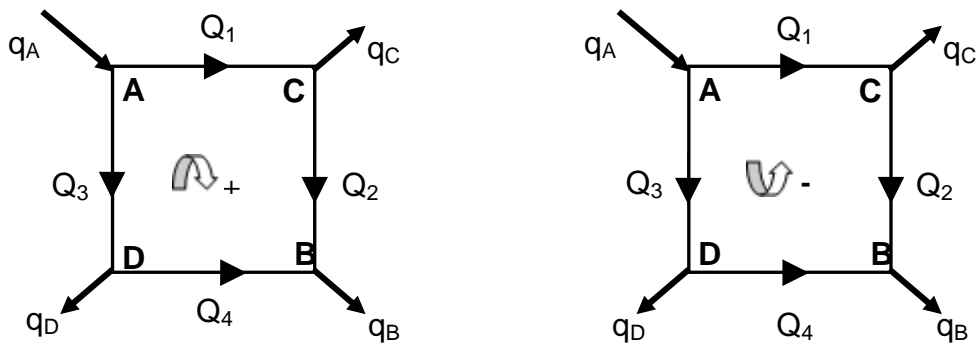


Figura 2.1.4 Signo del sentido de circulación en mallas (Martínez, 2007)

En (Chiong, 1982) se demuestra que el valor mínimo de la varianza se alcanza cuando se cumple la siguiente ecuación para cada malla de la red:

$$\sum Q_k = 0 \text{ para cada malla.} \quad (2.1.3)$$

Estas formas de estimar el caudal inicial que debe circular por cada conducto en una red de suministro de agua, a pesar de ser prácticas desde el punto de vista de diseño, no puede decirse que sean concluyentes para afirmar que se ha hecho un diseño fiable.

En la determinación de la fiabilidad de un sistema en sentido general, existen dos problemas importantes: el primero consiste en determinar qué es más apropiado medir para poder estimar su valor en un sistema, y el segundo consiste en determinar el nivel en el que un sistema puede ser considerado confiable.

En una red de distribución de agua, la estimación de la fiabilidad estará determinada por la medida en la que el sistema satisfaga los requerimientos del consumidor en cantidad y calidad tanto en condiciones normales como en condiciones anormales de operación (Mays, 1996; Ostfeld y Shamir, 1996). La cantidad de agua requerida se especifica como el flujo que debe ser suministrado y el rango de presión que debe existir en el suministro (Goulter, 1995), mientras que la calidad del agua se determina por la concentración de sustancias que pueden ser dañinas para la salud del hombre (Mays, 1996).

Desde el punto de vista cuantitativo, la fiabilidad de una red de distribución de agua se basa en dos tipos de fallo posibles: el fallo por la no disponibilidad de agua en cantidad y calidad suficiente (originado, por ejemplo, como consecuencia de necesidades de la demanda no previstas) y el fallo en el funcionamiento de alguno de los elementos físicos del sistema.

En una red ramificada con una sola entrada de suministro y sin elementos de almacenamiento, la rotura total de alguna de sus tuberías provocaría la afectación completa de los servicios de distribución de agua para todos los consumidores que se encuentren aguas abajo del lugar de la rotura. La rotura parcial (fuga) en alguna de las tuberías de la red provocaría también afectaciones aguas abajo, manifestadas a través de pérdidas de presión y de la imposibilidad de satisfacer completamente la demanda de agua. Afectaciones similares pudieran ser provocadas también por fallos en las estaciones de bombeo / rebombeo, excesivas demandas de consumo que lleven a una mayor pérdida de carga por fricción en la red, o por una mala operación con las válvulas que restrinja el paso usual del flujo desde la fuente hacia el consumidor. En cambio, una red mallada, bien diseñada y operada, pudiera continuar prestando un servicio aceptable independientemente del fallo de alguna de sus tuberías puesto que el agua podría seguir circulando por otro de los caminos de la red para ser suministrada. Precisamente en este punto se ubica la ventaja principal de las redes malladas sobre las ramificadas. Desde el punto de vista de la calidad del agua, las redes ramificadas quedan en desventaja porque en ellas existen mayores posibilidades de estancamiento del agua. Económicamente, hay que decir que las redes ramificadas necesitan de una inversión inicial menor pero, a largo plazo, lo más probable es que las configuraciones malladas se muestren más ventajosas, sobre todo en el caso de los SDA en ciudades.

2.2 Modelos matemáticos de análisis y el diseño de sistemas de distribución de agua.

El estado de un sistema de distribución de agua se obtiene interrelacionando distintas magnitudes dentro del modelo matemático de la red con la mayor precisión posible. Existen en el mercado distintas herramientas para analizar redes de agua, como EPANET (Rossman, 1997), WaterCad¹,...entre otras. En la modelación matemática de problemas físicos en los que las funciones subyacentes son conocidas es posible resolver las ecuaciones de manera determinista para predecir el comportamiento del sistema con cierto grado de precisión. En la modelación hidráulica, las distintas leyes que gobiernan el fenómeno (Izquierdo et al., 2004) pueden proporcionar una descripción muy precisa del mismo en el supuesto de que las condiciones iniciales y/o de contorno y los términos de forzamiento externo sean definidos con precisión.

El análisis de los sistemas de agua a presión es una de las tareas más complejas abordadas por los ingenieros hidráulicos, especialmente para sistemas grandes, que se presentan incluso para ciudades de tamaño moderado, ya que supone la solución de un sistema grande acoplado de ecuaciones no lineales. Existen ciertas formulaciones disponibles; ver, por ejemplo, (Izquierdo et al., 2004). Una de ellas considera, siendo N el número de nodos de demanda y L el número de líneas del sistema, las $N - 1$ ecuaciones de continuidad, que son lineales, más las L ecuaciones de energía, típicamente no lineales.

$$\begin{aligned} \sum_{j \in A_i} q_{ij} &= Q_i, & i &= 1, \dots, N - 1 \\ H_{k1} - H_{k2} &= R_k(q_k) \cdot q_k |q_k| & k &= 1, \dots, L \end{aligned} \quad (2.2.1)$$

A_i es el número de nodos directamente conectados al nodo i . k_1 y k_2 representan los extremos de la línea k , que transporta un caudal q_k y está caracterizada por su resistencia R_k , que depende de q_k a través del número de Reynolds (la no linealidad de las ecuaciones de energía se debe no sólo al término cuadrático en (1), sino

¹ <http://www.bentley.com/es-MX/Products/WaterCAD/Overview.htm>

también a la función $R_k(q_k)$. Si se utiliza la fórmula de pérdidas de Darcy-Weisbach, por ejemplo, puede decirse que la pérdida de carga será igual a:

$$hf = R_k(q_k) \cdot q_k \cdot |q_k| = f \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = f \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{Q}{A}\right)^2, \quad (2.2.2)$$

siendo,

L - longitud de la tubería

D - diámetro de la tubería

g - aceleración de la fuerza de gravedad

Q -caudal circulante por el conducto

f -factor de rugosidad

El valor de R_k depende de f y este, a su vez, depende del número de Reynolds, que está en función del gasto circulante:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{\varepsilon_r}{3.7} + \frac{2.51}{R_e \cdot \sqrt{f}} \right), \quad (2.2.3)$$

$$R_e = \frac{Q}{A} \cdot \frac{(4 \cdot R_h)}{v}, \quad R_h = \frac{D}{4} \text{ para tuberías circulares.}$$

Cuando se utiliza la aproximación de Hazen-Williams para evaluar las pérdidas de carga, el factor C , representativo de la rugosidad en la tubería, toma un único valor con independencia del gasto que circule:

$$hf = 10.61 \cdot \frac{L}{C_{H-W}^{1.85} \cdot D^{4.87}} \cdot Q^{1.85}. \quad (2.2.4)$$

En la ecuación (2.2.1), H_{k_1} y H_{k_2} , representan las alturas piezométricas en los nodos k_1 y k_2 . Estos valores son desconocidos para los nodos de consumo y son datos para los nodos de altura fija. El conjunto completo de ecuaciones se puede escribir, utilizando notación matricial por bloques, como

$$\begin{pmatrix} A_{11}(q) & A_{12} \\ A_{12}^t & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q \\ H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -A_{10}H_f \\ Q \end{pmatrix}, \quad (2.2.5)$$

donde A_{12} es la denominada matriz de conectividad que describe la forma en que los nodos de demanda están conectados a través de las líneas. Su tamaño es $L \times N_p$, siendo N_p el número de nodos de demanda; q es el vector de caudales a través de las líneas, H el vector desconocido de alturas en los nodos de demanda; A_{10} describe la forma en que los nodos de altura fija están conectados a través de las líneas y es una matriz de tamaño $L \times N_f$, siendo N_f el número de nodos de altura fija conocida, cuyos valores forman el vector H_f , y Q es el vector de las demandas, de dimensión N_p . Finalmente, $A_{11}(q)$ es una matriz diagonal de tamaño $L \times L$, con elementos

$$a_{ii} = R_i q_i + B_i + \frac{A_i}{q_i}, \quad (2.2.6)$$

siendo $R_i = R_i(q_i)$ la resistencia de la línea y A_i , B_i coeficientes que caracterizan a una hipotética bomba.

El sistema (2.2.5) es no lineal y su solución es el vector de estado $x = (q, H)^t$ (caudales a través de las líneas y altura en los nodos de demanda) del sistema.

Ya que la mayor parte de los sistemas de agua reales involucran un alto número de ecuaciones e incógnitas, el sistema (2.2.5) se suele resolver mediante alguna técnica de tipo gradiente. En (Izquierdo et al., 2007) se resuelve mediante un proceso iterativo con sobrerrelajación sucesiva aplicado a una versión linealizada de (2.2.5):

$$\begin{pmatrix} A'_{11}(q^{(k)}) & A_{12} \\ A_{12}^t & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta q \\ \Delta H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -A_{10}H_f - A_{11}(q^{(k)})q^{(k)} - A_{12}H^{(k)} \\ Q - A_{21}q^{(k)} \end{pmatrix}, \quad (2.2.7)$$

donde A'_{11} es la matriz Jacobiana correspondiente a A_{11} (las demás matrices son constantes). La ecuación (2.2.7) se reescribe de manera más compacta como:

$$A_k \Delta x_k = y_k. \quad (2.2.8)$$

El modelo descrito realiza un análisis en régimen permanente, considerando que el flujo se mantiene constante a lo largo del tiempo. Existen varias propuestas para resolver el régimen permanente pero, en realidad, este tipo de régimen no se desarrolla en casi ninguna ocasión. No obstante, cuando los cambios en el tiempo son de pequeña magnitud o se desarrollan muy lentamente, este tipo de modelo puede ser muy útil para reflejar, ante condiciones dadas de funcionamiento, las presiones y flujos en los elementos de los SDA, en intervalos discretos de tiempo.

En dependencia de la utilidad final del modelo, podrán utilizarse los que resuelven el régimen permanente, o será necesario recurrir a modelos que resuelven el análisis de los SDA en régimen no permanente. La consideración de los flujos variables en el tiempo requiere de modelos que aumentan en complejidad, desde los que aproximan el comportamiento de los SDA a través de una sucesión de estados permanentes (modelos cuasi-estáticos) hasta los modelos en régimen transitorio.

Entre los diferentes modelos existentes para el análisis de SDA en régimen transitorio, se distinguen: a) los modelos rígidos o de oscilación en masa, en los que únicamente se considera el efecto dinámico inducido por la inercia del fluido, y b) los modelos elásticos, basados en las ecuaciones del golpe de ariete, en los que intervienen además la compresibilidad del fluido y la elasticidad de las conducciones. En (Iglesias, 2001) se hace una amplia descripción de estos modelos.

Dentro del proceso de diseño de los SDA es muy importante conocer el comportamiento que teóricamente tendría el sistema una vez construido, ante diferentes condiciones de funcionamiento. Es usual el uso de programas de ordenador para el apoyo de las labores de diseño y las comprobaciones de las soluciones obtenidas. El dimensionamiento previo de un sistema de distribución de

agua puede ser continuamente mejorado a través de un proceso de prueba y error que involucre el uso de modelos de análisis en los que se pueda evaluar el funcionamiento de los SDA tal y como se mostró en la figura 2.1.2. En dependencia del análisis que se necesite hacer, habrá que utilizar un tipo de modelo u otro.

La utilidad de poder evaluar el comportamiento de las soluciones encontradas es trascendental y decisiva en el proceso de diseño óptimo de SDA a través de métodos evolutivos. El logro de diseños fiables requiere de la estimación de la respuesta del sistema ante diversas situaciones de fallo o condiciones anómalas de funcionamiento; la simulación de este tipo de situaciones es perfectamente realizable haciendo uso de los modelos de análisis.

2.3 Aspectos sobre la formulación del problema del diseño óptimo de sistemas de distribución de agua.

El problema de diseño económicamente óptimo de un sistema de distribución de agua se resume en minimizar la suma de los costes de inversión y los costes durante la vida útil del sistema.

Existen diferentes restricciones que han de tomarse en cuenta en el proceso de diseño:

- Restricciones geométricas. Las facilidades de acceso, la importancia de zonas y la presencia de obstáculos pueden limitar el posicionamiento de los elementos de los SDA.
- Restricciones de presión máxima y mínima en los nodos.

$$H_j^{m\acute{a}x} \geq H_j \geq H_j^{\min}; j = 1, \dots, N;$$

N - número de nodos en la red

H_j - presión en el nodo j

H_j^{\min} - presión mínima en el nodo j

$H_j^{m\acute{a}x}$ - presión máxima en el nodo j

- Restricciones de velocidad máxima y mínima en las tuberías.

$$V_i^{m\acute{a}x} \geq V_i \geq V_i^{\min}; i = 1, \dots, L;$$

L - número de tuberías en la red

V_j - velocidad de circulación del flujo por la tubería j

V_j^{\min} - velocidad mínima de circulación del flujo por la tubería j

$V_j^{m\acute{a}x}$ - velocidad máxima de circulación del flujo por la tubería j

- Cumplimiento de la ecuación de continuidad.

$$\sum Q_{in} - \sum Q_{out} = Q_e;$$

Q_{in} - flujo que entra a un nodo por alguna de las tuberías conectadas a él

Q_{out} - flujo que sale de un nodo por alguna de las tuberías conectadas a él

Q_e - aporte externo de agua al nodo, o la demanda existente en él

- Cumplimiento de la ecuación de conservación de la energía

Para cada malla de la red debe cumplirse que:

$$\sum_{t \in M} hf - \sum_{b \in E} E_b = 0;$$

t - tubo

M - malla

hf - valor de pérdida de carga en una tubería

b - bomba

E - conjunto de bombas

E_b - energía adicionada al agua por una bomba

- Restricciones con respecto a la fiabilidad de funcionamiento deseada en el sistema.
- Restricciones con respecto a la calidad del agua que se entregará a los diferentes usuarios que han de ser abastecidos.

Además de las restricciones, es muy importante tomar en cuenta, dentro del proceso de diseño óptimo de SDA, la forma en que son evaluadas económicamente las posibles soluciones. Buena parte de la inversión inicial está concentrada en el coste de las tuberías. Existen precios expresados en unidades monetarias por metro lineal de conducto para los diámetros comerciales disponibles en el mercado. Estos precios pueden variar en dependencia de las características de los tubos: diámetro, tipo de material, presiones admisibles para el trabajo, etcétera. De manera general la parte más significativa de la inversión inicial puede resumirse en los siguientes costes:

- Coste de las tuberías

Coste por metro lineal del tipo de tubo que se va a instalar multiplicado por su longitud.

- Coste de los depósitos

El coste de construcción de un depósito depende principalmente de su volumen y, en el caso de depósitos elevados, la altura también influye decisivamente. En cuanto al primero de los parámetros, el coste de construcción puede expresarse como:

$$Cd = D_1 \cdot V^{d_2}, \quad 0 < D_1 \leq 1;$$

V - volumen de depósito; D_1 y d_2 son coeficientes del ajuste. En este caso, se presenta una situación de economía de escala, puesto que el coste unitario del depósito (coste por unidad de capacidad) disminuye al aumentar el volumen del mismo (dentro de ciertos límites).

- Coste de las estaciones de bombeo

Para evaluar el coste de construcción de una estación de bombeo (EB), un parámetro muy significativo es la potencia instalada W . Al igual que en el caso de los depósitos, se presenta una situación de economía de escala, puesto que el coste de construcción por kilovatio (kW) instalado resulta decreciente

con la potencia total instalada. El coste de una EB puede aproximarse a una expresión del tipo:

$$C_{EB} = B_1 + B_2 \cdot W^{b_3}, \quad 0 < b_3 < 1,$$

donde W es la potencia total instalada, B_1 , B_2 y b_3 son coeficientes de ajuste.

- Coste de válvulas

Existen muchas válvulas disponibles en el mercado y su precio está regulado según las características y la calidad en el funcionamiento de cada una de ellas.

- Costes de los elementos de protección, medición y control

No solo los costes de inversión inicial son importantes a la hora de hacer una evaluación económica. Nunca deben perderse de vista los costes de operación, sobre todo cuando estos involucran una componente energética significativa. En este sentido, un término importante dentro de los costes de operación es el relacionado con las estaciones de bombeo. Dicho coste tiene una componente importantísima correspondiente a la facturación eléctrica anual, que pudiera expresarse como:

$$C_e = W \cdot p_a + W_m \cdot F_a \cdot e, \quad (2.3.1)$$

donde W es la potencia instalada, W_m es la potencia media consumida en kW y F_a es el tiempo medio de utilización anual (horas/años); en tal caso, el coeficiente e representa el coste del kW.h consumido, mientras que el término p_a corresponde al coste anual de un kW instalado. El coeficiente p_a puede incluir también otros costes de operación, proporcionales a la potencia instalada.

Los costes de mantenimiento también son significativos, sobre todo cuando se pretende brindar una buena garantía en el servicio que se brinda. El mantenimiento puede ser preventivo o correctivo. Las estaciones de bombeo son un ejemplo claro donde deben llevarse a cabo tareas de mantenimiento preventivo que, evidentemente, tienen un coste, para mantenerlas en un buen estado de funcionamiento durante el período de vida útil para el cuál estaban contempladas. El mantenimiento correctivo,

llevado a cabo ante la necesidad de reparación (o sustitución) de algún elemento de los SDA, es algo en la práctica inevitable. La detección, localización y reparación de fugas forman parte de las tareas de mantenimiento correctivo que pueden llegar al punto del planteamiento de la rehabilitación o la sustitución de determinados tramos de tubería en la red. La dinámica de los SDA hace que se puedan producir fallos en los diferentes elementos que lo componen que, de no ser corregidos, pueden propiciar el envejecimiento prematuro del sistema, quedando limitadas las prestaciones del servicio para el cual estuvo concebido. La presencia de fallos no corregidos en los sistemas puede sobrecargar a algunos elementos en funcionamiento y aumentar la probabilidad de ocurrencia de fallos en dichos elementos. En el caso de las tuberías, incluso cuando no haya una tasa de fallos elevada, la falta de una estrategia para el mantenimiento puede ocasionar incrementos en los costes de energía necesarios para la distribución de agua. En la medida en que pasa el tiempo, el coeficiente de conductividad de la tubería aumenta, por lo que aumentan también las pérdidas de energía que se producen a lo largo de la conducción. Una expresión para evaluar el aumento de dicho coeficiente para la fórmula de Hazen-Williams es la propuesta en (Sharp y Walski, 1988):

$$C_i^{HW}(t) = 18.0 - 37.2 \cdot \log\left(\frac{\varepsilon_i + a_i \cdot (t + g_i)}{D_i}\right), \quad (2.3.2)$$

donde:

- ε_i - rugosidad inicial del tubo i en el momento de su instalación [m]
- $C_i^{HW}(t)$ - coeficiente de conductividad hidráulica de Hazen-Williams para el tubo i
- t - lapso de tiempo entre el momento presente y el momento en que se quiere hacer la estimación [años].
- a_i - tasa de crecimiento de la rugosidad en la tubería i [m/año]
- g_i - edad de la tubería en el momento presente [años]
- D_i - diámetro de la tubería i [m]

Concebir estrategias de rehabilitación y sustitución de los elementos de un sistema de distribución de agua durante la etapa de diseño contribuye a que, con la solución resultante, se asegure un funcionamiento con cierto grado de fiabilidad para garantizar el servicio que será brindado.

Ante situaciones de rotura que imposibiliten la distribución de agua a usuarios del sistema, es conveniente evaluar un coste adicional proporcional al agua no entregada. Este coste adicional es debido a que quienes se han quedado sin suministro deberán abastecerse de agua mediante alguna otra alternativa, que será, lógicamente, más cara que el servicio que reciben a través del sistema de distribución al que están conectados.

Poder expresar económicamente de la manera más fiel posible los costes implicados en la construcción, mantenimiento y operación de los sistemas de distribución de agua, es un elemento clave para poder obtener buenos diseños de SDA a partir de métodos de optimización. Los costes involucrados y las restricciones de diseño tendrán un nivel de detalle mayor o menor en dependencia del objetivo al que va dirigida la solución que se plantee: planes maestros, ingeniería de detalle, entre otros.

Las variables involucradas en el problema son generalmente los diámetros para las tuberías nuevas, aunque, en función de las especificidades del diseño que se aborde, será necesario incluir como variables: volúmenes de almacenamiento, alturas de bombeo, la inclusión de válvulas, etcétera. La cuantificación de los costes deberá estar siempre en función de las variables involucradas.

2.4 La función objetivo.

La función objetivo debe involucrar tanto a los costes de inversión como a los costes de operación y mantenimiento; dichos costes se ubican en bases temporales diferentes.

Los costes de inversión constituyen pagos concentrados en momentos muy específicos con el objetivo de construir y poner en servicio el sistema. Están expresados en unidades monetarias. Los costos de operación y mantenimiento corresponden a cantidades devengadas periódicamente para asegurar el servicio y el correcto funcionamiento del sistema a lo largo del tiempo. Normalmente estos costos son referenciados anualmente quedando expresados en unidades monetarias al año.

Es conveniente, entonces, la expresión en una misma base temporal de todos los costes implicados. Para ello es posible expresarlos como una cantidad única concentrada en un momento y tomando en cuenta todo el período de la vida útil del sistema, o dejarlos expresados de una manera anualizada tomando en cuenta también el período de utilidad de la obra. Ambas variantes son válidas y en ambos casos también habría que considerar la tasa de interés vigente para que quede en consideración el valor temporal del dinero que ha sido invertido.

Si se tiene una cantidad C en el presente, al cabo de T años y a un interés real r , equivaldrá a una cantidad C'

$$C' = (1 + r)^T \cdot C. \quad (2.4.1)$$

Para distribuir el coste de la inversión inicial en costes anuales que puedan ser comparados con los costes anuales de operación se utiliza comúnmente el factor de amortización a_t :

$$a_t = \frac{(1 + r)^T \cdot r}{(1 + r)^T - 1}. \quad (2.4.2)$$

Dicho factor representa el coste anual de amortización de una inversión producida en el año inicial igual a una unidad monetaria y que se amortiza a lo largo de T años a una tasa de interés r . De esta forma, la inversión de un capital inicial C representa unas cargas anuales de amortización de $C \cdot a_t$ unidades monetarias.

De cualquier forma, lo más complicado dentro de la función objetivo no está en la base temporal en la que quede expresada sino en la forma misma de evaluar cada uno de las cuestiones con las que están involucrados los costes a tomar en cuenta. Varios autores han utilizado, dentro del proceso de optimización, una función objetivo que sólo considera los costes de las tuberías (Maier et al., 2003; Zecchin et al., 2005). Otros han tomado en cuenta varios costes involucrados (Matías, 2003; Dandy y Engelhardt, 2006). Una propuesta muy interesante de función objetivo es la presentada en (Martínez, 2007) y buena parte de ella ha sido tomada en cuenta en la realización de este trabajo.

No debe perderse de vista el tratamiento matemático de las restricciones a la hora de resolver el problema de optimización. En el caso de los algoritmos evolutivos, como la variante de PSO que se presentará en este documento posteriormente, las restricciones pueden ser incluidas como penalizaciones dentro de la función objetivo establecida, de forma que el no cumplimiento de alguno de los requisitos impuestos, provoque un aumento del valor de la función objetivo lo suficientemente elevado como para que la solución no sea deseable (Montalvo et al., 2008d).

La función objetivo básica tomada en cuenta en este trabajo tiene la forma siguiente:

$$F.O. = \sum_{i=1}^{\#tubos} \text{coste}_i \cdot \text{long}_i + \text{penaliz} + \text{coste_adic}, \quad (2.4.3)$$

donde coste_i es el coste unitario por metro lineal que tendrá el diámetro correspondiente a la tubería i y long_i es la longitud de dicha tubería. Las penalizaciones penaliz serán calculadas a partir de la ecuación (2.4.4), donde el factor de penalización FP , será igual a un valor elevado, cuando en el nodo que se está analizando la presión sea menor que la presión mínima deseada; de lo contrario el factor toma cero como valor, es decir, no habría penalización para el nodo en cuestión:

$$\text{penaliz} = \sum_{i=1}^{\#nodos} (p_{\text{mín}_i} - p_{\text{nodo}_i}) \cdot FP. \quad (2.4.4)$$

Nótese que las penalizaciones serán mayores mientras más por debajo de la presión mínima esté la presión en un nodo; la diferencia entre dichas presiones está representada en la ecuación (2.4.4) como $p_{\text{mín}_i} - p_{\text{nodo}_i}$ y es multiplicada por el factor FP que cuantifica el valor con que será penalizado el no cumplimiento del valor mínimo de presión. Por su parte, el coste adicional en la ecuación (2.4.3) se define como:

$$\text{coste_adic} = \sum_{i=1}^{\#tubos} w_k \cdot L_k \cdot d_k^{-u}, \quad (2.4.5)$$

donde:

- w_k - coeficiente asociado con cada tubería de la forma $a \cdot t_f \cdot (c_f + c_a \cdot V_f)$
- $a \cdot L \cdot d^{-u}$ - fórmula que da el número esperado de fallos por año en función del diámetro y la longitud de la tubería (a y u son constantes conocidas)
- t_f - número promedio de días para reparación completa de cada fallo en tubería
- c_f - coste promedio de reparación por día
- c_a - coste promedio de suministro de agua a usuarios afectados en unidades monetarias por unidad de volumen
- $V_f = 86400 \cdot Q_{rotura}$ - volumen por día que debería suministrarse a usuarios afectados por fallo del sistema (86400 es el número de segundos por día)

La estimación del valor de Q_{rotura} implica la simulación de la rotura de todas las tuberías de la red cuya importancia se desee considerar. Una vez simulada la rotura, el valor de Q_{rotura} será igualado al gasto total que dejó de suministrarse en las condiciones deseadas (presión, calidad, ...) a los usuarios.

Una interesante propuesta para formular los costes de las redes dentro de la función objetivo es la representación del coste de vida de la solución tal y como se muestra en (Kleiner et al., 2001) para el caso de tuberías simples. Kleiner et al., en su trabajo, consideran que un tubo debe ser reemplazado cada cierto tiempo y estiman el valor presente de los costes de una tubería desde el momento de su instalación hasta el momento en que es reemplazada según:

$$C(T_{ij}) = L_i \cdot Cr_{ij} \cdot e^{-rT_{ij}} + \int_0^{T_{ij}} L_i \cdot Cb_i \cdot N(t_0)_i \cdot e^{A_i \cdot (t+g_i)} \cdot e^{-rt} \cdot dt, \quad (2.4.6)$$

donde:

- Cb_i - coste de reparación de una rotura en el tubo i [€]
- Cr_{ij} - coste de reemplazar el tubo i con la alternativa j [€/km]
- T_{ij} - año en que es reemplazado el tubo i con la alternativa j
- L_i - longitud del tubo i [km]

- $N(t)_i$ - número de roturas por unidad de longitud y por año del tubo i [$km^{-1} año^{-1}$]
- $N(t_0)_i$ - valor de $N(t)_i$ en el año de la instalación del tubo
- A_i - tasa de incremento de roturas en el tubo i
- g_i - edad en años del tubo i en el presente
- r - tasa equivalente de descuento continuo

Nótese que se asume un incremento exponencial en la tasa de rotura de la tubería. Luego de que el tubo es reemplazado por primera vez, el nuevo tubo tendrá una tasa de rotura baja pero que irá creciendo hasta que el tubo sea reemplazado de nuevo. Este proceso se repetirá durante toda la vida del sistema. Kleiner et al., en su trabajo, calculan, al sumar los términos de la progresión geométrica que se obtiene, el coste de una tubería desde su primer reemplazo hasta la infinidad según la expresión:

$$C_{inf}(T_{ij}^c) = \frac{L_i \cdot Cr_{ij} \cdot e^{-rT_{ij}^c} + \int_0^{T_{ij}^c} L_i \cdot Cb_{ij} \cdot N(t)_{ij} \cdot e^{A_{ij}(t-r)} \cdot dt}{(1 - e^{-rT_{ij}^c})}, \quad (2.4.7)$$

donde:

- Cb_{ij} - coste de una rotura simple en la tubería i reemplazada con la alternativa j
- T_{ij}^c - duración del ciclo de reemplazo de la tubería i reemplazada con la alternativa j
- $N(t)_{ij}$ - número de roturas por unidad de longitud y por año del tubo i reemplazado con la alternativa j [$km^{-1} año^{-1}$]
- $N(t_0)_{ij}$ - valor de $N(t)_{ij}$ al inicio de la instalación

- A_{ij} - tasa de crecimiento de rotura de la tubería i reemplazada con la alternativa j
- r - tasa equivalente de descuento continuo

A partir de la ecuación resultante de igualar a cero la derivada de (2.4.7) con respecto a T_{ij}^c , se puede obtener el valor de la duración de los ciclos de reemplazamiento de tubería, T_{ij}^{**} , que minimiza el coste total de los ciclos de reemplazamiento hasta la infinidad. Nótese que es necesario que r y A_{ij} sean diferentes de cero. El valor presente del coste total asociado a una tubería desde el presente hasta la infinidad se determina entonces según:

$$C_{ij}^{tot}(T_{ij}^f) = Cr_{ij} \cdot e^{-rT_{ij}^f} + \int_0^{T_{ij}^f} Cb_i \cdot N(t_0)_i \cdot e^{A_i \cdot (t+g_i)} \cdot e^{-rt} \cdot dt + C_{inf}(T_{ij}^{**}) \cdot e^{-rT_{ij}^f}. \quad (2.4.8)$$

Si se iguala a cero la derivada de la ecuación (2.4.8) con respecto a T_{ij}^f se puede obtener el tiempo en el que debe efectuarse el primer reemplazo de tubería. La expresión de cálculo resultante se muestra a continuación:

$$T_{ij}^* = -g_i + \frac{1}{A_i} \cdot \ln \left[r \cdot \frac{Cr_{ij} + C_{inf}(T_{ij}^{**})}{Cb_i \cdot N(t_0)} \right]. \quad (2.4.9)$$

Varias son las formas que puede tomar la función objetivo que se plantee. La *definición de los objetivos* es, con frecuencia, la etapa más crucial y difícil del proceso de diseño. Los errores de enjuiciamiento en este punto tienen consecuencias inevitables y serias en las etapas posteriores. Estas afirmaciones pueden parecer obvias, pero es un hecho que en la mente del diseñador existe una tendencia natural a concentrarse en los síntomas del problema más que en el problema en sí mismo. Los objetivos no son siempre obvios, especialmente para quienes han estado excesivamente relacionados con una solución concreta del problema y que, por tanto, pueden estar condicionados por líneas preestablecidas de pensamiento. Los objetivos deben ser planteados de forma básica y general. Con el fin de mejorar la descripción de los objetivos, el diseñador debe ejercer cierto pensamiento lateral preguntándose por el

origen de cada necesidad percibida con el fin de construir una mejor fotografía del problema y su entorno.

Entre las ventajas del uso de los algoritmos evolutivos ya mencionadas con anterioridad, se destaca la posibilidad de que se pueda resolver el problema de optimización con independencia de la función objetivo. Esta característica, en el campo de los SDA adquiere mayor significación por la pluralidad de criterios y condiciones a tomar en cuenta en la solución del problema. Es evidente que lo más importante es contar con un algoritmo que sea capaz de asimilar todas las modificaciones y adiciones que se hagan a la función objetivo que se utilice. Debido a la naturaleza del problema que se trata, el soporte donde se realicen los cálculos debe estar preparado para enfocar el problema desde el punto de vista de una optimización multi-objetivo. En el capítulo que sigue se propone un algoritmo de optimización que precisamente tiene amplias facilidades para asimilar cualquier forma de planteamiento de los objetivos del diseño de SDA.

Capítulo 3. Algoritmo PSO y su aplicación al diseño de sistemas de distribución de agua

“Experiencia e imaginación siguen vías paralelas, aunque va muy retardada aquella respecto de esta. La hipótesis vuela, el hecho camina; a veces el ala rumbea mal, el pie pisa siempre en firme; pero el vuelo puede rectificarse, mientras el paso no puede volar nunca.”

José Ingenieros

3. Algoritmo PSO y su aplicación al diseño de sistemas de distribución de agua

3.1 Introducción

El algoritmo PSO fue concebido por Kennedy y Eberhart (Kennedy y Eberhart, 1995). La idea original fue simular el comportamiento social de una bandada de pájaros en su intento por alcanzar un destino deseado pero de cierta forma desconocido. En la PSO cada pájaro de la bandada es una solución potencial y puede ser referenciado como una partícula. Inicialmente, se genera de manera aleatoria un número de soluciones; cada solución corresponderá a una partícula (o pájaro). Las partículas de la PSO se mueven por el espacio de soluciones cada una con su velocidad propia. Dichas partículas poseen memoria y reciben información sólo de la mejor partícula en la historia del proceso de solución del problema, lo cual es un mecanismo de transmisión de la información mucho más simple que el de los Algoritmos Genéticos (AG) o el de la Optimización de las Colonias de Hormigas (ACO). Cada partícula evoluciona (cada pájaro vuela) en términos de su comportamiento individual y social para combinar movimientos en la dirección del destino deseado (Shi y Eberhart, 1998). La partícula i -ésima representa una solución potencial del problema de optimización y es caracterizada por su localización en un espacio d -dimensional, donde d es el número de variables involucradas en el problema. Durante el proceso, cada partícula tiene tres vectores asociados a ella:

- el de su posición actual dentro del espacio de soluciones

$$X_i = (x_{ij})_{j=1}^D, \quad (3.1.1)$$

- el de la mejor solución que haya alguna vez alcanzado durante el proceso de búsqueda

$$P_i = (p_{ij})_{j=1}^D, \quad (3.1.2)$$

- el vector de velocidad de movimiento, el cual posibilita el desplazamiento a un nuevo punto del espacio de soluciones

$$V_i = (v_{ij})_{j=1}^D. \quad (3.1.3)$$

En cada ciclo (iteración), se busca la partícula (pájaro) que mejor valor de la función objetivo ha encontrado; la posición de dicha partícula, $G = (g_j)_{j=1}^D$, juega un importante papel en el cálculo del movimiento posterior del resto de los pájaros. De forma coordinada, cada pájaro evoluciona cambiando su posición según:

$$X_i = X_i + V_i. \quad (3.1.4)$$

La nueva velocidad V_i será calculada como:

$$V_i = \omega_i V_i + c_1 r_1 (P_i - X_i) + c_2 r_2 (G - X_i), \quad (3.1.5)$$

de forma que una partícula se acelera hacia la mejor posición que alguna vez haya tenido, P_i , y hacia la mejor posición que haya tenido la partícula que posea en su historial el mejor valor de función objetivo encontrado, G . Esto posibilita que cada pájaro explore el espacio de búsqueda desde su nueva posición. El proceso se repite

hasta que se alcance alguna posición deseada o se cumpla alguna condición de parada previamente establecida. Nótese que el proceso hasta ahora descrito, involucra no sólo un comportamiento inteligente individual sino también una interacción social entre las partículas. De esta forma los pájaros aprenden de su propia experiencia (búsqueda local) y de la experiencia del grupo (búsqueda global).

En la ecuación (3.1.5), c_1 y c_2 son dos constantes positivas que representan el peso de los términos de aceleración estocástica que lleva a la partícula simultáneamente hacia la mejor posición que haya anteriormente encontrado y hacia la mejor posición global encontrada. Por otra parte, r_1 y r_2 son dos números aleatorios independientes que toman valores entre 0 y 1; ω es un factor de inercia empleado a propuesta de (Shi y Eberhart, 1998) para controlar el impacto de la historia de las velocidades en la velocidad actual; este factor puede variar en la medida en que van efectuándose ciclos de cálculo. Para balancear las búsquedas global y local, fue propuesto que ω decrementara su valor linealmente con el tiempo, de forma que en un inicio se favorezca la búsqueda global, y que luego sea potenciada la búsqueda local en la medida en que se avanza en el proceso de solución.

En cada dimensión la velocidad de movimiento (vuelo) está restringida por un valor mínimo y otro máximo, definidos a priori como parámetros:

$$V_{\min} \leq V_j \leq V_{\max} . \tag{3.1.6}$$

Estos parámetros resultan ser muy importantes y dependen fuertemente del problema. Son los que determinan la resolución con la que se realizará la búsqueda en la región entre la posición de una partícula y la mejor posición conocida hasta el momento. Si esta acotación es muy amplia, las partículas en su movimiento pueden pasar por encima de buenas soluciones sin percatarse; si es muy estrecha, las partículas probablemente tendrán dificultades para explorar regiones que no estén muy próximas a la vecindad donde se encuentran, producto de que fácilmente pueden quedar atrapadas en óptimos locales, sin poder moverse lo suficiente como para desplazarse hacia una mejor posición en el espacio de soluciones.

PSO, como otras técnicas evolutivas, no puede garantizar que se encuentre siempre un óptimo global, y en ocasiones puede tener una convergencia prematura hacia óptimos locales, especialmente en problemas complejos y altamente multimodales. Sin embargo, existe una probabilidad alta de encontrar al menos una buena solución

al problema de optimización que se esté resolviendo, incluso cuando esta solución no sea la óptima; por otra parte, la implementación de este algoritmo es relativamente sencilla y no requiere de grandes necesidades computacionales desde el punto de vista de la cantidad de memoria y velocidad de procesamiento necesarias.

3.2 Algoritmo PSO en el diseño de sistemas de distribución de agua

El algoritmo descrito con anterioridad puede ser considerado como el algoritmo estándar de la PSO, el cuál es aplicable a problemas continuos y, directamente, no puede ser aplicado a problemas discretos. Han sido varias las propuestas para enfrentar problemas discretos con la PSO (Al-kazemi y Mohan, 2000), (Rastegar et al., 2004), (Liao et al., 2007), (Shi et al., 2007).

El problema de diseño de SDA puede involucrar tanto a variables continuas como discretas. Para el tratamiento de las variables discretas, se plantea tomar sólo la parte entera del cálculo de las componentes de la velocidad de vuelo, haciendo esto que la nueva velocidad de vuelo siempre sea un número entero. Por consecuencia, las nuevas posiciones calculadas estarán también representadas por valores enteros puesto que el vector posición que se genere inicialmente tendrá igualmente valores enteros para las componentes que así lo requieran. Según esta idea, la ecuación (3.5) será sustituida por:

$$V_i = \text{fix}(\omega_i V_i + c_1 r_1 (P_i - X_i) + c_2 r_2 (G - X_i)), \quad (3.2.1)$$

donde $\text{fix}(\cdot)$ significa que sólo se tomará la parte entera del resultado. Debe considerarse además que el valor de la velocidad no debe estar fuera de los límites establecidos como máximo y mínimo. En caso de ser el valor de la velocidad mayor que el límite máximo, deberá igualarse la velocidad a dicho límite. Análogamente la velocidad será igualada al límite mínimo cuando su valor sea inferior.

El tratamiento de las variables discretas sólo diferirá del tratamiento de las variables continuas en el uso de la ecuación (3.2.1) o la (3.1.5) según corresponda. El resto de las cuestiones relacionadas con la PSO permanecerán inalterables.

La condición de la terminación del algoritmo está sujeta a si se ha llegado al máximo número de iteraciones o si se ha alcanzado un valor deseado de la función objetivo (Shi et al., 2007). Para los efectos de este trabajo, se propone que el algoritmo se esté

ejecutando hasta tanto se realice un número de iteraciones, definido a priori, sin que la mejor solución obtenida mejore.

3.3 Modificaciones propuestas para el algoritmo de optimización

Uno de los defectos mayores que se achaca al algoritmo PSO es su dificultad para mantener niveles de diversidad aceptables en la población de partículas con que trabaja, de modo que las búsquedas local y global estén mejor equilibradas.

Algunas técnicas evolutivas mantienen la diversidad de la población a partir del uso de algunos operadores o parámetros más o menos sofisticados, como la mutación en el caso de los AG. Varios mecanismos para forzar la diversidad pueden ser encontrados en la literatura. Un ejemplo está en los denominados sistemas artificiales inmunes, los cuales están diseñados para mantener la diversidad durante el proceso de optimización (Forrest y Perelson, 1991; Smith et al., 1993), y han sido luego extendidos para solucionar problemas de optimización con restricciones (Hajela y Lee, 1996; Yoo y Hajela, 1999). La literatura relacionada con la PSO en el contexto de la diversidad de la población es amplia. En (Angeline, 1998b) se ha dotado a la PSO de un mecanismo de selección explícito, similar al usado en algoritmos de optimización más tradicionales. En (Løvbjerg et al., 2001), se propone una variante de PSO híbrida que combina la velocidad tradicional y la actualización de la posición de las partículas de la población con la creación de subpoblaciones. La técnica denominada ‘function stretching’, con vista a aliviar los problemas de mínimos locales, fue introducida en (Parsopoulos et al., 2001a) y (Parsopoulos et al., 2001b). Otra variante, llamada IPSO (Jiang et al., 2007b), dividía la población en varios subgrupos que luego evolucionaban según la PSO más convencional; en esta variante, la población se transforma en determinados momentos de la evolución, formándose cada vez nuevos subgrupos para asegurar que la información sea compartida. La versión DPSO (Xie et al., 2002b) introduce mutaciones aleatorias en las partículas con una pequeña probabilidad; los mismos autores introdujeron la versión DEPSO (Zhang y Xie, 2003), la cual proporciona una mejor forma de mutación coordinada con la diversidad de la población, mientras mantiene la dinámica del grupo de partículas.

En general, el carácter aleatorio de los algoritmos evolutivos, adiciona diversidad genotípica y fenotípica a las poblaciones de soluciones que se manejan. Sin embargo, en la PSO, la componente aleatoria no siempre es capaz de adicionar suficiente diversidad a la población de partículas. Luego de analizar el comportamiento de la

PSO durante el proceso de optimización del diseño de redes hidráulicas, en esta investigación se detectaron frecuentes colisiones entre partículas, fundamentalmente con la partícula que poseía mejor solución. Esto, producía el efecto de que el tamaño efectivo de la población fuera más pequeño de lo que en realidad era y consecuentemente se viera reducida la efectividad a la hora de encontrar buenas soluciones. A partir de este hecho, se intentó buscar un mecanismo que evitara en lo posible las frecuentes colisiones.

Varios investigadores han analizado la PSO empíricamente (Angeline, 1998a; Xie et al., 2002b; Kennedy, 2003) y teóricamente (Clerc y Kennedy, 2002; Trelea, 2003; Yasuda et al., 2003; Jiang et al., 2007a) mostrando que las partículas, al evolucionar, convergen rápidamente (a veces prematuramente), especialmente para pequeños valores de ω (Xie et al., 2002b). Esto es, en particular, muy evidente para cualquier partícula X cuya mejor posición P esté demasiado cercana a la mejor posición global G . De acuerdo con (3.1.5), estas partículas se vuelven inactivas luego de cierta etapa de la solución (Xie et al., 2002a; Xie et al., 2002b; Higashi y Iba, 2003).

Sin perder generalidad, el análisis puede ser reducido al caso unidimensional siguiente, siendo k el número de la iteración que se está ejecutando:

$$V_{k+1} = \omega \cdot V_k + c_1 \cdot r_1 \cdot (P - X) + c_2 \cdot r_2 \cdot (G - X). \quad (3.3.1)$$

Puede verse en (3.3.1) que si la velocidad es muy pequeña, V_{k+1} no volverá a tomar valores grandes nuevamente si $|P - X|$ y $|G - X|$ también son pequeños, en la medida en que aumenta el número de iteraciones k . Esto representará una pérdida de la capacidad de exploración de la partícula en algunas generaciones debido a que la velocidad tenderá a ser cada vez más pequeña si se considera la disminución de ω en la medida en que avanza el número de iteraciones. La misma situación puede ocurrir, incluso en etapas iniciales, para la mejor partícula, caso en el que $|P - X|$ y $|G - X|$ son iguales a cero. A largo plazo, es de esperar que para cierto número de partículas ocurra que $P = G$ y se convierta G en el único punto de atracción para ellas, lo cual representa una pérdida de diversidad en la población. De hecho, si se escribe:

$$c = c_1 \cdot r_1 + c_2 \cdot r_2, \quad (3.3.2)$$

el punto equivalente de atracción h puede ser obtenido por

$$h = \frac{c_1 r_1}{c} P + \frac{c_2 r_2}{c} G, \quad (3.3.2)$$

con lo que la ecuación (3.3.1) puede quedar reescrita como

$$V_{k+1} = \omega V_k + c(h - X). \quad (3.3.2)$$

Si $P \neq G$, h cambia de una iteración a otra incluso si no se descubre ninguna mejor solución, lo que quiere decir que P y G permanecerían constantes; como consecuencia, también cambiaría el valor de V_{k+1} . Sin embargo, si es $P = G$, la ecuación (3.3.2) implica que, independientemente de los números aleatorios generados, sea $h = P = G$. Para pequeños valores de $|h - X|$, lo que típicamente ocurre en las últimas etapas del proceso de evolución, V_{k+1} se reduce, de acuerdo con (3.3.2), con la reducción de ω , lo que trae consigo que la partícula esté claramente inactiva y no tenga oportunidad de mejorar.

Para limitar las colisiones continuas que fueron detectadas, ante cada movimiento, se decidió chequear si la partícula que se intenta mover colisiona con la partícula líder o con alguna de las mejores partículas del grupo; en caso de posible colisión, esta partícula es regenerada aleatoriamente, o sea, es mandada a una posición aleatoria dentro del espacio de soluciones. Chequear la posible colisión con todas las partículas del grupo, era algo que se mostraba en la práctica innecesario y demasiado costoso, por lo que se decidió sólo chequear la posible colisión entre la partícula que se intenta mover y las m mejores partículas del grupo. La regeneración aleatoria de las partículas que intentaban colisionar, trajo consigo que se evitara la convergencia prematura del algoritmo, aumentara la diversidad de la población y mejorara la calidad de las soluciones finales.

A continuación se presenta un pseudo-código del algoritmo modificado, donde k es el número de de la iteración que se está ejecutando.

- $k = 0$

Capítulo 3. Algoritmo PSO y su aplicación al diseño óptimo de sistemas de distribución

- Generar aleatoriamente una población de M partículas: $\{X_i(k)\}_{i=1}^M$
 - Evaluar la función objetivo para cada partícula
 - Guardar la mejor posición local para cada partícula $\{P_i(k)\}_{i=1}^M$
 - Guardar la mejor posición global, $G(k)$, y la lista de las m mejores partículas para hacer el chequeo de las colisiones
 - Mientras no se cumpla la condición de terminación, hacer:
 - Determinar el parámetro de inercia $\omega(k)$
 - Comenzar un ciclo desde 1 hasta el número de partículas M
 - Calcular la nueva velocidad, $V_i(k+1)$, para cada partícula i , de acuerdo con (3.1.5); usar (3.2.1) para la optimización de variantes discretas
 - Actualizar la posición, $X_i(k+1)$, de la partícula i según (3.1.4)
 - Calcular el valor de la función objetivo para la partícula i y actualizar P_i en caso necesario
 - Si la partícula i tiene mejor valor de la función objetivo que el mejor valor encontrado por la partícula líder, entonces la partícula i pasará a ser la mejor partícula
 - Si la partícula i no es una de las m mejores partículas pero se encuentra en la posición de alguna de las m mejores partículas, entonces se regenera la partícula i ubicándola en una nueva posición aleatoria dentro del espacio de soluciones
 - Actualizar la lista de las m mejores partículas
 - $k = k + 1$
 - Mostrar la solución de la mejor particular
-

3.4 Consideraciones sobre los parámetros a utilizar.

Un aspecto laborioso de toda metaheurística, es el del ajuste de los parámetros adecuados (Ueno et al., 2005), que suele resultar tedioso y requiere mucho tiempo, esfuerzo y, también, suerte. Aunque los parámetros pueden ser decididos a priori, en muchos procesos metaheurísticos, como la PSO, es, con frecuencia, mucho más conveniente que sea el propio algoritmo quien los controle. En (Eiben et al., 1999) se describen dos formas de modificación dinámica de los parámetros: control adaptativo y control auto-adaptativo. En el primero, los parámetros cambian siguiendo alguna regla heurística basada en el estado actual del sistema. Para ello utilizan informaciones tales como el valor del contador de iteración, el desempeño de los operadores y/o la diversidad de la población. En el control auto-adaptativo, los parámetros entran a formar parte de la propia solución del problema y evolucionan con el algoritmo como cualquiera de las variables de diseño del problema original. Esta técnica ha sido utilizada con Algoritmos Genéticos (AG) incorporando parámetros a los cromosomas (Angeline, 1996; Robert et al., 1996; Herrera y Lozano, 1998; Smith, 2003; Krasnogor y Gustafson, 2004). En (Wu y Simpson, 2002) se utiliza el control auto-adaptativo para estimar el factor de penalización; en su trabajo hacen referencia a los autores de (Bäck et al., 1991) como los que introdujeron el concepto de co-evolucionar, que no es otra cosa que la forma auto-adaptativa de gestionar los parámetros. No son conocidos trabajos semejantes en PSO aplicados al diseño de SDA.

El control adaptativo sí se ha considerado con frecuencia (Kennedy y Eberhart, 1995; Jiang et al., 2007a; Arumugam y Rao, 2008) en la PSO. En este trabajo, además de utilizar el control adaptativo para el parámetro de inercia ω , introducido por (Kennedy y Eberhart, 1995), se propone un control auto-adaptativo para los demás parámetros.

La elección de los parámetros ω , c_1 , c_2 , V_{\min} y V_{\max} resulta crucial en la convergencia y eficiencia del algoritmo (Yao et al., 1999). El papel de ω es crítico. Aunque originalmente la inercia era considerada constante, puede variar de una iteración a otra. Debido a que permite el equilibrio entre las búsquedas local y global, pronto se sugirió que decreciese linealmente con el tiempo, de modo que la búsqueda global quedase reforzada en las primeras iteraciones y poco a poco fuese favoreciendo la explotación local (Janson et al., 2008). La propuesta de (Jin et al., 2007),

$$\omega = 0.5 + \frac{1}{2(\ln(k)+1)}, \quad (3.4.1)$$

utilizada aquí, siendo k el número de iteración, es especialmente favorable. En el marco que se describe en este trabajo, se trata, pues, de un parámetro con control adaptativo.

El ajuste adecuado de c_1 y c_2 en (3.1.5) y (3.2.1) puede acelerar grandemente la convergencia del algoritmo y contribuir a evitar óptimos locales. (Kennedy, 1999) proporcionó un extenso estudio sobre estos parámetros de aceleración. Por defecto, se tomaron ambos iguales a 2, pero los resultados experimentales indicaron que otras alternativas producían mejores desempeños. Trabajos recientes sugieren asignar valores linealmente variables para ambos, dando un mayor peso al parámetro cognitivo que al social, y siempre con $c_1 + c_2 \geq 4$, (Ratnaweera et al., 2004). En (Arumugam y Rao, 2008) se proponen definiciones para ambos parámetros en función del mejor óptimo local y el óptimo global actuales de la función objetivo. De nuevo, son ejemplos de control adaptativo.

Decidir el valor adecuado de $V_{m\acute{a}x}$ (habitualmente $V_{m\acute{i}n}$ se toma igual a $-V_{m\acute{a}x}$) es una tarea difícil y depende fuertemente del problema considerado: las velocidades no pueden ser demasiado arbitrarias. Así, en (Shi y Eberhart, 1998) se propone modificar la ecuación original de la PSO, que no incluía el factor de inercia, a la forma dada en (3.1.5). También, (Clerc, 1999) introdujo otro parámetro, denominado factor de constricción, que ayudaba en la convergencia. El modelo de constricción describe la forma de elegir ω , c_1 y c_2 que favorece la convergencia y evita las cotas $V_{m\acute{a}x}$ y $V_{m\acute{i}n}$ para la velocidad. En (Eberhart y Shi, 2000) se compara el desempeño del algoritmo PSO que utiliza $V_{m\acute{a}x}$ con el que utiliza solo el factor de constricción. Aunque la inclusión de este factor parece favorecer la convergencia, el modelo que lo utiliza no consigue rebajar determinados umbrales de error dentro de un número especificado de iteraciones al tratar de resolver ciertos problemas del benchmarking. Posteriormente, se comprobó que al permanecer las partículas fuera del rango deseado en el espacio de búsqueda, el modelo con factor de constricción no convergía en un número estipulado de iteraciones.

La figura 3.4.1 representa un ejemplo de un estudio paramétrico relacionado con $V_{m\acute{a}x}$, al ser aplicado el algoritmo PSO con las modificaciones expuestas al diseño de

una de las redes que aparecen en la literatura científica, la red de Hanoi; a esta red de hará referencia con más detalle en el capítulo siguiente. Se puede observar que si la velocidad de las partículas es limitada a un 20% del rango de las variables, la calidad de la soluciones es esencialmente más baja, ya que esta limitación tan estricta impide a las partículas explorar convenientemente el espacio de búsqueda. Por otra parte, si el límite se establece en el 40% o más, incluyendo la posibilidad de libertad total de movimientos, los resultados son mucho mejores.

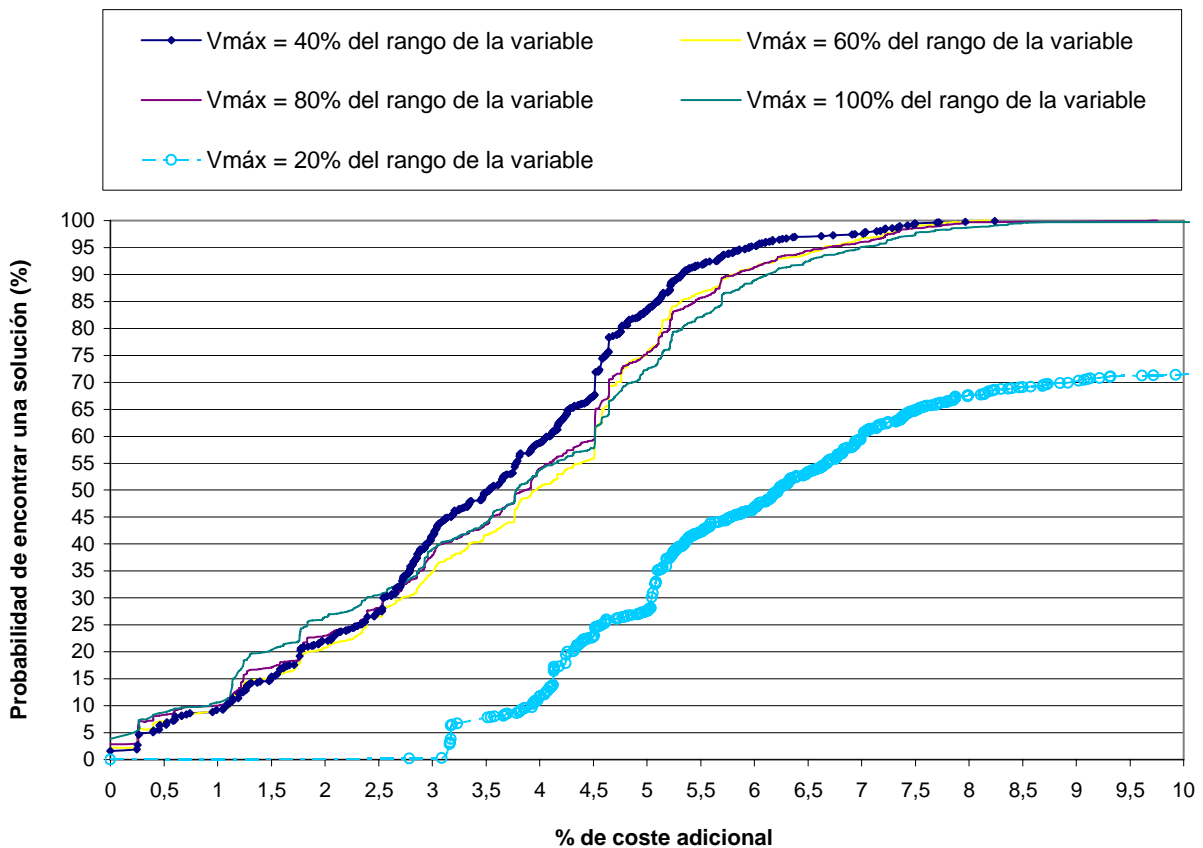


Figura 3.4.1 Probabilidad de obtención de soluciones, en algún tanto por ciento más costosa que la mejor solución conocida ejecutando el algoritmo una sola vez para distintos valores de $V_{máx}$ (red de Hanoi)

Argumentos y gráficas similares pueden esgrimirse para los coeficientes c_1 y c_2 , que muestran que las mejores soluciones se obtienen para ciertos rangos de tales parámetros. Pero no existe evidencia de que tales valores sean los mejores simultáneamente, ni durante todo el proceso, ni para todas las partículas. En el capítulo siguiente, se presentan gráficas, para el caso de la red de Hanoi, que muestran para 100 pájaros, el comportamiento de la gestión auto-adaptativa de sus parámetros.

En este trabajo los valores de tales parámetros no son constantes, como en la PSO clásica, ni se los hace variar con pautas a priori, como en las variantes adaptativas de la PSO. Por el contrario, se incorporan al propio problema de optimización. En efecto, cada partícula va a autogestionar sus propios parámetros utilizando las reglas de manipulación de la PSO dadas por (3.1.4) y (3.1.5). Esto se consigue incorporando tres nuevas variables a cada partícula X_i . En general, si la dimensión es d y el número de parámetros auto-gestionados es ag , el nuevo vector de posición para la partícula i tendrá $d + ag$ componentes. Las d primeras variables corresponden a la posición real de la partícula y las ag últimas a los parámetros autogestionados. Obviamente, estas nuevas variables no intervienen en la función objetivo, pero se manipulan utilizando el mismo paradigma mixto de aprendizaje individual y social de la PSO. Al igual que X_i , también V_i y P_i tendrán dimensión $d + ag$:

$$X_i = (X_{i1}, \dots, X_{id}, X_{id+1}, \dots, X_{id+ag}), \quad (3.4.2)$$

$$V_i = (V_{i1}, \dots, V_{id}, V_{id+1}, \dots, V_{id+ag}), \quad (3.4.3)$$

$$P_i = (P_{i1}, \dots, P_{id}, P_{id+1}, \dots, P_{id+ag}), \quad (3.4.4)$$

Al utilizar las ecuaciones (3.1.4) y (3.1.5), cada partícula tiene la capacidad de ajustar sus parámetros considerando a la vez los parámetros que tuvo cuando alcanzó su mejor posición y los parámetros del líder que lo han llevado a su situación privilegiada. Así, las partículas no solo utilizan su conocimiento individual y la cooperación social para mejorar de posición, sino también para mejorar la forma en que evolucionan al acomodar sus parámetros a las mejores condiciones conocidas, las suyas propias en su momento de mayor éxito y las del líder.

El siguiente pseudo-código presenta el algoritmo propuesto con control auto-adaptativo de parámetros; k es el número de la iteración.

- $k = 0$
- Generar aleatoriamente una población de M partículas: $\{X_i(k)\}_{i=1}^M$

- Evaluar la función objetivo para cada partícula (sólo las d primeras variables intervienen)
- Asignar las mejores posiciones $\{P_i(k)\}_{i=1}^M$ (incluyendo las ag últimas variables)
- Guardar la mejor posición global, $G(k)$, y la lista de las m mejores partículas (incluyendo los parámetros)
- Mientras no se cumpla la condición de terminación, hacer:
 - Determinar el parámetro de inercia $\omega(k)$
 - Comenzar un ciclo desde 1 hasta el número de partículas M
 - Tomar los parámetros auto-gestionados que están contenidos en el vector X_i para hacer los cálculos
 - Calcular la nueva velocidad, $V_i(k+1)$, para cada partícula i , de acuerdo con (3.1.5); usar (3.2.1) para la optimización de variantes discretas
 - Actualizar la posición, $X_i(k+1)$, de la partícula i según (3.1.4)
 - Calcular el valor de la función objetivo para la partícula i y actualizar P_i en caso necesario
 - Si la partícula i tiene mejor valor de la función objetivo que el mejor valor encontrado por la partícula líder, entonces la partícula i pasará a ser la mejor partícula
 - Si la partícula i no es una de las m mejores partículas pero se encuentra en la posición de alguna de las m mejores partículas, entonces se regenera la partícula i ubicándola en una nueva posición aleatoria dentro del espacio de soluciones
 - Actualizar la lista de las m mejores partículas

- $k = k + 1$
- Mostrar la solución de la mejor particular

Los tiempos de ejecución del algoritmo son considerablemente pequeños. No obstante, el uso de funciones objetivo cuya evaluación resulte costosa, pudiera hacer muy conveniente la reducción de los tiempos de ejecución. En este caso, el autor sugiere el empleo de las bondades de la computación paralela y distribuida, inclinándose más por la distribución que por la paralelización del algoritmo.

Capítulo 4. Casos de estudio

...el principio y el fin de la teoría están en la práctica...

4. Casos de estudio y análisis de resultados

4.1 Introducción

El algoritmo PSO con las modificaciones planteadas en este trabajo ha sido aplicado a cinco casos de diseño óptimo de SDA. Dos de ellos corresponden a las redes de Hanoi y de New York que son clásicos en la literatura científica relacionada con el diseño óptimo de SDA. Los otros tres corresponden a situaciones reales de un proyecto, cuyo objetivo ha estado dirigido al diseño del sistema de distribución de agua de Lima, Perú. El proyecto ha estado a cargo de la empresa Wasser S.A.E., radicada en Madrid, la cual dio la posibilidad a este autor de probar los resultados de investigación presentados en este trabajo.

Debido a que los algoritmos evolutivos no son absolutamente determinísticos, puesto que presentan componentes aleatorias que provocan que no siempre se obtenga la misma solución para un mismo problema concreto, se ha hecho un estudio estadístico de la obtención de posibles soluciones para las redes de Hanoi y New York. Los resultados de dicho estudio permiten estimar, para estas dos redes, la probabilidad con la que el algoritmo puede encontrar la mejor solución conocida, o soluciones con un coste en algún tanto por ciento superior. Adicionalmente, son comparados los resultados obtenidos antes y después de introducir las modificaciones propuestas en este trabajo al algoritmo PSO.

Las redes de Hanoi y New York también fueron utilizadas para hacer el mismo análisis estadístico anteriormente mencionado, pero considerando el tratamiento auto-adaptativo de los parámetros involucrados en el funcionamiento del algoritmo,

tal y como se hizo referencia en el epígrafe 3.4 de este trabajo. Algunos elementos adicionales con respecto al comportamiento numérico de los parámetros cuando son tratados de manera auto-adaptativa, se presentan tomando como red en estudio a la de Hanoi. Con el fin de trabajar con las mismas reglas utilizadas en la literatura científica con relación a estos dos problemas clásicos, el coste total de la red fue establecido como la suma del coste de inversión inicial de las tuberías más un coste de penalización en caso del no cumplimiento de las presiones mínimas requeridas en los nodos de consumo:

$$F = \sum_{i=1}^T C(D_i) \cdot L_i + \sum_{j=1}^K p_j \cdot v_j \quad (4.4.1)$$

T es el número de tuberías de la red, $D = (D_i)$ es el vector de diámetros de la tuberías, que es T -dimensional, y sus componentes pertenecen a un conjunto discreto de diámetros disponibles comercialmente, $C(D_i)$ es el coste unitario por unidad de longitud del diámetro D_i , y L_i es la longitud de la tubería i -ésima. Se debe observar que $C(\cdot)$ es una función no lineal del diámetro; K es el número de restricciones, v_j es la violación de la j -ésima restricción y p_j representa el parámetro de penalización correspondiente a la restricción j con un valor elevado (en este trabajo 10^9) para asegurar que las soluciones no factibles tengan un coste mayor que las factibles. En el caso de la restricción que consiste en que se alcance una presión igual o mayor que un valor mínimo, se utiliza para el cálculo de v_j la expresión: $v_j = (P_{\min} - P_j) \cdot H(P_{\min} - P_j)$, con $H(\cdot)$ siendo la función escalón de Heaviside, la cual toma valores cero o uno en dependencia de si $P_{\min} - P_j$ es menor o mayor que cero, respectivamente.

Debido a que los objetivos de este trabajo no iban dirigidos exclusivamente al tratamiento de problemas con naturaleza académica y relativamente pequeños, se han incluido los tres casos anteriormente mencionados que corresponden a situaciones reales de proyecto. La inclusión de estos ejemplos de redes mucho más acordes a las necesidades de los profesionales que trabajan el tema de diseño de SDA persigue la valoración del desempeño del algoritmo utilizado en problemas considerablemente más grandes que los que habitualmente se abordan desde el punto de vista académico.

Para estos problemas, a diferencia de las redes de Hanoi y New York, se utilizó una función objetivo que tomaba en cuenta los costes de inversión inicial, la violación de las restricciones de presión máxima y mínima, los costes de reparación de roturas y los costes adicionales ante la imposibilidad del suministro del agua necesaria a algún usuario durante hipotéticas situaciones de fallo. Los elementos que fueron tomados en cuenta dentro de la función objetivo responden a las necesidades de una de las variantes de proyecto analizadas. Las modificaciones o inclusiones de elementos adicionales a tomar en cuenta no tienen mayores complicaciones. Los posibles cambios son prácticamente inmediatos si se hace uso del programa de ordenador implementado durante el desarrollo de la investigación que en este trabajo se presenta. Los detalles de dicha aplicación informática se exponen en el capítulo 5. Por el momento sólo es importante decir que ha sido utilizada en la totalidad de los diseños realizados y presentados en este documento.

Interesantes comparaciones pueden llevarse a cabo a partir del análisis de los resultados de diseño obtenidos haciendo uso de diferentes funciones objetivo. Puede constatarse que una más acertada evaluación de los costes permitirá el alcance de soluciones que presenten un deseable grado de fiabilidad, a pesar de que no haya sido introducida ninguna restricción explícita con respecto a los indicadores cuantitativos de fiabilidad publicados en la literatura.

Como condición de parada del algoritmo de cálculo utilizado en cada caso que se presenta en este trabajo, se estableció que debía detenerse la ejecución cuando sucedieran 800 iteraciones sin que hubiera alguna mejora en la solución encontrada. También debe mencionarse, a efectos comparativos con otros trabajos que hayan abordado los mismos ejemplos, que se utilizó EPANET2 y la fórmula de Hazen-Williams para el análisis hidráulico de las soluciones potenciales. El uso de esta fórmula responde al estándar con que han sido tratados los problemas de Hanoi y New York y a las peticiones de proyecto en el resto de los casos tratados. En todo momento se utilizó el sistema internacional de unidades. Usar otra fórmula para evaluar las pérdidas u otro sistema de unidades no implica un cambio en la forma en que el algoritmo de optimización trabaja pero pudiera provocar una diferencia en los resultados. Para la fórmula de Hazen-Williams no todos los investigadores usan los mismos coeficientes. La diferencia de los coeficientes que se utilicen en la fórmula está en función de cuán preciso se haya sido a la hora de transformar la expresión original de Hazen-Williams para trabajar con ella de una forma diferente a la que originalmente se planteó: 1) transformaciones para trabajar con la fórmula en función del caudal y no en función de la velocidad. 2) Transformaciones para trabajar en un sistema de unidades diferente al originalmente propuesto.

4.2 Red de Hanoi

Esta red fue propuesta por (Fujiwara y Khang, 1990) y ha sido varias veces tratada en la literatura (Savic y Godfrey, 1995; Cunha y Sousa, 1999; Matías, 2003; Zecchin, 2003; Zecchin et al., 2005; Montalvo et al., 2007a). Consta de 34 tuberías y 31 nodos de demanda organizados en tres mallas básicas; es abastecida por una fuente cuya cota piezométrica es fija e igual a 100 metros de columna de agua (mca). Se trata de encontrar el diámetro de cada una de las tuberías de forma que el coste total de la red sea el menor posible, cumpliéndose con una presión mínima de 30 mca en los nodos de demanda. Un esquema de la red, que permite una mejor interpretación de los datos y de sus resultados se muestra a continuación:

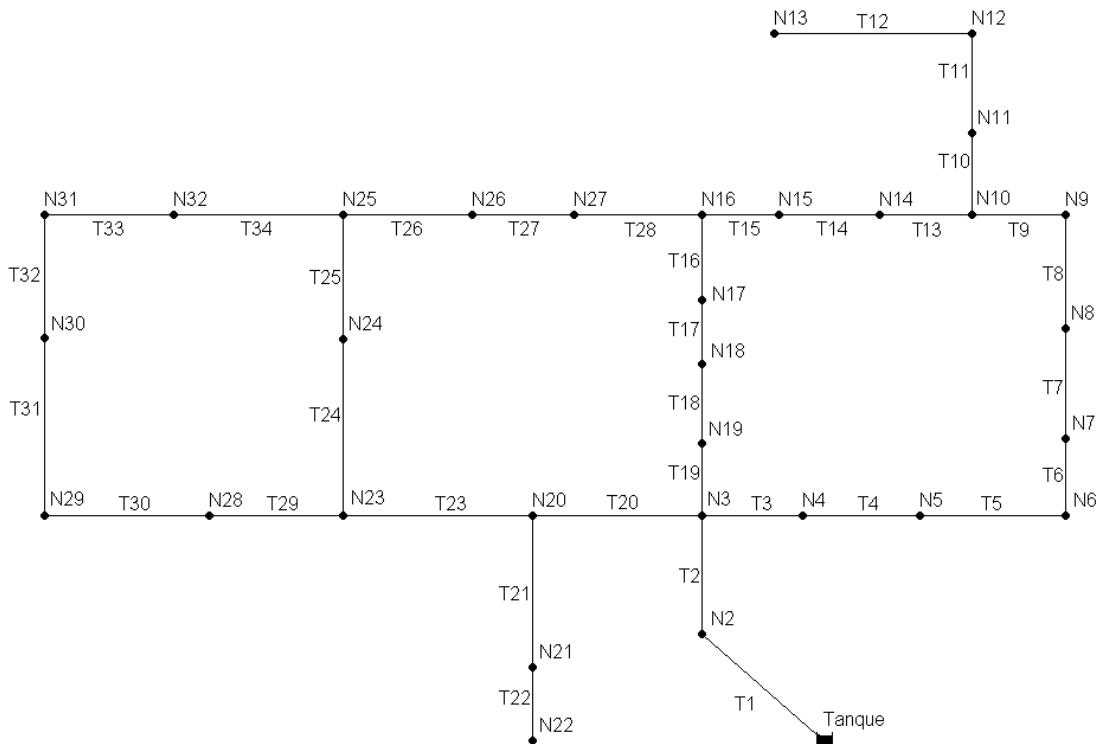


Figura 4.2.1 Esquema de la red de Hanoi

Para resolver el problema hay 6 diámetros candidatos posibles y, aunque aparentemente es una red sencilla, existen en este caso $6^{34} \approx 2.8 \times 10^{26}$ soluciones potenciales; analizar cada una de estas soluciones sería inviable en la práctica; es por

ello que se muestra ventajosa la exploración de este amplio espacio de soluciones mediante el uso de algoritmos evolutivos.

El conjunto de los diámetros comerciales disponibles se encuentra en la tabla siguiente:

Tabla 4.2.1 Diámetros comerciales para el diseño de la red de Hanoi

Diámetro (mm)	Coste Unitario (\$/m)	C _{H-W}
304,8	45,726	130
406,4	70,4	130
508	98,378	130
609,6	129,333	130
762	180,748	130
1016	278,28	130

Inicialmente el problema fue resuelto utilizando el algoritmo PSO propuesto, pero sin considerar el enriquecimiento de la diversidad de la población comentado en el epígrafe 3.3. Tampoco fue considerado inicialmente el tratamiento auto-adaptativo de los parámetros. La selección de los parámetros del algoritmo a utilizar, se hizo a partir de un estudio de trabajos previos presentados por otros autores que han ido dirigidos a diferentes problemas de optimización utilizando PSO (Jin et al., 2007; Liao et al., 2007; Shi et al., 2007). Los parámetros con que finalmente se han realizado los cálculos aparecen seguidamente:

- $c1 = 3$
- $c2 = 2$
- El factor de inercia se calcula según la expresión:
$$\omega = 0.5 + \frac{1}{2 * (\ln(k) + 1)}$$
- Velocidad máxima para variables discretas = 50% rango de la variable
- Velocidad máxima para variables continuas = 20% rango de la variable
- Velocidad mínima = -Velocidad máxima
- Tamaño de la población = 100

Fueron realizadas 100 ejecuciones del algoritmo para este problema bajo las condiciones que se acaban de mencionar. El coste de la mejor solución de cada ejecución aparece representado en la figura 4.2.2.

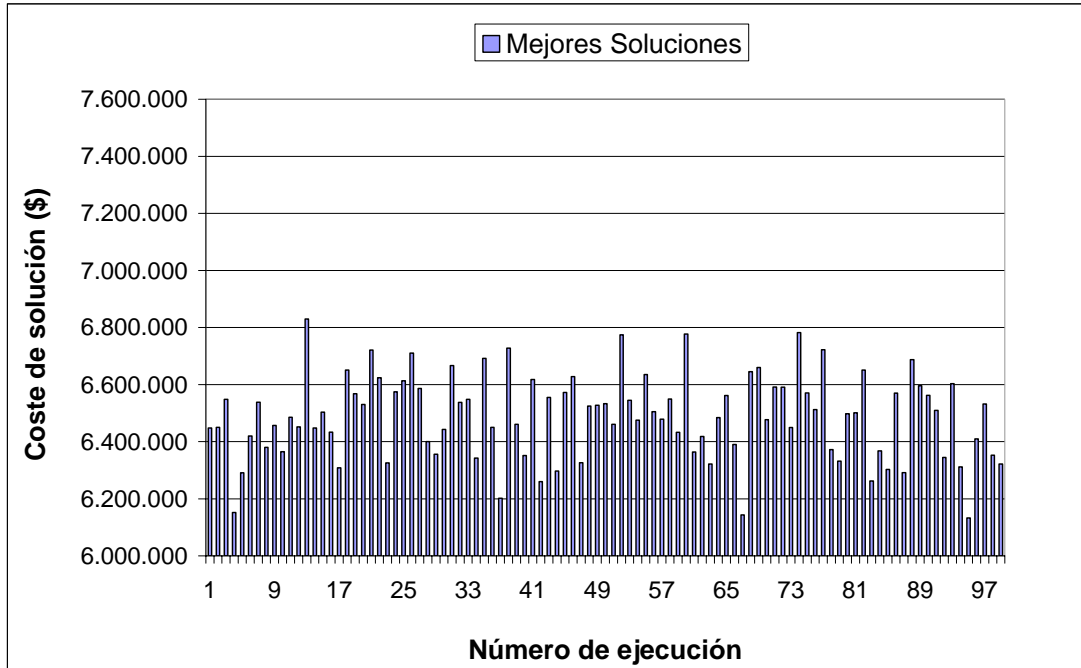


Figura 4.2.2 Representación de la mejor solución de cada una de las 100 ejecuciones

Otras 100 ejecuciones fueron realizadas incorporando la modificación propuesta en el epígrafe 3.3 para enriquecer la diversidad de la población de partículas (pájaros). En la figura 4.2.3 puede verse el mejoramiento, en sentido general, del coste de la mejor solución de cada iteración. El valor promedio del coste, sin considerar y considerando el propuesto enriquecimiento de la diversidad de la población, es 6.487 millones de dólares y 6.297 millones de dólares respectivamente. Estos resultados aparecen publicados en (Montalvo et al., 2008d) y (Montalvo et al., 2008e).

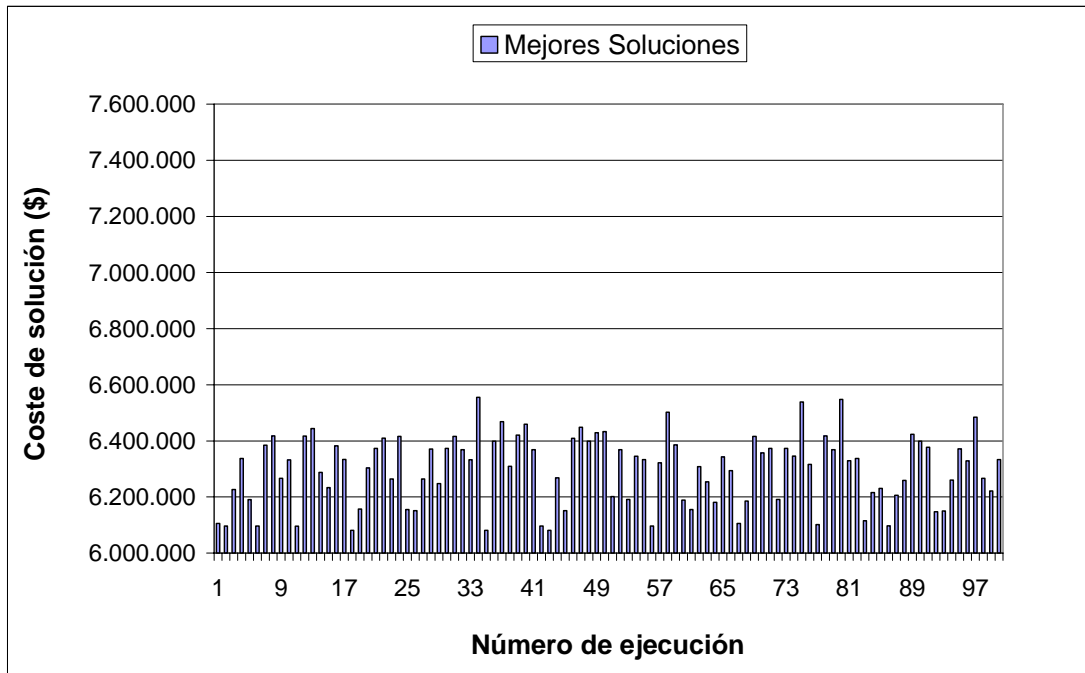


Figura 4.2.3 Representación de la mejor solución de cada una de las 100 ejecuciones de la red de Hanoi

Además de adicionar la diversidad enriquecida para la población de partículas, se consideró el tratamiento auto-adaptativo de parámetros tal y como se propuso en el epígrafe 3.4 y se llevaron a cabo otras 100 ejecuciones. El coste de la mejor solución de cada una de estas ejecuciones tiene un valor promedio aproximadamente de 6.5 millones de dólares. La no mejora aparente de este resultado, en cuanto a coste promedio, se explicará en el epígrafe 4.5.

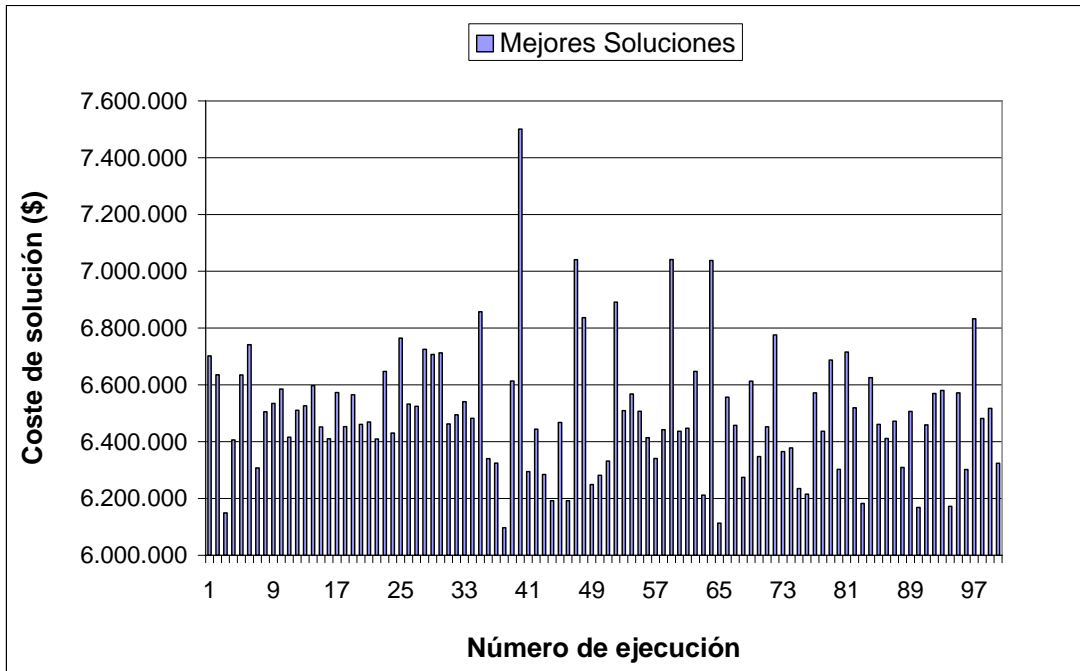


Figura 4.2.2 Representación de 100 ejecuciones del algoritmo PSO con diversidad enriquecida y parámetros auto-adaptativos para la red de Hanoi

Una comparación económica entre la mejor solución obtenida en las ejecuciones realizadas en este trabajo y las que aparecen en la literatura, se resume a continuación:

Tabla 4.2.2 Resumen de soluciones publicadas en la literatura para la red de Hanoi

Referencia	Método usado	Coste x10 ⁶ \$
(Cunha y Sousa, 1999)	Recocido Simulado	6.056
(Savic y Walters, 1997)	Algoritmos Genéticos	6.195
(Matías, 2003)	Algoritmos Genéticos	6.093
(Wu y Walski, 2005)	Algoritmos Genéticos	6.056
(Zecchin et al., 2005)	AS _{i-best} ²	6.367
Este trabajo	PSO-diversidad enriquecida	6.081

² Es un algoritmo basado en Ant Colony Optimization pero que adopta un esquema diferente al estándar para la actualización de la feromona.

Tabla 4.2.3 Resultados del diseño de la red de Hanoi según varios investigadores

Tubo	Diám.^[1] (mm)	Diám.^[2] (mm)	Diám.^[3] (mm)	Diám.^[4] (mm)	Diám.^[5] (mm)	Diám.^[6] (mm)
T 1	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00
T 2	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00
T 3	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00
T 4	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00
T 5	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00
T 6	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00
T 7	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00
T 8	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00
T 9	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	762.00	1016.00
T 10	762.00	762.00	762.00	762.00	762.00	762.00
T 11	609.60	762.00	609.60	609.60	609.60	609.60
T 12	609.60	609.60	609.60	609.60	609.60	609.60
T 13	508.00	406.40	508.00	508.00	304.80	508.00
T 14	406.40	406.40	406.40	406.40	304.80	406.40
T 15	304.80	304.80	304.80	304.80	304.80	304.80
T 16	304.80	406.40	304.80	304.80	609.60	304.80
T 17	406.40	508.00	406.40	406.40	508.00	406.40
T 18	508.00	609.60	609.60	508.00	1016.00	609.60
T 19	508.00	609.60	609.60	508.00	609.60	508.00
T 20	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00
T 21	508.00	508.00	508.00	508.00	508.00	508.00
T 22	304.80	304.80	304.80	304.80	304.80	304.80
T 23	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00	1016.00
T 24	762.00	762.00	762.00	762.00	762.00	762.00
T 25	762.00	762.00	762.00	762.00	609.60	762.00
T 26	508.00	508.00	508.00	508.00	508.00	508.00
T 27	304.80	304.80	304.80	304.80	304.80	304.80
T 28	304.80	304.80	304.80	304.80	304.80	304.80
T 29	406.40	406.40	406.40	406.40	508.00	406.40
T 30	304.80	406.40	304.80	304.80	406.40	304.80
T 31	304.80	304.80	304.80	304.80	406.40	304.80
T 32	406.40	304.80	406.40	406.40	304.80	406.40
T 33	406.40	406.40	406.40	406.40	304.80	406.40
T 34	609.60	508.00	609.60	609.60	508.00	609.60

[1] (Cunha y Sousa, 1999)

[2] (Savic y Walters, 1997)

[3] (Matías, 2003)

[4] (Wu y Walski, 2005)

[5] (Zecchin et al., 2005)

[6] Este trabajo

Bajo las condiciones en las que se estimaron las pérdidas de carga en este trabajo, las soluciones presentadas con coste de 6.056 millones no cumplen con la presión mínima requerida en todos los nodos de la red.

En los epígrafes 4.4 y 4.5 pueden verse resultados adicionales interesantes con respecto a la solución de esta red y el algoritmo que se presenta en este trabajo.

4.3 Red de New York

La red de New York, introducida en (Schaake y Lai, 1969), ha sido considerada varias veces en la literatura científica (Savic y Walters, 1997; Maier et al., 2003; Matías, 2003). Esta red tiene un único punto de suministro, con cota piezométrica fija, para abastecer 19 nodos de demanda. A diferencia del diseño visto en el epígrafe 4.2, en este caso la red es existente, pero su edad y el incremento de las demandas hacen que no se cumpla con la presión mínima de 30 mca, requerida en todos sus nodos de demanda. Consecuentemente se trata de duplicar algunas de las tuberías para poder hacer la distribución de agua en el rango de presiones deseado. El problema consiste en determinar qué tuberías han de ser duplicadas y qué diámetro ha de utilizarse para la nueva tubería que se coloque cuando se lleva a cabo la duplicación.

Existen 15 diámetros comerciales candidatos para duplicar una tubería y adicionalmente se tiene la opción de no hacer nada en un determinado conducto; esto hace que en el espacio de búsqueda se cuente con $16^{21} \approx 1.93 \times 10^{25}$ soluciones potenciales del problema. El conjunto de los diámetros comerciales disponibles se encuentra en la tabla siguiente:

Tabla 4.3.1 Diámetros comerciales para el diseño de la red de New York

Diámetro (pulgadas)	Diámetro (mm)	Coste (\$/m)
36	914,4	306,76
48	1219,2	439,63
60	1524	577,43
72	1828,8	725,07
84	2133,6	875,98
96	2438,4	1036,75
108	2743,2	1197,51
120	3048	1368,11
132	3352,8	1538,71

144	3657,6	1712,6
156	3962,4	1893,04
168	4267,2	2073,49
180	4572	2260,5
192	4876,8	2447,51
204	5181,6	2637,8

Un esquema de la red que permite una mejor interpretación de los resultados se muestra a continuación:

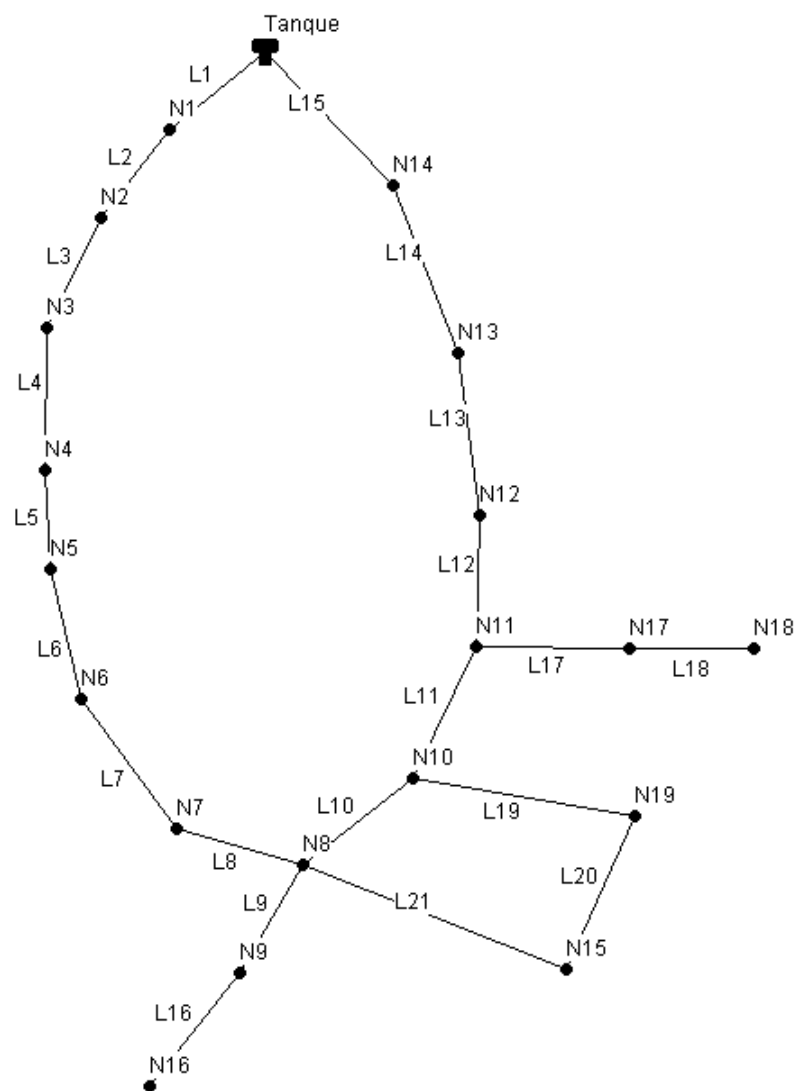


Figura 4.3.1 Esquema de la red de New York

Inicialmente el problema fue resuelto utilizando el algoritmo PSO propuesto, pero sin considerar el enriquecimiento de la diversidad de la población comentado en el epígrafe 3.3. Tampoco fue considerado inicialmente el tratamiento auto-adaptativo de los parámetros. La selección de los parámetros del algoritmo a utilizar fue la misma que para la red de Hanoi, aprovechando la experiencia de los buenos resultados obtenidos anteriormente.

Se realizaron 100 ejecuciones del algoritmo para este problema, bajo las condiciones que se acaban de mencionar. El coste de la mejor solución de cada ejecución aparece representado en el gráfico de la figura 4.3.2.

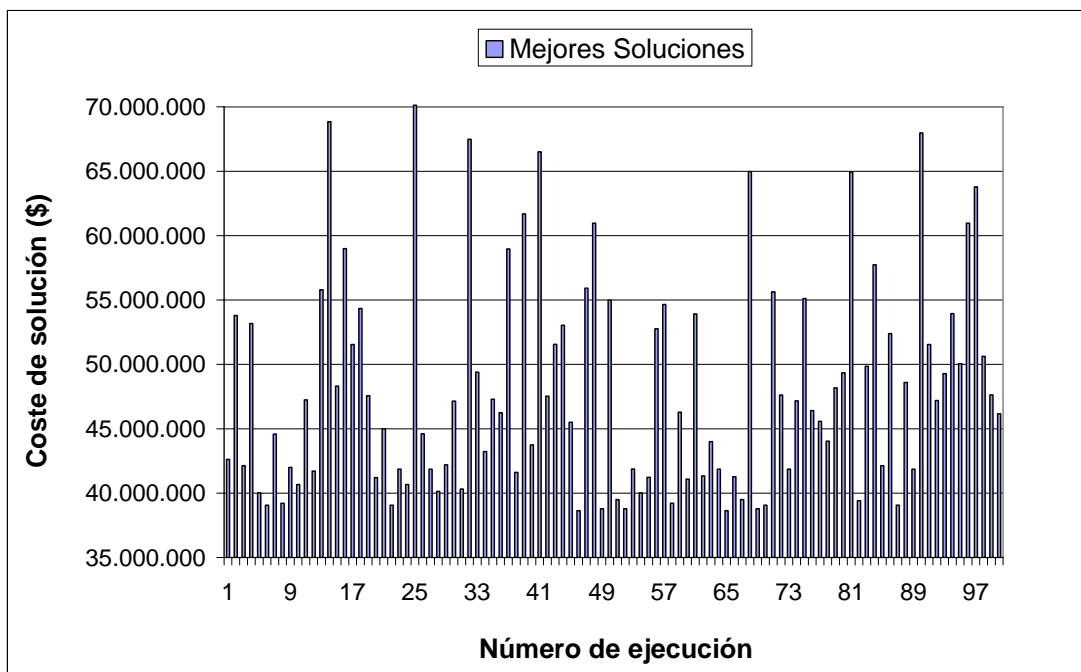


Figura 4.3.2 Coste del diseño óptimo para el problema de New York

Otras 100 ejecuciones fueron realizadas incorporando la modificación propuesta en el epígrafe 3.3 para enriquecer la diversidad de la población de partículas (pájaros). En el gráfico de la figura 4.3.3 puede verse el mejoramiento, en sentido general, del coste de la mejor solución de cada iteración. El valor promedio del coste, sin considerar y considerando el propuesto enriquecimiento de la diversidad de la población, es 48.039 millones de dólares y 39.761 millones de dólares respectivamente. Los resultados que aquí se presentan aparecen en (Montalvo et al., 2008d) y (Montalvo et al., 2008e).

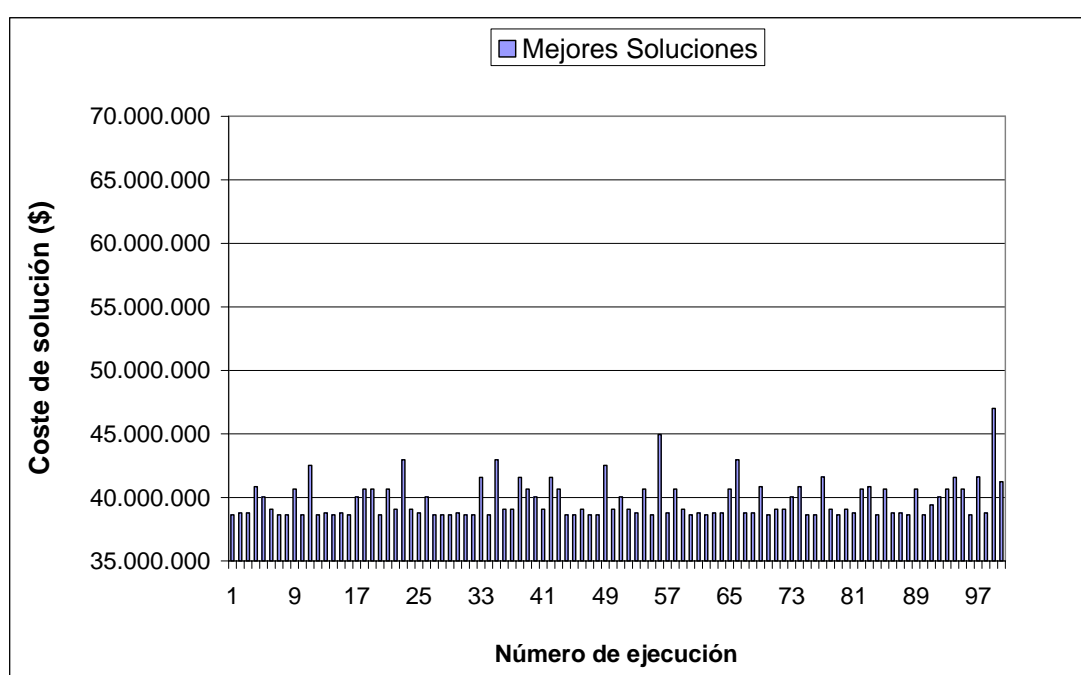


Figura 4.3.3 Representación de la mejor solución de cada una de las 100 ejecuciones de la red de New York

Además de adicionar la diversidad enriquecida para la población de partículas, se consideró el tratamiento auto-adaptativo de parámetros tal y como se propuso en el epígrafe 3.4 y se llevaron a cabo otras 100 ejecuciones. El siguiente gráfico representa los valores de coste obtenidos para cada ejecución:

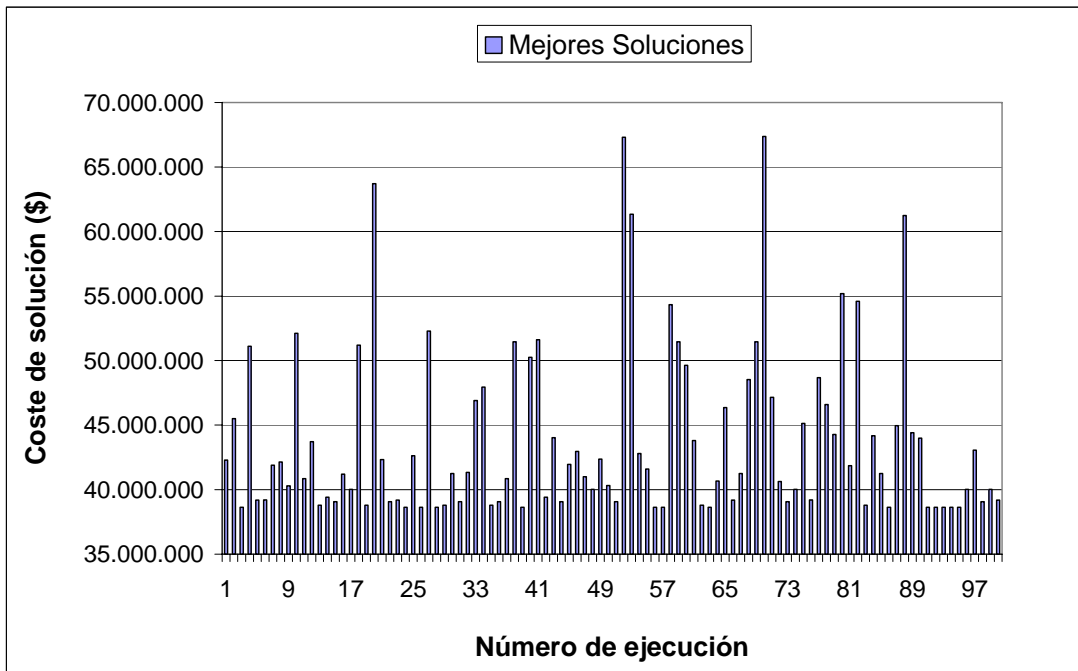


Figura 4.3.4 Representación de 100 ejecuciones del algoritmo PSO con diversidad enriquecida y parámetros auto adaptativos para la red de New York

El coste de la mejor solución de cada una de estas ejecuciones tiene como valor promedio 43.73 millones de dólares. En el epígrafe 4.5 se explica este aparente empeoramiento de los resultados.

La comparación económica entre la mejor solución obtenida en las ejecuciones realizadas en este trabajo y las que aparecen en la literatura para el caso de la red de New York, se detalla a continuación:

Tabla 4.3.2 Resultados del diseño de la red de New York según varios investigadores

Referencia	Método usado	Coste x10 ⁶ \$
(Dandy et al., 1996)	Algoritmos Genéticos	38.80
(Wu y Simpson, 2001)	Algoritmos Genéticos	38.80
(Maier et al., 2003)	Ant Colony Optimization	38.64
(Afshar y Mariño, 2007)	Algoritmos Genéticos	38.64
Este trabajo	PSO-diversidad enriquecida	38.64

Tabla 4.3.3 Resultados del diseño de la red de New York según varios investigadores

Tubo	Diám. (mm)	Diám. (mm)	Diám. (mm)	Diám. (mm)	Diám. (mm)
T 1	0	0	0	0	0
T 2	0	0	0	0	0
T 3	0	0	0	0	0
T 4	0	0	0	0	0
T 5	0	0	0	0	0
T 6	0	0	0	0	0
T 7	0	0	144	144	144
T 8	0	0	0	0	0
T 9	0	0	0	0	0
T 10	0	0	0	0	0
T 11	0	0	0	0	0
T 12	0	0	0	0	0
T 13	0	0	0	0	0
T 14	0	0	0	0	0
T 15	120	120	0	0	0
T 16	84	84	96	96	96
T 17	96	96	96	96	96
T 18	84	84	84	84	84
T 19	72	72	72	72	72
T 20	0	0	0	0	0
T 21	72	72	72	72	72
Ref.	(Dandy et al., 1996)	(Wu y Simpson, 2001)	(Maier et al., 2003)	(Afshar y Mariño, 2007)	Este trabajo

En el epígrafe siguiente pueden verse resultados adicionales interesantes con respecto a la solución de esta red y el algoritmo que se presenta en este trabajo.

4.4 Análisis estadístico de obtención de soluciones

En este epígrafe se han tomado como referencia los resultados obtenidos para las redes de Hanoi y New York. El diseño de estas dos redes ya había sido ejecutado 100 veces inicialmente para el algoritmo PSO con y sin la modificación de la diversidad enriquecida. Otras 100 ejecuciones fueron hechas con la diversidad enriquecida y el tratamiento auto-adaptativo de parámetros tal y como se mencionó en los epígrafes precedentes. Los fundamentos y resultados del análisis estadístico que en este trabajo se presenta aparecen publicados en (Izquierdo et al., 2008b).

Usando la diversidad enriquecida, se realizaron para cada red 1000 ejecuciones más y finalmente otras 2000. De esta forma se obtuvieron tres muestras de diferentes tamaños (100, 1000, 2000), representativas de las soluciones a estos dos problemas cuando se utiliza el algoritmo PSO propuesto con la modificación de la diversidad enriquecida. Los valores mínimos de la función objetivo en cada muestra fueron analizados según la prueba de Kruskal-Wallis (Hollander y Wolfe, 1999) para análisis no paramétricos. El estadístico utilizado por este test, T , se define como:

$$T = \frac{1}{S^2} \left(\sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - N \frac{(N+1)^2}{4} \right), \quad (4.4.1)$$

siendo

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \left(\sum_{\text{todos los rangos}} R(X_{ij})^2 - N \frac{(N+1)^2}{4} \right), \quad (4.4.2)$$

donde k es el número de grupos (tres en este caso), N el número total de ejecuciones (3100 en este caso), n_i el tamaño del grupo i (100, 1000, y 2000, respectivamente), R_i es la suma de los rangos del grupo i , y $R(X_{ij})$ es el rango de todas las muestras.

La hipótesis nula (iguales medidas estadísticas de las muestras) no fue rechazada luego de que se obtuvieran valores de probabilidad de 0.7030 y 0.6448 para los problemas de Hanoi y New York respectivamente. En la figura 4.4.1 puede verse la distribución de los valores de la función objetivo para ambos casos. La aceptación de iguales medidas estadísticas implica que no sean necesarias muestras de 2000 ó 1000 elementos para hacer comparaciones sino que sería suficiente utilizar muestras de tamaño 100.

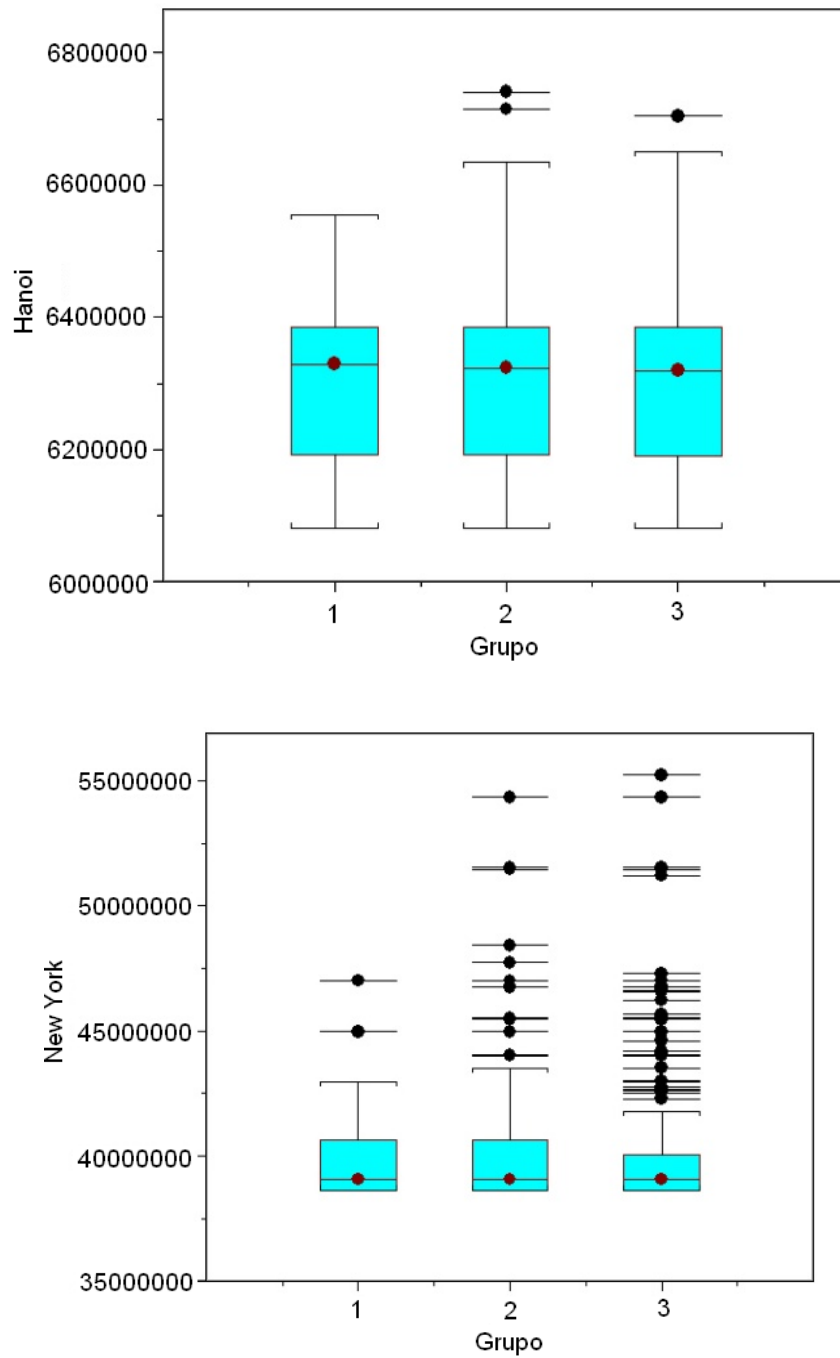


Figura 4.4.1 Gráficos de cajas de la distribución de los valores de la función objetivo para cada ejemplo considerado

Los valores mínimos de la función objetivo obtenidos en las 100 ejecuciones realizadas con y sin diversidad enriquecida fueron comparados usando la prueba U

de Mann-Whitney para análisis no paramétricos. El estadístico U es esencialmente el mismo que T para Kruskal-Wallis, pero es usado sólo para dos grupos. La hipótesis nula (iguales medidas estadísticas centrales para las dos versiones de PSO) fue rechazada luego de obtener un valor de probabilidad igual a cero. Los gráficos de distribución de los valores mínimos de la función objetivo, para ambas versiones de los dos ejemplos tratados, se muestran en la figura 4.4.2. Como puede observarse, la inclusión de la diversidad enriquecida en el algoritmo PSO, mejora claramente el desempeño de su versión estándar en los casos tratados.

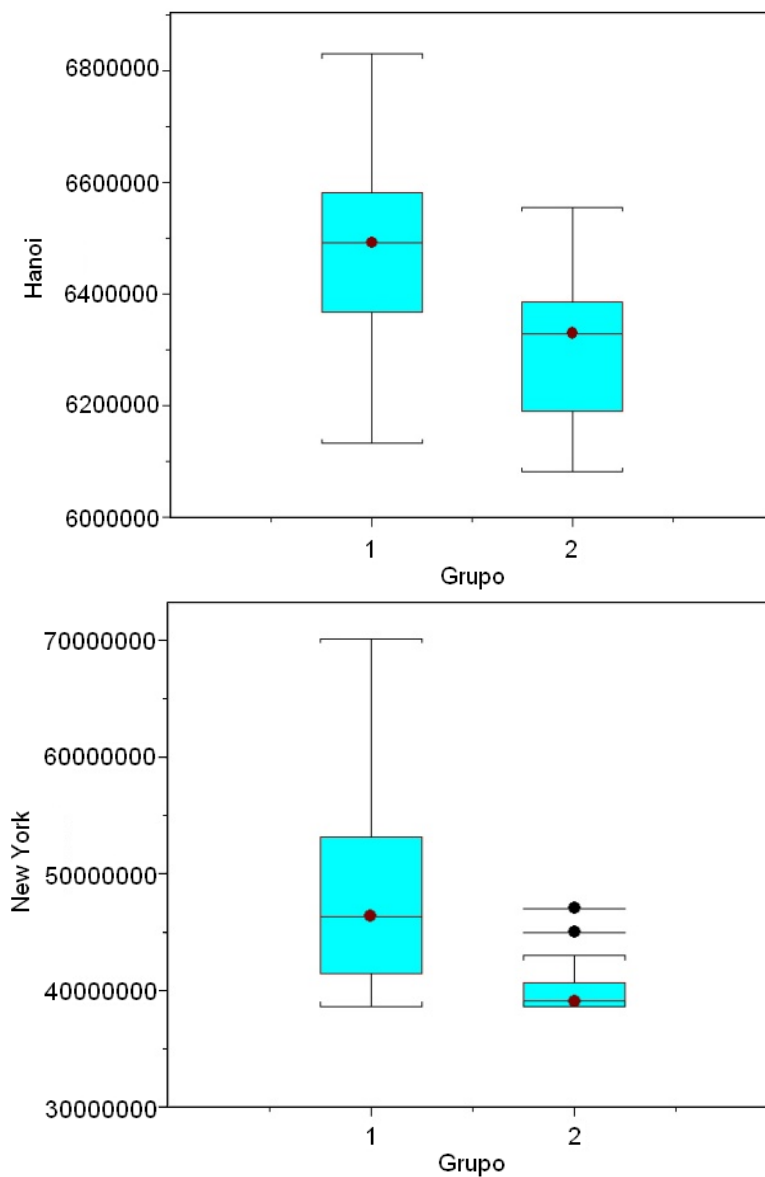


Figura 4.4.2 Gráficos de cajas de la distribución de los valores de la función objetivo para la PSO estándar y para la PSO con las modificaciones propuestas

Las 1000 y 2000 ejecuciones realizadas para cada red fueron utilizadas para estimar la probabilidad con que puede obtenerse la solución óptima (la óptima que se conoce y se ha publicado hasta el momento) o una solución con un coste en algún tanto por ciento superior. La mejor solución conocida para la red de New York puede obtenerse virtualmente en una sola ejecución del algoritmo con una probabilidad de casi el 30% y para la red de Hanoi con una probabilidad de casi un 5%, tal y como se muestra en el gráfico de la figura 4.4.3. Nótese que también se incluyó el cálculo de probabilidad para cada red, basado en un grupo de 100 ejecuciones, para comprobar que efectivamente las curvas de 100, 1000 y 2000 ejecuciones sean muy similares para cada ejemplo, tomando en cuenta la aleatoriedad existente en el funcionamiento del algoritmo.

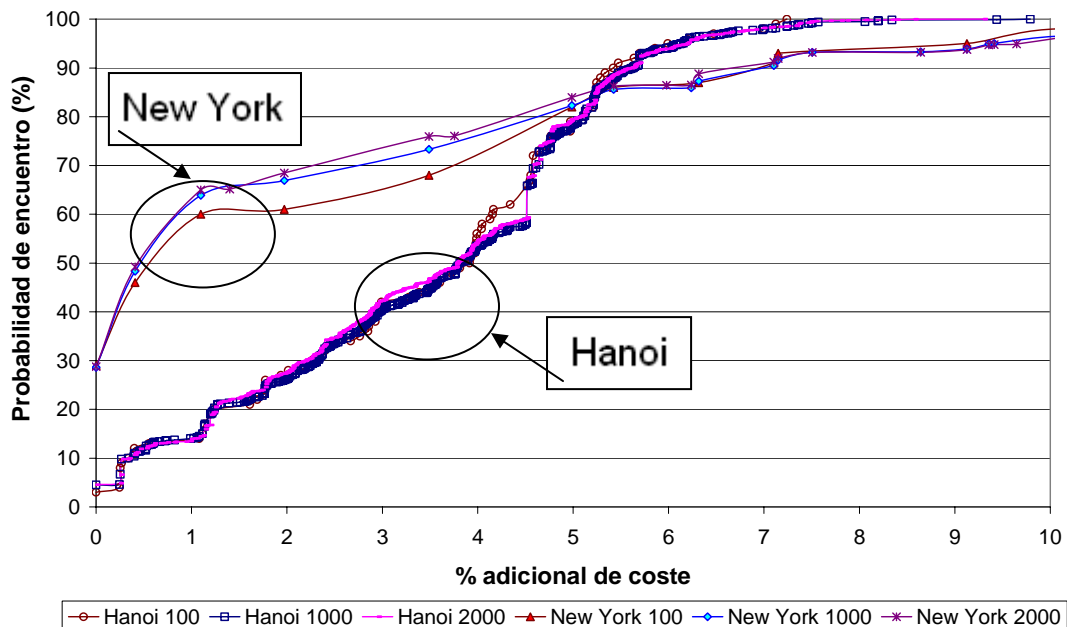


Figura 4.4.3 Probabilidad de obtener una solución con un coste en algún tanto por ciento superior al coste de la mejor solución conocida

Desde un punto de vista práctico, el gráfico de la figura anterior brinda algunas informaciones muy interesantes: por ejemplo, en ambos problemas, la probabilidad de obtener una solución como máximo un 5.5% mayor en coste que la mejor solución conocida, es prácticamente del 86%. Existe además casi total garantía de que se obtengan soluciones con un coste no mayor que 1.1 veces el coste de la mejor solución conocida para el caso de los dos problemas tratados. La obtención de estas

probabilidades para el caso de algoritmos genéticos fue presentada anteriormente en (Iglesias et al., 2006).

Debe señalarse que, en este trabajo, el algoritmo propuesto ha sido capaz de encontrar muy buenas soluciones con relativamente poco esfuerzo computacional. Requerir de elevados esfuerzos computacionales es una limitante para la aplicación de algoritmos evolutivos en la solución de problemas reales donde el tiempo condiciona la cantidad de ejecuciones de diseño y análisis de la red que se puedan realizar.

Con la variante de diversidad enriquecida, el número promedio de iteraciones necesarias en las 100 ejecuciones que se realizaron para el caso de Hanoi fue de 700; el número de iteraciones en el que se obtuvo la mejor solución conocida fue de 105. En el caso de New York, como promedio se realizaron 230 iteraciones y la ejecución que más rápidamente obtuvo la solución mínima conocida necesitó 16 iteraciones. En cada iteración se hace una evaluación de la función objetivo por cada miembro de la población. Esto pone de manifiesto que computacionalmente no es costoso el algoritmo utilizado comparado con otros estudios; por ejemplo, en (Lippai et al., 1999) se obtuvo una solución de 45.73 millones de dólares para la red de New York en 80,000 evaluaciones de la función objetivo.

Con las 100 ejecuciones para cada red hechas tomando en cuenta el tratamiento auto-adaptativo de los parámetros descrito en el epígrafe 3.4 se hizo también un análisis estadístico de la probabilidad con que se puede obtener la solución óptima o una solución en algún tanto por ciento superior en coste. Los gráficos de las figuras 4.4.4 y 4.4.5 muestran los resultados de dicho análisis e incluyen también los resultados del análisis sin el control auto-adaptativo de parámetros. Las curvas llevan en su nombre el tamaño de la muestra que fue utilizado en cada caso; las que son representativas de los parámetros auto-adaptativos incluyen también la denominación *self* en su nombre.

Según puede observarse en las figuras 4.4.3, 4.4.4 y 4.4.5, las probabilidades de conseguir “buenas” soluciones tienen una fuerte dependencia del problema que se trate. Como consecuencia, se considera que los valores de probabilidad obtenidos no pueden ser extrapolados a otros problemas similares.

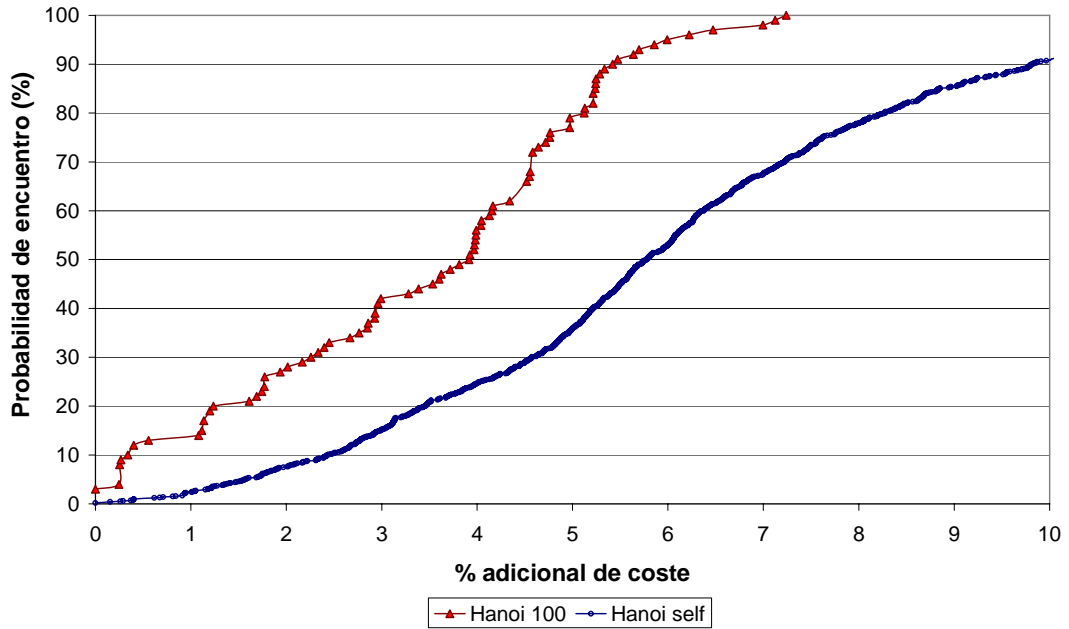


Figura 4.4.4 Curvas de probabilidad para la red de Hanoi

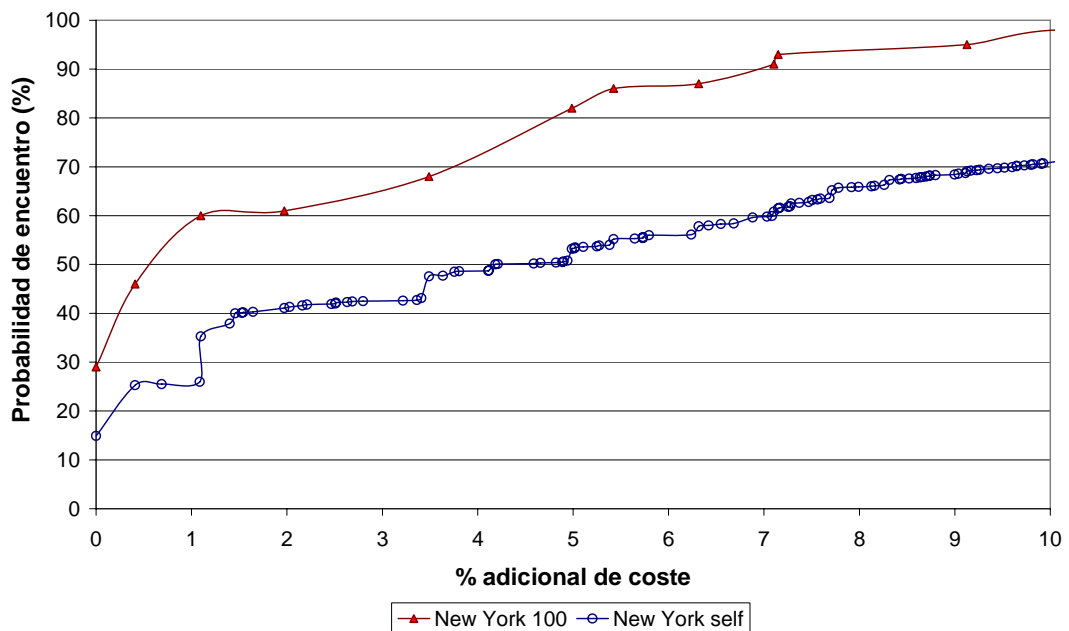


Figura 4.4.5 Curvas de probabilidad para la red de New York

4.5 Elementos del comportamiento paramétrico auto-adaptativo y sensibilidad paramétrica

En este epígrafe se ha utilizado la red de Hanoi para la obtención de los resultados de cálculo que se presentan. Inicialmente se ha hecho un registro de la evolución numérica que van teniendo los parámetros del algoritmo PSO que son gestionados de manera auto-adaptativa. La figura 4.5.1 muestra la evolución de c_1 y c_2 para el líder final de dos ejecuciones del algoritmo sin la característica de diversidad enriquecida descrita con anterioridad.

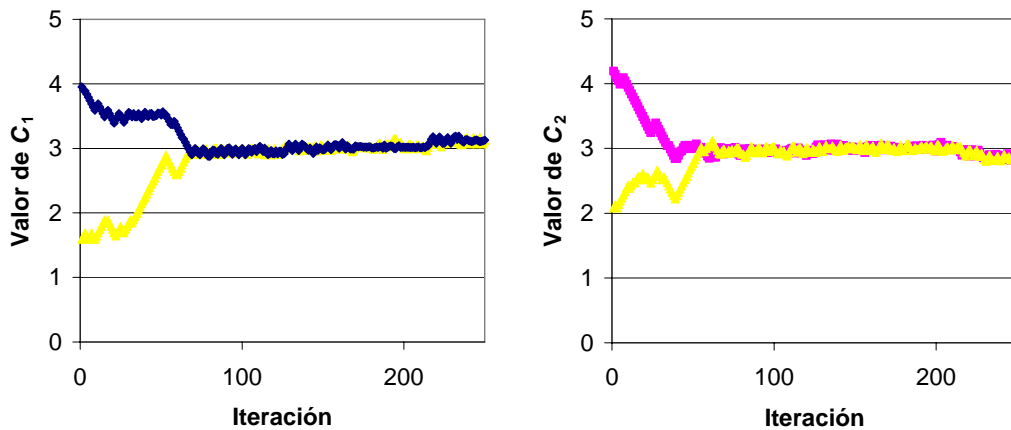


Figura 4.5.1 Evolución de c_1 y c_2 para el líder final de dos ejecuciones sin la característica de regeneración por superposición con el líder

En la figura 4.5.2, se ha hecho la misma representación que en la figura 4.5.1 pero para el caso en que sí se incluye la utilización de la diversidad enriquecida y utilizando 3 ejecuciones en lugar de dos. En ambas figuras, se muestran solo las 250 primeras iteraciones.

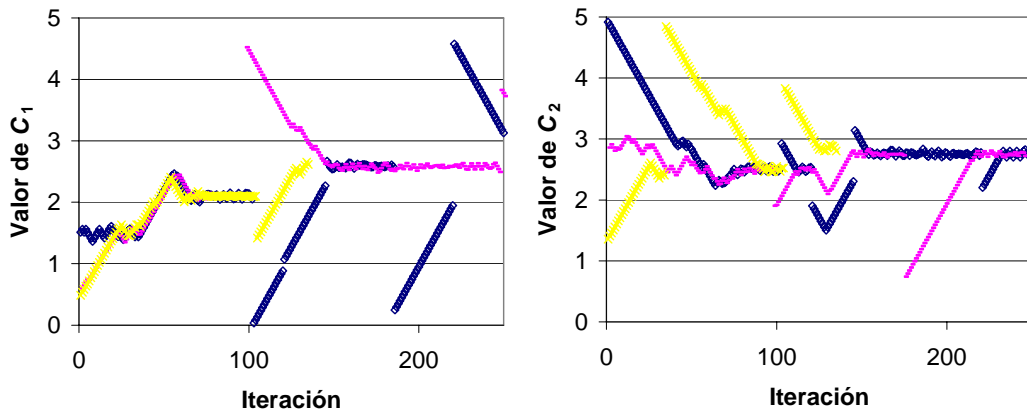


Figura 4.5.2 Evolución de c_1 y c_2 para el líder final de tres ejecuciones con diversidad enriquecida

En las figuras 4.5.1 y 4.5.2 se observa que los parámetros no parten de un mismo valor, pues inicialmente el valor es establecido de manera aleatoria.

En la figura 4.5.2, puede inferirse que los pájaros líderes cuyo registro numérico fue representado, no fueron líderes durante toda la etapa de ejecución del algoritmo. Las líneas que representan el registro numérico en cada caso muestran algunos saltos que corresponden al momento en que estos pájaros, sin ser líderes, intentan ocupar la posición del líder y son enviados a un punto del espacio de soluciones que es seleccionado de manera aleatoria. En la ejecución representada con color amarillo, por ejemplo, se terminó la ejecución antes de la iteración 150, y anteriormente el pájaro que terminó como líder, fue regenerado aleatoriamente alrededor de las iteraciones 40 y 110.

Existe una tendencia durante la evolución de los parámetros a que sean utilizados un conjunto de valores determinados. En la figura 4.5.3 se muestra la evolución de c_1 y c_2 para las partículas que finalmente acabaron como líderes en 100 ejecuciones del algoritmo. No se ha utilizado la opción de diversidad enriquecida con el fin de que la gráfica resulte más clara y entendible.

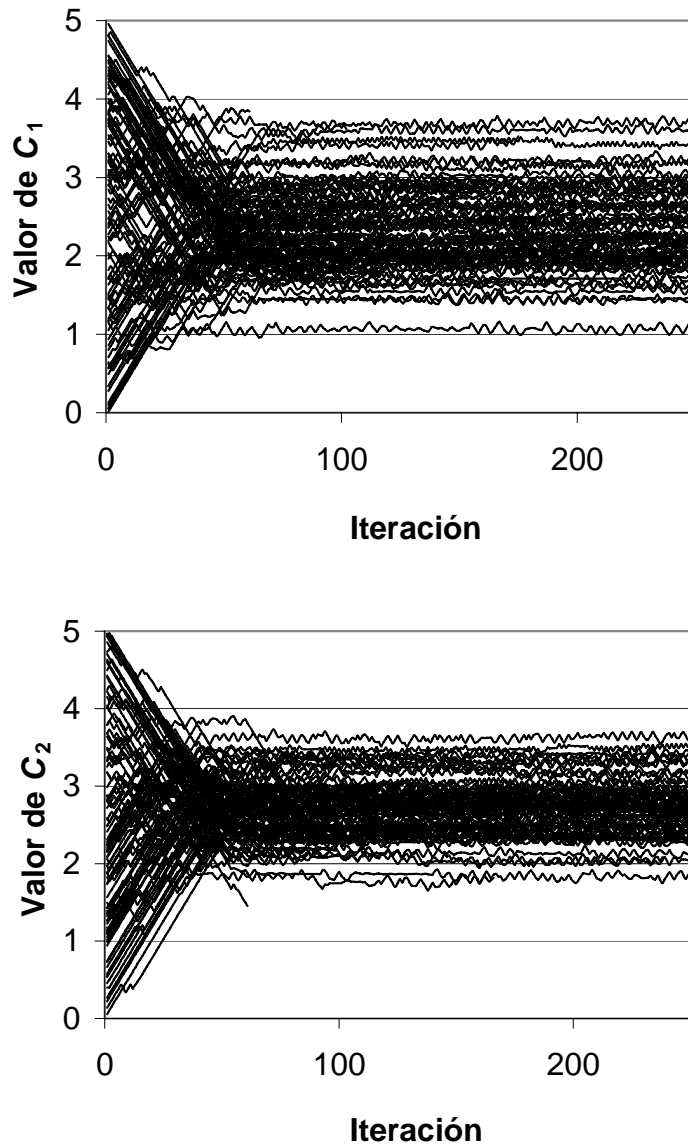


Figura 4.5.3 Evolución de c_1 y de c_2 para los líderes finales de cien ejecuciones

Una gráfica similar se puede elaborar para la evolución de la velocidad máxima ($V_{m\acute{a}x}$). En el gráfico 4.5.4 se observa cómo este parámetro tiende a ubicarse entre, aproximadamente, 0.34 y 0.6 del rango de las variables, dada la densidad de trayectorias que concluyen en ese rango, a pesar de que inicialmente se toman valores aleatorios entre el cero y el cien por ciento. La velocidad máxima permisible

es un parámetro muy importante dentro del funcionamiento del algoritmo PSO. De hecho, cuando se trabajan problemas como el que se presenta aquí, donde se incluyen variables continuas y discretas, la experiencia de este autor indica que es conveniente el uso de un parámetro de velocidad diferente para cada tipo de variable. Un tratamiento no diferenciado de estos tipos de variable puede resultar en dificultades para que el algoritmo converja hacia buenas soluciones.

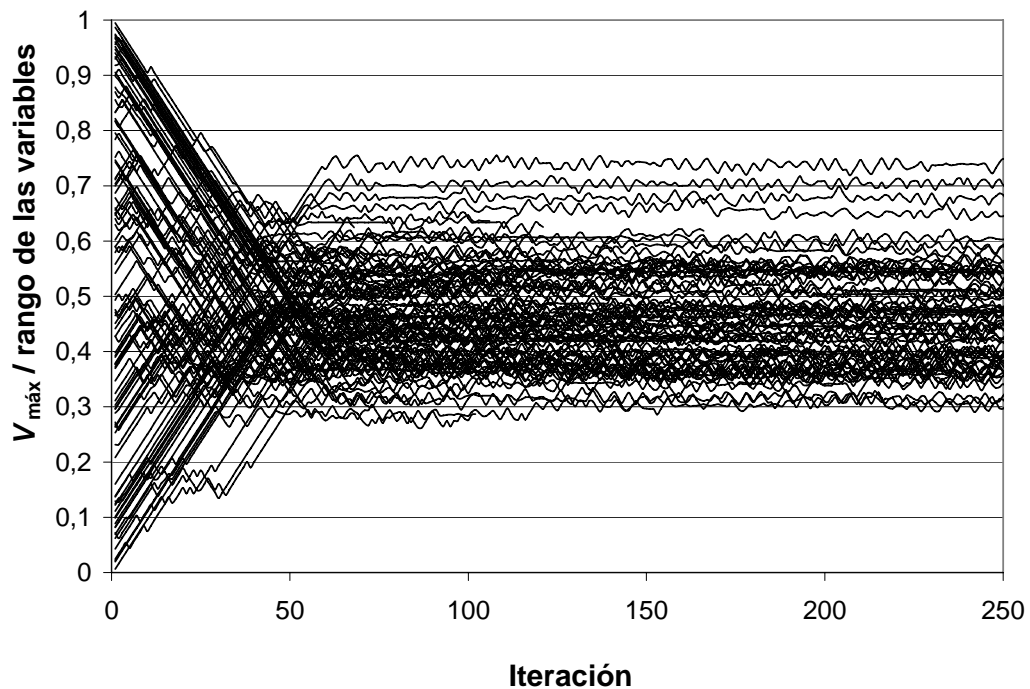


Figura 4.5.4 Evolución de $V_{máx}$ para los líderes finales de cien ejecuciones

La curva de probabilidades correspondiente a un comportamiento auto-adaptativo de la velocidad máxima se presenta en el gráfico siguiente:

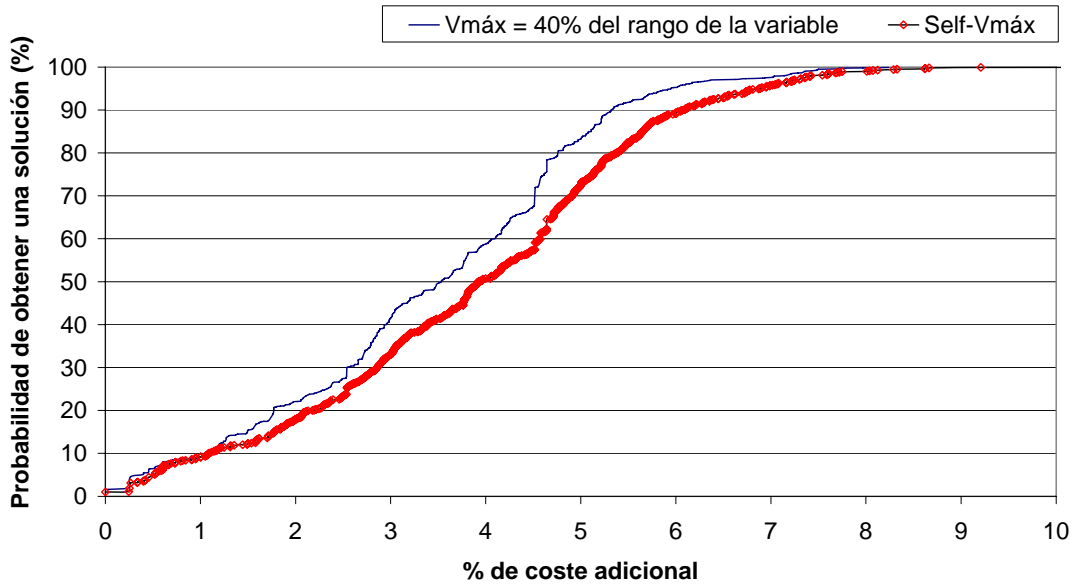


Figura 4.5.5 Probabilidad de obtener una solución en algún tanto por ciento superior en coste a la mejor solución conocida

Se observa cómo el algoritmo auto-adaptativo presenta un desempeño que no es tan bueno como con parámetros fijos. Sin embargo, realizar una comparación en este caso es injusto ya que ambos algoritmos utilizan el mismo número de partículas para resolver problemas de dimensiones distintas. Claramente, el algoritmo auto-adaptativo se enfrenta a un espacio de dimensión mayor, y además presenta el inconveniente de que todo lo que gestione de manera auto-adaptativa, tendrá una gran influencia en los valores que podrán tomar las variables restantes. Aumentando el número de pájaros para el algoritmo auto-adaptativo, de modo que se igualen los niveles de capacidad de exploración se puede observar cómo este es capaz de mejorar al de parámetros fijos. En el gráfico de la figura 4.5.6 se presenta esta situación para el caso de la velocidad máxima $V_{máx}$, comparada con las curvas que se representaron en la figura 3.4.1 del epígrafe 3.4. Puede comprobarse, por ejemplo, que una ejecución del algoritmo con un valor de velocidad máxima igual al 40 por ciento, garantiza con probabilidad del 86 por ciento, una solución que supera el coste de la mejor solución conocida a lo sumo en un 5.5 por ciento. La probabilidad resulta ser del 95 por ciento para el algoritmo auto-adaptativo.

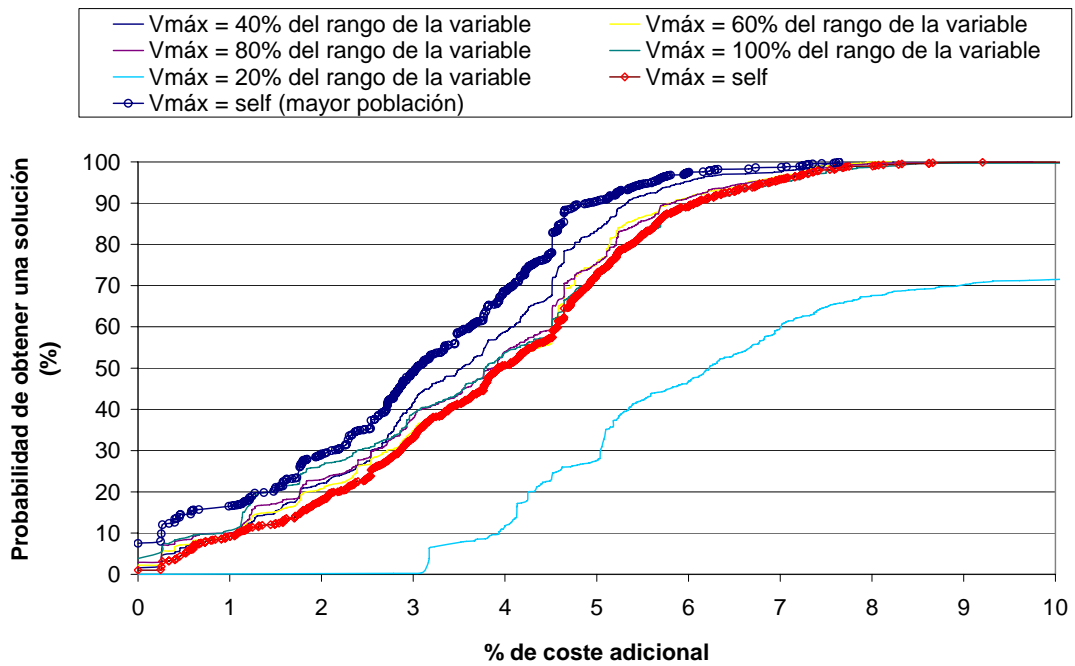


Figura 4.5.6 Probabilidad de obtener una solución para diferentes valores de velocidad máxima

El hecho de que todas las curvas representadas en la figura anterior tengan una forma parecida, reafirma la idea de que existe una fuerte dependencia de estas curvas con respecto al problema considerado.

4.6 Red del sector 1

Este sector de red cuenta con un tanque para su abastecimiento. El esquema de diseño tiene 132 tramos de tubería y 104 nodos de consumo; la longitud total de red es de 9.06 km y el caudal total consumido es de 47.09 l/s. Se desea realizar un nuevo diseño en el que se requiere una presión mínima de 15 mca. El conjunto de los diámetros comerciales disponibles se encuentra en la tabla siguiente:

Tabla 4.2.1 Diámetros comerciales para el diseño de la red de Hanoi

Diámetro (mm)	Coste Unitario (soles/m)	C _{H-W}
100	45,726	140
150	70,4	140
200	98,378	140
250	129,333	140
300	180,748	140

Para facilitar la interpretación de resultados, se ha utilizado un código de colores para las figuras que representan a las soluciones de la red:

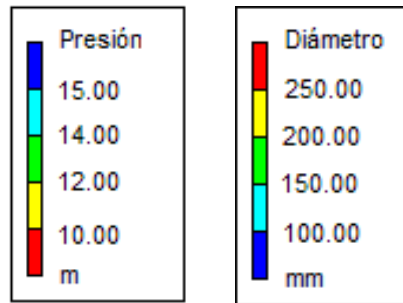


Figura 4.6.1 Código de colores utilizado

La figura 4.6.2 muestra el esquema de la red luego de que fuera diseñada con el algoritmo descrito en este trabajo; prácticamente todos los tramos de tubería tienen en esta solución un diámetro de 100 mm. En dicha figura, la solución que se muestra fue determinada utilizando una función objetivo que toma en cuenta los costes de inversión inicial, costes de reparación de fugas en tuberías y costes adicionales por agua no abastecida, tal y como se manifestó en el epígrafe 2.4 del capítulo 2 de este trabajo. La forma en que son consideradas las reparaciones de fugas en tuberías y los costes por el agua no abastecida es una manera de agregar fiabilidad en el funcionamiento al diseño que se hace.

La solución obtenida para este sector, considerando una función objetivo que no tomaba en cuenta ningún elemento con respecto a la fiabilidad de la red y que sólo reflejaba el coste de la inversión inicial a realizar, no tiene una significativa diferencia de coste. En cuanto a inversión inicial, si se compara con la solución representada en la figura 4.6.2 puede constatar que de una solución a la otra sólo varían algunos diámetros de tuberías. Sin embargo, el funcionamiento de las redes, ante situaciones de rotura o cierre por otras causas de algún tramo, dista mucho de ser el mismo.

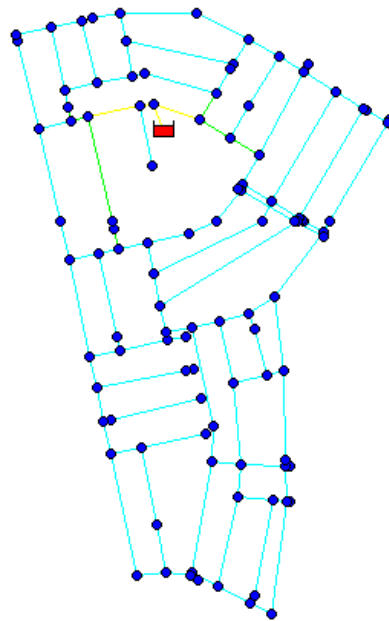


Figura 4.6.2 Red del sector 1 diseñada considerando elementos de fiabilidad

Las figuras 4.6.3 y 4.6.4 son representativas de la solución en la que no fue considerado ningún término relativo a la fiabilidad del funcionamiento de la red. En ellas se muestran las afectaciones que pudieran producirse si quedaran fuera de funcionamiento los tubos señalados con una flecha.

En la tabla 4.6.1, que a continuación se muestra, se ha realizado un resumen comparativo del coste de inversión inicial para ambas soluciones.

Tabla 4.6.1 Resumen comparativo de costes de diseño en el sector 1

Diámetro [mm]	Sin fiabilidad	
	Long. de red [m]	Coste [soles]
100	8832.13	1034596,18
150	187.52	27220,11
200	36.00	6891,12
250	0.00	0,00
300	0.00	0.00
Coste Total [soles]	1068707.41	

Diámetro [mm]	Con fiabilidad	
	Long. de red [m]	Coste [soles]
100	8409.102	985042,208
150	423.032	61407,3251
200	223.518	42785,8156
250	0	0
300	0	0
Coste Total [soles]	1089235.349	

En la figura 4.6.3 se muestran las consecuencias de un cierre en el tramo señalado.

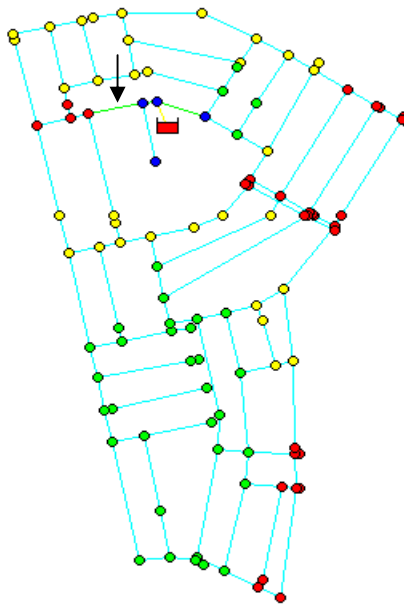


Figura 4.6.3 Red del sector 1; diseño sin fiabilidad; corte de un tramo de tubería y su efecto en la red

Puede verse, en la figura anterior, que el corte señalado provocaría presiones por debajo de los 10 mca en varios puntos, y prácticamente en todos los nodos de consumo habrían afectaciones de presión. Sólo mantienen la presión mínima requerida algunos nodos cerca de donde está ubicado el tanque.

En la figura 4.6.4 se muestran afectaciones todavía mayores cuando queda fuera de servicio el tramo de tubería señalado. En este caso, una buena parte de la red

quedaría con una presión por debajo de los 10 mca.

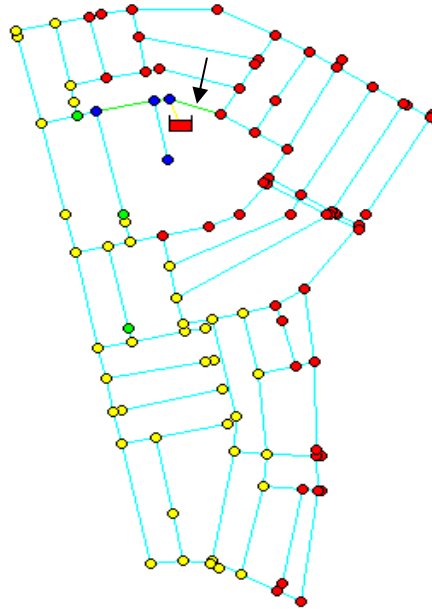


Figura 4.6.4 Red del sector 1 diseñada sin considerar elementos de fiabilidad; salida de servicio de una tubería y su efecto en la red

Si alguna de las afectaciones en tramos de red que fueron representadas en las figuras 4.6.3 y 4.6.4, tuvieran lugar en la solución que se muestra en la figura 4.6.2, ningún nodo de consumo tendría una presión por debajo de 15 mca. La solución obtenida, considerando elementos relacionadas a la fiabilidad de la red dentro de la función objetivo, es capaz de redistribuir los caudales circulantes y garantizar que llegue toda el agua demandada en los nodos de consumo sin que haya afectación de presiones en ningún caso. Esto, sin duda, es una gran ventaja desde el punto de vista operativo de la red. Por otra parte, es logrado sin un incremento excesivo del coste de inversión inicial que hay que realizar. Si se analizara no sólo el coste de inversión, sino también los costes adicionales producidos como consecuencia de roturas en la red, la solución con fiabilidad se mostraría claramente ventajosa desde un punto de vista económico.

4.7 Red del sector 2

Un análisis similar al realizado para el caso de estudio anterior también fue llevado a cabo para otro sector de red, el cual también es abastecido por un tanque. El esquema de diseño tiene en este caso 294 tramos de tubería y 240 nodos de consumo; la

longitud total de red es de 18.337 km y el caudal total consumido es de 81.53 l/s. Se trata también de hacer un diseño nuevo tomando 15 mca como presión mínima requerida en los nodos de consumo.

La figura 4.7.1 representa la solución obtenida utilizando la función objetivo que toma en cuenta las consideraciones de fiabilidad a las que se hizo referencia en el epígrafe 4.6.

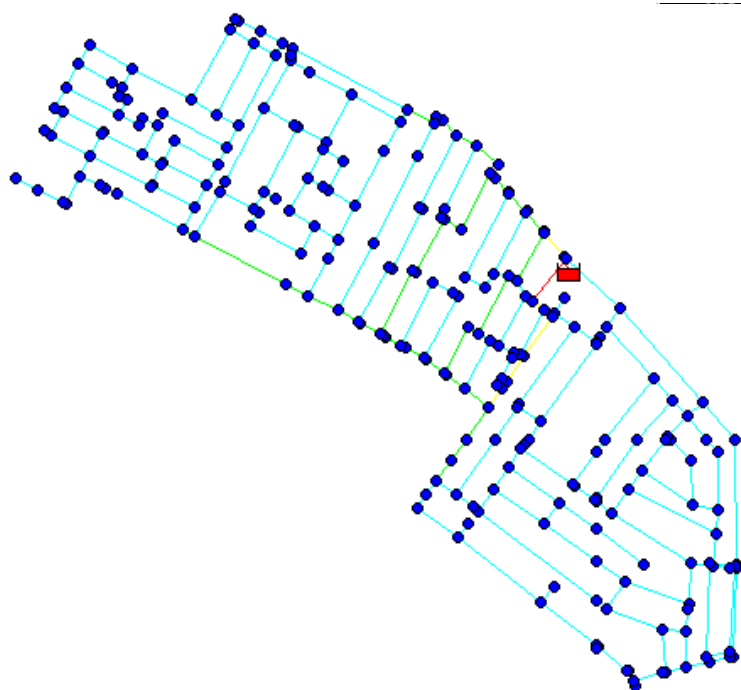


Figura 4.7.1 Red diseñada considerando elementos de fiabilidad

En este caso de estudio se ha utilizado el mismo código de colores que el presentado en el epígrafe 4.6. La solución de la figura anterior tiene un coste de inversión inicial 3.65% superior al coste de inversión inicial de la solución mostrada en las figuras 4.7.2 y 4.7.3, representativas de la solución obtenida cuando se utiliza una función objetivo que sólo toma en cuenta la inversión inicial y no utiliza ningún elemento que evalúe el desempeño de la red frente a situaciones de cierre de algún tramo. Al igual que en el primer caso estudiado, las diferencias entre las soluciones con y sin fiabilidad no son marcadamente significativas en cuanto a inversión inicial y diámetros seleccionados, aunque la diferencia sí es apreciable con respecto al funcionamiento en situaciones en las que algún tramo quede fuera de funcionamiento. En la tabla 4.7.1 pueden apreciarse algunos valores comparativos

entre ambas soluciones.

Tabla 4.7.1 Resumen comparativo de costes de diseño en el sector 2

Diámetro [mm]	Sin fiabilidad	
	Long. de red [m]	Coste [soles]
100	17731.10	2077021,41
150	606.39	88023,28
200	0.00	0,00
250	0.00	0,00
300	0.00	0,00
Coste Total [soles]	2165044.69	

Diámetro [mm]	Con fiabilidad	
	Long. de red [m]	Coste [soles]
100	15822.31	1853425,63
150	2077.69	301597,04
200	328.79	62937,56
250	108.70	26206,24
300	0.00	0,00
Coste Total [soles]	2244166.47	

En la figura 4.7.2, se representan los efectos que tendría en las presiones de la red, la salida de servicio del tramo de tubería señalado. Las afectaciones abarcan una buena parte de los nodos de consumo, aunque en ningún caso la presión cae por debajo de los 10 mca.

En la figura 4.7.3 pueden verse afectaciones todavía mayores para un escenario diferente de salida de servicio de un tramo de tubería. La situación representada es todavía más crítica que para el caso de la figura 4.7.2.

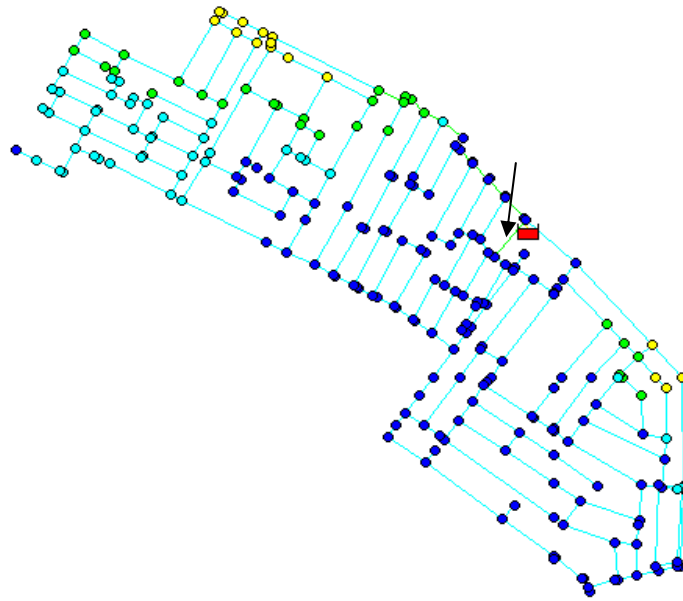


Figura 4.7.2 Red diseñada sin considerar elementos de fiabilidad. Salida de servicio de una tubería y su efecto en la red

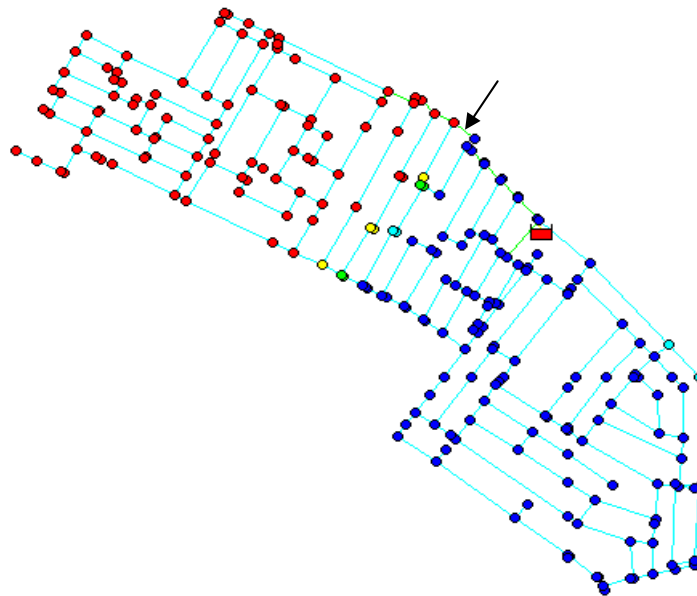


Figura 4.7.3 Red diseñada sin considerar elementos de fiabilidad. Salida de servicio de una tubería y su efecto en la red

4.8 Red del sector 3

El ejemplo que se muestra a continuación utiliza la misma función objetivo con que se trabajó en los epígrafes 4.7 y 4.8. Cuenta con un tanque para su abastecimiento, 193 tramos de tubería y 157 nodos de consumo; la longitud total de red es de 11.77 km y el caudal total consumido es de 49.57 l/s. El objetivo, al igual que en los dos casos anteriores, es realizar un nuevo diseño considerando una presión mínima de 15 mca.

La figura 4.8.1, muestra el esquema de la red, luego de que fuera diseñada con el algoritmo PSO con diversidad enriquecida descrito en este trabajo. También se usó la función objetivo que consideraba económicamente elementos de la fiabilidad del funcionamiento de la red tal y como se hizo en los epígrafes 4.6 y 4.7. El código de colores para la presentación de las figuras de este epígrafe es el mismo que se utilizó en el epígrafe 4.6.

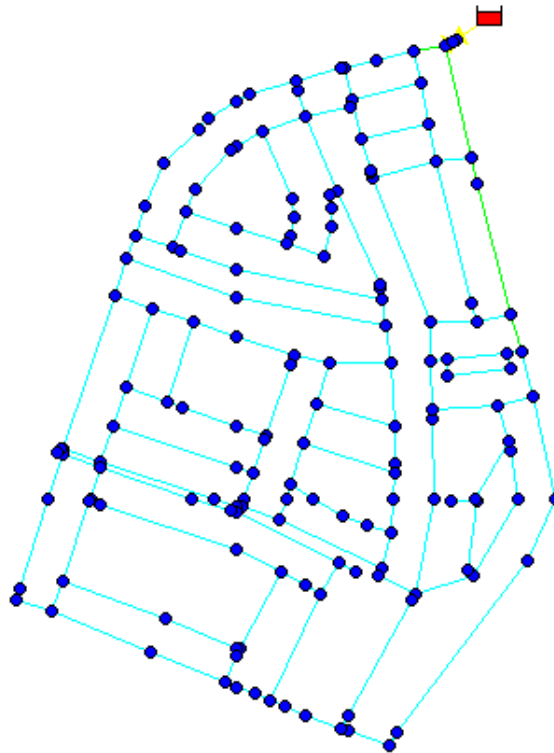


Figura 4.8.1 Red del sector 3 diseñada considerando elementos de fiabilidad

La solución obtenida para este sector, considerando una función objetivo que no tomaba en cuenta ningún elemento con respecto a la fiabilidad de la red y que sólo reflejaba el coste de la inversión inicial a realizar, tampoco tiene en este caso una significativa diferencia de coste. Las figuras 4.8.2 y 4.8.3, representativas de este tipo de solución, muestran las afectaciones que pudieran producirse si quedaran fuera de funcionamiento los tubos señalados con una flecha. Como puede verse, la diferencia del funcionamiento ante condiciones de fallo con respecto a la solución presentada en la figura 4.8.1 vuelve a ser significativa.

La figura 4.8.2 muestra las afectaciones de presión que pudieran producirse en caso de que algún problema implique el cierre del tramo señalado.

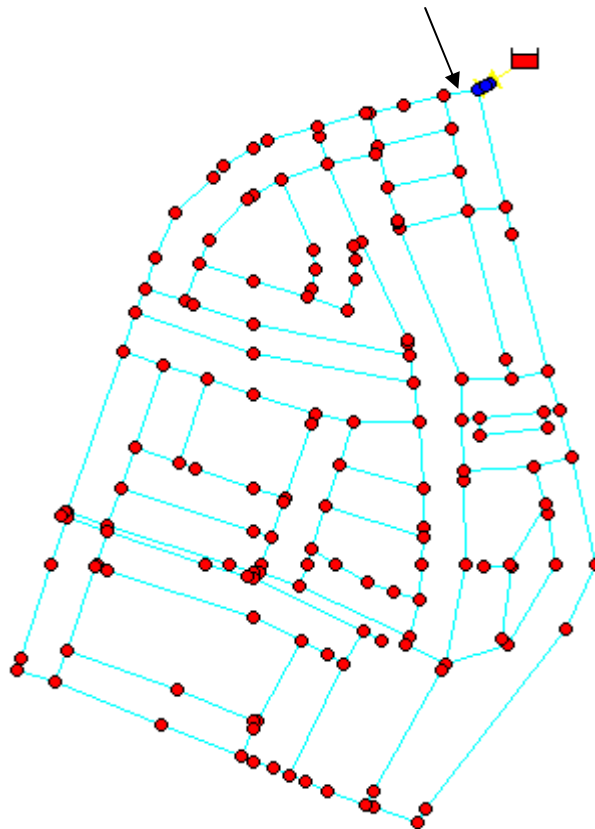


Figura 4.8.2 Red diseñada sin considerar elementos de fiabilidad; corte de una conducción y su efecto en la red

En la figura 4.8.3 puede verse, ante la salida de funcionamiento de otro de los tramos, las afectaciones que serán producidas. Los daños no se muestran tan severos como en la figura 4.8.2 pero igualmente abarcan casi toda la red.

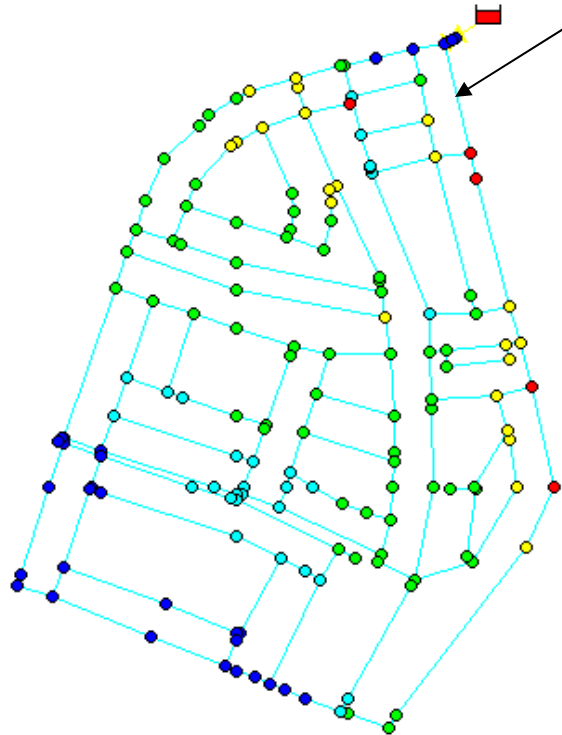


Figura 4.8.3 Red diseñada sin considerar elementos de fiabilidad. Salida de servicio de una tubería y su efecto en la red

Si alguna de las afectaciones en tramos de red que fueron representadas en las figuras 4.8.2 y 4.8.3, tuvieran lugar en la solución de la figura 4.8.1, en ningún nodo de consumo habría una presión por debajo de 15 mca. En este ejemplo, al igual que en los otros dos casos de estudio presentados en los epígrafes 4.6 y 4.7, puede verse la posibilidad de obtener un diseño funcionalmente superior sin una excesiva inversión inicial. En la tabla 4.8.1, se muestra un resumen comparativo de los costes de las soluciones de red.

Tabla 4.8.1 Resumen comparativo de costes de diseño en el sector 3

Diámetro [mm]	Sin fiabilidad	
	Long. de red [m]	Coste [soles]
100	10968.63	1284864,73
150	0.00	0,00
200	803.33	153772,66

Capítulo 4. Casos de estudio y sensibilidad del algoritmo

250	0.00	0,00
300	0.00	0,00
Coste Total [soles]	1068707.41	

Diámetro [mm]	Con fiabilidad	
	Long. de red [m]	Coste [soles]
100	10505.25	1230584,99
150	456.72	66297,91
200	809.98	155045,99
250	0.00	0,00
300	0.00	0,00
Coste Total [soles]	1089235.349	

Es muy interesante destacar, en las soluciones de red obtenidas, cómo la cuantificación económica que se hace del agua no abastecida y de la reparación de roturas en la red dentro de la función objetivo resulta luego en la obtención de diseños más fiables, sin un aumento significativo en coste.

Finalmente, es importante señalar que los resultados obtenidos en los casos de estudio señalados hubieran sido muy difíciles de lograr sin el soporte informático de la aplicación que se describe en el capítulo próximo.

Capítulo 5. Implementación de la aplicación

...”el hombre que piense que puede ser sustituido por una máquina,
merece ser sustituido por una máquina”...

5. Implementación de la aplicación

5.1 Introducción

El volumen de cálculo para llevar a cabo el diseño de un SDA utilizando cualquiera de las variantes del algoritmo PSO planteado en este trabajo, hace imprescindible el uso de ordenadores. Con vista a que todo lo que se ha planteado en este documento tenga una aplicación práctica en manos de proyectistas, se desarrolló un programa de ordenador capaz de brindar una asistencia completa en el desarrollo de los cálculos. La solución informática fue concebida y posteriormente mejorada a partir del consejo profesional de varios programadores, las sugerencias de usuarios potenciales y algunas ideas implementadas en aplicaciones existentes.

El software, bajo el nombre genérico de IngeniousWare, ha recibido la denominación de HADAS y está orientado al diseño y modelación de SDA. Puede ser utilizado en cualquier computadora que soporte Windows 95 o superior y la cantidad de tuberías que pueden analizarse estará en dependencia de la cantidad de memoria disponible que tenga la computadora en el momento de la ejecución del programa. Su instalación no requiere de grandes recursos de ordenador, siendo suficiente un mínimo de 3 megabytes de espacio en disco para poder ser ejecutado.

Un asistente para la instalación, que se muestra en la figura 5.1.1, permite en menos de dos minutos dejar lista la aplicación para ser utilizada.

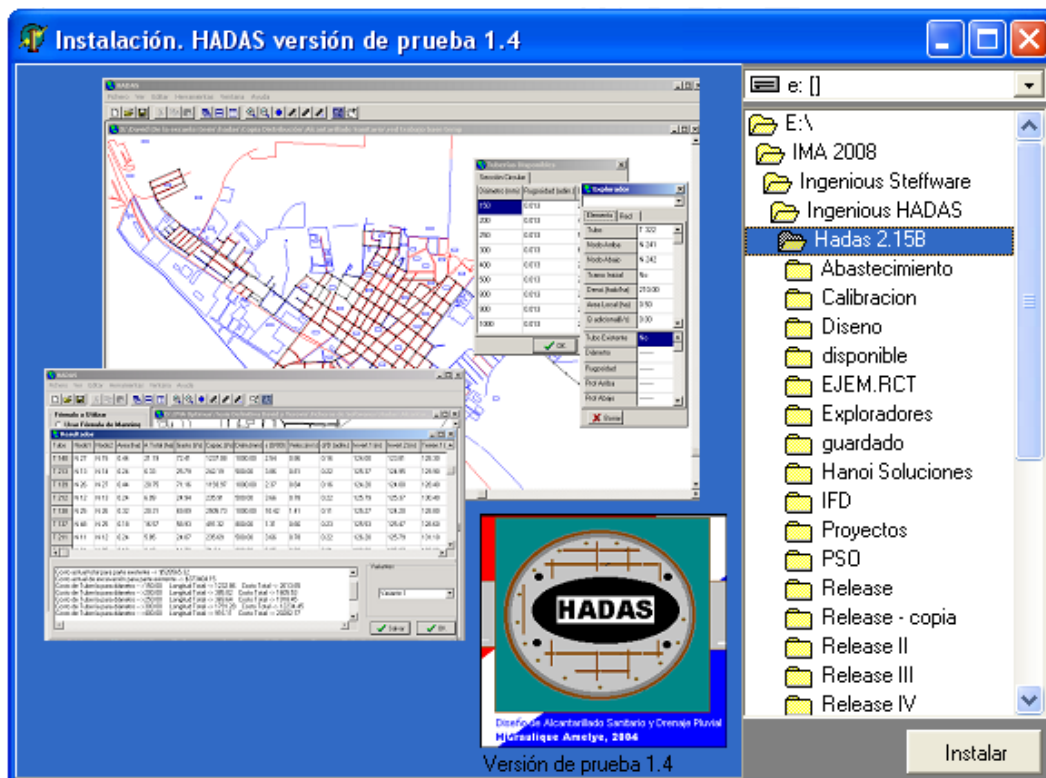


Figura 5.1.1 Asistente para la instalación de la aplicación

Si el usuario posee experiencia anterior con EPANET, Autocad, u otras aplicaciones similares, el uso del software le será intuitivo. La facilidad para el manejo, las posibilidades de intercambio de datos y resultados con otras aplicaciones y la capacidad para incluir varios aspectos de diseño han sido tres de las líneas fundamentales que han caracterizado el trabajo informático realizado.

Como plataforma de desarrollo, se utilizó una combinación de la versión 7 de Delphi, RAD Studio 2007 y Visual Studio 2005 y 2008. A continuación se explicarán detalles relacionados con la entrada de datos, algunas de las opciones de cálculo, y finalmente cómo fue concebida la salida de resultados.

5.2 Entrada de datos

Una vez instalada la aplicación en el ordenador se puede hacer uso de ella. Para realizar el diseño de un sistema de distribución de agua se necesita conocer un conjunto de datos que es necesario introducir en el programa. Toda la información

que es introducida puede modificarse tantas veces como se estime conveniente, y puede ser guardada en un fichero a través de las opciones “*Guardar*” y “*Guardar Como*” ubicadas en el menú principal “*Archivo*”. Con la opción “*Abrir*” del mismo menú principal, puede recuperarse la información que anteriormente haya sido guardada.

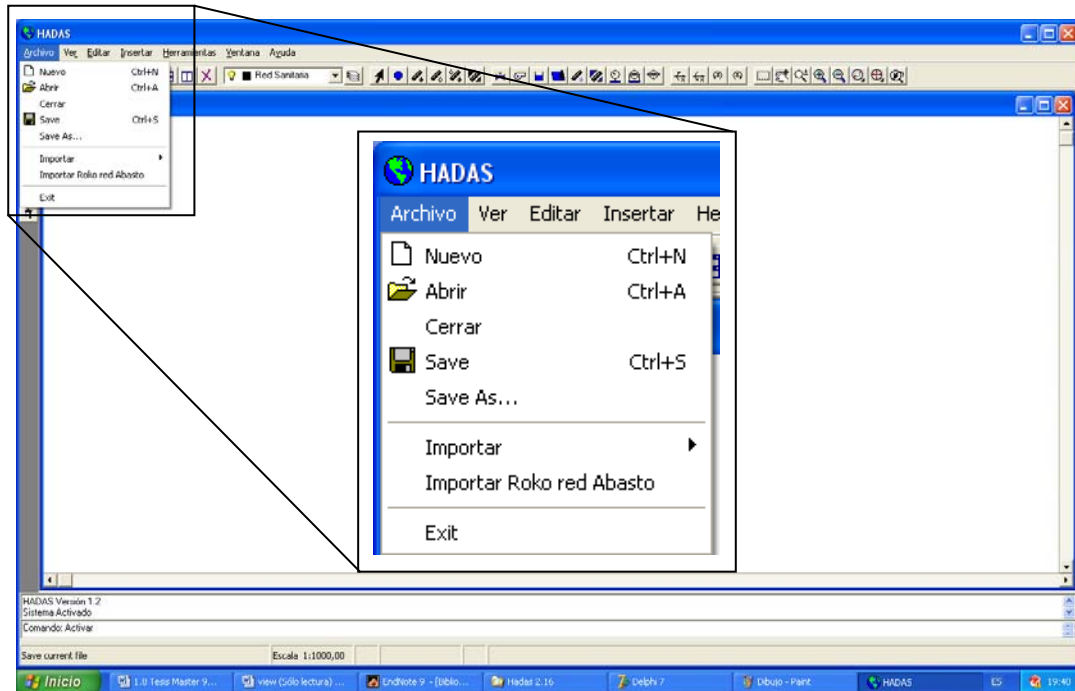


Figura 5.2.1 Opciones para el manejo de ficheros

En ocasiones, buena parte de los datos que se necesitan para llevar a cabo el diseño de SDA pueden encontrarse en ficheros (.INP) de EPANET. Cuando este sea el caso, podrá usarse la opción “*Importar/Red de Epanet (.INP)*”, también accesible desde el menú principal “*Archivo*”. Igualmente puede ser importado, como podrá verse en la figura siguiente, un archivo de imagen (.bmp) o un plano en formato (.dxf) (este formato es uno de los formatos de AutoCad) que puede ser utilizado como fondo para realizar el trazado de la red. Sin duda, contar con una imagen de fondo de la zona donde se va a trabajar ayuda considerablemente a las labores de diseño.

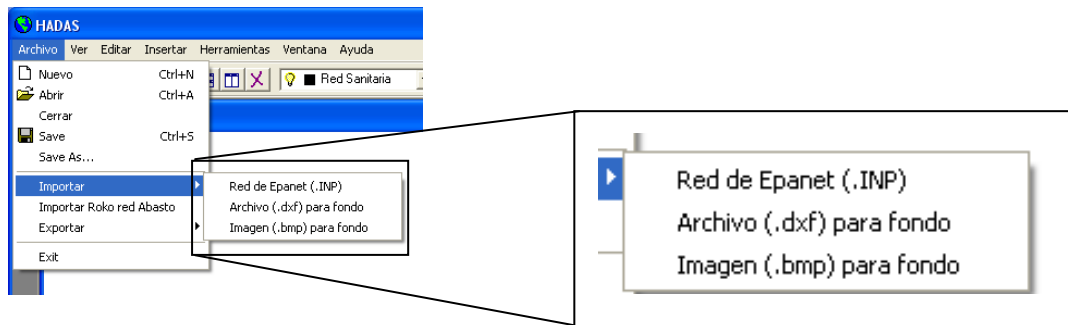



Figura 5.2.2 Opciones de importación

El trazado de la red y la introducción de datos específicos para sus elementos se puede realizar haciendo uso de algunos botones que permiten la activación de las opciones necesarias. Dichos botones aparecen en la barra de herramientas de la aplicación y al hacer clic sobre ellos se activa la opción que representan. Después de terminado el trazado de la red, o durante su transcurso, pueden introducirse datos específicos de cada elemento dibujado haciendo clic sobre él cuando está activada la opción de selección . La aparición de un explorador de propiedades para la introducción o modificación de datos específicos a los elementos de la red, se produce inmediatamente después de que el elemento es seleccionado.

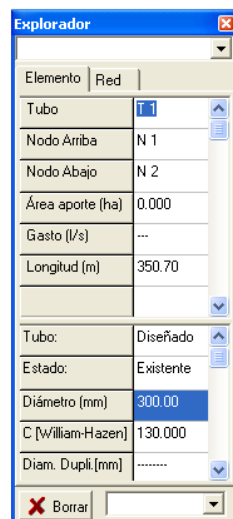



Figura 5.2.3 Explorador de propiedades

Todos los elementos de la red poseen una propiedad llamada *ID*; la cual los identifica como elementos. Para evitar ambigüedades a la hora de referenciar un elemento, se ha establecido que no existan dos nodos, independientemente de su tipo, que posean el mismo valor de *ID*. El valor de *ID* pudiera ser el mismo para más de una tubería, e incluso ser igual al de algún nodo, pero ninguno de estos casos es aconsejable porque puede traer confusiones sobre todo a la hora de analizar los resultados.


Las opciones que deben ser activadas para el trazado de la red se muestran a continuación con su botón de activación correspondiente. También se muestran las diferentes características que en el caso de cada elemento pueden ser establecidas o modificadas usando el explorador de propiedades.

- El trazado de tuberías se activa luego de hacer clic sobre el botón . Una vez activado, al hacer clic sobre un punto ubicado en el plano de trabajo, comenzará a dibujarse una tubería. En cada nuevo tramo de conducto, el primer clic hará referencia al nodo aguas arriba y el segundo al nodo aguas abajo. Cuando se hace clic sobre algún nodo existente (nodo de demanda, válvula, bomba, tanque o embalse) este nodo se asumirá como uno de los extremos de la tubería (nodo extremo aguas arriba o aguas abajo según corresponda). Si no existe ningún nodo en el punto donde se hace clic en el plano, se creará automáticamente un nodo de demanda en dicho punto.

Como propiedades de una tubería pueden establecerse las siguientes:

- *Nodo aguas arriba*: identificador del nodo aguas arriba de la tubería.
- *Nodo aguas abajo*: identificador del nodo aguas debajo de la tubería.
- *Coef. Rugosidad*: coeficiente de rugosidad de la tubería. Será relativo al valor de *C* de Hazen-Williams o a la *f* de Darcy-Weisbach en función de la fórmula de estimación de pérdidas de carga que se esté utilizando.
- *Longitud*: longitud total de la tubería. Un valor automático aparece para esta propiedad a partir del cálculo de las distancias a lo largo de la tubería entre los nodos aguas arriba y aguas abajo. Si dicha distancia es modificada en el plano, el valor de la longitud cambiará automáticamente a no ser que se haya especificado un valor numérico para esta propiedad directamente. Cuando el usuario pone un valor

numérico a esta propiedad, la aplicación entiende que la tubería representa un esquema y no el trazado real, por tanto, no utilizará como longitud la medida geométrica sino el valor numérico especificado. Si luego de que se haya especificado un valor numérico, se desea que la longitud de la tubería sea nuevamente igual a la longitud calculada geoméricamente, sólo se necesita borrar el valor de esta propiedad y oprimir la tecla <enter> posteriormente. En el explorador de propiedades, aparecerá el símbolo (*) delante del número, cuando esta propiedad se refiera a un valor numérico introducido por el usuario, o sea, cuando la representación de la tubería es esquemática.



- *Diámetro*: Este valor indica el diámetro interior de la tubería en (mm); este valor debe corresponder con uno de los valores comerciales que hayan sido establecidos como datos.
 - *Estado*: Esta propiedad indica si la tubería es existente, si está diseñada o si está por diseñar. Cuando la tubería es existente, su coste no es tomado en cuenta durante el proceso de diseño y el valor de las propiedades diámetro y rugosidad es un dato que debe proporcionar el usuario. En el caso de una tubería diseñada, también los valores de diámetro y rugosidad serán establecidos por el usuario, pero su coste sí será adicionado al coste total de la red resultante del diseño. Las tuberías que están por diseñar son las que podrán ser modificadas por los algoritmos concebidos para el diseño con que cuenta la aplicación.
- A través del botón  se activa la opción de dibujar nodos de demanda. Cuando está activa esta opción, podrán dibujarse nodos de demanda en cualquier punto del plano sólo haciendo clic sobre el lugar deseado. Existe la posibilidad también de insertar un nodo en cualquier punto a lo largo de una tubería previamente dibujada haciendo clic en el sitio donde se desee la inserción; en este caso, el conducto quedaría dividido en dos.


Como propiedades de los nodos de demanda se pueden establecer las siguientes:


- *Demanda*: valor en l/s que existirá como demanda puntual en el nodo correspondiente.

- X : coordenada X que tendrá el nodo en el terreno.
- Y : coordenada Y que tendrá el nodo en el terreno.
- *Cota*: cota topográfica del terreno en las coordenadas (X, Y) del nodo.
- *Curva*: identificador que hace referencia al nombre de la curva de consumo que caracteriza a la demanda en este nodo.

De manera análoga a como se hace la inserción de nodos de demanda, podrán adicionarse también el resto de los nodos disponibles en la aplicación para ser utilizados en los SDA. En todos los casos, los nodos podrían ser insertados en espacios donde no existe nada y en puntos ubicados a lo largo de alguna tubería. A continuación se especifican los nodos disponibles y sus botones correspondientes. Todos los nodos tienen, además de la propiedad *ID*, a la que se hizo referencia anteriormente, otras dos propiedades comunes: X e Y que representan sus coordenadas en el terreno.

- El botón  activa la opción de insertar tanques. Las propiedades que caracterizan a este elemento son:
 - *Diámetro*: diámetro en metros que tendrá el tanque, asumiendo que este tenga forma cilíndrica.
 - *Nivel de agua máximo*: es la cota máxima del agua en el tanque.
 - *Nivel de agua mínimo*: es la cota de agua mínima en el tanque.
 - *Cota de fondo*: es la cota de fondo del tanque.
- El botón  activa la opción de insertar embalses. Además de las propiedades *ID*, X e Y que caracterizan a todos los nodos, los embalses tienen otra característica importante:
 - *Cota del agua*: este valor se asume que no variará a lo largo de una simulación en período extendido, a diferencia del nivel en un tanque, que es susceptible de variación producto de las demandas existentes en los nodos.


- El botón  activa la opción de insertar válvulas. Existen dos propiedades importantes que caracterizan a este elemento:
 - *Cota*: cota topográfica en metros de la válvula.
 - *Tipo*: es el tipo de válvula, valor que determina el comportamiento que el elemento va a tener. Podrán elegirse entre válvulas reductoras de presión (VRP), válvulas sostenedoras de presión (VSP) y válvulas controladoras de caudal (VCQ).
 - Valor de consigna: es el valor que se tomará como referencia para complementar el funcionamiento de la válvula. Para las válvulas de tipo (VRP) y (VSP) será el valor de presión en mca. Para las válvulas (VCQ) será el valor de caudal en l/s.

- El botón  activa la opción de insertar bombas. Las propiedades que caracterizan a este elemento son:
 - *Cota*: Es la cota topográfica del punto donde está ubicado el eje de la bomba.
 - *Modelo*: Es el identificador del modelo de bomba al que se hace referencia. El valor de esta propiedad debe coincidir con alguno de los identificadores de bombas disponibles que se hayan entrado como dato; a partir de él, se podrán conocer las características de la bomba y su coste.


En el caso de las válvulas, está validado en el programa que sólo puedan existir dos tuberías como máximo conectadas a ella. Lo mismo sucede para las bombas. Estos dos elementos, a diferencia de EPANET, no requieren para su ubicación, de la presencia de nodos aguas arriba y aguas abajo previamente existentes. Simplemente son dibujadas válvulas y bombas, y se asumirán las partes aguas arriba y aguas abajo del elemento en la medida en que este sea conectado a la red. Una vez dibujado y conectado uno de estos elementos, sus posiciones aguas arriba y aguas abajo pueden ser intercambiadas si se desea.

Colocar en el plano el trazado de la red que se quiere realizar y sus modificaciones posteriores a lo largo del proceso de diseño, requiere de facilidades adicionales para manejar el espacio de trabajo. Esta aplicación informática cuenta con un plano de


dimensiones prácticamente ilimitadas sobre el cual puede hacerse el trazado que se desee a una determinada escala. La escala de visualización puede ser ampliada o reducida según convenga, a través del botón:

 ampliación o reducción de la escala en tiempo real; una vez activada esta opción, si se desplaza el ratón hacia arriba manteniendo oprimido su botón izquierdo, la imagen aumentaría de tamaño; si bajo las mismas condiciones se desplaza el ratón hacia abajo, la imagen disminuirá de tamaño.


En ocasiones es muy práctico poder ampliar rápidamente una determinada zona de la región que se está visualizando en pantalla, para ello está disponible el botón:

 ampliación de una zona de la región que se está visualizando en pantalla; mientras está activada la opción, al hacer clic en un punto de la pantalla, comenzará a dibujarse a partir de él un rectángulo que enmarcará a la zona que será ampliada. El rectángulo quedará totalmente definido luego de hacer clic en un segundo punto de la pantalla, diagonalmente opuesto al primer punto establecido. La zona enmarcada será ampliada automáticamente hasta que se alcance una de las dimensiones de la pantalla.


Para poder visualizar en un momento dado, de manera inmediata, la totalidad de la región que haya sido dibujada, existe la opción:

 coloca toda la región dibujada en el espacio de la pantalla del ordenador,

Una herramienta muy útil es la que posibilita regresar a estados visuales recientes. Dicha herramienta está contenida en el botón:

 permite regresar al estado visual anterior al que se esté visualizando cada vez que se hace clic sobre este botón.

La ampliación o reducción del plano con que se trabaja no es suficiente para poder desplazarse con rapidez por toda la zona dibujada. Por ello se ha incluido la opción:

 desplaza el plano de trabajo en la dirección y sentido en que se mueve el ratón cuando se tiene oprimido su botón izquierdo.

Con respecto también a la visualización, desde el punto de vista organizativo, fue incluida la presencia de capas. Cada elemento de la red estará dibujado en una capa;

pueden definirse tantas capas como se estime conveniente. Una aplicación muy práctica de esta facilidad consiste en establecer una capa para cada uno de los sectores en que quedará dividida una red, y luego, poder encender (mostrar) sólo las capas de los sectores con que se trabajará en un momento dado y dejar apagado el resto.

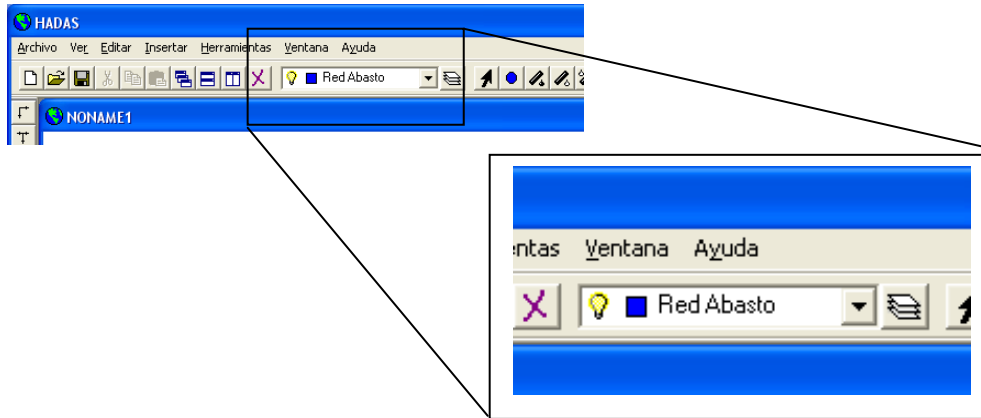
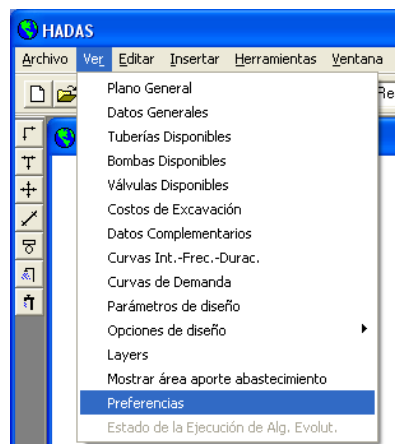


Figura 5.2.4 Acceso a las capas

Para los elementos de una capa pueden definirse color, tipo y grosor de línea. Independientemente de la definición que se haga, para cada tipo de elemento en particular puede decidirse la forma en que será visualizado, incluso establecer si sus patrones de visualización serán regidos por la capa donde esté ubicado o no. Las definiciones particulares para cada tipo de elemento están accesibles desde la opción “*Preferencias*” del menú principal “*Ver*”.



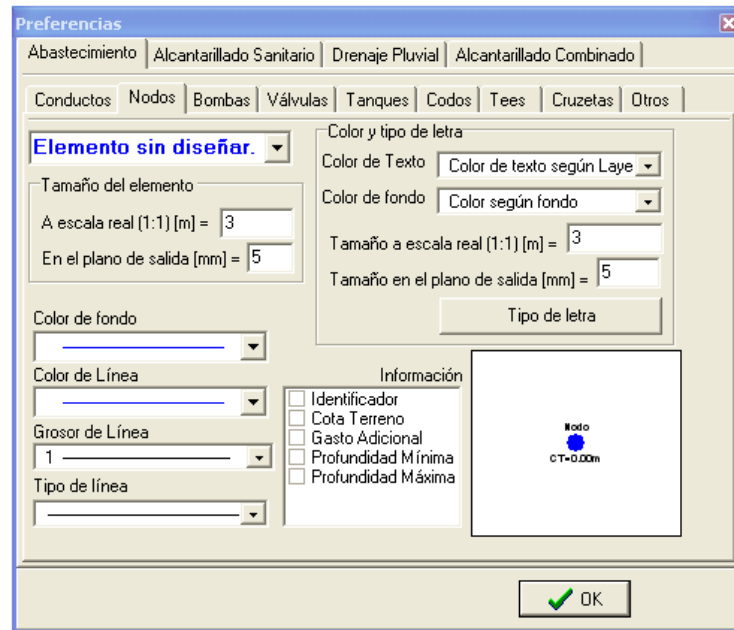


Figura 5.2.5 Acceso a las preferencias de visualización de los elementos

Entre los datos que no tienen una representación visual en el plano, están las curvas de variación de la demanda en los nodos, las cuales podrán ser accedidas desde la opción “*Curvas de demanda*” del menú principal “*Ver*”. Es posible crear tantas curvas como sean necesarias y cada una tendrá un identificador diferente para ser referenciada.

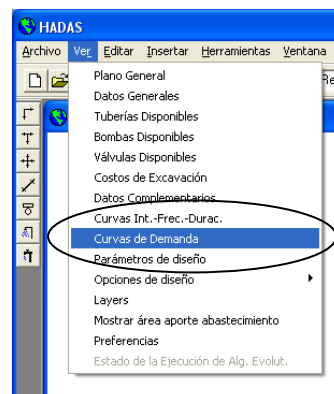




Figura 5.2.6 Curvas de demanda

Adicionalmente, para acometer el diseño óptimo de SDA, se necesitan informaciones relacionadas con los materiales disponibles en el mercado que podrán ser utilizados. Existen varias opciones del menú principal “Ver” que permiten el acceso a ventanas donde se ubicarán los datos relacionados con los materiales disponibles.

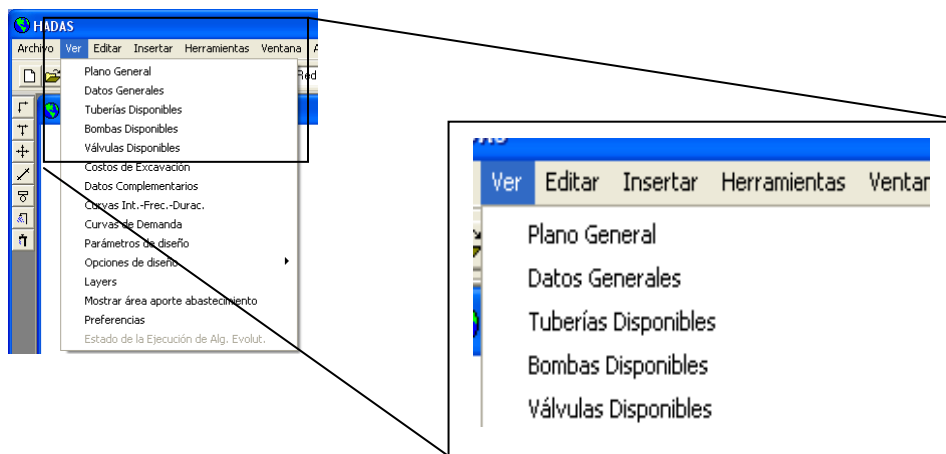


Figura 5.2.7 Acceso a materiales disponibles

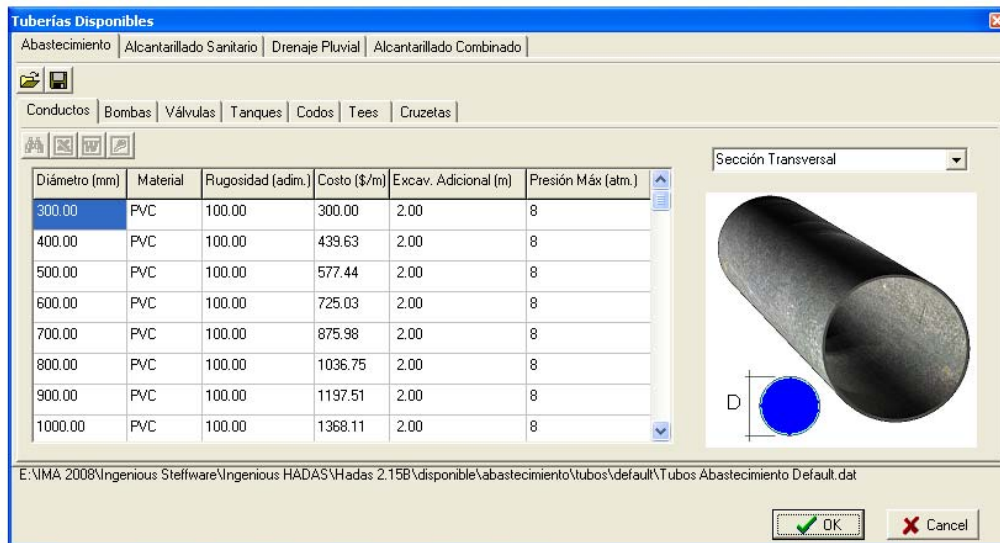


Figura 5.2.8 Tuberías disponibles

Como puede apreciarse en la figura anterior, es necesario introducir en el caso de las tuberías, los valores comerciales de diámetro, su coste por metro lineal y el coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams o de Darcy-Weisbach según la ecuación de estimación de pérdidas que se pretenda utilizar.

Los datos referentes a las bombas pueden ser establecidos o modificados a través de la opción “Bombas disponibles” del menú principal “Ver”.

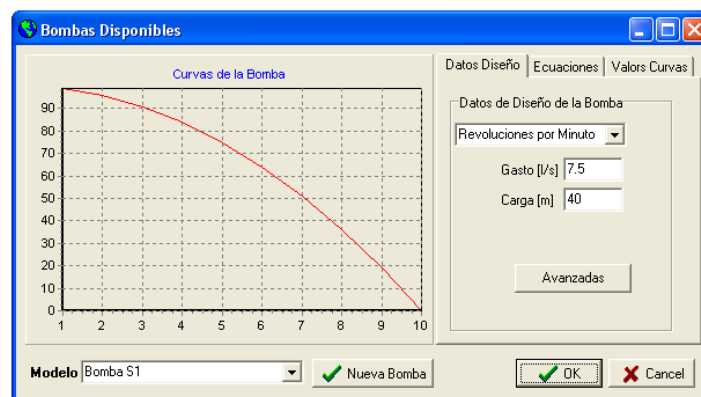


Figura 5.2.9 Bombas disponibles

Las restricciones de diseño también han de ser establecidas como datos. Para ello existe la ventana que se muestra en la figura 5.2.10. Dicha ventana puede ser accedida a través de la opción “*Parámetros de diseño*” del menú principal “*Ver*”.

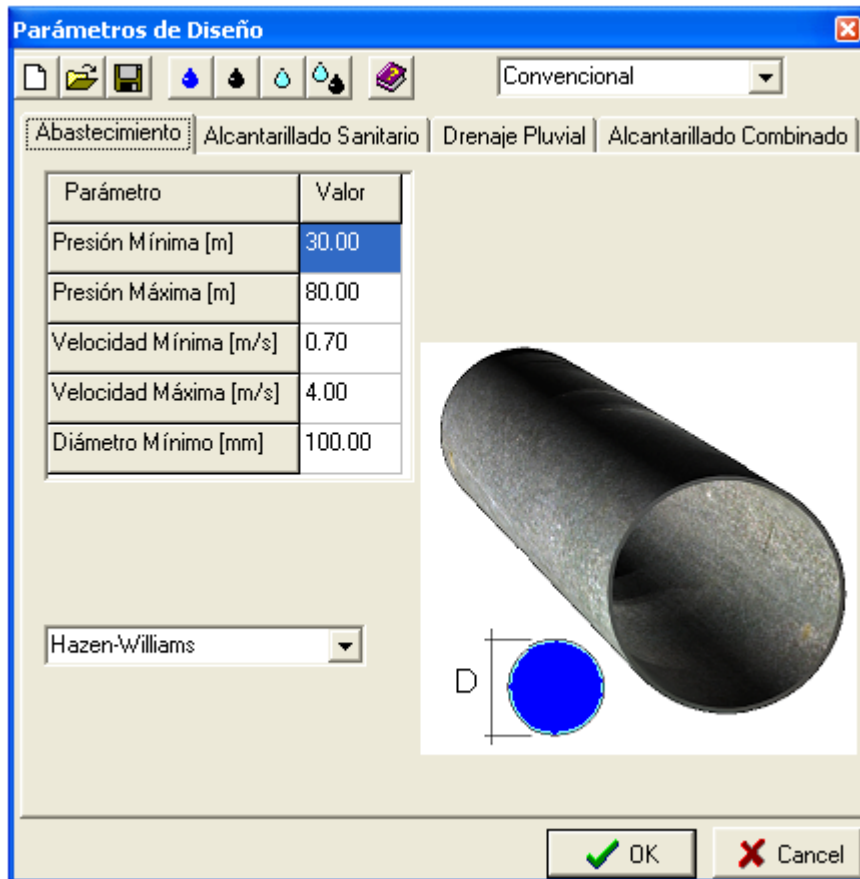


Figura 5.2.10 Restricciones de diseño

La ventana donde se muestran los parámetros de diseño, permite variar también las fórmulas a utilizar para el comportamiento hidráulico de las tuberías.

Una vez establecidos los parámetros deseados, se hace clic en el botón “*OK*” y puede procederse a la realización del diseño si se considera que están introducidos todos los datos necesarios. Hacer una comprobación rápida de todos los datos referentes a los elementos de la red, es posible mediante la opción “*Datos generales*” del menú principal “*Ver*”, que posibilita el acceso a la ventana mostrada en la figura siguiente:

The screenshot shows a software window titled 'Información de las redes.' with a menu bar containing 'General', 'Abastecimiento', 'Alcantarillado Sanitario', 'Drenaje Pluvial', and 'Alcantarillado Combinado'. Below the menu bar is a 'Nombre Red' dropdown and a toolbar with icons for file operations. A secondary menu bar includes 'Comentarios Generales', 'Conductos', 'Nodos', 'Bombas', 'Válvulas', 'Tanques', 'Codos', 'Tees', 'Cruzetas', and 'Otros'. The main area contains a table with the following data:

Tubo	Nodo 1	Nodo 2	Estado	Diámetro [mm]	Gasto [l/s]	Longitud [m]	Coef. Pérdida	Hf [m]	Diám. Duplic	Coste Tub
TUB9655	1015629	1018102	Diseñada	100.00	0.000	*7,466	130	0.000	...	874.567
TUB9660	1006200	979984	Diseñada	100.00	0.000	*187,843	130	0.000	...	22003.929
TUB9666	1039860	1031047	Diseñada	100.00	0.000	*58,755	130	0.000	...	6882.561
TUB9671	1025455	1031047	Diseñada	100.00	0.000	*44,126	130	0.000	...	5168.920
TUB9702	1018102	1028669	Diseñada	100.00	0.000	*77,41	130	0.000	...	9067.807
TUB9707	1006200	1011872	Diseñada	100.00	0.000	*41,757	130	0.000	...	4891.415
TUB9712	993538	979914	Diseñada	100.00	0.000	*51,704	130	0.000	...	6056.607
TUB9717	1031047	1039580	Diseñada	100.00	0.000	*77,654	130	0.000	...	9096.390
TUB9722	1023565	1025455	Diseñada	100.00	0.000	*17,925	130	0.000	...	2099.735

Figura 5.2.11 Ventana de visualización de datos generales

La ventana donde se muestran los datos generales, además de la visualización, permite la modificación de los datos. La información es presentada en formato de tablas en su mayor parte; es posible pegar en dichas tablas valores copiados de Excel, lo cual hace muy flexible las posibilidades de importación de datos.

5.3 Opciones de cálculo

Luego de que se han introducido todos los datos necesarios, la aplicación está lista para llevar a cabo las tareas de diseño. Como algoritmo de optimización se ha incluido el algoritmo PSO con todas las variantes posibles a las que se ha hecho referencia en este trabajo. A través de la opción “Diseñar redes” del menú principal “Herramientas” se puede acceder a la ventana de diseño.

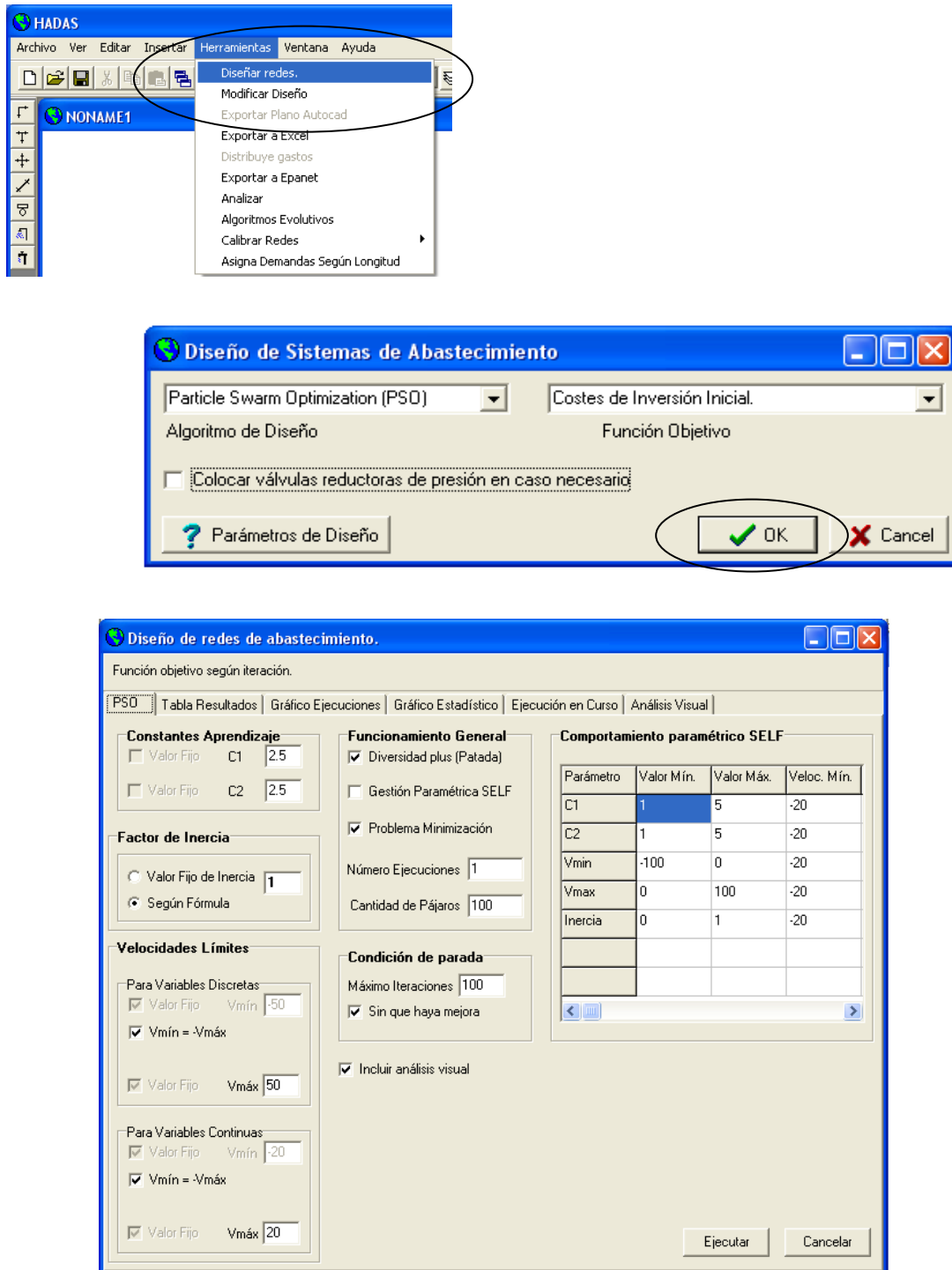


Figura 5.3.1 Opciones de diseño

Además de poder especificar los parámetros, el comportamiento y número de ejecuciones del algoritmo PSO, en la ventana de diseño existen varias pestañas a partir de las cuales se obtendrán informaciones importantes:

- Gráfico de ejecuciones: visualiza en un gráfico de barras el valor del coste de la mejor solución de cada una de las ejecuciones que ha llevado a cabo el algoritmo de optimización. Incluye también la representación en barras del número de iteraciones que fueron necesarias para llevar a cabo cada ejecución.

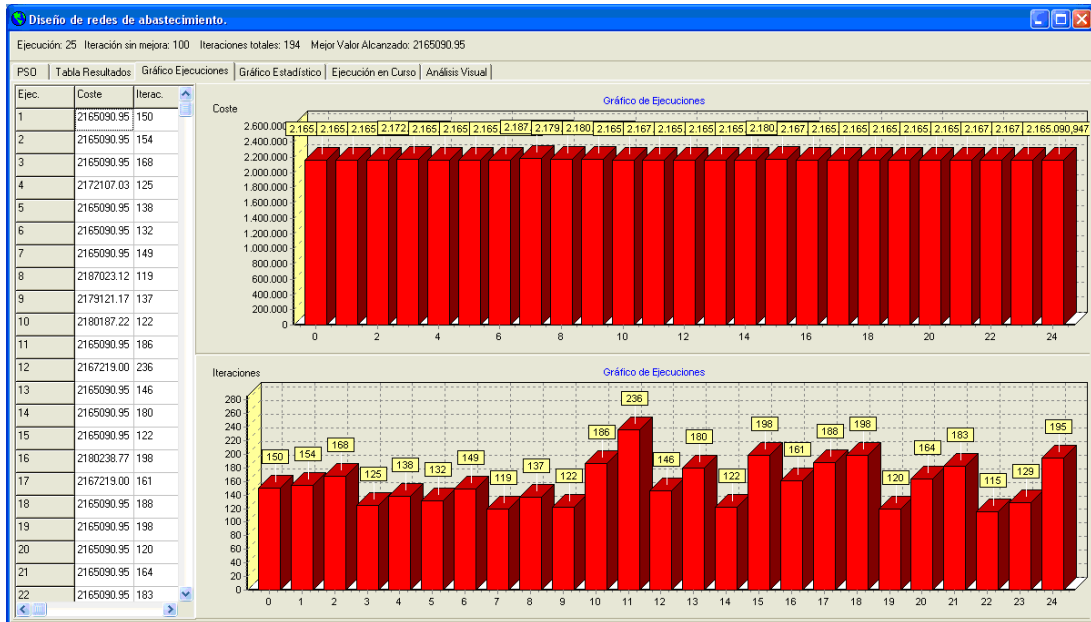


Figura 5.3.2 Gráfico de ejecuciones

- Gráfico estadístico: para el número de ejecuciones que se hayan hecho, partiendo de un análisis estadístico, representa la curva que indica la probabilidad con que puede ser obtenida, en una ejecución del algoritmo, la mejor solución encontrada o una solución en algún por ciento superior en coste.

5.4 Salida de resultados

El usuario podrá disponer de las soluciones que estime conveniente una vez que haya quedado satisfecho con las ejecuciones realizadas. Desde la pestaña de la tabla de resultados que aparece en la ventana de diseño, puede seleccionarse una solución al hacer clic sobre cualquiera de las celdas de la columna donde está la solución deseada. Automáticamente la columna se marcará en azul; luego, usando el botón “*Seleccionar solución*”, los valores señalados serán transmitidos a los elementos de la red.

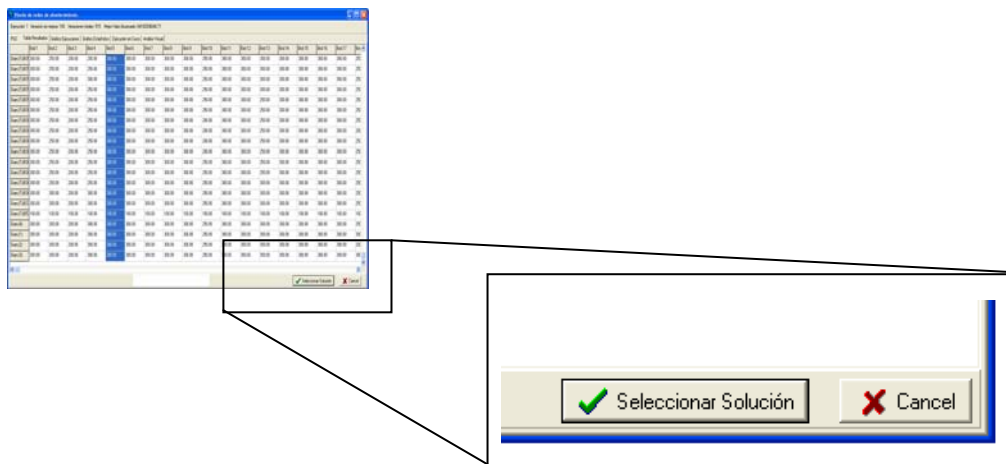


Figura 5.4.1 Resultados de diseño

A partir de que los elementos de la red tienen los valores de la solución deseada, es posible exportar el diseño creado a un archivo con el formato (.INP) de EPANET. La exportación se puede realizar con la opción *Exportar/Red a EPANET (.INP)* del menú principal “*Archivo*”.

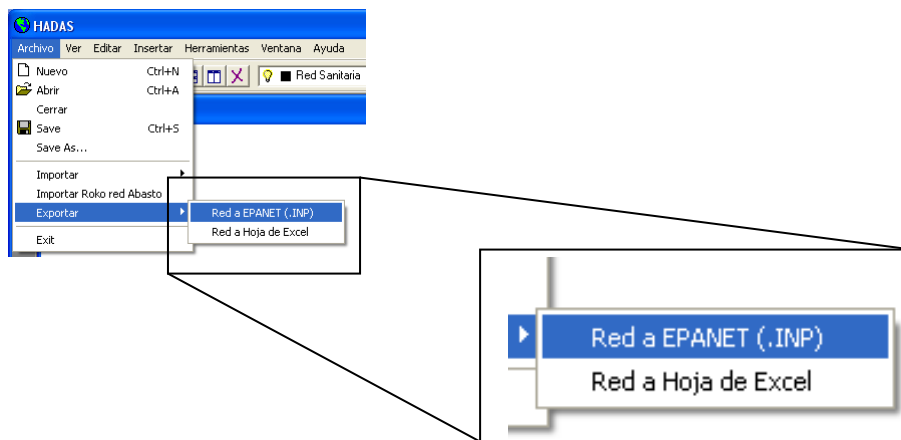


Figura 5.4.1 Exportar a EPANET

Con vista a facilitar el manejo e impresión de los resultados, ha sido concebido que la información relacionada con las redes pueda ser exportada a Microsoft Excel. Dicha exportación es accesible desde la opción “Red a hoja de Excel” del menú principal “Archivo”.

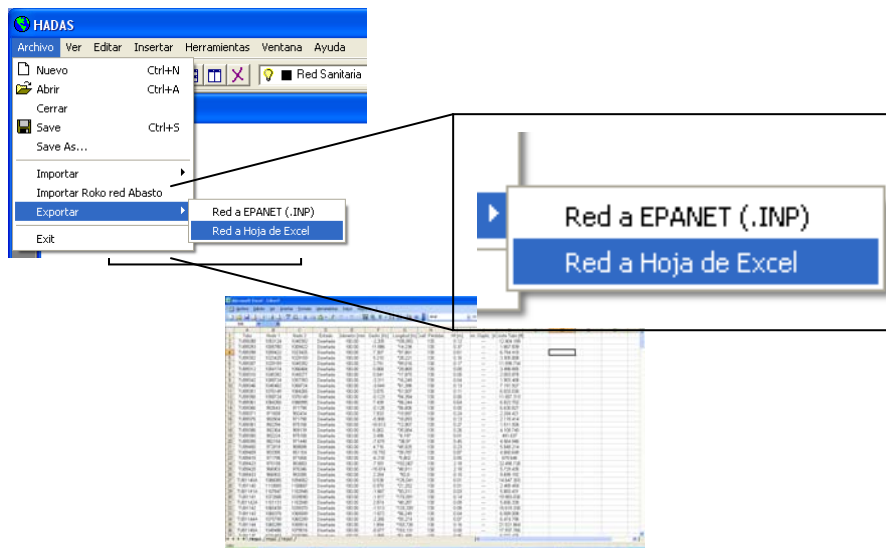


Figura 5.4.2 Resultados exportados a Microsoft Excel

5.5 Principales limitaciones de la aplicación

A pesar de que la aplicación que se presenta ofrece numerosas ventajas para el diseño óptimo de SDA, existen algunas limitaciones que deben ser conocidas:

- Como motor de cálculo, se utilizó EPANET2 para el análisis hidráulico de las soluciones, por lo que el programa queda subordinado a las limitaciones que EPANET2 ofrece para el cálculo.
- Para la verificación de algunas soluciones pudiera ser necesario realizar un análisis en régimen transitorio. Dicho análisis no se puede llevar a cabo en esta aplicación y debe usarse en su lugar algún otro programa como DYAGATS³, Hammer⁴,..., entre otros.
- No es posible en la versión actual el diseño de válvulas más allá de la determinación de sus valores de consigna.
- La interfaz con el usuario y con otras aplicaciones debe ser ampliada.

Independientemente de las limitaciones, las facilidades que ofrece el soporte informático que se presenta son de gran utilidad para el diseño óptimo de SDA. La variedad de aplicaciones existentes en el mercado concebidas específicamente para diseño de SDA no es amplia. Desde el punto de vista de la obtención de soluciones, el programa que se presenta tiene posibilidades tan buenas como cualquiera de las aplicaciones existentes en el mercado que este autor conoce.

³ <http://www.gmmf.upv.es>

⁴ <http://www.bentley.com/en-US/Products/HAMMER>

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

...mayor que la tristeza de no haber vencido, sería la vergüenza de no haber luchado...

6. Conclusiones y recomendaciones

En el diseño óptimo de sistemas de distribución de agua, las técnicas de optimización utilizadas han condicionado la forma en la que se ha planteado el problema de diseño en el transcurso de los años. El uso de la programación lineal, por ejemplo, ha conllevado la linealización de la función objetivo; por otra parte, las técnicas basadas en el gradiente, obligaron a garantizar la derivabilidad de la función que se utilice o a dividir el problema en partes para ser aplicadas sólo a los términos derivables. Durante años, consciente o inconscientemente, se adaptó el problema a la técnica de optimización utilizada.

El empleo de algoritmos evolutivos para el diseño óptimo de sistemas de distribución de agua permite el uso de cualquier forma de evaluar cuantitativamente los objetivos deseados. A pesar de sus bondades, cada algoritmo tiene sus propios inconvenientes. Para el algoritmo PSO, del cual se ocupa esta investigación, el intento de eliminar varios de sus inconvenientes para ser aplicado a la optimización del diseño de SDA, resultó en varias modificaciones implementadas a lo largo del trabajo realizado. La variante obtenida finalmente mostró un funcionamiento satisfactorio en la solución de varios problemas de diferente naturaleza.

El documento que se presenta expone tres modificaciones (dos fundamentales y una alternativa) realizadas al algoritmo original PSO. Desde el punto de vista de la metodología de diseño se hace uso de EPANET y de recientes propuestas de cuantificación económica de los diseños, para obtener soluciones de SDA que ofrecen una fiabilidad deseada en su funcionamiento sin un incremento excesivo de los costes. Como resultado de la investigación realizada puede concluirse que:

1. El manejo de variables discretas dentro del proceso óptimo de SDA usando PSO, puede llevarse a cabo satisfactoriamente con el empleo de la ecuación 3.2.1. Cuando el problema requiere el uso de variables continuas y discretas, preferiblemente no deben utilizarse los mismos límites de velocidades de vuelo para ambos tipos de variable. Una naturaleza marcadamente diferente de los efectos que la variación de una variable tiene en la función objetivo hace aconsejable también el uso de límites de velocidades diferentes para las variables en cuestión.

El empleo de las ecuaciones 3.1.5 y 3.2.1 para el caso de variables continuas y discretas respectivamente, es una de las modificaciones fundamentales para que el algoritmo pueda ser aplicado al diseño de SDA. Dicha modificación mantiene la sencillez de la implementación del algoritmo y brinda un desempeño excelente en el funcionamiento, según lo demuestra su utilización en todos los casos de estudio presentados en el capítulo 5.

Para las redes de Hanoi y New York, ampliamente abordadas en la literatura, los resultados estuvieron en el orden de las mejores soluciones obtenidas por otros autores. No obstante, las deficiencias del algoritmo para mantener elevados niveles de diversidad de la población de soluciones era una limitante de la eficiencia con los resultados encontrados.

El problema de la diversidad de la población se resolvió con lo que se ha considerado la segunda modificación fundamental:

2. Los choques que se producen con la partícula (pájaro) líder y las m mejores partículas deben evitarse introduciendo en el algoritmo la idea de que: la partícula que en su movimiento intente chocar será regenerada. Dicha regeneración quiere decir que la partícula es enviada a un punto del espacio de soluciones seleccionado de manera aleatoria; análogamente se modifica, su velocidad de vuelo y su memoria individual. Esta idea hace que aumente la diversidad de la población de soluciones evitando una concentración excesiva de partículas alrededor del elemento líder.

Los resultados de diseño correspondientes a los tres casos reales presentados fueron obtenidos todos con la inclusión de esta modificación en el algoritmo de cálculo. Las mejoras que esta modificación introduce son bien tangibles si se analizan las gráficas 4.2.2, 4.2.3, 4.3.2 y 4.3.3, correspondientes a los resultados de ejecutar el diseño de las redes de Hanoi y New York con y sin

el enriquecimiento de la diversidad propuesto. Para la red de Hanoi se obtuvo un coste de solución promedio de la mejor partícula en cada una de 100 ejecuciones de 6.487 y 6.297 antes y después de la introducción de la modificación, respectivamente. Para el caso de New York estos valores fueron 48.039 y 39.761 millones de dólares.

Luego de las mejoras en la diversidad de la población, se observó otro problema que era una limitante para que el algoritmo pudiera convertirse en una herramienta de trabajo útil en manos de proyectistas: el tratamiento de los parámetros.

Es un hecho que el uso de unos u otros parámetros podría resultar en un mejor o peor desempeño del algoritmo. La determinación a priori de buenos parámetros a utilizar es un proceso que puede requerir tiempo en dependencia del problema y de la experiencia que se tenga. El proceso de determinación de parámetros no es algo que debería dejarse totalmente en manos de los usuarios finales del algoritmo. Este es un proceso tedioso, que requiere de tiempo y además de cierta experiencia y conocimiento más detallado del funcionamiento del algoritmo. La búsqueda de una forma determinística para la obtención a priori de los parámetros fue desechada luego de que este autor encontró que existe una dependencia fuerte entre el problema y el desempeño del algoritmo. Luego se asume el hecho de que si el desempeño del algoritmo depende también de los parámetros que se utilicen, entonces, la selección a priori de dichos parámetros debe estar relacionada con las características del problema que se aborda. Para solucionar esta situación y evitar la necesidad de una elevada participación del usuario en la selección a priori de los parámetros, sobre todo si no se tiene experiencia en el tema, se propone la siguiente modificación alternativa para cuando se requiere una asistencia por parte del ordenador:

3. Se logró que el algoritmo gestionara sus parámetros de una manera auto-adaptativa, al ser incluidos estos dentro del conjunto de variables de decisión del problema.

En la aplicación descrita en el capítulo 5, se puede solicitar el tratamiento auto-adaptativo de los parámetros y el algoritmo funcionará como se describe en el capítulo 3 para esta situación. El usuario, en este caso, podrá desentenderse de la selección a priori de los parámetros.

Los resultados de diseño para las redes de Hanoi y New York, cuando el algoritmo gestiona sus parámetros, según se muestra en las figuras 4.4.4 y 4.4.5, no son tan buenos como cuando es conocido un conjunto de parámetros favorables. En el caso de estas figuras, el tamaño de la población que se usó fue el mismo. Hay que mencionar que el tamaño de la población no está incluido dentro de la gestión auto-adaptativa y debe ser definido a priori; no obstante, en este caso, un valor de 100 puede ajustarse bien prácticamente a todos los problemas. Los cálculos que dieron origen a las gráficas de las figuras 4.4.4 y 4.4.5 tenían el mismo tamaño de población del algoritmo cuando se trabajaba con y sin gestión auto-adaptativa. Esto ponía en desventaja a la gestión auto-adaptativa ya que con un mismo tamaño de población debía resolver un problema mayor en un espacio de soluciones mayor. De hecho, en la figura 4.5.6 se muestra que el algoritmo con gestión auto-adaptativa, si se pone en las mismas condiciones que el algoritmo que usa un conjunto de parámetros fijos, mediante el ajuste del tamaño de la población, los resultados obtenidos con la alternativa auto-adaptativa son superiores.

Estos resultados no son más que un reflejo de la capacidad de comportamiento multi-agente (MA) del algoritmo PSO. En un sistema MA cada agente tiene una capacidad limitada y/o información incompleta para resolver el problema que trata y, por tanto, tiene una visión limitada de la solución. No existe un control global del sistema, los valores son descentralizados y la computación es asincrónica (Sycara, 1998). Cada agente por separado es incapaz de resolver el problema, pero un conjunto de ellos, en el que coexisten visiones diferentes, estará mejor capacitado para encontrar una solución al interactuar entre sí. La necesidad de compaginar las intenciones es lo que hace a la inteligencia colectiva superior.

Desde el punto de vista del comportamiento de un sistema MA en un proceso de optimización, como en el caso de esta investigación, hay que dejar claro que:

- Un agente simple, al tomar decisiones, minimiza la función objetivo f buscando los valores de las variables $x \in C \subset R^n$

- Múltiples agentes K , que interactúan en su toma de decisiones, minimizan las funciones f_K buscando los valores de las variables $x_K \in C_K \subset \mathbb{R}^{n_K}$, donde f_K y C_K pueden depender de las decisiones de otros agentes.

El resultado de estas interacciones, como se había explicado anteriormente, es superior. En el caso del diseño óptimo de SDA, un sistema MA tiene un valor añadido considerable porque la introducción de varios agentes con visiones diferentes sobre un mismo problema para la evaluación de soluciones deja las puertas abiertas a una forma de optimización multiobjetivo cualitativamente mucho más cercana a la realidad. Desde el punto de vista práctico, este avance permite combinar dentro del proceso de optimización multi-objetivo, los intereses económicos, ingenieriles y políticos a la hora de darle solución a un problema.

Independientemente de las bondades del algoritmo que se presenta, lo acertado que sea el planteamiento de los objetivos del problema de optimización es decisivo para que los resultados se ajusten a la realidad deseada; en este sentido:

4. Se mejoró cualitativamente la calidad de las soluciones introduciendo en la función objetivo una reciente propuesta presentada en (Martínez, 2007) para evaluar mejor económicamente las ventajas que puede tener la topología de las redes.

La forma de evaluación introducida analiza no sólo la inversión inicial sino también los costes adicionales por posibles problemas de suministro en la red. Como resultado se obtuvieron diseños con una mayor fiabilidad en su funcionamiento ante posibles condiciones de fallo y sin un incremento significativo de los costes de inversión inicial.

Esta propuesta funde en una misma formulación el objetivo de obtener diseños fiables con el de la menor inversión inicial posible, buscando un punto de equilibrio en la evaluación económica de los costes de fallo. La inclusión de objetivos adicionales es inmediata dado el algoritmo que se ha presentado, pero la combinación de todos estos cálculos y posibilidades no sería posible desde el punto de vista práctico sin una aplicación informática que los lleve a cabo.

5. A lo largo de la investigación, este autor implementó una aplicación informática descrita en el capítulo 5, con la capacidad de resolver el diseño óptimo de los SDA, haciendo uso de los algoritmos y la teoría descrita en este trabajo.

La aplicación brinda facilidades para el intercambio de información con el usuario y con otras aplicaciones. También hace uso de EPANET2 como motor de cálculo para el análisis hidráulico de las soluciones potenciales. Esta aplicación permitió ver los resultados de la teoría planteada:

6. Se realizó la ejecución de cinco problemas de diseño de redes; dos de ellos conocidos, cuyos resultados coincidieron con los mejores resultados publicados por otros autores. Los tres casos restantes, correspondieron a soluciones reales de diseño.

Ejecutar la aplicación para los conocidos problemas de Hanoi y New York, permitió comprobar el desempeño del algoritmo a través de la comparación con otros trabajos. Un estudio estadístico de las soluciones para estos casos reafirmó las bondades de las modificaciones introducidas al algoritmo. Luego todo estuvo dispuesto para resolver diseños mayores cualitativa y cuantitativamente. Los resultados de los tres casos correspondientes a situaciones reales de diseño fueron muy alentadores pero todavía quedan insatisfacciones en tres sentidos diferentes:

- a) La aplicación informática tiene asociada todavía varias limitaciones en el análisis hidráulico de las soluciones potenciales. El motor de cálculo de EPANET2 impide el análisis en régimen transitorio y hace que la aplicación herede de él sus limitaciones. Por otra parte todavía es mejorable el intercambio de información con el usuario y con otras aplicaciones.
- b) El diseño hidráulico todavía puede incluir muchas más opciones para la evaluación de los objetivos deseados. La solución presentada no es la definitiva, evidentemente, y ha de trabajarse más en la ampliación del establecimiento de los objetivos porque, como se ha visto, el algoritmo propuesto está en buena capacidad para asimilarlos. Adicionalmente debe hacerse un trabajo dirigido en especial al tratamiento de la incertidumbre en datos y resultados.
- c) Desde el punto de vista del algoritmo, todavía queda pendiente la introducción de la gestión del tamaño de la población. También deben

considerarse mejoras adicionales que faciliten el proceso de búsqueda de soluciones. Finalmente, con el objetivo de poder solucionar grandes problemas en el menor tiempo posible, es conveniente la paralelización y/o distribución del algoritmo. Este autor se inclina más hacia una distribución y hacia el uso de computación concurrente asincrónica.

A pesar de las insatisfacciones, el trabajo que se presenta brinda varios aportes científicos:

- La aplicación de PSO al diseño óptimo de SDA no era algo de lo que se haya tenido referencias en el momento en que se desarrolló esta investigación.
- La propuesta de diversidad enriquecida que mejoró el funcionamiento de la PSO en el problema de optimización planteada en este trabajo, y en otros problemas también, fue un aporte exclusivo de este autor.
- La formulación del comportamiento auto-adaptativo de la gestión de parámetros y su interpretación dentro de la filosofía de sistema multi-agente es un aporte a la forma en que puede ser planteado el problema de optimización multi-objetivo en el caso de diseño de SDA. Implícitamente el control auto-adaptativo de parámetros es en sí mismo un ejemplo de optimización multi-objetivo basado en agentes que comparten la visión de encontrar la mejor solución al problema de diseño y la de encontrar los mejores parámetros para desenvolverse, durante el proceso de búsqueda, desde perspectivas individuales diferentes.

Desde el punto de vista práctico, la aplicación informática que se ha implementado es un aporte a las soluciones informáticas con las que pueden contar los especialistas dedicados a la práctica de diseño.

Los algoritmos evolutivos han abierto las posibilidades de expresión del diseño óptimo de sistemas de distribución de agua. Su uso ha ido en ascenso en los últimos años; no obstante, todavía queda trabajo por hacer para aumentar la confianza en ellos por los desconocedores del tema y la generalización de su empleo en los casos necesarios. La investigación que se presenta es un paso más para el alcance de este objetivo deseado.

Esta investigación hizo uso de la inteligencia colectiva de todos los que en ella se involucraron.

Bibliografía

Cuando bebas agua, acuérdate de la fuente.

Proverbio chino

Bibliografía

Afshar, M. H. y M. A. Mariño (2007). "A parameter-free self-adapting boundary genetic search for pipe network optimization." Computational Optimization and Applications **37**(1): 83-102.

Al-kazemi, B. y C. K. Mohan (2000). Multi-phase discrete particle swarm optimization. Fourth International Workshop on Frontiers in Evolutionary Algorithms.

Alperovits, E. y U. Shamir (1977). "Design of optimal water distribution systems." Water Resources Research **13**(6): 885-900.

Angeline, P. J. (1996). Two self-adaptive crossover operators for genetic programming. Advances in genetic programming: volume 2, MIT Press: 89-109.

Angeline, P. J. (1998a). Evolutionary Optimization Versus Particle Swarm Optimization: Philosophy and Performance Differences. 7th International Conference on Evolutionary Programming VII, Springer-Verlag.

Angeline, P. J. (1998b). Using selection to improve particle swarm optimization. Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence. , Anchorage, AK, USA.

Arumugam, M. S. y M. V. C. Rao (2008). "On the improved performances of the particle swarm optimization algorithms with adaptive parameters, cross-over operators and root mean square (RMS) variants for computing optimal control of a class of hybrid systems." Appl. Soft Comput. **8**(1): 324-336.

- Awumah, K., I. Goulter y S. Bhatt, K. (1991). "Entropy-Based Redundancy Measures in Water-Distribution Networks." Journal of Hydraulic Engineering **117**(5): 595-614.
- Awumah, K., I. C. Goulter y S. Bhatt, K. (1990). "Assessment of reliability in water distribution networks using entropy based measures " Stochastic Environmental Research and Risk Assessment **4**(4): 325-336.
- Bäck, T., F. Hoffmeister y H. Schwefel (1991). A survey of evolution strategies. Fourth International Conference on Genetic Algorithms, San Mateo, CA.
- Bao, Y. y L. W. Mays (1990). "Model for Water Distribution System Reliability." Journal of Hydraulic Engineering **116**(9): 1119-1137.
- Broad, D. R., G. C. Dandy y H. R. Maier (2005). "Water distribution system optimization using metamodels." Journal of Water Resources Planning and Management **131**(3): 172-180.
- Clerc, M. (1999). The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization. Congress on evolutionary Computation, CEC 99.
- Clerc, M. y J. Kennedy (2002). The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. IEEE Transactions on Evolutionary Computation.
- Coloni, A., M. Dorigo, F. Maffioli, V. Maniezzo, G. Righini y M. Trubian (1996). "Heuristics from nature for hard combinatorial optimization problems." International Transactions in Operational Research **3**(1): 1-21.
- Cullinane, M. J., E. L. Kevin y W. M. Larry (1992). "Optimization-Availability-Based Design of Water-Distribution Networks." Journal of Hydraulic Engineering **118**(3): 420-441.
- Cunha, M. C. y J. Sousa (1999). "Water distribution network design optimization: simulated annealing approach." Journal of Water Resources Planning and Management **125**(4): 215-221.
- Chiong, C. (1982). Optimización de redes cerradas. Centro de Investigaciones Hidráulicas. CUJAE, Ciudad de la Habana. Tesis doctoral.
- Dandy, G. C. y M. O. Engelhardt (2006). "Multi-Objective Trade-Offs between Cost and Reliability in the Replacement of Water Mains." Journal of Water Resources Planning and Management **132**(2): 79-88.
-

- Dandy, G. C., A. R. Simpson y L. J. Murphy (1996). "An improved genetic algorithm for pipe network optimization." Water Resources Research **32**(2): 449-458.
- Díaz, J. L., M. Herrera, J. Izquierdo, I. Montalvo y R. Pérez (2008). A Particle Swarm Optimization derivative applied to cluster analysis. 4th Biennial Meeting of the International Conference on Environmental Modelling and Software (iEMSs), Barcelona, España.
- Dong, Y., J. Tang, B. Xu y D. Wang (2005). "An application of swarm optimization to nonlinear programming." Computers & Mathematics with Applications **49**(11-12): 1655-1668.
- Dorigo, M., V. Maniezzo y A. Colormi (1996). "The ant system: optimization by a colony of cooperating agents." IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B, Cybernetics **26**(1): 29-41.
- Duan, N., L. W. Mays y K. E. Lansey (1990). "Optimal Reliability-Based Design of Pumping and Distribution Systems." Journal of Hydraulic Engineering **116**(2): 249-268.
- Duan, Q., S. Sorooshian y V. Gupta (1992). "Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models." Water Resources Research **28**(4): 1015-1031.
- Eberhart, R. C. y Y. Shi (2000). Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. Congress on Evolutionary Computation.
- Eiben, A. E., R. Hinterding y Z. Michalewicz (1999). Parameter control in evolutionary algorithms. Evolutionary Computation, IEEE Transactions on.
- Eusuff, M. M. y K. E. Lansey (2003). "Optimization of Water Distribution Network Design Using the Shuffled Frog Leaping Algorithm." Journal of Water Resources Planning and Management **129**(3): 210-225.
- Farmani, R., J. A. Wright, D. A. Savic y G. A. Walters (2005). "Self-Adaptive Fitness Formulation for Evolutionary Constrained Optimization of Water Systems." Journal of Computing in Civil Engineering **19**(2): 212-216.
- Forrest, S. y A. Perelson (1991). Genetic Algorithms and the Immune System. 1st Workshop on Parallel Problem Solving from Nature, Springer-Verlag.
- Fujiwara, O. y D. B. Khang (1990). "A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks." Water Resources Research **26**(4): 539-549.

- Geem, Z. W. (2006). "Optimal cost design of water distribution networks using harmony search." Engineering Optimization **38**(3): 259-280.
- Geem, Z. W., K. Joong Hoon y G. V. Loganathan (2001). "A new heuristic optimization algorithm: Harmony search." Simulation **76**(2): 60-68.
- Gessler, J. (1982). Optimization of pipe networks. International Symposium on Urban Hidrology, Hydraulics and Sediment Control, University of Kentucky, Lexington, Kentucky.
- Goulter, I. C. (1995). Analytical and simulation models for reliability analysis in water distribution systems. Improving efficiency and reliability in water distribution systems, London, U.K.
- Goulter, I. C. y F. Bouchart (1990). "Reliability-Constrained Pipe Network Model." Journal of Hydraulic Engineering-Asce **116**(2): 211-229.
- Goulter, I. C. y A. V. Coals (1986). "Quantitative approaches to reliability assessment in pipe networks." Journal of Transportation Engineering **112**(3): 287-301.
- Hajela, P. y J. Lee (1996). "Constrained genetic search via schema adaptation: An immune network solution." Structural and Multidisciplinary Optimization **12**(1): 11-15.
- Herrera, F. y M. Lozano (1998). Adaptive Genetic Algorithms Based on Coevolution with Fuzzy Behaviors, Department of computer science and A.I., University of Granada, Spain.
- Herrera, M., J. Izquierdo, I. Montalvo, J. García-Armengol y J. V. Roig (2008). "Identification of surgical practice patterns using evolutionary cluster analysis." aceptado en Mathematical and Computer Modelling.
- Higashi, N. y H. Iba (2003). Particle swarm optimization with Gaussian mutation. IEEE Swarm Intelligence Symposium, Indianapolis, Indiana, USA.
- Hollander, M. y D. A. Wolfe (1999). Nonparametric Statistical Methods, 2nd Edition New York, Wiley-Interscience.
- Iglesias, P. L. (2001). Modelo general de análisis de redes hidráulicas a presión en régimen transitorio. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. Tesis doctoral.
- Iglesias, P. L., D. Mora, V. Fuertes y F. J. Martínez (2006). Análisis estadístico de soluciones de diseño de redes de abastecimiento de agua mediante algoritmos
-

genéticos. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guyana, Venezuela.

Izquierdo, J., P. A. López, F. J. Martínez y R. Pérez (2007). "Fault detection in water supply systems using hybrid (theory and data-driven) modelling." Mathematical and Computer Modelling **46**(3-4): 341-350.

Izquierdo, J., R. Minciardi, I. Montalvo, M. Robba y M. Tavera (2008a). Particle swarm optimization for the biomass supply chain strategic planning. 4th Biennial Meeting International Conference on Environmental Modelling and Software (iEMSs), Barcelona, España.

Izquierdo, J., I. Montalvo, M. Herrera y R. Pérez (2008b). "A derivative of particle swarm optimization with enriched diversity." enviado a Optimization and Engineering.

Izquierdo, J., I. Montalvo, R. Pérez y V. Fuertes (2008c). "Design optimization of wastewater collection networks by PSO." Computers & Mathematics with Applications **56**(3): 777-784.

Izquierdo, J., I. Montalvo, R. Pérez y V. Fuertes (2008d). "Forecasting pedestrian evacuation times by using swarm intelligence." enviado a Physica A: Statistical Mechanics and its Applications.

Izquierdo, J., I. Montalvo, R. Pérez y M. Tavera (2008e). Optimization in water systems: a PSO approach. Business and Industry Symposium (BIS), Ottawa, Canadá.

Izquierdo, J., R. Pérez y P. L. Iglesias (2004). "Mathematical Models and Methods in the Water Industry." Mathematical and Computer Modelling(39): 1353-1374.

Janson, S., D. Merkle y M. Middendorf (2008). "Molecular docking with multi-objective Particle Swarm Optimization." Appl. Soft Comput. **8**(1): 666-675.

Jayaram, N. y K. Srinivasan (2008). "Performance-based optimal design and rehabilitation of water distribution networks using life cycle costing." Water Resources Research **44**(1): 15 pp.

Jiang, M., Y. P. Luo y S. Y. Yang (2007a). "Stochastic convergence analysis and parameter selection of the standard particle swarm optimization algorithm." Inf. Process. Lett. **102**(1): 8-16.

Jiang, Y., T. Hu, C. Huang y X. Wu (2007b). "An improved particle swarm optimization algorithm." Applied Mathematics and Computation **193**(1): 231-239.

- Jin, X., J. Zhang, J. L. Gao y W. Y. Wu (2008). "Multi-objective optimization of water supply network rehabilitation with non-dominated sorting Genetic Algorithm-II." Journal of Zhejiang University SCIENCE A **9**(3): 391-400.
- Jin, Y. X., H. Z. Cheng, J. Y. Yan y L. Zhang (2007). "New discrete method for particle swarm optimization and its application in transmission network expansion planning." Electric Power Systems Research **77**(3-4): 227-233.
- Jowitt, P. W. y X. Chengchao (1993). "Predicting Pipe Failure Effects in Water Distribution Networks." Journal of Water Resources Planning and Management **119**(1): 18-31.
- Kennedy, J. (1999). Small worlds and mega-minds: effects of neighborhood topology on particle swarm performance. Congress Evolutionary Computation.
- Kennedy, J. (2003). Bare bones particle swarms. IEEE Swarm Intelligence Symposium, Indianapolis, Indiana, USA.
- Kennedy, J. y R. C. Eberhart (1995). Particle swarm optimization. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, IEEE Service Center, Piscataway, NJ.
- Kim, J. H., C. W. Baek, D. J. Jo, E. S. Kim y M. J. Park (2004). "Optimal planning model for rehabilitation of water networks." Water Science and Technology: Water Supply **4**(3): 133-147.
- Kleiner, Y., B. J. Adams y J. S. Rogers (2001). "Water distribution network renewal planning." Journal of Computing in Civil Engineering **15**(1): 15-26.
- Krasnogor, N. y S. Gustafson (2004). "A Study on the use of "self-generation" in memetic algorithms." Natural Computing: an international journal **3**(1): 53-76.
- Lansley, K. E. y L. W. Mays (1989). "Optimization model for water distribution system design." Journal of Hydraulic Engineering **115**(10): 1401-1418.
- Liao, C. J., C. T. Tseng y P. Luarn (2007). "A discrete version of particle swarm optimization for flowshop scheduling problems." Computers and Operations Research **34**(10): 3099-3111.
- Liong, S. Y. y M. Atiquzzama (2004). "Optimal design of water distribution network using shuffled complex evolution." Journal of The Instituos of Engineers, Singapore **144**(1): 93-107.

Lippai, I., J. P. Heaney y M. Laguna (1999). "Robust water system design with commercial intelligent search optimizers." Journal of Computing in Civil Engineering **13**(3): 135-143.

Løvbjerg, M., T. K. Rasmussen y T. Krink (2001). Hybrid particle swarm optimiser with breeding and subpopulations. Third Genetic and Evolutionary Computation Conference.

Maier, H. R., A. R. Simpson, A. C. Zecchin, W. K. Foong, K. Y. Phang, H. Y. Seah y C. L. Tan (2003). "Ant colony optimization for design of water distribution systems." Journal of Water Resources Planning and Management **129**(3): 200-209.

Martínez, J. B. (2007). "Quantifying the economy of water supply looped networks." Journal of Hydraulic Engineering-Asce **133**(1): 88-97.

Matías, A. S. (2003). Diseño de redes de distribución de agua contemplando la fiabilidad, mediante Algoritmos Genéticos. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. Tesis doctoral.

Mays, L. W. (1996). Review of reliability analysis of water distribution systems. Stochastic Hydraulic, Rotterdam, The Netherlands.

Montalvo, I., M. Herrera, J. Izquierdo y J. L. Díaz (2008a). Métodos heurísticos para análisis de clusters en una base de datos de abastecimiento de agua. VIII Seminario iberoamericano: planificación, proyecto y operación de sistemas de abastecimiento de agua (SEREA), Lisboa, Portugal.

Montalvo, I., J. Izquierdo, M. Herrera y R. Pérez (2008b). El diseño de redes de distribución de agua mediante una variante del algoritmo PSO con diversidad enriquecida. Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia.

Montalvo, I., J. Izquierdo, R. Pérez y V. Fuertes (2008c). Simulation of people evacuation processes through Particle Swarm Optimization. 7th Interdisciplinary Conference of the International Society of the Arts, Mathematics and Architecture (ISAMA), Valencia, España.

Montalvo, I., J. Izquierdo, R. Pérez y P. Iglesias (2008d). "A diversity-enriched variant of discrete PSO applied to the design of Water Distribution Networks." Engineering Optimization **40**(7): 655-668.

Montalvo, I., J. Izquierdo, R. Pérez, D. Mora y M. Herrera (2007a). Aplicación de la Optimización de Colonia de Hormigas al Diseño de Sistemas de Distribución de Agua. VII Seminario iberoamericano planificación, proyecto y operación de sistemas de abastecimiento de agua (SEREA). Morelia, México.

Montalvo, I., J. Izquierdo, R. Pérez y M. Tung (2008e). "Particle Swarm Optimization applied to the design of water supply systems." Computers & Mathematics with Applications **56**(3): 769-776.

Montalvo, I., M. Tavera, J. Izquierdo y R. Pérez (2007b). Calibrazione di reti idriche e localizzazione teorica delle perdite in acquedotto utilizzando Particle Swarm Optimization (PSO). Terzo Seminario "La ricerca delle perdite e la gestione delle reti di acquedotto", Facoltà di Ingegneria, Perugia, Italia.

Montesinos, P., A. García-Guzmán y J. L. Ayuso (1999). "Water distribution network optimization using a modified genetic algorithm." Water Resources Research **35**(11): 3467-3473.

Morgan, D. R. y I. C. Goulter (1982). Least cost layout and design of looped water distribution systems. International Symposium on Urban Hydrology, Hydraulics and Sediment Control, University of Kentucky, Lexington, Kentucky.

Morgan, D. R. y I. C. Goulter (1985). "Optimal urban water distribution design." Water Resources Research **21**(5): 642-652.

Ostfeld, A. y U. Shamir (1996). "Design of Optimal Reliable Multiquality Water-Supply Systems." Journal of Water Resources Planning and Management **122**(5): 322-333.

Parsopoulos, K. E., V. P. Plagianakos, G. D. Magoulas y M. N. Vrahatis (2001a). Improving particle swarm optimizer by function "stretching". Advances in Convex Analysis and Global Optimization Nonconvex Optimization and Applications series, The Netherlands.

Parsopoulos, K. E., V. P. Plagianakos, G. D. Magoulas y M. N. Vrahatis (2001b). Stretching Technique for Obtaining Global Minimizers Through Particle Swarm Optimization. Particle Swarm Optimization Workshop, Indianapolis (IN), USA.

Qi, L. y L. ZiFang (1996). Optimization of looped water distribution systems. The IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT '96).

Quimpo, R. G. y U. Shamir (1987). Network analysis for water supply reliability determination. National Conference on Hydraulic Engineering, Williamsburg (VA), USA.

Quimpo, R. G. y U. M. Shamsi (1991). "Reliability-Based Distribution System Maintenance." Journal of Water Resources Planning and Management **117**(3): 321-339.

- Quindry, G. E., E. D. Brill y J. C. Liebman (1981). "Optimization of looped water distribution systems." American Society of Civil Engineers, Journal of the Environmental Engineering Division **107**(4): 665-679.
- Rastegar, R., M. R. Meybodi y K. Badie (2004). A new discrete binary particle swarm optimization based on learning automata. International conference on machine learning and applications.
- Ratnaweera, A., S. K. Halgamuge y H. C. Watson (2004). "Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients." IEEE Transactions on Evolutionary Computation **8**(3): 240-255.
- Reca, J. y J. Martínez (2008). "Application of Several Meta-Heuristic Techniques to the Optimization of Real Looped Water Distribution Networks." Water Resources Management **22**(10): 1367-1379.
- Robert, H., M. Zbigniew y C. P. Thomas (1996). Self-Adaptive Genetic Algorithm for Numeric Functions. Proceedings of the 4th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, Springer-Verlag.
- Rossman, L. A. (2000). EPANET, User's Manual. Cincinnati (IN), USA, Environmental Protection Agency.
- Rowell, W. F. y J. Barnes (1982). "Obtaining layout of water distribution systems." Journal of the Hydraulic Division **108**(1): 137-148.
- Savic, D. A. y A. W. Godfrey (1995). Genetic Operators and Constraint Handling for Pipe Network Optimization. Selected Papers from AISB Workshop on Evolutionary Computing, Springer-Verlag.
- Savic, D. A. y G. A. Walters (1997). "Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks." Journal of Water Resources Planning and Management **123**(2): 67-77.
- Schaake, J. y D. Lai (1969). Linear Programming and Dynamic Programming Applications to Water Distribution Network Design, Dept. of Civil Engineering, MIT.
- Sharp, W. W. y T. Walski (1988). "Predicting internal roughness in water mains." Journal of AWWA **80**(11): 34-40.
- Shi, X. H., Y. C. Liang, H. P. Lee, C. Lu y Q. X. Wang (2007). "Particle swarm optimization-based algorithms for TSP and generalized TSP." Information Processing Letters **103**(5): 169-176.

Shi, Y. y R. C. Eberhart (1998). A modified particle swarm optimizer IEEE international conference on evolutionary computation, Piscataway (NJ), USA.

Simpson, A. R., G. C. Dandy y L. J. Murphy (1994). "Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization." Journal of Water Resources Planning and Management **120**(4): 423-443.

Smith, J. E. (2003). Co-evolving memetic algorithms: a learning approach to robust scalable optimisation. Proceedings of Evolutionary Computation.

Smith, R., E., S. Forrest y A. Perelson, S. (1993). "Searching for diverse, cooperative populations with genetic algorithms." Evol. Comput. **1**(2): 127-149.

Sousa, J. y M. C. Cunha (1998). Dimensionamento otimizado de redes malhadas de distribuição de água. 4º Congresso da Água, "A Água como Recurso Estruturante do Desenvolvimento" Lisboa.

Strafaci, A. (2001). "Genetic algorithms in water resources engineering." Current Methods **1**(1): 119-123.

Sycara, K. (1998). "Multiagent Systems." AI Magazine **19**(2): 79-92.

Tanyimboh, T. T. y P. Kalungi (2008). "Optimal long-term design, rehabilitation and upgrading of water distribution networks." Engineering Optimization **40**(7): 637 - 654.

Tanyimboh, T. T. y Y. Setiadi (2008). "Joint layout, pipe size and hydraulic reliability optimization of water distribution systems." Engineering Optimization **40**(8): 729-747.

Tanyimboh, T. T. y A. B. Templeman (1993a). "Calculating maximum entropy flows in networks." The Journal of the operational research society **44**(4): 383-396.

Tanyimboh, T. T. y A. B. Templeman (1993b). "Maximum entropy flows for single-source networks." Engineering Optimization **22**(1): 49-64.

Templeman, A. B. (1982). "Discussion of "Optimization of looped water distribution systems" by Quindry et al." Journal of Environmental Engineering **108**(3): 599-602.

Todini, E. (2000). "Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach." Urban Water **2**(3): 115-122.

Trelea, I. C. (2003). "The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection." Inf. Process. Lett. **85**(6): 317-325.

Tung, Y. K. (1985). Evaluation of water distribution network reliability. Hydraulics and hydrology in the small computer age, Lake Buena Vista, Florida, USA.

Ueno, G., K. Yasuda y N. Iwasaki (2005). Robust adaptive particle swarm optimization. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics.

Vamvakeridou-Lyroudia, L. S., G. A. Walters y D. A. Savic (2005). "Fuzzy Multiobjective Optimization of Water Distribution Networks." Journal of Water Resources Planning and Management **131**(6): 467-476.

Wah, A. y P. W. Jowitt (2005). "Some new insights on informational entropy for WD Networks." Engineering Optimization **37**(3): 277-289.

Walski, T. (2006). "A history of water distribution." Journal American Water Works Association **98**(3): 110-121.

Wood, D. J. (1980). Computer analysis of flow in pipe networks including extended period simulation-user's manual, Continuing Education and Extension, University of Kentucky, Lexington (KY), USA.

Wu, Z. Y. y A. R. Simpson (2001). "Competent genetic-evolutionary optimization of water distribution systems." Journal of Computing in Civil Engineering **15**(2): 89-101.

Wu, Z. Y. y A. R. Simpson (2002). "A self-adaptive boundary search genetic algorithm and its application to water distribution systems." Journal of hydraulic research **40**(2): 191-203.

Wu, Z. Y. y T. Walski (2005). "Self-Adaptive Penalty Approach Compared with Other Constraint-Handling Techniques for Pipeline Optimization." Journal of Water Resources Planning and Management **131**(3): 181-192.

Xie, X. F., W. J. Zhang y Z. L. Yang (2002a). Adaptive particle swarm optimization on individual level. 6th International Conference on Signal Processing, Beijing, China.

Xie, X. F., W. J. Zhang y Z. L. Yang (2002b). A dissipative particle swarm optimization. Congress on Evolutionary Computation, Honolulu, Hawaii USA.

Xu, C. y I. C. Goulter (1998). "Probabilistic Model for Water Distribution Reliability." Journal of Water Resources Planning and Management **124**(4): 218-228.

Yao, X., Y. Liu y G. Lin (1999). "Evolutionary programming made faster." IEEE Transactions on Evolutionary Computation **3**(2): 82-102.

Yassin-Kassab, A. y A. B. Templeman (1999). "Calculating maximum entropy flows in multi-source, multi-demand networks." Engineering Optimization **31**(6): 695-729.

Yasuda, K., A. Ide y N. Iwasaki (2003). Adaptive particle swarm optimization. Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics.

Yoo, J. y P. Hajela (1999). "Immune network simulations in multicriterion design." Structural and Multidisciplinary Optimization **18**(2-3): 85-94.

Zecchin, A. (2003). Max-min ant system applied to water distribution system optimisation. MODSIM 2003: International congress on modelling and simulation.

Zecchin, A. C., A. R. Simpson, H. R. Maier, M. Leonard, A. J. Roberts y M. J. Berrisford (2006). "Application of two ant colony optimisation algorithms to water distribution system optimisation." Mathematical and Computer Modelling **44**(5-6): 451-468.

Zecchin, A. C., A. R. Simpson, H. R. Maier y J. B. Nixon (2005). "Parametric study for an ant algorithm applied to water distribution system optimization." IEEE Transactions on Evolutionary Computation **9**(2): 175-191.

Zhang, W. J. y X. F. Xie (2003). DEPSO: hybrid particle swarm with differential evolution operator. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics.