



Título del Trabajo Fin de Máster:

**“DESARROLLO DE UN MODELO DE
OPTIMIZACIÓN DE REDES DE
DISTRIBUCIÓN DE AGUA
ATENDIENDO A CRITERIOS
ENERGÉTICOS Y DE CALIDAD”**

Intensificación:

HIDRÁULICA URBANA

Autor:

VIGUERAS SEMPERE, CAROLINA

Director/es:

IGLESIAS REY, PEDRO L.

MARTÍNEZ SOLANO, F. JAVIER

Fecha: **JULIO, 2013**



Título del Trabajo Fin de Máster:

“Desarrollo de un modelo de optimización de redes de distribución de agua atendiendo a criterios energéticos y de calidad”

Autor: **VIGUERAS SEMPERE, CAROLINA**

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	PEDRO L. IGLESIAS REY	Fecha de Lectura	JULIO, 2013
Codirector1	FCO. JAVIER MARTÍNEZ SOLANO		
Codirector2	-		
Tutor	-		

Resumen:

CASTELLANO

“The Battle of the Water Networks II” es la cuarta edición de la serie de resolución de problemas de redes que comenzaron en 1985 con “The Battle of the Water Networks I”, seguida de “The Battle of the Water Sensor Networks” de 2006 y de “The Battle of the Water Calibration Networks” de 2010.

“The Battle of the Water Networks II” busca captar el interés de diversos grupos académicos para analizar y diseñar una determinada red de distribución de agua bajo unos condicionantes de funcionamiento específicos. Concretamente, la red de estudio consiste en una red existente más una nueva ampliación, la cual debe ser gestionada desde el punto de vista óptimo.

Optimizar costes de instalación, operación y mantenimiento de una red de abastecimiento se está convirtiendo en un hecho muy habitual. Todo ello implica encontrar las mejores condiciones de funcionamiento de los elementos de una red para garantizar un servicio adecuado a la población.

Sin embargo, las grandes redes de abastecimiento de las ciudades ya se encuentran previamente definidas, las tuberías tienen unos diámetros y una rugosidad concreta y los depósitos de abastecimiento ya están construidos, por lo que su optimización se convierte en un gran reto.

La optimización posee como principal premisa la reducción de costes. Generalmente, los costes de operación se suelen traducir principalmente en costes energéticos. Y por consiguiente, el ahorro de energía se encontrará supeditado al empleo de las estaciones de bombeo que dependerá del uso que se le dé a las bombas. Incluso las maniobras adjudicadas a las válvulas de la red pueden llegar a suponer un ahorro energético.

Todo ello muestra la gran cantidad de variables que existen en una red de abastecimiento que pueden ser susceptibles de modificar el funcionamiento óptimo de la red. Las combinaciones existentes pueden ser infinitas y es por ello que se hace necesario el uso de metodologías que emplean procedimientos basados en algoritmos de optimización. Incluso en este tipo de problemas se necesita aplicar previamente el conocimiento ingenieril, ya que se busca reducir el problema al máximo y minimizar así los tiempos de computación.

Mediante este Trabajo Fin de Máster, se presenta el estudio de investigación sobre una de las posibles soluciones óptimas a la red presentada por “The Battle of the Water Networks II”, empleando el software desarrollado por el departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia. Asimismo, se explica de forma muy breve el resto de soluciones adoptadas por los demás concursantes para poder comparar metodologías y recursos empleados.

Ante todo y como paso previo se estudiará también el problema y sus fundamentos teóricos, los

cuales ayudarán a una mejor resolución. Y tras una breve introducción a los conceptos básicos de análisis y diseño de redes, se pasará a desarrollar el concepto de algoritmo genético y sus capacidades para resolver este tipo de problemas. Finalmente, se aplicarán estos estudios al problema en cuestión.

A medida que se vaya avanzando en la resolución, irán apareciendo diversas hipótesis que se han de suponer. La metodología empleada posee unos límites que también se han tenido en cuenta en el documento.

Como conclusión, se ha obtenido una red que cumple unos requerimientos específicos tales como: costes, emisiones de gases y calidad del agua. Su optimización ha destapado sin embargo, otros problemas como es la existencia de depósitos que siempre desbordan, tuberías con tiempos de retención demasiado elevados o bombas que no llegan a funcionar. Y no obstante, ese es el óptimo. También indicar que algunas situaciones no se estudian en profundidad, como puede ser la rotura de tuberías, la existencia de fugas o la variación en la demanda.

Este documento ofrece una gran oportunidad para tratar temas de optimización en redes de distribución de agua, uniendo enfoques tradicionales basados en la experiencia y nuevas técnicas de computación. Sin embargo, las redes actuales son mucho más grandes que la aquí representada. Con todo ello, se trata de ofrecer un Trabajo Fin de Máster muy innovador a la vez que técnico y fácil de seguir. Además, los algoritmos genéticos forman parte de una metodología en auge para diseñar y analizar redes de distribución de agua, por lo que siempre es posible mejorar y redefinir las conclusiones a las que aquí se lleguen si el conocimiento y técnica evoluciona favorablemente.

VALENCIANO

"The Battle of the Water Networks II" és la quarta edició de la sèrie de resolució de problemes de xarxes que van començar en 1985 amb "The Battle of the Water Networks I", seguida de "The Battle of the Water Sensor Networks" de 2006 i de "The Battle of the Water Calibration Networks" de 2010.

"The Battle of the Water Networks II" busca captar l'interès de diversos grups acadèmics per analitzar i dissenyar una determinada xarxa de distribució d'aigua sota uns condicionants de funcionament específics. Concretament, la xarxa d'estudi consisteix en una xarxa existent més una nova ampliació, la qual ha de ser gestionada des del punt de vista òptim.

Optimitzar costos d'instal·lació, operació i manteniment d'una xarxa d'abastament s'està convertint en un fet molt habitual. Tot això implica trobar les millors condicions de funcionament dels elements d'una xarxa per garantir un servei adequat a la població.

No obstant això, les grans xarxes d'abastament de les ciutats ja es troben prèviament definides, les canonades tenen uns diàmetres i una rugositat concreta i els dipòsits d'abastament ja estan construïts, pel que la seua optimització es converteix en un gran repte.

L'optimització posseeix com a principal premissa la reducció de costos. Generalment, els costos d'operació se solen traduir principalment en costos energètics. I per tant, l'estalvi d'energia es trobarà supeditat a l'ocupació de les estacions de bombament que dependrà de l'ús que se li doni a les bombes. Fins i tot les maniobres adjudicades a les vàlvules de la xarxa poden arribar a suposar un estalvi energètic.

Tot això mostra la gran quantitat de variables que hi ha en una xarxa d'abastament que poden ser susceptibles de modificar el funcionament òptim de la xarxa. Les combinacions existents poden ser infinites i és per això que es fa necessari l'ús de metodologies que empen procediments basats en algorismes d'optimització. Fins i tot en aquest tipus de problemes es necessita aplicar prèviament el coneixement enginyeril, ja que es busca reduir el problema al màxim i minimitzar així els temps de computació.

Mitjançant aquest Treball Fi de Màster, es presenta l'estudi d'investigació sobre una de les possibles solucions òptimes a la xarxa presentada per "The Battle of the Water Networks II", emprant el programa desenvolupat pel departament d'Enginyeria Hidràulica i Medi Ambient de la Universitat

Politécnica de València. D'aquesta manera, s'explica de forma molt breu la resta de solucions adoptades pels altres concursants per poder comparar metodologies i recursos emprats.

Primer de tot i com a pas previ s'estudiarà també el problema i els seus fonaments teòrics, els quals ajudaran a una millor resolució. I després d'una breu introducció als conceptes bàsics d'anàlisi i disseny de xarxes, es passarà a desenvolupar el concepte d'algorisme genètic i les seves capacitats per resoldre aquest tipus de problemes. Finalment, s'aplicaran aquests estudis al problema en qüestió.

A mesura que es vagi avançant en la resolució, aniran apareixent diverses hipòtesis que s'han de suposar. La metodologia emprada té uns límits que també s'han tingut en compte tal i com es pot comprovar al document.

Com a conclusió, s'ha obtingut una xarxa que compleix uns requeriments específics tals com: costos, emissions de gasos i qualitat de l'aigua. La seva optimització ha destapat però, altres problemes com és l'existència de dipòsits que sempre desborden, canonades amb temps de retenció massa elevats o bombes que no arriben a funcionar. I no obstant això, aquest és l'òptim.

També indicar que algunes situacions no s'estudien en profunditat, com pot ser el trencament de canonades, l'existència de fuites o la variació en la demanda.

Aquest document ofereix una gran oportunitat per a tractar temes d'optimització en xarxes de distribució d'aigua, unint enfocaments tradicionals basats en l'experiència i noves tècniques de computació. No obstant això, les xarxes actuals són molt més grans que la aquí representada.

Amb tot això, es tracta d'oferir un Treball Fi de Màster molt innovador alhora que tècnic i fàcil de seguir. A més, els algorismes genètics formen part d'una metodologia en auge per dissenyar i analitzar xarxes de distribució d'aigua, de manera que sempre és possible millorar i redefinir les conclusions a les que aquí s'arriben si el coneixement i tècnica evoluciona favorablement.

INGLÉS

"The Battle of the Water Networks II" is the fourth edition of the series of network problems resolutions that began in 1985 with "The Battle of the Water Networks I", followed by "The Battle of the Water Sensor Networks", 2006 and "The Battle of the Water Calibration Networks ", 2010.

"The Battle of the Water Networks II" aims to capture the interest of various academic groups to analyze and design a particular water distribution network under some specific operating conditions. Specifically, the study network consists of an existing network plus a new extension, which must be managed from the optimal point.

Optimize costs of installation, operation and maintenance of a water supply network is becoming a very common fact nowadays. This involves finding the best operating conditions for network elements to ensure adequate service to the population.

However, city supply system is already defined, the pipes have specific diameters, roughness is defined and tanks are already built, so that, its optimization becomes a great challenge.

The main point in optimization is the cost reduction. Generally, the operating costs are usually translated by the energy costs. And therefore, energy savings will be contingent upon the use of pumping stations that depend on the use that will be given to the pumps. Even maneuvering valves, energy savings is noticeable.

All those facts show that many variables that exist in a supply network can alter the optimal operation of the network. Existing combinations can be endless and that is why it is necessary to use methodologies that use methods based on optimization algorithms. Even in such problems needs to be applied prior knowledge engineering, as it seeks to reduce the problem and to minimize the maximum computing time.

Through this Master's Thesis is presented the research study of the optimal solutions to the network of "The Battle of the Water Networks II", using software developed by the Department of Hydraulic Engineering and Environment of the Polytechnic University of Valencia. Likewise, very briefly

explains the rest of solutions adopted by the other contestants to compare methodologies and resources that have been used.

First of all and as a preliminary step, this thesis will also consider the problem and its theoretical foundations. And after a brief introduction to the basic concepts of network analysis and design, it will move on to develop the concept of genetic algorithm and its capabilities to solve these problems. Finally, we apply these studies to the actual problem.

As progress is made in the resolution, will appear several hypotheses to be assumed. The methodology has some limits that should be considered and are shown in the document.

As a conclusion, we have obtained a network which complies with specific requirements such as cost, emissions and water quality. His optimization has uncovered however, other problems such as the existence of deposits always overflow, pipes retention times too high or pumps fail to operate. And yet, that is optimal.

Also indicate that some situations are not discussed in depth, such as the broken pipes, leaks or the variation in demand.

This document provides a great opportunity to address issues of optimization in water distribution networks, combining traditional approaches based on experience and new computing techniques. However, today's networks are much larger than depicted here.

With all this, it is offering a Master's Thesis very innovative while technical and easy to follow. Moreover, genetic algorithms are part of a booming methodology to design and analyze water distribution networks, so it is always possible to improve and refine the conclusions we reach here if the technical knowledge and progressing allow it.

Palabras clave:

algoritmos genéticos / optimización / función objetivo / variables de decisión / EPANET

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Objetivos de Trabajo Fin de Máster.....	7
1.2.1 Objetivo general	7
1.2.2 Objetivos específicos	8
1.2.3 Aportaciones.....	8
1.3 Metodología.....	9
2. CONCEPTOS PREVIOS PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA	11
2.1 Análisis de redes	12
2.1.1 Introducción: conceptos y variables utilizados.....	12
2.1.2 Ecuaciones generales.....	13
2.2 Diseño de redes.....	16
2.2.1 Técnicas de diseño funcional.....	17
2.2.2 Técnicas de diseño económico	18
3. OPTIMIZACIÓN DE REDES. ALGORITMOS GENÉTICOS.....	21
3.1 El problema de optimización	21
3.1.1 Clasificación de las técnicas de optimización	22
3.1.2 Métodos heurísticos	23
3.2 Traducción biológica de los algoritmos genéticos.....	25
3.3 Parámetros de los algoritmos genéticos.....	26
3.3.1 Función objetivo o de aptitud	27
3.3.2 Tamaño de la población	28
3.3.3 Probabilidad de cruce.....	28
3.3.4 Probabilidad de mutación	28
3.4 Operaciones de los algoritmos genéticos	29
3.4.1 Codificación de las variables.....	30
3.4.2 Selección.....	32
3.4.3 Reproducción.....	34
3.4.4 Mutación	37

3.4.5	Evaluación.....	38
3.5	Ventajas e inconvenientes de los algoritmos genéticos.....	39
3.6	Algoritmos genéticos enfocados al diseño de redes de abastecimiento de agua.....	40
3.6.1	Algoritmo pseudogenético.....	40
4.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	47
4.1	Descripción del problema.....	47
4.2	Características de la red.....	48
4.3	Criterios de diseño.....	49
4.3.1	Costes.....	49
4.3.2	Edad del agua.....	50
4.3.3	Emisiones de gases invernadero.....	50
4.4	Escenarios de estudio.....	52
4.4.1	Operación normal.....	52
4.4.2	Fallo del sistema.....	52
4.5	Valores de diseño.....	53
4.5.1	Tuberías.....	53
4.5.2	Depósitos.....	55
4.5.3	Bombas.....	55
4.5.4	Generadores diesel.....	56
4.5.5	Válvulas.....	57
4.5.6	Controles de bombas.....	57
4.5.7	Tarifa eléctrica.....	58
5.	ESTADO DEL ARTE EN LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE LA RED DE <i>The Battle of the Water Networks II</i>.....	59
6.	MODELO MATEMÁTICO A EMPLEAR PARA SU RESOLUCIÓN.....	75
6.1	EPANET.....	75
6.2	Holored II.....	80
7.	EVALUACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA MEDIANTE ALGORITMOS PSEUDOGENÉTICOS.....	85
7.1	Función objetivo.....	92
7.1.1	Selección de los multiplicadores de Lagrange.....	94

7.2	Variables de decisión.....	95
7.3	Modelo de optimización.....	96
7.4	Metodología.....	100
7.4.1	Selección las variables de decisión	100
7.4.2	Simplificación de la red.....	110
7.4.3	Punto óptimo de funcionamiento o curva de consigna.....	115
7.4.4	Análisis de la calidad del agua	117
7.5	Optimización pseudogenética	124
7.6	Solución final.....	127
7.6.1	Diámetros de las tuberías.....	127
7.6.2	Controles de operación de la red	128
7.6.3	Generadores diesel.....	129
7.6.4	Costes de bombeo, emisiones de gases y calidad del agua.....	130
7.6.5	Comparación de resultados con el resto de investigaciones.....	131
7.6.6	Posibles mejoras de la solución obtenida.....	132
8.	CONCLUSIONES	137
	APÉNDICE	141
	BIBLIOGRAFÍA	143

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

“The Battle of the Water Networks II” es la cuarta edición de la serie de resolución de problemas de redes que comenzaron en 1985 con *“The Battle of the Water Networks I”*, seguida de *“The Battle of the Water Sensor Networks”* de 2006 y de *“The Battle of the Water Calibration Networks”* de 2010.

“The Battle of the Water Networks II” busca captar el interés de diversos grupos académicos para analizar y diseñar una determinada red de distribución de agua bajo unos condicionantes de funcionamiento específicos. Concretamente, la red de estudio consiste en una red existente más una nueva ampliación, la cual debe ser gestionada desde el punto de vista óptimo.

Optimizar costes de instalación, operación y mantenimiento de una red de abastecimiento se está convirtiendo en un hecho muy habitual. Todo ello implica encontrar las mejores condiciones de funcionamiento de los elementos de una red para garantizar un servicio adecuado a la población.

Sin embargo, las grandes redes de abastecimiento de las ciudades ya se encuentran previamente definidas, las tuberías tienen unos diámetros y una rugosidad concreta y los depósitos de abastecimiento ya están contruidos, por lo que su optimización se convierte en un gran reto.

La optimización posee como principal premisa la reducción de costes. Generalmente, los costes de operación se suelen traducir principalmente en costes energéticos. Y por consiguiente, el ahorro de energía se encontrará supeditado al empleo de las estaciones de bombeo. Incluso las maniobras adjudicadas a las válvulas de la red pueden llegar a suponer un ahorro energético, tal y como se verá en este documento.

Todo ello muestra la gran cantidad de variables que existen en una red de abastecimiento que pueden ser susceptibles de modificar el funcionamiento óptimo de la red. Las combinaciones existentes pueden ser infinitas y es por ello que se hace necesario el uso de metodologías que emplean procedimientos basados en algoritmos de optimización. Incluso en este tipo de problemas se necesita aplicar previamente el conocimiento ingenieril, ya que se busca reducir el problema al máximo y minimizar así los tiempos de computación.

Mediante este Trabajo Fin de Máster, se presenta el estudio de investigación sobre una de las posibles soluciones óptimas a la red presentada por *“The Battle of the Water Networks II”*, empleando el software desarrollado por el departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia. Asimismo, se explica de forma muy breve el resto de soluciones adoptadas por los demás investigadores para poder comparar metodologías y recursos empleados.

Ante todo y como paso previo se estudiará también el problema y sus fundamentos teóricos, los cuales ayudarán a una mejor resolución. Y tras una breve introducción a los conceptos básicos de análisis y diseño de redes, se pasará a desarrollar el concepto de algoritmo genético y sus capacidades para resolver este tipo de problemas. Finalmente, se aplicarán estos estudios al problema en cuestión. A medida que se vaya avanzando en la resolución, irán apareciendo diversas hipótesis que se han de suponer. La metodología empleada posee unos límites que también se han tenido en cuenta como se comprobará más adelante.

Con todo ello, se trata de ofrecer un Trabajo Fin de Máster muy innovador a la vez que técnico y fácil de seguir. Además, los algoritmos genéticos forman parte de una metodología en auge para diseñar y analizar redes de distribución de agua, por lo que siempre es posible mejorar y redefinir las conclusiones a las que aquí se lleguen si el conocimiento y técnica evoluciona favorablemente.

1.2 Objetivos de Trabajo Fin de Máster

1.2.1 Objetivo general

El objetivo del trabajo se centra en desarrollar un modelo para la optimización de las redes de distribución de agua donde se ponga la atención no únicamente en el aspecto energético sino también en los aspectos medioambientales y sanitarios del problema.

Para ello se ha tomado como base la red denominada D-Town. Se trata de un problema de optimización tipo benchmarking propuesto con ocasión de la XIV Water Distribution System Analysis, denominada "*The Battle of the Water Networks II*". Dicha red requiere de una optimización que incluye diversos aspectos: mejora de la operación de los grupos de bombeo, actualización, sustitución y ampliación de los grupos existentes, necesidad de instalación y reposición de tuberías tanto nuevas como existentes, necesidad de instalación de válvulas nuevas, determinación de la posibilidad de ampliación de los depósitos de abastecimiento, etc. Todos estos aspectos deben realizarse desde tres puntos de vista: minimizar los costes totales de inversión económica; maximizar la calidad del agua en base a reducir el tiempo de permanencia del agua en la red; minimizar las tasas de emisión de CO₂ relacionadas con la ampliación y operación del sistema. El trabajo previsto debe cumplir las mismas especificaciones que las propuestas para dicho problema.

Por tanto, el objetivo principal sería:

- Minimizar el coste de operación de la red de abastecimiento con la mejor calidad del agua posible. La solución adoptada debe cumplir todos los condicionantes definidos por los organizadores de "*The Battle of the Water*

Networks II", entre los que destacan: cumplir presiones mínimas en los nudos de consumo y mantener unos niveles en los depósitos, entre otros.

1.2.2 Objetivos específicos

El objetivo general del Trabajo Fin de Máster (TFM) se obtiene a partir de la consecución de los siguientes objetivos específicos:

- Comprender y conocer las técnicas de optimización de redes de abastecimiento disponibles, en concreto modelos de optimización metaheurísticos.
- Manejar la herramienta de trabajo específica basada en algoritmos pseudogenéticos y desarrollada por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- Determinar las operaciones de bombeo que minimizan los costes para cada escenario, intentando además minimizar el coste computacional.
- Comparar la solución adoptada con otras soluciones ofrecidas para la resolución del problema, así como la metodología y los recursos empleados por cada uno de ellos.

1.2.3 Aportaciones

Al finalizar el presente trabajo se prevé haber realizado las siguientes aportaciones:

- Desarrollo de un modelo optimización que integre los costes energéticos, la calidad del agua y las tasas de emisión de CO₂ a la atmósfera.
- Validar el modelo de optimización desarrollado sobre la red D-Town.
- Validar los resultados obtenidos con los obtenidos por los diferentes participantes de la BWN- II.
- Validar la eficacia del concepto de curva de consigna en la simplificación de redes de distribución de agua para su posterior optimización.

1.3 Metodología

El presente Trabajo de Fin de Máster posee dos partes. Una más teórica y otra más práctica. La parte teórica se centra en primer lugar, en el estudio de redes de abastecimiento desde el punto de vista del diseño y del análisis, para seguidamente llegar a la conclusión de que para conseguir una gestión óptima es necesario ayudarse de modelos informáticos basados en algoritmos genéticos. Existe un apartado en el cual se comenta cada una de las características que poseen dichos algoritmos, así como su funcionamiento y solución ofrecida.

En segundo lugar, la parte teórica dispone también de un análisis bibliográfico de los diversos métodos empleados por otros investigadores, mostrando así un gran abanico de posibilidades a la hora de resolver problemas de este tipo.

En cuanto a la parte práctica, se centra en resolver el caso concreto definido por "*The Battle of the Water Networks II*". Su resolución se ha basado en la experiencia y en el conocimiento adquirido durante el transcurso del máster. Se ha de comentar que existen infinitas formas de resolver el problema, y en función del camino seguido la solución obtenida será una u otra y seguramente con significativas diferencias entre ellas.

Además, en la parte práctica se incluye el razonamiento seguido para la simplificación de variables, que como se verá más adelante, juega un papel fundamental en la resolución del problema.

Tras la simplificación de variables se ha aplicado el software basado en algoritmos genéticos para obtener el diseño óptimo. Dicho diseño depende de diversos parámetros como son la calidad del agua, las emisiones de gases invernadero y los costes de mantenimiento, operación y construcción. Se buscará el óptimo para cada parámetro por separado para finalmente obtener el óptimo global de toda la red con la menor penalización posible.

2. CONCEPTOS PREVIOS PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

En el mundo de la hidráulica cabe diferenciar entre el análisis de redes y el diseño de redes de distribución de agua. El análisis de redes se centra en estudiar el estado hidráulico de la red, el cual viene definido por unos condicionantes previos. Se trata de obtener, por tanto, las alturas piezométricas en los nudos y los caudales circulantes por las líneas. Por otro lado, el diseño de redes establece como datos iniciales los caudales y las presiones. De este modo lo que se obtiene es una configuración geométrica necesaria para mantener esas condiciones.

Los modelos empleados tanto para el diseño como para el análisis de redes son muy variados en función del objetivo que se quiera cumplir. En este documento, se comenzará con un análisis previo seguido del diseño óptimo de la red para cumplir una serie de requisitos.

2.1 Análisis de redes

2.1.1 Introducción: conceptos y variables utilizados

Una red viene compuesta por nudos y líneas. Una línea es un segmento de la red que transporta un caudal uniforme y no tiene ramificaciones. Y un nudo corresponde al punto donde se reúnen dos o más líneas, o bien al extremo final de una línea.

Si se atiende a las características topológicas de una red, éstas se pueden clasificar en redes malladas y redes ramificadas. Las redes ramificadas tienen forma arborescente y no poseen mallas. Dos nudos cualesquiera solo pueden ser conectados mediante un único trayecto. Por otro lado, las redes malladas, como su nombre indica, se caracterizan por la existencia de mallas. En una red mallada pura puede definirse un conjunto de mallas básicas que incluyan a todas y cada una de las líneas de la red y en consecuencia cualquier par de nudos de la red mallada puede ser unido por al menos dos trayectos diferentes.

La configuración mallada pura no suele ser habitual, siendo la morfología más común la que se denomina red mixta, que combina subsistemas de topologías mallada pura y ramificada.

Cada una de las configuraciones tiene sus propias ventajas e inconvenientes a la hora del análisis y diseño. En las redes ramificadas los caudales son fácilmente calculables y su dimensionado más sencillo. Las soluciones obtenidas en el diseño suelen ser más económicas y con una regulación más simple. Sin embargo, no poseen una fiabilidad elevada, ya que cada nudo está unido al anterior por un único camino. En las redes malladas los caudales dependen de las características hidráulicas, por lo que son más complicados de obtener. Su dimensionado y regulación son más complejos pero poseen mayor seguridad frente a averías.

2.1.2 Ecuaciones generales

Para analizar redes de abastecimiento se emplea el régimen permanente, puesto que se trata de analizar un sistema que funcione incluso en las condiciones más críticas de servicio. Realmente, las soluciones ofrecidas tras un análisis en régimen permanente son puramente teóricas. Aun así cubren la realidad pues variaciones pequeñas de caudal y presiones se consideran despreciables por el pequeño error existente entre lo teórico y lo real.

El problema de análisis en régimen permanente se resume en la determinación de caudales que circulan por las líneas así como de las alturas piezométricas en los nudos del sistema. Para determinar las incógnitas se hace unos de dos leyes generales, que se cumplen independientemente de la configuración y los elementos de que consta la red. Forman parte de una particularización de las ecuaciones generales de conservación de la masa y la energía, aplicadas al flujo de un fluido incompresible a través de un sistema de tuberías a presión. Tales leyes se conocen como leyes de Kirchoff.

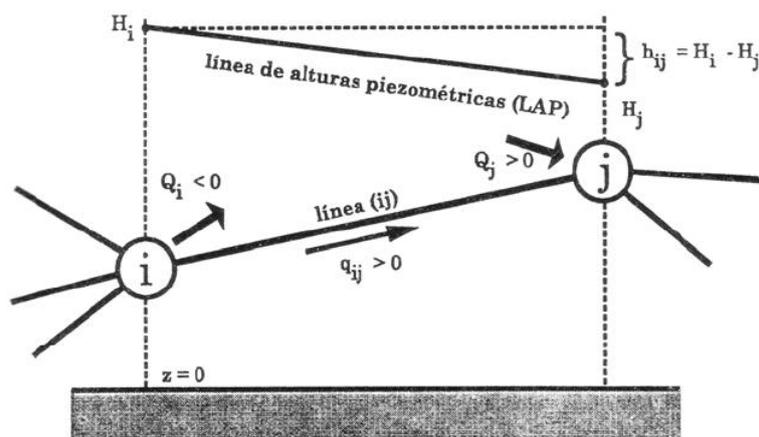


Figura 1. Esquema general de una línea (Fuente: "Dimensionado óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando los elementos de regulación". Tesis doctoral Rafael Pérez García. UPV, 1993)

La primera ley de Kirchoff establece que la suma neta de todos los caudales que confluyen en un nudo debe ser nula. Un caudal interno es negativo cuando entra en un nudo, y positivo cuando sale, mientras que adoptaremos un criterio contrario para los caudales exteriores. Así, la ecuación de continuidad queda expresada en la forma

$$\sum_{j \in A_i} q_{i,j} - Q_i = 0 \quad i=1, \dots, N \quad (2.1)$$

donde el subíndice j hace referencia a todos los nudos conectados directamente al i (conjunto A_i) y siendo N el número total de nudos de la red, y siendo $q_{i,j}$ el caudal que circula entre los nudos i y j, considerándolo positivo cuando circula del nudo i al j; Q_i el caudal inyectado en el nudo i. Será positivo si es entrante (aporte) y negativo cuando es saliente (consumo).

La segunda ley de Kirchoff establece que la suma algebraica de las pérdidas de carga debe ser nula a lo largo de cualquier malla. Nuevamente es necesario establecer un criterio de signos y para ello se dota a la malla de un sentido; y según este sentido, la pérdida de carga se considera positiva cuando el caudal recorre el circuito en mismo sentido de la malla, y negativo en caso contrario.

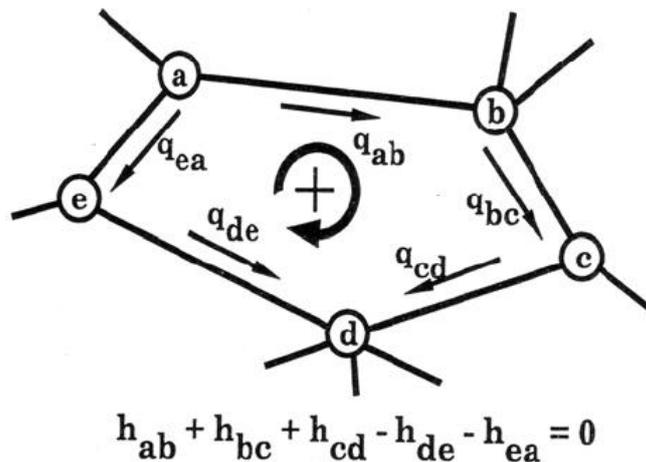


Figura 2. Configuración de una malla. (Fuente: "Dimensionado óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando los elementos de regulación". Tesis doctoral Rafael Pérez García. UPV, 1993)

Con esta definición de signos, la segunda ley de Kirchoff será

$$\sum_{(i,j) \in M_k} (\pm)_{i,j}^k h_{i,j} = 0 \quad k = 1 \dots M \quad (2.2)$$

donde M_k representa el conjunto de líneas de la malla k y el término $(\pm)_{i,j}^k$ toma un valor (+1) si el sentido hipotético del caudal q_{ij} es el mismo que el de la malla, y (-1) si toma sentido contrario. Además $h_{i,j}$ será la pérdida de carga en la línea ij .

La primera ley proporciona tantas ecuaciones como número de nudos N , pero una de ellas es ligada ya que debe cumplir el equilibrio de los consumos exteriores, quedando por tanto $N-1$ ecuaciones que sí son linealmente independientes. Por otro lado, la segunda ley da tantas ecuaciones como mallas independientes M .

En una red mallada es posible encontrar un subconjunto de líneas que unen entre sí a todos los nudos de la red, de forma que constituyan una red ramificada. Dicha red, en teoría de grafos, se conoce como árbol de la red y poseerá $N-1$ líneas, tantas líneas como nudos menos uno.

El subconjunto de líneas que resta para completar la red mallada original se conoce como coárbol y estará constituido por el resto de líneas, esto es $L-(N-1) = L-N+1$, siendo L el número total de líneas de la red.

Al concluir el análisis de todas las líneas del coárbol en el árbol y para reconstruir la red mallada original, se habrá obtenido tantas mallas básicas como líneas posee el coárbol, esto es $M=L-N+1$, ecuación válida para cualquier tipo de red, sea cual sea su disposición.

El software empleado para el análisis previo del caso que compete a este documento se basa en estas leyes. Además se va a trabajar con una red mallada, por lo que no se pueden desligar las ecuaciones de continuidad en los nudos y las ecuaciones características de las líneas. Se tendrá un sistema de ecuaciones no lineales que debe resolverse por métodos numéricos, y para el software empleado, con una formulación por nudos o método del gradiente.

La formulación por nudos está basada en el sistema de $N-1$ ecuaciones de continuidad del sistema. Como se ha comentado anteriormente, el sistema de ecuaciones de continuidad es insuficiente para resolver las incógnitas de los caudales de línea q_{ij} , sin

embargo, reformulando dichas ecuaciones en términos de alturas piezométricas en los nudos H_i se consigue un sistema de $N-1$ ecuaciones independientes con $N-1$ incógnitas, aunque en este caso las ecuaciones no son lineales.

La ventaja que posee dicha formulación es que solo es necesario conocer las líneas conectadas a cada nudo sin necesidad de definir las mallas, lo que simplifica el planteamiento del sistema de ecuaciones.

La transformación de las ecuaciones de continuidad en términos de altura H_i se consigue expresando los caudales de línea q_{ij} en función de las alturas H_i a través de las ecuaciones de comportamiento de las líneas, tal y como sigue

$$\sum_{j \in A_i} q_{i,j}(H_i - H_j) = Q_i \quad i = 1, \dots, N \quad (2.3)$$

donde A_i representaba el conjunto de nudos j conectados directamente al nudo i y H_i la altura piezométrica en el nudo i .

2.2 Diseño de redes

El diseño de redes se basa en determinar las dimensiones de los elementos de la red necesarios para conseguir unos caudales de diseño y unas presiones de servicio.

Se suele utilizar el régimen permanente para satisfacer las condiciones de servicio en la situación más desfavorable desde el punto de vista del caudal (máxima demanda) o de la presión (mínima presión de servicio).

El diseño de cualquier red implica su completa definición en cuanto a elementos constituyentes, disposición y dimensiones de los mismos. Se pueden distinguir dos fases: la distribución en planta (o layout), y el dimensionado de los elementos. En la primera fase se define el trazado y la ubicación e interconexión entre elementos, mientras que en la segunda fase se establecerán las dimensiones de cada elemento.

Existe por tanto una serie de datos previos que se deben conocer: necesidades de caudal, necesidades de presión, posibles trazados, topografía del terreno, materiales, diámetros de las conducciones, velocidades de circulación, etc.

Por otro lado, de todo lo comentado en el punto 2.1.2 se deduce que la segunda ley de Kirchoff ofrece una ecuación más por cada línea, existiendo 4 incógnitas y solo 3 ecuaciones para resolverlas. La cuarta ecuación necesaria se basa en estimaciones previas de los caudales, limitaciones de velocidad o diámetros candidatos bajo una sobrada experiencia.

Las N ecuaciones de la primera ley se pueden intercambiar por cualquier otro criterio (probabilidad o simultaneidad) que ayuden al cálculo de los caudales de diseño.

Es por ello que a la hora de diseñar redes aparecen diversos métodos. Existen técnicas de diseño funcional, y por otro lado, técnicas de diseño económico.

2.2.1 Técnicas de diseño funcional

El diseño funcional de una red de distribución de agua puede realizarse mediante dos criterios:

- Criterios de velocidad

Consisten en aplicar a cada tubería el diámetro correspondiente para que no supere un valor máximo (criterio de velocidad máxima) o bien para conseguir que la velocidad resulte en torno a un valor recomendado (criterio de velocidad recomendable).

La fórmula de Mougny es un buen ejemplo de dicho criterio ya que expresa la velocidad máxima de diseño en función del diámetro tal y como se muestra en la ecuación siguiente:

$$v_{\max} \text{ (m/s)} = 1'5 \sqrt{D \text{ (m)} + 0'05} \quad (2.4)$$

- Criterios de pendiente hidráulica uniforme

El objetivo es seleccionar el diámetro de un conjunto de tuberías intentando mantener la misma pendiente hidráulica en todas ellas.

El problema estriba en seleccionar el conjunto de tuberías a dimensionar, así como el valor de la pendiente hidráulica de referencia. En una red ramificada,

el dimensionado se efectúa siguiendo una secuencia de trayectos de tubería comenzando por aquel trayecto que une la cabecera de la red con el nudo de consumo que resulta más exigente en cuanto a la presión mínima de servicio, nudo que se denomina nudo crítico, y en consecuencia, el trayecto definido será el trayecto crítico. A continuación se calcula el diámetro teórico de las líneas para la pendiente de referencia mediante la fórmula de Darcy y se normalizan los diámetros. Se pasa a calcular las pérdidas de carga en el trayecto crítico, así como las alturas piezométricas y las presiones según el diámetro definido. En el caso de que las presiones no alcancen el valor mínimo, se debería corregir los diámetros del trayecto. Finalmente, se debe pasar a identificar el siguiente nudo crítico para completar el dimensionado de la red. En los supuestos de tratarse de una red alimentada por bombeo se debería trabajar con una pendiente hidráulica de referencia j^* , siendo el nudo crítico aquel que necesite una mayor altura de bombeo para la j^* establecida.

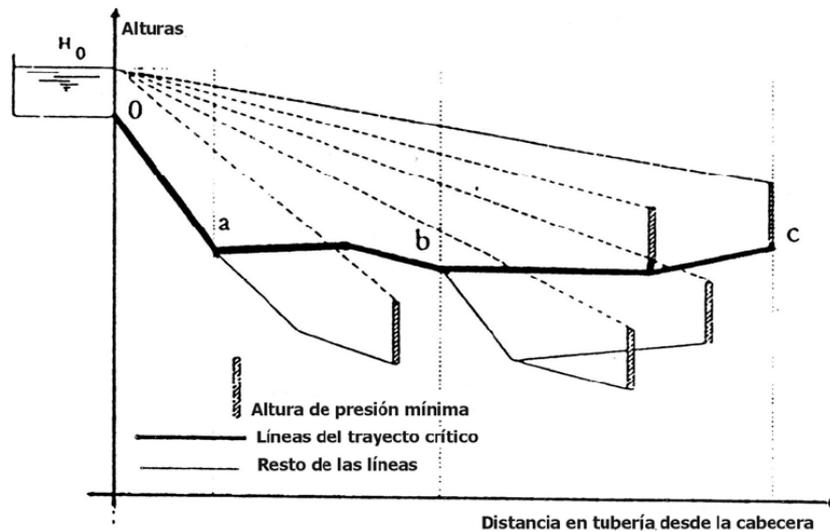


Figura 3. Selección del nudo crítico y del trayecto crítico. (Fuente: "Dimensionado óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando los elementos de regulación". Tesis doctoral Rafael Pérez García. UPV, 1993)

2.2.2 Técnicas de diseño económico

Estas técnicas predominan en los casos en los que la red de estudio posee sistemas de impulsión, hecho que se da continuamente en los sistemas de abastecimiento.

La solución del problema consistirá en encontrar el diámetro que supone un compromiso principalmente entre ahorro en la tubería y ahorro energético para que el coste total anual sea mínimo.

La estación elevadora deberá aportar energía suficiente para vencer el desnivel geométrico Δz existente y además contrarrestar las pérdidas de carga que se producen en la impulsión al trasegar un caudal Q .

El coste anual mínimo buscado será la suma de los costes de la energía eléctrica consumida por la bomba en su operación C_E y por otro lado, la amortización anual del coste de la tubería.

$$C_E (\text{€} / \text{año}) = \frac{9'81 Q_b H_b}{\eta} \cdot nh \cdot pkw \quad (2.5)$$

donde Q_b es el caudal bombeado de diseño, η es el rendimiento total de la bomba, nh es el número de horas de bombeo anuales, pkw el precio del kilowatio hora y H_b la altura de bombeo.

La altura de bombeo H_b debe ser igual a la suma del desnivel geométrico mas las pérdidas de carga h_f en la tubería de impulsión.

$$H_b = \Delta z + h_f \quad (2.6)$$

A mayor diámetro de la tubería, resultará más cara pero se reducen las pérdidas de carga y consecuentemente será posible disminuir la altura de bombeo, con el consiguiente ahorro energético, tal y como se observa en la figura siguiente.

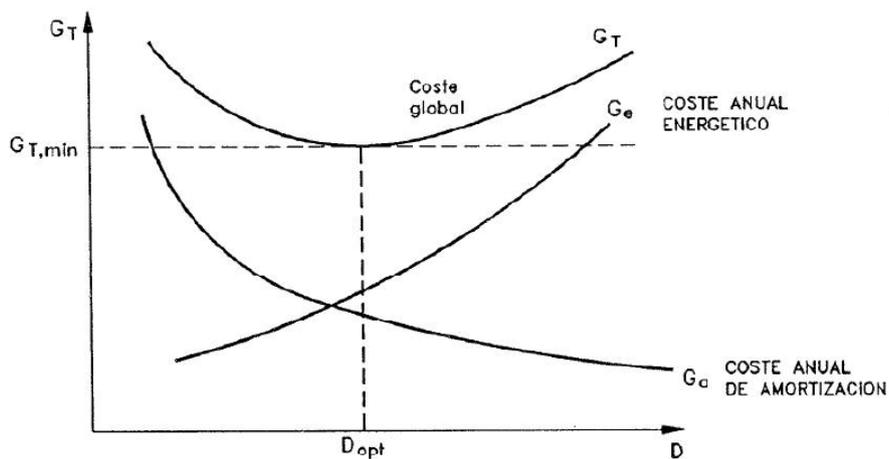


Figura 4. Costes de amortización, energéticos y totales. (Fuente: "Dimensionado óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando los elementos de regulación". Tesis doctoral Rafael Pérez García. UPV, 1993)

De dicha gráfica además se extrae la existencia de un diámetro óptimo el cual es el que menos costes totales genera.

Se debe tener en cuenta que en la realidad los diámetros poseen valores discretos, y no continuos como se deduce de la gráfica, por lo que puede llegar a darse el caso que dos diámetros comerciales dieran lugar al mismo coste total. Si se diera tal caso, sería aconsejable disponer el mayor de los dos diámetros, previendo futuros incrementos del caudal bombeado o una disminución del rendimiento de la bomba.

Uno de los métodos más empleados en técnicas de diseño económico es el de la serie económica. Se basa en definir un diámetro para cada una de las tuberías de la serie para el que la solución óptima ofrece un valor constante en el cociente entre el coste de una línea y su pérdida de carga, y coincide con el cociente entre el coste total de la serie de tuberías y la pérdida de carga total.

Estos métodos tienen una gran variedad en cuanto a las consideraciones a tener en cuenta: tuberías en serie, redes ramificadas, redes malladas, con estaciones de bombeo o sin ellas, formulaciones en diámetros continuos o discretos, etc. Todas estas apreciaciones poseen una formulación muy variada que queda fuera de este documento. Si se desea profundizar se recomienda seguir la bibliografía en toda su amplitud.

3. OPTIMIZACIÓN DE REDES. ALGORITMOS GENÉTICOS

3.1 El problema de optimización

Una vez definido tanto el análisis básico como el diseño básico de redes, la optimización se abriría paso en el procedimiento.

Optimizar implica encontrar la mejor solución del problema, en términos de calidad, coste, fiabilidad o cualquier otro criterio de utilidad. La solución será un extremo, máximo o mínimo, de una función de n variables de decisión, $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ denominada función objetivo.

Las variables de decisión suelen estar unidas entre sí por unas leyes de comportamiento que restringen el problema. Además se requiere el establecimiento de condiciones adicionales que describan los límites de funcionamiento adecuado. El conjunto de leyes de comportamiento y de condiciones de funcionamiento reciben el nombre de restricciones.

La unión de las restricciones con la función objetivo forma el modelo matemático que se va a optimizar. El modelo siempre será una representación de la realidad, por lo que es necesario que exista un compromiso entre el nivel de detalle del modelo, las técnicas numéricas existentes para su resolución, la disponibilidad y manejabilidad de los datos y las conclusiones que se desean obtener.

3.1.1 Clasificación de las técnicas de optimización

De forma genérica, los problemas de optimización y las técnicas existentes para resolverlos, se clasifican de la siguiente manera:

- 1) Técnicas del Cálculo Diferencial Clásico. Posibles de emplear si no existen restricciones ya que el óptimo se puede obtener por cálculo diferencial. Si existieran restricciones, el problema puede transformarse en uno equivalente sin restricciones mediante los multiplicadores de Lagrange.
- 2) Optimización lineal o Programación lineal (PL). Su finalidad es encontrar el mínimo o máximo de una función objetivo lineal, sujeto a unas restricciones lineales. El algoritmo más conocido para resolver estos problemas es el SIMPLEX.
- 3) Optimización No Lineal Convexa. Tal como su nombre indica, contiene al menos una función no lineal. Además si tiene algún óptimo, será el óptimo global debido a las propiedades de convexidad. Según el tipo de problema, pueden resolverse por:
 - a) Linealización, es decir, transformando el problema original en uno lineal. La solución será aproximada pero suficientemente real.
 - b) Programación cuadrática, que trata de resolver funciones objetivo cuadráticas y restricciones lineales. Uno de los procedimientos de resolución es la transformación a un problema lineal equivalente.

- c) Método del gradiente. Es un proceso iterativo en el que la solución es mejorada en la dirección del gradiente de la función objetivo hasta llegar al óptimo.
- 4) Optimización No Convexa. Este tipo de problemas tiene la característica de que puede contener óptimos locales, por lo que puede alejarse del óptimo global. Los procedimientos aplicables son:
- a) Enumeración explícita. Evalúa y compara todas las soluciones posibles. Estas deben ser finitas para que el procedimiento pueda llevarse a cabo. Los arboles de decisión suelen conformar una buena herramienta.
 - b) Enumeración implícita o parcial. Se trabaja únicamente con una fracción de todas las soluciones y se busca el óptimo de dicha parte.
 - c) Métodos Heurísticos. Estos métodos no garantizan la solución óptima pero sí mejoran la solución inicial mediante aproximaciones racionales.
- 5) Problemas especiales. Son técnicas específicas para diversos problemas con estructuras especiales. Un ejemplo es la Programación Dinámica, la cual resuelve el problema descomponiéndolo en pequeños problemas que suelen ser etapas de un determinado proceso.

En este documento nos centraremos en las técnicas heurísticas, que aun mejorando el desempeño en promedio, no mejora el desempeño en el peor de los casos.

3.1.2 Métodos heurísticos

Tal y como se ha comentado anteriormente, los métodos heurísticos buscan una solución adecuada a un determinado problema sin concretar si la solución es la óptima. Si no fuera la óptima tampoco indica cuán lejos se está de dicha solución. También, los métodos heurísticos no necesitan una gran capacidad computacional y las soluciones ofrecidas se encuentran más allá de los mínimos locales. Estas

características en problemas con gran número de variables son idóneas para poder llegar a un óptimo o casi al óptimo.

Dentro de las técnicas heurísticas, los procedimientos que más utilidad tienen son los que se basan en algoritmos evolutivos. Éstos tienen la capacidad de evitar máximos y mínimos locales ya que emplean poblaciones potenciales y no un único individuo. Asimismo trabajan con operadores probabilísticos, que no quiere decir que trabajen con valores aleatorios. Y además no necesitan conocer con profundidad el problema a resolver.

Los algoritmos evolutivos se centran en la teoría Neo-Darwiniana de la evolución natural. Sus principios son, entre otros, la existencia de una estructura de datos para almacenar al “individuo”, la existencia de operaciones que afectan a los “individuos”, la presencia de una función de aptitud que indica lo buena o mala que es la solución respecto a las demás, y un criterio de supervivencia que permite que solo los más aptos puedan reproducirse.

Empleando dichos principios existen una serie de técnicas que pueden ser aplicadas a una gran variedad de campos. Las más conocidas, en términos anglosajones, son las siguientes:

- *Hill Climbing*
- *Simulated Annealing*
- *Quantum Annealing*
- *Genetic Algorithms*
- *Particle Swarm Optimization*
- *Ant Colony*
- *Estrategic Evolution*
- *Differential Evolution*
- *Harmony Search*
- *Shuffled Frog Leaping Algorithm*

Cada una de estas técnicas se aplica de una determinada manera y dentro de un contexto específico. Este documento, sin embargo, se va a centrar únicamente en una de ellas, Genetic Algorithms o Algoritmos Genéticos.

Los algoritmos genéticos nacieron de la mano de John Holland en 1962 cuando trataba de imitar los procesos adaptativos de los sistemas naturales. Diseñó sistemas artificiales o programas que retenían los mecanismos más importantes de los sistemas naturales. Es decir, imitaban la teoría de la evolución de Darwin, partiendo de una población inicial donde se seleccionaban los individuos más capacitados para luego reproducirlos, mutarlos y obtener así una nueva generación más adaptada.

3.2 Traducción biológica de los algoritmos genéticos

Todos los organismos existentes están compuestos por una o más células. Cada una de las células contiene a su vez uno o más cromosomas que forman cadenas de ADN, que tienen la propiedad de transmitirse a la descendencia.

Un cromosoma se puede dividir en genes, que son bloques funcionales de ADN. Estos genes, de forma muy superficial, son los encargados de determinar los rasgos de un individuo, tales como el color de ojos o del pelo. Las diferentes posibilidades de escoger un rasgo (ojos azules, marrones o verdes, por ejemplo) reciben el nombre de alelos.

Cada gen está localizado en un determinado lugar o posición dentro del cromosoma donde está integrado.

Como se ha comentado, los organismos pueden tener varios cromosomas en cada célula. El genoma del organismo, es la colección completa del material genético. Y el genotipo es el conjunto de genes contenidos en un genoma. El genotipo dará lugar, tras el desarrollo fetal, al fenotipo del organismo, es decir, contendrá las características tanto físicas como mentales.

La mayoría de especies reproductoras sexualmente que habitan el planeta, almacenan sus cromosomas por parejas. Este hecho se conoce como diploide. En el caso del ser

humano, cada célula somática (no germen) contiene 23 pares de cromosomas. Durante la reproducción sexual se produce un cruce entre los pares de cromosomas del padre y de la madre para formar un gameto, que es un cromosoma único. Entonces, los gametos de la madre y del padre se emparejan para constituir un conjunto completo de cromosomas diploides.

La descendencia está sujeta a mutaciones, producidas por un cambio en los nucleótidos del ADN. Los nucleótidos podrían ser los bits elementales del ADN.

Todo esto puede trasladarse a la “vida artificial” que genera los algoritmos genéticos teniendo en cuenta que:

- El término cromosoma se refiere a un candidato a solución del problema, que a menudo se codifica como una cadena de bits.
- Los genes son tanto un bit como bloques cortos de bits adyacentes que codifican un elemento particular del candidato a ser solución.
- Un alelo en una cadena de bits será un 0 o un 1.
- El cruce consiste, normalmente, en un intercambio de material genético entre dos cromosomas de dos padres.
- La mutación es una permutación en un bit en un lugar aleatorio.

3.3 Parámetros de los algoritmos genéticos

En la naturaleza, el proceso se realiza por sí sólo, pero a la hora de inicial un programa que posea este procedimiento debe tenerse en cuenta que la población inicial de la que parte sea lo suficientemente grande para garantizar la diversidad. Esto se garantiza si la población se genera de forma aleatoria.

Los pasos básicos de un algoritmo genético son:

- Evaluar la puntuación de cada uno de los cromosomas generados.
- Permitir la reproducción de aquellos cromosomas más aptos.
- Mutar un gen del nuevo individuo generado según una determinada probabilidad.

- Crear una nueva población con la que volver a inicial el algoritmo.

El proceso se repite hasta llegar a un máximo de iteraciones previamente prefijadas o bien hasta que el algoritmo genético no produzca más cambios en la población.

Existen gran variedad de tipos de algoritmos genéticos, sin embargo en este documento se va a trabajar con el algoritmo pseudogenético, el cual se describirá de forma más concreta en apartados sucesivos. Para tratarlo en profundidad se puede consultar el documento "*Optimización energética de las redes de abastecimiento de la ciudad de Murcia. XI Seminario Iberoamericano de Abastecimiento Agua y Drenaje (SEREA 2012)*" redactado por *Iglesias-Rey, P.L., Oyarzún Constabel, S. y Martínez Solano, .J.*

3.3.1 Función objetivo o de aptitud

Dos aspectos que resultan cruciales en el comportamiento de los algoritmos genéticos son la determinación de una adecuada función de adaptación o función objetivo, así como la codificación utilizada.

Idealmente interesaría construir funciones objetivo con ciertas regularidades, es decir funciones objetivo que verifiquen que para dos individuos que se encuentren cercanos en el espacio de búsqueda, sus respectivos valores en las funciones objetivo sean similares. Por tanto, la regla general para construir una buena función objetivo es que ésta debe reflejar el valor del individuo de una manera real.

Para este planteamiento en el que los individuos están sometidos a restricciones, se han propuesto varias soluciones. La primera se denomina absolutista. En ella, aquellos individuos que no verifican las restricciones, no son considerados como tales, y se siguen efectuando cruces y mutaciones hasta obtener individuos válidos. También se puede asignar funciones objetivo nulas.

Otra posibilidad consiste en reconstruir aquellos individuos que no verifican las restricciones. Dicha reconstrucción suele llevarse a cabo por medio de un nuevo operador que se acostumbra a denominar reparador.

El enfoque más común y el empleado en este trabajo es aquel basado en la penalización de la función objetivo. La idea general consiste en dividir la función objetivo del individuo por una cantidad (la penalización) que guarda relación con las restricciones que dicho individuo viola. Dicha cantidad puede simplemente tener en cuenta el número de restricciones violadas o bien el denominado costo esperado de reconstrucción.

3.3.2 Tamaño de la población

Este parámetro indica el número de cromosomas existentes en la población para cada generación. Si es un valor muy pequeño, el algoritmo genético tiene pocas posibilidades de realizar reproducciones con lo que la búsqueda de soluciones será escasa y poco óptima. Por otro lado, si el valor del tamaño de la población es muy elevado, el algoritmo será muy lento.

Se ha de encontrar un valor por debajo de un límite a partir del cual es ineficiente elevar el tamaño de la población.

3.3.3 Probabilidad de cruce

Indica la frecuencia con la que se producen cruces entre los cromosomas padre. Si no existe probabilidad de reproducción, los hijos serán copias exactas de los padres. En caso contrario, los hijos tendrán solo parte de los cromosomas de los padres, situación deseable. Si la probabilidad de cruce se lleva al extremo, es decir, si es del 100%, el hijo se crea totalmente por cruce y no por partes.

3.3.4 Probabilidad de mutación

Indica la frecuencia con la que los genes de un cromosoma son mutados. Si no hay mutación, los descendientes serán iguales a los que había tras la reproducción. En caso

de que haya mutaciones, parte del cromosoma descendiente es modificado y si la probabilidad de mutación es del 100%, la totalidad del cromosoma se cambia. En este último caso, hay que indicar que se produce una inversión en el cromosoma y no una mutación ya que no se cambian solo unos bits del cromosoma, sino que cambian todos. Esto produce una degeneración muy rápida de la población.

3.4 Operaciones de los algoritmos genéticos

Un algoritmo genético es independiente del problema, lo cual lo hace un algoritmo robusto al resultar útil en cualquier ámbito. Sin embargo, a su vez es débil, pues no se especializa en ninguno. Un modelo de programación del algoritmo genético simple sería el mostrado a continuación.

```

BEGIN /* Algoritmo Genetico Simple */
  Generar una poblacion inicial.
  Computar la funcion de evaluacion de cada individuo.
  WHILE NOT Terminado DO
    BEGIN /* Producir nueva generacion */
      FOR Tamaño poblacion/2 DO
        BEGIN /*Ciclo Reproductivo */
          Seleccionar dos individuos de la anterior generacion,
          para el cruce (probabilidad de seleccion proporcional
          a la funcion de evaluacion del individuo).
          Cruzar con cierta probabilidad los dos
          individuos obteniendo dos descendientes.
          Mutar los dos descendientes con cierta probabilidad.
          Computar la funcion de evaluacion de los dos
          descendientes mutados.
          Insertar los dos descendientes mutados en la nueva generacion.
        END
      IF la poblacion ha convergido THEN
        Terminado := TRUE
      END
    END
  END
END

```

Figura 5. Pseudocódigo del Algoritmo Genético Simple. (Fuente: "Algoritmos genéticos" Departamento de métodos matemáticos en ciencias de la computación Universidad del País Vasco. <http://www.sc.ehu.es/ccwbayes/docencia/mmcc/docs/temageneticos.pdf>)

Existen tantas programaciones de algoritmos genéticos como mejoras que introducen los investigadores, ya que el mundo de la programación ofrece infinitas soluciones. El pseudocódigo indicado únicamente muestra el esquema general de un algoritmo genético.

Por lo tanto, un algoritmo genético consiste en hallar de qué parámetros depende el problema, codificarlos en un cromosoma, y aplicar los métodos de la evolución: selección y reproducción con intercambio de información y mutaciones que generen diversidad.

3.4.1 Codificación de las variables

La codificación puede realizarse de varias maneras. La más utilizada es mediante una cadena de números binarios, pero también se puede realizar mediante números enteros o incluso cadenas de palabras.

El escoger una codificación u otra depende del tipo de problema a resolver. Se ha de estudiar la codificación más óptima según el caso que se esté estudiando.

3.4.1.1 Codificación binaria

Es la codificación más extendida y se basa en que cada cromosoma es una cadena de bits (0 o 1). Puede abarcar muchos cromosomas incluso con un número reducido de genes. No obstante no suele ser idónea y debe realizarse correcciones tras la reproducción y/o mutación.

Este tipo de codificación se emplea por ejemplo en el problema de la mochila. La citada mochila tiene una determinada capacidad donde se quieren introducir una serie de objetos. Cada uno de los objetos tiene un peso y un beneficio. La capacidad de la mochila es inferior a la suma del peso de todos los objetos. Y el objetivo es conseguir que la suma de los beneficios sea máxima sin sobrepasar la capacidad de la mochila.

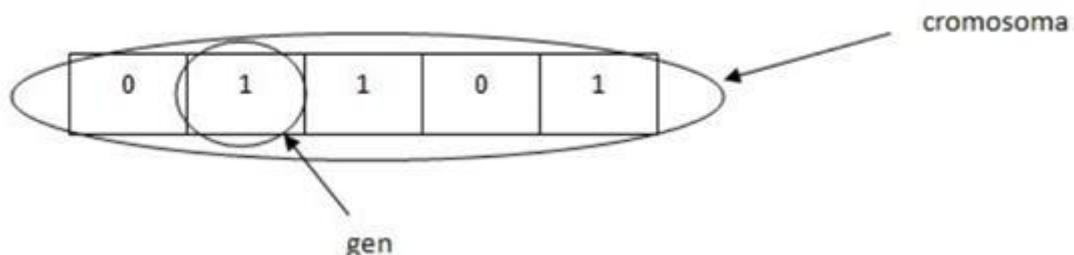


Figura 6. Ejemplo de cromosoma de representación binaria. (Fuente: "Un algoritmo genético con codificación real para la evolución de transformaciones lineales" PFC José Carlos López Díaz. Universidad Carlos II de Madrid. 2010)

3.4.1.2 Codificación numérica

En este tipo de codificación se utilizan cadenas de números que representan un número en una secuencia. Se emplea en problemas en los que hay que ordenar algo. A menudo necesita correcciones tras las mutaciones, al igual que el caso anterior.

Un ejemplo muy común es el problema del viajante de comercio. El viajante debe pasar por una serie de ciudades separadas una determinada distancia. El objetivo es que el comerciante recorra todas las ciudades y vuelva al punto de partida habiendo recorrido el menor número de kilómetros.

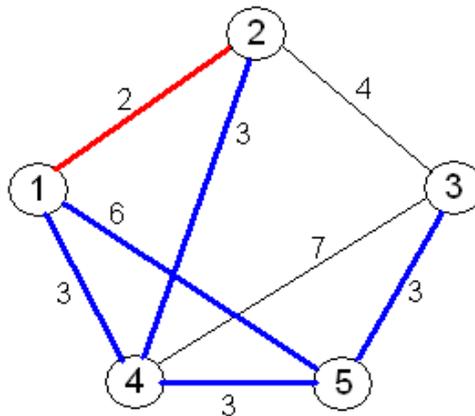


Figura 7. Esquema del problema del viajante. (Fuente: "Algoritmos genéticos" Arranz de la Peña, Jorge; Parra Trujol, Antonio. Universidad Carlos III de Madrid.)

3.4.1.3 Codificación por Valor Directo

Esta codificación se emplea en resolución de problemas en el que se requiere el uso de valores de cifrado complicado como por ejemplo el uso de números reales. Cada cromosoma es una cadena de valores relacionados con el problema, pudiendo ser números decimales o cadenas de caracteres. Suele requerir nuevas técnicas de reproducción y mutaciones específicas del problema.

Un ejemplo es la resolución de la búsqueda de pesos para las redes neuronales. Así cada neurona tendrá un peso con el que se puede entrenar a la red y obtener la salida deseada.

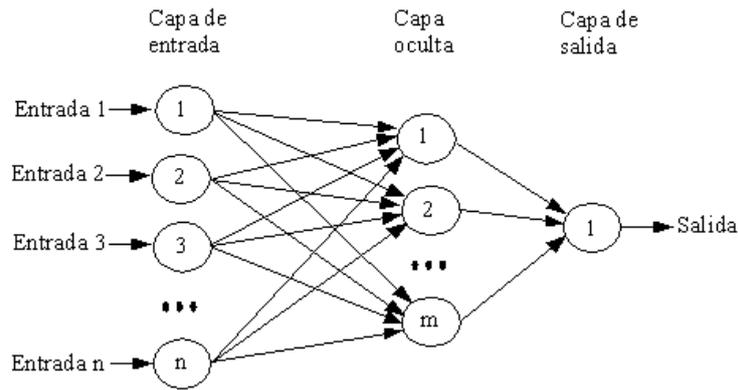


Figura 8. Esquema de red neuronal. (Fuente: “Algoritmos genéticos” Arranz de la Peña, Jorge; Parra Trujol, Antonio. Universidad Carlos III de Madrid.)

3.4.1.4 Codificación en árbol

Esta codificación se utiliza en el desarrollo de programas para programación genética. Cada cromosoma será un árbol con diferentes objetos.

3.4.2 Selección

Una vez evaluado cada cromosoma, se crea la nueva población teniendo en cuenta que los buenos rasgos de los mejores se transmitan a ésta. Es decir, se hace una selección de los individuos más capacitados para que se produzcan con más probabilidad.

3.4.2.1 Selección por Rueda de Ruleta

En este tipo de selección se crea previamente una ruleta con los cromosomas de la generación teniendo en cuenta la puntuación de cada uno. A mayor puntuación, mayor porción de la ruleta, por lo que al hacerla girar, tendrá mayor probabilidad de salir elegido. En el caso de que las probabilidades difieran mucho, este método da problemas ya que puede reducir la diversidad genética.

Cromosoma	No. Cadena	Aptitud	% del Total
1	11010110	254	24.5
2	10100111	47	4.5
3	1101110	457	44.1
4	1110010	194	18.7
5	11110010	85	8.2
Total		1037	100

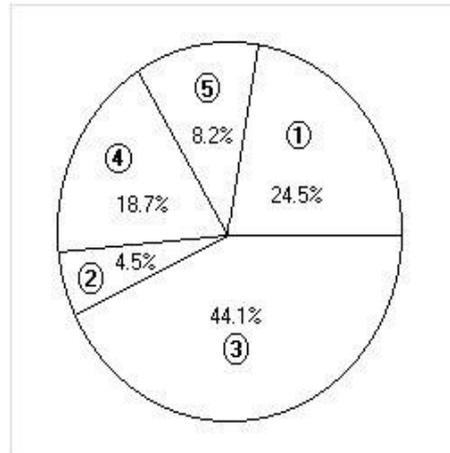


Figura 9. Ejemplo de red de ruleta de selección. (Fuente: "Algoritmos genéticos y sus aplicaciones" Carlos A. Coello Coello. 1995)

3.4.2.2 Selección por Rango

En este método, a cada cromosoma se le asigna un rango numérico basado en su amplitud. La selección se realiza en base a este ranking.

La diferencia con el método de la ruleta es que la selección por rango va a producir una variedad genética más rica. Sin embargo tiene una convergencia más lenta ya que no existe tanta diferencia entre el mejor cromosoma y el resto como ocurría antes.

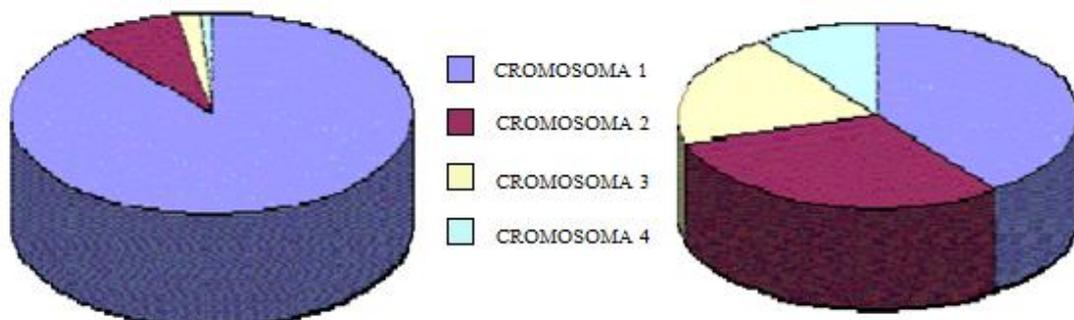


Figura 10. Caso de selección por ruleta (izq.) y selección por rango (dcha.) (Fuente: "Algoritmos genéticos" Arranz de la Peña, Jorge; Parra Trujol, Antonio. Universidad Carlos III de Madrid.)

3.4.2.3 *Selección Elitista*

Este método copia el mejor cromosoma (con mejor adaptación) en la nueva población para que tras el cruce y la mutación no se pierda.

El elitismo mejora el funcionamiento de los algoritmos genéticos al evitar que pierda la mejor solución. Una variación es que el mejor cromosoma solo se copie a la siguiente generación en caso de que no se genere un cromosoma mejor tras la reproducción/mutación.

3.4.2.4 *Selección por Torneo*

En este caso se escogen individuos aleatoriamente y aquel con mayor puntuación se reproduce, sustituyendo su descendencia al que tiene menor puntuación.

3.4.2.5 *Selección Escalada*

Al incrementarse la aptitud media de la población, la fuerza de la presión selectiva también aumenta. La función de aptitud o función objetivo comienza a ser mas discriminadora por lo que este método es útil para seleccionar individuos cuando la gran mayoría de ellos tenga una aptitud alta y solo se distingan mínimamente.

3.4.2.6 *Selección Jerárquica*

Los individuos van pasando por rondas de selección que van de menos discriminatorias a mas discriminatorias. La ventaja es que reduce el tiempo total de cálculo pues evalúa más rápidamente y menos selectivamente. De este modo elimina individuos poco prometedores y va sometiendo a los supervivientes a evaluaciones más rigurosas y costosas.

3.4.3 Reproducción

Una vez realizada la selección de los cromosomas se pasa a su reproducción. Se busca conseguir un descendiente que mejore la aptitud de sus padres mediante el intercambio de material genético de dos cromosomas.

Existen diferentes formas de realizar los cruces para cada codificación. Sin embargo, algunas técnicas son aplicables a las distintas codificaciones.

3.4.3.1 Cruce de 1 punto

Los dos cromosomas padres se cortan por un punto. Se copia la información genética de uno de los padres desde el inicio hasta el punto de cruce y el resto se copia del otro progenitor. El punto de corte se determina aleatoriamente generando dos segmentos diferenciados llamados cabeza y cola.

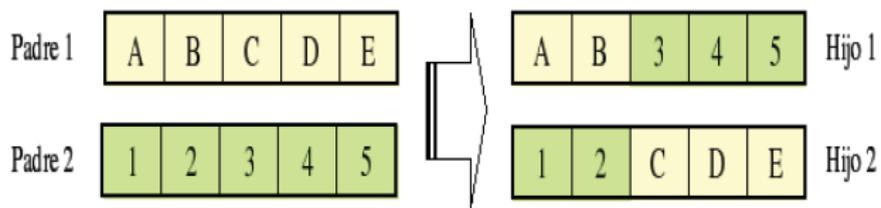


Figura 11. Esquema de cruce de 1 punto. (Fuente: "Introducción a los algoritmos genéticos" Marcos Gestal Pose. Departamento Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Universidad da Coruña.)

3.4.3.2 Cruce de 2 puntos

Mediante la misma filosofía que el anterior los padres se cortan en este caso por dos puntos. Deberá tenerse en cuenta que ninguno de estos puntos de corte coincida con el extremo de los cromosomas. Así se garantiza que se originen tres segmentos.

Para generar los descendientes se escoge el segmento central de uno de los padres y los segmentos laterales del otro padre.

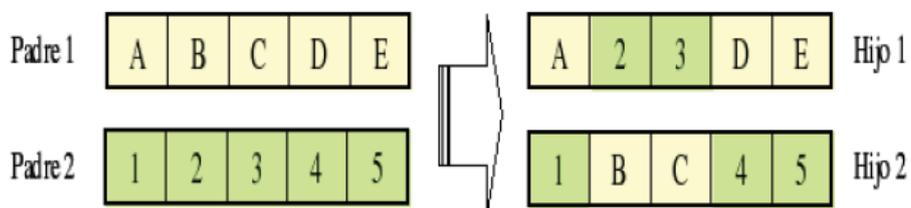


Figura 12. Esquema cruce de 2 puntos. (Fuente: "Introducción a los algoritmos genéticos" Marcos Gestal Pose. Departamento Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Universidad da Coruña.)

Este tipo de cruce mejora sustancialmente al cruce de un punto ya que al añadir más puntos se reduce el rendimiento del algoritmo genético además de explorar más a

fondo el espacio de búsqueda. Sin embargo, existen estudios que desaprueban los cruces multipuntos ya que es más fácil que los segmentos originados pierdan las características de bondad que poseían de forma conjunta.

3.4.3.3 Cruce uniforme

En este caso cada gen de la descendencia tiene las mismas probabilidades de pertenecer a uno u otro padre.

Una opción es generar un número aleatorio. Si este número supera un cierto umbral se elegirá un padre determinado y si no lo supera se elige al otro.

Otra opción es seleccionar una máscara de cruce con valores binarios. Si en una de las posiciones de la máscara hay un 1, el gen situado en esa posición en uno de los descendientes se copia del primer padre. Si por el contrario hay un 0, el gen se copia del segundo padre. Para producir el segundo descendiente se intercambian los papeles de los padres, o bien se intercambia la interpretación de los 1 y lo 0 de la máscara de cruce.

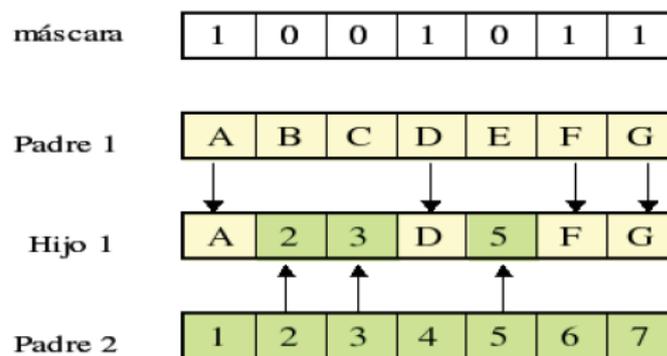


Figura 13. Esquema de cruce uniforme. (Fuente: "Introducción a los algoritmos genéticos" Marcos Gestal Pose. Departamento Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Universidad de Coruña.)

3.4.3.4 Cruces específicos de codificaciones no binarias

Los tipos de cruce planteados son válidos para cualquier representación del genotipo. Si por otro lado, se emplean genotipos enteros o reales, los operadores de cruce que pueden darse son:

- Media: el gen de la descendencia toma el valor medio de los genes de los padres. Como desventaja presenta que el descendiente obtiene un gen que es el cruce de dos padres.
- Media geométrica: cada gen de la descendencia toma como valor la raíz cuadrada del producto de los genes de los padres. Presenta el problema de qué signo asignar al resultado si los padres son de diferente signo.
- Extensión: se toma la diferencia entre los genes situados en la misma posición de los padres y se suma al valor más alto (o se resta del valor más bajo). Solventa el problema de generar un único descendiente.

3.4.4 Mutación

La mutación de un individuo provoca que alguno de sus genes, generalmente solo uno, varíe en su valor y de forma aleatoria.

La mutación suele realizarse de manera conjunta con el operador de cruce o reproducción. Primeramente se seleccionan dos individuos de la población para realizar el cruce. Si éste tiene éxito entonces uno de los descendientes, o ambos, se muta con cierta probabilidad, generalmente menor al 1%. La probabilidad de mutación es muy baja debido a que los individuos suelen tener un ajuste menor después de ser mutados. Sin embargo, se realizan mutaciones para garantizar que ningún punto del espacio de búsqueda tenga una probabilidad nula de ser examinado.

La mutación en codificaciones binarias se centra en negar un bit aunque también es posible realizar las mutaciones intercambiando los valores de dos alelos del cromosoma. Sin embargo, si la codificación es no binaria existen otras opciones como aumentar o disminuir un gen una pequeña cantidad generada aleatoriamente; o bien multiplicar un gen por un valor aleatorio próximo a 1. En una codificación en árbol la mutación podría radicar en el cambio de operador, de un número o incluso en la mutación de una rama entera.

Otro caso que puede existir es que no todos los cromosomas de los individuos de la población tengan la misma longitud. Esto implica que no codifican el mismo conjunto

de variables. En este caso el añadir un nuevo gen o eliminarlo puede considerarse como mutación. Este último caso puede darse en las redes neuronales por ejemplo.

A la hora de cruzar y mutar individuos, puede aparecer que la diversidad genética de la población se vea disminuida. Por ello, a veces se complementa la mutación con operadores de nichos, los cuales mantienen la diversidad genética provocando que cromosomas similares sustituyan solo a cromosomas similares. Así si existen diversas especies puede hallarse el máximo de cada una.

3.4.5 Evaluación

Para el correcto funcionamiento del algoritmo, es necesario saber si el nuevo individuo es o no una buena solución.

De esto se encarga la función de evaluación u objetivo, la cual mide la bondad de la solución o en otras palabras, mide su ajuste. En la naturaleza, esta acción se denominaría adecuación de un individuo en relación a la probabilidad de que ese individuo sobreviva hasta la edad de reproducción y se reproduzca. Evidentemente la probabilidad de reproducción de una población dependerá del número de individuos que posea.

En relación a los algoritmos genéticos, el ajuste permitirá controlar el número de selecciones, cruces, copias y mutaciones realizadas.

Comúnmente se crea una medida de ajuste para cada individuo mediante un valor de ajuste escalar obtenido por procedimientos de evaluación específicos. Algunos de los ajustes existentes son el ajuste puro, el ajuste estandarizado o el ajuste normalizado.

3.5 Ventajas e inconvenientes de los algoritmos genéticos

Las principales ventajas que presentan los AG como técnica de optimización son:

- Operan con varias soluciones de forma simultánea, y no de forma secuencial como las técnicas tradicionales. Esto significa que mientras las técnicas tradicionales solo pueden explorar el espacio de soluciones hacia una solución y en una dirección al mismo tiempo, resultando dicha solución no óptima, no pueden hacer otra cosa que abandonar todo el trabajo y empezar de nuevo. Los algoritmos genéticos desechan la solución pero siguen por otros caminos.
- Resultan menos afectados por los máximos locales que las técnicas tradicionales.
- Son hábiles en la manipulación simultánea de gran cantidad de parámetros.
- No necesitan conocimientos específicos del problema a resolver. Realizan cambios aleatorios en sus soluciones candidatas y luego utilizan la función de aptitud para determinar si esos cambios han mejorado la solución.
- Son fáciles de ejecutar.
- Emplean operadores probabilísticos en vez de determinísticos.

Por el contrario, los principales inconvenientes son:

- La representación del problema puede ser complicada ya que el lenguaje empleado debe ser robusto para tolerar cambios aleatorios sin llegar a ofrecer errores fatales o resultados sin sentido. Se puede obtener soluciones mediante la definición de los individuos como listas de números donde cada número representa algún aspecto de la solución candidata.
- Pueden tardar mucho en converger, o no converger en el óptimo. Dependen de los parámetros escogidos, es decir, del tamaño de la población, del número de generaciones, etc.
- Si un individuo es más apto que la mayoría, los algoritmos genéticos convergen muy rápidamente pues se merma la diversidad de la población y converge hacia el óptimo local representado por ese individuo. Este problema suele darse en poblaciones pequeñas pues puede aparecer un genotipo dominante sobre los otros.

3.6 Algoritmos genéticos enfocados al diseño de redes de abastecimiento de agua

El diseño óptimo de redes de abastecimiento de agua de un determinado tamaño resulta hoy en día extremadamente complejo si se emplean métodos tradicionales. La obtención de un diseño óptimo utilizando diámetros discretos resulta prácticamente imposible. Cuando las variables de decisión son los diámetros, las restricciones son funciones implícitas de dichas variables, apareciendo una región del espacio de soluciones de donde se debe extraer el óptimo global. Esto solo es posible con métodos no tradicionales, ya que los tradicionales podrían solo localizar los mínimos locales.

Es por ello que los algoritmos genéticos abren una novedosa vía para resolver esta problemática pues permiten la búsqueda más allá de los mínimos locales, pudiendo alcanzar el óptimo global.

Este trabajo tiene como objetivo minimizar los costes de inversión necesarios para la implantación de un determinado sistema a partir del trazado topológico, demandas y requerimientos de presión en los nudos. El método propuesto emplea un software basado en algoritmos pseudogenéticos, basado en diversos trabajos previos. Algunos de los mas importantes y que se encuentran citados en la bibliografía son:

- “Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia.” Tesis doctoral de Daniel Mora-Meliá, UPV. 2012.
- *“Optimización energética de las redes de abastecimiento de la ciudad de Murcia. XI Seminario Iberoamericano de Abastecimiento Agua y Drenaje (SEREA 2012)”* redactado por Iglesias-Rey, P.L., Oyarzún Constabel, S. y Martínez Solano, J.

3.6.1 Algoritmo pseudogenético

Tal y como se ha comentado anteriormente, un algoritmo genético es una técnica de optimización numérica basada en la simulación de la reproducción, cruce y mutación

definida por la teoría de la evolución de Darwin. La selección del individuo más adaptado se realiza en función de un criterio que ha sido definido previamente.

Esta técnica posee diversas ventajas e inconvenientes, los cuales han sido descritos con anterioridad. Una de las ventajas más importantes es que la búsqueda de soluciones es robusta, es decir, que convergerá a una solución siempre y cuando la elección de los parámetros será la adecuada.

Otra característica que poseen es que son de carácter estocásticos, es decir, que dos ejecuciones distintas pueden dar dos soluciones y ser ambas las óptimas. Esta situación se adapta perfectamente a las resoluciones de redes de abastecimiento, pues siempre existen varias soluciones posibles. Además ofrece un amplio abanico de éstas, pudiendo elegir aquella que más se adapte a la naturaleza de problema. Puede decirse que los algoritmos genéticos poseen una gran capacidad de exploración con una convergencia muy rápida. Esto será cierto siempre y cuando el espacio de soluciones sea el adecuado y con una buena representación, permitiendo mutaciones beneficiosas que trasladen los cromosomas más fuertes al resto de la población.

Los algoritmos genéticos simples suelen codificarse en binario. Sin embargo, en este documento se han empleado los algoritmos pseudogenéticos, los cuales se diferencian de los anteriores en que la codificación es numérica.

Las etapas que sigue un algoritmo pseudogenético a la hora de optimizar una red de distribución de agua se muestra en la siguiente figura.

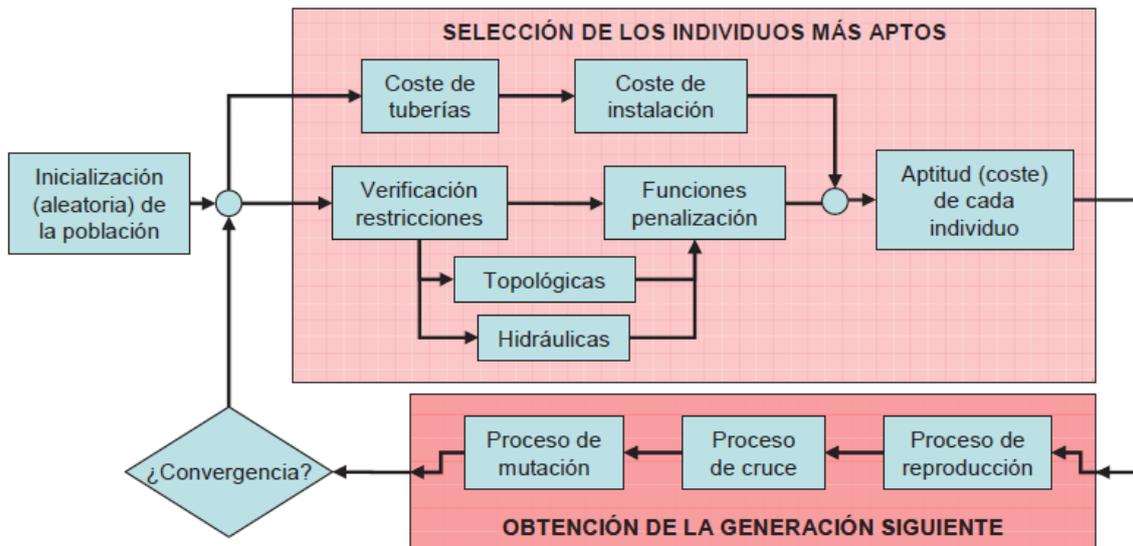


Figura 14. Etapas seguidas en un algoritmo pseudogenético. (Fuente: "Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia." Tesis doctoral Daniel Mora-Meliá. UPV. 2012)

El algoritmo genético aplicado trata de aplicar los operadores de reproducción, cruce y mutación a una determinada cadena alfanumérica. Las soluciones aportadas formarán la población del algoritmo, formadas por una determinada cantidad de individuos.

El algoritmo pseudogenético sigue las siguientes etapas:

- Etapa 0: Definición de los parámetros. Esta etapa está definida por el experto que desea realizar la optimización, ya que de él dependerá definir unos parámetros de trabajo. Si dichos parámetros no son los adecuados puede que el algoritmo no ofrezca una solución adecuada.
- Etapa 1: Inicialización del algoritmo y selección de los individuos más aptos. Se genera aleatoriamente una primera generación de cromosomas. Cada cromosoma se ordena en función del coste de la red, ofreciendo una solución al problema. Para poder asociar el coste a los condicionantes hidráulicos de redes de abastecimiento, el algoritmo pseudogenético trabaja conjuntamente con EPANET.
- Etapa 2: Operadores genéticos. Los cromosomas, previamente ordenados según su aptitud, pasan a reproducirse según unos criterios. El algoritmo

pseudogenético emplea el método de reproducción constante, el cual asigna a cada cadena de población una probabilidad de reproducción que depende de su aptitud o coste asociado. Cada individuo de la nueva generación es afectado del cruce y mutación. El cruce se realiza de modo aleatorio, intercambiando eslabones y obteniendo una nueva cadena. Y la mutación examina cada eslabón de la cadena y también de forma aleatoria produce un cambio en su valor.

- Etapa 3: Condición de convergencia. Esta última etapa se basa en repetir el ciclo tantas veces como sea necesario hasta que se cumpla la condición de convergencia, que suele definirse como aquel punto en el cual ya no se producen mejoras en el individuo. Se debe tener en cuenta que ese número de ciclos no sea muy reducido, ya que indicaría una convergencia temprana y seguramente en un mínimo local, ni que tampoco sea muy elevado, ya que la espera de la solución sería demasiado prolongada.

Como se puede observar, las etapas que sigue un algoritmo pseudogenético son idénticas a las comentadas anteriormente de forma genérica. La única diferencia de momento se centra en la codificación alfanumérica.

3.6.1.1 Operadores genéticos

El funcionamiento de los algoritmos pseudogenéticos se centra principalmente en los operadores genéticos que poseen. Dichos operadores son unas funciones que favorecen la diversidad genética de la población, y conforman un elemento clave para el correcto funcionamiento del algoritmo.

El proceso de reproducción seguido por el algoritmo pseudogenético es del tipo de reproducción constante. Éste es un método de selección proporcional en el que se asigna a cada cadena de la población una probabilidad de selección para formar parte de la siguiente generación. La probabilidad asignada dependerá del coste de la cadena dentro de la población y como tal, se encontrará entre una probabilidad máxima p_{max} , asociada al individuo de coste menor, y una probabilidad mínima p_{min} , asociada a la solución de coste mayor. Las probabilidades se definen como

$$p_{\max} = \frac{\beta}{N_C} \quad p_{\min} = \frac{2 - \beta}{N_C} \quad (3.1)$$

donde β es una constante que varía entre 1,5 y 2 (Wang, 1991), y N_C es el número de cromosomas.

Por lo tanto, para una cadena genérica i , la probabilidad de selección es la siguiente:

$$p_i = p_{\min} + (p_{\max} - p_{\min}) \frac{N_C - i}{N_C - 1} \quad (3.2)$$

La posibilidad de que una cadena se reproduzca es función del producto de la probabilidad p_i por el número de cadenas N_C . Si dicho producto es mayor o igual a 1,5 la cadena se duplica; si está entre 0,5 y 1,5 la cadena se mantiene; y si es inferior a 0,5 la cadena desaparece en la siguiente generación. El proceso se puede observar gráficamente en la Figura 15.

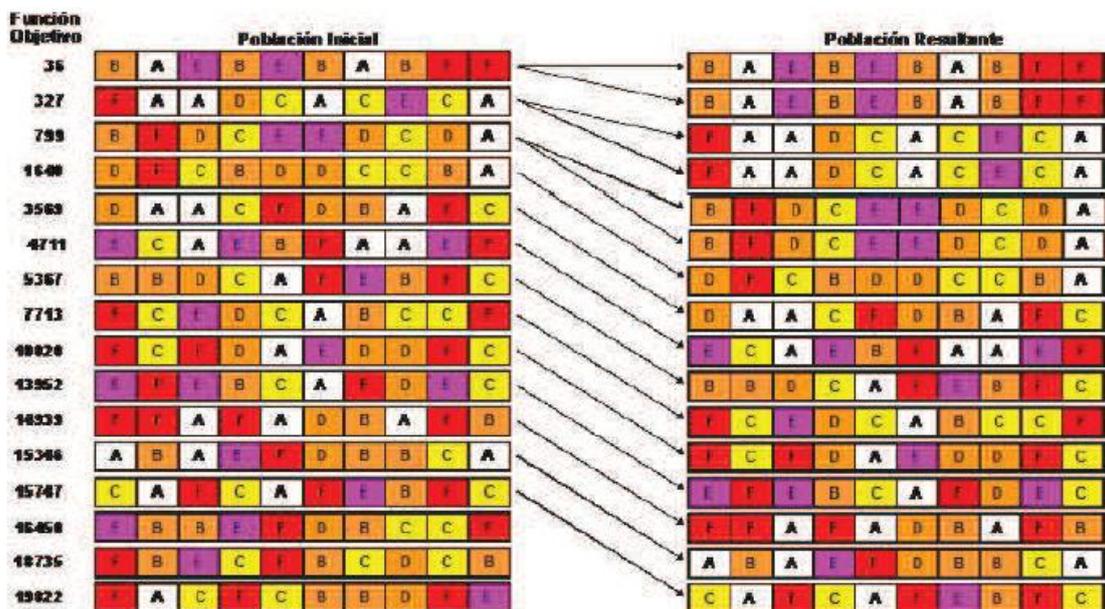


Figura 15. Proceso de reproducción constante. (Fuente: "Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia." Tesis doctoral Daniel Mora-Meliá. UPV. 2012)

El proceso de cruce que se le atribuye al algoritmo pseudogenético es el de cruce de un punto, según se muestra en la Figura 16. Este tipo de cruce suele emplearse con codificaciones binarias con ciertos problemas de sesgo, ya que se fracciona el código que identifica una de las variables de decisión. En el caso de los algoritmos

pseudogenéticos, al disponer de codificación alfanumérica, no se da esta problemática ya que cada eslabón es una variable de decisión, es decir, no necesitan de todo el código para representar al individuo.

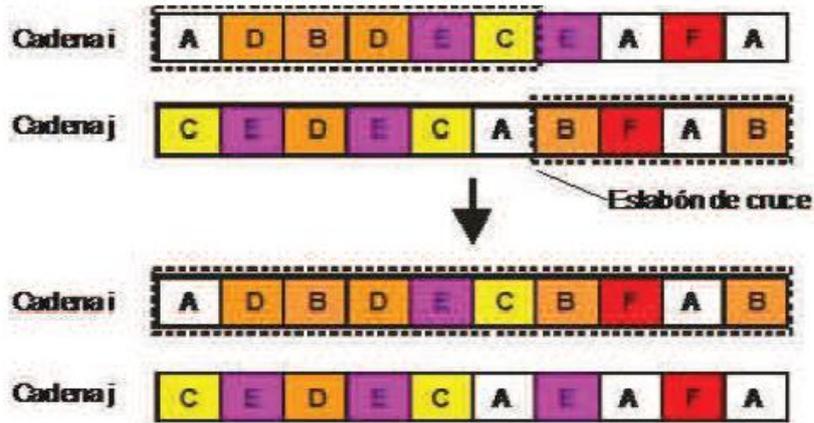


Figura 16. Proceso de cruce de un punto. (Fuente: "Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia." Tesis doctoral Daniel Mora-Meliá. UPV. 2012)

El último operador que condiciona al algoritmo pseudogenético es la mutación. Este proceso se aplica a la población obtenida tras la reproducción y el cruce y su objetivo es ampliar zonas de búsqueda dentro del espacio de soluciones. Los algoritmos genéticos simples transponen el valor binario, es decir, cuando el valor es 1, éste pasa a ser 0; y cuando el valor es 0, éste pasa a ser 1. En los algoritmos pseudogenéticos no es posible realizar dicho intercambio de forma tan simple pues se codifican alfanuméricamente siguiendo el código de Gray. La utilidad de la codificación alfanumérica se centra en evitar sesgar las variables de decisión, que suelen ser principalmente los diámetros de las tuberías de la red de estudio. De este modo, se definen previamente unos diámetros con una determinada codificación, y cuando es necesario aumentar o disminuir el diámetro, se especifica directamente qué diámetro es el elegido para continuar con la optimización. En la tabla siguiente se comparan codificaciones binarias y de Gray para unos diámetros en concreto y en la figura siguiente se muestra el proceso de mutación de un algoritmo con codificación alfanumérica.

Tabla 1. Codificación binaria y de Gray de diferentes diámetros. (Fuente: "Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia." Tesis doctoral Daniel Mora-Meliá. UPV. 2012)

ID DIÁMETRO	DIÁMETRO INTERIOR (mm)	CÓDIGO BINARIO	CÓDIGO GRAY
A	100	000	000
B	125	001	001
C	150	010	011
D	200	011	010
E	250	100	110
F	300	101	111
G	350	110	101
H	400	111	100

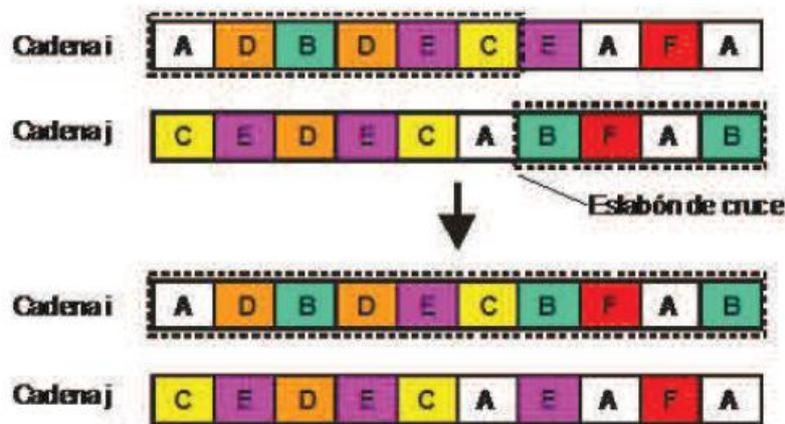


Figura 17. Proceso de mutación de un algoritmo pseudogenético. (Fuente: "Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia." Tesis doctoral Daniel Mora-Meliá. UPV. 2012)

Actualmente se considera a la mutación como un operador secundario ya que el proceso de cruce suele ser suficiente para generar una diversidad de individuos adecuada. Sin embargo, en los algoritmos pseudogenéticos el proceso de cruce no es tan diverso, por lo que la mutación adquiere mayor protagonismo. De este modo se pasa a aumentar el porcentaje de mutación desde el 0,001% o 0,01% típico de algoritmos genéticos simples al 1% o 10% para algoritmos pseudogenéticos. Aun así no es adecuado aumentar mucho dicho porcentaje para no caer en un proceso puramente aleatorio.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

4.1 Descripción del problema

La red de distribución de agua a analizar forma parte del desafío denominado *“The Battle of the Water Networks II”*, realizado para el congreso *“Water Distribution Systems Analysis”* celebrado en Australia.

En esta ocasión, un determinado municipio de una determinada ciudad necesita un proyecto de diseño para cubrir el incremento de demanda de agua de la población y además, abastecer a un nuevo distrito recién asentado. La red consta de un embalse, siete depósitos, 443 tuberías, 11 bombas, cinco válvulas y 399 nudos.

Dentro del municipio, se ha subdividido el área en diversas DMA o District Metering Areas, tal y como se muestra en la Figura 18. El nuevo distrito corresponde al DMA-6.

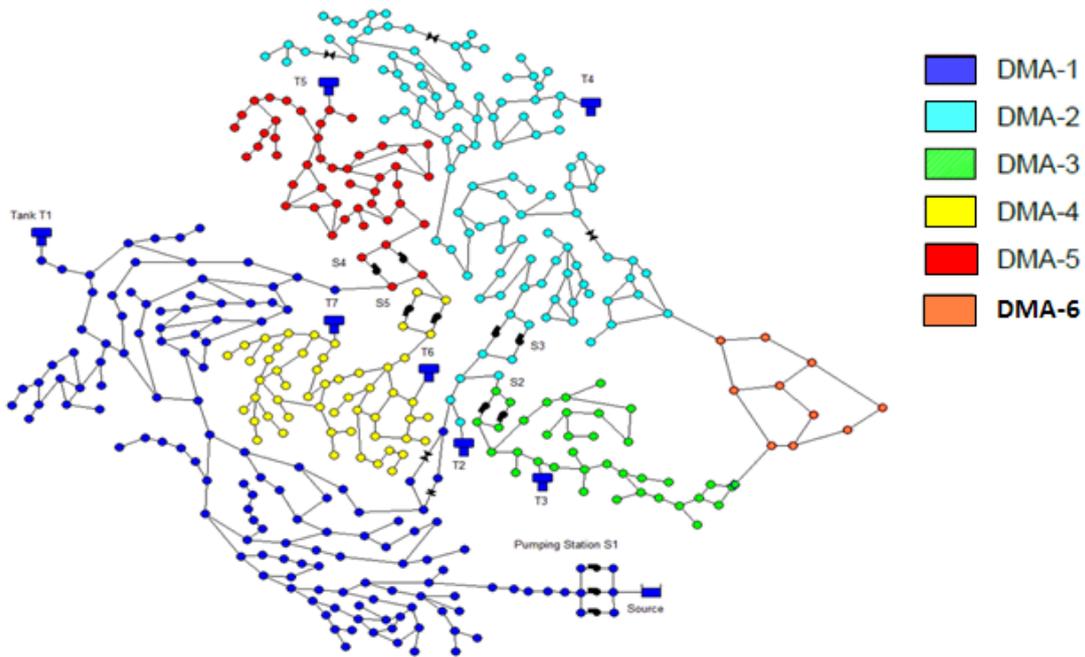


Figura 18. District Metering Areas, DMA.

4.2 Características de la red

Para llegar al correcto diseño del aumento de la demanda tanto de la red existente como del nuevo distrito, se parte de un diseño previo conocido ya que la red ya estaba calibrada hidráulicamente por el regulador actual. Este diseño inicial pone de manifiesto que incluso las infraestructuras existentes no son capaces de abastecer la nueva demanda. Obviamente se conocen las demandas y los patrones de demanda.

Se busca, por tanto, una mejora del estado actual para que su comportamiento futuro sea el adecuado. Los objetivos a alcanzar son:

- Minimizar costes de operación, mantenimiento y construcción.
- Reducir las emisiones de gases invernadero.
- Reducir el tiempo que el agua se encuentra circulando por la red para evitar problemas sanitarios.

4.3 Criterios de diseño

4.3.1 Costes

Se busca el menor coste que se pueda deducir del correcto diseño de la red de abastecimiento.

Los costes a considerar son los costes de operación y los costes de capital. Concretamente, los costes de operación son los costes deducidos de operaciones de bombeo; mientras que los costes de capital son los asociados a cualquier actividad de construcción, tuberías y depósitos necesarios que pueden recibirse incluso prefabricados, y también cualquier mejora que se produzca en las estaciones de bombeo existentes.

Como los costes de operación y de capital se producen en distintos momentos a lo largo de la vida útil del proyecto, los costes anuales se encuentran afectados por la vida útil de cada componente específico, incluyendo la tasa de amortización. Consecuentemente, el coste que se busca minimizar es la suma de los costes anuales de capital y los costes anuales de operación. En apartados siguientes se muestran diversas tablas correspondientes a los costes anuales que incluyen los costes de operación y de capital amortizados.

Para el cálculo de los costes de operación, o costes de bombeo, se ha de obtener los costes semanales de la estación de bombeo y luego multiplicarlos por el número total de semanas que tiene un año, que se considerarán 52. Una vez obtenido este valor, se debe tener en cuenta la variabilidad de la demanda a lo largo del año, por lo que se dividirá por el factor punta del día de mayor consumo que es de 1.3. Es decir, se fija un precio de la energía de 40.

En este documento no se ha tenido en cuenta ni la variabilidad de la tarifa eléctrica, ni la variabilidad de la demanda a lo largo del año.

4.3.2 Edad del agua

En determinados puntos de la red se puede llegar a dar un estancamiento indeseable del agua, lo que puede provocar problemas sanitarios y de salubridad para los consumidores. Por ello, la calidad del agua es un factor muy importante a la hora de definir la red de abastecimiento y debe mantenerse al mínimo.

La edad del agua se medirá en función de la siguiente ecuación:

$$WA_{net} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{junc}} \sum_{j=1}^{N_{time}} k_{ij} Q_{dem,ij} WA_{ij}}{\sum_{i=1}^{N_{junc}} \sum_{j=1}^{N_{time}} Q_{dem,ij}} \quad (4.1)$$

donde WA_{net} es la edad del agua en la red medida en horas, WA_{ij} es la edad también en horas del nudo i en el instante t_j , $Q_{dem,ij}$ la demanda del nudo i en el tiempo t_j y k_{ij} una variable definida como sigue:

$$k_{ij} = \begin{cases} 1 & , \quad WA_{ij} \geq WA_{th} \\ 0 & , \quad WA_{ij} < WA_{th} \end{cases} \quad (4.2)$$

donde WA_{th} es la edad del agua para un umbral de 48horas.

El tiempo de simulación se define como $t_j = j \Delta t$, con $\Delta t = 1$ hora, N_{junc} como el numero de cruces y N_{time} como el numero de simulaciones e igual a 168 ya que el periodo extendido de simulación es una semana. La expresión utilizada para evaluar la calidad del agua da mayor peso a los nodos con mayores demandas y descarta también aquellos nodos con demanda nula.

4.3.3 Emisiones de gases invernadero

Actualmente, el aspecto medio ambiental está cada vez más en auge, sobretodo en el campo de los gases invernadero. Es por ello que se está comenzando a hablar de tasas deducidas por la producción de una cantidad determinada de gases invernadero.

Consecuentemente, se prevé que aparezca un límite a partir del cual se deba pagar, de ahí que también se busque minimizar las emisiones de gases invernadero, o *greenhouse gases* (GHG), asociadas al diseño de la red de distribución.

Las emisiones de GHG se pueden dividir en emisiones asociadas con la energía producida, transporte, instalación de tuberías, depósitos y bombas, denominadas emisiones de GHG capitales. Y también en GHG resultantes de la operación de las bombas al consumir electricidad proveniente de recursos fósiles, también llamadas emisiones de GHG operacionales.

Al igual que anteriormente, se busca minimizar las emisiones totales de manera anual de los GHG producidos, tanto de los GHG capitales como de los GHG operacionales.

La componente de los GHG capitales se ha estimado empleando la Tabla 2, la cual representa las emisiones anuales de CO₂ equivalente al manufacturar un metro de tubería.

Tabla 2. Emisiones anuales de CO₂ equivalente al manufacturar un metro de tubería.

Diámetro (mm)	Emisiones anuales de CO₂ equivalente (kg CO₂-e/m/año)
102	5.90
152	9.71
203	13.94
254	18.43
305	23.16
356	28.09
406	33.09
457	38.35
508	43.76
610	54.99
711	66.57
762	72.58

Las emisiones anuales de GHG operacionales computan como el producto del consumo de energía total anual de las bombas del sistema en operación normal por un factor de emisión de 1.04 kg CO₂-e/kW h. Dicho factor de emisión, el cual convierte energía en carbono equivalente varía en función del recurso empleado para producir energía. Sin embargo en este caso se tomará como constante para simplificar el diseño.

Como en el caso de los costes anuales de capital, la Tabla 2 ya tiene en cuenta el factor de amortización.

4.4 Escenarios de estudio

Para el correcto diseño de la red de abastecimiento será necesario considerar diversos escenarios para asegurar una fiabilidad mínima del sistema.

Existirán, a priori, dos estados. Cada uno de ellos vendrá determinado por unos condicionantes específicos del caso en concreto.

4.4.1 Operación normal

Tal y como su nombre indica, dicho escenario considerará que la red de abastecimiento trabaja en condiciones normales. Por ello, cada nudo con demanda de la red debe tener como mínimo una presión de 25 mca. Los nudos sin demanda, únicamente deben tener una presión por encima de cero, para asegurar así que la red no pueda llegar a sufrir cavitación o depresiones excesivas.

Además de la condición de presión, se establece que los depósitos tienen que tener al menos el mismo volumen de agua que tenía al inicio de la simulación, estableciendo como simulación un periodo de una semana. Dicho volumen inicial deberá ser igual a la mitad de la máxima variación del depósito. Así mismo, durante la operación normal no deben vaciarse nunca.

4.4.2 Fallo del sistema

Se entenderá que el sistema falla únicamente si se produce una parada en el abastecimiento de energía, ya que resultaría en una parada de la red de bombeo. La parada se producirá durante un periodo de 2 horas y puede darse en cualquier instante a lo largo de la semana de simulación.

Para poder solventar dicho problema se colocarán generadores diesel en aquellas estaciones de bombeo que lo requieran, teniendo en cuenta siempre que los depósitos no se vacíen y que la presión en los nudos sea la adecuada. Cabe destacar que la red será evaluada para esas dos horas de fallo, cuyos valores iniciales en cuanto a la demanda y a los niveles de los depósitos serán aquellos definidos para el mismo instante pero en operación normal.

El fallo del sistema puede apenas notarse en la red mediante dos actuaciones. Una de ellas se ha comentado anteriormente al indicar que los generadores diesel pueden trabajar durante esas dos horas, sin embargo será penalizado en cuanto a gasto energético y medioambiental. O bien, se puede minimizar el fallo teniendo en cuenta un volumen de almacenamiento en la red de tuberías y de depósitos, evitando la penalización mencionada, ya que la red trabajaría durante esas dos horas gracias a sus propias reservas.

En el caso de fallo, sí se permite que los depósitos operen por debajo de su nivel mínimo, pero siempre sin vaciarse. Es por este tipo de fallos por los que el volumen de reserva se hace necesario.

4.5 Valores de diseño

4.5.1 Tuberías

Los posibles diámetros a instalar así como su coste, se muestran en la Tabla 3. Incluyen la construcción de las tuberías, transporte e instalación.

Las tuberías pueden añadirse en paralelo a las existentes en aquellos casos que se considere necesario. Esto implicará corte de carreteras, así como la reposición de pavimentos. Para incluir dichos costes, en la Tabla 3 se muestran los valores correspondientes a un coste adicional del 20%.

Otro requerimiento es que ninguna de las tuberías existentes puede ser desmantelada, a excepción de dos tuberías. Estas tuberías que pueden no existir son aquellas que unen el DMA-6 al resto de la red. Pueden ser omitidas si con ello se consigue un resultado óptimo.

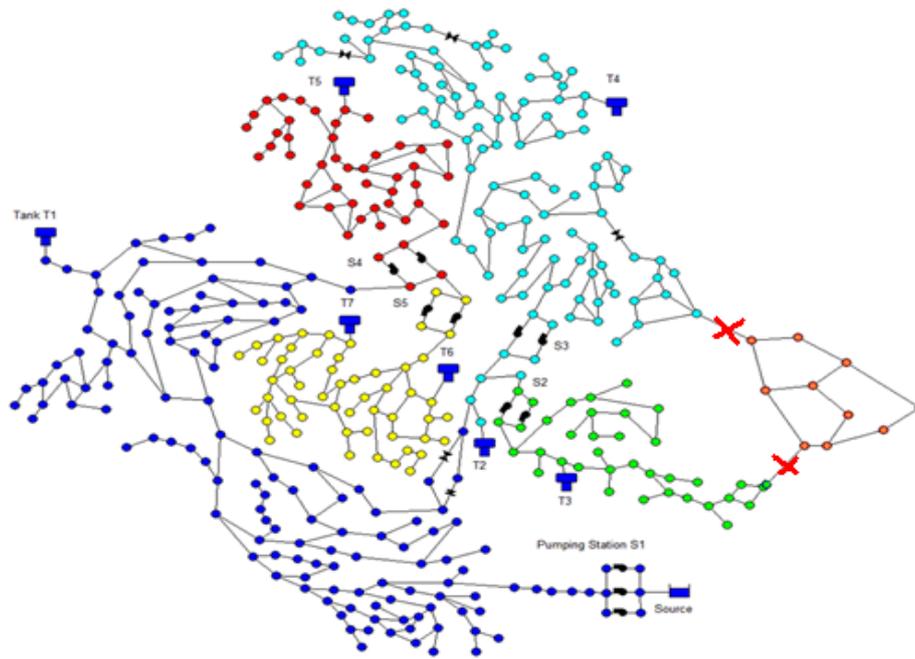


Figura 19. Tuberías que pueden ser omitidas durante el proceso de análisis y modelación de la red.

Para el estudio se tomará un coeficiente de Hazen-Williams para cada diámetro de 120.

Tabla 3. Costes anuales para tuberías añadidas.

Díámetro (mm)	Coste anual tubería nueva (\$/m/año)	Coste anual tubería en paralelo (\$/m/año)
102	8.31	9.97
152	10.10	12.10
203	12.10	14.49
254	12.96	15.55
305	15.22	18.28
356	16.62	19.94
406	19.41	23.26
457	22.20	26.65
508	24.66	29.58
610	35.69	42.80
711	40.08	48.12
762	42.60	51.11

4.5.2 Depósitos

Debido al incremento de la demanda, es posible añadir nuevos depósitos a la red inicial, pero únicamente pueden ser adyacentes a los ya existentes pues ya se conoce el terreno sobre el que se asentarían. Los depósitos que se añadan deben tener la misma altura y elevación desde el suelo que los adyacentes, evitando así el introducir nuevas válvulas de control.

Los depósitos a añadir serán cilíndricos, y tendrán las dimensiones que se permiten en la Tabla 4. Cada volumen tiene asociado a unos determinados costes anuales, los cuales incluyen la conexión de los nuevos depósitos a la red.

Tabla 4. Costes anuales para depósitos añadidos.

Volumen (m ³)	Coste anual (1000\$/año)
500	14.02
1000	30.64
2000	61.21

4.5.3 Bombas

Los sistemas de bombeo pueden ser mejorados reemplazando las bombas existentes con bombas de mayor potencia o bien añadiendo nuevas bombas en paralelo. No se podrán añadir nuevas estaciones de bombeo pues actualmente se sabe que no se dispone de espacio para su ubicación.

La eficiencia de las bombas existente es del 65%, mientras que las nuevas bombas tienen una eficiencia del 75%. Las curvas de las bombas se muestran en diversas tablas en el Apéndice.

Por otro lado el coste anual asociado a cada modelo de bomba se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 5. Costes anuales según modelo de bomba.

Modelo	Máxima potencia (kW)	Coste anual (\$/año)
8	45.24	4133
9	31.67	3563
10	49.76	4339
11	22.62	3225
8a	22.62	3225
10a	24.88	3307
11a	11.31	2850
8b	54.28	4554
9b	38.00	3820
10b	59.71	4823

4.5.4 Generadores diesel

Para mejorar el funcionamiento de la red en periodos de fallo se pueden instalar generadores diesel para que las estaciones de bombeo sigan trabajando. Por lo tanto, se colocaran en aquellas estaciones de bombeo existentes. Cabe añadir que se puede incorporar más de un generador diesel en una misma estación de bombeo. Los costes anuales asociados son los que muestran la Tabla 6, incluyendo costes de transporte e instalación. Se considera además que no existen costes al ocupar nuevos terrenos.

Tabla 6. Costes anuales según modelo de generador diesel.

Potencia (kW)	Coste anual (1000\$/año)
50	9.45
100	10.56
200	11.63
300	15.00
400	16.78
800	25.74
1300	40.67
2500	62.29

Los generadores diesel deben ofrecer la potencia de cuyas bombas sustituyan, teniendo en cuenta los valores de potencia de la Tabla 5. El consumo de energía y las emisiones de gases asociadas a los generadores diesel se considera despreciable a la hora de cuantificar los costes y las emisiones de gases.

4.5.5 Válvulas

Como se ha comentado anteriormente, no es posible añadir nuevas válvulas para operar el sistema. Las válvulas reductoras de presión existentes deben mantenerse. Sin embargo, su consigna puede variar si se considera necesario siempre y cuando no supere los 60m.

La única excepción a la hora de incluir válvulas es la posible instalación de una de ellas en la tubería que une el DMA-6 con el DMA-3. Si dicha válvula fuera necesaria, sus costes anuales deberían ser los indicados en la Tabla 7, correspondientes al diámetro de dicha tubería.

Tabla 7. Costes anuales de la válvula reductora de presión según el diámetro de la tubería.

Diámetro (mm)	Coste anual (\$/año)
102	323
152	529
203	779
254	1113
305	1892
356	2282
406	4063
457	4452
508	4564
610	5287
711	6122
762	6790

En todos los casos, las modificaciones en la consigna se consideran constantes durante el periodo de simulación. Además, el modificar la consigna no produce ningún coste adicional.

4.5.6 Controles de bombas

Los controles existentes en las bombas pueden ser modificados sin coste alguno, al igual que la modificación del tipo de control. Es decir, se puede alternar el control de las bombas en función de los niveles del depósito, o por controles en función del tiempo.

4.5.7 Tarifa eléctrica

La tarifa eléctrica a aplicar se muestra en la Tabla 8 donde los precios de la energía son en cent/kWh.

Tabla 8. Tarifa eléctrica.

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
0	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72
1	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72
2	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72
3	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72
4	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72
5	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72
6	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72
7	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	6.72
8	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	6.72
9	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	6.72
10	27.68	27.68	27.68	27.68	27.68	10.94	6.72
11	27.68	27.68	27.68	27.68	27.68	10.94	6.72
12	27.68	27.68	27.68	27.68	27.68	10.94	6.72
13	27.68	27.68	27.68	27.68	27.68	10.94	6.72
14	27.68	27.68	27.68	27.68	27.68	10.94	6.72
15	27.68	27.68	27.68	27.68	27.68	10.94	6.72
16	27.68	27.68	27.68	27.68	27.68	10.94	6.72
17	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94
18	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94
19	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94
20	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	6.72	10.94
21	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72
22	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72
23	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72	6.72

5. ESTADO DEL ARTE EN LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE LA RED DE *The Battle of the Water Networks II*

La mejora de la gestión técnica de las redes de distribución de agua pasa por una mejor gestión tanto de los recursos hídricos como de los recursos energéticos. En este sentido en la actualidad hay dos líneas que convergen hacia la mejora de los sistemas de transporte de agua: disminuir los costes de bombeo y disminuir al máximo las presiones a fin de reducir en lo posible las pérdidas de agua latentes del sistema.

El problema de la optimización de las redes de distribución de agua no es nuevo. El problema de la optimización de las redes es una preocupación permanente en la literatura científica sobre el tema. Algunos estudios realizan un planteamiento inicial del problema (*Nitivattananon et al., 1996*) e incluso utilizan técnicas matemáticas conocidas como la programación lineal para resolver el problema (*Ormsbee y Reddy, 1995*).

Con el auge de las técnicas heurísticas ha aumentado la utilización de estas técnicas en la optimización de las redes de distribución de agua. Los problemas de optimización de

las redes estaban inicialmente planteados en términos de la determinación de la combinación de diámetros más económica para satisfacer unas ciertas demandas de consumo (*Goldberg y Kuo, 1987*). Estas técnicas iniciales están basadas en la utilización de algoritmos genéticos. Con posterioridad esta técnica ha sido mejorada incluyendo en la formulación elementos adicionales y estableciendo con criterio un análisis estadístico de la influencia que tienen los diferentes parámetros (*Iglesias et al, 2007; Mora et al, 2007*).

La utilización de técnicas heurísticas como los algoritmos evolutivos se introduce en trabajos como el de *Sun et al. (1995)* o el de *Ilich y Simonovic (1998)*. Dichos estudio se complican más adelante introduciendo en el estudio de la minimización de los costes energéticos de bombeo diferentes estados de funcionamiento del sistema (*McCormick y Powell, 2003*). En esta línea *Samani y Mottaghi (2006)* proponen la utilización de la programación lineal como herramienta básica para la optimización de las redes de distribución de agua.

Pero es el uso creciente de las técnicas heurísticas lo que hace que el problema de la optimización continúe creciendo. Así aparecen aplicaciones clásicas de los algoritmos genéticos (*Tolson et al, 2003*) o bien modificaciones híbridas de este tipo de algoritmo adaptándose a la problemática específica de la optimización de los sistemas de distribución de agua (*Van Zyl et al., 2004*). En la misma línea aparece la utilización de técnicas derivadas como la evolución diferencial (*Vasan y Simonovic, 2010*) como motor de optimización del problema. Asimismo en la actualidad existen aplicaciones basadas en los modelos ACO (*Ant Colony Optimization, López-Ibáñez et al., 2008*), en la lógica difusa (*Vamvakeridou-Lyroudia et al., 2005*) o en la búsqueda neutral (*Bene et al, 2009*).

Finalmente en la actualidad empleamos de forma conjunta técnicas de tipo heurístico con aproximaciones al comportamiento de la red a fin de establecer un modelo de optimización que permita acometer la gestión técnica de la red (*Iglesias et al., 2012a*).

Es de forma reciente cuando el papel de estos modelos de optimización ha cambiado de rumbo. Se han introducido como objetivos de optimización no solo la minimización de los costes sino le mejora de las condiciones sanitarias de suministro relacionadas

con la calidad del agua. Al mismo tiempo se analiza que las soluciones empleadas tengan un mínimo impacto medioambiental, para lo cual será necesario contabilizar las emisiones de CO₂ a la atmósfera (*Iglesias et al., 2012b*). Es en este marco de trabajo es donde se enmarca el presente Trabajo Fin de Master.

A continuación se va a comentar qué características y qué bases científicas han seguido cada uno de los grupos multidisciplinares que han seguido la investigación de "*The Battle of the Water Networks II*" a lo largo de sus hilos de investigación.

En las últimas dos décadas, los métodos de optimización, tales como los algoritmos genéticos, han sido ampliamente aplicados a la hora de resolver problemas de recursos hídricos. Como ya se ha comentado, los algoritmos genéticos nacen de la mano de *John Holland* en la década de 1960 para resolver problemas de aprendizaje de máquina. *Holland* estudio los procesos lógicos de la adaptación de los individuos para generar unos comportamientos considerados flexibles y poder aplicarlos a sistemas complejos. Su primer trabajo fue publicado en 1975, año en el cual *David Goldberg*, ingeniero industrial, comienza a interesarse también por dichos algoritmos, llegando a escribir un algoritmo genético para un ordenador personal Apple II.

Originalmente los algoritmos genéticos se implementaron para mejorar el diseño de aprendizaje de máquina. Sin embargo, hoy en día se ha demostrado que son excelentes aliados en procesos de optimización.

Para resolver problemas que tienen en cuenta costes de construcción o de operación a nivel de la ingeniería hidráulica han ido apareciendo diversos investigadores destacables, a saber, *Engelhard (1999)* en el reemplazamiento de tuberías, *Farmani (1999)* en la optimización de sistemas de distribución; o *Halhal (1999)* en la rehabilitación de sistemas de distribución. Bien es cierto que para redes de saneamiento, estos métodos no han sido tan extendidos.

Sin embargo, este trabajo se centra en la aplicación de algoritmos al diseño óptimo de redes, el cual minimiza el coste además de cumplir restricciones de presiones, entre otras. En este campo, muchos investigadores han aplicado los algoritmos genéticos sobre una serie de redes de referencia o "*benchmarking*", como por ejemplo *Alperovits*

y Shamir (1977), Fujiwara y Khang (1990), Murphy et al (1993) o Savic (1997). Éste último llegó incluso a fundar una empresa llamada “*Optimals Solutions*”, asociada a “*Ewan Associates*”.

La gran mayoría de investigadores han tendido a programar sus propios algoritmos para aplicarlos a los casos que se les planteaban. En este sentido, Wang (1991) aplicó por primera vez un algoritmo genético para resolver de forma conceptual la calibración de un modelo de precipitación-escorrentía. Más adelante, Murphy y Simpson (1992) llegaron a aplicarlos a la optimización del diseño de sistemas de distribución de agua. Y en 1994, Wu desarrolló y aplicó los algoritmos genéticos a la calibración de modelos hidrológicos e hidrodinámicos.

Todas estas investigaciones han puesto de manifiesto que los métodos de optimización mediante algoritmos mejoran en gran medida los métodos convencionales de optimización. Desde entonces, las técnicas de optimización se han ido desarrollando y aplicando a los difíciles problemas que a veces se presentan en los sistemas de distribución de agua.

En el problema que se presenta en este documento, se han empleado diversos métodos heurísticos para llegar a una solución que cumpla los objetivos planteados. Sin embargo, antes de ejecutar el algoritmo en concreto se ha necesitado, en general, aplicar el conocimiento ingenieril al problema, para así poder simplificarlo y adaptarlo a unas características.

Uno de los investigadores de “*The Battle of the Water Networks II*” ha sido Zheng Yi Wu et al., colaborador del Departamento de Ingeniería Informática de la Universidad de Connecticut, USA e investigador de Sistemas Bentley. Su solución se basó en primer lugar, en determinar aquellas tuberías existentes que necesitaban otra tubería en paralelo, así como su diámetro. Posteriormente aplicó el método de optimización mediante algoritmos genéticos que él mismo había desarrollado para determinar el funcionamiento óptimo de las válvulas, capacidades de bombeo y volumen de los depósitos. Zheng Yi Wu et al. trataron el problema como un conjunto de subproblemas los cuales han sido evaluados siguiendo un juicio ingenieril acompañado de un análisis de sensibilidad y una serie de validaciones de la solución en cada paso.

Christopher Stokes et al. de la Universidad de Adelaida, Australia, dividió el problema en dos secciones. La primera de ellas se centró en el conocimiento del incremento de demanda de la ciudad debido al crecimiento de la población. Sus primeras acciones fueron introducir nuevas tuberías en paralelo, redimensionar las bombas existentes, introducir nuevas bombas e incrementar la capacidad de almacenamiento de la red inicial.

La segunda actuación se centró en el nuevo sector, el cual debía ser diseñado correctamente hasta el punto de modificar lo deducido en la primera sección en el caso de ser necesario. Para ello empleó también un algoritmo genético multiobjetivo distinto al tradicional y asociado al programa EPANET2.0. El algoritmo genético empleado se caracteriza por emplear una clasificación y una ordenación de las poblaciones, además de estrategias para el tratamiento de la limitación de éstas. Fue empleado con éxito en estudios previos como los de *Wu, et al. (2010)*. Dicho algoritmo ha demostrado que ofrece una mayor diversidad de soluciones óptimas ya que emplea un algoritmo con una alta velocidad de limitación de poblaciones que es mucho más eficiente comparando y escalando las soluciones que los algoritmos tradicionales. Además, *Christopher Stokes et al.* preservó la diversidad empleando un operador de comparación de la distancia de cruce. De este modo, las generaciones padre e hijo se comparan reteniendo aquella generación que conforma la mejor adaptación. Al igual que en el caso anterior, el juicio ingenieril se emplea para reducir el tamaño del problema, dividiendo el diseño en diversos escenarios que mediante ensayos de prueba y error llegan a ofrecer el diseño óptimo de la red. Existe además una tercera fase en la se comparan todas las soluciones mediante una suma de pesos que considera los tres objetivos para así obtener la mejor de todas las soluciones obtenidas.

En el estudio de *Wu et al. (2010)* empleado para este trabajo se habla de cómo optimizar emisiones de gases en función del precio del carbono. Según *Wu*, existen dos caminos: uno de objetivo único y otro multiobjetivo. En el de objetivo único, el coste total, el cual es la suma de los costes del sistema y del coste de las emisiones de gases basadas en el precio del carbono, se optimiza como un único objetivo. Por otro lado, en la aproximación multiobjetivo, el objetivo convencional es minimizar el coste del

sistema, y el segundo objetivo es minimizar las emisiones de gases. Es decir, en la técnica multiobjetivo se analizan ambos objetivos por separado.

Cada método tiene unas ventajas y unos inconvenientes. La técnica que emplea un único objetivo es más fácil de implementar, sin embargo, sus resultados pierden la información existente entre los conflictos que se dan entre ambos objetivos. Además, la hipótesis de perfecta equivalencia entre ambos objetivos no es aplicable. Por el contrario, la búsqueda multiobjetivo necesita un mayor esfuerzo computacional y dominio del conocimiento; sin embargo ofrece información más detallada entre ambos objetivos, sin perder información de su intersección.

Saldarriaga J. et al., de la Universidad de los Andes, Colombia, ha sido otro de los investigadores. Al igual que los anteriores, la gran cantidad de variables de decisión existentes le ha planteado un problema en cuanto al espacio posible de soluciones. Sin embargo, en vez de decantarse por la optimización del problema mediante algoritmos metaheurísticos, según los cuales afirma que necesitan un tiempo de computación considerable, ha resuelto el problema mediante el método de la línea de gradiente óptimo, desarrollado por *I Pai Wu (1975)* para redes de riego. De esta forma se reduce el número de iteraciones y el carácter determinísticos de estas.

El método de *I Pai Wu* se centra en definir una superficie de energía, traducida en gradiente hidráulico, para cada uno de los nudos de la red. Una vez estudiadas las formas de las superficies obtenidas, se pueden obtener patrones que permiten estimar la superficie óptima de otras redes. La superficie de presión óptima empleada asigna una pérdida de carga total para cada nudo de la red siguiendo una serie de recomendaciones que llevan al diseño óptimo y minimizan los costes de construcción; es decir, minimizan también las emisiones de gases. Todo ello lleva a que la presión óptima de cada nudo puede ser calculada mediante una ecuación cuadrática.

Con la base anterior, *Saldarriaga J. et al.*, dividió la red en sectores para poder aplicar el método, ya que éste no considera depósitos ni estaciones de bombeo. De esta forma se sustituyen los elementos anteriores por embalses y se analizan uno a uno en función de los requerimientos de los embalses y bombas.

Otro de los investigadores fue *Matos, J. P et al.*, de la Technical University de Lisboa, Portugal. Este grupo trabajó tanto con EPANET como con MATLAB. Su esfuerzo se centró en remarcar las variables de decisión del problema y reducir al mínimo el juicio humano. Realizaron una optimización de casi 24 horas con un algoritmo genético estructurado eliminando acciones de escritura en el disco para agilizar así los cálculos. Dicho algoritmo se introdujo en EPANET, el cual se había traducido previamente al lenguaje Java.

El algoritmo genético estructurado se caracteriza por ser función de los distintos criterios de diseño del problema. En el caso de que no se alcancen esos criterios, se penalizará la solución obtenida. De este modo, cada objetivo forma parte de una estructura que se evalúa por separado para definir una solución global.

Qi Wang et al., de la Universidad de Exeter, en UK, presentó una solución muy similar a las anteriores. Ellos propusieron un método híbrido de búsqueda multi-fase que empleaba dos procedimientos: *AMALGAM (Vrugt & Robinson, 2007)* y *NSGA-II (Deb et al., 2002)*; en combinación con EPANET. El proceso se dividió en tres fases. En la primera de ellas se optimizaba la red en operación normal empleando los algoritmos indicados; en la segunda fase se realizaba un test de vulnerabilidad bajo fallo de la red; y en la tercera se realizaba un proceso de selección de la mejor solución.

AMALGAM o también conocido como “*a multialgorithm, genetically adaptative multiobjective*” es un algoritmo que permite mantener una determinada diversidad en una población de soluciones y explorar soluciones por recombinación de estas en función de su similitud. Este método ofrece nuevas oportunidades para resolver problemas de optimización que se suponían intratables, como por ejemplo la aplicación de un algoritmo a espacios de soluciones demasiado grandes. *AMALGAM* es un método muy flexible que puede acomodarse a cualquier modelo de evolución de la población. Sin embargo, *Qi Wang et al.* consideraron también implementar el método *NSGA-II*, o también llamado “*nondominated sorting genetic algorithm II*”. *NSGA-II* es un algoritmo multiobjetivo que se caracteriza por su compleja computación, su búsqueda no elitista y por la necesidad de especificar un parámetro que asegure la diversidad. Se demuestra además que en muchos problemas, el *NSGA-II*, es capaz de encontrar

soluciones mucho más extendidas y una mejor convergencia que su predecesor, el *NSGA*.

De nuevo, la Universidad de Exter, UK, presentó ahora junto con *M.S.Morley et al.* otra solución al problema, en este caso, ayudándose de un algoritmo evolutivo para la resolución de un problema de optimización multiobjetivo. El algoritmo empleado se denominaba "*Omni-Optimizer evolutionary algorithm*" (Deb & Tiwari, 2008), el cual se completa con una versión híbrida de los mismos elementos que conforman los algoritmos diferenciales. En la publicación "*European Journal of Operational Research*" se explica con claridad cómo funciona el "*Omni-Optimizer evolutionary algorithm*". Este algoritmo puede emplearse tanto para una optimización simple como para una multiobjetivo y posee la ventaja de que además tiene implementado otros algoritmos que resuelven otros problemas más simples referidos a la optimización, como encontrar la única solución óptima de un problema de objetivo único, encontrar la única solución óptima de problemas multiobjetivo, o encontrar las soluciones múltiples de problemas de objetivo único. Cada tipo de algoritmo es eficiente en su ámbito de utilización. No es lo mismo emplear un algoritmo condicionado al cumplimiento de un único objetivo que al cumplimiento de varios. Por ello es que aparece el "*Omni-Optimizer evolutionary algorithm*", ya que se adapta a diversos tipos de problemas: objetivo único o múltiple y soluciones única o múltiple.

El algoritmo propuesto se encuentra dentro de la categoría de algoritmos genéticos, ya que se basa en diversos operadores genéticos como el cruce y la mutación para generar nuevas soluciones e imitar el proceso natural de la evolución. El algoritmo en cuestión emplea combinaciones de dos escalones de aptitud, en el primero del cual emplea únicamente los fenotipos, al contrario que la mayoría de algoritmos genéticos los cuales emplean fenotipos y genotipos conjuntamente. Además, el "*Omni-Optimizer evolutionary algorithm*" trata tanto con valores reales continuos como con valores discretos variables mediante código binario y operadores de variación de parámetros reales.

El algoritmo de optimización "*Omni-Optimizer evolutionary algorithm*" emplea el método "*latin-hypercube*" (T.R. Cruse, 1997) para generar la primera población. Es un

método que de forma estadística, genera una serie de valores de los parámetros que son plausibles para una población. Esta población, por tanto, se obtiene de forma aleatoria o preasignada pero basada siempre en un muestreo uniforme. En cada iteración, se crea una población cada vez mayor, aproximadamente de un orden dos veces mayor a la anterior. A continuación, se eligen cuatro individuos en función de la distancia de sus genotipos empleando la estrategia del vecino más próximo; y dos operadores de selección se mejoran para así seleccionar dos soluciones nuevas. Es decir, el primer individuo se elige de forma aleatoria y el segundo es aquel que se encuentra más cercano al primero dentro del espacio de los genotipos disponibles. Esto ayuda a preservar las posibles multi-soluciones óptimas y a acelerar el ratio de convergencia del algoritmo. El operador de selección por torneo hace que las soluciones posibles aparezcan antes que las soluciones inviables, que las soluciones no dominantes superen a las dominantes y que las soluciones menos pobladas se antepongan a las que menor población tengan para mantener la biodiversidad. Una vez realizada la selección, las dos soluciones parentales obtenidas se recombinan y mutan para obtener dos soluciones iniciales. En el *“Omni-Optimizer evolutionary algorithm”* se emplea el operador de cruce denominado *SBX* o *“Simulated Binary Crossover”* (Deb & Agrawal, 1995) y una variación de la mutación polinómica para variables reales (Deb & Goyal, 1996). El operador de intercambio genético *SBX* se caracteriza porque la codificación de las variables se elimina y la serie de descendientes se crea a partir de una distribución de probabilidades que depende de la posición de la generación superior. En el caso de variables binarias, se emplea el cruce de dos puntos y mutación escalonada.

Por otro lado, la variación de la mutación polinómica para variables reales emplea una combinación de algoritmos genéticos binarios y reales, para que así cualquier variable, ya sea continua o discreta, pueda manejarse sin problemas.

Tanto la población inicial como la nueva solución obtenida tras el cruce y la mutación se vuelven a combinar, ordenando de mayor a menor las soluciones ofrecidas. De este modo se descartan las peores soluciones y se mantienen las mejores para la siguiente operación. Si no hubiese un mínimo de soluciones adecuadas, se crearían otras nuevas. De este modo se van generando nuevas soluciones a partir de otras previas. Solo se

emplearan aquellas soluciones previas que cumplan los condicionantes que requiere la solución. Las iteraciones continúan hasta que se acaben los criterios de selección o bien cuando se alcance un máximo número de generaciones. Finalmente, las soluciones del algoritmo de *M.S. Morley et al.* se ejecutaban con EPANET en paralelo a dicho algoritmo.

El procedimiento seguido por el "*Omni-Optimizer evolutionary algorithm*" es similar al algoritmo *NSGA-II* mencionado con anterioridad pero con algunas diferencias, principalmente en lo que se refiere a la selección y a los operadores de mutación.

La gran mayoría de las soluciones aportadas al para resolver la red se basaron en estudios previos. Inicialmente, estos estudios se basaban únicamente en los costes de capital y de operación en función de unas condiciones de funcionamiento (Alperovits & Shamir, 1977). Este tipo de problemas llegó a resolverse mediante programación lineal en términos de gradientes, la cual consistía en descomponer jerárquicamente el problema de optimización.

Más adelante se comenzaron a considerar metodologías que abarcaban también el diseño de redes bajo un amplio campo de condiciones de operación, incluso variabilidad de la demanda o fallo electromecánico (Bao & Mays, 1990; Lansey & Mays, 1989; Su et al., 1987). El primero de estos autores incluso llegó a emplear simulaciones de Monte Carlo para la optimización.

Como consecuencia, el diseño óptimo de redes para un problema multiobjetivo ofreció una serie de posibles soluciones, siempre dependientes de la capacidad de decisión del técnico.

El resolver problemas de distribución de agua conlleva trabajar con varios problemas tipo como los siguientes:

- Diseño de nuevas zonas de la red.
- Mejora de la red existente teniendo en cuenta el incremento de la demanda por el aumento de la población o su nivel de vida.
- Mantenimiento de la red existente para limitar la ocurrencia de roturas de tuberías y fugas.

- Diseño a tiempo real o a pequeña escala de tiempo que abarque un ajuste dinámico en función de la variabilidad de la demanda.

Todas estas situaciones han sido solventadas con anterioridad mediante investigaciones de diversos autores. Para problemas de diseño se tiene que *Alperovits & Shamir, 1977; Simpson et al, 1994; y Savic & Walters, 1997;* conforman algunas de las soluciones más conocidas. En el caso del mantenimiento de redes, algunos de los estudiosos que abarcaron con éxito esta problemática fueron *Arulraj & Rao; 1995; Atiquzzaman et al., 2006; y Alvisi & Franchini, 2009.* Por último, algunas referencias en cuanto a la resolución de problemas de optimización de redes para controles en tiempo real son *Jowitt & Germanopoulos, 1992; Ormsbee & Lansey, 1994; Martinez et al., 2007; o Salomons et al., 2007.*

Todos estos diseños se han realizado de forma separada. Y para el problema que presenta este documento, deben tenerse en cuenta como un conjunto. *Stefano Alvisi et al.,* de la Universidad de Ferrara, Italia, llegó a esta misma conclusión. Para solventarlo dividió el problema en tres pasos, como muchos antes lo habían hecho. En la primera parte se reducía el problema al máximo teniendo en cuenta únicamente un juicio técnico y bajo condiciones normales de operación. El segundo paso consistía en optimizar el problema empleando un algoritmo genético multiobjetivo definido por *Deb et al. en 2002* y conocido por el nombre de *NSGA-II*, el cual ya ha sido mencionado. Y el tercer y último paso realizaba el ajuste de las soluciones óptimas para poder cumplir la situación de fallo del sistema.

Russell Bent et al., del laboratorio nacional de Los Alamos, Nuevo México, presentó otra solución al problema basada en el planeamiento de sistemas de distribución de agua en expansión. El algoritmo utilizado combina la robustez de la búsqueda local con la flexibilidad de la búsqueda global. El algoritmo descompone el problema en otros subproblemas empleando un procedimiento de búsqueda local denominado "*Large Neighborhood Search*" (*Shaw, 1998*). Dicho procedimiento se basa en un proceso continuo de *relajación* y de *re-optimización* del problema del transporte. La *relajación* es un término que se aplica a la situación en la cual el viajante se desvincula de la ruta de viaje. En este momento es cuando la ruta de viaje se *re-optimiza* sobre las nuevas

posiciones, incluyendo aquella que el viajante ha empleado al *relajarse*. El proceso de reinsertión ayuda a emplear la programación condicionada en toda su amplitud y por la vía heurística.

Los únicos factores que pueden afectar a los operadores de búsqueda son, en primer lugar, como se escogen a los usuarios que se eliminan; y en segundo lugar, el proceso de reinsertión de los visitantes. Normalmente se eliminan y reinsertan usuarios teniendo en cuenta características geográficas. Aquellos visitantes que estén más cerca de aquellos que conforman la ruta, tendrán más posibilidades de incluirse en el proceso. Y aquellos que se encuentren más lejos, serán los candidatos a desaparecer.

De este modo puede llegarse a completar una red arborescente con cada uno de los caminos seguidos por los individuos que se han ido relajando. Es importante hacer notar que el tamaño se limita con la ayuda de un límite superior en cuanto al número de visitantes previamente prefijado, el cual se alcanzará siempre y cuando el nuevo visitante ha supuesto una mejora en la solución respecto a la solución anterior.

Desde la Universidad de Korea, *Joong Hoon Kim et al.*, presentaron una solución basada en *Harmony Search Algotihm*, método meta-heurístico estudiado previamente por *Zecchin et al. en 2006*, ente otros. Esta técnica es muy reciente. Trata de imitar el proceso de improvisación que realiza una orquesta en la composición de una melodía que se considera perfecta, considerando factores como el ancho de banda o el par. Otra analogía muy común viene relacionada con la conocida optimización de la colonia de hormigas, el cual es un proceso basado en el comportamiento de una colonia de hormigas y su habilidad para determinar la ruta más corta entre el nido y los recursos alimenticios. El método consiste en emplear la información que adquieren a partir del estudio del espacio que las rodea para así resolver dos aspectos conflictivos del algoritmo de búsqueda: exploración y explotación. La exploración consiste en la capacidad de algoritmo para buscar ampliamente a través del espacio de búsqueda del problema; y explotación es aquella capacidad del algoritmo para buscar localmente dentro de aquellas soluciones consideradas como válidas previamente.

Para minimizar la edad del agua, éste último autor se basó en la minimización del volumen de los tanques; y para minimizar las emisiones de gases, minimizó el tamaño

de las bombas y de las tuberías, todo ello aplicándolo sector a sector para posteriormente obtener una solución para la red completa.

Bryan A. Tolson et al. de la Universidad de Waterloo, en Canadá, ofrecieron una solución muy similar a las anteriores. Dividieron el problema en cinco etapas. La primera etapa consistía en encontrar una solución factible bajo condiciones normales de funcionamiento de la red para a continuación emplear una técnica de algoritmos de optimización multiobjetivo denominada "*Pareto-Archived Dynamically Dimensioned Search*" (*Asadzadeh & Tolson, 2012*). Las soluciones ofrecidas en la segunda etapa mencionada pasaban a una tercera etapa en la cual se hacían pasar por otra fase de optimización. Una vez obtenidas las soluciones, se pasaba a la cuarta fase en la que se evaluaba la red en condiciones de fallo para así determinar qué bombas deberían ser complementadas con los generadores diesel. Finalmente, en la última y quinta fase se determinaba la mejor solución.

El método "*Pareto-Archived Dynamically Dimensioned Search*" o *PA-DDS* emplea una búsqueda discreta y archiva todas aquellas soluciones no dominantes que se han ido obteniendo. Además trabaja conjuntamente con una estrategia de búsqueda discreta local para mejorar su rendimiento cuando se encuentra cercano al límite de la búsqueda. Este método se caracteriza, por tanto, por la existencia de un único parámetro en el algoritmo y por el ajuste de la estrategia de búsqueda al empleo óptimo del tiempo computacional.

En total, *Bryan A. Tolson et al.* realizaron 20.000 diseños factibles mediante este procedimiento, de los cuales presentaron una solución que posiblemente se encuentre entre las tres mejores presentadas hasta el momento.

El investigador que obtuvo el menor coste de la red fue *V. Kandiah et al.*, de la Universidad de North Carolina, USA. Este grupo multidisciplinar desarrolló las soluciones con la ayuda de EPANET y de un algoritmo de evolución, "*Evolutionary Algorithm*", así como de una comprobación previa y otra posterior de las soluciones, basadas en el juicio ingenieril. Debido al alto tiempo de computación requerido, permitieron múltiples simulaciones en paralelo en un ordenador de alto rendimiento de Universidad de Carolina denominado "*Ingenia*". Dicho ordenador es un clúster de

Linux en paralelo con 6 nodos, cada uno de los cuales con 4 procesadores de 8 núcleos, lo que favoreció el hallazgo de la solución más óptima en cuanto a costes de la red.

Un algoritmo de evolución utiliza un concepto similar al del algoritmo genético para lograr un objetivo en la optimización del problema. Las principales cualidades que tiene es que posee una codificación discreta o continua y una selección aleatoria. Sus operadores vienen determinados por el problema a resolver. En los algoritmos genéticos, los padres suelen ser reemplazados por los hijos manteniendo al mejor individuo de la población anterior, pero en los algoritmos de evolución se realiza un ranking de descendencia y se elige de forma determinística a aquellos mejor adaptados.

Por último, se considera que *Michele Guidolin et al.*, de la Universidad de Exeter, UK, ha sido el que ha obtenido la solución más adecuada. Michele ha calculado las emisiones de gases invernadero más pequeñas y la perfecta calidad del agua, y aun sin obtener el coste más bajo de la red, ha aventajado a sus competidores en el conjunto del problema. La optimización de la red de distribución se ha realizado mediante una versión paralela del ϵ -NSGAII (*Tang et al., 2007*). El método ϵ -NSGAII, o “*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II*”, fue desarrollado originariamente del NSGAII (*Deb et al. 2002*), mencionado anteriormente, para reducir la sensibilidad del tamaño de las poblaciones y mejorar el mantenimiento de la diversidad empleando el dominio ϵ . El concepto de dominio- ϵ viene de la necesidad de resolver problemas ingenieriles donde las variables objetivo necesitan una precisión que a menudo se pierde debido al desconocimiento de los datos y de los límites de diseño.

Se ha demostrado recientemente que el método ϵ -NSGAII es competitivamente superior a otros algoritmos multiobjetivo actuales, como por ejemplo el NSGAII, para aplicaciones relacionadas con los abastecimientos de agua. Se puede emplear tanto para aplicaciones discretas o como continuas.

El primer objetivo en el desarrollo del ϵ -NSGAII es proporcionar un algoritmo de evolución multiobjetivo eficiente y robusto el cual minimice la necesidad de los tradicionales algoritmos de evolución en cuanto a la parametrización. También busca el permitir al usuario el dirigir el problema hacia unos determinados objetivos previos,

empleando para este fin el menor tamaño de la población necesario y la eliminación de aplicaciones de prueba y error para determinar parámetros de búsqueda.

Como se ha comentado, el ϵ -NSGAII proviene del NSGAII. Al nuevo método se le añade la dominancia ϵ y un tamaño de población adaptativo para minimizar la necesidad de una calibración de los parámetros demasiado extensa. El concepto de dominancia ϵ permite al usuario especificar la precisión requerida para cuantificar cada objetivo. Se emplea para ello dos etapas. En primer lugar se aplica al espacio de búsqueda del problema una rejilla ϵ determinada. Cada bloque contiene múltiples soluciones las cuales son examinadas y solo aquella solución más cercana a la esquina inferior izquierda del recuadro se mantiene para la siguiente etapa.

En la segunda etapa, se estrecha el margen de soluciones. De este modo, si se elige un tamaño ϵ menor, la precisión de la solución será mayor.

El ϵ -NSGAII emplea además una condición de búsqueda que se adapta automáticamente al tamaño de la población y a la complejidad del problema. Dicha condición depende del número de soluciones no dominadas encontradas por el algoritmo. Cada una de las soluciones de cada generación se va almacenando y se van empleando para dirigir las siguientes búsquedas. De este modo, el tiempo computacional se irá reduciendo a medida que se avanza con el procedimiento. La búsqueda terminará cuando se hayan empleado todas las poblaciones necesarias.

El ϵ -NSGAII emplea una continuación temporal para permitir una correcta diversidad de la población y así extender el tiempo de exploración activa. La continuación temporal resulta de combinar soluciones aleatorias con miembros que se han ido archivando cada vez que el tamaño de la población se ha adaptado en función de la dominancia ϵ . De este modo se demuestra que el ϵ -NSGAII ofrece soluciones de calidad con un tiempo de computación no muy elevado.

Aun así, *Michele Guidolin et al.* debe su primer puesto a que el problema ha sido resuelto en un superordenador de la Universidad de Exeter de 150 nodos de 6 núcleos cada uno, el cual ha ofrecido la mejor solución del problema.

Una vez conocidas las soluciones presentadas y cada una de sus bases científicas y teóricas se puede dar paso a la evaluación que se ha realizado en este Trabajo Fin de Máster así como los modelos matemáticos empleados.

6. MODELO MATEMÁTICO A EMPLEAR PARA SU RESOLUCIÓN

6.1 EPANET

Para la resolución del problema mencionado en el este documento se emplea el conocido programa EPANET 2.0 vE. Éste fue desarrollado por la U.S. EPA para realizar simulaciones en período extendido (o cuasi-estático) del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de tuberías a presión. En la figura inferior se puede observar el lugar que ocupan estos modelos dentro los modelos de análisis existentes.

Fue traducido al español por personal del Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos de la Universidad Politécnica de Valencia. Esta traducción supone la modificación parcial de algunas de las opciones por defecto del programa, adaptándolas a los estándares españoles.

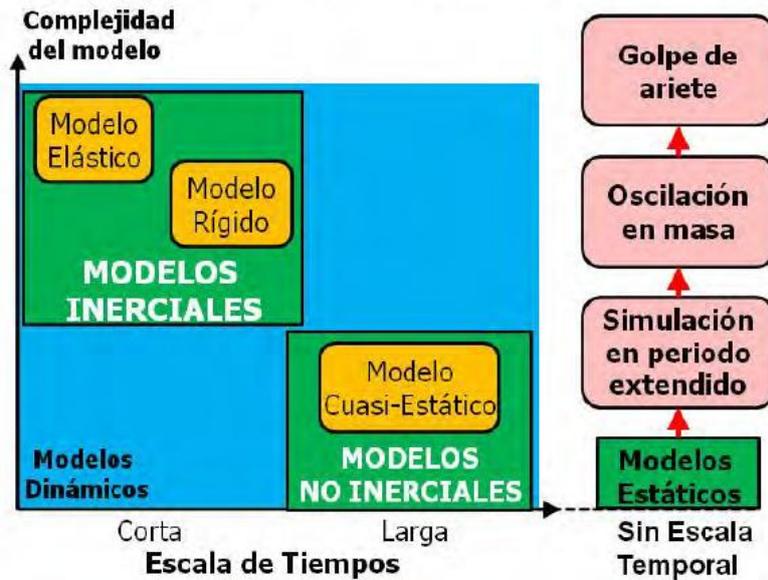


Figura 20. Modelos hidráulicos existentes. (Fuente: "Análisis y diseño de redes de distribución de agua mediante Epanet 2 vE" Pedro L. Iglesias; Fco. Javier Martínez Solano. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Editorial UPV. 2012)

EPANET permite seguir la evolución del flujo del agua en las tuberías, de la presión en los nudos de demanda, del nivel del agua en los depósitos, y de la concentración de cualquier sustancia a través del sistema de distribución durante un período prolongado de simulación.

El programa EPANET es un simulador compuesto por dos módulos. Un módulo de calidad, que en este caso es indiferente; y un módulo de análisis hidráulico. El módulo de análisis hidráulico permite simular el comportamiento dinámico de la red bajo determinadas leyes de operación. Admite tuberías, bombas de velocidad fija y variable, válvulas de estrangulación, reductoras, sostenedoras, controladoras de caudal y muchas otras variables para poder calcular el caudal circulante, la presión en los nudos, el nivel de agua en los depósitos y otros parámetros de calidad.

Las principales características del modelo de cálculo hidráulico de EPANET son:

- No existe límite en el tamaño de la red que se desea analizar.
- Calcula las pérdidas por fricción en las conducciones mediante las expresiones de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach o Chezy-Manning.
- Incluye pérdidas menores en elementos como codos, acoplamientos, etc.

- Modela bombas funcionando tanto a velocidad de giro constante como a velocidades de giro variables.
- Calcula la energía consumida y el coste de bombeo de las estaciones.
- Modela diferentes tipos de válvulas, incluyendo válvulas de regulación, válvulas de retención, válvulas de aislamiento, válvulas reductoras de presión, válvulas de control de caudal, etc.
- Permite el almacenamiento de agua en tanques que presenten cualquier geometría (sección del tanque variable con la altura del mismo).
- Da la posibilidad de establecer diferentes categorías de consumo en los nudos, cada una de ellas con su propia curva de modulación.
- Modela consumos dependientes de la presión que salen al exterior del sistema a través de emisores.
- Permite utilizar controles de tiempo o sistemas de regulación más complejos mediante consignas.

Los depósitos en EPANET vienen definidos por 6 variables: diámetro, cota, nivel mínimo, nivel máximo y nivel inicial. En el punto 4.5.2 se habló de las condiciones que deben darse en los depósitos para una situación de operación normal, por lo que si el nivel de agua en el depósito debe estar entre el mínimo y el máximo; el volumen que queda entre el nivel mínimo y la elevación será el volumen de reserva o de emergencia. Si una simulación requiere agua de un depósito que ya se encuentra al nivel mínimo, EPANET desconectará el depósito de la red. Consecuentemente el nivel del depósito se mantendrá en el mínimo.

Por otro lado, para comprobar que el depósito no se vacía durante una simulación, se debe comprobar que el nivel de agua en el depósito no debe ser igual al nivel mínimo en dos o más espacios de tiempo consecutivos, observando el campo “Presión” en la ventana de propiedades del depósito.

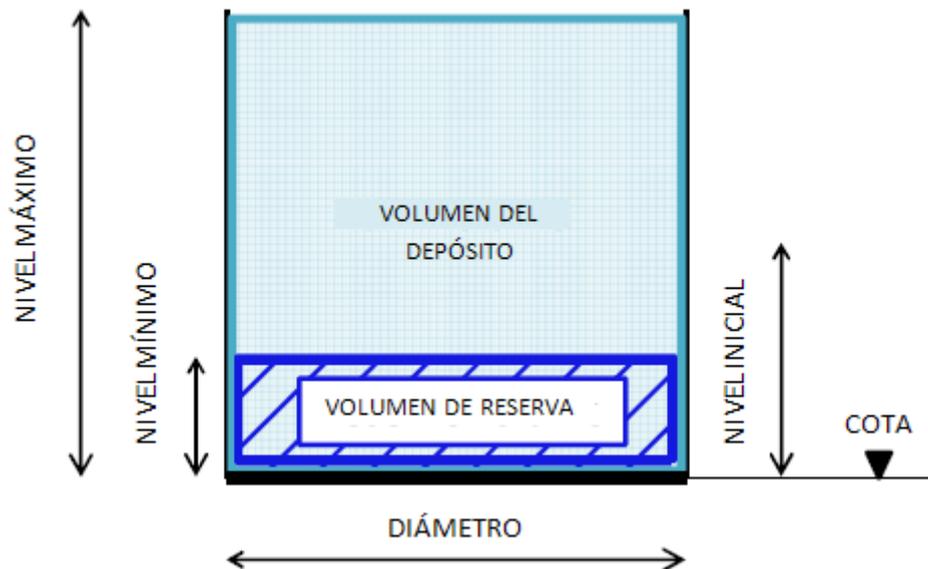


Figura 21. Modelo de depósito empleado por EPANET. (Fuente: “Análisis y diseño de redes de distribución de agua mediante Epanet 2 vE” Pedro L. Iglesias; Fco. Javier Martínez Solano. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Editorial UPV. 2012)

A la hora de modelar nuevos depósitos, en EPANET simplemente se incrementará el diámetro del depósito inicial. Así, el volumen resultante es igual al ya existente más el volumen del nuevo depósito.

Dados los archivos de EPANET se puede entrar en el programa BWNII. Dicho programa agrupa tanto las operaciones a realizar sobre los archivos de extensión .inp de EPANET como la optimización de la red con algoritmos pseudo-genéticos. Éste algoritmo pseudogenético ha sido desarrollado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia y se denomina Holored II. Su ejecución se realiza a partir del desplegable de la pestaña superior derecha del programa BWNII denominada “Optimizar”.

Como se observa en la interfaz del programa BWNII, se puede comprobar que el archivo .inp de EPANET es correcto fijándose en los apartados de *Summary*, *Times* y *Options*. A continuación se puede realizar con la pestaña *BWN* → *Comprobar* la simulación del archivo y calcular los tres criterios. Así mismo se puede jugar con los distintos valores de los parámetros de costes, de calidad del agua y de gases emitidos a la hora de optimizar. De este modo puede obtenerse los máximos valores para cada parámetro de forma individual. También se puede comprobar si la solución adoptada

cumple los requisitos definidos por el enunciado, tales como presiones mínimas y volúmenes de los depósitos, así como obtener los valores de cada uno de los elementos de la función objetivo.

Una vez comprobado lo anterior se pasa a optimizar con la ayuda de Holored II. Este programa obtendrá la mejor solución a partir de los datos iniciales. Una vez calculada, puede volverse a ejecutar BWNII y seguidamente Holored II hasta llegar al óptimo.

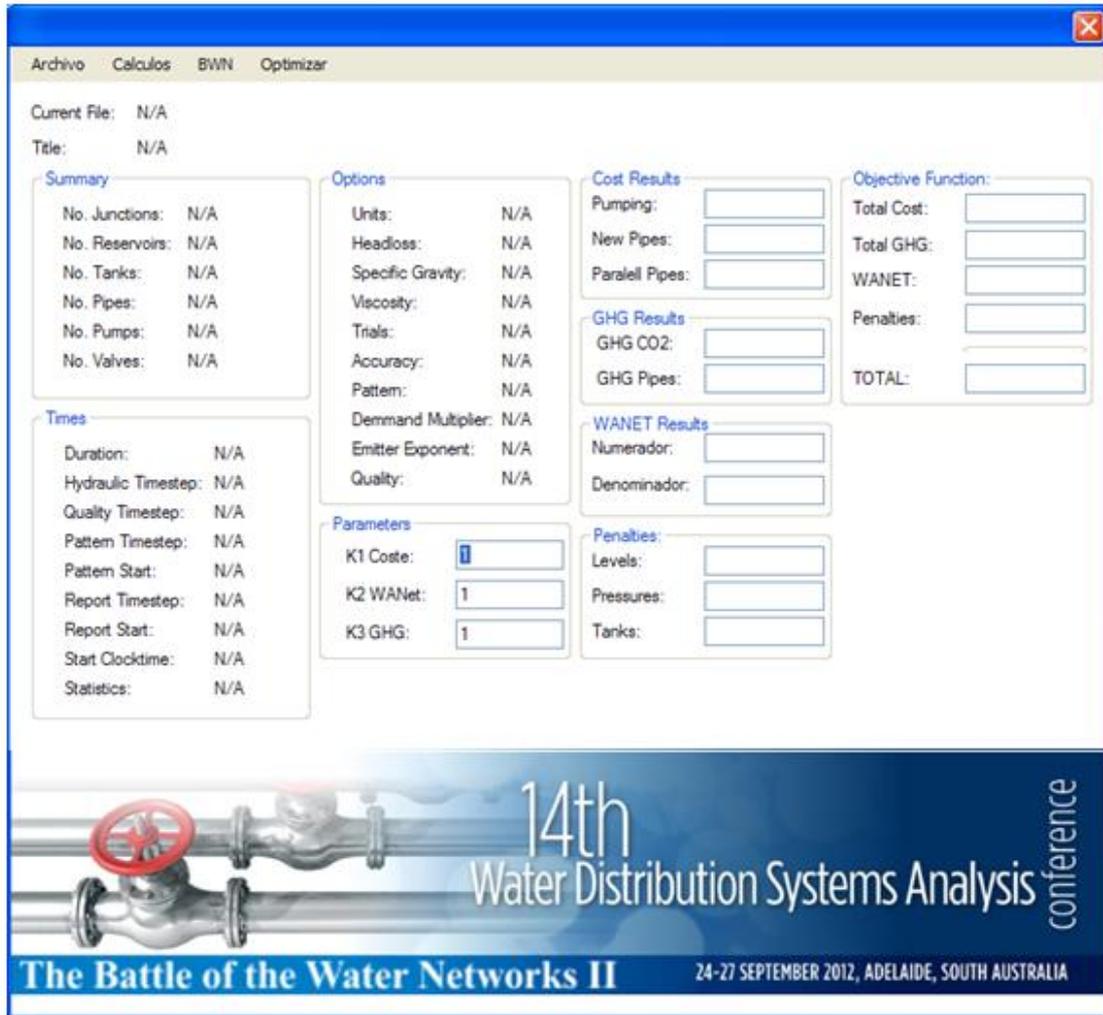


Figura 22. Interfaz del programa BWNII que incluye al optimizador Holored II.

6.2 Holored II

Holored II es una herramienta de optimización diseñada por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la UPV con el objetivo minimizar los costes energéticos operacionales de una red de abastecimiento de agua. Este software utiliza una base optimizadora basada en algoritmos genéticos. Sus soluciones son resultado de operaciones con cadenas que contienen las variables de cada elemento a optimizar, realizando mutaciones y cruzamientos entre dichas cadenas. Cuando se llega a un óptimo deseado de alguno de los parámetros establecidos, el programa lo considera como solución óptima, deteniéndose en esa solución.

Para ejecutarlo se necesita de un modelo de análisis hidráulico, EPANET, en base al cual puede evaluar todos los parámetros asociados, ya que a medida que el software se ejecuta, realiza continuas llamadas a EPANET para evaluar cada cadena del proceso de optimización.

Para su funcionamiento se requiere de dos tipos de archivos. El primero de ellos es un archivo .inp, el cual contiene todas las características de la red a optimizar. Y el segundo es un archivo .opt, el cual tiene identificadas todas las opciones de optimización de cada elemento así como el tipo de optimización. El primero de ellos se obtiene directamente de EPANET y el segundo de un editor de texto común y corriente. Al tener la condición de editor de texto, se puede añadir presiones mínimas en los nodos o condiciones de optimización de bombas y válvulas.

La combinación de la información del archivo .inp y del fichero .opt junto con EPANET define la estrategia a seguir en la optimización de la red.

El fichero .opt es resultado de completar en Holored II la siguiente información según el tipo de elemento:

- Bombas. Las posibilidades de control existentes son:
 - EPANET: Implica que la bomba en cuestión funcionará como indiquen los controles ingresados en EPANET.

- TANK: Indica que el arranque y paro de la bomba está asociado a la variación del nivel de un depósito. El depósito debe especificarse en la herramienta de edición del software.
 - TIME: Significa que la optimización de la bomba será en forma horaria. Necesita de un número límite de operaciones de arranque y paro.
- Válvulas: Su optimización es similar al caso de las bombas, ya que se puede realizar en función de un depósito (TANK), por temporización (TIME) o por controles de EPANET, pero además existe la posibilidad de optimizar su consigna (SETTING) en la cual se debe ingresar los valores máximo y mínimo que puede tomar dicha consigna.
 - Tuberías: Funcionan exactamente igual que las bombas. La única diferencia es el estado, ya que pueden pasar de abiertas a cerradas y viceversa. Esto permite evaluar posibles fallos del sistema.
 - Nodos: Su localización en Holored II está fundamentada en posibles penalizaciones al sistema, ya que no están sujetos a optimización y son solo utilizados para comparar con las presiones mínimas necesarias.

Conocidos los elementos y sus variables, Holored II es capaz de crear de forma aleatoria cadenas de soluciones para llegar a la optima. Tiene en cuenta, sin embargo, diversas penalizaciones relacionadas con presiones en los nodos, niveles de los depósitos y horarios tarifarios eléctricos que se aplican al coste final de la optimización. Las penalizaciones son:

- Presiones: Si no se cumple la presión mínima en un nodo, se imputara un coste igual al necesario para bombear con la bomba de mayor coste a modo de suplir esa presión necesaria.
- Niveles: Si los niveles en los depósitos al final del día no son iguales que al comienzo de éste, se imputara un coste igual al necesario para reponer la

diferencia existente con la bomba que suponga un mayor coste en la instalación.

- Tarifas eléctricas: A modo de suplir las diferencias de nivel o de presión presentes en el sistema, se admitirá que todas estas penalizaciones de bombeo serán siempre a coste de horario punta.

Los operadores buscan siempre minimizar el número de maniobras diarias manteniendo las presiones necesarias, por lo que un límite en dicho número sería aconsejable. Holored II es capaz de incorporar a su optimización el número de maniobras máximas permitidas en cuanto a paradas y arranques de las bombas. Sin embargo, en dicho documento no se han tenido en cuenta, aun cuando sería muy útil ya que al poseer un número limitado de operaciones en las bombas, la cadena empleada para generar el óptimo sería más pequeña. Como los costes de mantenimiento son despreciables, no se ha podido hacer uso de dicha ventaja.

Una vez definidas las variables a modificar para llegar al óptimo, se necesita ajustar los parámetros del algoritmo genético incorporado en Holored II. Los parámetros a ingresar son:

- Tamaño de población. Normalmente es el doble del número de elementos presente en una cadena.
- Índice de cruzamiento. Valor entre 0.6 y 1.0.
- Índice de mutación. Valor menor a 0.1, y a ser posible que sea el inverso del número de elementos presentes en una cadena.
- Número de iteraciones: Se recomienda del orden de magnitud del tamaño de población o superior.

Recordar que Holored II trabaja con un algoritmo genético de tipo pseudo-genético descrito anteriormente en el apartado 3.7.1.

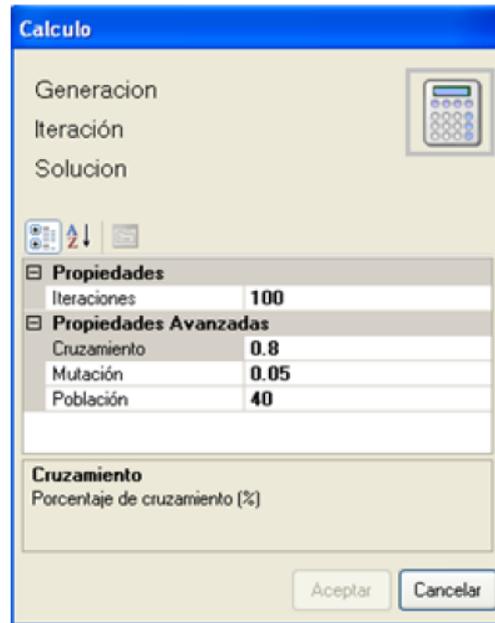


Figura 23. Parámetros a ingresar en Holored II en el proceso de optimización.

Una vez ingresados todos los parámetros en Holored II, la optimización da comienzo. A medida que transcurre el tiempo se van generando poblaciones de soluciones aleatorias que se cruzan entre ellas en función de los índices ingresados hasta que una solución no varía durante una cantidad de generaciones o iteraciones.

La solución que deja de variar durante esas generaciones se puede guardar en formato .inp, y por lo tanto contendrá los valores asociados a la red inicial pero optimizada. Eso se traduce en una modificación en los controles simples de bombas, válvulas y líneas del sistema.

7. EVALUACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA MEDIANTE ALGORITMOS PSEUDOGENETICOS

La red de estudio, tal y como se ha definido anteriormente, está formada por un embalse, siete depósitos, 462 tuberías, 11 bombas, cinco válvulas y 399 nudos.

Para cada una de las estaciones de bombeo se ha definido un control. Este control supone una acción de arranque y parada de las bombas de dicho sector. Por ello cada una de las bombas está controlada (arranque y paro) por el nivel de agua en uno de los depósitos de la red. Dichos niveles de arranque y paro han sido optimizados como parte de la obtención de la solución final seleccionada.

Los controles iniciales de cada elemento se muestran en la tabla siguiente. Estos controles pueden modificarse atendiendo a la resolución óptima del problema.

Tabla 9. Controles iniciales de cada elemento en el archivo original.

Elemento	Parámetro	Nudo Control	Datos Nudo Control		Tipo Control	Valor Control
PU1	OPEN (1)	T1	Z _{min}	0.0	BELOW	4.0
PU1	CLOSED (0)	T1			ABOVE	6.3
PU2	OPEN (1)	T1	Z _{max}	6.5	BELOW	1.0
PU2	CLOSED (0)	T1			ABOVE	4.5
PU3	OPEN (1)	T1	Z _{max}	6.5	BELOW	0.5
PU3	CLOSED (0)	T1			ABOVE	2.5
PU4	OPEN (1)	T3	Z _{min}	0.0	BELOW	3.0
PU4	CLOSED (0)	T3			ABOVE	5.3
PU5	OPEN (1)	T3	Z _{max}	6.75	BELOW	1.0
PU5	CLOSED (0)	T3			ABOVE	3.5
PU6	OPEN (1)	T4	Z _{min}	0.0	BELOW	2.0
PU6	CLOSED (0)	T4			ABOVE	3.5
PU7	OPEN (1)	T4	Z _{max}	4.7	BELOW	3.0
PU7	CLOSED (0)	T4			ABOVE	4.5
PU8	OPEN (1)	T5	Z _{min}	0.0	BELOW	1.5
PU8	CLOSED (0)	T5			ABOVE	4.5
PU9	OPEN (1)	T5	Z _{max}	4.5	BELOW	0.5
PU9	CLOSED (0)	T5			ABOVE	3.0
PU10	OPEN (1)	T7	Z _{min}	0.0	BELOW	2.5
PU10	CLOSED (0)	T7			ABOVE	4.8
PU11	OPEN (1)	T7	Z _{max}	5.0	BELOW	1.0
PU11	CLOSED (0)	T7			ABOVE	3.0
V2	OPEN (1)	T2	Z _{min}	0.0	BELOW	0.5
V2	CLOSED (0)	T2	Z _{max}	5.9	ABOVE	5.5

Las unidades de longitud son metros, de volumen litros por segundo y de tiempo, horas.

Los patrones de consumo obtenidos a partir de los datos iniciales del archivo de EPANET y mediante unos cálculos sencillos en Excel, son los que se muestran en las siguientes gráficas. Por ejemplo, el caudal de cada sector en un instante de tiempo $Q_i(t)$ vendrá definido por:

$$Q_i(t) = Q_{\text{medio},i} \times CM_i(t) \quad (7.1)$$

siendo $Q_{\text{medio},i}$ el caudal medio de cada sector i considerado como la suma de las demandas de los nudos de dicho sector i , y $CM_i(t)$ el coeficiente de modulación del

patrón de consumo de cada sector i en un tiempo t , ambos obtenidos del archivo original pues son datos del problema.

Se ha tenido en cuenta tanto el funcionamiento normal o funcionamiento para 1 hora, como el funcionamiento de emergencia o funcionamiento para 2 horas.

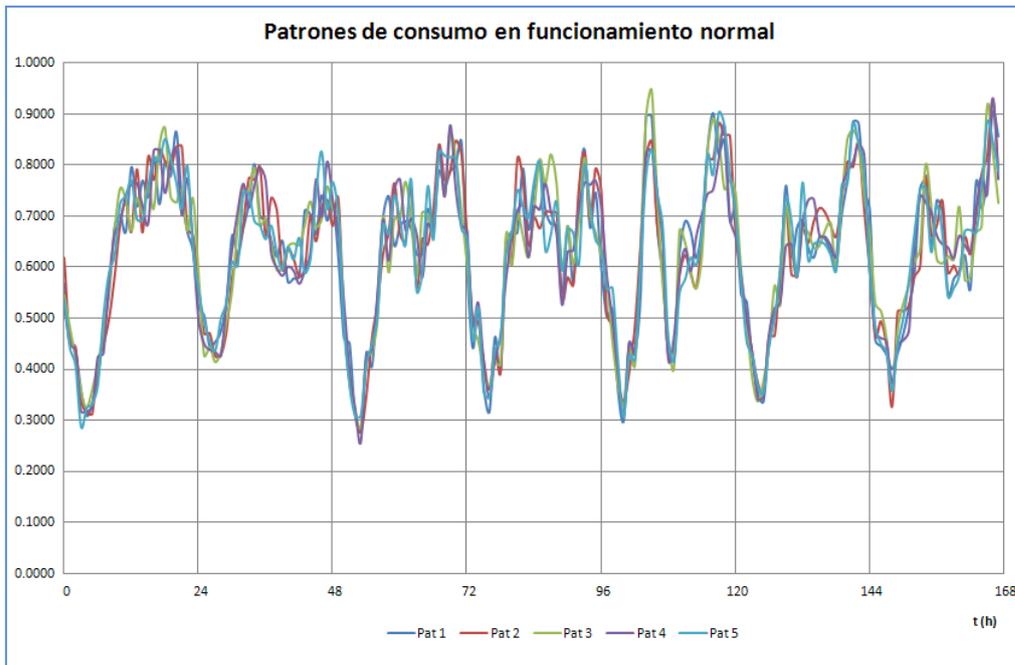


Figura 24. Patrones de consumo en funcionamiento normal.

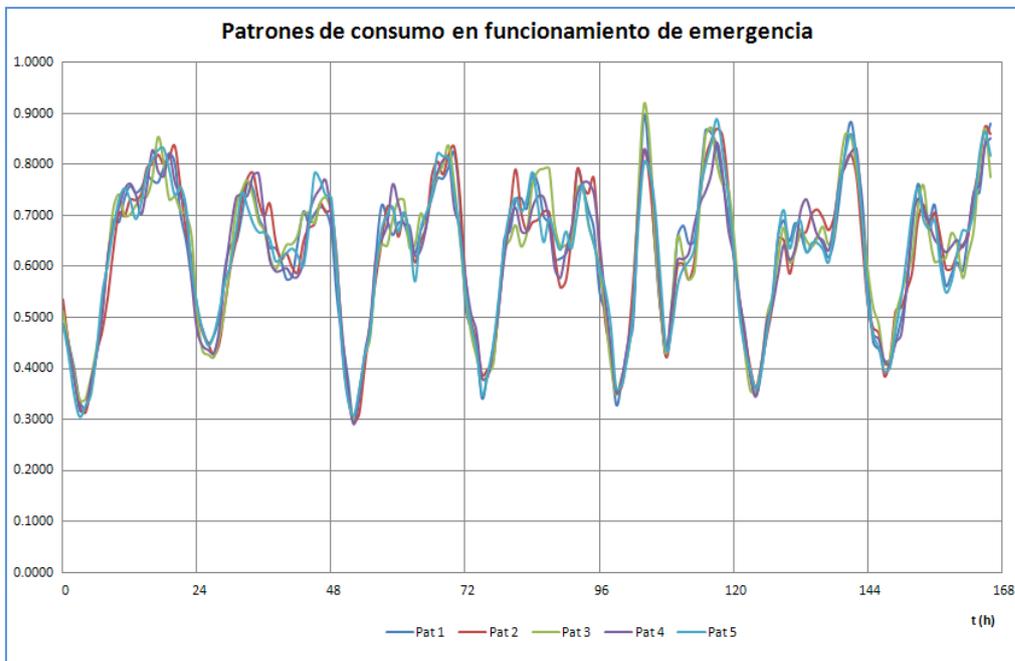


Figura 25. Patrones de consumo en funcionamiento de emergencia.

Se observa que los caudales consumidos son prácticamente los mismos tanto en operación normal como en emergencia. Sin embargo los picos oscilan menos o son menos erráticos en el caso del funcionamiento de emergencia o de 2 horas.

Por otro lado, los consumos para cada sector según la ecuación (7.1), incluyendo el sector nuevo y el global son los siguientes:

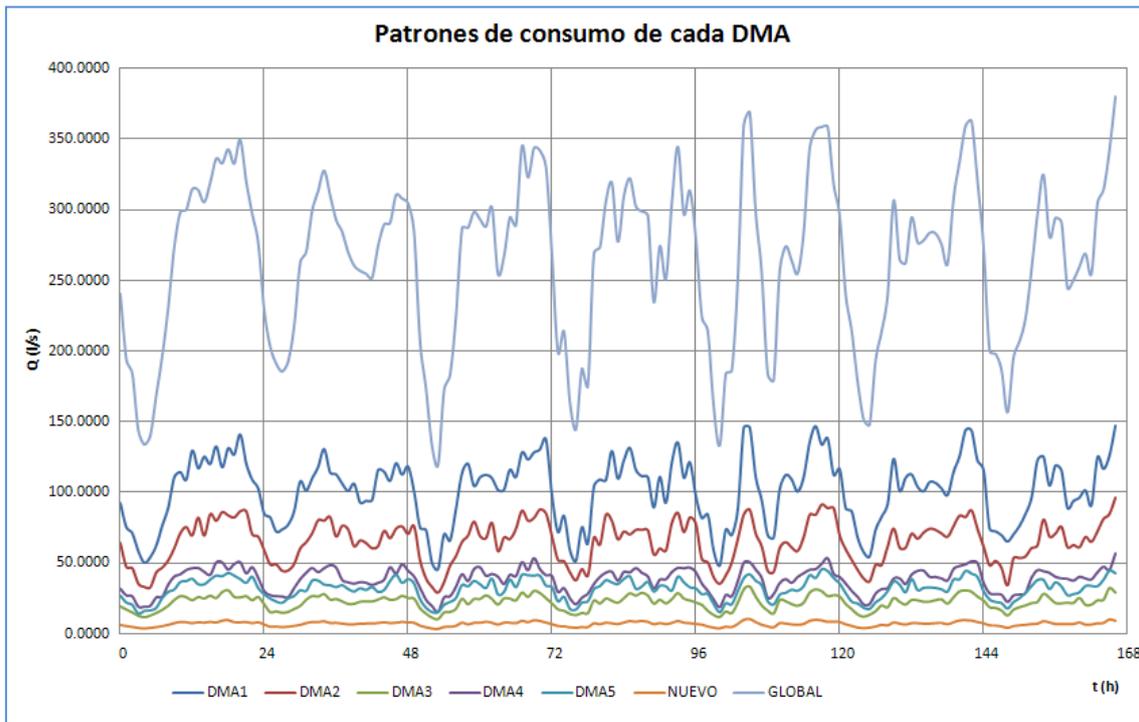


Figura 26. Patrones de consumo de cada sector

El caudal y las presiones más desfavorables que existen en la red inicial se muestran también a continuación. Dichos valores corresponden a los caudales y presiones mínimas para la simulación de una semana teniendo en cuenta los controles simples iniciales. Para ejecutar la red, se han establecido además unos diámetros idénticos a todas las tuberías del nuevo sector, los cuales se encuentran en consonancia con los diámetros de las tuberías que conectan con los sectores adyacentes. Estos diámetros se deben optimizar.

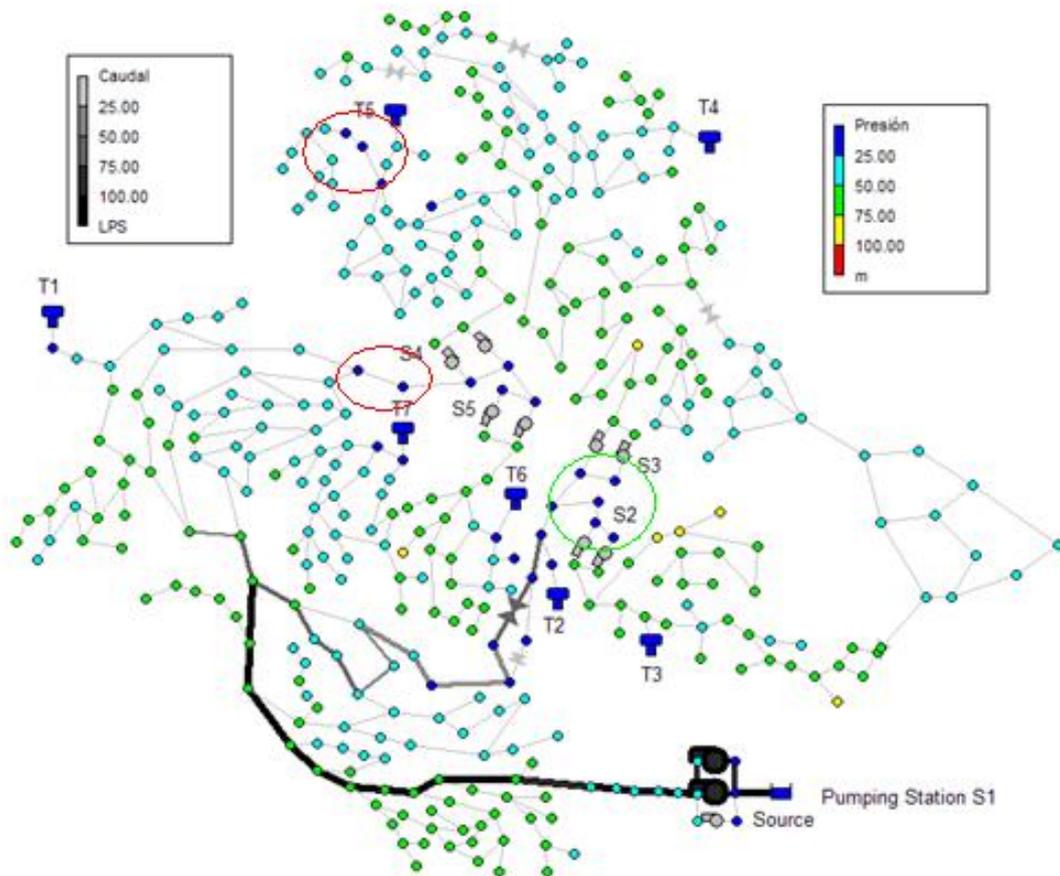


Figura 27. Presiones y caudales mínimos para una simulación de 168 horas.

Como se deduce de la Figura 27, las presiones no son adecuadas en todos los puntos. Aquellos nudos pertenecientes a la aspiración de las estaciones de bombeo no incurrirían a error ya que no son de consumo, por lo que el no cumplir presiones mínimas no es un problema que condicione la solución. Sin embargo, existen otros nudos con consumo cuya presión es menor a la mínima necesaria. De aquí la necesidad de diseñar correctamente la red de abastecimiento.

El caudal circulante es mayor en las ramificaciones más cercanas a los recursos hídricos, representado por el grosor de la tubería. A medida que las conducciones se alejan del recurso, el flujo descende en magnitud hasta llegar a ser incluso menor a 25 l/s, hecho que se da por ejemplo en el nuevo sector, DMA-6. Si se representa también el caudal máximo de una simulación de 168 horas se observa la misma conclusión en cuanto a los caudales circulantes. En este caso, las presiones máximas siempre cumplen los condicionantes de presión mínima.

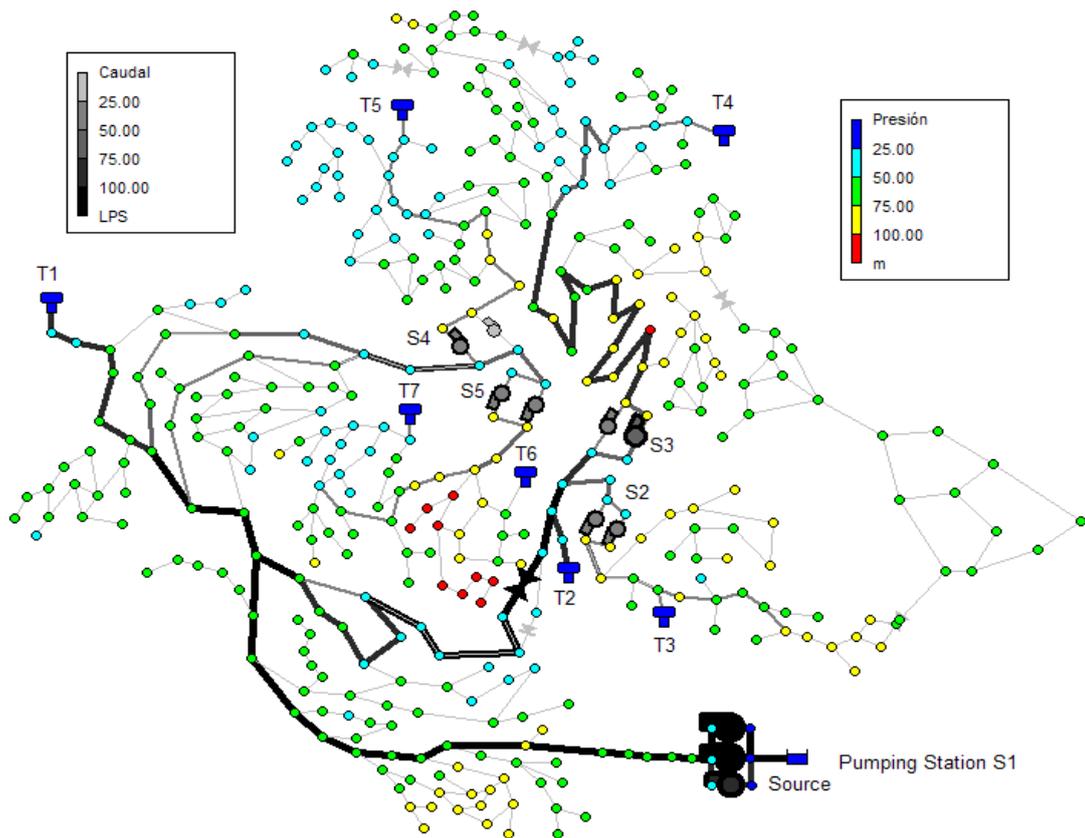


Figura 28. Presiones y caudales máximos para una simulación de 168 horas.

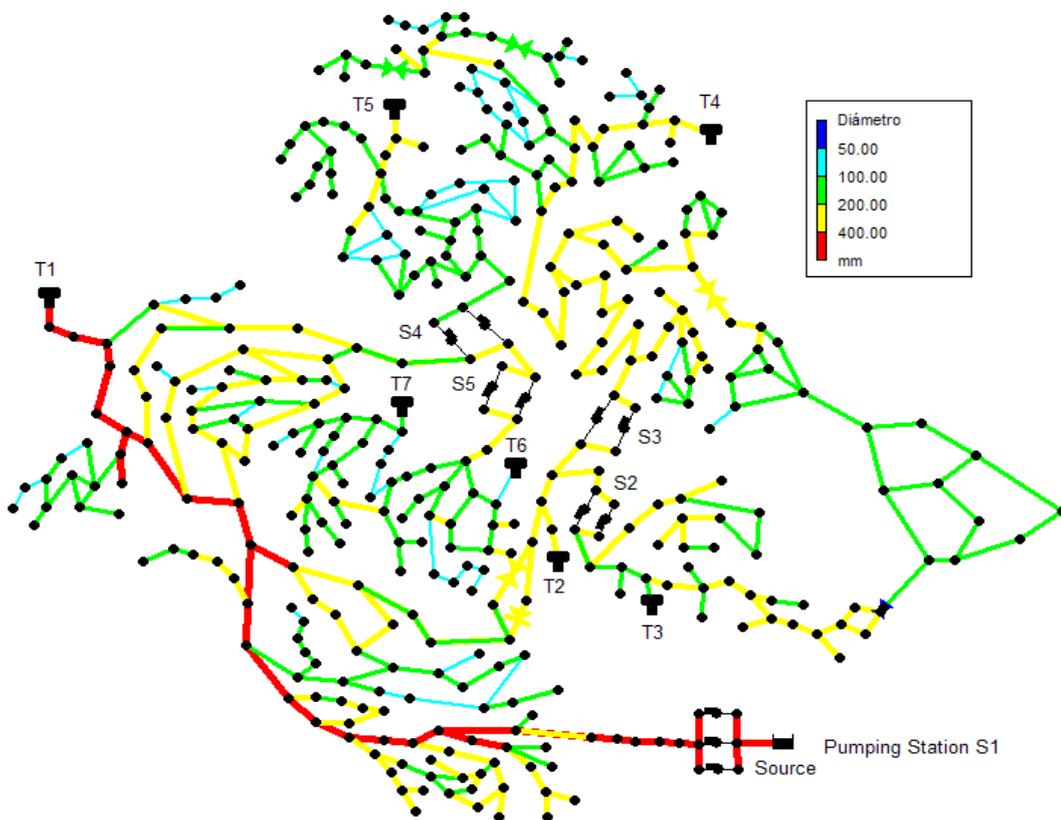


Figura 29. Rango de diámetros de las tuberías de la red.

El resto de datos como diámetros o longitudes de tuberías vienen definidos en el archivo original de EPANET. Carece de interés el indicar aquí cada uno de sus valores debido a la gran cantidad de tuberías. Sin embargo, en la figura 29 se muestra de una forma aproximada el rango de diámetros y de longitudes de éstas.

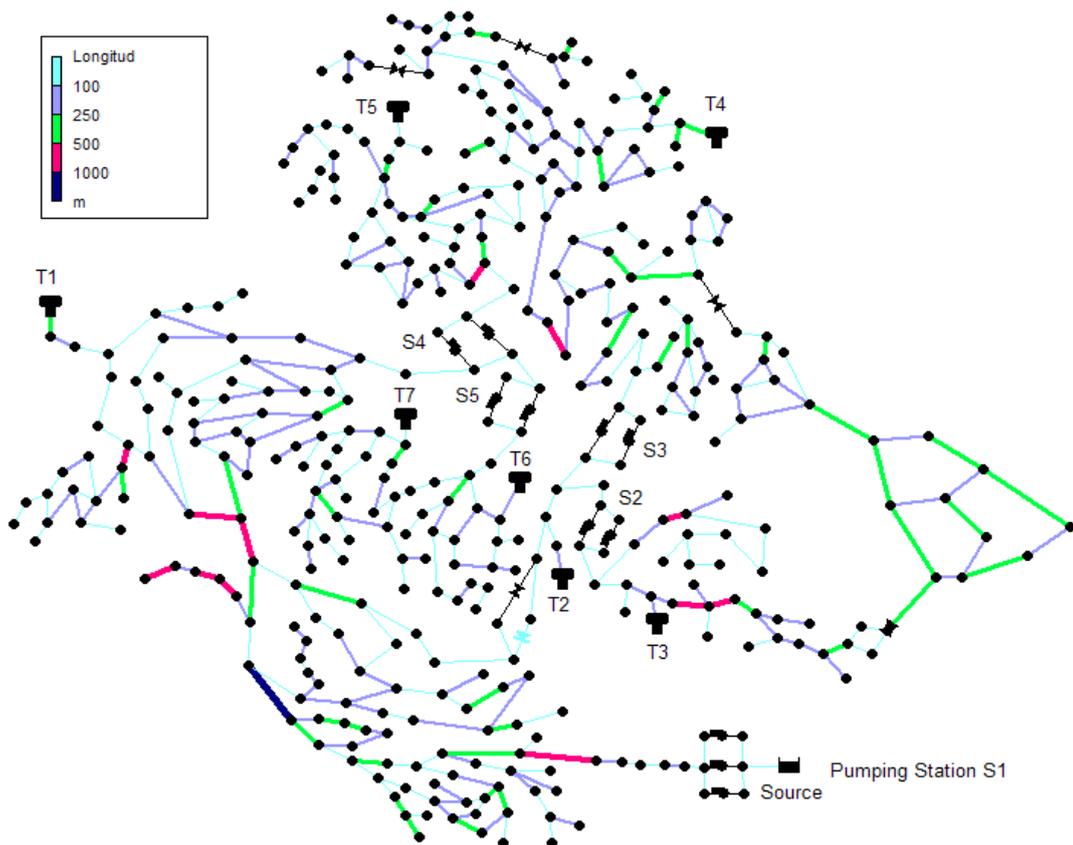


Figura 30. Rango de longitudes de las tuberías de la red.

Para poder aplicar un algoritmo pseudogenético es necesario tener un punto de partida adecuado. Habitualmente a este punto se le denomina población semilla ya que es la primera población a partir de la cual se lanza el algoritmo. Debe proporcionar información suficiente para que el proceso aleatorio no lleve a la solución a un valor de óptimo local y no global. Además este punto es necesario para no necesitar tiempos de computación demasiado elevados, ya que los recursos disponibles en la Universidad Politécnica de Valencia no son ilimitados.

7.1 Función objetivo

La función objetivo a cumplir para encontrar la solución óptima de la red se define por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} & \lambda_1 \left[\sum_{i=1}^{N_{bunc}} \left(C_{B,i} + \frac{52}{1.3} \sum_{j=1}^{N_{time}} \frac{\gamma H_{B,ij} Q_{B,ij}}{\eta_{B,ij}} \cdot C_{E,j} \right) + \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^{N_{pases}} C_{P,i} \cdot L_i + \sum_{i=1}^{N_{trjes}} C_{T,j} + \sum_{i=1}^{N_{vases}} C_{V,i} + \sum_{i=1}^{N_{dases}} C_{D,i} \right] + \lambda_2 \cdot WA_n + \lambda_3 \left[\sum_{i=1}^{N_{dumps}} \sum_{j=1}^{N_{time}} GHG_{B,ij} + \sum_{i=1}^{N_{pipes}} GHG_{P,i} \cdot L_i \right] + \beta_0 + \\ & + \beta_1 \left[\sum_{i=1}^{N_{junc}} \sum_{j=1}^{N_{time}} \delta_{1,ij} (p_{min,i} - p_{ij}) \right] + \beta_2 \left[\sum_{i=1}^{N_{tanis}} \sum_{j=1}^{N_{time}} \delta_{2,ij} (z_{min,i} - z_{ij}) \right] + \beta_3 \left[\sum_{i=1}^{N_{tanis}} \delta_{3,i} (z_{i,0} - z_{i,N_b}) \right] \end{aligned} \quad (7.2)$$

Los elementos λ_i son los multiplicadores de Lagrange asociados a los costes de operación y a los costes de capital (λ_1), a la edad del agua (λ_2) y a las emisiones de gases (λ_3). Cada uno de los multiplicadores acompaña a cada uno de los objetivos definidos en el problema. Esta ecuación incluye dichos multiplicadores ya que emplea la metodología de los multiplicadores de Lagrange. Dicho método permite encontrar aquellos puntos que optimizan una función de varias variables, es decir, aquellos que producen máximos y/o mínimos, y que además están sujetos a unas restricciones. Este método reduce el problema restringido con n variables a uno sin restricciones de n + k variables, donde k es igual al número de restricciones, y cuyas ecuaciones pueden ser resueltas más fácilmente. Estas nuevas variables escalares desconocidas, una para cada restricción, son llamadas multiplicadores de Lagrange. Se trata, por tanto, de extraer una función implícita de las restricciones, y encontrar las condiciones para que las derivadas parciales con respecto a las variables independientes de la función sean iguales a cero.

Los costes de operación son aquellos que se deducen de la operación de los bombeos existentes, y que además son función del tiempo. Se dividen a su vez en el coste inicial de cada bomba $C_{B,i}$ más el coste de la energía empleada al bombear un determinado

$$\text{caudal} \frac{52}{1.3} \sum_{j=1}^{N_{time}} \frac{\gamma H_{B,ij} Q_{B,ij}}{\eta_{B,ij}} \cdot C_{E,j}$$

El numero 52 corresponde al número de semanas que se consideran al año, y el 1.3 al factor punta del día de mayor consumo. De este modo se obtiene una constante que fija el precio de la energía en 40. Esto es así porque las simulaciones se han establecido cada 168 h, es decir, una semana.

Los costes de capital se dividen en el coste de cada tubería según su longitud $C_{P,i} L_i$, el coste asociado a los depósitos $C_{T,i}$, el coste de las posibles válvulas $C_{V,i}$ y el coste de los grupos electrógenos diesel $C_{D,i}$.

El siguiente multiplicador de Langrange se relaciona con la edad del agua WA_{net} . Dicho factor se definió anteriormente por la ecuación (2.9) y determina si la calidad del agua es la mínima necesaria para un consumo adecuado. En caso contrario, se penalizará la solución.

Por último se define el tercer multiplicador λ_3 como aquel asociado a las emisiones de

gases, tanto por la operación de las bombas $\sum_{i=1}^{N_{pumps}} \sum_{j=1}^{N_{time}} GHG_{B,ij}$ como por la adición de nuevas tuberías en cuya elaboración se han emitido una determinada cantidad de

$$\text{gases } \sum_{i=1}^{N_{pipes}} GHG_{P,i} \cdot L_i .$$

Por último, la función objetivo también contiene unos determinados factores de penalización que representan los requisitos establecidos en cuanto a presiones mínimas y niveles en los depósitos. Los factores de penalización de Lagrange son los β_i .

El factor β_0 simplemente penaliza la ecuación por la existencia o no de un incumplimiento de los requisitos. Este factor puede llegar a tomar valores muy elevados para así descartar soluciones que no cumplan por muy poco, pero que ofrecen una solución inviable a la vista de las condiciones requeridas. Es un valor ficticio para que la restricción tenga un mayor peso en la ecuación global.

El siguiente factor es el β_1 . Representa la presión mínima en cada nudo, tanto para la

$$\text{operación normal como para el fallo del sistema } \sum_{i=1}^{N_{junc}} \sum_{j=1}^{N_{time}} \delta_{1,ij} (p_{min,i} - p_{ij}) .$$

Para indicar en la función objetivo que los niveles de los depósitos se encuentran por encima del mínimo definido y durante operación normal se emplea el factor β_2 . Este factor es función del número de depósitos y del tiempo de simulación

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{tanks}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{time}}} \delta_{2,ij} (z_{\text{min},i} - z_{ij})$$

Por último β_3 , representa que el nivel de cada deposito al final de cada simulación en

operación normal sea al menos igual al inicial
$$\sum_{i=1}^{N_{\text{tanks}}} \delta_{3,i} (z_{1,0} - z_{i,N_D})$$

Los términos δ_i corresponden a componentes binarios de penalización, por lo que tomaran valores de 0 o 1 en función de si la penalización existe o no.

7.1.1 Selección de los multiplicadores de Lagrange

Los multiplicadores de Lagrange definidos se han seleccionado en función de la puntuación total según la siguiente expresión:

$$S = \frac{C - C_{\text{min}}}{C_{\text{max}} - C_{\text{min}}} + \frac{Q - Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}} + \frac{G - G_{\text{min}}}{G_{\text{max}} - G_{\text{min}}} \quad (7.3)$$

donde C es el coste en cada solución obtenida tras analizar solamente el coste de la red, C_{min} el coste mínimo del conjunto de soluciones, C_{max} el coste máximo, Q la calidad del agua para cada solución teniendo en cuenta solo la resolución del problema respecto a la calidad, Q_{min} la calidad mínima, Q_{max} la calidad máxima, G valor de la solución teniendo en cuenta solo el análisis respecto a los gases, G_{min} el valor mínimo de la emisión de gases y G_{max} el valor máximo.

Para obtener el mínimo de dicha ecuación, se procede a su derivación. Y tras despreciar los valores constantes se llega a:

$$S' = \frac{C}{C_{\text{max}} - C_{\text{min}}} + \frac{Q}{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}} + \frac{G}{G_{\text{max}} - G_{\text{min}}} \quad (7.4)$$

Finalmente se deduce que cada multiplicador de Lagrange perteneciente a la función objetivo definida anteriormente será:

$$\lambda_1 = \frac{1}{C_{\max} - C_{\min}} \quad ; \quad \lambda_2 = \frac{1}{Q_{\max} - Q_{\min}} \quad ; \quad \lambda_3 = \frac{1}{G_{\max} - G_{\min}} \quad (7.5)$$

7.2 Variables de decisión

Las variables iniciales que se deducen de la red y sus componentes son:

- 429 tuberías susceptibles de ser colocadas en paralelo a las ya existentes.
- 14 nuevas tuberías para el nuevo sector, teniendo en cuenta que tanto la tubería 1 como la 2 pueden ser o no instaladas.
- 7 depósitos que pueden ampliarse si fuera necesario.
- 5 posibles generadores diesel a instalar para cubrir el fallo del sistema. Cada generador se asocia a cada una de las estaciones de bombeo existentes, ya que es imposible cualquier otro emplazamiento según el enunciado.
- 4 consignas de presión; una para cada una de las válvulas reductoras de presión del sistema.
- 11 bombas ya existentes las cuales pueden ser modificadas, adoptando alguna de las 10 curvas de bombeo definidas.
- 1 consigna de funcionamiento para la válvula de regulación V2, la cual da paso del flujo al nuevo sector.
- Entre 1 y 3 nuevas bombas a instalar en las estaciones de bombeo existentes en el caso de que fuera necesario aumentar la capacidad de bombeo. Si hay 5 estaciones de bombeo, pueden aparecer hasta 15 bombas nuevas, cada una con un abanico de 10 curvas posibles.

En total se dispone de 455 variables de decisión, 4 consignas para las válvulas reductoras de presión, 11 bombas existentes, 1 consigna para la válvula de regulación y más de 15 posibles bombas nuevas cada una con 10 curvas diferentes.

Todas estas variables se encuentran determinadas además por el tiempo de simulación, que son 168 horas. Dicho tiempo se encuentra además discretizado en intervalos de 15 minutos, lo cual eleva cuantiosamente el número de variables de decisión totales.

Cuantificando todas las variables para todo el periodo de simulación se tiene:

- 429 tuberías en paralelo + 14 tuberías nuevo sector + 7 depósitos a agrandar + 5 generadores diesel (uno por cada estación de bombeo) = **455**
- 11 bombas existentes modificables con 10 posibles curvas = **110**
- 4 consignas válvulas reductoras de presión = **4**
- 1 consigna válvula de regulación = **1**
- 1-3 bombas nuevas por cada estación de bombeo, las cuales son 5. Por lo tanto $5 \times 3 = 15$ bombas nuevas como máximo, cada una candidata para trabajar con cualquiera de las 10 posibles curvas = **150**

TOTAL_i (para un instante i) = $455 + 110 + 4 + 1 + 150 =$ **720 variables_i**

TOTAL (168 horas, de 15 en 15 minutos) = $720 \times (168h/15min) = 720 \times (168h/0.25h) = 720 \times 672$ intervalos = **483.840 variables en total**

Como se deduce de lo anterior, el posible número total de variables es bastante elevado, lo que justifica la necesidad de simplificar la red.

7.3 Modelo de optimización

El modelo de optimización se centra, como se ha comentado anteriormente, en el empleo de un algoritmo pseudogenético.

El algoritmo pseudogenético aplicado trata de aplicar los operadores de reproducción, cruce y mutación a una determinada cadena alfanumérica. Las soluciones aportadas formarán la población del algoritmo, formadas por una determinada cantidad de individuos.

En los algoritmos genéticos clásicos, los genes que representan la información básica se representan en forma binaria, es decir con 0 y 1. En el algoritmo pseudogenético, los genes son alfanuméricos.

El algoritmo pseudogenético sigue las siguientes etapas:

- Etapa 0: Definición de los parámetros. Esta etapa está definida por el experto que desea realizar la optimización, ya que de él dependerá definir unos parámetros de trabajo. Si dichos parámetros no son los adecuados puede que el algoritmo no ofrezca una solución adecuada.
- Etapa 1: Inicialización del algoritmo y selección de los individuos más aptos. Se genera aleatoriamente una primera generación de cromosomas. Cada cromosoma se ordena en función del coste de la red, ofreciendo una solución al problema. Para poder asociar el coste a los condicionantes hidráulicos de redes de abastecimiento, el algoritmo pseudogenético trabaja conjuntamente con EPANET.
- Etapa 2: Operadores genéticos. Los cromosomas, previamente ordenados según su aptitud, pasan a reproducirse según unos criterios. El algoritmo pseudogenético emplea el método de reproducción constante, el cual asigna a cada cadena de población una probabilidad de reproducción que depende de su aptitud o coste asociado. Cada individuo de la nueva generación es afectado del cruce y mutación. El cruce se realiza de modo aleatorio, intercambiando eslabones y obteniendo una nueva cadena. Y la mutación examina cada eslabón de la cadena y también de forma aleatoria produce un cambio en su valor.
- Etapa 3: Condición de convergencia. Esta última etapa se basa en repetir el ciclo tantas veces como sea necesario hasta que se cumpla la condición de convergencia, que suele definirse como aquel punto en el cual ya no se producen mejoras en el individuo. Se debe tener en cuenta que ese número de ciclos no sea muy reducido, ya que indicaría una convergencia temprana y

seguramente en un mínimo local, ni que tampoco sea muy elevado, ya que la espera de la solución sería demasiado prolongada.

El proceso de reproducción seguido por el algoritmo pseudogenético es del tipo de reproducción constante. Éste es un método de selección proporcional en el que se asigna a cada cadena de la población una probabilidad de selección para formar parte de la siguiente generación. La probabilidad asignada dependerá del coste de la cadena dentro de la población y como tal, se encontrará entre una probabilidad máxima p_{\max} , asociada al individuo de coste menor, y una probabilidad mínima p_{\min} , asociada a la solución de coste mayor. Las probabilidades se definen como

$$p_{\max} = \frac{\beta}{N_C} \quad p_{\min} = \frac{2 - \beta}{N_C} \quad (7.6)$$

donde β es una constante que varía entre 1,5 y 2 (Wang, 1991), y N_C es el número de cromosomas.

Por lo tanto, para una cadena genérica i , la probabilidad de selección es la siguiente:

$$p_i = p_{\min} + (p_{\max} - p_{\min}) \frac{N_C - i}{N_C - 1} \quad (7.7)$$

La posibilidad de que una cadena se reproduzca es función del producto de la probabilidad p_i por el número de cadenas N_C . Si dicho producto es mayor o igual a 1,5 la cadena se duplica; si está entre 0,5 y 1,5 la cadena se mantiene; y si es inferior a 0,5 la cadena desaparece en la siguiente generación.

El proceso de cruce que se le atribuye al algoritmo pseudogenético es el de cruce de un punto. Este tipo de cruce suele emplearse con codificaciones binarias con ciertos problemas de sesgo, ya que se fracciona el código que identifica una de las variables de decisión. En el caso de los algoritmos pseudogenéticos, al disponer de codificación alfanumérica, no se da esta problemática ya que cada eslabón es una variable de decisión, es decir, no necesitan de todo el código para representar al individuo.

El último operador que condiciona al algoritmo pseudogenético es la mutación. Este proceso se aplica a la población obtenida tras la reproducción y el cruce y su objetivo

es ampliar zonas de búsqueda dentro del espacio de soluciones. Los algoritmos genéticos simples transponen el valor binario, es decir, cuando el valor es 1, éste pasa a ser 0; y cuando el valor es 0, éste pasa a ser 1. En los algoritmos pseudogenéticos no es posible realizar dicho intercambio de forma tan simple pues se codifican alfanuméricamente siguiendo el código de Gray. La utilidad de la codificación alfanumérica se centra en evitar sesgar las variables de decisión, que suelen ser principalmente los diámetros de las tuberías de la red de estudio. De este modo, se definen previamente unos diámetros con una determinada codificación, y cuando es necesario aumentar o disminuir el diámetro, se especifica directamente qué diámetro es el elegido para continuar con la optimización.

La mutación adquiere mayor protagonismo en los algoritmos pseudogenéticos que en los algoritmos genéticos clásicos. Esto se debe a que el cruce no genera una amplia diversidad de individuos, por lo que se pasa a aumentar el porcentaje de mutación hasta el 1% o 10%. Aun así no es adecuado aumentar mucho dicho porcentaje para no caer en un proceso puramente aleatorio.

Las principales ventajas que posee este tipo de algoritmos son:

- La probabilidad de reproducción influye muy poco a la hora de garantizar la obtención de mínimos, es decir, no introduce diversidad en las soluciones.
- Necesita valores muy grandes en la mutación para producir un incremento de la diversidad. La mutación solo modifica el valor de la solución incrementándose o disminuyéndose en una posición, según se observa en la siguiente imagen.

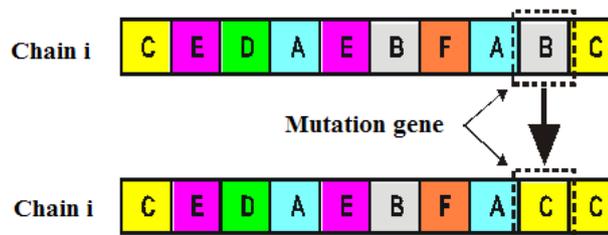


Figura 31. Método de trabajo del operador mutación en el algoritmo pseudogenético empleado. (Fuente: "The battle water networks II: Combination of meta-heuristic technics with the concept of setpoint function in water network optimization algorithms" Pedro L. Iglesias. UPV)

7.4 Metodología

7.4.1 Selección las variables de decisión

7.4.1.1 Bombas

Para conocer la capacidad de bombeo existente en la red, se debe realizar un estudio preliminar de dicha capacidad de bombeo.

En un principio, bastaría con expandir la estación de bombeo principal, pues si con ella se abastecen los caudales necesarios, el resto de estaciones no necesitarían redimensionarse. La estación a expandir sería la denominada S1 y correspondería al DMA-1.

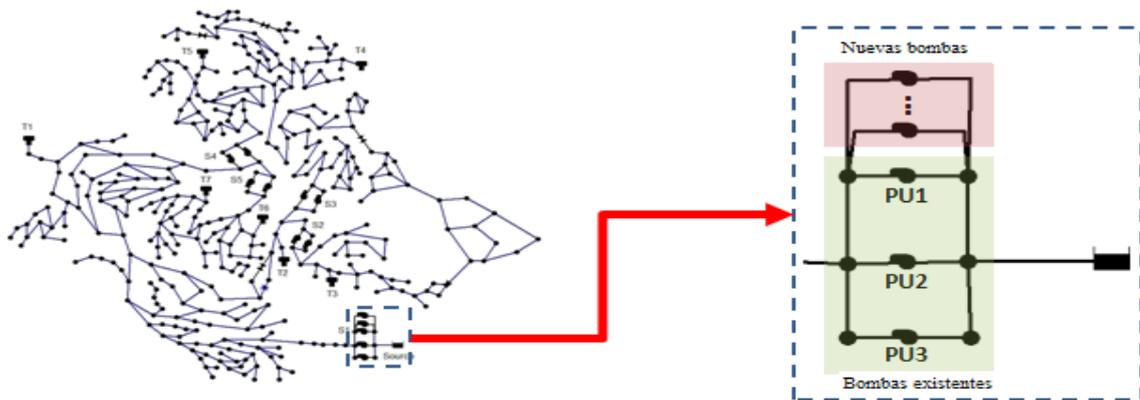


Figura 32. Expansión estación de bombeo S1 en el DMA-1.

Para saber si es necesaria su ampliación se estudia la evolución de las líneas PU1, PU2 y PU3 en una simulación de una semana discretizada en periodos de 15 minutos. Los valores del caudal y de la pérdida unitaria producida en las líneas condicionarán la ampliación o no de la estación de bombeo.

Tabla 10. Caudales y pérdida unitaria promedio de cada una de las bombas de la estación de bombeo S1.

Línea	Caudal promedio (l/s)	Pérdida unitaria promedio (m/km)
PU1	90.374	35.021
PU2	82.361	33.632
PU3	79.554	32.652

Tanto el caudal promedio como la pérdida unitaria promedio disminuyen según la línea, es decir, la línea PU1 posee mayor caudal promedio y mayor pérdida unitaria que la línea PU2 y PU3. Y así mismo, la línea PU2 posee mayor caudal promedio y mayor pérdida unitaria que la línea PU3.

Los caudales totales de cada sector, los valores máximos y los mínimos se muestran en la Tabla 11. Su obtención se ha realizado gracias a cálculos sencillos en Excel sobre los datos de la Figura 25.

Tabla 11. Caudales correspondientes a cada sector.

Sector	Caudal de referencia (l/s)	Caudal medio (l/s)	Caudal máximo (l/s)	Caudal mínimo (l/s)
DMA-1	162.335	101.459	146.832	45.843
DMA-2	103.418	64.636	96.096	28.595
DMA-3	35.257	22.035	33.356	10.098
DMA-4	60.443	37.777	56.272	15.558
DMA-5	50.661	31.663	45.716	14.509
DMA-6	10.744	6.715	10.165	3.077
TOTAL	-	264.285	388.437	117.680

Comparando los caudales que aportan cada una de las bombas con los necesarios de cada sector y el total de la red, se deduce que aun trabajando las tres bombas no se alcanza el caudal máximo necesario. De este modo se confirma que es necesario aumentar la capacidad de bombeo de la estación S1.

Para poder alcanzar el caudal máximo, será necesario incluir dos bombas más. Ahora faltaría saber qué bomba y qué curva son las más adecuadas. Se procede, por tanto, a realizar un estudio en términos de costes, comparando las bombas existentes con las disponibles. De simulaciones iniciales se puede deducir el orden de magnitud de la altura a suministrar, que debe ser similar a las ya proporcionada por las bombas existentes ya que se colocarán en paralelo a éstas. De todo esto se deduce que se pueden colocar dos bombas, PU13 y PU12, más con las curvas 11a y 8b, respectivamente.

Estas bombas son las que a priori, ofrecen una mejor solución. Sin embargo puede ser necesario un estudio en mayor profundidad que se basará en el tiempo de

funcionamiento de cada bomba, tipo de bomba, etc. Se puede llegar, por tanto, a otra solución igual de válida que la ya mencionada.

7.4.1.2 Tuberías

En cuanto a las tuberías, todas se encuentran físicamente en la red salvo las que componen el nuevo sector DMA-6. Éste está formado por 14 tuberías las cuales deben diseñarse de forma óptima. El diámetro final que adquieran vendrá determinado por la optimización. Inicialmente y para estudios preliminares pueden adquirir un valor de 102 mm, que es el diámetro mínimo disponible. Los diámetros posibles varían desde 102 mm hasta 762 mm.

Por otro lado, deben estudiarse aquellas tuberías ya existentes que requieran de la colocación de otra tubería en paralelo. Para obtener este objetivo se ha realizado un estudio de las pendientes hidráulicas. Se considera que todas aquellas tuberías que ofrezcan una pendiente hidráulica j mayor a 50m/km deberán acompañarse de otra tubería paralela. Se ha tomado este valor mediante tanteo, ya que se busca no introducir tuberías en paralelo en exceso. El valor de 50m/km es un valor bastante alto y que a su vez no genera un gran número de variables de decisión.

En la siguiente tabla se muestra, en función de la pendiente hidráulica, el número de variables de decisión existentes.

Tabla 12. Numero de tuberías a colocar en paralelo en función de un valor mínimo de la pendiente hidráulica

Pendiente hidráulica (m/km)	Numero de tuberías existentes
20	70
30	44
40	29
50	19
60	4

Tras ejecutar el programa, se observa que existen 19 tuberías que cumplen $j > 50\text{m/km}$.

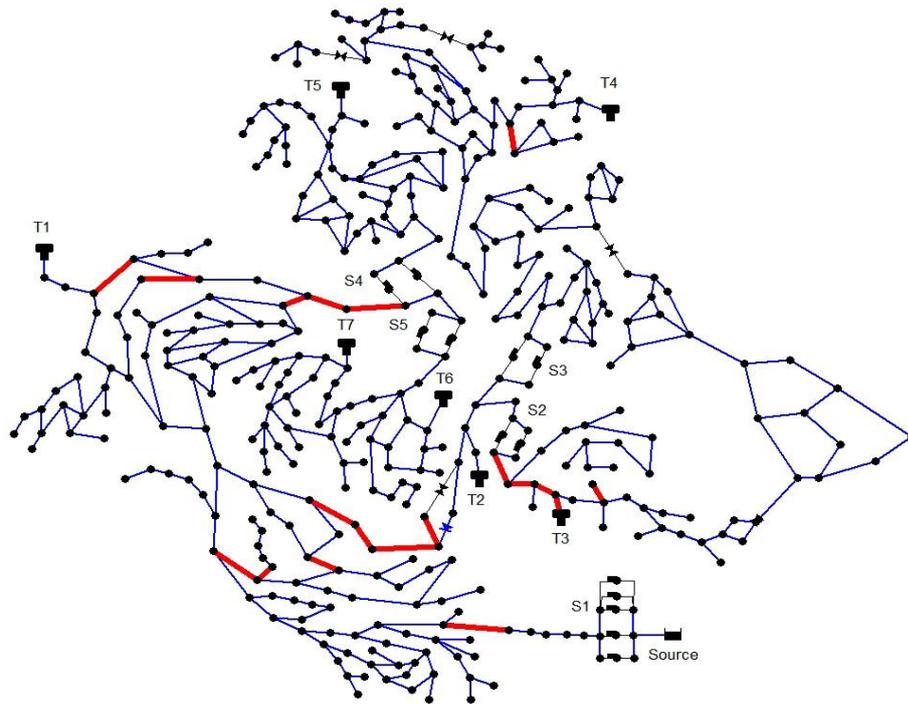


Figura 33. Tuberías con $j > 50 \text{ m/km}$ y candidatas a ser desdobladas.

La pendiente hidráulica representa en cierta medida el rozamiento que se produce entre las partículas del fluido y principalmente, el rozamiento entre el fluido y las paredes de la conducción. A mayor pendiente hidráulica, menor movimiento del fluido en la conducción y mayor estancamiento de ésta, pudiendo llegar a ocasionar problemas sanitarios. Es una medida representativa de las pérdidas que se producen en la conducción. A mayor pendiente hidráulica, mayores pérdidas ya que $h_f = J \times L$ siendo h_f las pérdidas, J la pendiente hidráulica y L la longitud de la tubería.

7.4.1.3 Bombas y depósitos

Se ha definido que el control de las bombas se realice según los niveles de los depósitos, es decir, las consignas de control no van a ser horarias sino por nivel. De esta forma se elimina la opción de controlarlas por tiempo y desaparecen así 672 variables de decisión correspondientes a las 168 horas discretizadas en intervalos de 15 minutos ($168 \text{ h} / 15 \text{ min} = 168 \text{ h} / 0.25 \text{ h} = 672$ variables).

Con esta premisa se establece que para cada bomba existen tres variables de decisión:

- Estado inicial, es decir, si está encendida o apagada.
- Nivel del depósito al cual arranca la bomba.
- Nivel del depósito al cual para la bomba.

Por lo tanto es necesario indicar de qué depósito depende cada bomba o estación de bombeo, pues al tratarse de una red mallada no resulta inmediato. Observando los flujos de la red durante la simulación extendida, se deduce que cada una de las bombas van asociadas a los siguientes depósitos.

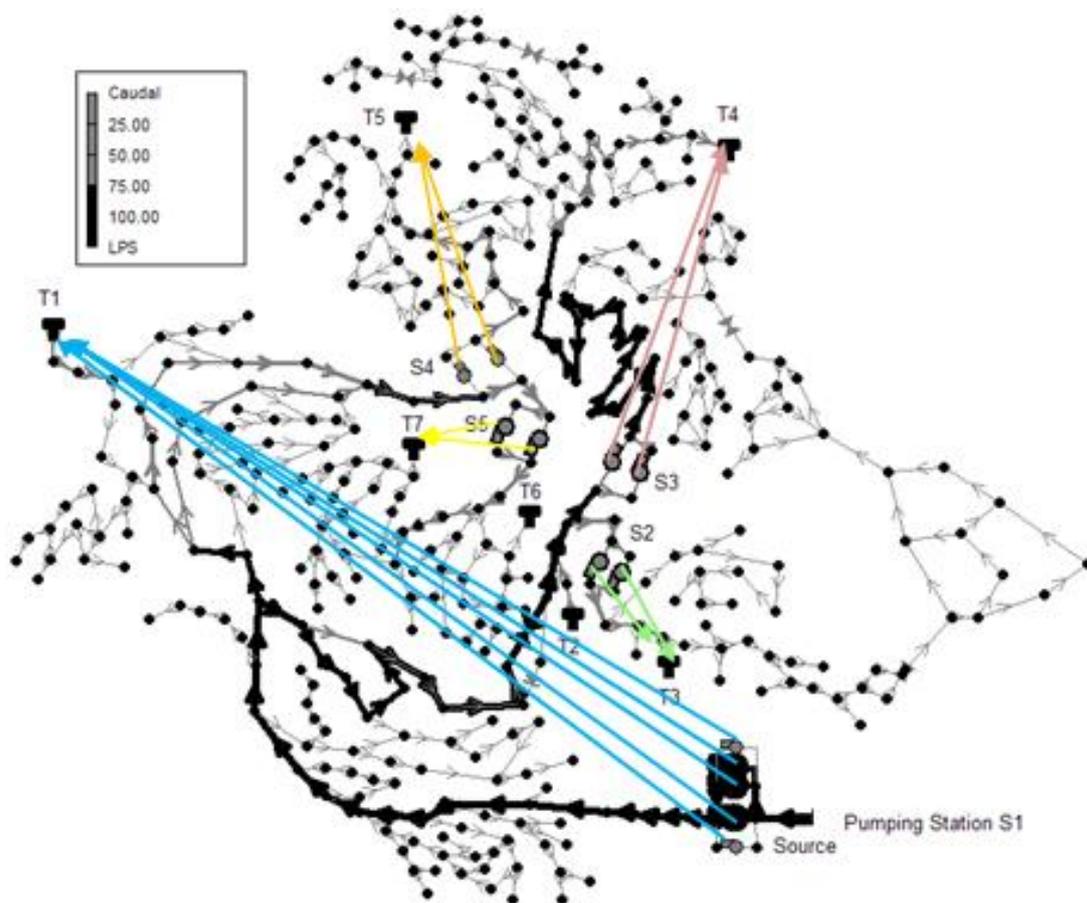


Figura 34. Caudales iniciales con su dirección y sentido en el instante t=0.

Tabla 13. Estaciones de bombeo asignadas a cada depósito.

Depósito	Estación de bombeo
T1	PU1
	PU2
	PU3
	PU12
	PU13
T3	PU4
	PU5
T4	PU6
	PU7
T5	PU8
	PU9
T7	PU10
	PU11

Para el caso de fallo del sistema, la existencia de unos niveles en los depósitos y la parada y puesta en marcha de las bombas juega un papel fundamental. Bajo el fallo sólo se podría operar de dos formas:

- a) Con la ayuda de generadores diesel.
- b) Dimensionando los tanques de tal forma que puedan abastecer por si solos a los consumidores y con todos sus requerimientos durante el tiempo de fallo.

Teniendo en cuenta estas soluciones únicas se llega a la conclusión de que la mejor opción es colocar generadores diesel en aquellas estaciones que sea necesario. Esto se debe principalmente a que:

- ✓ 1º. Instalar generadores diesel produce menor coste que aumentar el tamaño de los tanques.
- ✓ 2º. El aumento de los depósitos disminuye tanto los costes de bombeo como las emisiones de gases.
- ✓ 3º. A mayor tamaño de depósito peor calidad del agua.

De lo anterior se deduce que el aumento de los depósitos solo es beneficioso a la hora de optimizar energéticamente la red, en cuyo caso no tiene sentido si nos encontramos en el escenario de fallo energético. Este razonamiento conlleva a concluir que no es necesario estudiar la red en el caso de fallo del sistema, reduciendo el número de variables de decisión.

Para afianzar esta decisión se va a llevar a cabo el estudio que se comenta a continuación. Supongamos que en uno cualquiera de los sectores se produce el fallo cuando el nivel de los depósitos es mínimo e igual a cero. Sería necesario, por tanto, la instalación de los grupos diesel. En estas condiciones y para no requerir el grupo diesel habría que aumentar la capacidad de los depósitos.

El análisis económico para cada sector se basará en el volumen máximo que consumiría durante dos horas cada uno de los sectores. Este volumen máximo sería el volumen adicional a añadir a los depósitos existentes. Una vez calculado el volumen de depósito se puede ya comparar con el coste económico de ampliación de los depósitos con el coste asociado a la instalación de los grupos diesel. El volumen de los depósitos se encuentra entre los valores de 500 m³ y 10000m³ según el enunciado.

Realizando diversos cálculos con la ayuda de EPANET y de una hoja de cálculo se obtiene que el volumen máximo consumido durante un periodo de dos horas en función del depósito es:

Tabla 14. Volumen máximo consumido durante dos horas.

Depósito	Volumen máximo consumido (m ³)
T1	584.064
T2	659.376
T3	164.376
T4	169.488
T5	94.284
T6	54.288
T7	48.312

Estos volúmenes se deberían suministrar bien con nuevos depósitos o con generadores diesel, para así solventar problemas de abastecimiento de la población durante las dos horas de fallo.

Como se observa todos los depósitos deberían aumentarse, en el peor de los casos. Sin embargo, los más críticos son los depósitos T1 y T2 que llegan a alcanzar volúmenes necesarios importantes.

El coste económico de la ampliación de los depósitos en función del volumen que se consume en esas horas de fallo según la Tabla 4 sería:

Tabla 15. Coste anual de la hipotética ampliación de los depósitos.

Depósito	Coste anual (1000\$/año)
T1	30.64
T2	30.64
T3	14.02
T4	14.02
T5	14.02
T6	14.02
T7	14.02

Si en vez de aumentar los depósitos se instalan generadores diesel, se debe tener en cuenta que seguirá existiendo un coste asociado tanto al bombeo como al uso de los generadores. Por lo tanto, el coste del establecimiento de generadores diesel, el cual depende de la potencia que sea necesaria instalar para que las bombas asignadas a cada generador entreguen el volumen necesario se desglosa como se muestra a continuación.

Cada depósito va asociado a una estación de bombeo, y cada estación de bombeo posee un modelo de bomba en concreto. Según el modelo, la potencia máxima que tiene varía según lo indicado en la Tabla 5. Por lo que el generador que se debiese instalar tendrá que proporcionar esa potencia que necesita la bomba según la Tabla 6. Ahora solo es necesario saber cuántas bombas deben trabajar para proporcionar el volumen consumido durante las dos horas de fallo. Esto se deduce fácilmente con la ayuda de las curvas de las bombas. Para que el depósito T1 ofrezca durante dos horas el caudal necesario indicado en la Tabla 14, deberán trabajar tres bombas, por lo tanto necesitare tantos generadores como potencia necesaria para que trabajen esas tres bombas. Colocando un generador diesel de 100 kW y otro de 50 kW pueden funcionar tres bombas.

De igual manera se ha deducido los generadores necesarios para los demás depósitos. El coste asociado a la colocación de los generadores se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 16. Coste anual del hipotético generador diesel a añadir para el caso de fallo del sistema.

Depósito	Estación de bombeo asignada	Modelo de bomba existente	Potencia generador diesel a instalar (kW)	Coste anual del generador diesel (1000\$/año)
T1	PU1	8	50	9.45
	PU2	8	100	10.56
	PU3	8	-	-
	PU12	8b	-	-
	PU13	11a	-	-
T3	PU4	9	100	10.56
	PU5	9	-	-
T4	PU6	10	100	10.56
	PU7	10	-	-
T5	PU8	9	100	10.56
	PU9	9	-	-
T7	PU10	11	100	10.56
	PU11	11	-	-

Como se observa es mucho más económico establecer un generador diesel que ampliar los depósitos cuando se produce el fallo del sistema durante un periodo de dos horas.

7.4.1.4 Válvulas

La válvula de regulación V2 se operará de igual manera que las bombas. Es decir, tendrá tres variables de decisión: estado inicial, nivel en el depósito T2 que originará su apertura y nivel de ese mismo depósito pero que provocará su cierre.

En cuanto a las válvulas reductoras de presión, solo dos de ellas tienen relevancia, ya que si se simplifica la red, sólo las válvulas V1 y N15 son necesarias. Las presiones de referencia entre las que se va a considerar su consigna variará entre 0 y 60 mca según indica el enunciado. De igual modo, el valor exacto de la consigna vendrá dado por la optimización.

Si la válvula N15, la cual es de nueva instalación, adquiere un valor de consigna nulo se considerará que se encuentra cerrada y por tanto que no es necesaria su colocación en la instalación. Consecuentemente la tubería 2 no deberá disponerse para conectar con el nuevo sector.



Figura 35. En rojo, válvulas que se consideran relevantes en la resolución del problema.

7.4.1.5 Variables de decisión finales

Por lo tanto, las variables finales deducidas de todo lo anterior quedan como muestra la siguiente tabla:

PARÁMETRO		Nº V.DECISIÓN
Tuberías	Tuberías correspondientes a la expansión de la red	14
	Tuberías a colocar en paralelo a las tuberías existentes	19
Bombas	Condiciones iniciales de las bombas existentes	11
	Nivel inicial de los tanques (arranques de las bombas)	11
	Nivel final de los tanques (paradas de las bombas)	11
	Estatus inicial de las nuevas bombas	2
	Nivel de arranque de las nuevas bombas	2
	Nivel de parada de las nuevas bombas	2
Válvulas	Consigna de presión de las válvulas V1 y N15	2
	Consigna de la válvula V2	3
VARIABLES DE DECISIÓN TOTALES		77

Como se observa, se llegan a obtener 77 variables de decisión tras aplicar el conocimiento ingenieril al problema. De esta forma se reduce notablemente el problema, aun sin llegar a transformarlo en un problema trivial.

7.4.2 Simplificación de la red

Además de la simplificación de las variables de decisión realizada en el punto anterior, se va a esqueletizar el problema para tratar de convertirlo en un problema aun más sencillo. Este paso intermedio suele requerirse para eliminar información no necesaria para alcanzar los objetivos buscados. Redes que posean todas las conexiones, válvulas, demandas o tuberías hacen que evaluarlas se convierta en un gran desafío. Puede originar incluso problemas en la interpretación, operación y/u optimización del problema.

Esto es posible ya que existen elementos que son ajenos al propósito evaluado, los cuales provocan que la eficiencia, eficacia y utilidad del modelo se altere y se incremente además el tiempo de cálculo necesario.

Lo ideal es obtener una red menos detallada que mantenga los elementos principales y una agrupación de consumos en nodos representativos. Así se reduce el número de variables y se mantienen las características hidráulicas del modelo para que la optimización sea más veloz.

Por lo tanto, se puede entender que una parte de la red no es modelada, pero el hecho de esqueletizar la red completa hace que esos elementos ignorados permanezcan en la red reducida. De ello se encarga los distintos métodos de esqueletización.

Según el uso que se le quiera dar al modelo, se puede reducir la red en diferentes grados. Para un análisis de costes de energía, se prefiere un alto grado de simplificación; sin embargo, para analizar la calidad del agua se requiere una esqueletización mínima pues los tiempos de viaje y la edad del agua se ven demasiado alteradas.

7.4.2.1 Métodos de esqueletización

Los diversos métodos existentes para esqueletizar una red son adecuados en casos concretos. No obstante, una combinación de estas técnicas sería más eficiente que emplear solamente una.

Los métodos existentes son:

- ❖ Depuración de datos. Es un método muy simple y se suele emplear como primer paso en la reducción de modelos. Consiste en eliminar todos los elementos que no cumplan con una o varias condiciones, como por ejemplo diámetros superiores a un valor, rugosidades muy elevadas o longitudes de tubería muy pequeñas. Este método se suele emplear en modelos creados a partir de datos GIS, los cuales suelen contener mucha información no necesaria para modelos hidráulicos.

El problema que tiene es que no existe consideración alguna con la red asociada, pudiendo dar lugar a errores al no considerar la conectividad de la red.

- ❖ Tramos ramificados. Consiste en eliminar aquellos elementos situados al final de una ramificación. El problema reside en la reubicación de la demanda de los nodos eliminados, el cual se solventa traspasando al nodo del comienzo del tramo la demanda que se ha eliminado. Igualmente, la curva de consigna debe asociarse al nodo en cuestión para no perder información de presiones mínimas de los nodos eliminados.

Este método puede realizarse en diversos grados. El proceso supuestamente finaliza cuando no existen más tramos ramificados, pero puede establecerse un cierto grado de reducción para no simplificar en exceso la red.

El único problema que presenta es que la información de los nodos eliminados no se refleja en el modelo reducido. Únicamente quedará una referencia a las presiones mínimas representada por la curva de consigna asociada al nodo cabecera.

- ❖ Eliminación de tuberías en serie. Se basa en eliminar nodos que posean solo dos líneas adyacentes, uniendo estas dos líneas en una sola con nuevas propiedades. Las demandas de los nodos eliminados se reubican en los nodos vecinos bien de forma equitativa o bien proporcionalmente a la distancia entre nodos.

Se debe tener especial cuidado con otros aspectos del nodo eliminado como por ejemplo la cota.

Al unir las tuberías se debe considerar que el diámetro, la longitud y la rugosidad se pueden ver alterados. Dependerá en gran medida de si las líneas que se unen tienen propiedades idénticas o no y de si existen demandas en los nudos o no.

Si dos líneas poseen idénticas propiedades, únicamente se sumará la longitud de cada una y se mantendrá el diámetro y la rugosidad. Se operará del mismo modo si varias líneas de propiedades idénticas se segmentan por nodos sin demandas.

Si las dos líneas tienen distintas propiedades pero los nodos intermedios no poseen demanda, se puede operar de forma simultánea pero aplicando unas ecuaciones para definir las nuevas propiedades de diámetro, longitud y/o rugosidad. Las ecuaciones empleadas consideran que el total de pérdidas de cada tramo individual debe ser igual a la pérdida de la tubería final.

En el caso de que existan demandas se añade el problema de su traslado según los diferentes patrones de consumo.

Este método es eficiente cuando se eliminan nodos sin demandas y que posean dos líneas adyacentes con propiedades idénticas, ya que al eliminar los nodos sin demanda y unir las tuberías, no se modificaran las características hidráulicas.

- ❖ Eliminación de tuberías en paralelo. Dos tuberías en paralelo serán aquellas que comparten nudo inicial y nudo final. El primer paso consiste en definir la tubería dominante, la cual condicionará la longitud, diámetro o rugosidad resultante. Una vez definida la tubería dominante, se fijará la longitud y el diámetro; y la rugosidad se calculará como una rugosidad equivalente. De igual

manera se puede realizar si se fija la longitud y la rugosidad, y se calcula el diámetro equivalente.

Este método elimina tuberías (y no nodos) y considera las propiedades de las tuberías eliminadas, por lo que las características hidráulicas se mantendrán.

- ❖ Agrupación de pseudonodos. Aquellos nodos unidos por tuberías de pequeñas longitudes pueden agruparse en uno sumando únicamente las demandas individuales y eliminando directamente las tuberías de pequeña longitud. Así se eliminan gran cantidad de tuberías, pero con cierto cuidado en la consideración de la cota y de los patrones de consumo de las tuberías eliminadas.

Al eliminar tuberías de pequeña longitud, las pérdidas de carga son tan despreciables que no afectan hidráulicamente al sistema.

7.4.2.2 *Esqueletización realizada*

Una vez conocidos los métodos de esqueletización se puede pasar a realizar la simplificación de la red. Como el problema abarca temas de calidad del agua y de costes energéticos, la simplificación a realizar no debe ser muy radical.

Se han empleado todos los métodos anteriores, en mayor o menor medida, a la hora de simplificar la red. Las técnicas se han basado principalmente en:

- Agregación de la demanda por agrupación de nodos cercanos y eliminación de ramificaciones. Se ha considerado que los nodos se encuentran tan cercanos unos a otros que la diferencia de presiones entre ellos es despreciable, por lo que únicamente se han sumado las demandas de los nodos eliminados al nodo que permanece en la red reducida.
- Asociación de tuberías en serie y en paralelo en otra tubería con características equivalentes.

En la siguiente figura se muestra la red simplificada en color más oscuro. Las tuberías de color más claro han sido aquellas que se han ido eliminando según los métodos anteriores.

El orden seguido a la hora de simplificar ha sido el siguiente:

- 1) Fijarse principalmente en la eliminación de tramos ramificados.
- 2) Eliminación de tuberías en serie de dichos tramos ramificados, ya sean de iguales propiedades o de distintas propiedades, acumulando las demandas y estableciendo tuberías equivalentes.
- 3) Agrupación de pseudonodos.

La red original tenía 399 nodos y 462 tuberías, para llegar a 234 nodos y 291 tuberías en la red simplificada. Aproximadamente se ha reducido la red en un 40%.

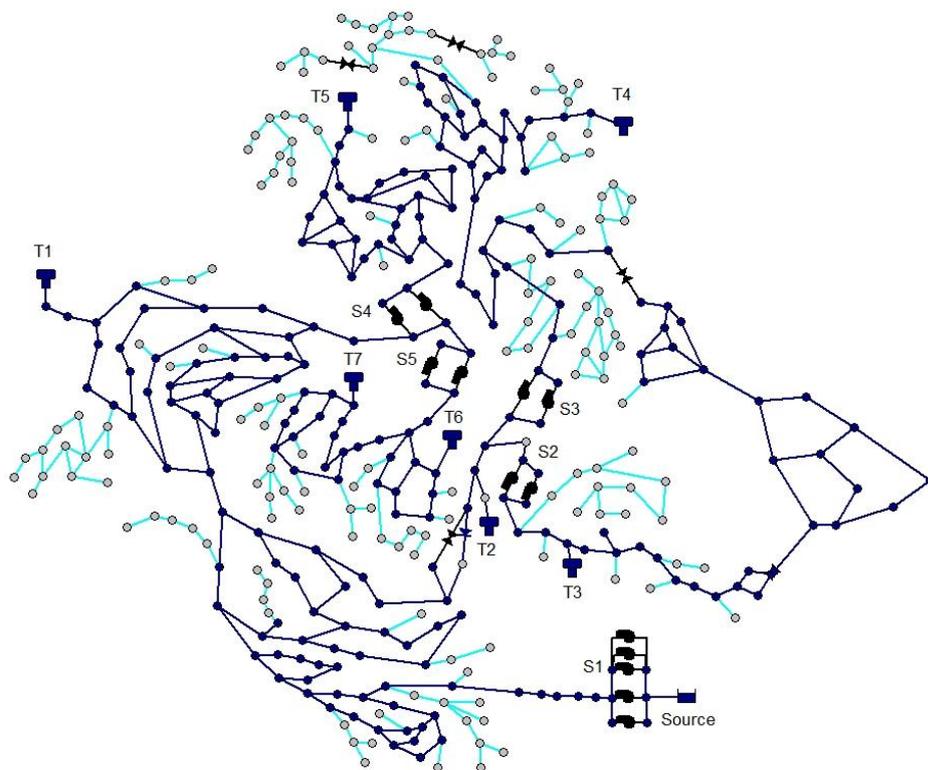


Figura 36. Red original y simplificada.

No obstante, la simplificación realizada plantea una serie de problemas:

- Los valores en la presiones de la red simplificada deberían ser iguales a los de la red original. Este supuesto debe cumplirse siempre, aunque en este caso se haya tomado como hipótesis que la variación de dichas presiones es tan

pequeña que puede despreciarse. Y es por ello que se plantea una función de punto óptimo de funcionamiento o curva de consigna.

- La edad del agua debe ser la misma en ambos modelos. Este hecho se ha tenido en cuenta a la hora de no simplificar en exceso la red. Aun así debe mantenerse una equivalencia entre ambas redes. Para realizar dicha comprobación se ha realizado un análisis previo con métodos de flujo.

7.4.3 Punto óptimo de funcionamiento o curva de consigna

La curva de consigna se define como aquella curva que representa las presiones mínimas necesarias en cabecera para mantener unas determinadas presiones en cada uno de los nudos de la red en función de un determinado caudal de consumo de la red.

El mantenerse sobre la curva de consigna ayuda a disminuir presiones en la red y por lo tanto a que aparezcan menos fugas. También se ahorra en cuanto a la energía empleada en el bombeo de caudal, ya que se da la altura de bombeo estrictamente necesaria. Además se eliminan averías en la red por el poco estrés al que se somete la red.

La curva resistente es la curva representativa del sistema y viene impuesta por los usuarios al “abrir y cerrar los grifos”. Y la curva de la bomba o curva motriz es aquella curva característica de la bomba e impuesta por el regulador del sistema.

El fenómeno de la evolución temporal de los consumos, desde un punto de vista físico, puede interpretarse como que en cada momento la red de distribución presenta una curva resistente distinta, la cual corta a la motriz en el punto de funcionamiento correspondiente a ese instante, caracterizado por el consumo solicitado y la presión registrada en la acometida. Dicho de otro modo, la evolución dinámica de la curva resistente provocada por las continuas maniobras efectuadas por los usuarios en los puntos de toma, así como por el constante arranque y parada de los grupos, tiene como resultado la evolución de los consumos con arreglo a la demanda de los usuarios, siguiendo en todo momento la curva motriz.

En horas valle la red mantiene siempre un consumo mínimo que será el que nos define la curva resistente máxima, caracterizada por un elevado número de tomas cerradas. En el otro extremo, para las horas punta, el sistema solicita el consumo máximo, el cual corresponderá a una curva resistente mínima. El punto de funcionamiento vendrá dado por la intersección de ambas curvas.

$$\underbrace{(A + B \cdot Q + A \cdot Q^2)}_{\text{CURVA MOTRIZ}} = \underbrace{H_g + \sum k \cdot Q^2}_{\text{CURVA RESISTENTE}} \quad (7.8)$$

Gráficamente se observa que la curva de consigna es creciente con el consumo.

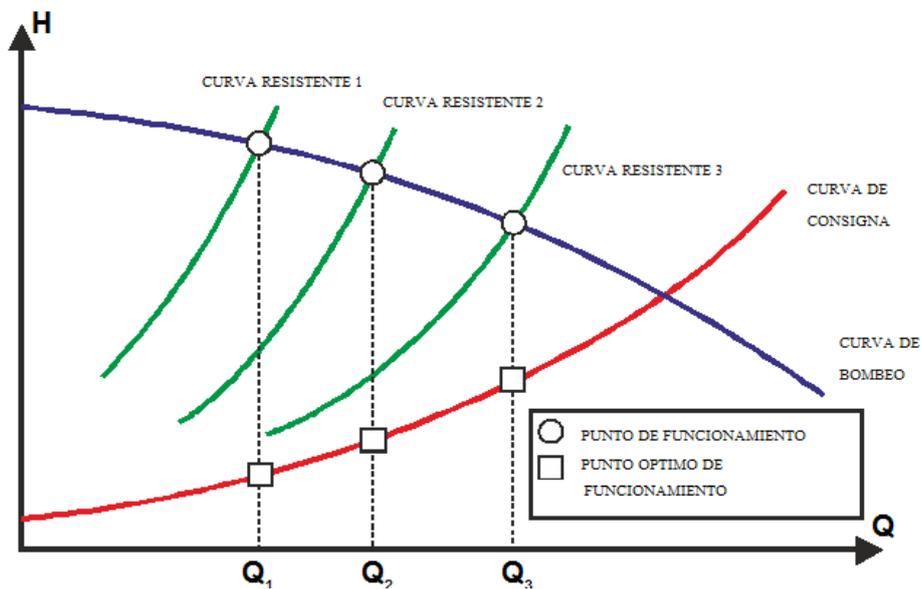


Figura 37. Curva de consigna, curva resistente y curva motriz de un sistema. (Fuente: "Análisis y diseño de redes de distribución de agua mediante Epanet 2 vE" Pedro L. Iglesias; Fco. Javier Martínez Solano. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Editorial UPV. 2012)

El establecimiento de la curva de consigna en un punto de acometida, además de servir para regular los niveles de presión en la red, nos permite disponer de una curva de referencia ideal sobre la que contrastar la rentabilidad energética de un sistema de regulación determinado. Para cada caudal, la curva de consigna indicara las condiciones de bombeo ideales, mientras que la motriz dará las reales. La diferencia entre unas y otras será un índice del rendimiento del equipo de regulación empleado para inyectar desde el punto de acometida considerado, de modo que a los efectos de

considerar su rentabilidad, la curva de consigna puede interpretarse como una curva resistente ideal a seguir.

Por todo ello, se busca simplificar un tramo siempre y cuando se obtenga del mismo su curva de consigna en cabecera. Así se puede saber qué nivel de presión es necesario en cabecera para cada uno de los caudales. Como también se conocen los caudales a lo largo del tiempo, se puede controlar las presiones requeridas en cada instante. Las presiones requeridas son las que se integran en el modelo de optimización para verificar las restricciones de presión.

7.4.4 Análisis de la calidad del agua

En cuanto al estudio de calidad del agua cabe mencionar que existen varios modelos de resolución.

Los llamados modelos estáticos determinan la distribución espacial de una sustancia, pero no su variación temporal, es decir, todas las derivadas con respecto al tiempo se hacen cero. Se apoyan en modelos hidráulicos estáticos, aunque pueden convertirse igual que aquellos en modelos estáticos. En este tipo de modelación, los depósitos no afectan a la calidad del agua. Las ecuaciones que componen estos modelos tienen las premisas siguientes: i) el tiempo de viaje a través de la línea se utiliza para el cálculo de la reacción química, ii) en los nudos se aplica un balance de masa para obtener la concentración resultante, ignorando las reacciones químicas.

Por otro lado existen los modelos dinámicos, caso en concreto de EPANET, programa que trabaja con éstos en tema de calidad aun cuando en la hidráulica EPANET emplea modelos cuasi-estáticos. Este tipo de modelos se caracteriza por apoyarse en modelos hidráulicos dinámicos o modelos en periodo extendido. Tiene en cuenta las variaciones tanto espaciales como temporales de la concentración de una determinada sustancia en la red. Combina además tres efectos:

- Transporte longitudinal y transversal en las líneas.
- Mezcla en los nudos.

- Reacción química tanto en líneas como nudos y con capacidad de almacenamiento.

Los depósitos suelen considerarse como elementos excepcionales en función de diversos patrones de mezcla y del flujo tridimensional que conllevan.

Los modelos dinámicos se clasifican de diversa manera:

- Según el tratamiento espacial:
 - Modelos eulerianos, cuyo protagonista son las conducciones. Se basan en descomponer la red en parcelas o volúmenes de control conectados entre sí y registrar los cambios habidos tanto en el interior de cada volumen de control como en sus fronteras. Se denominan comúnmente por el nombre de *modelos de mezcla completa*.
 - Modelos lagrangianos, en el cual el fluido es el protagonista ya que se descompone el agua en porciones a las que siguen a lo largo de toda la red. Se les conocen por *modelos de flujo pistón*.
- Según el tratamiento temporal:
 - Simulaciones regidas por el tiempo en las que se calcula el estado de la red a intervalos prefijados.
 - Simulaciones regidas por eventos. En este caso se calcula el estado de la red cuando tiene lugar un evento significativo.
- Método de las diferencias finitas. Se basa en descomponer la red en parcela espaciales y temporales y tras plantear las ecuaciones en diferencias finitas, se resuelven de manera explícita siguiendo el curso del agua y el paso del tiempo.
- Método de volúmenes discretos. Es el método que se implementó en las primeras versiones de EPANET. Descomponía cada tubería en un número de segmentos de igual tamaño en los cuales tiene lugar una mezcla completa de las sustancias, actuando como un depósito de nivel fijo.

De todos ellos, se ha hecho uso de un modelo de flujo pistón basado en despreciar la existencia de tuberías y en centrarse en el tiempo de viaje. Para redes ramificadas es ideal ya se presupone que no hay inversión del flujo en las tuberías. Sin embargo, para redes malladas o aquellas donde el flujo pueda variar de dirección, los resultados no pueden ser completamente aplicables.

El objetivo de este modelo de calidad de flujo pistón es quitarle trabajo a EPANET. De este modo se puede realizar un mayor número de simulaciones previas a la evaluación de la función objetivo. Los pasos seguidos se centran, en primer lugar, en rodar una función que gestiona la curva de consigna de la red eliminada tras la simplificación y a continuación, otra función que evalúa la calidad según la fórmula (7.27) que se deduce a continuación. De este modo se puede calcular el numerador del parámetro WA_{net} definido en el enunciado del problema en el apartado 4.3 y representado por la fórmula (4.1).

En el apartado anterior se ha realizado la simplificación de la red para facilitar su estudio. Todas las simplificaciones realizadas se tratan de redes ramificadas. Únicamente existe una única ramificación que no ha sido simplificada, a pesar de tener una parte mallada. Esto es así porque el trayecto desde la red a este nudo es único y es mejor no eliminarlo. Como todas las ramificaciones eliminadas pueden asignarse a un único DMA, todos tienen la misma curva de modulación y consecuentemente el mismo patrón.

Del mismo modo, se sabe que las demandas son conocidas y el patrón también. A partir de los datos de demanda base y longitud de cada tubería se pueden calcular de antemano los tiempos de viaje a lo largo de toda la simulación. De este modo puede hacerse un tratamiento previo de la red en cuanto a calidad se refiere.

Si se establece, por ejemplo, como punto de comparación el nudo J1223, se observa que el estudio de calidad calculado junto con el estudio de calidad de la red simplificada son muy similares. De esta forma, se considera que el modelo simplificado es adecuado para optimizar la red como si estuviera completa.

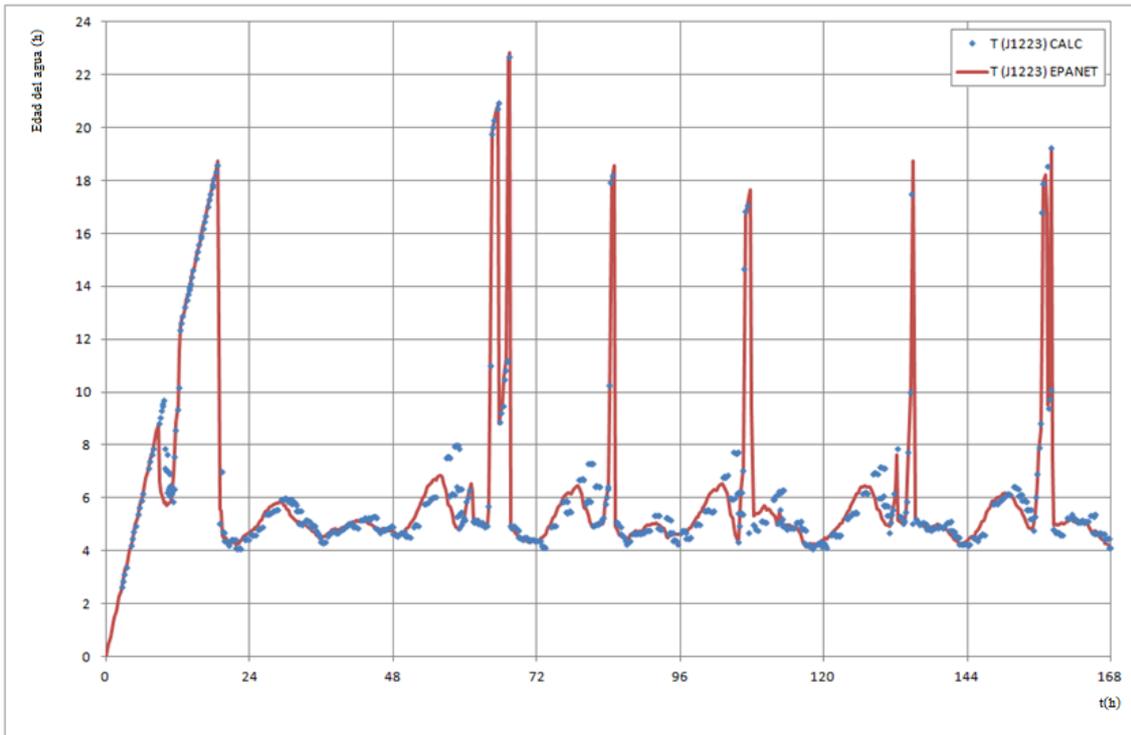
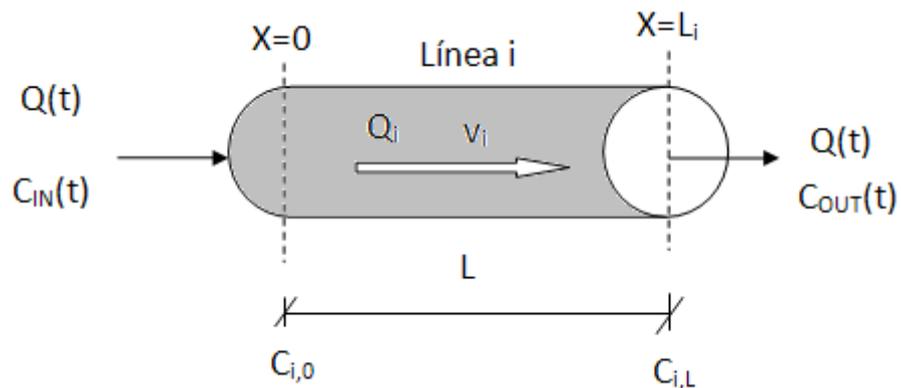


Figura 38. Imagen comparativa de la calidad obtenida con EPANET y mediante cálculo adicional del nudo J1223.

De este modo, el apartado de calidad correspondiente a la optimización se analizará de dicha forma, evitando así que Epanet se sature. Cabe mencionar que el modelo de calidad de la red se ha discretizado en periodos de 5 minutos y no en intervalos de 15 minutos como si ocurría con el modelo hidráulico.

El modelo de calidad empleado se ha definido por las siguientes ecuaciones. Planteando una línea i en la que lo que entra menos lo que sale es igual a la acumulación menos la reacción, se tiene que:



$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -v_i \frac{\partial c_i}{\partial x} + R(c_i) \quad (7.9)$$

siendo $R(c_i)$ el elemento correspondiente a la cinética de la reacción en el seno de un fluido. Se representa además por un coeficiente de reacción k ; y un exponente n que indica el orden de la reacción.

$$R(c_i) = k \cdot c_i^n \quad (7.10)$$

Por otro lado, en flujo pistón:

$$\frac{\partial c}{\partial t} \approx 0 \quad (7.11)$$

Así que la ecuación (7.9) queda como sigue:

$$v_i \frac{\partial c_i}{\partial x} = R(c_i) \quad (7.12)$$

Si el exponente que indica el orden de la reacción se toma como nulo, es decir, crecimiento de orden cero, se tiene que:

$$R(c_i) = k \quad (7.13)$$

Y entonces (7.12) queda:

$$v_i \frac{\partial c_i}{\partial x} = k \quad (7.14)$$

Que es lo mismo que:

$$\frac{\partial c_i}{\partial x} = \frac{k}{v_i} \quad (7.15)$$

Integrando dicha ecuación (7.15) se obtiene la siguiente:

$$c(x) = c(0) + \frac{k \cdot x}{v} \quad (7.16)$$

Sabiendo que el caudal que pasa por una conducción es igual a la velocidad a la que circula por el área de la sección, se llega a:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{\bar{Q} \cdot m(t)}{A} \quad (7.17)$$

donde $m(t)$ es el valor del coeficiente de modulación en el instante t y \bar{Q} el caudal medio. En redes ramificadas se cumple que el caudal es igual al caudal medio por el coeficiente de modulación de un determinado instante.

Si se sustituye (7.17) en (7.16) se obtiene:

$$c(x) = c(0) + \frac{k \cdot x \cdot A}{Q \cdot m(t)} \quad (7.18)$$

Y para $x = L$:

$$c(L) = c(0) + \frac{k \cdot L \cdot A}{Q \cdot m(t)} \quad (7.19)$$

O lo que es lo mismo:

$$c(L) = c(0) + \frac{k \cdot V}{Q \cdot m(t)} \quad (7.20)$$

siendo V el volumen encerrado por la línea i . De esta forma se conoce la concentración al final de la línea. Si la ecuación (7.20) se extrapola de forma temporal queda:

$$c(L, t) = c(0, t) + \frac{k \cdot T}{m(t)} \quad (7.21)$$

donde T es el tiempo medio de permanencia en la conducción, es decir, el tiempo de viaje.

Finalmente, teniendo en cuenta el tiempo de viaje t' :

$$c(L,t') = c(0,t) + \frac{k \cdot T}{m(t)} \quad (7.22)$$

siendo

$$t' = t + \frac{T}{m(t)} \quad (7.23)$$

Si en vez de una conducción se tiene una serie de conducciones o un número de líneas NL determinado:

$$c(L,t') = c(0,t) + k \sum_{i=1}^{NL} \frac{T_i}{m_i(t)} \quad (7.24)$$

siendo

$$t' = \sum_{i=1}^{NL} \frac{T_i}{m_i(t)} = \sum_{i=1}^{NL} \frac{V_i}{Q_i \cdot m_i(t)} \quad (7.25)$$

Y el tiempo medio de permanencia en la conducción i :

$$T_i = \frac{V_i}{Q_i} = \frac{L_i \cdot A_i}{Q_i} \quad (7.26)$$

Finalmente si todas las conducciones y nudos comparten un mismo patrón temporal, la concentración final será:

$$c(L,t') = c(0,t) + \frac{k}{m_i(t)} \sum_{i=1}^{NL} T_i \quad (7.27)$$

con

$$t' = \frac{1}{m_i(t)} \sum_{i=1}^{NL} T_i \quad (7.28)$$

7.5 Optimización pseudogenética

Una vez aplicado el conocimiento ingenieril al problema para reducirlo considerablemente, se puede pasar a su optimización con la ayuda del programa BWN y posteriormente con el Holored II.

En primer lugar se va a exportar el archivo inicial de la red completa de EPANET a extensión .inp para poder trabajar con él en el software mencionado. Tras abrir con BWN el archivo .inp, se comprueba que los parámetros de tiempo y otros valores son correctos. A continuación se puede pasar a la simulación del archivo y calcular los tres criterios. Los resultados obtenidos para $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=1$ (ó $K1\ Coste = K2\ WANET = K3\ GHG =1$) son los siguientes:

Cost Results		Penalties:	
Pumping:	249505.3	Levels:	6.58634
New Pipes:	32986.55	Pressures:	-294.3915
Paralell Pipes:	39651.41	Tanks:	19.0
GHG Results		Objective Function:	
GHG CO2:	51885.3	Total Cost:	322143.26
GHG Pipes:	64305.24	Total GHG:	2139717.13
WANET Results		WANET:	0.05986
Numerador:	2668.44225	Penalties:	-268.80516
Denominador:	44577.89259	TOTAL:	2461860.44

Para leer estos datos es necesario saber que:

- *Cost Results* (\$/año) indica aquellos costes de operación de los bombeos, teniendo en cuenta tanto el coste inicial como el coste de la energía necesaria para su bombeo; y los costes de capital asociados a nuevas tuberías y a tuberías desdobladas. Se relaciona con el operador de Lagrange λ_1 de la ecuación (7.2).
- *GHG Results* (\$/año) indica los costes asociados a las emisiones de gases por las operaciones de las bombas (*GHG CO2*) y a las emisiones por la construcción de nuevas tuberías (*GHG Pipes*). Ligado al operador de Lagrange λ_3 de la ecuación (7.2).

- *WANET Results* (\$/año) muestra los costes relacionados con la edad del agua en función del valor que adquiere el numerador y el denominador del parámetro definido en el enunciado e indicado en la ecuación (4.1). Conectado al operador de Lagrange λ_2 de la ecuación (7.2).
- *Penalties* señala el valor de los factores de penalización en función de los niveles de los depósitos (β_2 , *Levels*), de las presiones mínimas en los nudos (β_1 , *Pressures*) y de los niveles de cada depósito al final de la simulación (β_3 , *Tanks*) según la ecuación (7.2).
- *Objective Function* finalmente muestra el resumen cada uno de los sumandos de la ecuación (7.2) que engloba los resultados de los apartados anteriores.

De este modo se ha obtenido para el archivo inicial aquellos valores de los parámetros simulados. Esta simulación es la que debe optimizarse con la ayuda de Holoed II en la pestaña de *Optimizar* del programa BWN. También se puede ir jugando con los valores de los parámetros *K1 Coste*, *K2 WANET* y *K3 GHG* para optimizar cada uno por separado, ya que en el enunciado del problema se considera que no necesariamente debe darse el óptimo de los tres parámetros al mismo tiempo, aun cuando en la realidad eso sería lo deseable.

No obstante, la optimización de la red al completo acarrearía tiempos de computación prohibitivos. Es por ello que se optimizará la red simplificada, ya que como se ha comentado anteriormente su simplificación cumple con el criterio de calidad y con el energético.

Abriendo por tanto la red simplificada en formato .inp, se obtienen los siguientes resultados iniciales para $K1 Coste = K2 WANET = K3 GHG = 1$:

Cost Results		Penalties:	
Pumping:	255182.94	Levels:	1.7889
New Pipes:	32986.55	Pressures:	-1.04962
Paralell Pipes:	39651.41	Tanks:	0.0
GHG Results		Objective Function:	
GHG CO2:	53653.65	Total Cost:	327820.89
GHG Pipes:	64305.24	Total GHG:	2210451.25
WANET Results		WANET:	0.06804
Numerador:	3039.10207	Penalties:	0.73928
Denominador:	44665.65	TOTAL:	2538272.21

Si se comparan los resultados con los obtenidos para la red completa, se demuestra que ambas redes poseen un comportamiento similar y que sus costes no difieren de forma excesiva.

Se puede pasar ahora, por tanto, a la optimización del problema mediante el empleo de la red simplificada. Se procederá a la optimización del parámetro *K1Coste* por lo que adoptaremos un valor de 1 para éste y un valor nulo para los otros dos: *K2 WANET* y *K3 GHG*. De igual modo se realizará con el resto de parámetros. Seguidamente se calcula la red mediante la pestaña *BWN→Comprobar* para ese parámetro en cuestión, y se pasa a *Optimizar* con Holored II.

Una vez dentro del programa Holored II se mantiene el cruzamiento en 0.8, una población de 100 individuos, una mutación con un ratio del 1.5% y un numero generaciones sin cambio en la solución de valor 100.

De este modo el programa comienza a calcular hasta obtener como solución el menor coste de bombeo. Mencionar que el tamaño de la población no debe ser menor a 25 individuos. Además cuanto más se acerque al número de variables de decisión, más perfecto será el resultado.

Una vez resuelta la optimización para cada parámetro, se puede seguir ejecutando EPANET con los nuevos resultados y realizando de nuevo la optimización. Este procedimiento puede llegar a ser infinito, en función de los resultados que se van obteniendo. En este caso se ha llegado a las soluciones optimas descritas en el siguiente epígrafe.

7.6 Solución final

Tras ejecutar HoloRed II y EPANET para cada uno de los parámetros, se ha llegado a las siguientes soluciones, consideradas como óptimas dentro del proceso seguido por este documento.

7.6.1 Diámetros de las tuberías

Los diámetros considerados para las tuberías que conforman el nuevo sector son:

Tabla 17. Diámetros asignados a las tuberías del nuevo sector DMA-6.

ID tubería	Diámetro (mm)
1	102
2	102
3	102
4	102
5	102
6	102
7	102
8	102
9	102
10	102
11	102
12	102
13	102
14	102

En cuanto a las tuberías a colocar en paralelo, se ha llegado a la siguiente solución:

Tabla 18. Diámetros de las tuberías a colocar en paralelo a las ya existentes.

ID tubería	Diámetro (mm)
N1000	0
N1025	102
N115	102
N22	711
N235	203
N295	0
N296	0
N397	356
N445	406
N465	356
N785	0
N787	203
N788	254
N791	254
N796	254
N892	356
N96	406
N995	305
N996	356

La variación de los diámetros de las tuberías puede resumirse gráficamente en la siguiente imagen.

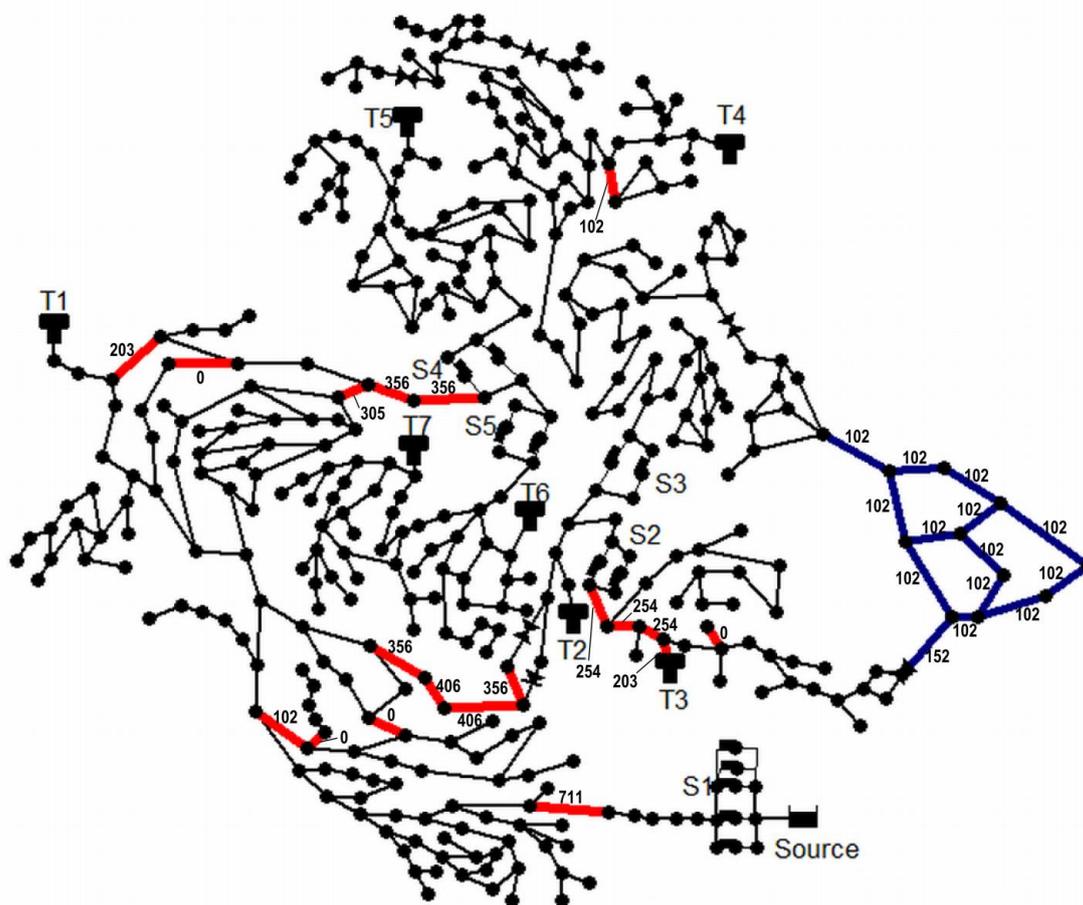


Figura 39. Valores de los nuevos diámetros de tuberías, tanto del nuevo sector como de las desdobladas.

7.6.2 Controles de operación de la red

Los controles óptimos para gestionar el encendido y apagado de las bombas en función del nivel al que se encuentre cada tanque vienen definidos en la siguiente tabla.

Por ejemplo para el tanque T1, su nivel máximo se encuentra a 6.50 m y el mínimo a 0.00 m. El grupo de bombas PU1, por ejemplo, el cual está asociado a este tanque T1, arrancará cuando el nivel en el tanque T1 sea de 6.045 m y se apagará cuando el nivel llegue a los 6.049 m. De igual modo se puede extrapolar a todas aquellas bombas que dependen del tanque T1.

Lo mismo ocurre para el resto de tanques excepto para el depósito T2 el cual está condicionado por la válvula V2, la cual es una válvula de control. Esta válvula abrirá o cerrará en función del nivel del depósito T2.

Tabla 19. Controles de operación asociados a las bombas y válvulas en función del nivel en los depósitos.

ID Depósito	Nivel Max (m)	ID Elemento	Nivel de encendido (m)	Nivel de apagado (m)
	Nivel Min (m)			
T1	6.50	PU1	6.045	6.049
		PU2	4.94	5.018
		PU3	2.535	3.01
	0.00	PU12 (8b)	6.175	6.197
		PU13 (11a)	0.715	4.301
T3	6.75	PU4	3.172	5.712
	0.00	PU5	0.742	4.707
T4	4.70	PU6	3.384	4.686
	0.00	PU7	1.175	2.444
T5	4.50	PU8	3.78	4.01
	0.00	PU9	2.61	3.479
T7	5.00	PU10	3.2	4.694
	0.00	PU11	4.2	4.648
T2	5.90	V2	2.36	3.103
	0.00			

7.6.3 Generadores diesel

A continuación se muestran el número de generadores diesel añadidos, con su potencia concreta y a la bomba a la que asistirían energéticamente en caso de fallo del sistema.

Por ejemplo el generador diesel número 1, tendría una potencia máxima de 200 kW y asistiría a las bombas PU1, PU2, PU3 y PU12. La potencia que tendrían estas bombas sería de 45.24 kW en el caso de PU1, PU2 y PU3. Y de 54.28 kW para el grupo PU12. El incorporar este generador diesel tendría un coste de 11 630 \$/año.

En total, la incorporación de los generadores diesel incrementaría los costes anuales hasta los 52 760 \$/año.

Tabla 20. Generadores diesel necesarios en caso de fallo del sistema.

Nº de Generador Diesel	Potencia Maxima (kW)	ID Bomba	Maxima Potencia Bomba (kW)	Coste Generador Diesel (\$/año)
1	200	PU1	45.24	11 630
		PU2	45.24	
		PU3	45.24	
		PU12	54.28	
2	100	PU4	31.67	10 560
		PU5	31.67	
3	100	PU6	49.76	10 560
		PU7	49.76	
4	100	PU8	31.67	10 560
		PU9	31.67	
5	50	PU10	22.62	9 450
		PU11	22.62	
TOTAL				52 760

7.6.4 Costes de bombeo, emisiones de gases y calidad del agua

Una vez definidos los valores de funcionamiento de cada elemento, es necesario conocer los costes que se alcanzarían con esta decisión. Remarcar de nuevo que la optimización se ha realizado con la ayuda de Holored II, en el cual se ha trabajado con una población de 100 individuos, una mutación del 1.5%, un cruce del 80% y un criterio de parada de 100 generaciones sin cambios. Tras 1781 generaciones, se ha obtenido la solución mostrada anteriormente. Los costes anuales asociados al bombeo, a la emisión de gases y a la calidad del agua han sido:

Minimización de Costes		
<i>Costes de Capital</i>		
Costes anuales tuberías	\$ 79,160.37	\$/año
Costes anuales depósitos	\$ 0.00	\$/año
Costes anuales bombas	\$ 7,404.00	\$/año
Costes anuales generadores diesel	\$ 52,760.00	\$/año
Costes anuales válvulas	\$ 529.00	\$/año
TOTAL Costes de Capital Anuales	\$ 139,853.37	\$/año
<i>Costes de Operación</i>		
Coste anual bombeo	\$ 239,006.15	\$/año
TOTAL Costes Anuales	\$ 378,859.52	\$/año

Minimización de emisiones de gases GHG		
<i>Capital GHG</i>		
GHG anual tuberías	81590.4592	kgCO2-e/año
<i>Operacional GHG</i>		
GHG anual bombeo	1973648.812	kgCO2-e/año
TOTAL GHG Anuales	2055239.27	kgCO2-e/año

Minimización de la edad del agua	
Valor WA_{net}	0.611905617

Estos valores se han deducido finalmente con la ayuda del programa BWN una vez conocidos todos los valores de operación de los elementos que conforman la red de abastecimiento. Si se comparan con los valores obtenidos en el apartado 7.5, se observa que no difieren cuantiosamente, pero año a año, la optimización energética se traduce en un ahorro económico que si es necesario tener en consideración.

7.6.5 Comparación de resultados con el resto de investigaciones

A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos por el resto de investigadores y en función de cada parámetro.

Tabla 21. Relación entre investigadores y soluciones obtenidas.

	Costes (\$)	GHG	WANET
Zheng Yi Wu	1,553,295.00	2,183,931.00	0.1100
Tom Walski	-	-	-
Christopher Stokes	1,000,000.00	3,620,000.00	0.1200
Stefano Alvisi	464,797.00	2,913,365.00	-
Saldarriaga J.	361,800.00	2,506,219.00	5.3000
Russell Bent	386,725.00	2,538,970.00	0.5500
Matos, J. P.	512,900.00	1,891,000.00	0.0700
Joong Hoon Kim & Do Guen Yoo	928,951.00	2,600,656.00	0.1920
UPV	378,859.52	2,055,239.00	0.6119
Michele Guidolin	420,537.00	1,588,413.00	0.0000
Qi Wang	385,777.00	2,237,599.00	0.0950
V. Kandiah & K. Mahinthakumar	338,840.00	2,060,809.00	0.3096
M.S. Morley & C. Tricarico	448,110.00	978,019.00	0.1450
Bryan A. Tolson	356,638.00	1,920,000.00	0.1500

Si se realiza un estudio de las distintas soluciones, teniendo en cuenta el mínimo y máximo valor de cada parámetro, se puede llegar a la conclusión de que el grupo multidisciplinar con la mejor solución ha sido el grupo de Michele Guidolin, perteneciente al Centre for Water Systems, College of Engineering, Mathematics and Physical Sciences, University of Exeter, UK. Seguido en segundo lugar por Bryan A. Tolson de la University of Waterloo, Ontario, Canada. Y en tercer lugar, V. Kandiah & K. Mahinthakumar de la North Carolina State University, USA.

7.6.6 Posibles mejoras de la solución obtenida

Una vez obtenida la solución anterior, pueden seguirse dos caminos. El primero de ellos sería el de mejorar el método de optimización y continuar aplicando un programa que optimice la solución hasta obtener otra red mejorada. Y el segundo camino podría ser el de volver a aplicar el conocimiento ingenieril a la solución adoptada. De este modo se solventarían las posibles debilidades/incoherencias que pudiese ofrecer el método de optimización empleado.

Si se estudia detalladamente la solución con la ayuda de EPANET se llega a varias conclusiones susceptibles de mejorar:

- El depósito T6 está prácticamente desbordando durante toda la simulación. Su nivel máximo es de 5.5m y si observamos la gráfica de evolución de dicho depósito, la gran mayoría del tiempo está en el límite. Se asume este problema pues ofrece mejores soluciones en el ámbito económico-energético y de calidad del sistema. Aun así en la realidad esto no sería factible y debería solventarse.

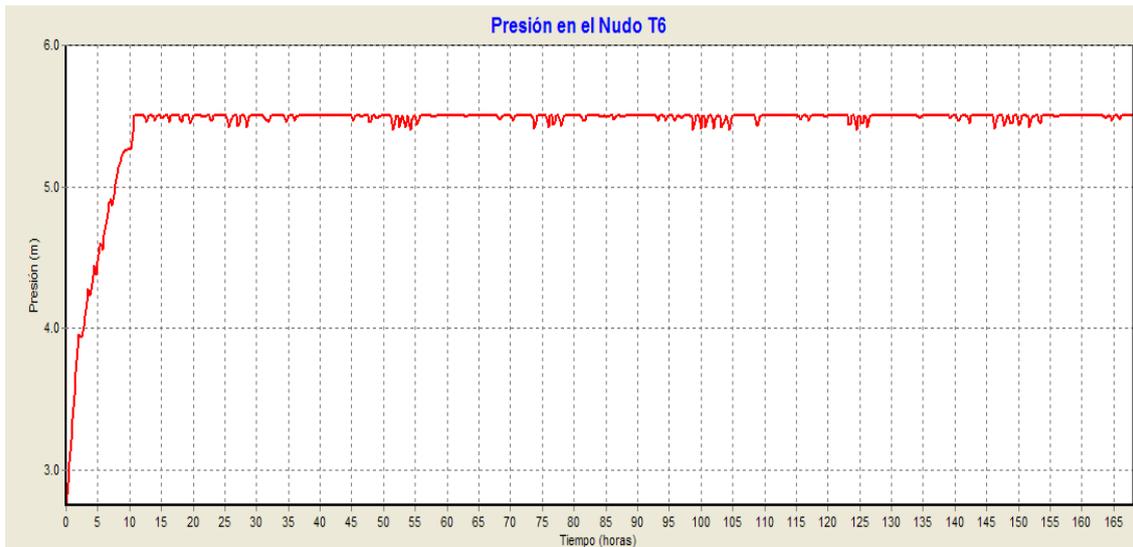


Figura 40. Evolución temporal del depósito T6. Niveles de agua existentes en el mismo.

- Existe una tubería en la cual la calidad del agua va a ser siempre bastante mala, ya que la velocidad de paso es muy pequeña y el tiempo de permanencia muy alto. Concretamente, la tubería P292 posee una velocidad de 1.29m/s, un caudal de 94.42l/s y un tiempo de permanencia de 159.56 h durante una longitud de 13.54 m con un diámetro de 305 mm. Lo ideal habría sido eliminarla y cambiarla por otra tubería de menor diámetro que incremente la velocidad del flujo pero las reglas no permiten esta solución, es decir, no se pueden eliminar tuberías.

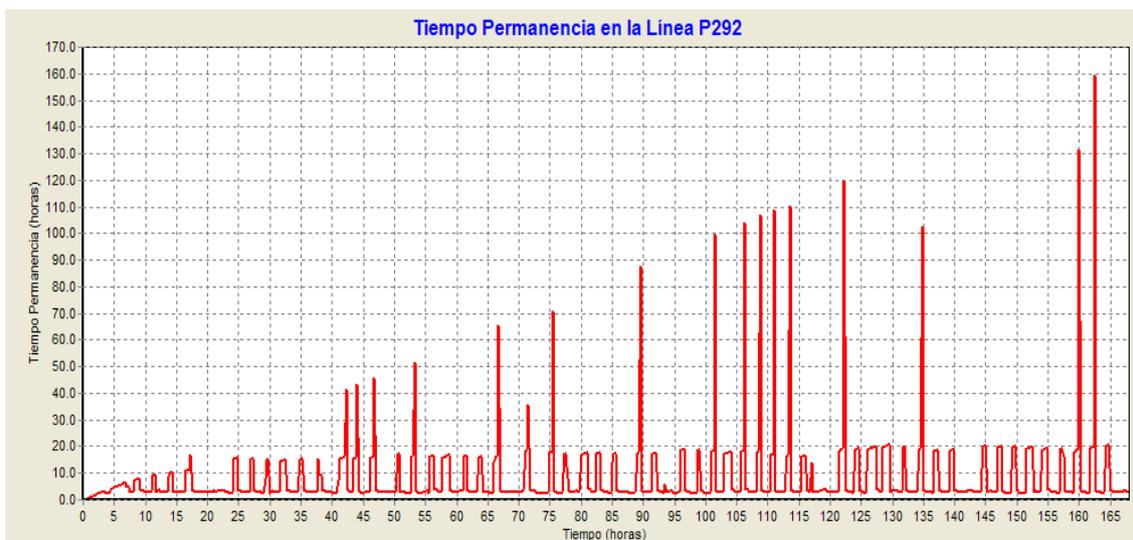


Figura 41. Tiempo de permanencia de la tubería P292.

Además, existe otra tubería conocida por P450 que se encuentra justo antes de la válvula de retención con un tiempo de permanencia creciente. Esto se debe a que la válvula de retención se encuentra cerrada y por lo tanto no hay flujo en esa tubería y el agua no se recicla.

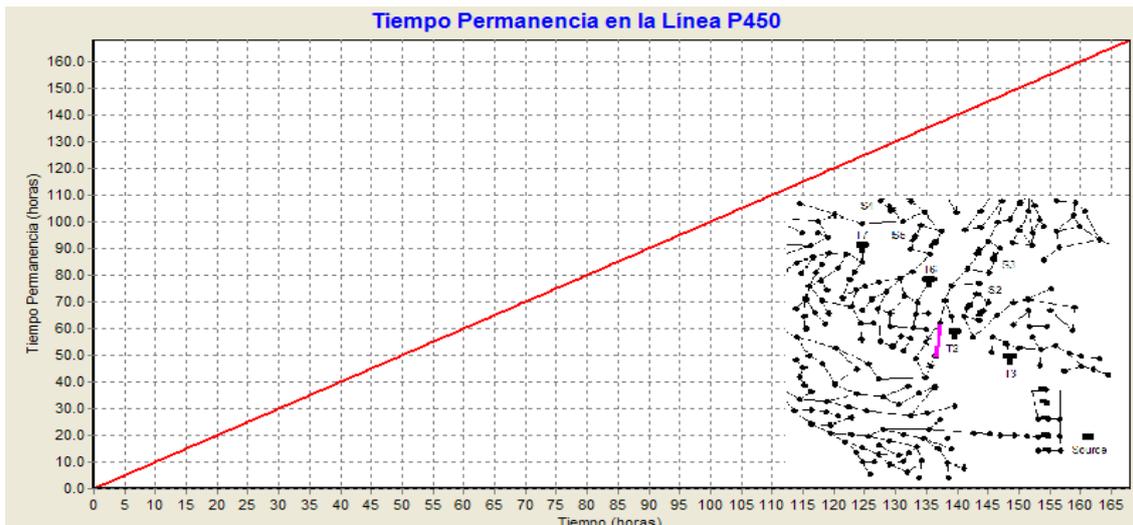


Figura 42. Calidad en la tubería P460. Tubería contigua a la válvula de retención.

Este problema podría arreglarse aceptando la sustitución de tuberías. Si consideramos esta opción como válida a pesar de que no se contempla en el enunciado, se puede llegar a mejorar la solución.

Por lo tanto si se implementa en la programación la opción de poder sustituir tuberías, el tiempo de permanencia del agua en la red disminuye significativamente. En la siguiente figura se muestran los tiempos máximos de permanencia del agua en las tuberías. Como se observa, se obtienen tiempos razonables, eliminando el problema de la tubería P292, la cual ahora posee un tiempo de permanencia máximo de 20.12 h, muy diferente a las 159.56 h que poseía anteriormente.

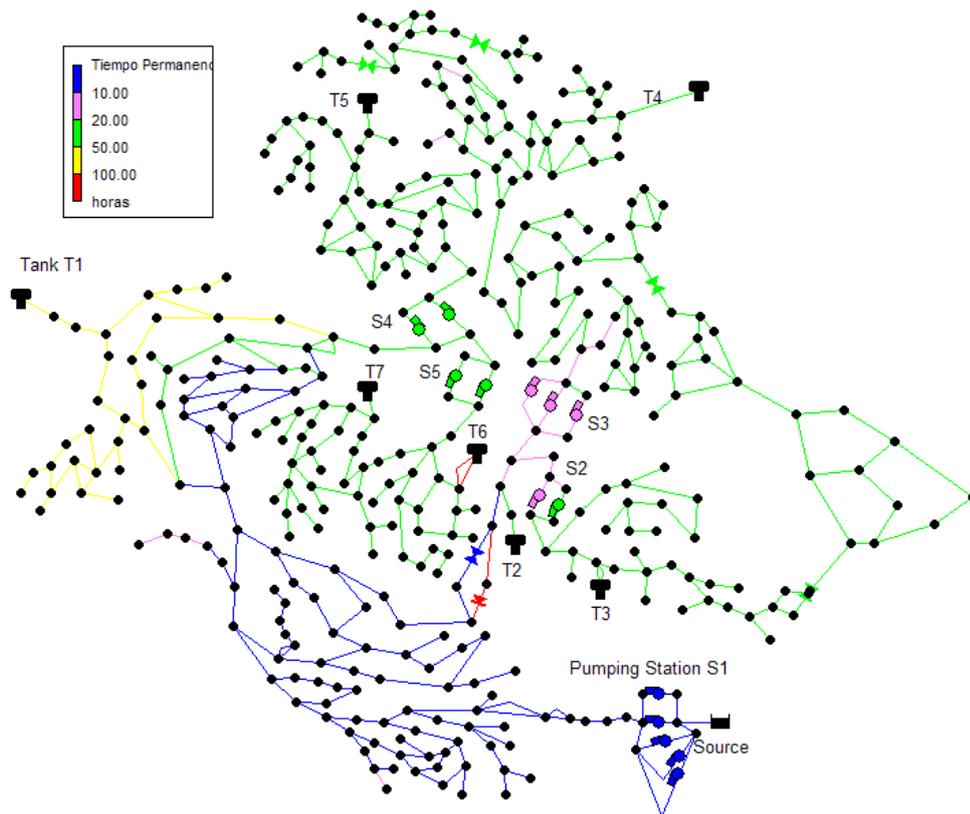


Figura 43. Tiempos de permanencia máximos del agua en la red de abastecimiento.

- La bomba PU3 no funciona en la solución final adoptada. Lo ideal sería eliminarla. Ahorrando así en el aspecto energético y económico.

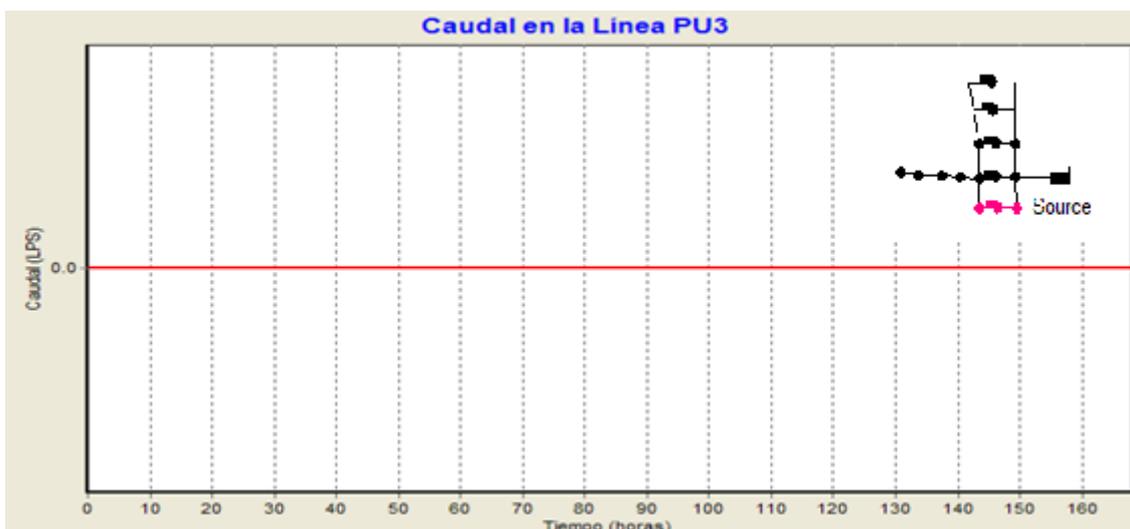


Figura 44. Caudal bombeado por la bomba PU3.

- Se podría estudiar el sustituir las bombas existentes, las cuales tienen un rendimiento del 65%, por bombas nuevas, las cuales poseen un rendimiento del 75%. Puede que se llegase a obtener una solución mas optima que la mencionada.

Esto es así porque se sabe que la potencia real de una bomba es inversamente proporcional a su rendimiento. Por lo que si el rendimiento aumenta, la potencia disminuye. Y si disminuye la potencia, disminuye el coste de funcionamiento. Solo faltaría comprobar que se cumplen el resto de condicionantes del problema: presiones, niveles de depósitos, calidad, etc.

8. CONCLUSIONES

Como se ha podido demostrar a lo largo de este Trabajo Fin de Máster, los algoritmos genéticos son una fuerte herramienta de resolución de problemas complejos. Además pueden incluso llegar a ofrecer distintas soluciones al problema en función del camino seguido. Esto se debe a que las estrategias de resolución no son fijas, y en función de cada caso, pueden ofrecer conclusiones diferentes entre sí. Esta variabilidad se puede eliminar si se ajustan adecuadamente los parámetros existentes, tales como mutación o reproducción del algoritmo, adaptando así el problema a las condiciones existentes. Sin embargo, en una situación real puede suceder que no se conozcan los parámetros iniciales. Por lo que habrá que escoger los parámetros muy cuidadosamente.

Tal y como se ha comentado anteriormente, una probabilidad de cruce elevada es recomendable para la mayoría de los problemas, pero no es condición necesaria, ya que muchas otras veces una probabilidad de cruce menor puede dar mejores resultados. Por otro lado, la mutación debe ser baja o cercana al 1%. Y el resto de parámetros deberán ser determinados en función del problema. La población a elegir debe atender a un valor óptimo, es decir, no por tener una población mayor se va a tener una solución mejor. La codificación dependerá del problema a resolver y el

método de selección se centrará seguramente en el de selección por rueda de ruleta, por ser el más común. Aun así, también dependerá del tipo de problema.

Los algoritmos tienden a imitar lo que sucede en la naturaleza, por lo que hay que tener cuidado con la pérdida de diversidad en la población ya que estas poblaciones no evolucionan y su adaptación a las condiciones no mejora en función del cambio de éstas. Para evitarlo es necesario trabajar adecuadamente con el parámetro de la mutación.

En este problema de investigación, catorce grupos multidisciplinares participaron en el problema. Las metodologías empleadas para llegar a cada una de las soluciones difieren significativamente. Sin embargo, ha existido una consideración común, la cual ha sido el empleo de métodos heurísticos, no sin antes reducir considerablemente el número y el rango de las variables de decisión.

El juicio ingenieril ha sido ampliamente utilizado. Se ha adoptado por ejemplo la disposición de tuberías de mayor diámetro en aquellas que poseían mayores pérdidas. Y además se ha optado por la simplificación de la red hasta en un 40%, lo que ha reducido el tiempo computacional hasta casi en un 50% para cada simulación. Otra consideración fue la capacidad inicial de bombeo de la estación S1 comparada con la demanda del sistema. Debido a que la capacidad existente no era suficiente para suministrar a todos los consumidores en buenas condiciones, se añadieron nuevas bombas con las que hacerlo posible.

La optimización mediante algoritmos pseudogenéticos ha demostrado que es efectiva ante problemas multiobjetivo. El pequeño número de parámetros del algoritmo permite encontrar fácilmente soluciones adecuadas. Además, si se reduce el número de variables de decisión se pueden obtener soluciones con un coste computacional aceptable.

La función objetivo empleada ha sido modificada teniendo en cuenta criterios de competitividad creados específicamente para este problema. En un problema real, estos parámetros deberían haber sido escogidos siguiendo un camino más real.

Además las presiones y los niveles mínimos de los tanques podrían haber sido más permisivas.

Se muestra además la gran dependencia entre la calidad del agua y el tiempo de estudio. Pequeñas variaciones temporales suponen variaciones importantes en el parámetro de calidad del agua WA_{net} .

En cuanto a la diferencia con el resto de investigadores, destacan principalmente: los medios empleados para la optimización, el método utilizado y el estudio en profundidad de soluciones dominantes, los cuales han conllevado el alcance de mejores conclusiones.

Este documento ofrece una gran oportunidad para tratar temas de optimización en redes de distribución de agua, uniendo enfoques tradicionales basados en la experiencia y nuevas técnicas de computación. Sin embargo, las redes actuales son mucho más grandes que la aquí representada. Además se ha supuesto que las demandas se conocen completamente, hecho muy poco común en la realidad.

Por otro lado existen acontecimientos que pueden darse y no han sido contemplados como pueden ser: rotura de tuberías, fallo del equipamiento, variación de la demanda, etc. Incluso tampoco se ha definido el sistema para contemplar futuras expansiones.

Otro aspecto muy importante son las posibles fugas de la red. Su coste puede llegar a ser bastante elevado, y no debería menospreciarse. También se da el caso de que los costes energéticos se han representado como un coste simple del kilovatio hora como función del tiempo. Sin embargo, las tarifas reales a menudo contienen un cargo por alcanzar el pico de la demanda, basado en el pico de kilovatios empleados durante un periodo de tiempo.

Muchos países trabajan además con un flujo denominado de incendios que también se tiene en cuenta en el diseño para eventos poco usuales. Este flujo suele influir de forma significativa en el diseño de las tuberías, de las bombas y de los depósitos. A pesar de ello, el flujo destinado a este objetivo no se ha tenido en cuenta tampoco en este documento.

Otras simplificaciones comparadas con el mundo real y que no se han llevado al extremo son: i) el desgaste por funcionamiento y por los arranques de las bombas no se han considerado; ii) la sustitución de bombas ha sido mediante bombas de velocidad fija, es decir, las bombas de velocidad variable no se han considerado; iii) la cavitación no se ha tenido en cuenta y el único requerimiento es mantener una presión por encima de 0 si el nudo tienen una demanda nula; iv) el coste de los generadores diesel no tiene en cuenta las tareas de mantenimiento; v) solo se han considerado emisiones de gases por la construcción y por la operación de las bombas.

Finalmente, la ausencia de un mapa a escala que mostrase las calles y otros condicionantes físicos de la zona, así como información previa de los costes operacionales de la red, han provocado ciertas limitaciones a la hora de resolver el problema mediante juicio ingenieril.

Aún con todo lo anterior, este Trabajo Fin de Máster conforma un documento de investigación pionero en el mundo de los abastecimientos de agua. No obstante, el desarrollo de estas metodologías puede llegar a resolver grandes problemas energéticos y ayudar económicamente a grandes y pequeñas poblaciones. Simplemente se trata de un pequeño punto de partida que en un futuro puede llegar a resolver grandes problemas.

APÉNDICE

A continuación se muestran las curvas de las bombas disponibles. Las bombas 8, 9, 10 y 11 corresponden a bombas ya operativas en la actualidad. Así mismo todas ellas cubren la totalidad del rango de caudales, desde caudal nulo hasta el caudal correspondiente a una altura nula. Las ecuaciones de cada bomba también se muestran en cada modelo.

Curva de bomba nº 8

$$H=70.00-0.07731Q^{1.36}$$

Modelo	Caudal (l/s)	Altura (m)
8	0	70
8	60	50
8	100	30

Curva de bomba nº 10a

$$H=120.00-0.008915Q^{2.59}$$

Modelo	Caudal (l/s)	Altura (m)
10a	0	120
10a	15	110
10a	35	30

Curva de bomba nº 9

$$H=90.00-0.01331Q^{2.15}$$

Modelo	Caudal (l/s)	Altura (m)
9	0	90
9	30	70
9	50	30

Curva de bomba nº 11a

$$H=90.00-0.05866Q^{2.41}$$

Modelo	Caudal (l/s)	Altura (m)
11a	0	90
11a	15	50
11a	20	10

Curva de bomba nº 10

$$H=120.00-0.001477Q^{2.59}$$

Modelo	Caudal (l/s)	Altura (m)
10	0	120
10	30	110
10	70	30

Curva de bomba nº 8b

$$H=84.00-0.09277Q^{1.36}$$

Modelo	Caudal (l/s)	Altura (m)
8b	0	84
8b	60	60
8b	100	36

Curva de bomba nº 11

$$H=90.00-0.01104Q^{2.41}$$

Modelo	Caudal (l/s)	Altura (m)
11	0	90
11	30	50
11	40	10

Curva de bomba nº 9b

$$H=108.00-0.01597Q^{2.15}$$

Modelo	Caudal (l/s)	Altura (m)
9b	0	108
9b	30	84
9b	50	36

Curva de bomba nº 8a

$$H=70.00-0.198Q^{1.36}$$

Modelo	Caudal (l/s)	Altura (m)
8a	0	70
8a	30	50
8a	50	30

Curva de bomba nº 10b

$$H=144.00-0.001773Q^{2.59}$$

Modelo	Caudal (l/s)	Altura (m)
10b	0	144
10b	30	132
10b	70	36

BIBLIOGRAFÍA

- Alperovits, E., and Shamir, U. (1977). **“Design of optimal water distribution systems.”** Water Resour. Res., 13(6): 885–900.
- Alvisi, Stefano; Creaco, Enrico; Franchini, Marco. **“A multi-step approach for optimal design of the d-town pipe network model”** Department of Engineering - University of Ferrara, Ferrara, ITALY. 2012
- Alvisi S. , Franchini M. (2009) **“Multiobjective optimization of rehabilitation and leakage detection scheduling in water distribution systems.”** Journal of Water Resources Planning and Management, 135(6): 426–439
- Arranz de la Peña, Jorge; Parra Truyol, Antonio **“Algoritmos Genéticos”**, Universidad Carlos III.
- Arulraj, G.P. and Rao, H.S. (1995). **“Concept of Significance Index for Maintenance and Design of Pipe Networks.”** Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 121(11): 833-837.
- Atiquzzaman, M., Liong, S. Y. and Yu, X. (2006). **“Alternative decision making in water distribution network with NSGA-II.”** Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 132(2): 122-126.
- Bene, J. G., Selek, I., & Hös, C. **“Neutral search technique for short-term pump schedule optimization.”** *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(1), 133-137.2009
- Bent, Russell; Coffrin, Carleton; Judi,David; McPherson,Tim; and van Hentenryck; Paskal. **“Water Distribution Expansion Planning with Decomposition”** Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico; NICTA, Australia. 2012
- Christopher Stokes, Christopher;Wu, Wenyan ; Dandy, Graeme; **“Battle of the Water Networks ii: Combining Engineering Judgment with Genetic Algorithm Optimization”** University of Adelaide, Adelaide, SA, Australia. 2012
- Coello Coello, Carlos A. **“Introducción a los Algoritmos Genéticos”**, Soluciones Avanzadas. Tecnologías de Información y Estrategias de Negocios, Año 3, No. 17, Enero de 1995, pp. 5-11.
- Do Guen Yoo , Ho Min Lee , Joong Hoon Kim;**“Optimal Design of D-Town Network Using Multi-Objective Harmony Search Algorithm”** , Korea University, Seoul, Korea. 2012
- Deb, K., Agrawal R.B, **“Simulated binary crossover for continuous search space, Complex Systems”** 9 (2) (1995) 115–148.
- Deb, K.; Goyal, M., **“A combined genetic adaptive search (geneas) for engineering design”**, Computer Science and Informatics 26 (4) (1996) 30–45.

- Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal, e T. Meyarivan. 2002. '**A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II**'. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on* 6 (2): 182–197.
- Deb, K. & Tiwari, S. (2008) "**Omni-Optimizer: A Generic Evolutionary Algorithm for Single and Multi-Objective Optimization**" *European Journal of Operational Research* 185(3), pp1062-1087.
- Gil Londoño, Natyhelem "**Algoritmos genéticos**"; Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Estadística, 2006.
- Gestal Pose, Marcos "**Introducción a los Algoritmos Genéticos**", Universidad de A Coruña, Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. 2012
- Goldberg, D. E., & Kuo, C. H. "**Genetic algorithms in pipeline optimization.**" *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1(2), 128-141. 1987
- Guidolin, Michele; Fu, Guangtao; Reed, Patrick. "**Parallel Evolutionary Multiobjective Optimization of Water Distribution System Design**" Centre for Water Systems, College of Engineering, Mathematics and Physical Sciences, University of Exeter, North Park Road, Exeter, EX4 4QF, UK. Department of Civil and Environmental Engineering, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, PA 16802, USA. 2012
- Iglesias Rey, P. L., Martínez Solano, F. J., Fuertes Miquel, V., & López Patiño, G. "**Utilización de curva de consigna de abastecimiento de agua para determinar el régimen de explotación más eficiente.**" *Tecnología del Agua*, (286), 50-55. 2007
- Iglesias-Rey, P.L., Oyarzún Constabel, S., Martínez Solano, J., Martínez Solano, P.D. "**Optimización energética de las redes de abastecimiento de la ciudad de Murcia. XI Seminario Iberoamericano de Abastecimiento Agua y Drenaje (SEREA 2012)**" Coimbra (Portugal). 2012a
- Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., Mora-Melia, D., & Ribelles-Aguilar, J. V. "**The battle water networks ii: Combination of meta-heuristic techniques with the concept of setpoint function in water network optimization algorithms.**" In WDSA 2012: 14th Water Distribution Systems Analysis Conference. 24-27 September 2012 in Adelaide, South Australia (p. 510). Engineers Australia. 2012b
- Iglesias Rey, Pedro L.; Martínez Solano, F.Javier "**Análisis y diseño de redes de distribución de agua mediante Epanet 2vE**", Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, 2012.
- Ilich, N., & Simonovic, S. P. "**Evolutionary algorithm for minimization of pumping cost.**" *Journal of computing in civil engineering*, 12(4), 232-240. 1998
- Jowitt, P. W. and Germanopoulos, G. (1992). "**Optimal pump scheduling in water-supply networks.**" *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, 118 (4), 406–422.

- Kandiah,V.; Jasper,M. ; Drake,K.; Shafiee, M.E.; Barandouzi,M. ; Berglund,A.D.; Brill, E.D. ; Mahinthakumar,G. ; Ranjithan,S. ; Zechman, E. **“Population-Based Search Enabled by High Performance Computing for BWN-II Design”** North Carolina State University, Raleigh, NC, USA. 2012
- Lansey K. E., and Mays L. W., (1989) **“Optimization Model for Water Distribution System Design”**, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 115(10), 1401-1418
- Lopez Diaz, Jose Carlos **“Un algoritmo genético con codificación real para la evolución de transformaciones lineales”**; Universidad Carlos II de Madrid, Proyecto Fin de Carrera, 2010.
- López-Ibáñez, M., Prasad, T. D., & Paechter, B. **“Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks.”** *Journal of water resources planning and management*, 134(4), 337-346. 2008
- Martinez, F., Hernandez, V., Alonso, J. M., Rao, Z. and Alvisi, S. (2007) **“Optimizing the operation of the Valencia water-distribution network.”** J. Hydroinformatics, 9(1): 65–78.
- Matías Sánchez, Agustín y Pérez García, Rafael **“Diseño de redes de distribución de agua contemplando la fiabilidad, mediante algoritmos genéticos”**; Universidad Politécnica de Valencia Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, 2003.
- Matos, J. P., Monteiro, A. J., Matias, N.; **“Redesigning Water Distribution Networks Through a Structured Evolutionary Approach”** Technical University of Lisbon, Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Vaud, Switzerland. 2012
- McCormick, G., & Powell, R. S. **“Optimal pump scheduling in water supply systems with maximum demand charges.”** *Journal of water resources planning and management*, 129(5), 372-379. 2003
- Mora, D., Fuertes, V. S., Iglesias, P. L., & Martinez, F. J. **“Study of sensitivity of the parameters of a genetic algorithm for design of water distribution networks.”** *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 1(2), 61-69. 2007
- Mora, D., Iglesias, P. L., Martinez, F. J., & Fuertes, V. S. **“Statistical Analysis of Water Distribution Networks Design Using Harmony Search.”** In *World Environmental and Water Resources Congress 2009@ sGreat Rivers* (pp. 1-11). ASCE. 2009
- Mora-Meliá, Daniel. **“Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia.”** Tesis doctoral. UPV. 2012
- Morley, M.S. ; Tricarico, C. ; de Marinis, G. **“Multiple-Objective Evolutionary Algorithm Approach to Water Distribution System Model Design”** Centre for Water Systems, University of Exeter, North Park Road, Exeter, Devon (UK),Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica, Università di Cassino e del Lazio Meridionale, via Di Biasio, 43, Cassino, Frosinone (Italy). 2012

- Nitivattananon, V., Sadowski, E. C., & Quimpo, R. G. **“Optimization of water supply system operation.”** *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(5), 374-384. 1996
- Ormsbee, L. E. & Lansey, K. E. (1994). **“Optimal control of water supply pumping systems.”** *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 120(2): 237–252.
- Ormsbee, L. E., & Reddy, S. L. (1995). **“Nonlinear heuristic for pump operations.”** *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121(4), 302-309.
- Pérez García, Rafael. **“Dimensionado óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando los elementos de regulación”.** Tesis doctoral. UPV, 1993
- Qi Wang, Qi; Liu, Haixing; McClymont, Kent; Johns, Matthew; Keedwell, Edward. **“A Hybrid of Multi-Phase Optimisation and Iterated Manual Intervention for BWN-II”** Centre for Water Systems, University of Exeter, Exeter, Devon, UK; School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang, China. 2012
- Saldarriaga J., Páez D., Hernández D., Bohórquez J.; **“An Energy Based Methodology Applied to D-Town”**, Universidad de los Andes, Colombia. 2012
- Salomons, E., Goryashko, A., Shamir, U., Rao, Z. and Alvisi, A. (2007) **“Optimizing the operation of the Haifa-A water-distribution network.”** *J. Hydroinformatics*, 9(1): 51–64.
- Savic, D. A., and Walters, G. A. (1997). **“Genetic algorithms for least cost design of water distribution networks.”** *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 123(2): 67–77.
- Shaw, Paul. **“Using Constraint Programming and Local Search Methods to Solve Vehicle Routing Problems.”** In *Proceedings of the Fourth International Conference on the Principles and Practice of Constraint Programming (CP)*. Pisa, Italy, 1998, 417–431.
- Simpson, A. R., Dandy, G. C., and Murphy, L. J. (1994). **“Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization.”** *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 120(4): 423–443.
- Samani, H. M., & Mottaghi, A. (2006). **“Optimization of water distribution networks using integer linear programming.”** *Journal of hydraulic engineering*, 132(5), 501-509.
- Su, Y.C., Mays, L.W., Duan, N. e K.E. Lansey, (1987) **“Reliability-based optimization model for water distribution system”**, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 114(12), 1539-1556

- Sun, Y. H., WG. Yeh, W., Hsu, N. S., & F. Louie, P. W. (1995). **“Generalized network algorithm for water-supply-system optimization.”** *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121(5), 392-398.
- Tang, Y., P. M. Reed, and J. B. Kollat. 2007. **‘Parallelization Strategies for Rapid and Robust Evolutionary Multiobjective Optimization in Water Resources Applications’.** *Advances in Water Resources* 30 (3): 335–353.
- Tolson, B. A., Maier, H. R., Simpson, A. R., & Lence, B. J. (2003). **“Genetic algorithms for reliability-based optimization of water distribution systems.”** *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1), 63-72.
- Tolson, Bryan A. ; Khedr, Ayman ; Asadzadeh, Masoud. **“The Battle Of The Water Networks (BWN-II): Padds Based Solution Approach”** University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada. 2012
- Ulanicki, B., Zhenpfund, A., Martinez, F. **“Simplification of water distribution models”** Proc., Hydroinformatics 96, A. Muller, ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 493–500, 1996.
- Vrugt J. A. and Robinson B. A. (2007). **“Improved Evolutionary Optimization from Genetically Adaptive Multimethod Search.”** *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(3): 708-711.
- Vamvakeridou-Lyroudia, L. S., Walters, G. A., & Savic, D. A. (2005). **“Fuzzy multiobjective optimization of water distribution networks.”** *Journal of water resources planning and management*, 131(6), 467-476.
- Van Zyl, J. E., Savic, D. A., & Walters, G. A. (2004). **“Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm.”** *Journal of water resources planning and management*, 130(2), 160-170.
- Vasan, A., & Simonovic, S. P. (2010). **“Optimization of water distribution network design using differential evolution.”** *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(2), 279-287
- Wu, W., Maier, H. R., and Simpson, A. R. (2010b). **“Single-objective versus multiobjective optimization of water distribution systems accounting for greenhouse gas emissions by carbon pricing.”** *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(5), 1-11.
- Yi Wu, Zheng; Elsayed, Samir M; Song, Yuan, **“High Performance Evolutionary Optimization For Batter of The Water Network II”** Applied Research, Bentley Systems, Incorporated, Watertown, CT, USA; Department of Computer Science and Engineering, University of Connecticut, Storrs, USA. 2012
- Zecchin, A. C, Simpson, A. R., Maier, H. R., and Leonard, M., Roberts, A. J., and Berrisford, M. J. (2006). **“Application of two ant colony optimization algorithms to water distribution system optimization.”** *Mathematical and Computer Modelling*, 44, 451–468.

