



Título del Trabajo Fin de Máster:

***DISEÑO ÓPTIMO DE UNA RED DE
DISTRIBUCIÓN DE AGUA CON
OBJETIVOS MÚLTIPLES UTILIZANDO
MÉTODOS HEURÍSTICOS
(ALGORITMOS GENÉTICOS)***

Intensificación:

HIDRÁULICA URBANA

Autor:

MILLET GARCÍA, MÓNICA

Director/es:

PÉREZ GARCÍA, RAFAEL

IZQUIERDO SEBASTIÁN, JOAQUÍN

Fecha: **SEPTIEMBRE, 2014**

Título del Trabajo Fin de Máster:

DISEÑO ÓPTIMO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA CON OBJETIVOS MÚLTIPLES UTILIZANDO MÉTODOS HEURÍSTICOS (ALGORITMOS GENÉTICOS)

Autor: **MILLET GARCÍA, MÓNICA**

Tipo	A <input type="checkbox"/>	B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	RAFAEL PÉREZ GARCÍA		Fecha de Lectura	SEPT. 2014
Codirector1	JOAQUÍN	IZQUIERDO		
Codirector2	SEBASTIÁN			
Tutor	<NOMBRE Y APELLIDOS>			

Resumen:

RESUMEN

Los sistemas urbanos de distribución de agua envejecen al tiempo que las ciudades continúan creciendo, incrementando las necesidades de agua tanto en cantidad como en calidad. Es por ello que en la gestión del agua urbana son de capital importancia los trabajos de rehabilitación y modernización de la red.

Cuando se plantea el diseño o ampliación de una red, no sólo se deben considerar las dimensiones de los componentes, también la operación del sistema, de manera que todo el conjunto permita suministrar las demandas requeridas por los usuarios a las presiones adecuadas. Pero además de este requisito tradicional, los gestores de hoy en día tienen en cuenta otros factores no funcionales como la fiabilidad y la robustez en el funcionamiento, el impacto del dimensionado en la calidad del agua, las emisiones de CO2 relacionadas con el consumo energético del sistema, el nivel de fugas en la red, etc.

Parece evidente que cuanto más complejo y sofisticado sea el funcionamiento del sistema en relación a su diseño, y a las restricciones, mayores garantías ofrecerá la solución definitiva. Sin embargo este planteamiento incrementa considerablemente las dimensiones del problema, en cuanto al número de variables sobre las que decidir.

Esta es la razón por la que, en los últimos tiempos, muchas de las investigaciones relativas a la optimización del diseño de nuevos sistemas, y a la ampliación o modernización de sistemas existentes, han estado protagonizadas por toda una nueva generación de metodologías heurísticas, surgidas en respuesta a la gran complejidad del planteamiento del problema, no solo por el número de variables de distinta naturaleza sino, sobre todo, por la dificultad que existe en algunos casos para dar forma a las relaciones funcionales entre las variables, bien sean funciones objetivo o restricciones.

Las técnicas heurísticas si bien no garantizan encontrar la solución óptima, al contrario que otros métodos exactos, contienen las estrategias de acción para alcanzar los objetivos y encontrar soluciones realmente cercanas de la óptima. En ocasiones puede ser preferible encontrar al menos una solución aproximada, pero viable, aunque algunos pocos parámetros puedan no satisfacer estrictamente una restricción.

El objetivo principal del trabajo es analizar el problema de la modernización/ampliación de un sistema de distribución de agua, planteado en la literatura reciente, que se enfrenta a unas necesidades de demanda de caudal creciente, ante la perspectiva de cumplir objetivos múltiples, no solamente la optimización económica.

El primer paso consiste en analizar la situación del sistema actual en relación a una situación de demanda futura, y a partir de este análisis, determinar las posibles acciones a emprender para verificar las demandas futuras satisfaciendo los requisitos de presión de servicio y calidad.

Las actuaciones sobre la red comprenden los cambios o ampliaciones en la capacidad de las tuberías y estaciones de bombeo, con un primer objetivo, que es poder suministrar las demandas previstas a la presión de servicio requerida. Si bien se plantean objetivos adicionales, como son minimizar los costes de inversión y de operación (energéticos), minimizar las emisiones de CO2 (asociadas a la producción de los elementos y al consumo energético del sistema) y minimizar el tiempo de residencia del agua en las tuberías, como una medida indirecta de la calidad del agua servida.

La vía que se ha utilizado para abordar el problema es la optimización multiobjetivo. En los problemas con múltiples objetivos, la interacción entre ellos puede hacer que la mejora de alguno empeore el valor de los otros y que no exista una única solución óptima sino un conjunto de soluciones de compromiso (óptimos de Pareto) que apoyarán la decisión sobre la solución definitiva. Esta decisión puede manejarse bien por parte del decisor cuando sólo se consideran dos objetivos, pero se complica con más de dos, sobre todo cuando hay objetivos contrapuestos entre sí frente a otros que son compatibles. Sin embargo también cabría la posibilidad de replantear el problema multiobjetivo a un único objetivo, bien agrupando los distintos objetivos en uno solo bien reformulando todos los objetivos salvo uno como restricciones.

Por ello, en este trabajo se busca analizar la naturaleza del problema y encontrar una solución óptima para el diseño y operación de una red, de manera que se satisfagan los múltiples objetivos, considerándolos bien como parte de una función objetivo a minimizar o maximizar, bien como un conjunto de restricciones (duras o blandas) del problema.

En el desarrollo de este trabajo se ha utilizado EPANET como herramienta clave en la simulación del funcionamiento del sistema, en combinación con una aplicación de Algoritmos Genéticos, EVOLVER, que lleva el peso del proceso de optimización.

EVOLVER trabaja en el entorno de la hoja de cálculo EXCEL, lo que permite la conexión con EPANET mediante macros, que en este caso han sido programas en Visual Basic para aplicaciones (VBA). La conexión ha sido posible gracias a las funciones y procedimientos de la librería TOOLKIT de EPANET.

RESUM

Els sistemes urbans de distribució d'aigua envellixen alhora que les ciutats continuen creixent, incrementant les seues necessitats d'aigua tant en quantitat com en qualitat. És per això que en la gestió de l'aigua urbana són de capital importància els treballs de rehabilitació i modernització de la xarxa.

Quan es planteja el disseny o ampliació d'una xarxa, no sols s'han de considerar les dimensions

dels components, també l'operació del sistema, de manera que tot el conjunt permeta subministrar les demandes requerides pels usuaris a les pressions adequades. Però a més d'aquest requisit tradicional, els gestors de hui en dia tenen en compte altres factors no funcionals com la fiabilitat i la robustesa en el funcionament, l'impacte del dimensionat en la qualitat de l'aigua, les emissions de CO2 relacionades amb el consum energètic del sistema, el nivell de fugues en la xarxa, etc.

Pareix evident que quant més complex i sofisticat siga el funcionament del sistema en relació al seu disseny, i a les restriccions, majors garanties oferirà la solució definitiva. No obstant això este plantejament incrementa considerablement les dimensions del problema, en quant al nombre de variables sobre les quals decidir.

Esta és la raó per la qual, en els últims temps, moltes de les investigacions relatives a l'optimització del disseny de nous sistemes, i a l'ampliació o modernització de sistemes existents, han estat protagonitzades per tota una nova generació de metodologies heurístiques, sorgides en resposta a la gran complexitat del plantejament del problema, no sols pel nombre de variables de distinta naturalesa sinó, sobre tot, per la dificultat que existix en alguns casos per a donar forma a les relacions funcionals entre les variables, bé siguen funcions objectiu o restriccions.

Les tècniques heurístiques si bé no garantixen trobar la solució òptima, al contrari que altres mètodes exactes, contenen les estratègies d'acció per a assolir els objectius i trobar solucions realment pròximes de l'òptima. De vegades pot ser preferible trobar almenys una solució aproximada, però viable, encara que alguns pocs paràmetres puguin no satisfer estrictament una restricció.

L'objectiu principal del treball és analitzar el problema de la modernització/ampliació d'un sistema de distribució d'aigua, plantejat en la literatura recent, que s'enfronta a unes necessitats de demanda de cabal creixent, davant la perspectiva de complir objectius múltiples, no sols l'optimització econòmica.

El primer pas consistix en analitzar la situació del sistema actual en relació a una situació de demanda futura, i a partir d'aquest anàlisi, determinar les possibles accions a emprendre per a verificar les demandes futures satisfent els requisits de pressió en el servici i qualitat.

Les actuacions sobre la xarxa comprenen els canvis o ampliacions en la capacitat de les canonades i estacions de bombament, amb un primer objectiu, que és poder subministrar les demandes previstes a la pressió en el servici requerida. Si bé es plantegen objectius addicionals, com són minimitzar els costos d'inversió i d'operació (energètics), minimitzar les emissions de CO2 (associades a la producció dels elements i al consum energètic del sistema) i minimitzar el temps de residència de l'aigua en les canonades, com una mesura indirecta de la qualitat de l'aigua servida.

La via que s'ha utilitzat per a abordar el problema és l'optimització multiobjectiu. En els problemes amb múltiples objectius, la interacció entre ells pot fer que la millora d'algun empitjore el valor dels altres i que no existisca una única solució òptima sinó un conjunt de solucions de compromís (òptims de Pareto) que recolzaran la decisió sobre la solució definitiva. Esta decisió pot manejar-se bé per part del decisor quan només es consideren dos objectius, però es complica amb més de dos, sobre tot quan hi ha objectius contraposats entre sí front d'altres que són compatibles. No obstant això també cabria la possibilitat de replantejar el problema multiobjectiu a un únic objectiu, bé agrupant els distints objectius en només un bé reformulant tots els objectius excepte un com a restriccions.

Per això, en aquets treball es busca analitzar la naturalesa del problema i trobar una solució òptima per al disseny i operació d'una xarxa, de manera que es satisfacen els múltiples objectius, considerant-los bé com a part d'una funció objectiu a minimitzar o maximitzar, bé com a un conjunt de restriccions (dures o blanques) del problema.

En el desenvolupament d'aquest treball s'ha utilitzat EPANET com a ferramenta clau en la simulació del funcionament del sistema, en combinació amb una aplicació d'Algoritmes Genètics, EVOLVER, que porta el pes del procés de optimització.

EVOLVER treballa en l'entorn del full de càlcul EXCEL, la qual cosa permet la connexió amb EPANET mitjançant macros, que en aquest cas han sigut programades en Visual Basic per aplicacions (VBA). La connexió ha sigut possible gràcies a les funcions i procediments de la llibreria TOOLKIT d'EPANET.

SUMMARY

Urban water distribution systems age as cities continue growing, thus increasing water needs in terms of both quantity and quality. As a result, works on rehabilitation and modernization of the network are crucial in urban water management.

When designing or expanding a network, not only the dimensions of the components must be considered, but also the operation of the system, so that the entire supply allows for the demands required by users at the required pressure. However, besides this traditional requirement, nowadays managers take into account other factors such as functional reliability and operation robustness, impact of sizing on water quality, CO2 emissions related to the system energy consumption, level of leakage in the network, and so on.

It seems clear that the more complex and sophisticated system operation is in relation to its design and restrictions, the better solutions will be obtained. However, this approach significantly increases the size of the problem regarding the number of decision variables.

This is the reason why, recently, most research on optimizing the design of new systems and the expansion or modernization of existing systems have been carried out by a new generation of heuristic methods that emerged in response to the high complexity of the problem statement, not only because of the number of variables of different nature, but also, above all, by the difficulty in some cases to shape the functional relationships between the variables, whether objective functions or constraints.

Although heuristic techniques do not guarantee to find optimal solutions, unlike other exact methods, they contain action strategies able to achieve the objectives and find quasi-optimal solutions. Sometimes it may be preferable to find at least one approximate solution, provided it is feasible, in spite of the fact that a few parameters may not strictly satisfy a constraint.

The main objective of this document is to analyze the problem of modernization and expansion of water distribution system, proposed in the recent literature, facing growing demand needs, from the perspective of meeting multiple objectives, not only economic optimization.

The first step is to analyze the current performance of the system relative to a situation of future demand and, from this analysis, to identify possible actions to verify that future demands will meet requirements of pressure and quality.

Actions on the network include changes or additions to the capacity of pipelines and pumping stations, the first goal being to supply the required demand to the required pressure. With this, additional objectives are considered, such as minimizing investment and operating costs (related to energy), minimizing CO2 emissions (associated with the production of the elements and the energy consumption of the system) and minimizing the residence time of water in the pipes (as an indirect measure of the quality of water).

To address this problem we use a multi-objective perspective. In problems with multiple objectives, the interaction between them may impair one of them when improving the value of another. In general, there is no single optimal solution but a set of compromise solutions (Pareto optimal), which will support the decision on the final solution. This situation is easy to handle by the decision-maker when only two objectives are involved, but having more than two objectives pose additional problems, especially when there are conflicting objectives. However, it is also possible to recast the multi-objective problem into a single-objective one, either by grouping the different objectives into just one, or by suitably reformulating as constraints all but one of the objectives.

This work attempts to analyze the nature of the problem and to find an optimal solution for the design and operation of a network so that multiple objectives are met, considering them either as part of an objective function to minimize or maximize, or as a set of constraints (hard or soft).

In the development of this work a key tool in simulation of system performance, such as EPANET, has been used, combined with an application of Genetic Algorithms, EVOLVER, carrying the weight of the optimization process.

EVOLVER works on an EXCEL spreadsheet, which allows efficient connection to EPANET through macros. These macros have been programmed in Visual Basic for Applications (VBA). The connection has been made possible thanks to the functions and procedures of the TOOLKIT library of EPANET.

Palabras clave:

<algoritmo genético, diseño óptimo, red distribución agua, multiobjetivo>

**DISEÑO ÓPTIMO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA CON OBJETIVOS
MÚLTIPLES UTILIZANDO MÉTODOS HEURÍSTICOS (ALGORITMOS GENÉTICOS)**

ÍNDICE

CAPÍTULO 01. INTRODUCCIÓN	4
1.1. PREÁMBULO. LA PROBLEMÁTICA DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA	4
1.2. OBJETIVOS DE LA TESINA	7
1.3. ESQUEMA DEL DOCUMENTO	7
CAPÍTULO 02. DISEÑO ÓPTIMO DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA.....	9
2.1. EL DISEÑO ÓPTIMO DE UNA RDA	9
2.2. EL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN	12
2.3. LAS ECUACIONES DE LA HIDRÁULICA Y OTRAS RESTRICCIONES DEL PROBLEMA.....	16
2.3.1. CONSERVACIÓN DE LA MASA.....	16
2.3.2. CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA.....	16
2.3.3. PRESIÓN EN LOS NUDOS.....	17
2.3.4. RESTRICCIONES DE DISEÑO.....	18
2.3.5. RESTRICCIONES EN GENERAL.....	18
2.4. LAS RESTRICCIONES DE CARÁCTER MEDIOAMBIENTAL	18
CAPÍTULO 03. LAS TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN Y SU APLICACIÓN A LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA	23
3.1. LAS TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN.....	23
3.2. LAS TÉCNICAS HEURÍSTICAS	25
3.2.1. ALGORITMOS GENÉTICOS	35
3.3. LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA CON MÚLTIPLES OBJETIVOS.....	42
3.3.1. LA SOLUCIÓN MULTI-OBJETIVO	43
3.3.2. LA SOLUCIÓN MONO-OBJETIVO.....	43
3.4. APLICACIÓN DE LOS AG A LA OPTIMIZACIÓN DE LAS RDA.....	45
CAPÍTULO 04. MATERIALES Y MÉTODOS: EPANET, LA TOOLKIT DE PROGRAMACIÓN DE EPANET Y EVOLVER.....	54
4.1. EPANET.....	54

4.1.1. EL SIMULADOR HIDRÁULICO EPANET	54
4.1.2. EL MODELO DE LA RED SOBRE EPANET	56
4.2. LA TOOLKIT DE PROGRAMACIÓN DE EPANET	58
4.3. EVOLVER.....	59
4.3.1. QUÉ ES Y CÓMO FUNCIONA EVOLVER	59
4.3.2. LA CELDA OBJETIVO	61
4.3.3. LAS RESTRICCIONES Y LA FUNCIÓN DE PENALIZACIÓN.....	62
4.3.4. MACROS A EJECUTAR DURANTE LA OPTIMIZACIÓN.....	64
4.3.5. SELECCIÓN, CRUCE Y MUTACIÓN EN EVOLVER.....	64
4.3.6. PROBLEMAS DE MÚLTIPLES OBJETIVOS.....	67
CAPÍTULO 05. EL PROBLEMA DE ESTUDIO. DESCRIPCIÓN Y CRITERIOS DE DISEÑO.....	68
5.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	68
5.2. CONDICIONES PARA EL DISEÑO ÓPTIMO	75
5.2.1. SOBRE LOS COSTES.....	75
5.2.2. SOBRE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO	77
5.2.3. SOBRE LA EDAD DEL AGUA	78
5.3. CONDICIONES DE NORMAL FUNCIONAMIENTO	80
5.4. OPCIONES PARA EL DISEÑO.....	81
5.4.1. TUBERÍAS.....	81
5.4.2. DEPÓSITOS	82
5.4.3. BOMBAS	83
5.4.4. VÁLVULAS.....	85
5.4.5. LA TARIFA ELÉCTRICA	86
CAPÍTULO 06. EL PROBLEMA DE ESTUDIO. OPTIMIZACIÓN.	87
6.1. ANÁLISIS DE LA RED.....	87
6.2. LOS OBJETIVOS MÚLTIPLES A SATISFACER	97
6.3. CONSIDERACIONES PARA EL CÁLCULO.....	98
6.3.1. TUBERÍAS.....	98
6.3.2. BOMBEO.....	105
6.3.3. DEPÓSITOS	111
6.3.4. VÁLVULAS.....	114
6.4. LA FUNCIÓN OBJETIVO	115
6.5. RESTRICCIONES Y VARIABLES DE DECISIÓN.....	118
6.6. CÁLCULOS, RESULTADOS Y ANÁLISIS	120
6.7. LA SOLUCIÓN ÓPTIMA. DISCUSIÓN.....	129

CAPÍTULO 07: CONCLUSIONES.....	136
ANEXOS.....	139
ANEXO 1. MACROS PROGRAMADAS.....	139
<i>METOVAlORES</i>	139
<i>CORROMODELO</i>	144
ANEXO 2. RESULTADOS DE DISEÑO.....	149
REFERENCIAS.....	158

CAPÍTULO 01. INTRODUCCIÓN

1.1. PREÁMBULO. LA PROBLEMÁTICA DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Conforme va pasando el tiempo, las redes de distribución de agua (RDA) se van deteriorando. Los problemas de corrosión o deposiciones en su interior disminuyen su capacidad y hacen aumentar las exigencias de bombeo y, en consecuencia, de energía. Por otro lado, pueden afectar a la presión de servicio de la red de manera que resulte inadecuada o insuficiente para los usuarios e incluso acabar dando problemas de calidad ([41]).

Al mismo tiempo, estos sistemas deben ser capaces de hacer frente a las continuas y cambiantes necesidades de la población a la que atienden, adaptándose a las crecientes demandas de consumo y expansión de las zonas de suministro ([53]).

Los gestores de la red deben, por tanto, asumir grandes inversiones para mantener la red actualizada con nuevos proyectos de diseño y rehabilitación en la red para que el servicio sea adecuado en términos de cantidad y calidad.

La magnitud de dichas inversiones es tal que ha llevado a que, en los últimos años, ingenieros e investigadores vengán realizando grandes esfuerzos en encontrar nuevas fórmulas para la reducción de costes y mejora de la eficiencia en el funcionamiento del sistema, haciendo que el diseño y desempeño de la red sean, en conjunto, lo más ventajosos posible.

Este es el reto de la optimización. Con las técnicas matemáticas de optimización se puede abordar desde el diseño de una nueva red de agua, concibiéndola desde su origen, hasta la expansión y rehabilitación de una red existente y en uso. El sistema debe ser económico en su instalación y en su mantenimiento y debe cumplir con los criterios de fiabilidad, calidad, capacidad y presión ([44]).

Pero además de los costes relacionados con el diseño y mantenimiento de la infraestructura hay que tener en cuenta los costes de operación del sistema, en gran parte debidos a los bombeos y demás consumos de energía en general. Es por ello que, dentro de la optimización, se puede considerar la programación de los bombeos de manera que, trabajando conjuntamente con la capacidad de almacenamiento de los depósitos, funcionen principalmente en las horas valle de la tarifa eléctrica.

Pero el consumo energético en la operación de la red no es sólo un problema económico, también lo es medioambiental.

Muchos gobiernos, instituciones y ciudadanos están tomando conciencia del problema del cambio climático. Esto llevó a que en diciembre de 1997 se firmara el Protocolo de Kioto, dentro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, por el que los países firmantes se comprometían a reducir las emisiones de 6 gases de efecto invernadero causantes del calentamiento global, entre ellos, el CO₂.

En relación con las RDA es considerable el impacto medioambiental de las emisiones de gases de efecto invernadero, resultado de la generación de la energía necesaria para, por un lado, la operación de la red y, por otro, la fabricación de los distintos elementos como tuberías, bombas y depósitos.

Una forma de controlar y reducir las emisiones de CO₂ es gravándolas con una especie de impuesto. Cada país de la UE establece un nivel de emisiones totales de gases de efecto invernadero y asigna a cada foco de emisión una cuota sobre ese total. Son los derechos de emisión. Existe un mercado de emisiones, también llamado bolsa de CO₂, en el que se pueden comprar y vender esos derechos según se haya superado o no la cuota asignada.

La optimización de una RDA resulta un problema complejo, no sólo por el tamaño de la red, sino también por pretender alcanzar múltiples objetivos muchas veces en conflicto, como el mínimo coste, la operación eficiente del sistema, una adecuada calidad del agua y un menor impacto ambiental.

Por otra parte, cada posible configuración de la red resultado de la optimización debe satisfacer, en cada estado de carga, las restricciones hidráulicas de continuidad en nudos y conservación de energía en mallas, por lo que se hace necesario resolver el problema de optimización en combinación con un simulador hidráulico.

Las primitivas técnicas de optimización fueron evolucionando hacia las llamadas técnicas heurísticas, que son las que hoy gozan de mayor aceptación y popularidad. Estas técnicas guían el proceso de búsqueda de la solución óptima aplicando una serie de reglas o criterios para decidir entre los varios caminos alternativos para alcanzar los objetivos. Dentro de estas técnicas se encuentran los algoritmos evolutivos (AE), inspirados en la selección natural que sufren los individuos, entendida como un proceso de optimización en el cual los individuos de la población mejoran sus cualidades para adaptarse al medio, sobreviven y se reproducen.

Concretamente, los algoritmos genéticos (AG) simulan los procesos de selección genética, cruzamiento y mutación que se dan en la naturaleza, localizan aquellas soluciones más aptas, las que mejor se ajustan a los objetivos. Algunas de las ventajas que presentan este tipo de algoritmos y por las que se uso se ha extendido en muchos campos, en particular en el del agua, son:

- ✓ Tienen un carácter general, ya que pueden ser adaptados para resolver cualquier problema simplemente adaptando la función objetivo.
- ✓ La aptitud de cada individuo o potencial solución sólo depende de su valor en la función objetivo.
- ✓ Permiten utilizar variables de naturaleza discreta, como es la gama de diámetros comerciales disponible.
- ✓ Permite encontrar un conjunto de buenas soluciones cerca de la óptima global o directamente la óptima global.
- ✓ Permiten incorporar la simulación hidráulica dentro del cuerpo o estructura del algoritmo de optimización y analizar el sistema frente a distintos estados de carga.

1.2. OBJETIVOS DE LA TESINA

El objetivo principal de esta TFM es analizar el problema de la modernización/ampliación de un sistema de distribución de agua que se enfrenta a unas necesidades de demanda creciente y plantear la optimización de su diseño y operación en vistas a satisfacer múltiples requisitos distinta naturaleza, económicos, medioambientales, de calidad, de presión de servicio y de operación en general, utilizando unos recursos de software comercial y gratuito al alcance de cualquier estudiante o profesional no necesariamente familiarizado con las técnicas de optimización heurísticas, concretamente, algoritmos genéticos.

Como objetivos específicos, se pretende:

- ✓ Proponer una función objetivo que permita valorar el grado de cumplimiento de los requisitos de la red por parte de las distintas opciones de diseño y operación propuestas por un algoritmo genético.
- ✓ Desarrollar las macros necesarias para la conexión de un programa de optimización comercial (EVOLVER) con un simulador hidráulico (EPANET) para la optimización multiobjetivo de una RDA.
- ✓ Aplicación práctica a una RDA concreta y discutir la solución obtenida en comparación con las soluciones de otros profesionales que la han resuelto con otros planteamientos, procedimientos y técnicas.

1.3. ESQUEMA DEL DOCUMENTO

En el Capítulo 1 de esta TFM se ponen de manifiesto algunos de los problemas que presentan las redes de distribución de agua a lo largo de su vida útil, como la pérdida de capacidad de transporte y los problemas de presión, lo cual puede llevar la red a resultar ineficiente para atender a las demandas de los usuarios con los niveles de presión y calidad que éstos requieren. Se exponen también los objetivos que se pretenden alcanzar con el presente trabajo y la estructura que se le ha dado al mismo para presentarlos.

En el Capítulo 2 se introduce el concepto de diseño óptimo, que va más allá del simple diseño del esqueleto de la red ya que se deben incorporar variables de operación de los distintos elementos, combinando entonces consideraciones de naturaleza hidráulica y económica. Se presentan las distintas variables que pueden intervenir en la optimización de una RDA, cuyo elevado número aumenta la complejidad del problema, la concepción matemática del problema y las restricciones, principalmente de carácter hidráulico por ser comunes a la RDA, y las medioambientales por ser específicas al caso práctico a resolver.

El Capítulo 3 recoge el estado del arte en la materia, haciendo un breve repaso de la evolución de investigaciones y trabajos en el campo del diseño óptimo de RDA. Se presentan algunas de las técnicas heurísticas más empleadas para centrarse en los algoritmos genéticos, por su gran aceptación.

En el Capítulo 4 se describen los medios y soportes empleados en la resolución del caso práctico de esta TFM.

En el Capítulo 5 se presenta el caso práctico a resolver. Se describen, primero, la red en su situación actual, tanto en configuración como en operación, que no es capaz de responder ante las demandas futuras y, a continuación, los condicionantes de diseño a respetar en la nueva propuesta de diseño y operación, la óptima.

En el Capítulo 6 se analiza pormenorizadamente la red, que presenta problemas de capacidad y presión, y se plantean unas primeras modificaciones a introducir a la red en base a dicho análisis. A continuación se exponen las consideraciones para el cálculo efectuadas sobre cada uno de los elementos sobre los que se podría actuar en busca de una solución óptima. Se formula la función objetivo, que medirá la calidad de las soluciones propuestas por el algoritmo genético, y se proponen las variables de decisión y las penalizaciones. Finalmente, el mejor resultado obtenido, la solución óptima, se compara con las obtenidas por otros autores y por último, en el Capítulo 7, se presentan las conclusiones.

CAPÍTULO 02. DISEÑO ÓPTIMO DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

2.1. EL DISEÑO ÓPTIMO DE UNA RDA

Los sistemas de distribución de agua están compuestos por una serie de elementos interconectados entre sí (fuentes, tuberías, bombas, depósitos, válvulas) dispuestos de manera que se entregue la cantidad de agua demandada por los consumidores a una presión adecuada, con la calidad requerida (cuestión importante por temas de seguridad y salubridad) y de manera fiable, esto es continua, que además sea rentable y sostenible ([41]).

Mientras que el análisis de una red permite conocer cómo funciona ésta dada su particular configuración (obtener los caudales y presiones en los distintos puntos de la red, por ejemplo), el diseño es la fase en la que se seleccionan el tamaño y características de los componentes del sistema para que éste funcione como sería de esperar ante un determinado escenario ([42]).

Sin embargo, son varias y muy distintas las cuestiones a tener en cuenta para que el diseño de la red además de ser correcto resulte el óptimo. Junto con el diseño se deben considerar la operación, el mantenimiento y todo lo relacionado con la planificación y administración de la red en general. En el diseño óptimo intervienen, por tanto, variables de naturaleza hidráulica y de naturaleza económica ([40]).

La tarea de optimizar una red no es sencilla y requiere de un notable esfuerzo e inversión en tiempo y dinero. Dentro de la optimización se deben barajar diferentes alternativas de tamaño de las tuberías y de tamaño y operación de otros elementos, para distintas configuraciones de la red, y obtener para cada caso los valores de caudal y/o presión, lo que ya es en sí mismo un problema de consideración ([44]).

El diámetro de las tuberías será uno de entre una gama comercial de diámetros disponible en el mercado, cada uno con un determinado coste unitario asociado. Por otro lado, en el

caso de una red existente que requiera de rehabilitación, las opciones a considerar para cada tubería pueden ir desde una profunda limpieza del interior que reduzca su rugosidad, a colocar una nueva tubería en paralelo para aumentar la capacidad en ese tramo, a remplazarla o hasta simplemente suprimirla ([44]).

En los depósitos las alternativas de diseño pueden ir desde su volumen (a mayor volumen mayor coste) hasta el punto de emplazamiento más adecuado dentro de la red. En cuanto al volumen de cada depósito, éste debe ser suficiente para ayudar en el suministro a la red en los momentos de picos de demanda o incluso de fallo en el sistema pero, por otro lado, debe ser ajustado para que se llene y vacíe durante su ciclo de operación y evitar así problemas de desbordamiento y de estancamiento del agua. Si se trata del diseño de una nueva red o de una zona de expansión, puesto que los depósitos deben contribuir a mantener la presión de servicio en el sistema, el emplazamiento óptimo dependerá de dónde se presenten problemas de presiones negativas o insuficientes para dar ese servicio a la presión requerida ([44]).

Los bombeos también pueden instalarse en cualquier punto de la red para así aportar la energía adicional que requiere el sistema cuando sea necesario. En la optimización deben tenerse en cuenta los distintos modelos de bombas disponibles, cada uno con una curva característica de funcionamiento y de rendimiento, por lo que la operación de cada bomba es distinta según el estado de presiones y caudales de la red ([44]).

Las válvulas se introducen para cambiar el perfil de caudales, a menudo para reducir la presión aguas abajo de su punto de instalación. Si la red ya existe pero se quiere mejorar su desempeño, con la optimización se buscará la mejor alternativa de operación dentro de la red (estado y consigna de la válvula). Si por el contrario se pretende el diseño de una nueva red o zona se puede localizar, además, el punto más adecuado para su instalación.

En muchas ocasiones la optimización se lleva a cabo durante el periodo de punta de consumo, como si de un estado estacionario se tratase, dado que si la red responde adecuadamente frente a las demandas punta lo hará frente a otras menores. Sin embargo, con bajas demandas puede existir el riesgo de que en algunos puntos se alcancen presiones

demasiado altas, que incluso pudieran superar el límite máximo admisible, por lo que habría que simular y analizar la red incluso para el caso extremo de que se anulasen las demandas.

Cuando se incluye el diseño de los depósitos, para que los parámetros de diseño de los mismos conduzcan a una operación lo más eficiente posible, se deben simular las entradas y salidas de caudal que tienen lugar a lo largo de todo el ciclo de funcionamiento del sistema, por lo que un análisis en periodo extendido resulta inevitable ([44]).

El diseño óptimo supone encontrar una solución de equilibrio entre los varios objetivos que se pretende alcanzar y que se encuentran en conflicto. Y esta no es cuestión baladí. El problema requiere de un gran esfuerzo de cálculo que se espera resolver en un espacio de tiempo razonable.

El tratamiento del problema de optimización de una RDA ha evolucionado desde cuando el ingeniero concebía la red basándose en su experiencia y la optimización consistía en determinar las características de los elementos que mejor conjugasen con el diseño preconcebido. En los sistemas complejos de la realidad, el ingeniero podría aplicar su experiencia y ciertas reglas de oro para acabar planteando tan solo un puñado de soluciones factibles, pero esto llevaría a reducir drásticamente el espacio de decisión. Con los avances de la informática y la tecnología se ha ido abandonando esta forma artesanal de proceder para desarrollar y utilizar herramientas que permiten resolver esta cuestión de forma total o parcialmente automática.

Este problema de la optimización de una RDA es no lineal. Las restricciones de carácter hidráulico se formulan mediante ecuaciones que no son lineales y los cambios hechos sobre un componente pueden influir sobre el funcionamiento de otro.

Una exhaustiva búsqueda del óptimo también implica que cada elemento del sistema pueda tomar todos y cada uno de los posibles valores admisibles para la variable de decisión o parámetro a optimizar, lo cual supone la generación de múltiples combinaciones candidatas a ser solución, creciendo este número de forma exponencial conforme aumenta el número de elementos de la red implicados. La complejidad de la búsqueda aumenta, en

consecuencia, al ritmo w^k donde k es el número de elementos y w el número de opciones de diseño de cada uno ([44]).

El gran número de variables implicadas también supone que el problema puede llegar a ser NP-duro. El tiempo de cálculo que se requiere para resolverlo crece exponencialmente con el número de variables y no existe algoritmo capaz de resolverlo en un tiempo polinomial ([31], [35]).

En el caso de las RDA, la optimización requiere de realizar un elevado número de simulaciones hidráulicas para comprobar la factibilidad de las soluciones propuestas por el algoritmo de optimización. El proceso se inicia con la generación de una solución o de una población de posibles soluciones. Mediante un simulador hidráulico se comprueba cuáles de estas soluciones candidatas son factibles bajo diferentes escenarios de demanda, pudiendo analizar el funcionamiento de la red incluso en periodo extendido. La información de presiones en los nudos y caudales en las líneas de la red retroalimenta el proceso de optimización, se calcula el valor que alcanza cada solución en la función objetivo, según el cual se mantendrá en la población o desechará, y se genera una nueva serie de soluciones candidatas ([44]). Esta nueva población, que contiene diferente información con nuevos valores de las variables de decisión, repetirá el proceso hasta converger o alcanzar un criterio de parada.

Es por ello que es necesario combinar herramientas matemáticas de optimización con otras que permitan calcular las variables hidráulicas de estado (como el software libre EPANET, por ejemplo) al objeto de alcanzar una solución factible, en la cual se satisfagan los requerimientos de presión y caudal en cada nudo de demanda, o incluso considerar otras soluciones en principio no factibles según el grado de violación de las restricciones ([44]).

2.2. EL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

Las exigencias y competencia a las que cada día se encuentran sometidas muchas actividades productivas, relacionadas con la investigación o la actividad empresarial o

profesional, hacen que continuamente se estén buscando nuevas estrategias que mejoren los procesos o saquen más rendimiento a las tareas de operación y/o de gestión. La disciplina que estudia este tipo de problemas y sus alternativas es conocida como optimización.

Las numerosas aplicaciones en ámbitos tan variados como la ingeniería, la industria, la logística y la administración, han despertado un gran interés y desarrollo de esta disciplina en las últimas décadas.

Existen muy distintos tipos de problemas de optimización según la existencia o no de restricciones, el carácter estático o dinámico del problema, si es lineal o no, si se busca mejorar un solo objetivo (monobjetivo) o varios (multiobjetivo), la técnica de búsqueda de soluciones factibles (exacta o aproximada), etc. ([06]).

Formalmente, los métodos de optimización se refieren a las técnicas o procedimientos matemáticos usados para ajustar de forma automática los parámetros (o variables de decisión) de un modelo, al objeto de alcanzar los mejores resultados posibles (los óptimos) definidos por una función o varias funciones objetivo, y sujetos a ciertas restricciones impuestas sobre el modelo ([44]).

La optimización permite encontrar la mejor solución de entre un conjunto finito de soluciones alternativas ([06]) y tener un criterio objetivo de apoyo a la toma de decisión ([24]).

Matemáticamente, el problema de optimización se plantea como la maximización o minimización de una o más funciones objetivo de las variables de decisión supeditada una serie de restricciones dadas como igualdades y/o desigualdades ([44]).

$$\begin{array}{ll} \text{Función objetivo:} & \text{Max } f(x) \text{ ó Min } f(x) \quad [\text{EC.1}] \\ \text{Sujeto a restricciones:} & g(x) \leq 0 \\ & h(x) = 0 \\ & x \in X \end{array}$$

Donde f es la función objetivo
 x es el vector de las variables de decisión
 f, g, h son funciones de x
 X es el conjunto de todas las posibles soluciones

La función objetivo permite cuantificar lo buena que es una solución. Es la función matemática que permite medir el desempeño del sistema e indicar el grado en que son alcanzados los objetivos. Si existen múltiples objetivos, puede existir una o múltiples funciones objetivo ([24]). La mejor solución o más ventajosa en términos de su valor alcanzado en la función objetivo es la solución óptima.

Las variables de decisión son todos aquellos parámetros que pueden ser modificados para mejorar el desempeño del sistema. Los valores de estas variables deben conocerse de antemano para ser contrastadas en el problema. En la optimización, según la técnica o método que se emplee, se parte de una solución o de un conjunto de soluciones que expresan en forma de vector o cadena posibles valores que pueden alcanzar cada una de las variables de decisión a considerar. Si sobre estos valores existe algún tipo de restricción, como por ejemplo que el diámetro de una tubería deba ser escogido de entre una serie discreta de diámetros en el caso de una RDA, el modelo de optimización debe recoger dichas restricciones de forma clara.

Las restricciones son aquellas limitaciones que deben tenerse en cuenta (en la operación, en el diseño, etc.). Definen y acotan el espacio de decisión, donde están todos los posibles valores de las variables de decisión, para obtener el efectivo espacio de búsqueda, con sólo las alternativas de posibles soluciones al problema. El valor o valores de la función o funciones objetivo es el llamado espacio objetivo ([44]). La función objetivo enlaza los vectores de valores de las variables de decisión desde el espacio de búsqueda con el espacio objetivo ([06]). Una o varias soluciones serán factibles cuando satisfagan todas las restricciones del problema de optimización y no factibles en cualquier otro caso ([44]).

Las restricciones pueden ser de tipo duro o blando. Las de tipo duro (hard, en inglés) son aquellas que de incumplirse podrían conducir a un fallo o daño severo en el sistema mientras que las de tipo blando (soft, en inglés) pueden incumplirse en cierta medida, aunque no es lo deseable. Estas restricciones de tipo blando son más realistas y permiten que en la optimización se tanteen más posibles soluciones ([24]).

De forma esquemática, el proceso de optimización comprende los siguientes pasos:

1. Seleccionar un conjunto de variables de decisión que describan las distintas alternativas de decisión.
2. Seleccionar un objetivo o varios objetivos que, expresados en términos de las variables de decisión, conforman la función o funciones a optimizar, esto es, a minimizar o maximizar.
3. Determinar el conjunto de restricciones, ya sean duras o blandas, también expresadas en términos de las variables de decisión, que deberán ser satisfechas por cualquier solución para que sea factible.
4. Determinar el conjunto de valores de las variables de decisión que optimizan la función (o funciones) objetivo al tiempo que satisfacen las restricciones impuestas ([24]).

No todos los problemas de optimización presentan la misma complejidad. Los problemas lineales¹ son relativamente sencillos. Sin embargo, en la mayoría de los problemas que aparecen en la práctica existen relaciones entre las variables, ya sea en la función objetivo o en las restricciones, por lo que el problema es difícil de resolver. En términos de complejidad algorítmica, el problema es NP-duro, en términos coloquiales, significa que no se puede garantizar el encontrar la mejor solución posible en un tiempo razonable. Esto impulsó el desarrollo de procedimientos eficientes para encontrar buenas soluciones aunque no fueran óptimas, en los que la rapidez del proceso es tan importante como la calidad de la solución obtenida. Estos métodos aproximados se denominan métodos heurísticos ([36]).

¹ Que el problema sea lineal significa tanto la función objetivo como las restricciones son de tipo lineal, donde las variables están elevadas a la primera potencia y entre ellas sumando o restando, nunca multiplicando o dividiendo. Las restricciones están expresadas, además, como \leq , \geq o $=$.

Tratar de resolver un problema de manera que se cumplan todas las restricciones puede no ser posible. Las restricciones pueden interactuar entre sí y los límites impuestos para una pueden suponer el no encontrar un mejor valor en otra. A menudo, resulta preferible encontrar al menos una solución aproximada, pero viable, aunque algunos pocos parámetros puedan no satisfacer estrictamente la restricción.

2.3. LAS ECUACIONES DE LA HIDRÁULICA Y OTRAS RESTRICCIONES DEL PROBLEMA

2.3.1. CONSERVACIÓN DE LA MASA

Por cada nudo de la red se debe cumplir la ecuación de conservación de la masa, por la que la suma de todos los caudales entrantes en un nudo debe ser igual a la suma de los caudales salientes ([24], [44]). En periodo extendido, el agua puede ser almacenada en los depósitos o consumida desde ellos, por lo que la variación del volumen almacenado en éstos debe ser tenida en cuenta. Matemáticamente esta ley viene expresada como:

$$\sum_i Q_i - U - \frac{dS}{dt} = 0 \quad [\text{EC.2}]$$

Donde Q_i = caudal entrante (+) o saliente (-) al nudo por la tubería i (m^3/s)

U = caudal demandado en el nudo (m^3/s)

dS/dt = variación de volumen en depósitos (m^3/s)

2.3.2. CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

Este principio dicta que la diferencia de energía entre dos puntos debe ser la misma independientemente del camino que se tome entre esos dos puntos (Bernoulli). En términos de presión, la diferencia de energía entre dos puntos se calcula como la energía aportada por los bombeos menos las pérdidas de energía en tuberías, por fricción y pérdidas menores:

$$\sum_k h_{Bk} - \sum_{ij} h_{Lij} = 0 \quad [EC.3]$$

Donde h_B : energía aportada por la bomba k a la malla (m)

h_L : pérdidas de energía en la línea entre nudos i - j de la malla (m)

En las redes malladas, la energía se conserva alrededor de cada malla, es decir, los cambios de energía en la malla suman cero.

En las dos restricciones anteriores las relaciones entre variables no son de tipo lineal por lo que, para agilizar los cálculos en el proceso de optimización, se garantiza el cumplimiento estricto de ambas conectando el algoritmo de optimización con un paquete de simulación hidráulica de la red en el cual se cumplen intrínsecamente estas restricciones y cuyos resultados retroalimentan el proceso de optimización ([24], [44]).

2.3.3. PRESIÓN EN LOS NUDOS

En cada nudo de la red pueden imponerse unos límites inferior y superior de presión. El límite inferior se correspondería con la mínima presión requerida para dar al usuario un servicio adecuado mientras que el límite superior podría estar relacionado con la integridad estructural de las tuberías o con evitar un exceso de presión no aprovechable por el usuario pero que supone un coste.

En la optimización de una RDA, las restricciones de presión suelen considerarse de tipo blando ya que, de no ser así, y puesto que no siempre pueden cumplirse estrictamente en todos los nudos de la red, no se llegaría a encontrar ninguna solución factible. Considerando los límites de presión como restricciones blandas se permiten moderados déficits de presión en algunos nudos ([24], [44]).

2.3.4. RESTRICCIONES DE DISEÑO

Pueden imponerse restricciones del tipo $X_{\min} \leq x \leq X_{\max}$ sobre cualquier variable x de diseño, definiendo el conjunto de valores que puede tomar esa variable. Suelen ser restricciones sobre variables de tipo discreto, como el diámetro de las tuberías, que debe elegirse de entre una serie comercial de diámetros ([24], [44]).

2.3.5. RESTRICCIONES EN GENERAL

Hacen referencia a todas las demás restricciones que podrían introducirse en el modelo. Dentro de este punto estarían las limitaciones sobre la velocidad en las tuberías, que es un término que depende tanto del análisis hidráulico como del propio diseño de las tuberías, el tope de presupuesto y otras restricciones sobre la operación como el número de arranques y paros en las bombas, etc.

2.4. LAS RESTRICCIONES DE CARÁCTER MEDIOAMBIENTAL

El 9 de mayo de 1992, durante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) celebrada en Nueva York, se acuña la expresión "cambio climático" para referirse a un cambio de clima que es consecuencia directa o indirecta de la actividad humana, por alterar la composición de la atmósfera mundial, y que ha de sumarse a la natural variabilidad del clima per sé ([62]).

En las últimas décadas, los modelos productivos y de consumo han comportado una excesiva emisión a la atmósfera de gases como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) o los hidrofluorocarbonos (HFCs), entre otros. Estos gases tienen la particularidad de que son capaces de absorber y reemitir parte de la radiación solar que llega a la Tierra, lo que redundaría en un calentamiento de la superficie terrestre y de la troposfera.

Este efecto, conocido como “efecto invernadero” sería beneficioso de producirse de forma natural, ya que permite que la temperatura en la superficie de la Tierra sea unos 35 °C superior a la que le correspondería por su distancia al Sol. El problema está en que la excesiva emisión de los citados gases ha alterado las condiciones de equilibrio del clima lo que, según consenso científico, es un hecho inequívoco y atribuible a la acción del hombre con una certidumbre superior al 90% ([62]).

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) el calentamiento global afectará gravemente a los ecosistemas naturales y a los sistemas socioeconómicos. Un aumento de la temperatura mundial media en superficie superior a los 2°C en relación con los niveles de la era preindustrial provocará muy probablemente efectos irreversibles en los ecosistemas, las sociedades humanas, la economía y la salud.

De hecho, muchos de estos impactos ya son tangibles. La temperatura en la superficie de la Tierra ha aumentado un promedio de 0,76 °C desde la era preindustrial y el nivel del mar ha subido unos 17 cm. Y se prevé que el ritmo de este calentamiento sea mayor en el siglo XXI, con un incremento de 0,2 °C por decenio en las dos próximas décadas ([62]).

Para hacer frente a esta inevitable amenaza, deben abordarse acciones preventivas encaminadas a frenar el cambio y reducir al mínimo sus consecuencias.

Con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático se establece como objetivo último lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida una interferencia peligrosa del hombre sobre el clima. Ese objetivo debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente y que la producción y desarrollo económico prosigan de manera sostenible. El carácter global del cambio climático requiere de la cooperación de todos los países, con una participación internacional efectiva y proporcionada a sus respectivas responsabilidades, capacidades y condiciones sociales y económicas ([62]).

En la tercera Conferencia de las Partes (los miembros de la CMNUCC) celebrada en Japón en 1997 se adoptó el Protocolo de Kioto, que entró en vigor en febrero de 2005. Hasta la fecha, es el principal acuerdo internacional en materia de cambio climático.

El Protocolo estableció un compromiso concreto y jurídicamente vinculante para aquellos países que lo ratificaron (las llamadas Partes del Anexo I de la Convención). Las Partes se comprometían a reducir, de forma individual o conjunta, las emisiones medias de seis gases de efecto invernadero causantes del calentamiento global en el periodo 2008 a 2012 en un porcentaje no inferior al 5,2% respecto a las emisiones del año base (1990). Tales gases eran el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y tres gases industriales fluorados, hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆).

Las Partes se reunieron por primera vez para su seguimiento en 2005, en Montreal (Canadá) donde se estableció el llamado Grupo de Trabajo Especial sobre los Futuros Compromisos de las Partes del Anexo I en el marco del Protocolo de Kioto (GTE-PK), orientado a los acuerdos a tomar para después de 2012. La decimoctava Conferencia de las Partes (COP 18) sobre cambio climático ratificó el segundo periodo de vigencia del Protocolo que va desde el 1 de enero de 2013 hasta el 31 de diciembre de 2020, con un nuevo objetivo global de reducción para el año 2020 del 10% de las emisiones en 2005. Para este segundo periodo de vigencia, se incluye el gas trifluoruro de nitrógeno (NF₃).

Las emisiones de este conjunto de gases se contabilizan en unidades, generalmente toneladas, de CO₂ equivalente (CO₂-e). Una tonelada de CO₂-e de cualquiera de los compuestos anteriores es básicamente la cantidad de dicho gas de efecto invernadero que causaría el mismo nivel de forzamiento radiativo que una tonelada de CO₂.

Un aspecto muy importante del Protocolo de Kioto es que ofrece mecanismos flexibles para facilitar el cumplimiento de los compromisos de reducción.

Con los mecanismos basados en proyectos (aplicación conjunta y desarrollo limpio), un miembro de las Partes puede invertir en un proyecto encaminado a reducir las emisiones

debidas a las fuentes o a aumentar la absorción por los sumideros en otro país. De esta manera el país que financia el proyecto puede obtener ciertas unidades de reducción de emisiones, lo que le ayudará a cumplir con el compromiso adquirido, mientras que el país receptor se beneficia de la inversión.

También cabe la posibilidad de adherirse a un comercio internacional de emisiones, de forma suplementaria a las medidas que se adopten para reducir las emisiones en el propio país. En este caso los países pueden participar como agentes en un comercio donde las unidades contables son los derechos de emisión, pudiendo comprar o vender estos derechos. Un derecho de emisión es aquel derecho subjetivo, de carácter transmisible, que atribuye a su titular la facultad de emitir a la atmósfera una tonelada de CO₂-e.

En el ámbito de la Unión Europea, el compromiso de reducción previsto en el Protocolo de Kioto fue del 8% respecto a las emisiones de 1990. La Unión Europea y sus Estados Miembros ratificaron su adhesión al Protocolo el 25 de abril de 2002 mediante la Decisión del Consejo 2002/358/CE, con la que se asignaba una contribución de emisiones de gases de efecto invernadero a cada Estado Miembro, en función de sus expectativas de crecimiento económico, reparto energético y estructura industrial. Posteriormente, con la Directiva 2003/87/CE se crea y regula un mercado para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero ([62]).

Dentro de este mercado están incluidas las instalaciones que realizan alguna de las actividades incluidas en el anexo I de la Directiva 2003/87/CE (generación de electricidad, coquerías, refinerías, producción y transformación de metales férreos, cementeras e industrias de fabricación de vidrio, cerámica, pasta de papel y cartón). Recientemente la Directiva 2003/87/CE ha sido modificada por las Directivas 2008/101/CE y 2009/29/CE que incorporan a este mercado otras actividades industriales y al sector de la aviación.

Las instalaciones afectadas reciben cierta cantidad de derechos de emisión en base a unos criterios de asignación. Deben disponer de un permiso de emisión, notificar anualmente las emisiones de gases de efecto invernadero en relación con su actividad y entregar la cantidad

de derechos que corresponda según a sus emisiones, pudiendo acceder al mercado de compraventa de derechos de emisión para realizar las transacciones necesarias.

En España, el régimen de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero ya se ha consolidado como un instrumento central para fomentar la reducción de las emisiones en los sectores industrial y energético. La Directiva 2003/87/CE fue transpuesta al ordenamiento jurídico español mediante la Ley 1/2005, de 9 de marzo, legislación que posteriormente ha sido modificada en virtud de las nuevas Directivas 2008/101/CE y 2009/29/CE ([62]).

CAPÍTULO 03. LAS TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN Y SU APLICACIÓN A LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

3.1. LAS TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN

Ya en la década de 1930 comenzaron a publicarse trabajos sobre la optimización de RDA, principalmente basados en técnicas analíticas, pero no fue hasta 1970, con el desarrollo del soporte informático, cuando comenzó su verdadero despegue.

Las técnicas van desde las analíticas con una sola variable de decisión, pasando por las basadas en la programación lineal, no lineal o dinámica, hasta las técnicas adaptativas de búsqueda que imitan procesos de la naturaleza ([24]).

Las técnicas analíticas han quedado relegadas al campo teórico. Básicamente pueden aplicarse a problemas sin restricciones donde sólo interviene la función objetivo y se basan en obtener los valores que anulan la primera y segunda derivadas de la función objetivo. Aunque difícilmente aplicables a las RDA, dada la gran dimensión de las redes reales, estas técnicas han servido de base para el desarrollo de otras más avanzadas.

Para tener en cuenta las restricciones, surgieron nuevas técnicas como la programación lineal donde tanto la función objetivo como las restricciones son expresiones matemáticas de tipo lineal. Esta técnica sólo podría aplicarse a redes ramificadas donde las demandas son conocidas y los caudales se obtienen simplemente por continuidad. Al ser las pérdidas de carga por fricción de tipo no lineal, en principio, el problema es también no lineal. Sin embargo, las pérdidas pueden reformularse a una expresión de tipo lineal donde la variable independiente es la longitud de cada tubería. La optimización consiste, entonces, en obtener la solución de mínimo coste de la red, con la única variable de decisión la longitud de cada segmento de tubería, cada uno con un diámetro fijado previamente y donde se debe cumplir, como restricción adicional, que la suma de todos los segmentos en que queda dividida un tubería sea la verdadera longitud de la misma.

Una de las ventajas de la programación lineal es que, si el óptimo existe, seguro lo encuentra. Uno de sus inconvenientes, que no es apropiado asumir linealidad en RDA.

La aplicación a redes malladas requiere de combinar esta técnica con otra que determine la óptima distribución de caudales dentro de la red. Los primeros en tratar de resolver este problema fueron Alperovits y Shamir (1977) ([44]). Propusieron la técnica denominada gradiente de programación lineal (LPG por sus siglas en inglés) en el que las tuberías quedaban divididas en al menos dos tramos de diferente diámetro, prefijado de entre una serie de diámetros candidatos, pasando a ser la variable de decisión la longitud de cada tramo ([03]). Este método aplica un proceso iterativo en el que primero se fija el caudal por las tuberías y luego se optimizan las demás variables (longitud de los tramos, bombeos) para dichas condiciones de caudal, utilizando la programación lineal. Se actualizan los caudales y se vuelve a optimizar hasta alcanzar el criterio de convergencia establecido.

Esta técnica fue mejorada posteriormente por otros autores. Kessler y Shamir (1989) presentaron una variante del método LPG con dos etapas, descomponiendo el problema no lineal original en otros dos, uno lineal a resolver con el método de programación lineal y uno no lineal a resolver con el gradiente. En la primera etapa se consideran conocidos los caudales circulantes por cada línea y las variables longitud de tramos se utilizan para resolver la red, esto es, hallar la presión en los nudos, con la programación lineal. En la segunda etapa, se utiliza la solución óptima de la etapa anterior para determinar el gradiente de la función objetivo que servirá para modificar los caudales de partida. Ambas etapas se repiten hasta encontrar una reducción en los costes de diseño de la red.

Estos métodos fallan al resolver problemas de redes malladas de gran tamaño. Otro de sus inconvenientes es que no son útiles para resolver redes con bombeos ya que éstos aumentan la no linealidad del problema.

La técnica de programación no lineal se ajusta mejor a la naturaleza no lineal de la ecuación de pérdidas por fricción y, en general, a los problemas donde las funciones son no lineales con respecto a las variables. Sin embargo, presenta mayores dificultades de cálculo al no estar garantizado que el espacio de soluciones factibles sea convexo. Esto se debe a la

combinación de restricciones no lineales y a la posible existencia de múltiples óptimos locales, en los que el algoritmo puede quedar atrapado, impidiendo identificar el óptimo global ([45]). Para sacar las restricciones de carácter hidráulico fuera del problema de optimización, en estos métodos se conecta el algoritmo de búsqueda con un simulador hidráulico para manejarlas.

Otra importante limitación es que, al hacer uso de las derivadas parciales de la función objetivo con respecto a todas las variables de decisión, éstas deben ser continuas. Sin embargo muchas de las variables de decisión en el caso de las RDA son de tipo discreto o entero, como el diámetro de las tuberías, la parada/arranque de una bomba (1/0), etc. ([24]). Convertir las soluciones continuas a valores discretos puede reducir la calidad de la solución y es por lo que en el campo de las RDA la programación no lineal no ha resultado muy útil.

En estos problemas, donde el espacio de búsqueda de soluciones es no lineal y lo suficientemente amplio como para que no pueda ser evaluado y encontrar una solución en un tiempo razonable, están cobrando importancia las técnicas heurísticas ([06]).

Las técnicas heurísticas consisten en procedimientos sistemáticos de prueba que ofrecen soluciones aceptables, aunque no necesariamente la óptima absoluta ([06]). Dentro de sus virtudes, la principal es que el proceso estocástico de búsqueda permite al proceso de optimización saltar o escapar de quedar atrapado en un óptimo local, aumentando la probabilidad de encontrar un óptimo global. Otras ventajas son que no hace uso de las derivadas de la función objetivo y que puede manejar directamente variables de tipo discreto, como los diámetros de tubería, mientras que los métodos deterministas operan con variables de tipo continuo ([01]).

3.2. LAS TÉCNICAS HEURÍSTICAS

Las técnicas heurísticas se emplean para tratar de encontrar una buena solución a un problema de optimización cuando no existen métodos conocidos que lo resuelvan de forma

eficiente, bien porque el espacio de búsqueda es tan grande que no puede ser explorado por completo bien porque no pueden adaptarse a las características del problema. La mayoría de las técnicas que pueden encontrarse en la actualidad fueron en su día diseñadas y desarrolladas de forma específica para las características particulares del problema que debían resolver ([23]).

En general, las técnicas heurísticas parten de un conjunto de potenciales soluciones para las que se evalúa la función objetivo. Las nuevas soluciones son generadas a partir de las primeras según el valor alcanzado por cada una en la función objetivo y así, sucesivamente en varias generaciones, continúa el proceso de evaluación y generación hasta cumplir con el criterio o condición de parada impuesta ([29]).

Las técnicas heurísticas no garantizan encontrar la solución óptima, al contrario que los métodos exactos, pero contienen estrategias de acción para alcanzar los objetivos y encontrar soluciones realmente cerca de la óptima. Sus principales características son ([06]):

- ✓ Se pueden aplicar a problemas de muy distinta naturaleza
- ✓ Exploran de forma eficiente el espacio de búsqueda, sin tener que evaluar todas las posibles soluciones y sin exigirle ninguna topología concreta
- ✓ Guían en el proceso de búsqueda valiéndose de la experiencia de búsquedas anteriores
- ✓ Incorporan mecanismos para evitar quedar atrapados en óptimos locales
- ✓ Son más flexibles que los métodos exactos y permiten incorporar condiciones o restricciones más difíciles de modelar

Existen muchas y muy distintas clasificaciones de las técnicas heurísticas según el procedimiento esté inspirado o no en algún proceso de la naturaleza, si parte de una única solución potencial o de un conjunto de ellas, si la función objetivo o el espacio de búsqueda se mantienen a lo largo de toda la optimización o pueden cambiar en el transcurso, si utilizan información previa para afinar la búsqueda, etc.

Además del concepto en el que se inspiran, otra diferencia es la forma matemática de expresar los mecanismos internos de exploración y explotación del espacio de búsqueda. La exploración se refiere a la habilidad del algoritmo de buscar ampliamente por el espacio de búsqueda, saltando hacia lo desconocido, al objeto de evitar una convergencia prematura y encontrar el óptimo global sobre numerosos óptimos locales. La explotación, a la habilidad para centrarse en la búsqueda intensiva en buenas regiones del espacio.

De entre estos tipos, algunas de las principales técnicas heurísticas son:

1. Enfriamiento simulado (Simulated annealing, SA): Algoritmo evolutivo. Imita el proceso de enfriamiento de un metal tras ser fundido, por el cual sus partículas se ordenan en una estructura cristalina de mínima energía, lo que le confiere mayor resistencia. En general, cualquier sistema de la naturaleza busca alcanzar un estado de mínima energía.

Parte de una única solución que evoluciona a lo largo del proceso de búsqueda donde el parámetro básico de guía es la temperatura. Al principio, un alto valor de la temperatura confiere una mayor flexibilidad al algoritmo para moverse a través del espacio de búsqueda. El enfriamiento avanza, la temperatura desciende y la capacidad de búsqueda disminuye, lo que puede llevar a quedar atrapado en un óptimo local. El algoritmo marca las reglas para el descenso de temperatura porque si el enfriamiento es muy lento la búsqueda resulta ineficiente y si es demasiado rápido puede llevar a soluciones no óptimas.

Esta técnica se puede aplicar a problemas no lineales, con múltiples óptimos locales y muchas restricciones. Es robusta y en muchas ocasiones permite encontrar el óptimo global, aunque no está garantizado.

Los inputs del algoritmo son una configuración inicial x_1 de la RDA, una temperatura inicial T_1 , una temperatura de parada T_f y una función de coste $C(x)$ para obtener el coste de cada configuración x . El output del algoritmo es una aproximación al óptimo global.

En 1999 Cunha y Sousa aplicaron el algoritmo a las redes de Hanoi y Nueva York obteniendo en ambas una solución de menor coste que las obtenidas anteriormente. En el 2000, Costa et al. incluyeron los costes de capital y de operación de los bombeos, con las variables de decisión los diámetros de las tuberías y el tamaño de las bombas, todas ellas discretas, planteando el problema de mínimo coste sobre tres redes ([10]). En 2006, Sousa et al. aplicaron SA para minimizar el coste de operación de los bombeos, exclusivamente, teniendo en cuenta las características de las bombas y el funcionamiento de los depósitos ([51]).

2. Optimización mediante colonia de hormigas (Ant colony optimization, ACO):

Algoritmo evolutivo. Se inspira en el comportamiento real de las colonias de hormigas, que trabajan unidas por el bien de la colonia. Las hormigas localizan las fuentes de alimento enviando recolectoras a explorar los alrededores de la colonia, de forma más o menos aleatoria. Cuando una hormiga encuentra alimento regresa al hormiguero dejando un rastro de feromonas. Otras hormigas utilizarán este rastro, con mayor probabilidad cuanto mayor sea la concentración de feromonas, y lo reforzarán dejando las suyas propias. Podrían elegir un camino alternativo al del rastro, pero esto es menos probable. El hecho de que un camino sea poco usado o deje de usarse se introduce con el decaimiento de feromonas, lo cual podría asemejarse con la evaporación del rastro al dejar estos caminos de tener interés ([66]).

Las hormigas que han utilizado los caminos más cortos vuelven más rápidamente, pues se mueven a una velocidad uniforme, y pueden repetir el camino, dejando una mayor concentración de feromonas. La colonia de hormigas puede resolver el problema de encontrar el camino más corto, de entre muchos caminos, hasta la fuente de alimento en un aparente comportamiento social se ha venido a llamar inteligencia de enjambre (swarm intelligence).

Esta heurística parte de una población de soluciones. La diferencia con los AG, como se verá más adelante, es que las soluciones de un AG conservan toda la información

de su evolución en la población propiamente, como parte de su código genético, mientras que en la colonia de hormigas dicha información se conserva en el medio, como un vector de concentración de feromonas.

La resolución comienza con un vector de concentraciones iniciales de feromonas en el que cada valor se refiere a cada uno de los posibles valores que puede tomar cada variable de decisión. Por ejemplo, en una RDA donde se quiere optimizar el diámetro de las tuberías para que resulte de mínimo coste habría una concentración por cada posible diámetro de la gama comercial. Cada hormiga de la población recorre la red y el camino constituye una posible solución. En cada punto de decisión del camino, la hormiga avanza en una u otra dirección según una probabilidad que es función de la concentración de feromonas. En el ejemplo de la RDA, avanza eligiendo un diámetro según la concentración (probabilidad) asociada a este diámetro. A continuación se evalúa la calidad de cada camino, esto es, de cada solución y se actualiza el vector de concentraciones de feromonas. En la RDA, cada solución se comprueba con un simulador hidráulico y se calcula su coste, siendo mejor la solución que cumpliendo las restricciones resulta más económica. El algoritmo se repite hasta que la solución converge o hasta un cierto criterio de parada. Las principales desventajas de esta técnica son el gran número de parámetros involucrados, cuyos valores es necesario ajustar.

En 2003 Maier et al. lo aplicaron por primera vez al diseño óptimo de dos redes de la literatura que funcionaban por gravedad y bajo un solo estado de carga, indicando que podían ser una alternativa a los AG. Simpson et al. (2001) estudiaron la sensibilidad del algoritmo ante la selección de los parámetros y sugirieron unos rangos de valores para éstos ([50]). Zecchin et al. (2007) compararon el desempeño de cinco algoritmos basados en ACO sobre algunas redes obteniendo resultados satisfactorios en todos los casos ([60]). López-Ibáñez et al. (2008) utilizaron ACO para optimizar la operación de los bombeos al objeto de minimizar su consumo eléctrico ([34]). Ostfeld et al. (2008) se basaron en ACO para conjugar el problema de mínimo coste y de operación de la red, considerando diferentes cargas en periodo extendido en una red con bombas y depósitos ([42]). Zecchin et al. (2012) propusieron dos

métricas para evaluar la efectividad de la búsqueda de algoritmos basados en ACO al aplicarlos a RDA ([61]).

3. Búsqueda tabú (Tabu search, TS): Esta técnica no está inspirada en ningún fenómeno de la naturaleza. Su característica principal es que hace uso de cierta memoria para almacenar información sobre las soluciones previas y utilizarla en la búsqueda, de manera que no se vuelvan a repetir los pasos hacia soluciones que en iteraciones anteriores no resultaron fructíferas.

La búsqueda del óptimo parte de una posible solución x_0 , la cual tiene asociadas otras soluciones también posibles y que forman su denominado vecindario $N(x_0)$. Algunas de las soluciones de este vecindario son de peor calidad que la solución conocida, en términos de la función objetivo, por lo que son rechazadas y pasan a la llamada lista tabú. El resto de soluciones del vecindario, $N^*(x_0)$, son evaluadas mediante la función objetivo y se elige a la mejor. Si esta solución de $N^*(x_0)$ es mejor que la solución actual x_0 se toma como nueva solución de partida y se actualizan el vecindario y la lista tabú. El proceso termina cuando la búsqueda no mejora o cuando se alcanza un criterio de parada. La información previa puede ser utilizada para evitar movimientos que hagan volver a soluciones que no dieron buen resultado, penalizándolos (sería la memoria a corto plazo) o para dirigir la búsqueda a hacia zonas no exploradas o hacia ya exploradas pero que dieron buenas soluciones (sería la memoria a largo plazo) ([46]).

En 2003, Cunha y Ribeiro lo utilizaron en el problema de mínimo coste de una red mallada, aplicándolo a cinco redes, entre ellas la de Alperovits y Shamir, Hanoi y Nueva York ([11]).

4. Optimización por enjambre de partículas (Particle swarm optimization, PSO): Algoritmo evolutivo. Se inspira en el comportamiento social que desarrollan los pájaros para moverse juntos, en bandada, hasta su destino ([37]).

El algoritmo parte de una población de soluciones generada aleatoriamente, donde cada una es asimilada a un pájaro que vuela dentro de bandada. Cada pájaro tiene unas coordenadas, que son las variables de decisión del problema, y tres vectores que lo caracterizan, su posición y velocidad actuales y su mejor posición histórica. Se identifica la mejor solución instantánea al problema, es decir, el pájaro mejor posicionado de la bandada, al que todos los demás pájaros tenderán a ir. La velocidad con la que cada pájaro se moverá hacia el mejor posicionado depende de su velocidad actual, de una cierta inercia ante el cambio de velocidad, del conocimiento de su mejor posición individual (aprendizaje cognitivo) y del conocimiento de la mejor posición en la bandada (aprendizaje social). La búsqueda finaliza tras un determinado número de iteraciones o tras alcanzar un valor prefijado para la función objetivo.

Este algoritmo fue desarrollado por Kennedy y Eberhart en 1995 para problemas de optimización con variables de decisión continuas ([30]). Izquierdo et al. propusieron sendas adaptaciones al algoritmo en 2007 y 2008. La primera permite acomodar variables de tipo discreto para su aplicación a los problemas en RDA y la segunda evitar la superposición de las soluciones con la mejor, como suele ocurrir con el algoritmo original, escapando de una convergencia prematura para escapar de óptimos locales y encontrar soluciones de mayor calidad ([38]).

5. *Shuffled complex evolution (SCE)*: Algoritmo evolutivo. Este algoritmo combina operaciones de tipo probabilístico y determinista. Comienza con una población aleatoria de soluciones factibles, ordenadas de menor a mayor valor de la función objetivo. Esta población inicial se divide en varios subconjuntos todos del mismo tamaño ("complexes"), cada uno representando un área local dentro del dominio completo. Los subconjuntos evolucionan independientes llevando a cabo búsquedas simultáneas hasta encontrar el óptimo local de cada uno, mediante el algoritmo simplex. Los nuevos individuos de cada subconjunto se reagrupan, se ordenan por ranking según valor de la función objetivo y se barajan, lo que permite el intercambio de información. La población así formada se divide de nuevo en subconjuntos. El proceso termina cuando ninguno de los siguientes óptimos locales puede mejorar el

actual óptimo local de su subconjunto o cuando se alcanza el criterio de parada ([32], [44]).

Fue desarrollado por Duan et al. en 1992 para calibrar de forma eficiente modelos de lluvia-escorrentía ([14]). En 2004 Liong y Atiquzzaman introdujeron algunas modificaciones al algoritmo original, para manejar un mayor número de variables y convertir los diámetros en valores comerciales discretos, y lo aplicaron al problema de mínimo coste de varias redes de tuberías, observando que resultaba mucho más rápido en el cálculo que otras técnicas utilizadas con anterioridad.

6. *Shuffled frog leaping algorithm (SFLA)*: Algoritmo evolutivo. Esta heurística fue propuesta por Eusuff y Lansey en 2003 para encontrar el óptimo global. Parte de una población inicial de posibles soluciones, cada una asimilada como una “rana” virtual. Cada rana es un vector de ideas (“meme”), donde cada idea es una variable de decisión discreta. En comparación con un AG, como se verá más adelante, una idea en un “meme” equivaldría a un gen en un cromosoma. Sin embargo, mientras que en un AG la buena información sólo pasa de padres a hijos entre generaciones en SFLA la información se puede transmitir inmediatamente entre dos individuos cualesquiera, sin esperar a la siguiente generación. Se podría decir que las ranas (“memes”) saltan sobre rocas, cada una situada en una posición discreta, tratando de encontrar aquella que contiene la mayor cantidad de comida. Las ranas se comunican entre ellas compartiendo información sobre sus respectivas posiciones. Esta comunicación mejora sus ideas o conocimiento y lleva a que cada rana cambie su posición individual ajustando la magnitud de su salto hacia una posición mejor. Este algoritmo combina otros dos, SCE y PSO. Como en SCE, la población inicial se divide en subconjuntos (“memeplexes”) que evolucionan simultánea e independientemente, empleando el algoritmo PSO como herramienta para la búsqueda local. Tras un determinado número de evoluciones, todos estos subconjuntos se reagrupan para compartir la información de las búsquedas locales. Como en SCE, la población se divide y reagrupa hasta cumplir el criterio de parada.

Eusuff y Lansey aplicaron SFLA a las redes de Alperovits y Shamir, Nueva York y Hanoi, donde sólo intervienen tuberías en el problema de diseño. En las dos primeras superaron a la mejor solución hasta la fecha y en la última se quedaron muy cerca de la mejor reportada requiriendo, en los tres casos, de un menor número de iteraciones en el algoritmo ([15]).

7. Búsqueda de la armonía (Harmony Search, HS): Este algoritmo fue propuesto por Geem et al. en 2001. El algoritmo imita a un grupo de músicos de jazz que improvisan tratando de encontrar la mejor armonía. Cada músico representa una variable de decisión, el tono del instrumento de cada músico es el valor que tomaría esa variable de decisión, la armonía es una solución potencial y la calidad de la armonía se mide con su valor en la función objetivo ([19]).

El algoritmo emplea cuatro parámetros: tamaño de memoria (harmony memory size, HMS), tasa de memoria (harmony memory considering rate, HMCR), tasa de tono (pitch adjusting rate, PAR) y el número de improvisaciones (NI) o criterio de parada. La memoria almacena los vectores solución y sus respectivos valores de la función objetivo. El algoritmo comienza inicializando los valores de los parámetros y la memoria. A continuación se improvisa una armonía (se genera aleatoriamente una posible solución), se compara con las existentes en memoria (se analiza con el simulador hidráulico y se calcula su valor objetivo), se actualiza la memoria en caso de sustituir a la armonía peor y así, sucesivamente, hasta verificar el criterio de parada ([20]).

Cada variable de decisión toma su valor dentro de un rango de posibles valores preestablecido (cada instrumento marca un tono). El parámetro HMCR se refiere a la probabilidad de tomar un valor del histórico de valores guardados en memoria para esa variable de decisión o de tomar uno aleatorio dentro de su rango. El parámetro PAR indica la necesidad o no de ajustar el valor tomado (el tono) a alguno de los adyacentes dentro de su rango de posibles. La finalidad de HMCR y PAR es mejorar la búsqueda global y local del algoritmo, respectivamente.

Si la nueva armonía (o solución candidata) es mejor que la peor armonía en memoria, en términos del valor de la función objetivo (o estética de la armonía), y no coincide con otra guardada en la memoria, se incorpora ésta a la memoria y se descarta a la peor. En RDA, se calcula el coste de la red tras llevar a cabo un análisis hidráulico con la nueva solución candidata y si el coste es menor que el de la peor solución en memoria, la sustituye. Así se evalúan las armonías generadas hasta satisfacer el criterio de parada o encontrar una armonía fantástica.

En comparación con AG, HS genera un nuevo vector solución tras considerar todos los que ya existen en memoria y no sólo a dos (los padres en el AG). Otras diferencias son que puede tratar con variables de tipo continuo sin perder precisión y que no requiere de conversiones de las mismas a expresiones de tipo decimal o binario.

En su aplicación al diseño óptimo de RDA, Geem et al. encontraron soluciones más económicas a las reportadas anteriormente en un muy inferior número de iteraciones del algoritmo ([22]). En 2006 mejoraron el algoritmo introduciendo las relaciones entre variables de decisión (entre los músicos) ([20]). En 2009 incluyeron las bombas en RDA, consiguiendo también mejores resultados que con AG y SA. En 2011, propusieron una nueva versión que evitaba el tedioso trabajo de calibrar los parámetros HMCR y PAR, cuyos valores se ajustan durante el algoritmo ([21]).

8. Algoritmos genéticos: Algoritmo evolutivo. Inspirados en la evolución natural que se da en la naturaleza. Parten de un conjunto de soluciones que, de forma simultánea, evolucionan durante generaciones al aplicar sobre ellas una serie de operaciones basadas en la herencia genética y la lucha por la supervivencia.

Dentro de las técnicas heurísticas, en los últimos años se han desarrollado algoritmos que imitan ciertos principios de la naturaleza y que han demostrado ser resolutivos en muy distintas aplicaciones. Son los llamados algoritmos evolutivos. En el campo de las RDA, los algoritmos evolutivos están cobrando fama e importancia ya que, entre otras ventajas, permiten manejar variables de tipo discreto (como el tamaño de los componentes), son capaces de conducir una búsqueda de forma robusta (poco

sensibles a las variaciones de los parámetros), no requieren de cálculos de derivadas ni de derivadas parciales de funciones (utilizan sólo los valores de la función objetivo) y tienen mecanismos para escapar de óptimos locales y explorar todo el espacio de soluciones ([24], [44]).

Dentro de los algoritmos evolutivos quizá los más conocidos y extendidos sean los algoritmos genéticos, inspirados en las leyes de la evolución natural y la genética. En los últimos años, han demostrado ser muy resolutivos dando buenas soluciones a problemas antes considerados intratables y en tiempos razonables, por lo que gozan de un amplio reconocimiento y difusión entre investigadores e ingenieros. Además, su relativamente sencillo manejo ha hecho que muchos paquetes informáticos que se pueden encontrar en el mercado los incorporen como algoritmo de optimización.

En lo que interesa al presente TFM, el software de optimización utilizado (EVOLVER) emplea un algoritmo genético y es por ello por lo que se presentan más ampliamente a continuación.

3.2.1. ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos (AG) fueron propuestos por primera vez por Holland en 1975 y desarrollados posteriormente por otros autores en la década de los ochenta siendo Golberg quien, en 1989, los popularizó como herramienta de búsqueda y optimización.

Los AG forman parte de los llamados algoritmos evolutivos. Se inspiran en el comportamiento y aprendizaje de los seres vivos que continuamente se enfrentan a una serie de dificultades para subsistir, como encontrar alimento o refugio. Los individuos que mejor se adaptan a su entorno son los que perduran a lo largo de generaciones a través del proceso conocido como selección natural ([06]).

Los seres vivos cuentan con unas habilidades y capacidades innatas para la supervivencia, implícitas en su material genético. A lo largo de las generaciones, la evolución es posible al incorporar a nivel de sus cromosomas el conocimiento y aprendizaje adquiridos de las mejores adaptaciones al medio, hostil y cambiante, transmitiendo esta información genética de padres a hijos ([36]).

Los algoritmos genéticos trabajan con una población de individuos cada uno de los cuales representa una solución factible a un problema dado. Cada individuo o posible solución se representa como un conjunto de valores, llamados genes, agrupados formando una estructura mayor, llamada cromosoma. Cada gen significa el valor tomado por cada variable de decisión en el problema de optimización y el cromosoma el conjunto de los valores tomados por todas las variables, conformando una solución al problema.

Cada individuo lleva aparejada una medida de su calidad como solución (o fitness) basada en el valor de la función objetivo. En la naturaleza, esto equivaldría a la capacidad de cada individuo por competir por la supervivencia. Cuanto mayor sea su calidad, o capacidad de supervivencia, mayor será su probabilidad de ser seleccionado para reproducirse.

Para la reproducción, se seleccionan los padres al azar usando algún procedimiento que favorezca la elección de los mejor adaptados, lo que sucede con una probabilidad que es proporcional a su valor en la función objetivo. Con la reproducción de los individuos mejor adaptados se exploran las áreas más prometedoras del espacio de búsqueda.

Una vez seleccionados los padres sus cromosomas se combinan, utilizando los operadores de cruce y mutación, dando lugar a descendientes que constituirán los nuevos individuos de la siguiente generación.

El operador de cruce actúa sobre dos padres seleccionados cortando sus respectivas cadenas de cromosomas. Si el cruce está basado en un punto, el corte se produce según una posición escogida al azar. Los dos tramos iniciales y los dos tramos finales se intercambian dando dos nuevas cadenas de cromosomas completos (descendientes), de manera que ambos heredan parte de la información genética de cada uno de los padres.

El operador de mutación actúa sobre los individuos descendientes alterando los genes individuales aleatoriamente, normalmente con probabilidad pequeña ([24]).

Tras la recombinación de las soluciones de la población inicial se tiene una nueva población que reemplaza a la anterior y que contiene una mayor proporción de buenas características, que continúan propagándose a través de la población.

Dado que el algoritmo genético opera con una población en cada iteración, se espera que el método converja de modo que al final del proceso la población sea muy similar, y en el infinito se reduzca a un solo individuo, el óptimo global ([36]).

El concepto de convergencia está relacionado con la progresión hacia la uniformidad. Por ejemplo, si se asume una convergencia del 95%, un gen habrá convergido cuando al menos el 95 % de los individuos de la población compartan el mismo valor para dicho gen. Se dice que la población converge cuando todos los genes han convergido.

A modo de resumen, los pasos seguidos por un AG son los siguientes ([24]):

1. Genera de forma aleatoria una población de potenciales soluciones.
2. Mediante la función objetivo se evalúa el ajuste o adaptación al problema de cada solución de la población inicial, asignándole el valor obtenido.
3. Durante la ejecución del algoritmo, se seleccionan los individuos que se reproducirán, los padres, en base a su valor en la función objetivo.
4. Se genera una nueva población de soluciones utilizando operadores que se inspiran en la reproducción biológica: cruce y mutación. Los padres seleccionados se cruzarán generando dos hijos sobre los que actuará un operador de mutación.
5. El resultado de la reproducción de los padres es una nueva generación de individuos, nuevas posibles soluciones al problema.
6. Se evalúa la calidad de cada nueva solución obteniendo su valor en la función objetivo y de nuevo se repite el proceso de reproducción hasta que el algoritmo converge o se alcanza la condición de terminación

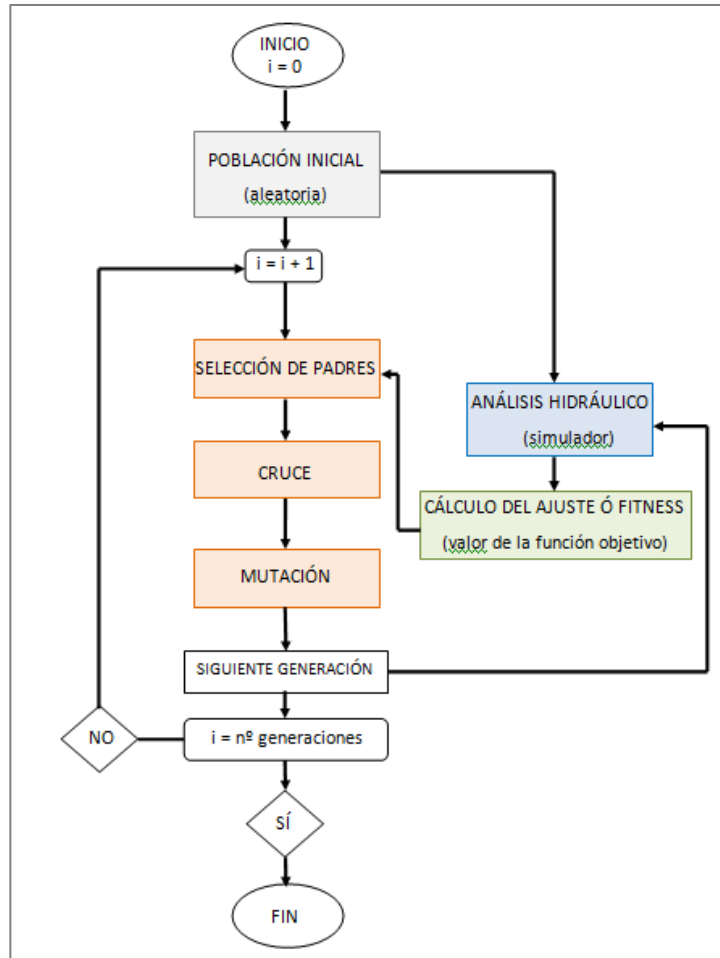


Fig.1. Funcionamiento de un AG (adaptada de Reca y Martínez, 2006)

Población

El tamaño de la población inicial es uno de los parámetros a ajustar. Intuitivamente se podría pensar que poblaciones pequeñas podrían no cubrir adecuadamente el espacio de búsqueda y que poblaciones demasiado grandes podrían consumir un excesivo tiempo de cálculo. Algunos autores (como Alander en 1992) han sugerido que un tamaño de la población comprendido entre L y $2L$ es suficiente para atacar con éxito un problema con L variables de decisión, es decir, la longitud del cromosoma o solución.

Los valores más habituales para el tamaño de la población de partida en un AG se encuentran en el rango entre 50 y 1.000 individuos ([24]). Dandy et al. (1996) proponen una población inicial entre 100-1.000 individuos ([12]).

Función objetivo

La función objetivo debe ser diseñada específicamente para cada problema de manera que refleje fehacientemente el nivel de adaptación de cada individuo de la población al problema particular.

Idealmente, la función debería verificar que para dos individuos que se encuentran próximos en el espacio de búsqueda sus respectivos valores en la función objetivo sean similares. Sin embargo esto no siempre es posible, sobre todo en los problemas con un gran número de restricciones donde muchos puntos del espacio de búsqueda pueden representar soluciones no factibles. Una forma de manejar a estas soluciones sería directamente desestimarlas por no cumplir las restricciones pero que siguieran evolucionando con cruces y mutaciones hasta obtener soluciones factibles. Otra forma sería directamente asignarles un valor de cero a la función objetivo.

Lo habitual cuando se trabaja con AG es manejar las restricciones usando un término de penalización que, añadido a la función objetivo, reduzca (en caso de maximizar) o aumente (en caso de minimizar) el valor de la función objetivo y que sólo interviene cuando la solución viola alguna de las restricciones. No ignorar estas soluciones para concentrarse sólo en las factibles contribuye a guiar la búsqueda, aunque a costa de pagar de un precio ([24]).

El término de penalización incluye un factor, llamado factor de penalización, para adecuar la escala de la penalización a las unidades de la función objetivo. Este factor puede ser función del número de generación de manera que la penalización tomará un valor distinto a medida que avanza el algoritmo y así asegurar que la solución final sea factible.

En muchas ocasiones, se utiliza la combinación del valor de la función objetivo con la penalización como indicador del ajuste de cada solución al problema.

Selección

El método de selección de padres más utilizado es el denominado método de ruleta donde la selección de un individuo como padre es proporcional a su valor de la función objetivo. Este método asume que cada individuo tiene asignada una porción en la ruleta cuya área es proporcional al valor de la función objetivo, de manera que un individuo con mayor área tendrá más probabilidades de ser elegido para reproducirse ([58]). Sin embargo, este método puede llevar a una convergencia prematura ya que se centra en explotar los individuos que desde el principio presentan una mayor aptitud, se multiplicarán rápidamente en la población desplazando a otros individuos que, aunque en un primer momento son poco idóneos, en generaciones futuras podrían aportar buena información para llegar a la solución óptima ([33]).

Para evitar el inconveniente de la convergencia prematura, una alternativa es la selección por ranking. En este método los individuos de la población son ordenados de mayor a menor aptitud o fitness (que muchas veces coincide con el valor de la función objetivo) y, según su puesto en el ranking, se calcula su probabilidad de selección. Este método ignora el valor absoluto de la función objetivo de cada individuo, lo que en ocasiones podría ser interesante para saber el grado de diferencia entre las soluciones competidoras ([33]). En comparación con la selección por ruleta, puesto que evita coger la mayoría de los hijos de un pequeño grupo de individuos, aumenta la variedad genética, lo que puede conducir a una búsqueda más exitosa. Sin embargo, tiene la desventaja de que la convergencia puede ser más lenta ya que no existe tanta diferencia entre individuos. En definitiva, la población no se colapsa rápidamente con los descendientes de un pequeño grupo de individuos lo que permite una mayor efectividad del AG.

Otros métodos serían la selección elitista y la selección por torneo:

- ✓ En la selección elitista el mejor individuo en cada momento es forzado a ser seleccionado como padre.

- ✓ En la selección por torneo se escoge al azar un determinado número de entre los individuos de la población (tamaño del torneo) y se les hace competir entre ellos, en términos de valor de la función objetivo, para seleccionar como padre al mejor del torneo. El proceso de torneo se repite hasta que el número de individuos seleccionados coincide con el tamaño de la población.

Cruce

El operador de cruce es el responsable de efectuar la búsqueda a lo largo del espacio de posibles soluciones. Su objetivo es conseguir descendientes que mejoren la aptitud con respecto a sus padres.

Habitualmente el operador de cruce no se aplica a todos los pares de individuos que han sido seleccionados para emparejarse sino que se aplica de manera aleatoria con una probabilidad comprendida entre 0,5 y 1,0, es decir, sobre entre el 50 y el 100 % de los individuos seleccionados. En el caso en que el operador de cruce no se aplique la descendencia se obtiene simplemente duplicando los padres. Goldberg (1989) propone una probabilidad de cruce entre 0,6 y 1.

Existen varias formas de realizar el cruce entre dos individuos seleccionados:

- ✓ Cruce por un punto: Es la forma más simple del operador de cruce. Se escoge una posición de cruce de forma aleatoria y las partes de los padres se intercambian para formar dos descendientes.
- ✓ Cruce por dos puntos: Trata de reducir el sesgo posicional. Se escogen dos posiciones de cruce de forma aleatoria y los padres se intercambian los segmentos existentes entre ellas.

Algunos investigadores opinan que el operador de cruce más eficiente es el cruce uniforme ([33]), ya que opera sobre cada gen de los padres individualmente, y no sobre bloques de material genético ([01]). Cada gen del descendiente tiene las mismas probabilidades de pertenecer a uno u otro padre. Una forma sería generando un número aleatorio de modo

que si supera un cierto umbral se toma el gen de primer padre y si no lo supera se toma del otro. Otra forma sería seleccionando una máscara generada aleatoriamente que contiene unos y ceros, ambos con la misma probabilidad. En caso de que el bit correspondiente a la máscara esté a 1, se copia el gen del primer padre y en caso de que esté a 0 se copia el gen del segundo. Para producir el segundo descendiente se intercambian los papeles de los padres.

Mutación

El objetivo de la mutación es asegurar que ningún punto del espacio de búsqueda tenga probabilidad cero de ser examinado y evitar así una convergencia prematura del algoritmo hacia buenas soluciones óptimas locales en las que podría quedar atrapado.

Si la probabilidad de mutación es demasiado alta la búsqueda de soluciones podría degenerar en una búsqueda aleatoria, lo cual no está permitido en un problema de optimización mediante AG. Por ello los valores más habituales de la probabilidad de mutación están entre 0,001 y 0,01, es decir, actúa sobre entre un 0,1% y un 1% de los individuos descendientes ([24]).

3.3. LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA CON MÚLTIPLES OBJETIVOS

El problema de optimización tal y como se ha definido anteriormente en la [EC.1] sólo consideraba un objetivo, expresado formalmente como $f(x)$, planteando la llamada *optimización mono-objetivo*. Con dicha formulación se espera encontrar “la mejor solución”, la que producirá el mínimo o máximo valor en la función objetivo ([24]).

El problema tradicional del diseño óptimo de RDA ha tenido como objetivo minimizar el coste económico de la red con las variables de decisión los diámetros de las tuberías, de manera que fuera lo más eficiente posible en el suministro de agua a los usuarios cumpliendo con la restricción de presión mínima en los nudos de demanda ([06]).

Sin embargo, muchos problemas de diseño o de toma de decisión de la vida real contemplan la optimización simultánea de varios objetivos, muchas veces en conflicto, como minimizar el coste de capital y de operación, minimizar el riesgo, maximizar la seguridad y fiabilidad del sistema, etc. Son los problemas *multi-objetivo*, donde la interacción entre objetivos hace que la mejora en alguno provoque el deterioro en otros y que no exista una única solución óptima sino un conjunto de soluciones de compromiso conocidas como soluciones no dominadas u óptimos de Pareto.

3.3.1. LA SOLUCIÓN MULTI-OBJETIVO

La finalidad de las técnicas multi-objetivo es encontrar un conjunto de soluciones de compromiso, los óptimos de Pareto. En estas soluciones de compromiso no es posible mejorar un objetivo sin que, en cierta medida, empeore alguno de los demás.

Estas técnicas están ganando muchos seguidores ya que permiten obtener un abanico de soluciones alternativas donde la elección de la solución definitiva no recae sobre el propio cálculo sino sobre el responsable de la gestión o de la toma de decisión.

Estas técnicas, sin embargo, exceden del alcance del presente TFM al utilizar, como se verá más adelante, una herramienta para la optimización basada en una técnica mono-objetivo (EVOLVER), por lo que no se volverá a incidir sobre ellas.

3.3.2. LA SOLUCIÓN MONO-OBJETIVO

Los problemas con más de un objetivo se pueden tratar de resolver con técnicas propiamente multi-objetivo pero también con técnicas mono-objetivo. El problema se debe replantear a un único objetivo, bien agrupando los distintos objetivos en uno solo bien reformulando todos los objetivos salvo uno como restricciones. En cualquier caso, la combinación de los múltiples objetivos requiere que sean medibles en los mismos términos la función objetivo ([24]).

Existen dos formas principales de agrupación de objetivos, por ponderación (Weighting method) y por restricción (Constraint method).

El método de ponderación parte de un conocimiento a priori de las preferencias o importancia relativa de los objetivos. La función que se optimiza (f) es suma de todas las funciones objetivo implicadas, una por cada objetivo (f_i), donde cada función objetivo va afectada por un peso que hace referencia a su importancia particular dentro del problema. Así, el problema con múltiples objetivos se transforma en un problema con una sola expresión (f):

$$f = \sum_{i=1}^k w_i \cdot f_i(x) \quad [\text{EC.4}]$$

Donde $w_i \geq 0$ con $i = 1 \dots k$ son los coeficientes de peso representando las preferencias o importancia relativa de las k funciones objetivo del problema multi-objetivo. Normalmente se asume que la suma de los pesos w_i es igual 1 ([09]).

Este método es fácil de entender e implementar y el cálculo es muy eficiente. Sin embargo, presenta la desventaja de tener que ajustar a priori una serie de pesos sin un conocimiento profundo del problema, dadas la incertidumbre y complejas interacciones no lineales entre los componentes de la red. Como la solución óptima que se obtiene es función de los pesos utilizados para agregar los objetivos lo habitual es resolver el problema para diferentes valores de w_i y generar una superficie de soluciones de compromiso de entre las cuales el responsable adoptará la que estime más adecuada.

En el método de restricción algunos de los objetivos pueden reformularse como restricciones introduciendo en la función objetivo un término de penalización por cada objetivo reformulado que grava la violación de la restricción, por ejemplo penalizar en cada nudo la desviación de la presión alcanzada con respecto al valor de presión mínima requerida. Cada término de penalización lleva asociado un factor de penalización que acomoda las unidades de dicha violación a las unidades de la función objetivo y que guía la búsqueda en el espacio de soluciones hacia la región de soluciones factibles ([44]):

$$f = f(x) \pm \left[\sum_{i=1}^{\text{nudos}} n_i \cdot G_i + \sum_{j=1}^{\text{tuberías}} t_j \cdot L_j \right] \quad [\text{EC.5}]$$

Donde G_i y L_j son funciones de las restricciones referidas a los nudos y tuberías, respectivamente, y n_i y t_j son los correspondientes factores de penalización ([09]).

Este método es el más empleado cuando en la optimización se utilizan algoritmos evolutivos. La principal desventaja en este caso es el ajuste de los factores de penalización ya que valores excesivamente altos o bajos pueden llevar a que el algoritmo no encuentre ninguna solución. Si el valor es demasiado alto, el algoritmo es arrastrado muy rápidamente hacia el interior del espacio de soluciones factibles y desalienta la exploración más allá de este espacio. Si por el contrario es demasiado bajo, el valor de la penalización resulta despreciable en comparación con el valor de la función objetivo y el algoritmo consume mucho tiempo valorando soluciones no factibles ([09]).

3.4. APLICACIÓN DE LOS AG A LA OPTIMIZACIÓN DE LAS RDA

La versatilidad de los AG para su aplicación a múltiples problemas de optimización ha hecho que, en los últimos años, hayan experimentado un importante auge el campo de la ingeniería hidráulica y en particular en el diseño y gestión de las RDA.

Desde las primeras aplicaciones de los AG en esta materia, han sido numerosos los investigadores que han profundizado en ella desarrollando nuevos algoritmos que, en algún aspecto, mejoran el resultado de los precedentes. El desempeño de muchos de estos trabajos se ha contrastado a partir de su aplicación sobre redes sintéticas de referencia o “benchmarking” como serían la red de dos mallas de Alperovits y Shamir (1977), la red de Hanoi de Fujiwara y Khang (1990) o la red de túneles de Nueva York de Schaake y Lai (1969) ([40]).

El problema de optimización de RDA cobra especial importancia en el caso de las redes malladas por dos cuestiones principales. En primer lugar porque, a diferencia de lo que

ocurre en las redes ramificadas, para un determinado estado de demanda no es posible asignar de manera inequívoca el caudal que circula por cada una de las tuberías, lo que afecta al diseño óptimo de una RDA y, en segundo, porque la redundancia de una red mallada confiere al sistema una mayor garantía de suministro y, por consiguiente, de fiabilidad.

Los primeros trabajos de optimización de una RDA se centraban en obtener una red de mínimo coste determinando el diámetro de las tuberías. Más tarde se incorporaron otras variables de diseño como el tamaño de depósitos, bombas y válvulas y otros conceptos como la ubicación de los elementos, la operación del sistema, la calidad del agua, la fiabilidad, la rehabilitación, etc.

Simpson et al. (1994) fueron los primeros en emplear AG en el diseño óptimo de RDA ([41]). Hasta ese momento las técnicas más empleadas habían sido de tipo determinístico. En su investigación optimizaron la red de Gessler (1985) utilizando AG, enumeración exhaustiva y programación no lineal y compararon los resultados obtenidos. En todos los casos consideraron tres estados distintos de demanda y presión en los nudos. El objetivo era encontrar la combinación de diámetros de las tuberías que diera el mínimo coste sujeto a las restricciones de continuidad en nudos, pérdidas de carga en mallas y mínimos y máximos valores de presión en nudos y de diámetro en tuberías. El AG se aplicó sobre una población inicial de potenciales soluciones expresadas en código binario. Para cada potencial solución, primero se calculaba el coste de capital asociado y después se obtenía la distribución de caudales y presiones mediante un simulador hidráulico. En caso de no satisfacer la restricción de presión mínima en la red, un término de penalización que considera la violación en el nudo con mayor déficit de presión incrementa el coste asociado de la potencial solución. La selección de individuos para las operaciones de cruce y posterior mutación se realiza en función de su ajuste (o fitness) que es inversamente proporcional al coste total, esto es, cuanto menor sea su coste total mayor será su ajuste y, por tanto, su probabilidad de ser elegido para reproducirse. Se adoptaron unas probabilidades de cruce y mutación de 0,7 y 0,01 respectivamente. El algoritmo repite este proceso sobre las nuevas generaciones hasta alcanzar el número de iteraciones establecido. Finalmente concluyeron que el AG resultaba una técnica mucho más efectiva, con un menor tiempo de cálculo, para

encontrar la solución óptima o al menos una próxima a la óptima, al necesitar un número menor de iteraciones ([49]).

Dandy et al. (1996) aplicaron una versión mejorada de AG al problema de la ampliación de la red de túneles de Nueva York obteniendo el diseño más económico hasta ese momento. Las mejoras introducían variaciones sobre tres aspectos: la función de ajuste, la mutación y la codificación de las soluciones. En su formulación, la función de ajuste se expresa como una potencia donde el exponente aumenta su valor conforme avanza el algoritmo. De esta manera, al alcanzar cada vez mejores soluciones y más similares entre sí, un mayor exponente permite acentuar las pequeñas diferencias que existen entre soluciones en cuanto al valor de ajuste, lo que ayuda a concentrar la búsqueda en las mejores regiones del espacio de soluciones. En cuanto a la mutación, se introduce un nuevo operador para que los cambios en la variable de decisión a mutar se dirijan hacia su valor inmediatamente anterior o posterior en el listado de posibles valores de las variables de decisión. Por último, codifican las soluciones mediante una escala de grises y no mediante código binario de manera que soluciones muy próximas entre sí en el espacio de soluciones estén codificadas de forma muy similar.

Savic y Walters (1997) desarrollaron un programa informático, GANET, que incorporaba los AG como técnica de optimización para resolver el problema de mínimo coste en el diseño de una RDA. Para ilustrar la capacidad del programa lo aplicaron sobre tres redes estudiadas con anterioridad (dos mallas, Hanoi y túneles de Nueva York), bajo un único estado de carga ([48]). Los costes de GANET no siempre resultaron inferiores a los obtenidos previamente, pero sí bastante aproximados. En comparación con las otras técnicas, concluyeron que además de resultar muy eficiente en el cálculo y sencillo de manejar (ya que sólo requería de introducir ciertos parámetros relativos a los AG y que podían tomar valores referidos en la literatura), GANET presentaba las ventajas de, por un lado, manejar directamente diámetros discretos y, por otro, no proporcionar un diseño óptimo con tuberías divididas en tramos de distinto diámetro, el cual es menos realista.

Otros, como Halhal et al. (1997) se plantearon obtener la mejor combinación de mejoras a realizar en una RDA, mediante trabajos de rehabilitación, reposición, reparación o

duplicación de elementos, al objeto de alcanzar simultáneamente dos objetivos, maximizar el beneficio de la solución y minimizar la inversión, todo ello sujeto a un presupuesto limitado. El beneficio de una solución tiene en cuenta conceptos como la mejora del nivel de servicio (medido como el aumento de presión en los nudos), la disminución de futuros costes de reparación, un aumento de la flexibilidad del sistema y una mejora de la calidad. Para su problema multiobjetivo formularon el algoritmo Structured Messy Genetic Algorithm (SMGA), basado en el proceso natural de evolución de los individuos desde organismos unicelulares a formas de vida complejas. El algoritmo comienza con una población inicial formada por la enumeración exhaustiva de todos los posibles valores de cada variable de decisión (sólo tuberías), de un dígito de longitud. Por cada iteración aumenta su longitud inicial en un dígito, por un proceso llamado concatenación, formando la población de la siguiente generación. Aplicaron SMGA a dos redes y comprobaron su mejor desempeño frente a un AG simple ([25]).

Abebe y Solomatine (1998) combinaron una herramienta de optimización global con varios algoritmos de búsqueda (GLOBE) con un simulador hidráulico (EPANET) con el que manejar las restricciones de carácter hidráulico. El objetivo era obtener el mínimo coste de la red determinando los diámetros de las tuberías y satisfaciendo una presión mínima en los nudos. Además de la interfaz para conectar ambos programas lo novedoso era la asignación de un valor de índice por cada diámetro comercial con lo que se reducía el tiempo de búsqueda del algoritmo y se evitaba obtener soluciones con tramos de distinto diámetro en tuberías ([02]).

Ninguna formulación es única. Un mismo problema puede resolverse desde distintos planteamientos de AG. Estos pueden usar diferentes estructuras para definición de las soluciones, diferentes operadores genéticos para transformar las soluciones, diferentes métodos para crear la población inicial o para incorporar las restricciones o diferentes parámetros (tamaño de la población, número de generaciones, probabilidades de selección, de cruce y de mutación) ([39]).

Montesinos et al. (1999) introdujeron nuevas modificaciones al AG simple al objeto de aumentar su convergencia. Dichas modificaciones afectaban a la selección y mutación de

soluciones para formar la siguiente generación. Proponen un operador de selección para el cruce que comienza ordenando las soluciones de mayor a menor valor de su ajuste (fitness) para luego eliminar aquellas cuyo ajuste no supera un determinado umbral. Para mantener el tamaño de la población, las soluciones eliminadas son reemplazadas por duplicados de las de mayor ajuste. El valor de ajuste es inversamente proporcional al coste total para cada solución, calculado como el coste de capital más un término de penalización. En su trabajo, a diferencia de otros anteriores, la penalización es función del número de elementos (tuberías y nudos) en los que no se cumplen las restricciones y no del grado de violación de una restricción, habitualmente la presión mínima, y observan que así aumenta la eficiencia en el proceso de búsqueda del óptimo. Para la mutación, proponen una probabilidad individual de mutación de manera que cada individuo mute como mucho una vez. Aplicaron esta modificación al problema de los túneles de Nueva York y aunque no obtuvieron una solución de menor coste que en trabajos anteriores sí la alcanzaron en un menor número de iteraciones ([39]).

Abdel-Gawad (2001) sugiere una nueva formulación del AG tras comparar las soluciones obtenidas con diferentes alternativas de selección, cruce y mutación sobre la red de túneles de Nueva York. Codifica las variables de decisión mediante valores discretos dentro de unos límites superior e inferior en lugar de representarlas mediante código binario o de grises. Concluye que el esquema que da el mejor resultado es el que emplea una estrategia de torneo en la selección para reproducción y en el remplazo, un valor constante de penalización, un cruce uniforme y una mutación uniforme modificada (la diferencia con la mutación uniforme es que en vez de permitir la mutación de un gen a un valor aleatorio dentro de su rango de valores posibles, el gen muta en una cierta cantidad, en el estudio en cuestión hacia un tamaño inferior o superior). El AG mejorado alcanzó la solución óptima en un menor número de generaciones que AG anteriores.

La mayoría de los trabajos y formulaciones se contrastan con redes funcionando por gravedad. Sin embargo, las redes están equipadas con bombeos y depósitos que intervienen en la operación del sistema y que, por tanto, influyen en los costes. De hecho, el consumo de energía puede suponer más de la mitad del presupuesto anual para el mantenimiento y

operación del sistema por lo que tenerlos en cuenta en el problema de optimización de una RDA es lo más realista ([08]).

Una forma de ahorrar en el consumo de energía es programar el funcionamiento diario de los bombeos ajustándolo a la tarifa eléctrica, procurando su funcionamiento fuera de las horas punta cuando el precio de la energía es mucho más alto.

Boulos et al. (2001) introducen los AG en la operación óptima de bombeos en RDA. Hasta ese momento el problema se había tratado con otras heurísticas, sin demasiada aceptación. Desarrollan un programa informático (H₂ONET) que determina la operación óptima de cada estación de bombeo según unas reglas temporales de operación que asigna a cada bomba individual, según deba encenderse o apagarse, de manera que el coste total de la energía consumida sea mínimo ([08]).

Tolson et al. (2004) se plantearon el problema de minimizar el coste total por tuberías en la red maximizando la fiabilidad del sistema, entendida como la capacidad de cumplir con la presión mínima en los nudos incluso bajo cierta incertidumbre en las demandas y en la rugosidad de las tuberías. En su trabajo combinaron un AG para la optimización con un método para calcular la fiabilidad de la red (FORM), el cual modificaron para obtener la fiabilidad en base al fallo de dos nudos críticos (y no uno) de la red. Consideraron tres estados de carga y asumieron la mínima fiabilidad obtenida (de entre los tres) como el valor de la fiabilidad objetivo ([53]).

Farmani et al. (2005) aplican la función objetivo autoadaptativa que formularon en 2003 para problemas de optimización con restricciones a las redes de Nueva York y Hanoi y concluyeron que, en comparación con soluciones anteriores de otros autores, obtenían la solución óptima, o una muy próxima, con un menor esfuerzo de cálculo ([16], [17]).

Babayan et al. (2005) consideran la incertidumbre de las demandas en los nudos y, en consecuencia, de las presiones. Utilizan la desviación típica de las presiones en nudos críticos como una medida de la variabilidad en la red. Dicha desviación típica se introduce en el término de penalización de la función objetivo que posteriormente optimizan mediante un

AG, tratando de encontrar un diseño de mínimo coste que al mismo tiempo sea robusto ([05]).

Son muchos los ajustes introducidos en los planteamientos con algoritmos genéticos para mejorar la convergencia y velocidad en la obtención de resultados ([45]).

Reca y Martínez (2006) desarrollaron el programa informático GENOME para optimizar el diseño de redes malladas para riego alimentadas por gravedad desde un depósito con carga fija. La novedad es que, en el proceso de selección de individuos para el cruce, utilizaron una variante al clásico método de la ruleta al objeto de evitar los posibles fallos que puede suponer el emplear directamente el valor de la función objetivo como medida de la probabilidad de selección. Ellos introdujeron un parámetro de adaptación (o fitness) relativo calculado en función del tamaño de la población, de una presión de selección y de la posición o ranking de cada solución, siendo la primera del ranking la solución de mayor valor de la función objetivo y la última la de menor. Probaron GENOME en una red real y en dos redes de la literatura (dos mallas y Hanoi) concluyendo que en ambos casos se igualaban las mejores soluciones obtenidas en trabajos previos en un tiempo razonable ([45]).

Gupta et al. (2008) proponen un AG modificado con reducción del espacio de búsqueda, para lo que desarrollan el programa GA-WAT. Al reducir el espacio de búsqueda es posible generar soluciones factibles más rápidamente y obtener una solución óptima en un menor número de generaciones y, por tanto, menor tiempo de cálculo. En su estudio, reducen dicho espacio asignando sólo cinco diámetros candidatos para cada tubería, y no todos los posibles de la gama comercial. Su AG modificado comienza convirtiendo la red mallada en ramificada a partir del camino más corto a cada nudo desde la fuente. Con el método de la pendiente uniforme obtienen el camino crítico para cada nudo extremo y el gradiente hidráulico en los nudos intermedios. Por continuidad, calculan el caudal por cada tubería. Después, despejando en la ecuación de pérdidas, obtienen un diámetro para cada tubería que obviamente no será un tamaño comercial. Los cinco diámetros candidatos serán el más próximo al calculado en la serie comercial, los dos inferiores y los dos superiores. Acotado el espacio de búsqueda, aplican los operadores genéticos. Emplearon este procedimiento con

la red de Hanoi y, en comparación con otros autores, comprobaron que resultada más eficiente y efectivo alcanzando similares o mejores soluciones ([29]).

Tradicionalmente, los métodos de optimización empleados en RDA sólo han tenido en cuenta cuestiones relativas al coste de tuberías, bombeos y depósitos. En los últimos años, se está tomando conciencia del impacto medioambiental que suponen las actividades industriales para la fabricación de los materiales y la energía insumida en los productos, transporte y colocación, por lo que cada vez con más frecuencia se está tratando de incorporar esta cuestión en el proceso de optimización. Así, además de los objetivos tradicionales de minimizar costes y satisfacer los requisitos de presión y calidad, se valoran el consumo de materiales y energía y las emisiones de gases de efecto invernadero y otros productos tóxicos derivados de la producción de los componentes y su continua operación.

A este respecto, en 2009, Herstein et al. proponen un nuevo parámetro, llamado “índice de impacto ambiental”, que aglutina el consumo de energía y las descargas contaminantes al medio ambiente y su impacto (medido como huella de carbono), el cual puede ser utilizado como un objetivo a minimizar dentro de la optimización multiobjetivo y guiar en el proceso de diseño de la red. Al comparar los índices y costes de las distintas alternativas observaron dos cosas: primero, que en todos los casos el coste de bombeo era muy superior al coste de tuberías y, segundo, el directo incremento del índice de impacto ambiental al aumentar el consumo de energía por los bombeos ([27]).

En 2010, Wu et al. utilizan un AG en la optimización multiobjetivo de una RDA considerando el criterio medioambiental de minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero junto con el plantemiento clásico de minimizar los costes del sistema. Las emisiones del capital se calculan en base a la energía consumida en el proceso de fabricación de las tuberías y las emisiones de operación en base a la electricidad consumida por los bombeos, a través de un factor de emisión que traduce los kWh en kg CO₂-equivalentes ([55]).

El mercado de los bonos o créditos de carbono nació con el Protocolo de Kioto como mecanismo para tratar de reducir las emisiones causantes del calentamiento global o efecto invernadero. Los países que lo aceptaron están obligados a cumplir con sus normas,

promoviendo políticas y promulgando leyes que les permitan cumplir con los compromisos que adquirieron al ratificarlo.

Las industrias que por sus procesos productivos emiten gases de efecto invernadero a la atmósfera deben adquirir una serie de permisos o créditos de emisión por cada Tn de CO₂ que emitan ([64]). Estos permisos se pueden comprar y vender. En el mercado de bonos de carbono aquellas industrias que más contaminan deben comprar más bonos para cubrir su exceso de emisión, pudiendo comprar parte de los créditos de aquellas que contaminan menos, ya sea porque emplean tecnologías más eficientes y menos emisoras o porque han incorporado alguna energía renovable, obteniendo estas industrias menos contaminantes un beneficio económico adicional al medioambiental. Por tanto, cada Tn de CO₂ puede ser valorada en términos económicos según el precio que se deriva de este mercado (precio del carbono).

El hecho de poder expresar la emisiones de CO₂ en términos económicos permite que, algo más tarde en 2010, Wu et al. planteen el problema de minimizar sendos objetivos, el coste total de la red y las emisiones de CO₂, como un problema monobjetivo ([56]). En su estudio analizan el problema desde las perspectivas mono y multiobjetivo. Con la técnica monobjetivo sólo cabe encontrar la solución de mínimo coste total de la red, la cual depende claramente del precio del carbono considerado. Como cabría esperar, a mayor precio del carbono la solución tiende a diámetros de tuberías mayores, con menores pérdidas por fricción y menores emisiones de CO₂ por operación.

En 2014, Hendrickson y Horvath estudian el potencial ahorro en emisiones de CO₂ al reducir las fugas en la red mediante un programa de sustitución de tuberías ([26]). La energía consumida por los bombeos es la principal fuente de emisiones de CO₂ y, aunque estas podrían reducirse bajando la presión de servicio en la red o aumentando la eficiencia de los bombeos, esto no siempre es posible. Una alternativa sería reducir las fugas ya que, al depender de la presión en la red, llevan implícita parte de las emisiones generadas con los bombeos. Los autores plantean un programa óptimo de sustitución de tuberías teniendo en cuenta el nivel de fugas y concluyen el tiempo máximo que no se debería superar para el replazo.

CAPÍTULO 04. MATERIALES Y MÉTODOS: EPANET, LA TOOLKIT DE PROGRAMACIÓN DE EPANET Y EVOLVER

4.1. EPANET

4.1.1. EL SIMULADOR HIDRÁULICO EPANET

EPANET es un software de libre distribución desarrollado por Lewis Rossman para la Agencia para la protección del medio ambiente de los Estados Unidos (USEPA, U.S. Environmental Protection Agency) para modelar sistemas de tuberías para distribución de agua. Permite simular en periodo extendido el movimiento del agua y el comportamiento de su calidad en redes a presión ([68]).

La posibilidad de poder acceder a su código fuente para modificar o adaptar el programa a las necesidades particulares del problema a resolver lo hace especialmente útil.

El módulo hidráulico de EPANET permite simular el comportamiento de la red bajo ciertos criterios de operación. Admite la modelación de los elementos físicos como tuberías (y sus pérdidas), bombeos (de velocidad fija o variable), válvulas (de estrangulación, reductoras, sostenedoras, rotura de carga, controladoras de caudal y de propósito general), depósitos de nivel fijo (embalses) o variable (tanques) pero también de la operación mediante controles, curvas de modulación, curvas características de las bombas, etc.

El módulo de calidad permite conocer, además de la concentración de un posible contaminante, la fuente de procedencia y el tiempo de permanencia del agua en la red.

Una vez definidos todos los elementos que componen la red, tanto su emplazamiento como sus características físicas e hidráulicas, y establecidos los diferentes patrones de consumo y de regulación del sistema, se puede simular el modelo en periodo extendido. Como resultado, además de seguir el flujo del agua por las tuberías y conocer el caudal que circula por ellas, se puede determinar la presión en los nudos y el nivel de agua en los depósitos.

EPANET es un modelo de análisis dinámico (transitorio) no inercial, también llamados cuasi-estáticos o en periodo extendido. Para cada instante de tiempo, se resuelve un modelo estático donde la variación entre dicho instante con respecto al anterior proviene de la actualización de parámetros como niveles en depósitos, demandas en los nudos, etc. Esta es su principal limitación, ya que no es posible contemplar fenómenos que suceden rápidamente como la rotura en una tubería, el cierre repentino de una válvula, el fallo de una bomba, etc.

Sin embargo, son muchas las capacidades del modelo hidráulico EPANET que lo hacen especialmente interesante para el desarrollo de esta tesina son:

- No existe límite en el tamaño de la red que se desea analizar.
- Permite calcular las pérdidas por fricción en tuberías.
- Permite incluir las pérdidas menores.
- Se pueden modelar los bombeos funcionando a velocidad de giro constante o variable.
- Se pueden modelar distintos tipos de válvulas.
- Se pueden modelar depósitos con cualquier geometría (función de sección variable con la altura).
- Es posible establecer diferentes tipos de consumo en los nudos, cada uno con su patrón de tiempo.
- Calcula la energía consumida y los costes de bombeo.
- Permite regular el sistema mediante controles de tiempo o consignas.

De entre las capacidades del módulo de calidad, dados el objeto y alcance de esta tesina, destacar que permite modelar y obtener el tiempo de permanencia del agua en red o, lo que es lo mismo, la edad del agua ([65]).

4.1.2. EL MODELO DE LA RED SOBRE EPANET

Para sacar el máximo partido del programa, el modelo debe representar a la red real lo más fielmente posible y estar bien calibrado.

En EPANET el agua se considera almacenada en embalses y en depósitos. La diferencia fundamental entre ambos es que en los embalses se considera que el nivel de agua se mantiene constante, ya que su capacidad de almacenamiento es muy superior al volumen de agua requerido por la red para su funcionamiento, mientras que en los depósitos el nivel de agua fluctúa a lo largo del día en función de los caudales entrantes y salientes, funcionando entre sus niveles máximo y mínimo.

Los consumos se consideran aplicados a los nudos. En estos puntos el caudal o caudales demandados son dato. Con el sistema en equilibrio, el programa resuelve el valor de la presión o, indistintamente, la altura piezométrica en dichos puntos.

El transporte se realiza exclusivamente por medio de las tuberías, en las cuales se pierde parte de la energía del fluido como consecuencia de la fricción y otras pérdidas localizadas. Son las pérdidas de energía las que condicionan el reparto de caudales circulantes por cada tubería, en función de la diferencia de alturas disponible entre dos puntos. EPANET permite aproximar las pérdidas por fricción mediante las expresiones de Darcy-Weisbach, Chezy-Manning y, en particular, de Hazen-Williams. Su magnitud es función del caudal, del diámetro y longitud de la tubería y del material, caracterizado por la rugosidad. Las pérdidas localizadas se deben a cambios de dirección, codos, accesorios, etc. Pueden modelizarse mediante un coeficiente k de pérdidas menores que afectará a la altura de velocidad en la tubería.

En la regulación del sistema intervienen las válvulas y los bombeos.

Las válvulas son líneas que permiten controlar la presión y el caudal en puntos específicos de la red al quedar completamente abiertas, cerradas o parcialmente abiertas. Su presencia en la red introduce una pérdida localizada de energía. En EPANET se pueden modelar válvulas

con diferentes propósitos como válvulas de retención, válvulas reductoras de presión, sostenedoras de presión, de rotura de carga, controladoras de caudal, reguladoras por estrangulación y, para representar cualquier elemento con un comportamiento diferente o con una relación caudal-pérdidas no estándar, las válvulas de propósito general. Cada tipo de válvula tiene un parámetro de consigna que define su punto de operación, pudiéndose modificar tanto la consigna como el estado a lo largo de la simulación mediante una serie de instrucciones o controles.

Las bombas son elementos que aportan energía al fluido incrementando su carga hidráulica. Se definen mediante su curva característica que establece la relación entre el caudal y la altura que la bomba puede aportar. EPANET permite variar la velocidad de giro de las bombas y programar su arranque y parada mediante el uso de controles y patrones de tiempo, según el nivel en un depósito o la presión en un nudo superen o caigan por debajo de un determinado valor. El consumo y coste de energía por la operación de las bombas se puede calcular a partir de su curva de rendimiento y un determinado patrón de precios de la energía.

Sin embargo, en EPANET no es posible modelar otros dispositivos imprescindibles en las redes reales para control y medida del suministro. Estos equipos aportarían información de determinadas variables hidráulicas como caudal, presión, nivel, volumen, concentración de desinfectante, etc. las cuales permiten tener un mayor conocimiento del estado de la red.

Una vez construido el modelo de la red e introducidas sus propiedades físicas y de funcionamiento, se lleva a cabo la simulación. EPANET informa de si la simulación resulta satisfactoria o de si contiene errores, presentando en cualquier caso los resultados del cálculo hidráulico (o de calidad) para su análisis.

4.2. LA TOOLKIT DE PROGRAMACIÓN DE EPANET

Como EPANET, la caja de herramientas (TOOLKIT) de programación de EPANET fue diseñada por la Agencia para la protección del medio ambiente de los Estados Unidos (USEPA, U.S. Environmental Protection Agency) y se distribuye de forma gratuita libre.

La “Toolkit” es una librería de enlace dinámico (.dll) de funciones que permite a los programadores adaptar EPANET a las necesidades específicas del problema. Dichas funciones se pueden utilizar en aplicaciones para Windows y, además, en distintos lenguajes de programación (C/C++, Delphi Pascal, Visual Basic o cualquier otro que pueda llamar a funciones de una librería de Windows) ([68]).

Contiene alrededor de 50 funciones que permiten abrir un archivo con el modelo de la red, leer y modificar el diseño o los parámetros de operación, ejecutar múltiples simulaciones en período extendido, mostrar los resultados generados y guardarlos todos o sólo los seleccionados en un archivo.

La “Toolkit” permite desarrollar aplicaciones específicas como, por ejemplo, modelos de optimización o de calibración automáticos que requieren ejecutar numerosos análisis de la red. Además, se puede vincular con otras herramientas de diseño asistido por ordenador (CAD), de análisis espacial (GIS) o de bases de datos. Incluye varios archivos de cabecera diferentes, archivos de definición o declaración de funciones y archivos de librerías .lib que facilitan la conexión con el código de la programación.

La estructura típica de un código que utiliza las funciones de la “Toolkit” para el análisis de una red de distribución de agua sería la siguiente:

1. Utilizar, junto con un archivo .inp de la red, la función ENopen para abrir el módulo de cálculo
2. Utilizar las funciones tipo ENset para modificar ciertas características del sistema.
3. Ejecutar un análisis hidráulico completo con ENSolveH, que automáticamente guarda los resultados en un fichero, o con la cadena de funciones ENopenH - ENinitH -

ENrunH – ENnextH – EncloseH, para ejecutar el análisis hidráulico paso a paso y poder acceder a los resultados con las funciones ENget...

4. Equivalentemente, ejecutar un análisis de calidad completo, con ENSolveQ o con ENopenQ - ENinitQ – ENrunQ – ENnextQ – EncloseQ.
5. Repetir los pasos de 2 a 5 para análisis adicionales o reportar los resultados.
6. Utilizar la función ENclose para cerrar todos los archivos y liberar memoria.

Existe un documento de ayuda donde se explica cómo usar las distintas funciones de la “Toolkit” y presenta algunos ejemplos sencillos de programación.

4.3. EVOLVER

4.3.1. QUÉ ES Y CÓMO FUNCIONA EVOLVER

EVOLVER es un software desarrollado por Palisade Corporation² para la optimización. Mediante potentes técnicas de optimización basadas en algoritmos genéticos puede hallar soluciones óptimas a problemas complejos que resultan irresolubles con técnicas de optimización lineal y no lineal. EVOLVER encuentra la solución óptima, es decir, las mejores variables de entrada que generan el resultado deseado ([63]).

Lo más frecuente es utilizar EVOLVER como un programa complementario de la hoja de cálculo de Excel. El modelo del problema se crea en la hoja Excel y se utiliza EVOLVER para resolverlo.

Se parte de un modelo del problema lo más fiel posible a la realidad, sin simplificar en exceso las relaciones de causa y efecto entre las variables. La mayoría de los problemas tienen múltiples variables que interactúan según fórmulas y restricciones establecidas. Las funciones incorporadas a Excel, su capacidad para usar macros y su interfaz clara e intuitiva permiten crear el modelo de forma sencilla y analizar problemas complejos.

² Palisade Corporation. <http://www.palisade.com>

El modelo debe ser capaz de alojar una serie de valores de entrada (celdas ajustables) y producir un valor numérico que refleje cómo de bien esos valores resuelven el problema (valor de la función objetivo). Dichos valores de entrada son los valores de las variables de decisión. Se debe prestar especial atención a la definición de la función objetivo ya que EVOLVER hará todo lo posible por maximizar (o minimizar) el valor de la celda objetivo.

EVOLVER utiliza un sistema de algoritmos genéticos para buscar la solución óptima a un problema. Los algoritmos genéticos imitan los principios darwinianos de selección natural mediante la creación de un entorno en el que cientos de posibles soluciones a un problema compiten unas con otras, y sólo la “mejor adaptada” sobrevive. Como sucede en la evolución biológica, cada solución puede transmitir sus mejores “genes” a través de soluciones “descendientes”. Estos nuevos miembros de la población se crean a partir de los actuales utilizando los operadores genéticos. Dos de los operadores son el cruce y la mutación. El operador de cruce determina cómo intercambian genes los pares de miembros de una población para producir “descendientes” que puedan ser mejores respuestas que cualquiera de sus “padres”. El operador de mutación determina si se producirán cambios aleatorios de “genes” (variables) y cómo se producirán.

EVOLVER contiene 6 posibles métodos de resolución, cada uno de los cuales baraja los valores de las variables de decisión de una forma diferente. Cada método es, en esencia, un algoritmo genético diferente con sus propias rutinas de selección, cruce y mutación ([63]):

- Método de receta: se utiliza cuando las variables a ajustar puedan variar independientemente unas de las otras. EVOLVER genera números para esas variables en busca de la mejor combinación siendo la única restricción el que deben estar dentro de su rango, entre su valor más alto y el más bajo. Según se especifique, EVOLVER puede tratar esos números como enteros, como valores independientes con un tamaño de paso ó como números reales.
- Método de orden: se utiliza para encontrar la mejor forma de organizar un grupo de valores ya definidos para las variables en el modelo. En este método, se barajan los valores existentes obteniendo diferentes escenarios. Puesto que no se calculan

valores nuevos, no es necesario indicar ningún rango de mínimo y máximo para cada variable.

- Método de agrupamiento: se utiliza cuando el problema incluye múltiples variables que se deben reunir en grupos. El número de grupos diferentes que crea EVOLVER es igual al número de valores distintos presentes en las celdas ajustables (variables de decisión) antes de iniciar la optimización, por lo que cada grupo debe estar representado por al menos una de las celdas ajustables. Como en el método anterior, EVOLVER no calcula valores nuevos, sólo reorganiza los existentes, por lo que tampoco es necesario indicar ningún rango de mínimo y máximo para cada variable.
- Método de presupuesto: igual que el “Método de receta” pero con todos los valores de las variables totalizando una cantidad determinada (presupuesto).
- Método de proyecto: se utiliza en la administración de proyectos para reorganizar el orden en que se deben realizar una serie de tareas, cumpliendo siempre las restricciones de orden precedente. Después de indicar en el modelo el rango de celdas ajustables, es necesario especificar qué tareas deben ir precedidas de qué otras.
- Método de calendarización: similar al “Método de agrupamiento”, donde el objetivo es asignar una serie de tareas en el tiempo.

4.3.2. LA CELDA OBJETIVO

La celda objetivo contiene el valor resultado del modelo. Se genera un valor en esta celda por cada solución potencial probada por el AG de EVOLVER, es decir, por cada combinación de posibles valores de las celdas ajustables (variables de decisión). El valor de la celda objetivo permite a EVOLVER evaluar la idoneidad de cada solución planteada y medir con precisión su progreso en la búsqueda ([63]).

La celda objetivo debe contener una fórmula que dependa directa o indirectamente (a través de una serie de cálculos) de las celdas ajustables. Esta fórmula se puede crear con fórmulas estándar de Excel o con funciones de macro VBA definidas por el usuario, opción que permite a EVOLVER evaluar modelos más complejos.

La respuesta que debe buscar EVOLVER se determina con la meta de optimización. Si se selecciona mínimo, EVOLVER buscará valores para las variables de decisión que generen el menor valor posible en la celda objetivo. Si se selecciona máximo, EVOLVER buscará valores que resulten en el mayor valor posible en la celda objetivo. Si se selecciona valor objetivo, EVOLVER buscará valores que generen un valor en la celda objetivo lo más cercano posible a un valor especificado y, una vez encontrado, la búsqueda se detendrá automáticamente ([63]).

4.3.3. LAS RESTRICCIONES Y LA FUNCIÓN DE PENALIZACIÓN

En EVOLVER se pueden especificar dos tipos de restricciones, duras y blandas. Las restricciones duras son condiciones que deben cumplirse ineludiblemente para que una solución sea válida y, de no cumplirse, la solución se descarta ([63]).

Si se fuerza al programa para que sólo busque soluciones que cumplan todas las restricciones, es posible que no se encuentre ninguna solución viable. Con frecuencia, es más útil tener al menos una solución viable aproximada aunque no se cumplan algunas de las restricciones. Una alternativa al uso de restricciones duras es reconfigurar el problema con restricciones que EVOLVER tratará de cumplir. Son las restricciones blandas.

Las restricciones blandas son condiciones que deberían cumplirse en la medida de lo posible pero, de no hacerlo, la solución puede admitirse si ello supone una gran mejora del resultado de la celda objetivo (valor de la función objetivo). Este tipo de restricciones es más realista y permite a EVOLVER explorar y probar muchas más opciones. Si el problema está muy restringido no serán muchas las soluciones que cumplan con todos los requisitos, de manera que el algoritmo genético de EVOLVER tendrá más posibilidades de encontrar la

mejor solución si se le permite obtener información sobre algunas soluciones “cercanas” a las que sí cumplan las restricciones.

En cuanto a la ejecución del algoritmo, EVOLVER resuelve más rápidamente el problema si las restricciones son blandas. Por otro lado, en un modelo con restricciones blandas frecuentemente se encuentra una solución muy buena que casi cumple con todas las restricciones, lo cual puede tener más valor que una solución no tan buena que cumple las restricciones duras.

Cuando no se cumple una restricción blanda se introduce un cambio en la celda objetivo que aleja al valor de la celda objetivo del valor óptimo. Esto puede hacerse de dos formas ([63]):

- Especificando una función de penalización en EVOLVER: EVOLVER tiene una función de penalización predeterminada que aparece cuando se introduce una restricción blanda. Sin embargo, cualquier fórmula de Excel válida se puede introducir para calcular la cantidad de la penalización. La función debe incluir la palabra clave “desviación” que representa la cantidad absoluta por la que la restricción ha superado su límite. Con cada recálculo, EVOLVER comprueba si se han cumplido las restricciones blandas. Si alguna restricción no se cumple, coloca la cantidad de la desviación en la fórmula de la penalización y calcula la cantidad de la penalización a aplicar a la estadística de la celda objetivo. Esta cantidad se suma o se resta del valor de la celda objetivo para que resulte menos óptima, esto es, si se busca obtener un máximo se restará el valor de la penalización al valor de la celda objetivo.
- Mediante fórmulas en la hoja de cálculo: añadiendo una función de penalización a la función de la celda objetivo.

4.3.4. MACROS A EJECUTAR DURANTE LA OPTIMIZACIÓN

La utilización de macros VBA permite el desarrollo de cálculos personalizados que se realizarán durante una optimización. Las macros VBA se pueden ejecutar en diferentes momentos de la optimización y simulación de cada solución potencial ([63]):

- Al inicio de la optimización, la macro se ejecuta inmediatamente después de iniciar la optimización y antes de que se genere la primera solución de prueba.
- Antes del recálculo de cada prueba, la macro se ejecuta antes de que se realice el recálculo de cada prueba.
- Después del recálculo de cada prueba, la macro se ejecuta después de que se realice el recálculo de cada prueba.
- Después de almacenar la variable de salida, la macro se ejecuta después de cada prueba ejecutada y después de que se almacene el valor de la celda objetivo en el generador de optimización. En consecuencia, cualquier cambio realizado en los valores de la celda no tendrán ningún efecto en la información que se transmite al generador de optimización en esa prueba. Este macro se puede usar para actualizar el progreso de la optimización para el usuario (o para registrar el progreso de la optimización).
- Al final de la optimización, la macro se ejecuta cuando se completa la optimización.

Esta función permite que se lleven a cabo cálculos que sólo se pueden realizar con una macro durante una optimización, como por ejemplo los cálculos de operaciones repetitivas y los cálculos que requieren nuevos datos de fuentes externas.

4.3.5. SELECCIÓN, CRUCE Y MUTACIÓN EN EVOLVER

En primer paso para la ejecución del AG es definir el tamaño de la población, que es el parámetro que le indica a EVOLVER cuántos organismos (o grupos completos de variables) deben almacenarse en memoria en cada momento ([63]).

Uno de los problemas más difíciles en la búsqueda de soluciones óptimas, cuando el problema tiene aparentemente infinitas posibilidades, es determinar dónde concentrar el esfuerzo, es decir, cuánto tiempo se debe dedicar a buscar en nuevas áreas del espacio de soluciones y cuánto tiempo se debe dedicar a afinar aquellas soluciones que han demostrado ser bastante buenas. Gran parte del éxito del AG se atribuye a su capacidad de conservar de forma natural este equilibrio. La estructura del AG permite que las buenas soluciones se reproduzcan mientras conserva los organismos menos adaptados para mantener la diversidad, en espera de que un gen latente resulte importante para la solución final.

Los dos parámetros que influyen en el alcance de la búsqueda son el cruce y la mutación. EVOLVER permite al usuario cambiar estos parámetros antes y durante el proceso de evolución de manera que un usuario experto pueda dirigir el AG hacia dónde debe concentrar sus esfuerzos.

Para crear un nuevo organismo se deben seleccionar dos padres de entre la población actual. En EVOLVER los padres se seleccionan mediante un mecanismo basado en la clasificación o ranking. A diferencia de otros sistemas de AG en los que las posibilidades de selección de los padres para la reproducción son directamente proporcionales a su valor de función objetivo o fitness, el método por ranking que utiliza EVOLVER ofrece una curva de probabilidad de selección más uniforme, ya que tiene en cuenta el orden en el ranking, impidiendo que los organismos buenos dominen completamente la evolución desde el principio.

EVOLVER ofrece unas configuraciones predeterminadas de cruce y mutación (0,5 y 0,1 respectivamente) que no necesitan ajuste.

La tasa de cruce refleja la probabilidad de que futuros escenarios u organismos contengan una mezcla de información de la generación previa de organismos originales. La tasa de cruce se puede ajustar entre 0,01 y 1,0 permitiendo al usuario modificarla para afinar el funcionamiento de EVOLVER en problemas complejos, incluso cuando EVOLVER ya ha comenzado a resolver el problema. Un valor de 0,5 significa que un organismo descendiente

contiene aproximadamente el 50% de sus valores de variable (genes) de un padre y el resto del otro padre. Un valor de 0,9 significa que aproximadamente el 90% de los genes de un organismo descendiente provienen del primer padre y el 10% restante del segundo. Una tasa de cruce de 1 significa que no se producirá ningún cruce y sólo se evaluarán los clones de los padres ([63]).

EVOLVER emplea una rutina de cruce diferente para cada tipo de problema. En el método de solución de receta básico realiza cruces usando una rutina de cruce uniforme. Lo habitual es dividir a los padres en dos bloques a partir de un punto aleatorio (si es un cruce por “un solo punto”) y recombinar un bloque de cada uno para formar dos descendientes. En la rutina de cruce uniforme se seleccionan aleatoriamente genes o valores de variable de un padre para formar un primer bloque que se recombinará con un segundo bloque formado con los genes complementarios en el otro padre.

La tasa de mutación refleja la probabilidad de que futuros escenarios contengan algunos valores aleatorios. Se puede ajustar entre 0,0 y 1,0. Una tasa de mutación más alta significa que se introducirán más mutaciones o valores de variable (genes) aleatorios en la población. Como la mutación sucede después del cruce, una tasa de mutación de 1,0 (100% de valores aleatorios) impediría que el cruce tuviera efecto ya que EVOLVER generaría escenarios totalmente aleatorios. Si todos los datos de la solución óptima se encontraran en la población, bastaría con el operador de cruce para generar la solución ([63]).

Sin embargo, la mutación es necesaria para mantener una población diversa de organismos individuales, evitando así que la población sea demasiado rígida e incapaz de adaptarse a un entorno dinámico. Como en la biología, muchas veces son las mutaciones genéticas en los animales lo que finalmente lleva al desarrollo de nuevas funciones vitales.

En la mayoría de los casos, la configuración predeterminada de la tasa de mutación puede resultar adecuada para resolver el problema y no necesitar ajuste. No obstante, puede ser modificada por usuarios expertos para afinar el funcionamiento de EVOLVER en problemas complejos. Es posible que el usuario quiera potenciar la tasa de mutación si la población es bastante homogénea y no se han encontrado nuevas soluciones en los últimos cientos de

pruebas. Los cambios típicos de configuración van de 0,06 a 0,2 y pueden realizarse incluso cuando EVOLVER ha comenzado a solucionar el problema.

La opción de tasa de mutación automática permite a EVOLVER aumentar dicha tasa cuando un organismo "envejece" significativamente, es decir, cuando ha permanecido invariable durante un gran número de pruebas. En muchos modelos, especialmente cuando se desconoce la tasa de mutación adecuada, la opción de tasa automática puede generar mejores resultados y más rápidamente.

Como sucede con el cruce, el método de mutación es diferente para cada método de solución. El método de solución de receta básico realiza mutaciones examinando cada variable individualmente. Para cada una de las variables del organismo (genes) se genera un número aleatorio entre 0 y 1 y si éste es menor o igual que la tasa de mutación entonces esa variable (gen) se muta. La mutación de una variable incluye su reemplazo por un valor generado aleatoriamente dentro de su rango de mínimo-máximo válido.

Obtenido un nuevo organismo, este debe ser introducido en la población. Para ello EVOLVER utiliza un método de estado uniforme y no el de reemplazo generacional. Esto significa que cada vez se reemplaza un solo organismo, en lugar de reemplazar una generación completa.

Algunos autores consideran que reemplazar toda una generación de soluciones por una nueva generación podría llevar a perder las buenas soluciones de la primera, con un buen valor de la función objetivo. Al reemplazar cada vez la peor solución de la generación antigua por la mejor solución de la nueva se asegura que las mejores soluciones (cromosomas) de la antigua generación perduren en la nueva, manteniendo una estrategia elitista ([01]).

4.3.6. PROBLEMAS DE MÚLTIPLES OBJETIVOS

En EVOLVER se pueden resolver problemas con múltiples objetivos mediante la creación de una función que combine los distintos objetivos en uno solo, que se deberá especificar en la única celda para el campo de celda objetivo ([63]).

CAPÍTULO 05. EL PROBLEMA DE ESTUDIO. DESCRIPCIÓN Y CRITERIOS DE DISEÑO

5.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El crecimiento de población experimentado por una determinada ciudad ha conducido a una mayor demanda de agua y a la ampliación de la red de distribución para dar servicio a una nueva zona residencial (nodos N1 a N10). El gestor del servicio de la distribución del agua dispone de un modelo hidráulico calibrado de la red para evaluar su estado actual y su comportamiento en un futuro, estimadas las demandas para un determinado año horizonte.

La red está compuesta por un total de 469 líneas, de las cuales 11 son bombas y 6 son válvulas. Las tuberías permiten la conexión de la fuente (Source) con los 406 nudos de la red, de los que 7 son depósitos (T1 a T7). Un total de 348 nudos tienen un consumo aplicado, según 5 patrones de demanda (DMA1_pat a DMA5_pat).

El modelo de la red en formato .INP para su tratamiento en EPANET es el siguiente:

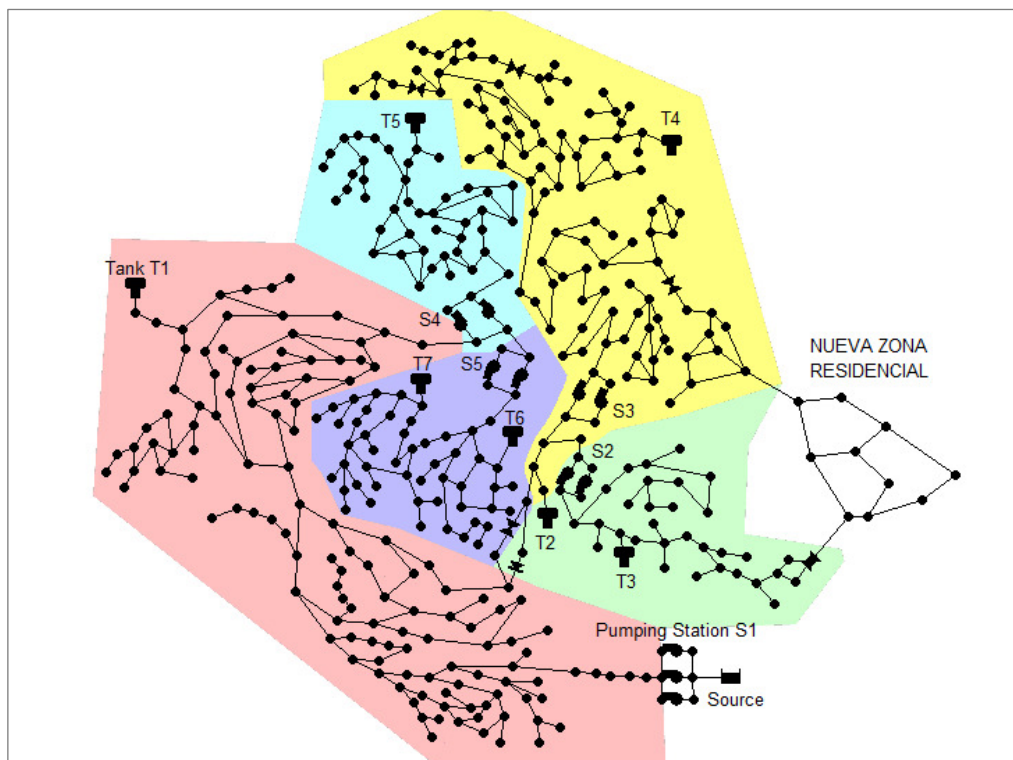
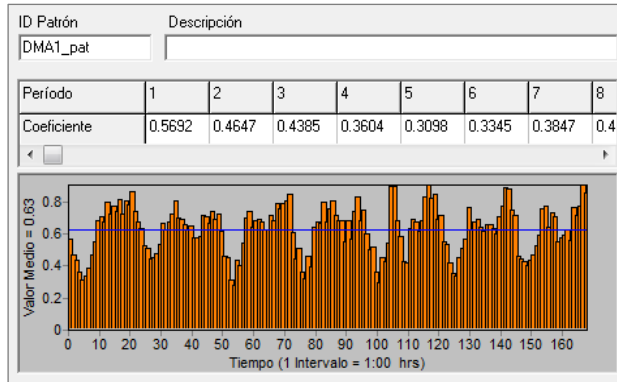
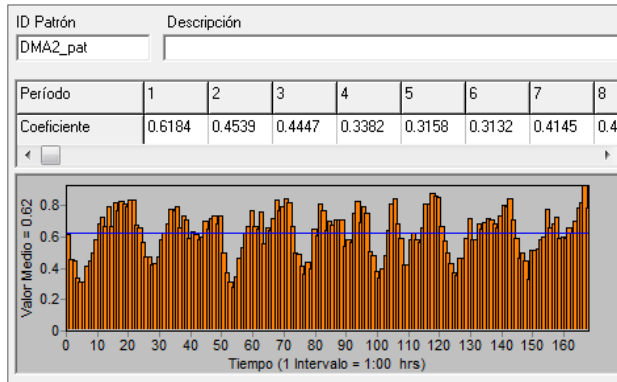


Fig.2. Modelo calibrado de la red y distribución de las demandas de consumo

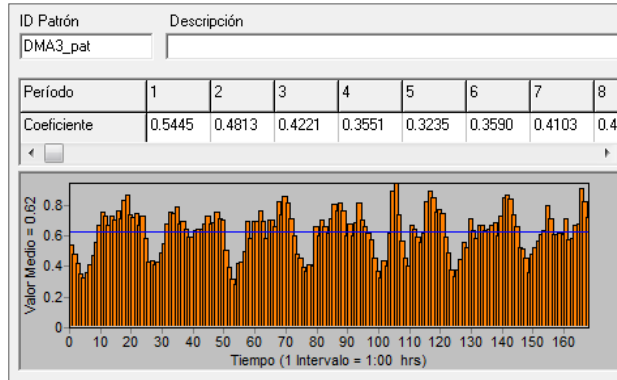
Zona estación S1 – depósito T1



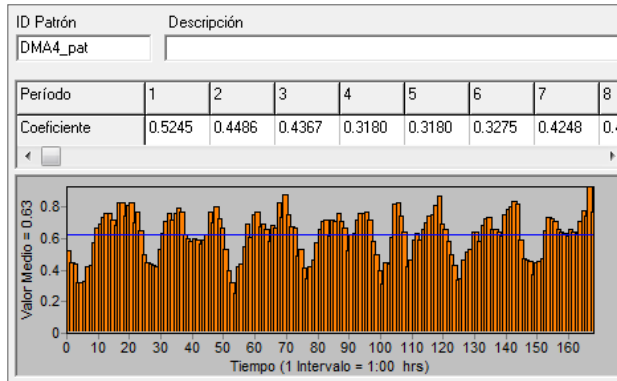
Zona estación S3 – depósito T4



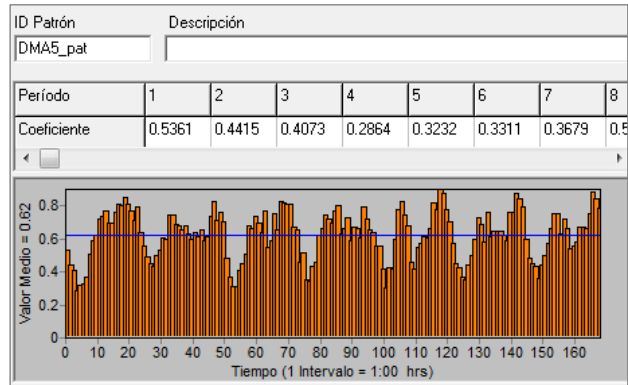
Zona estación S2 – depósito T3



Zona estación S5 – depósitos T6 y T7



Zona estación S4 – depósito T5



Todas las estaciones de bombeo, salvo la S1, están equipadas con dos bombas en paralelo de idéntica curva característica. Básicamente son estaciones de rebombeo que permiten aportar la presión necesaria a las zonas de la red que se encuentran alejadas de la captación. De esta forma la estación de rebombeo sólo impulsa el caudal demandado por la zona en la que se ubica, lo que supone un ahorro energético importante respecto a la alternativa de bombear desde la estación de bombeo principal, la S1, con una altura mayor. La estación S1 es la que alimenta toda la red desde la fuente y alberga tres bombas.

El rendimiento de todas las bombas se asume constante del 65%. La distribución de las bombas en la red y sus curvas características altura-caudal a velocidad nominal son las siguientes:

Estación S1: 3 bombas (PU01, PU02, PU03) de curva H-Q tipo 8

Estación S2: 2 bombas (PU04, PU05) de curva H-Q tipo 9

Estación S3: 2 bombas (PU06, PU07) de curva H-Q tipo 10

Estación S4: 2 bombas (PU08, PU09) de curva H-Q tipo 9

Estación S5: 2 bombas (PU10, PU11) de curva H-Q tipo 11

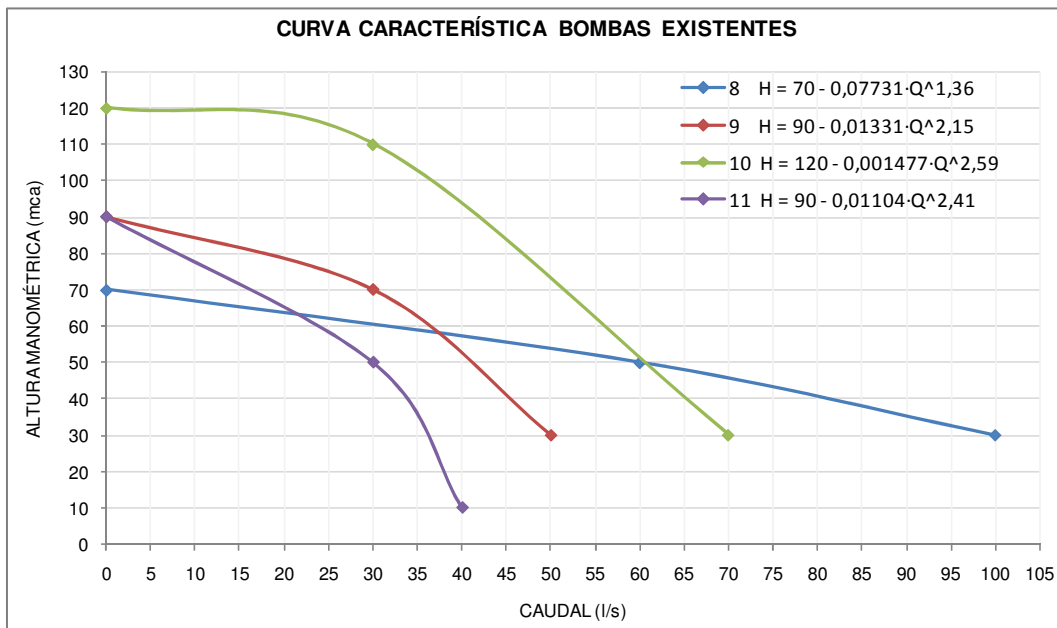


Fig.3. Curvas características H-Q de las bombas presentes en la red original

Existe también una serie de controles simples basados en niveles umbral de depósito que gobiernan la operación de las bombas. Según estos controles, cuando en el depósito se alcanza el nivel umbral superior la bomba controlada para (0) y cuando desciende por debajo del nivel umbral inferior la bomba controlada arranca (1). Los controles de la red original son:

LINK PU01 1.0000 IF NODE T1 BELOW 4.0000
 LINK PU01 0.0000 IF NODE T1 ABOVE 6.3000
 LINK PU02 1.0000 IF NODE T1 BELOW 1.0000
 LINK PU02 0.0000 IF NODE T1 ABOVE 4.5000
 LINK PU03 1.0000 IF NODE T1 BELOW 0.5000
 LINK PU03 0.0000 IF NODE T1 ABOVE 2.5000
 LINK PU04 1.0000 IF NODE T3 BELOW 3.0000
 LINK PU04 0.0000 IF NODE T3 ABOVE 5.3000
 LINK PU05 1.0000 IF NODE T3 BELOW 1.0000
 LINK PU05 0.0000 IF NODE T3 ABOVE 3.5000

LINK PU06 1.0000 IF NODE T4 BELOW 2.0000
 LINK PU06 0.0000 IF NODE T4 ABOVE 3.5000
 LINK PU07 1.0000 IF NODE T4 BELOW 3.0000
 LINK PU07 0.0000 IF NODE T4 ABOVE 4.5000
 LINK PU08 1.0000 IF NODE T5 BELOW 1.5000
 LINK PU08 0.0000 IF NODE T5 ABOVE 4.5000
 LINK PU09 1.0000 IF NODE T5 BELOW 0.5000
 LINK PU09 0.0000 IF NODE T5 ABOVE 3.0000
 LINK PU10 1.0000 IF NODE T7 BELOW 2.5000
 LINK PU10 0.0000 IF NODE T7 ABOVE 4.8000
 LINK PU11 1.0000 IF NODE T7 BELOW 1.0000
 LINK PU11 0.0000 IF NODE T7 ABOVE 3.0000

En cuanto a los depósitos, existen uno o dos por cada sector, situados generalmente en un extremo de la red. Los depósitos aumentan la capacidad del sistema y aportan estabilidad a la red tanto en presiones como en suministro. Los depósitos T2 y T3 podría decirse que están en un punto intermedio, siendo su principal finalidad regular la presión en los momentos de mayor consumo.

Todos los depósitos están conectados a la red a través de una sola tubería con funciones de entrada y salida. Como se ha visto, el nivel en algunos depósitos controla el arranque y parada de los bombeos de su mismo sector. Una estrategia de operación alternativa podría ser programar los bombeos según la hora del día, bien haciendo que se bombee durante las horas valle de la tarifa eléctrica o bien a lo largo de las 24 horas del día. Bombear en las horas valle repercute notablemente en el coste energético y en el volumen de diseño del depósito. Así, si el bombeo se programa para que funcione exclusivamente en las horas valle se requerirá un volumen de depósito mayor ya que será necesario atender los caudales demandados mientras no funcionan los bombeos. Si por el contrario el bombeo funciona durante todo el día el depósito puede ser de un volumen menor ya que su función entonces es asegurar que en los puntos de la red se alcanza una presión adecuada.

Las características físicas que definen a los depósitos son su cota, diámetro y altura. Los niveles máximo y mínimo acotan su rango de funcionamiento. Las características de los siete depósitos de la red original son:

DEPÓSITO	COTA (m)	DIÁMETRO (m)	ALTURA (m)	NIVEL MÍNIMO (m)	NIVEL MÁXIMO (m)
T1	71,50	31,30	6,50	0,00	6,50
T2	65,00	20,78	5,90	0,00	5,90
T3	112,90	13,73	6,75	0,00	6,75
T4	132,50	11,64	4,70	0,00	4,70
T5	105,80	11,89	4,50	0,00	4,50
T6	101,50	8,33	5,50	0,00	5,50
T7	102,00	7,14	5,00	0,00	5,00

Tabla 1. Características de diseño y operación de los depósitos en la red original

Las válvulas son también un mecanismo para regular el funcionamiento del sistema. Permiten controlar bien la presión bien el caudal en puntos específicos de la red a base de introducir pérdidas de carga de forma localizada. De las seis válvulas instaladas, 4 son reductoras de presión (v1, V45, V47 y N15), 1 es de regulación (V2) y otra es una válvula de retención (línea P446).

Las válvulas reductoras de presión limitan la presión en los nudos situados aguas abajo de su punto de instalación según el valor de una presión de tarado o consigna que define su punto de operación. Al modelarla en EPANET, se pueden distinguir tres posibles estados de funcionamiento:

- Activa (estado “Ninguno”): mantiene la presión en los nudos aguas abajo por debajo de la presión de tarado. Cuando la presión aguas arriba es superior a la presión de tarado la válvula cierra parcialmente introduciendo la pérdida de carga necesaria para que aguas abajo la presión sea igual o inferior a la presión de tarado.
- Totalmente abierta (estado “Abierta”): así permanece la válvula cuando la presión aguas arriba está por debajo de la presión de tarado. En este caso no tiene sentido introducir ninguna pérdida de carga puesto que la presión en los nudos aguas arriba ya es inferior a presión de tarado y, hacia aguas abajo, la presión disminuirá por efecto de las pérdidas por fricción.
- Cerrada (estado “Cerrada”): la válvula puede cerrar bien porque la presión aguas abajo de la válvula es mayor que la presión aguas arriba e impedir el flujo inverso, bien porque no es capaz de introducir una pérdida de carga suficiente para mantener la presión aguas abajo en un valor igual o inferior a la presión de tarado.

Una válvula de regulación simula una válvula parcialmente cerrada que introduce una pérdida de carga localizada proporcional a un valor del coeficiente de pérdidas menores dado por el fabricante. Este coeficiente de pérdidas menores es un parámetro adimensional cuyo valor varía con el grado de cierre de la válvula y que afecta al término de la energía por velocidad $v^2/2g$.

Tanto el estado de una válvula como su consigna se pueden modificar durante la simulación introduciendo controles. En la red original, sólo existen controles sobre la válvula de regulación V2:

```
LINK V2 open IF NODE T2 BELOW 0.5000
LINK V2 closed IF NODE T2 ABOVE 5.5000
```

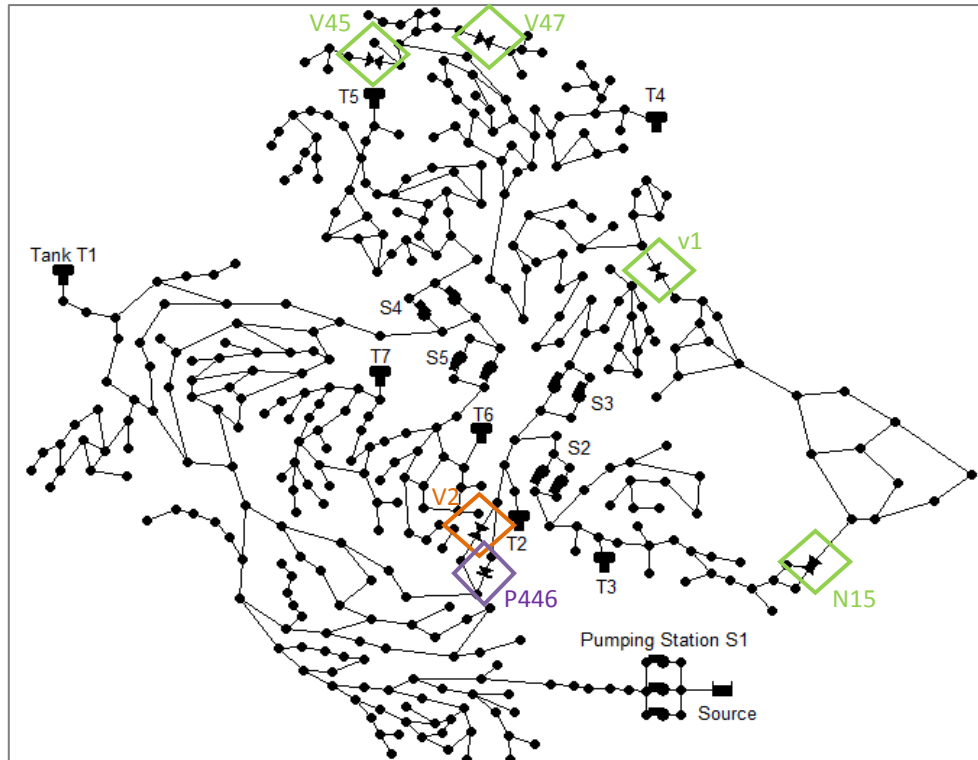


Fig.4. Localización de las válvulas en la red

La actual infraestructura, dados los diámetros de las tuberías, la configuración de las estaciones de bombeo y depósitos y los controles de funcionamiento establecidos para bombas y válvulas no será capaz de atender las demandas previstas para el año horizonte puesto que la presión resulta insuficiente en algunos puntos.

Por esta razón, para que el suministro se produzca con un nivel de servicio adecuado, el gestor considera necesario llevar a cabo una actualización de la red, siendo un objetivo principal que sean mínimos los costes de capital y de operación del sistema.

Por otra parte, por política medioambiental, se prevé será introducida una nueva tasa o impuesto que grave las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera,

concretamente de CO₂, por lo que el gestor también está interesado en reducir tales emisiones y ahorrar así en el pago de más impuestos.

Del modelo actual se sabe, además, que el agua permanece largo tiempo en algunos puntos de la red antes de llegar a los usuarios, empeorando su calidad, lo que podría derivar en problemas de salud pública. Es por ello que con las mejoras que se introduzcan en la red se pretende conseguir, como objetivo adicional, disminuir el tiempo de permanencia del agua en la misma.

5.2. CONDICIONES PARA EL DISEÑO ÓPTIMO

5.2.1. SOBRE LOS COSTES

El diseño óptimo de la red será aquel que, como cuestión principal, minimice su coste total, esto es, que minimice la suma de los costes de operación y de capital. Los costes de operación se deben exclusivamente al consumo de energía necesario para las operaciones de bombeo mientras que los costes de capital abarcan la fabricación e instalación de tuberías, válvulas y depósitos y cualquier actualización o mejora en las estaciones de bombeo. Las expresiones que recogerían estos costes son:

$$C_{\text{OPERACIÓN}} (\$) = \sum_{t=1}^{\text{horas}} \text{pkwh} \cdot \left(\sum_{b=1}^{\text{bombas}} \frac{\gamma \cdot Q_{b,t} \cdot H_{b,t}}{\eta_b} \right) \quad [\text{EC.6}]$$

$$C_{\text{CAPITAL}} (\$) = \sum_{j=1}^{\text{tuberías}} C_j \cdot L_j + \sum_{b=1}^{\text{bombas}} C_b + \sum_{v=1}^{\text{válvulas}} C_v + \sum_{d=1}^{\text{depósitos}} C_d \quad [\text{EC.7}]$$

Donde:

- i, b, v, d: contador de tuberías, bombas, válvulas y depósitos, respectivamente.
- t: intervalo de cálculo. Se toma cada hora del período extendido (168 horas).
- γ : peso específico del agua (9,81 KN/m³).
- $Q_{b,t}$: caudal bombeado por la bomba b en la hora t, en m³/s.

$H_{b,t}$:	altura aportada por el bombeo b en la hora t, en m.
H_b :	rendimiento global de la bomba b (adimensional).
pkwh:	precio del kw por cada hora, según la tarifa eléctrica, en \$/kwh.
C_j :	coste unitario de la tubería j, en \$/m.
L_j :	longitud de la tubería j, en m.
C_b, C_v, C_d :	coste unitario de bombas, válvulas y depósitos, en \$/ud, respectivamente.

Los costes de capital suponen la inversión necesaria para la ejecución y puesta en servicio de las obras y, a priori, constituyen un pago único al inicio del proyecto. Los costes de operación, sin embargo, puesto que son consecuencia del funcionamiento del sistema, se producen a lo largo de toda la vida del proyecto, contabilizándose y abonándose periódicamente.

Para poder comparar los costes de capital y de operación, por ejemplo en orden de magnitud, es necesario referirlos a una misma base temporal, que normalmente es un año. Esto es especialmente importante durante la fase de diseño, cuando se deben hacer comparaciones realistas entre los costes implicados en cada una de las alternativas de diseño que se barajan ([43]).

La distribución de la inversión inicial en cantidades anuales requiere utilizar un factor de amortización (a_t), el cual tiene en cuenta la vida del proyecto y una tasa de interés de la amortización. De esta forma, la inversión de un capital inicial C representa una carga anual $C \cdot a_t$ de amortización.

Teniendo en cuenta lo anterior, como dato para el diseño óptimo de la red el gestor facilita el coste anual de los posibles nuevos componentes.

Obtener el montante anual de los costes de operación es más sencillo. Se obtiene a partir del coste de operación semanal, calculado como el producto de la potencia eléctrica consumida por hora (kwh) y el precio de la energía según la tarifa eléctrica (\$/kwh), según la siguiente expresión:

$$\text{Coste operación semanal (\$)} = \sum_{t=1}^{\text{horas}} \text{pkwh} \cdot \left(\sum_{b=1}^{\text{bombas}} \frac{\gamma \cdot Q_{b,t} \cdot H_{b,t}}{\eta_b} \right) \quad [\text{EC.8}]$$

El coste de operación anual se obtiene multiplicando el coste de operación semanal por el número de semanas del año (52) y dividiendo por un factor de día punta (de valor 1,3) para tener en cuenta la variabilidad de la demanda a lo largo del año.

5.2.2. SOBRE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Por cuestiones de política medioambiental se prevé que las autoridades competentes introduzcan una nueva tasa que grave las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, en particular las emisiones de CO₂.

Ante esta perspectiva, y puesto que se va abordar un nuevo diseño de la red, además de minimizar los costes de inversión y de operación, se pretende que el nuevo diseño incorpore estas consideraciones de carácter medioambiental y permita reducir al máximo posible las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que conllevará un menor desembolso en impuestos.

El gestor de la red considera que estas emisiones pueden proceder de dos fuentes, bien del consumo de energía necesario para fabricar, transportar e instalar tuberías, depósitos y bombas, bien del funcionamiento de los bombeos, ya que la energía consumida por estos proviene de fuentes de combustibles fósiles. Las primeras son las emisiones derivadas del capital y las segundas de la operación.

El objetivo es reducir el total anual de las emisiones, esto es, la suma de las emisiones anuales debidas al capital (materiales, transportes y construcción) y las emisiones anuales debidas a la operación de la red (bombeos).

$$\text{Total anual emisiones(kg CO}_2 \text{ e/año)} = \text{Emisiones anuales capital(kg CO}_2 \text{ e/año)} \\ + \text{Emisiones anuales operación (kg CO}_2 \text{ e/año)}$$

Las emisiones anuales de capital se consideran debidas exclusivamente a las nuevas tuberías (no se tiene en cuenta el CO₂ emitido con la fabricación de bombas y depósitos). Las emisiones anuales de CO₂ varían con el diámetro de la tubería expresándose en términos de kg de CO₂ equivalente a la fabricación de un metro de tubería:

DIÁMETRO (mm)	EMISIÓN ANUAL EQUIVALENTE (kg CO ₂ -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

Tabla 2. Emisiones anuales equivalentes según diámetro de tubería

Las emisiones anuales de operación se obtienen multiplicando el consumo anual de energía del sistema por un factor de emisión que traduce la energía consumida a términos de CO₂ equivalente, de valor 1,04 kg CO₂-e/kWh. Aunque se asume un valor constante, en realidad el factor de emisión varía con la zona geográfica, la época del año, la hora del día, las fuentes utilizadas en la generación de energía y la participación en estas fuentes de energías renovables.

5.2.3. SOBRE LA EDAD DEL AGUA

La edad del agua es el tiempo que una porción de agua se encuentra en la red. Este concepto tiene en cuenta el tiempo que el agua permanece en los depósitos y el tiempo de viaje entre

dos nudos ([18]). El agua nueva que entra en la red a través de nudos fuente lo hace con una edad de cero. El agua se mueve a través del sistema de tuberías, se separa en porciones y se mezcla junto con otras porciones de diferente edad en las conexiones de las tuberías y en los almacenamientos.

El valor de la edad del agua está íntimamente relacionado con los parámetros de diseño como el diámetro de las tuberías o el volumen de los depósitos. Una red sobredimensionada puede tener efectos adversos sobre la edad del agua debido a las bajas velocidades en tuberías de grandes diámetros y a la menor renovación en depósitos de gran volumen. La edad del agua es una medida representativa de la calidad del agua y una mayor edad o, equivalentemente, un mayor tiempo de residencia del agua en la red, serían un claro indicador del deterioro de dicha calidad.

Cuando se simula la red en EPANET, el programa internamente trata la edad del agua como un reactivo constitutivo que crece de forma lineal con una velocidad constante igual a 1, esto es, con cada segundo que pasa el agua es un segundo más vieja.

El gestor del servicio considera que en algunos puntos de la red se miden valores demasiado altos de la edad del agua lo que podría ser un síntoma de insalubridad. Es por ello que otro de los objetivos que se persigue con el nuevo diseño es reducir la edad del agua al mínimo posible. Para valorar la reducción, introduce el parámetro *edad del agua en la red (WAnet)*, que se calcula mediante la siguiente expresión:

$$W_{Anet} = \frac{\sum_{i=1}^{\text{nudos}} \sum_{j=1}^{\text{horas}} k_{ij} \cdot Q_{dem\ i, j} \cdot WA_{i, j}}{\sum_{i=1}^{\text{nudos}} \sum_{j=1}^{\text{horas}} Q_{dem\ i, j}} \quad [EC.9]$$

Donde W_{Anet} : edad del agua en la red, en horas.

$WA_{i, j}$: edad del agua en el nudo i en la hora j , en horas.
(depósitos y embalses excluidos)

K_{ij} : variable que toma valor 1 si $WA_{ij} \geq WA_{th}$ ó 0 si $WA_{ij} < WA_{th}$.

WA_{th} : edad de agua umbral, fijada en 48 horas.

$Q_{dem\ i, j}$:	demanda en el nudo i en la hora j , en l/s.
i :	contador de nudo ($i=1\dots$ nudos).
nudos:	número de nudos en la red.
j :	contador de hora ($j=1\dots$ horas).
hora:	número de horas de la simulación en periodo extendido.

A la vista de la expresión anterior, en el cálculo de edad del agua de la red sólo se tienen en cuenta los nudos donde, localmente, se supera el umbral de 48 horas (k_{ij} toma valor 1) y donde existe un consumo aplicado, ya que el caudal consumido en cada nudo y en cada instante ($Q_{dem\ i, j}$) interviene tanto en el numerador como en el denominador, dando más peso a aquellos nudos con mayor demanda. El tiempo que el agua permanece en un depósito no se considera expresamente pero sí indirectamente a través de los nudos que son alimentados desde el depósito.

5.3. CONDICIONES DE NORMAL FUNCIONAMIENTO

Se considera que la red opera en condiciones de normal funcionamiento cuando no sobreviene ninguna circunstancia que pueda suponer un fallo en el suministro o una merma de la calidad del servicio.

La presión en la red es un buen indicador de la calidad de dicho servicio ya que, de ser insuficiente, no se podrá disponer de la cantidad de agua demandada en cada momento. A este respecto, el gestor de la red exige que el agua llegue a los nudos de consumo con “presión adecuada” y establece la presión mínima en 25 mca. En los nudos en que no hay aplicado ningún consumo bastará con que la presión esté por encima de cero.

Un requisito adicional es que al final de la simulación, de duración 168 horas (una semana), los depósitos tengan, como mínimo, el mismo volumen con el que comenzaron, siendo éste igual a la mitad del volumen máximo del depósito. En condiciones de normal funcionamiento los depósitos no pueden permanecer vacíos. En EPANET, el nivel en el depósito está forzado a permanecer entre los niveles mínimo y máximo. El volumen entre el fondo del depósito y

el nivel mínimo representa un nivel de reserva que sólo podría ser consumido en situaciones de fallo o emergencia, por ejemplo por un corte en el suministro eléctrico o en caso de incendio. En el modelo en EPANET, si durante la simulación se necesitara agua de un depósito que se encuentra a su nivel mínimo, el programa desconecta el depósito, es decir, cierra la salida y el depósito permanece a su nivel mínimo.

5.4. OPCIONES PARA EL DISEÑO

5.4.1. TUBERÍAS

El gestor de la red ofrece una gama comercial de posibles diámetros para las nuevas tuberías. Tras la optimización de la red, el nuevo diseño puede requerir la sustitución de algunas tuberías por otras de mayor diámetro. También cabe la posibilidad de aumentar la capacidad de un tramo instalando una nueva tubería en paralelo a la existente, lo que supone un coste adicional del 20% para la tubería del mismo diámetro. Los costes asociados a las tuberías son:

DIÁMETRO (mm)	NUEVA TUBERÍA REPLAZO (\$/m/año)	NUEVA 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

Tabla 3. Coste anual tuberías

En las tuberías nuevas, el coeficiente de rugosidad para la expresión de pérdidas de carga de Hazen-Williams es de 120 para todos los diámetros de tubería:

$$h = \frac{10,7 \cdot Q^{1,85} \cdot L}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \quad [\text{EC.10}]$$

- Donde h: pérdida de carga por fricción, en mca.
- Q: caudal circulante por la tubería, en m³/s.
- L: longitud de la tubería, en m.
- C: coeficiente de pérdidas (adimensional). Su valor depende del material y edad de la tubería.
- D: diámetro de la tubería, en m.

Ninguno de los tramos de tuberías existentes puede dejarse fuera de servicio, a excepción de una de las tuberías que conectan la nueva zona residencial con la red principal. Estas tuberías son la 1 y 2 del modelo en EPANET:

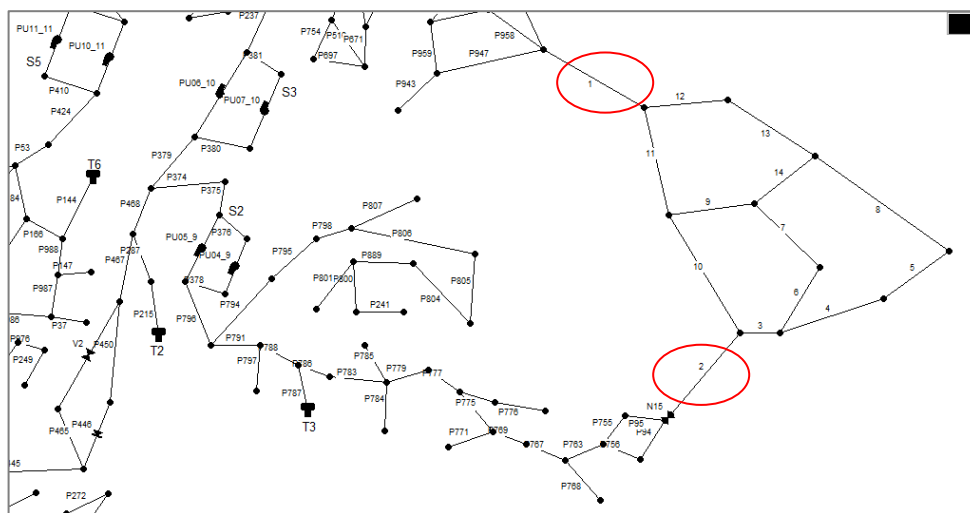


Fig. 5. Tuberías 1 y 2 de posible conexión de la nueva zona residencial

Las tuberías de la nueva zona residencial tienen un diámetro inicial de 102 mm. Todas ellas son nuevas por lo que tienen un coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams de 120.

5.4.2. DEPÓSITOS

Debido al aumento de la demanda, el gestor permite aumentar la capacidad del sistema añadiendo nuevos depósitos adyacentes a los existentes, donde dispone de terreno suficiente. Los nuevos depósitos serán cilíndricos y de alguno de los tamaños especificados,

no siendo posible la construcción de depósitos de tamaño no estándar ya que se consideran más caros. Los costes anuales que facilita el gestor, indicados a continuación, incluyen la conexión del depósito a la red:

VOLUMEN (m ³)	COSTE ANUAL (1.000 \$/año)
500	14,02
1.000	30,64
2.000	61,21
3.750	87,46
5.000	122,42
10.000	174,93

Tabla 4. Coste anual depósitos

Los nuevos depósitos deberán tener la misma cota y altura, evitando así añadir nuevas válvulas de control en el sistema. Pueden modelarse en EPANET aumentando el diámetro de los depósitos existentes de manera que el volumen final sea igual a la suma del volumen original más el volumen a ampliar con el nuevo depósito. También se puede cambiar el nivel mínimo del depósito, que de partida está puesto a cero.

5.4.3. BOMBAS

Las estaciones de bombeo pueden actualizarse reemplazando las actuales bombas por otras de mejores prestaciones o bien instalando nuevas bombas en paralelo. Sin embargo, no está permitido añadir nuevas estaciones dado que el gestor no dispone de ningún nuevo posible emplazamiento en la red para estos elementos.

La variedad de bombas disponible y sus características son:

MODELO	POTENCIA MÁXIMA (kW)	COSTE ANUAL (\$/año)	CURVA CARACTERÍSTICA H (m) Q (l/s)
8	45,24	4.133	$H = 70 - 0,07731 \cdot Q^{1,36}$
9	31,67	3.563	$H = 90 - 0,01331 \cdot Q^{2,15}$
10	49,76	4.339	$H = 120 - 0,001477 \cdot Q^{2,59}$
11	22,62	3.225	$H = 90 - 0,01104 \cdot Q^{2,41}$
8a	22,62	3.225	$H = 70 - 0,198 \cdot Q^{1,36}$

MODELO	POTENCIA MÁXIMA (kW)	COSTE ANUAL (\$/año)	CURVA CARACTERÍSTICA H (m) Q (l/s)
10a	24,88	3.307	$H = 120 - 0,008915 \cdot Q^{2,59}$
11a	11,31	2.850	$H = 90 - 0,05866 \cdot Q^{2,41}$
8b	54,28	4.554	$H = 84 - 0,09277 \cdot Q^{1,36}$
9b	38,00	3.820	$H = 108 - 0,01597 \cdot Q^{2,15}$
10b	59,71	4.823	$H = 144 - 0,001773 \cdot Q^{2,59}$

Tabla 5. Potencia, coste anual y curva H-Q de las posibles nuevas bombas

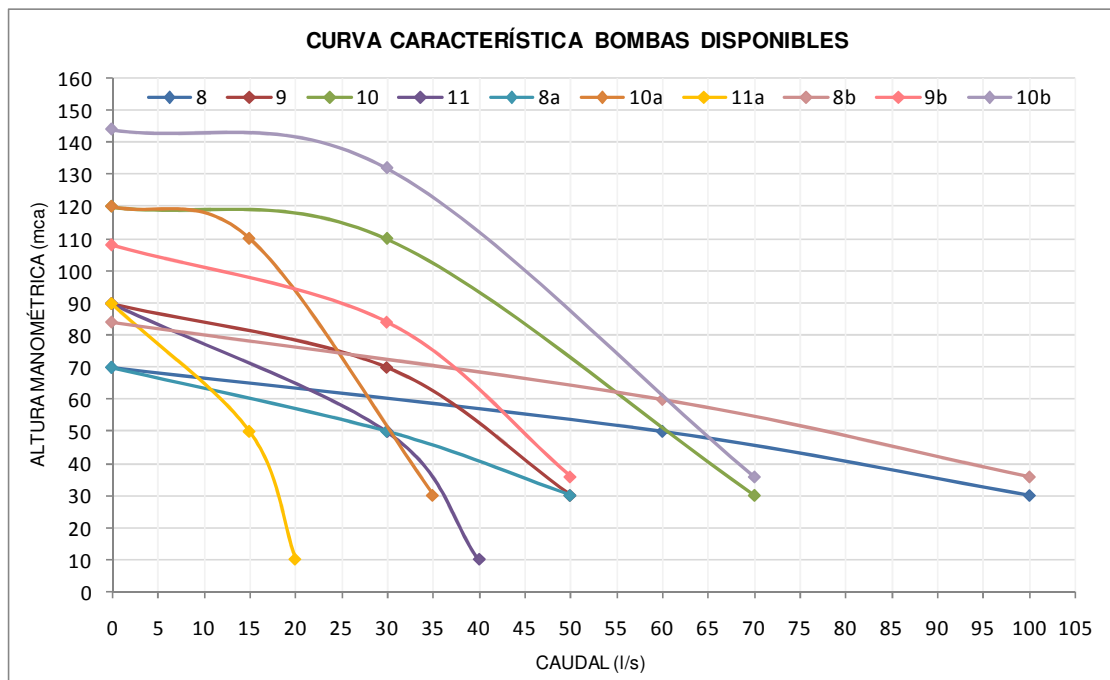


Fig. 6. Curvas características disponibles para nuevas bombas

Se asume una eficiencia constante para las bombas del 65% para las bombas existentes y del 75% para las bombas nuevas, cuando se estimen necesarias.

El funcionamiento de las bombas está regulado por una serie de controles simples. Estos controles pueden ser modificados en el proceso de optimización sin incurrir en costes adicionales, tanto a nivel de los valores de los parámetros como del tipo de control, pudiendo sustituir un control basado en un nivel umbral en depósito por uno basado en tiempo o viceversa.

5.4.4. VÁLVULAS

La red está equipada con seis válvulas, cuatro reductoras (V45, V47, v1 y N15), una de regulación (V2) y una válvula de retención (línea P446).

A excepción de la N15 (VRP), el gestor no considera instalar nuevas válvulas. De instalar la N15, iría colocada en la línea 2 que conecta la red con la nueva zona residencial siendo su coste de amortización anual función de su diámetro. Los costes de la válvula N15 facilitados por el gestor son:

DIÁMETRO (mm)	COSTE ANUAL (\$/año)
102	323
152	529
203	779
254	1.113
305	1.892
356	2.282
406	4.063
457	4.452
508	4.564
610	5.287
711	6.122
762	6.790

Tabla 6. Coste anual válvulas

En cuanto a las válvulas reductoras de presión, no puede dejarse ninguna fuera de servicio. Aunque todas deben mantenerse sí sería posible actuar sobre su punto de funcionamiento y modificar su consigna, que no podrá ser mayor de 60 mca, ya que esta operación no supone ningún coste. Modificada o no la consigna, el funcionamiento de las válvulas será constante durante todo el periodo de la simulación, sin depender del estado de ningún otro componente de la red.

5.4.5. LA TARIFA ELÉCTRICA

El precio de la energía eléctrica varía según la hora del día y según el día sea laborable, sábado o domingo. La distribución de precios en la tarifa eléctrica, con los precios en céntimos de dólar, es la siguiente:

HORA/DÍA	LUNES A VIERNES (0,01 \$/kWh)	SÁBADO (0,01 \$/kWh)	DOMINGO (0,01 \$/kWh)
0	6.72	6.72	6.72
1	6.72	6.72	6.72
2	6.72	6.72	6.72
3	6.72	6.72	6.72
4	6.72	6.72	6.72
5	6.72	6.72	6.72
6	6.72	6.72	6.72
7	10.94	10.94	6.72
8	10.94	10.94	6.72
9	10.94	10.94	6.72
10	27.68	10.94	6.72
11	27.68	10.94	6.72
12	27.68	10.94	6.72
13	27.68	10.94	6.72
14	27.68	10.94	6.72
15	27.68	10.94	6.72
16	27.68	10.94	6.72
17	10.94	10.94	10.94
18	10.94	10.94	10.94
19	10.94	10.94	10.94
20	10.94	6.72	10.94
21	6.72	6.72	6.72
22	6.72	6.72	6.72
23	6.72	6.72	6.72

Tabla 7. Tarifa eléctrica

CAPÍTULO 06. EL PROBLEMA DE ESTUDIO. OPTIMIZACIÓN.

6.1. ANÁLISIS DE LA RED

En la actual infraestructura, simulada en EPANET aplicando las demandas estimadas para el año horizonte y durante el periodo extendido de 168 horas (una semana), se advierten problemas de presión insuficiente (por debajo de la mínima) y negativas en algunos nudos, además de que algunos de los depósitos permanecen vacíos durante largos periodos de tiempo.

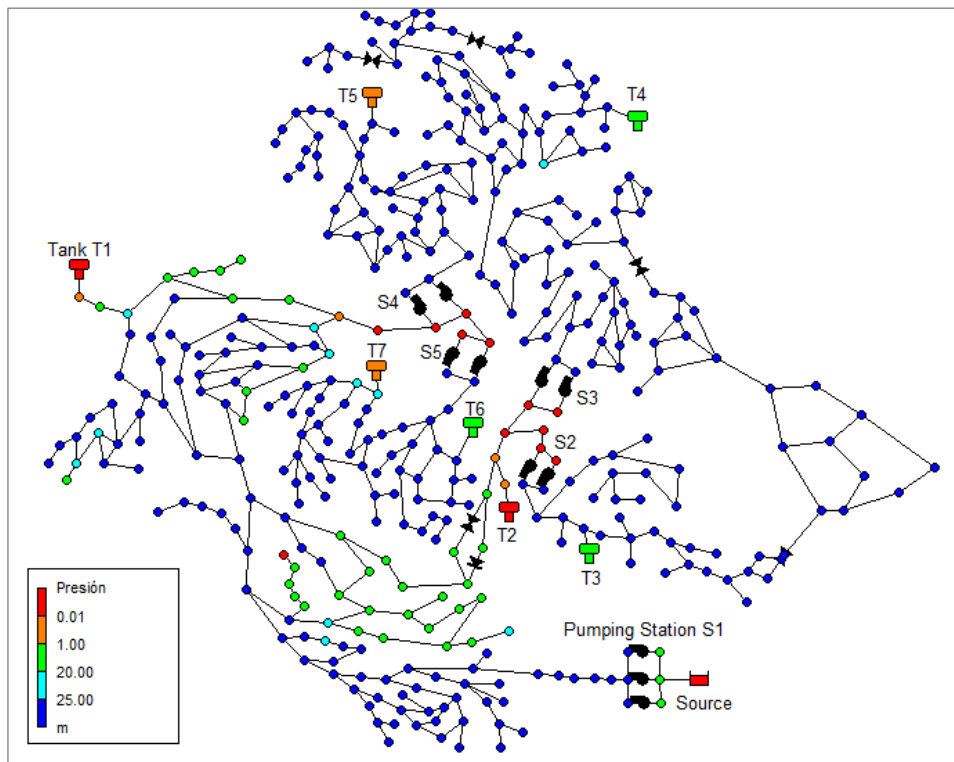


Fig. 7. Estado de presiones en la red en la hora 20 de la simulación.

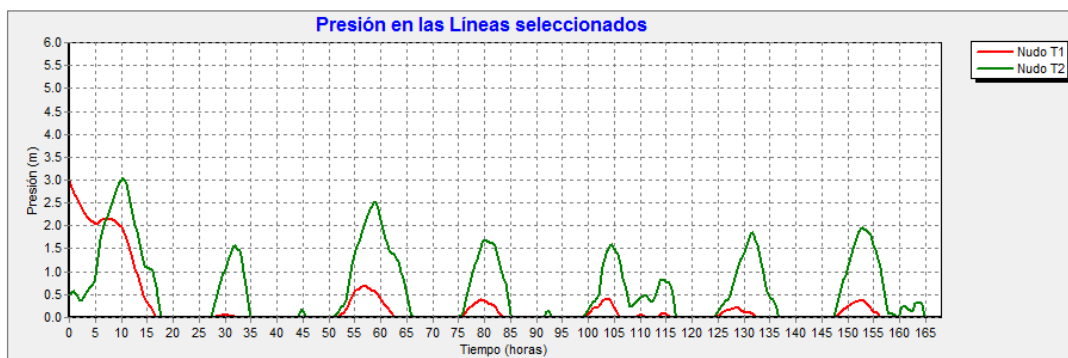


Fig. 8. Evolución de los depósitos T1 y T2 a lo largo de la simulación.

En primer lugar, interesa saber si los bombeos existentes son suficientes para hacer frente a los caudales demandados en la red y aportar la altura necesaria para que la presión en los nudos quede por encima de la mínima especificada, a lo largo de todo el periodo extendido.

Para analizarlo, se considera la situación límite de no tener el apoyo de los depósitos, ni en volumen almacenado ni en presión, para lo que se desconectan de la red cerrando las respectivas tuberías de entrada/salida. Por cada sector, se obtiene el máximo caudal a inyectar y la máxima altura a cubrir con el bombeo, y se estudia la capacidad de las bombas existentes.

Sector de estación S1 – depósitos T1 y T2:

La estación de bombeo S1 está dotada con tres bombas de curva característica tipo 8.

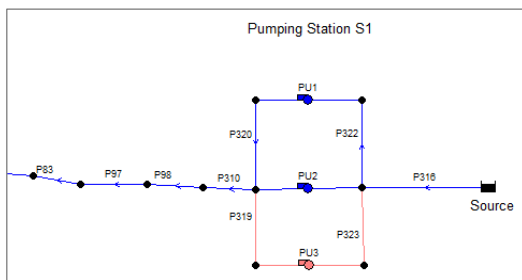


Fig. 9. Configuración original de la estación S1, bombas PU1, PU2 y PU3

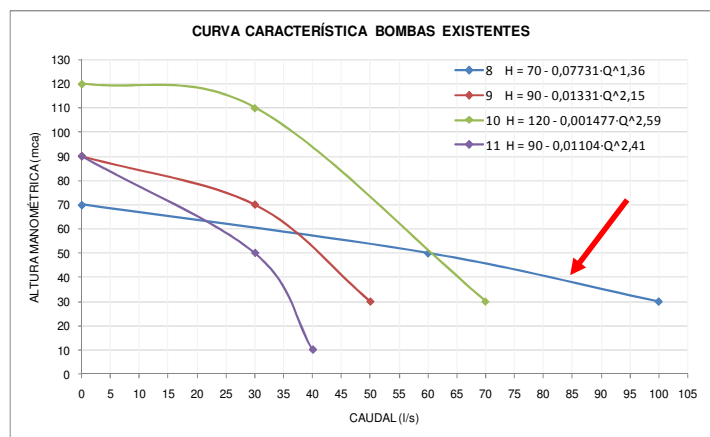


Fig. 10. Curva característica bombas de la estación S1

El caudal se inyecta al sector (y en este punto también a la red) a través de la tubería P310.

El máximo caudal inyectado se tiene en la hora 166 y es de 379,47 l/s:

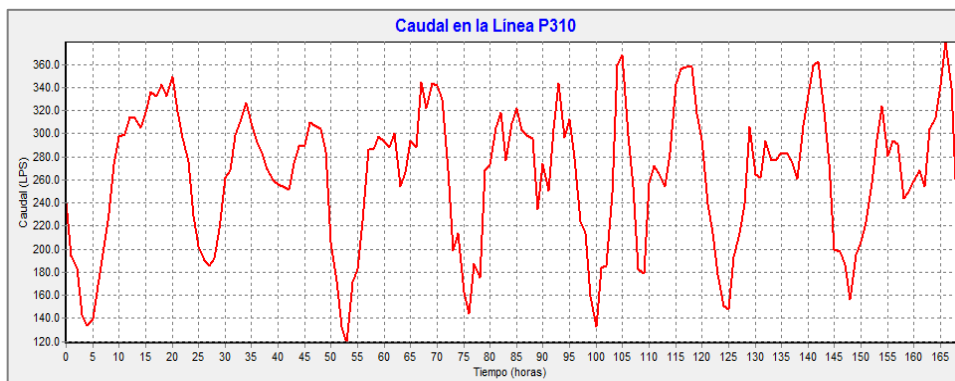


Fig.11. Caudal demandado por la red en el período de simulación 168 horas

Sin tener en cuenta las pérdidas de carga por fricción entre la estación de bombeo y cualquier punto, sólo considerando la diferencia de cota y la presión mínima de 25 mca exigida en los nudos de consumo, el punto más desfavorable sería el nudo J39, situado inmediatamente aguas abajo del depósito T1.

Este nudo se encuentra a la cota 45,88 m que, sumada a la presión mínima de 25 mca por haber en este punto un consumo aplicado, requiere un aporte de energía de como mínimo 70,88 mca. Como esta altura es inferior a la cota del depósito T1, a 71,50 m, se toma este último valor como el más desfavorable.

Puesto que la cota de aspiración de las bombas es de 46 m, el máximo desnivel sería de $\Delta z = 71,50 - 46 = 25,50$ m. En la hora crítica de mayor caudal se tendría, por tanto, $Q=379,47$ l/s y $\Delta z = 25,50$ m.

Cada una de las tres bombas de la estación S1 debería trasegar $379,47 / 3 = 126,49$ l/s. Sin embargo, este caudal excede el máximo según su curva característica por lo que resulta necesario ampliar la capacidad de bombeo de esta estación S1 con, como mínimo, una bomba en paralelo.

Para este orden de caudales, la bomba o bombas a instalar podrían ser de curva tipo 8 o tipo 8b. Para simplificar el diseño de la estación, si se toma una bomba de curva idéntica a las que ya están instaladas, se tendría:

Caudal por cada una de las 4 bombas tipo 8:	$Q' = 379,47/4 = 94,86$ l/s
Altura a la salida de cada una de las bombas:	$H' = 32,23$ mca

De manera que, en principio, bastaría con añadir una sola bomba de curva característica tipo 8 en paralelo a las existentes en la S1, ya que la energía aportada sería suficiente para vencer el desnivel entre la estación de bombeo y el depósito T1.

Sector de estación S2 – depósito T3:

Para evaluar la capacidad de bombeo de esta estación es necesario tener en cuenta que la nueva zona residencial podría ser alimentada bien a través de este sector exclusivamente, bien a través del sector de la estación S3 – depósito T4 exclusivamente, bien a través de ambos. Estas tres posibles situaciones llevan a caudales punta distintos:

- Nueva zona residencial alimentada desde S2 (válvula N15 abierta, válvula v1 cerrada): el máximo caudal saliente de S2 es de 53,17 l/s.
- Nueva zona residencial alimentada desde S3 (válvula N15 cerrada, válvula v1 abierta): el máximo caudal saliente de S2 es de 33,36 l/s.
- Nueva zona residencial alimentada desde S3 y S2 (válvulas N15 y v1 abiertas): el máximo caudal saliente de S2 es 49,62 l/s y de S3 es 84,95 l/s.

La situación más desfavorable sería, por tanto, la de alimentar la nueva zona residencial exclusivamente desde la estación S2, y es la que se considera para el análisis de la capacidad de bombeo.

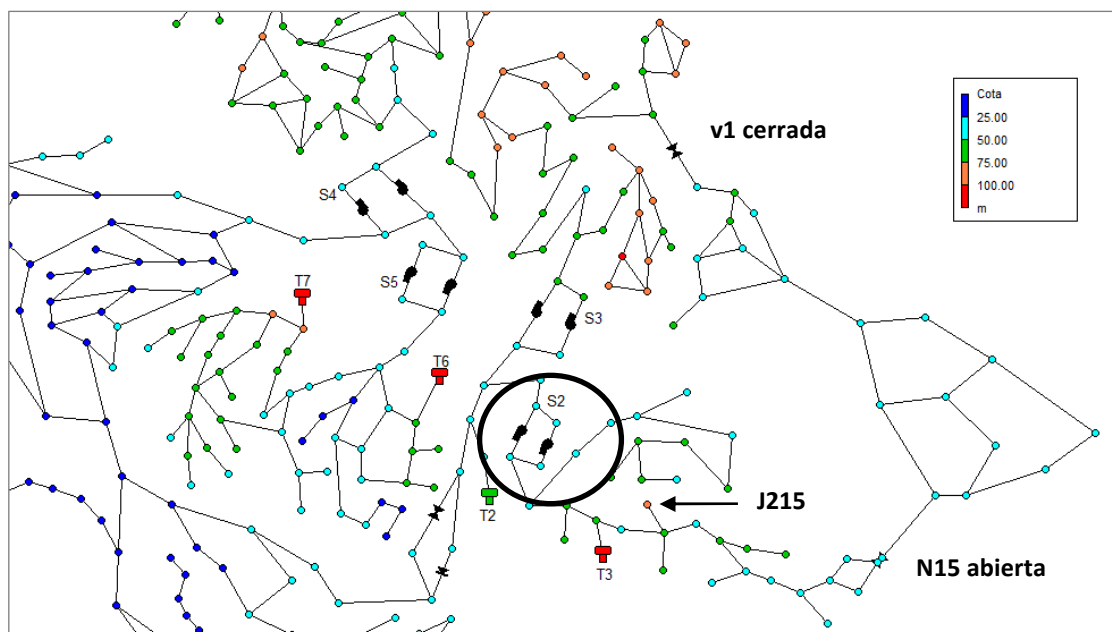


Fig.12. Alimentación de sector desde estación de bombeo S2

En esta situación, el máximo caudal por la S2 es de 53,17 l/s. Obviando las pérdidas de carga por fricción, el nudo más desfavorable por cota sería el J215, a 75,76 m. Por tener un consumo aplicado, la presión mínima en este punto debería ser de 25 mca. De esta manera, la mínima energía requerida en este punto es de $75,76 + 25 = 100,76$ mca. Como este valor es inferior a la cota del depósito T3, a 112,9 m, se toma este último como punto más desfavorable.

Desnivel a salvar: 112,9 (cota depósito T3)–40 (cota aspiración S2)=72,9 m
Máximo caudal a impulsar: 53,17 l/s

Las bombas instaladas en la estación S2 son de curva tipo 9. Un caudal de 53,17 l/s excede del caudal máximo que puede impulsar una bomba con este tipo de curva (que es de 50 l/s) y, aunque sería posible simular en EPANET el funcionamiento con una sola bomba, porque internamente el programa extrapola la curva de la bomba hasta obtener el caudal requerido (incluso si ello diera lugar a una altura negativa, emitiendo un mensaje de advertencia), en esta situación lo más adecuado sería que trabajasen las dos bombas. Así, trabajando ambas bombas:

Caudal por cada una de las 2 bombas tipo 9: $Q' = 53,17 / 2 = 26,59$ l/s
Altura a la salida de cada una de las bombas: $H' = 74,60$ mca

Puesto que la energía aportada por el bombeo es mayor que el desnivel a salvar para alcanzar el depósito T3, aunque ligeramente, la actual configuración de la estación S2 podría ser suficiente.

Sector de estación S3 – depósito T4:

Como en el caso anterior, teniendo en cuenta la alimentación de la nueva zona residencial, las tres situaciones y caudales punta son:

- Nueva zona residencial alimentada desde S2 (válvula N15 abierta, válvula v1 cerrada): el máximo caudal saliente de S3 es de 85,06 l/s.

- Nueva zona residencial alimentada desde S3 (válvula N15 cerrada, válvula v1 abierta): el máximo caudal saliente de S3 es de 104,32 l/s.
- Nueva zona residencial alimentada desde S3 y S2 (válvulas N15 y v1 abiertas): el máximo caudal saliente de S3 es 84,95 l/s y de S2 es 49,62 l/s.

Atendiendo al caudal punta, la situación más desfavorable es la de alimentar la nueva zona residencial exclusivamente desde la estación S3:

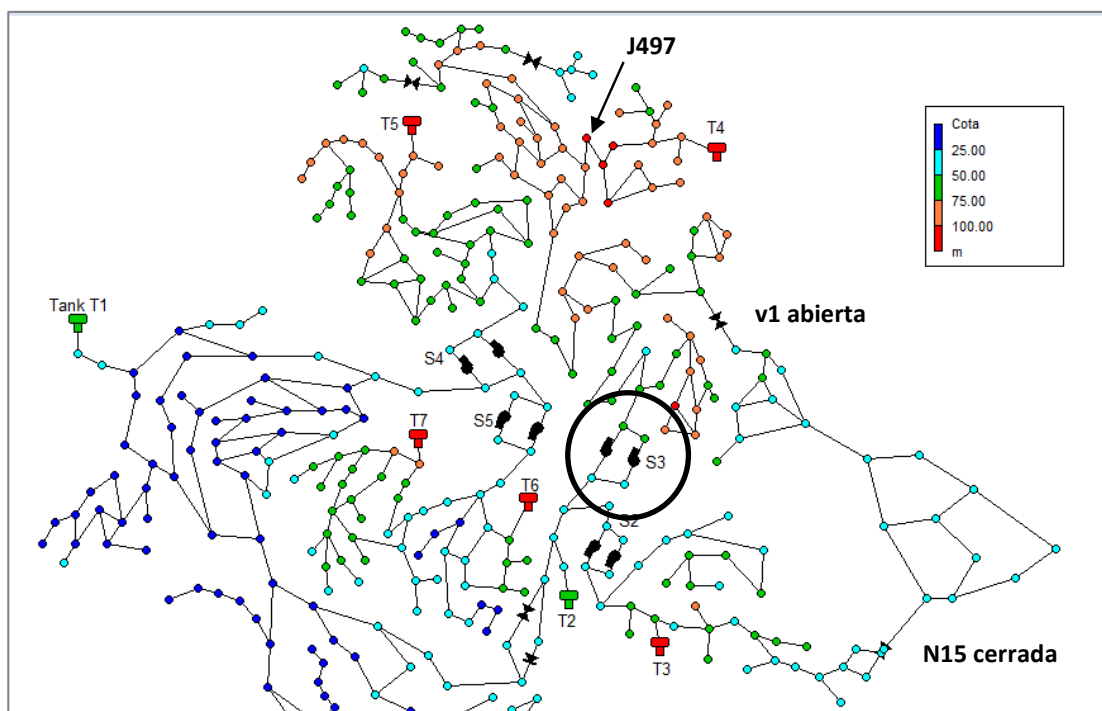


Fig.13. Alimentación de sector desde estación de bombeo S3

El nudo de mayor cota es el J497, a 105,63 m. Por tener un consumo aplicado, hay que tener en cuenta la presión mínima de 25 mca, de manera que la mínima energía requerida para este punto sería de $105,63 + 25 = 130,63$ mca, valor ligeramente inferior a la cota del depósito T4, que es de 132,50 m. Se toma la cota del depósito como el valor más desfavorable.

Desnivel a salvar: $132,5$ (cota depósito T4) $- 40$ (cota aspiración S3) $= 92,5$ m
 Máximo caudal a impulsar: 104,32 l/s

Las bombas instaladas en la estación S3 son de curva tipo 10. El máximo caudal que podría impulsar una sola bomba de este tipo es de 70 l/s por lo que en la situación de máxima demanda lo adecuado sería que trabajasen las dos bombas:

Caudal por cada una de las 2 bombas tipo 10:	$Q' = 104,32 / 2 = 52,16 \text{ l/s}$
Altura a la salida de cada una de las bombas:	$H' = 78,17 \text{ mca}$

En principio, puesto que las dos bombas no serían capaces de aportar la energía mínima necesaria, de alimentar la zona residencial exclusivamente desde este sector (línea 2 y válvula N15 cerradas) sería necesario modificar la actual configuración de la estación S3 añadiendo una nueva bomba en paralelo. Si esta nueva bomba fuera de idéntica curva, la situación sería:

Caudal por cada una de las 3 bombas tipo 10:	$Q' = 104,32 / 3 = 34,77 \text{ l/s}$
Altura a la salida de cada una de las bombas:	$H' = 105,50 \text{ mca}$

Con lo que se aportaría energía suficiente.

En el caso de abastecer a la nueva zona residencial desde los sectores de S2 y S3, disminuyen los caudales máximos a bombear por cada una de las estaciones. Así, en la S2 el caudal máximo pasa de ser 53,17 l/s a 49,62 l/s y en la S3 de 104,32 l/s a 84,95 l/s.

En la S2, cada bomba impulsaría un caudal de 24,81 l/s y aportaría al fluido una energía de 76,74 mca, reforzando la posibilidad de mantener la configuración de la S2. En la S3, cada bomba impulsaría un caudal de 42,48 l/s y aportaría una altura de 95,66 mca, superior a los 92,5 m del desnivel que se debía vencer para alcanzar la cota del depósito T4 de manera que, de abastecer desde los dos sectores, se podría mantener la configuración actual de la estación S3 y no sería necesario instalar ninguna nueva bomba en paralelo.

Sector de estación S4 – depósito T5:

La estación de bombeo S4 está equipada con dos bombas en paralelo con curva característica tipo 9. El máximo caudal demandado es de 45,72 l/s, en la hora 117. Existen

varios puntos a cota 80 m, la mayor del sector exceptuando el depósito T5 (cota 105,80 m). Puesto que en todos estos nudos existe un consumo aplicado, la energía mínima con la que debería llegar es de $80 + 25 = 105$ mca. Tomando como valor más desfavorable la cota del depósito, por ser algo superior, se tiene:

Desnivel a salvar: $105,8(\text{cota depósito T5}) - 44(\text{cota aspiración S4}) = 61,80$ m
 Máximo caudal a impulsar: 45,72 l/s

En este caso, sí podría trabajar una sola bomba e impulsar todo el caudal, ya que su curva tipo 9 permite funcionar con caudales de hasta 50 l/s. Sin embargo, aportaría una altura de 33,28 m, claramente insuficiente. Lo más conveniente sería que funcionasen las dos bombas, de manera que:

Caudal por cada una de las 2 bombas tipo 9: $Q' = 45,72 / 2 = 22,86$ l/s
 Altura a la salida de cada una de las bombas: $H' = 78,87$ mca

Puesto que la energía aportada por el bombeo supera el desnivel a salvar, la actual configuración de la estación S4 podría ser suficiente.

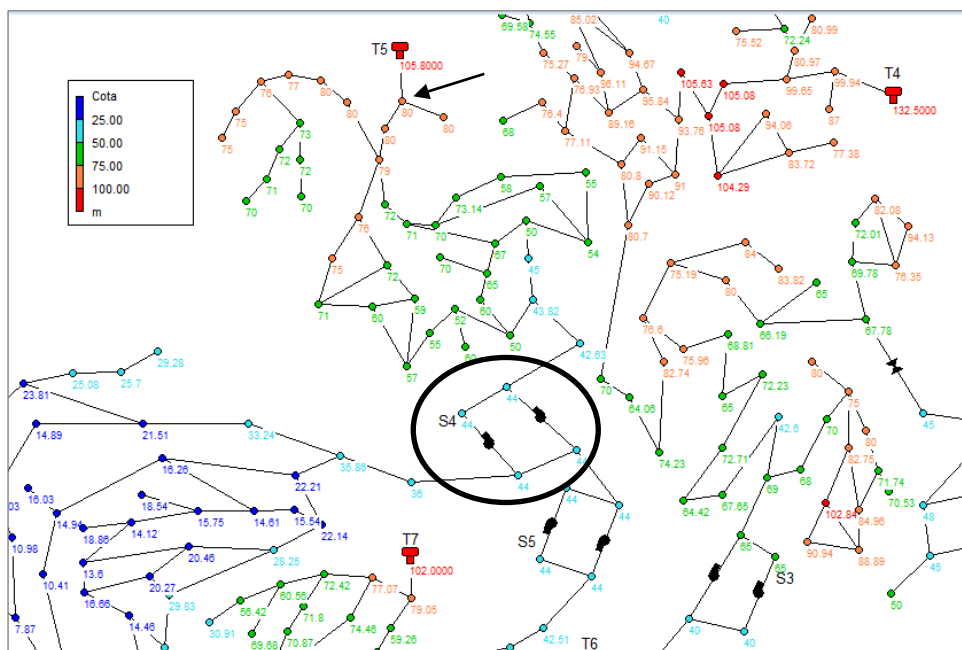


Fig.14. Alimentación de sector desde estación de bombeo S4

Sector de estación S5 – depósitos T6 y T7:

En este sector, a excepción de los depósitos, que se encuentran cotas de 102 m el T7 y 101,50 m el T6, el nudo más elevado es el J297, con una cota de 79,05 m. Por tener un consumo aplicado, la energía mínima requerida en ese nudo es de $79,05 + 25 = 104,05$ mca.

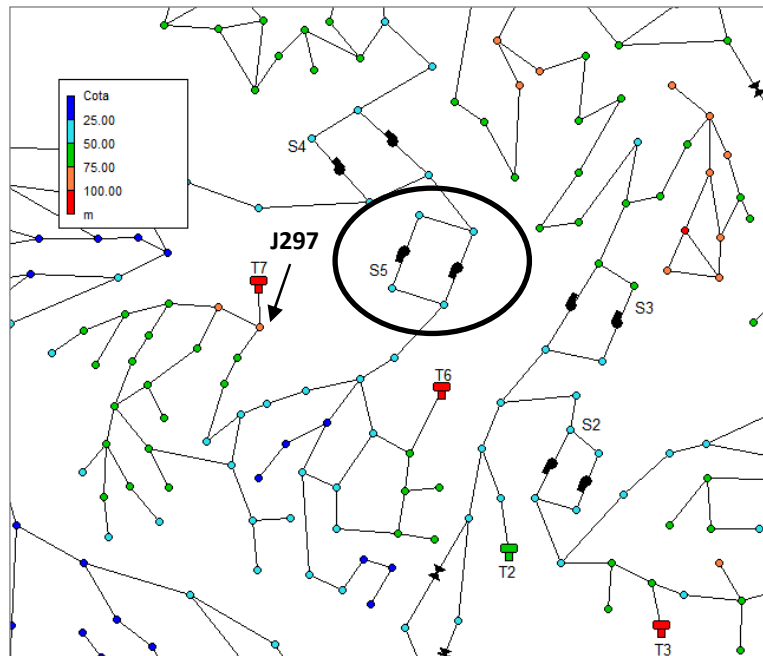


Fig.15. Alimentación de sector desde estación de bombeo S5

El máximo caudal demandado en esta zona es de 56,27 l/s. Las dos bombas instaladas en S5 son idénticas, de curva tipo 11. El máximo caudal que se podría elevar con una curva de este tipo es de 40 l/s por lo que la operación con una sola curva no sería factible. Funcionando las dos bombas, se tendría el siguiente escenario:

Desnivel a salvar: $104,05$ (nudo J297) – 44 (cota aspiración S5) = $60,05$ m

Máximo caudal a impulsar: $56,27$ l/s

Caudal por cada una de las 2 bombas tipo 11: $Q' = 56,27 / 2 = 28,14$ l/s

Altura a la salida de cada una de las bombas: $H' = 55,65$ mca

Aunque por poco, las bombas de S5 no serían capaces de aportar al fluido la energía necesaria para que en el nudo J297 se cumpliera con la presión mínima de 25 mca. Cabrían

distintas acciones: instalar una nueva bomba de curva tipo 11 en paralelo, remplazar las bombas existentes por otras que aporten una mayor altura, lo que a la vez implicaría aumentar el rendimiento global de la estación del 65 % al 75 %, o mantener las bombas actuales y el nivel del depósito T7 por encima de un determinado nivel de manera que la presión en el nudo J297, inmediatamente aguas abajo, sea superior a la presión mínima.

En el caso de instalar una nueva bomba en paralelo de curva tipo 11:

$$\text{Caudal por cada una de las 3 bombas tipo 11: } Q' = 56,27 / 3 = 18,76 \text{ l/s}$$

$$\text{Altura a la salida de cada una de las bombas: } H' = 77,04 \text{ mca}$$

En el caso de remplazar las dos bombas existentes por otras de curva tipo 9 (p.e):

$$\text{Caudal por cada una de las 2 bombas tipo 9: } Q' = 56,27 / 2 = 28,14 \text{ l/s}$$

$$\text{Altura a la salida de cada una de las bombas: } H' = 72,61 \text{ mca}$$

El nivel crítico (h) a mantener en el depósito para que la presión en J297 sea mayor de 25 mca sería:

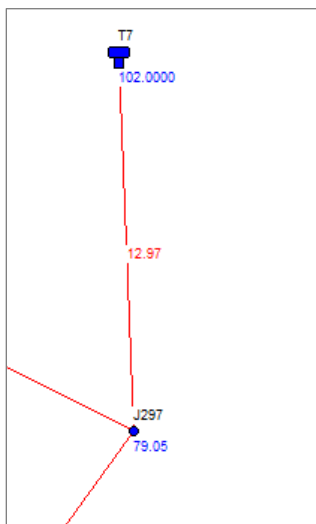


Fig.16. Cotas depósito T7 y nudo J297 y pérdida de carga unitaria en la tubería de unión

Aplicando Bernoulli entre el depósito T7 y el nudo J297,

$$H_{T7} = H_{J297} + \Delta H_{T7-J297}$$

$$(P/\rho)_{T7} + Z_{T7} + h = (P/\rho)_{J297} + Z_{J297} + \Delta H_{T7-J297}$$

$$0 + 102 + h = 25 + 79,05 + 0,91$$

$$h \geq 2,96 \text{ m}$$

Si la mayor pérdida de carga unitaria en la tubería que conecta el depósito y el nudo es de 12,97 m/Km (hora 54 de la simulación, caudal de 19,96 l/s) y la longitud de la tubería es de 70,36 m:

$$\Delta H_{T7-J297} \text{ (m)} = 12,97 \text{ m/Km} \cdot 1 \text{ Km}/1000 \text{ m} \cdot 70,36 \text{ m} = 0,91 \text{ mca}$$

6.2. LOS OBJETIVOS MÚLTIPLES A SATISFACER

El objetivo principal es conseguir que la red sea capaz de atender las demandas estimadas para el año horizonte cumpliendo con unos requisitos de presión mínima en los nudos (de 25 mca ó de 0 mca según exista o no un consumo aplicado). Son objetivos adicionales que la red sea medioambientalmente más eficiente, valorándose este objetivo en términos de menores emisiones de CO₂, y que la edad del agua en la red, medida con el parámetro WA_{net} , sea la mínima posible.

Para alcanzar estos objetivos, se plantea una optimización de la red aplicando un algoritmo genético, concretamente el desarrollado por Palisade Corporation e incluido en el programa comercial EVOLVER. Obviamente, junto con la optimización de la red se requiere comprobar que se satisfacen las restricciones hidráulicas, al margen de las que se piden para el servicio y reducción de costes, lo que puede hacerse automáticamente mediante el simulador EPANET.

La infraestructura requiere, por tanto, de una serie de modificaciones, actualizaciones o mejoras para tratar de satisfacer todos los objetivos, principalmente actuando sobre:

- las tuberías de la red, con la posibilidad de remplazar una tubería en algún tramo o colocar una nueva en paralelo a una existente;
- las estaciones de bombeo, donde es posible remplazar las bombas existentes o aumentar su capacidad instalando nuevas bombas en paralelo;
- los depósitos, aumentando su volumen;
- las válvulas, modificando su consigna y en algún caso su estado;
- la operación de los bombeos y del sistema en general.

La calidad de la solución se valora en términos económicos, siendo la óptima aquella con la que se alcancen los objetivos de la forma más económica posible.

6.3. CONSIDERACIONES PARA EL CÁLCULO

6.3.1. TUBERÍAS

Para que mejore la red, puede ser necesario modificar algunos de los diámetros de las tuberías, bien sustituyendo algunas bien colocando una nueva tubería en paralelo para aumentar la capacidad del tramo. Los diámetros de las tuberías son, por tanto, variables de decisión en el problema de optimización. Los nuevos diámetros se deben acomodar a los tamaños disponibles en el mercado. Deben, por tanto, tomar valores discretos de entre una gama comercial de posibles diámetros, lo que ya supone una restricción.

Una forma de manejar los diámetros es asignando a cada posible valor de diámetro un valor de índice. Los índices toman valores enteros que van desde 10 para el menor de los diámetros de la gama comercial (diámetro 102 mm) hasta 21 para el mayor (diámetro 762 mm). Así, el cambio de un diámetro al siguiente en la gama se resuelve aumentando el índice en una unidad.

Cada solución o cromosoma se compone de un vector de valores donde, al menos en las variables de decisión o genes que representan los diámetros de tubería, toman valores enteros en vez de una ristra de caracteres unos y ceros o tonos de grises.

Al proceder de esta manera, el algoritmo busca la combinación óptima de los parámetros índice de diámetro, en vez de buscar los diámetros propiamente. La principal ventaja es que a cada tubería se le asigna un único índice, lo que significa un único diámetro, por lo que se evitan tuberías divididas en dos o más tramos de distintos diámetros. Por otra parte, el algoritmo consume menos tiempo de cálculo, ya que se evitan los procesos de codificación y decodificación, por lo que se mejora su rendimiento ([02], [45]).

ÍNDICE DE DIÁMETRO ÓPTIMO	DIÁMETRO ÓPTIMO (mm)
1	51.0
2	52.0
3	76.0
4	76.2

ÍNDICE DE DIÁMETRO ÓPTIMO	DIÁMETRO ÓPTIMO (mm)
5	101.6
6	152.4
7	203.2
8	300.0
9	304.8
10	102.0
11	152.0
12	203.0
13	254.0
14	305.0
15	356.0
16	406.0
17	457.0
18	508.0
19	610.0
20	711.0
21	762.0
22	0.0

Tabla 8. Índices de diámetro de tubería

El índice 22 representando a un diámetro de cero sólo es aplicable a las tuberías 1 ó 2 de conexión de la red con la nueva zona residencial ya que, al poder conectar esta zona a través de una sola de estas tuberías la otra habría que ponerla fuera de servicio, lo que se simularía en EPANET introduciendo un diámetro de cero. Los índices de 1 a 9 corresponden a los diámetros presentes en la red original.

El algoritmo genético obtiene un diámetro óptimo para cada tubería pero, puesto que ya existe una tubería instalada, cabrán las opciones de reemplazar la existente o de colocar una nueva tubería en paralelo, eligiendo aquella opción que resulte más económica.

Dado el óptimo, el diámetro de la tubería en paralelo se calcula teniendo en cuenta que la sección de paso a través de las tuberías original y en paralelo deber ser igual a la sección de paso que supone la solución óptima.

Si $D_{\text{ópt}}$ es el diámetro óptimo y D_1 el de la tubería existente, el diámetro teórico de la nueva tubería en paralelo, D_2 , será:

Sección óptima = Sección tubería original + Sección tubería en paralelo

$$\pi \left(\frac{D_{\text{ópt}}}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{D_1}{2} \right)^2 + \pi \left(\frac{D_2}{2} \right)^2 \quad [\text{EC.11}]$$

$$D_2 = \sqrt{D_{\text{ópt}}^2 - D_1^2}$$

En general, el diámetro teórico D_2 no pertenece a la serie comercial, por lo que se toma el valor del diámetro comercial inmediatamente superior al calculado.

A continuación se obtiene el coste que supone reemplazar la tubería existente por otra con el diámetro óptimo y el coste que supone instalar una nueva tubería, con el diámetro comercial inmediatamente superior a D_2 , en paralelo. Si esta última opción es la que resulta más ventajosa, la forma de introducirla en EPANET es mediante una tubería de diámetro y rugosidad equivalentes.

El diámetro equivalente puede calcularse teniendo en cuenta que entre los dos puntos de instalación, de la tubería equivalente o de la pareja de tuberías en paralelo, la pérdida de carga debe ser la misma.

La ecuación de pérdidas por fricción de Hazen-Williams para la tubería equivalente sería, retomando la EC.10:

$$h = \frac{10,7 \cdot Q^{1,85} \cdot L}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \quad [\text{EC.10}]$$

Por cada una de las tuberías en paralelo, las pérdidas de carga son:

$$\Delta h_1 = \frac{10,7 \cdot Q_1^{1,85} \cdot L_1}{C_1^{1,85} \cdot D_1^{4,87}} \rightarrow j_1 = \frac{\Delta h_1}{L_1} = \frac{10,7 \cdot Q_1^{1,85}}{C_1^{1,85} \cdot D_1^{4,87}}$$

$$\Delta h_2 = \frac{10,7 \cdot Q_2^{1,85} \cdot L_2}{C_2^{1,85} \cdot D_2^{4,87}} \rightarrow j_2 = \frac{\Delta h_2}{L_2} = \frac{10,7 \cdot Q_2^{1,85}}{C_2^{1,85} \cdot D_2^{4,87}}$$

Asumiendo que la longitud de la tubería actual y de la nueva tubería en paralelo es la misma (al menos será muy similar):

$$j_1 = j_2 = j \quad [\text{EC.12}]$$

Siendo j la pérdida de carga unitaria en la nueva tubería equivalente. De manera que:

$$j_1 = j \rightarrow \frac{Q_1^{1,85}}{C_1^{1,85} \cdot D_1^{4,87}} = \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \rightarrow Q_1^{1,85} = \frac{Q^{1,85} \cdot C_1^{1,85} \cdot D_1^{4,87}}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}}$$

$$j_2 = j \rightarrow \frac{Q_2^{1,85}}{C_2^{1,85} \cdot D_2^{4,87}} = \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \rightarrow Q_2^{1,85} = \frac{Q^{1,85} \cdot C_2^{1,85} \cdot D_2^{4,87}}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}}$$

Al estar las tuberías en paralelo, se cumple:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad [\text{EC.13}]$$

Y, equivalentemente:

$$Q = \left(\frac{Q^{1,85} \cdot C_1^{1,85} \cdot D_1^{4,87}}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \right)^{\frac{1}{1,85}} + \left(\frac{Q^{1,85} \cdot C_2^{1,85} \cdot D_2^{4,87}}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \right)^{\frac{1}{1,85}}$$

$$Q = \left(\frac{Q \cdot C_1 \cdot D_1^{2,63}}{C \cdot D^{2,63}} \right) + \left(\frac{Q \cdot C_2 \cdot D_2^{2,63}}{C \cdot D^{2,63}} \right)$$

$$1 = \frac{C_1 \cdot D_1^{2,63} + C_2 \cdot D_2^{2,63}}{C \cdot D^{2,63}}$$

$$D^{2,63} = \frac{C_1 \cdot D_1^{2,63} + C_2 \cdot D_2^{2,63}}{C}$$

$$D = \left(\frac{C_1 \cdot D_1^{2,63} + C_2 \cdot D_2^{2,63}}{C} \right)^{\frac{1}{2,63}}$$

Como se desprende de la ecuación anterior, el diámetro de la tubería equivalente (D) depende de la rugosidad (C) en la misma. Este valor de rugosidad “equivalente” o “compuesta” (en analogía con canales abiertos) es obviamente un parámetro a estimar ya que el problema resulta un sistema compatible indeterminado con 3 ecuaciones (EC. 10, 12 y 13) y 4 incógnitas (Q_1 , Q_2 , C, D).

Dicha rugosidad equivalente (C) puede aproximarse mediante ponderación de las áreas de las dos tuberías a unificar, de manera que si D_1 y C_1 son el diámetro y la rugosidad de la tubería original, respectivamente, y D_2 y C_2 los homólogos de la tubería en paralelo (que por ser nueva C_2 vale 120):

$$C = \frac{C_1 \cdot A_1 + C_2 \cdot A_2}{A_1 + A_2} \quad \rightarrow \quad C = \frac{C_1 \cdot (D_1)^2 + 120 \cdot (D_2)^2}{(D_1)^2 + (D_2)^2}$$

Cada solución debe ser simulada en EPANET para evaluar su desempeño, calcular el grado de cumplimiento de las restricciones y obtener el valor de la función objetivo (fitness). Los nuevos valores de diámetro y rugosidad de las tuberías, para los casos de reemplazo y paralelo, así como los demás valores que propone el AG para las otras variables de decisión del problema, se introducen en un archivo .INP mediante una macro programada en Visual Basic que conecta EVOLVER con EPANET gracias a las funciones y procedimientos de la librería de la TOOLKIT de EPANET.

Suministrar el agua a los consumidores con una presión adecuada es la principal restricción en el problema de optimización de una RDA, el cual se complica con la presencia de depósitos y bombas al ser los elementos más difíciles de modelar ([18]).

En muchas ocasiones, la optimización tiende a reducir los costes (de capital) disminuyendo el diámetro de las tuberías. Esto podría llevar al sistema a no tener capacidad suficiente para atender unas demandas superiores a las previstas sin violar algunas de las condiciones de funcionamiento, en particular la presión mínima. Mayores caudales por las tuberías y

menores diámetros implican mayores pérdidas por fricción en tuberías y por tanto, menores presiones disponibles en los nudos.

En la macro de introducción de valores (llamada “metovalores”) se ha establecido una condición con respecto al diámetro de las tuberías al objeto de disminuir las pérdidas por fricción introducidas. Si el diámetro que propone EVOLVER es mayor que el diámetro original de la tubería, puesto que supondrá menores pérdidas por fricción, se introduce éste en el archivo .INP sustituyendo al diámetro original. Si por el contrario EVOLVER propone un diámetro menor, lo que significaría mayores pérdidas, se desestima el nuevo valor y la tubería conserva su diámetro original.

Para no restringir la capacidad de búsqueda del AG, la condición de presión mínima se impone como una restricción blanda. Las restricciones blandas son condiciones que las soluciones candidatas deben cumplir en la medida de lo posible y no cumplirlas no implica necesariamente el descartarlas, ya que pueden mantenerse en la población en vistas a obtener un futuro mejor resultado de la función objetivo.

La restricción blanda por presión mínima en los nudos se encaja en la optimización mediante un término de penalización dentro de la función objetivo. Como el problema de optimización trata de minimizar el valor de la celda objetivo, este término se sumará.

La evaluación de cada solución candidata mediante el simulador hidráulico permite conocer la presión en todos los nudos de la red a lo largo de todo el periodo extendido, para todas las condiciones de carga. Conocida la presión, se puede calcular el déficit de presión en cada nudo, para cada hora. La suma acumulada de todos los déficits de presión sirve de indicador del grado de cumplimiento de la condición de presión mínima por parte de la solución, de manera que se usa este valor como base para el cálculo de la penalización por déficit de presión.

Kadu y Gupta en 2008 propusieron como factor de penalización, para una red con un único bombeo, el coste de la energía para bombear un 1 m^3 de agua a 1 m de altura ([29]). Este

factor lo aplicaban sobre cada nudo con déficit de presión, obteniendo la penalización como el producto del factor por el déficit de presión y el caudal demandado en el nudo.

La red problema, sin embargo, presenta varios bombeos con distinta eficiencia según sean nuevos o no. De forma similar, para este caso se propone un término de penalización también basado en la expresión del coste de la energía consumida por los bombeos, pero de carácter global a la instalación, no para ser aplicado a cada nudo.

La penalización se define mediante la siguiente expresión:

$$\text{Penalización} = \sum_{t=1}^{\text{horas}} \gamma \cdot \text{pkwh} \cdot \Delta P_{\text{total}, t} \cdot \left(\sum_{b=1}^{\text{bombas}} \frac{Q_{b, t}}{\eta_b} \right) \quad [\text{EC.14}]$$

Donde γ : peso específico del agua (9,81 KN/m³).

pkwh: precio del kw por cada hora, según la tarifa eléctrica, en \$/kwh.

t: intervalo de cálculo, cada hora del período extendido (168 horas).

b: contador de bomba (en total 12 bombas).

$Q_{b, t}$: caudal bombeado por la bomba b en la hora t, en m³/s.

η_b : rendimiento global de la bomba b (adimensional).

$\Delta P_{\text{total}, t}$: déficit de presión total en el conjunto de nudos de la red en la hora t,

en mca. Calculado como:
$$\Delta P_{\text{total}, t} = \sum_{\text{nudo}=1}^{\text{nudos}} (P_{\text{minnudo}} - P_{\text{nudo}, t})$$

La penalización así obtenida tiene en cuenta, para cada hora, el caudal total bombeado en toda la instalación ya que suma el caudal por cada equipo, cada uno trabajando según su eficiencia, y el déficit total de presión en la red, suma del déficit de presión de cada uno de los nudos de la red.

6.3.2. BOMBEO

La red original contaba con 11 bombas. El análisis de la red del punto 5.1 puso de manifiesto los problemas de presión insuficiente que, a lo largo del periodo, se presentaban en algunos sectores de la red en los que, por tanto, era necesario actuar bien ampliando la capacidad de bombeo de la estación, añadiendo nuevas bombas, bien dotando a la estación de nuevos equipos capaces de aportar más altura dadas las cotas de los nudos y las demandas del sector.

Se vio que para el caso de la estación S1, en principio, bastaba con añadir una nueva bomba en paralelo de igual curva característica que las existentes (tipo 8). En la estación S5 cabían las posibilidades de, entre otras, acoplar una nueva bomba en paralelo de igual H-Q que las instaladas o reemplazar las bombas existentes por otras que proporcionasen mayor altura, por ejemplo de curva H-Q tipo 9.

Para el caso de la estación S5 en particular, pero para el problema de optimización en general, lo ideal hubiera sido poder manejar el parámetro de curva característica como una variable de decisión, de manera que el AG encontrase aquella curva o combinación de curvas más adecuada para la operación de cada estación. Sin embargo, la TOOLKIT de EPANET no dispone de ninguna función para modificar la propiedad de curva característica de una bomba por lo que no sería posible introducir un nuevo valor de curva propuesto por el AG para simular la red en EPANET y evaluar su desempeño.

Esta es la razón por la que las nuevas bombas se introducen en la red al margen de la optimización, en un paso previo, con una curva característica fijada de antemano en base al análisis del estado de presiones de la red original, no modificándose en ningún momento puesto que no puede ser objeto de la optimización.

Uno de los objetivos es minimizar el coste de operación. Este coste depende del consumo energético y éste, a su vez, del rendimiento del equipo. Un mayor rendimiento de la instalación conlleva un menor consumo de energía. Para las bombas nuevas el rendimiento

adopta un valor constante del 75% mientras que para las que no lo son, el rendimiento es constante del 65%.

Otro de los objetivos era minimizar el coste por emisiones de CO₂, que también depende del consumo energético. Un mayor rendimiento de los bombeos reduciría el consumo energético y, en consecuencia, las emisiones, lo que favorecería la consecución de este objetivo.

Para caracterizar las bombas de la red se han definido dos curvas de rendimiento, RN para las bombas nuevas y RE para las bombas existentes. Estas curvas determinan el rendimiento total de la bomba, que tiene en cuenta tanto el rendimiento mecánico como el rendimiento eléctrico del motor, en función del caudal bombeado.

La tarifa eléctrica está metida como un patrón de precios para representar las variaciones en el precio de la energía con el tiempo. En cada bomba el precio de la energía es 1 \$/kwh, aunque las unidades no se expresan explícitamente, de manera que el precio real por hora se obtiene multiplicando este valor de 1 por el coeficiente del patrón de precios correspondiente a cada hora.

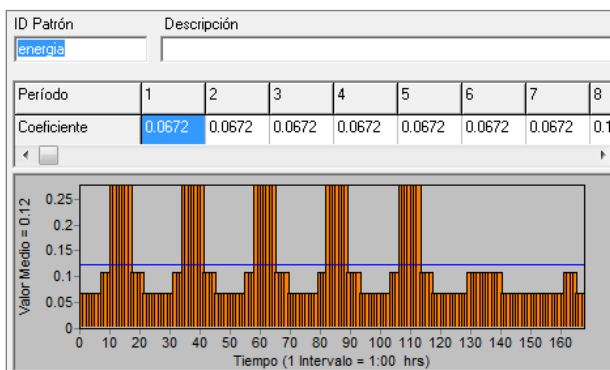


Fig. 17. Patrón de precios de la tarifa eléctrica

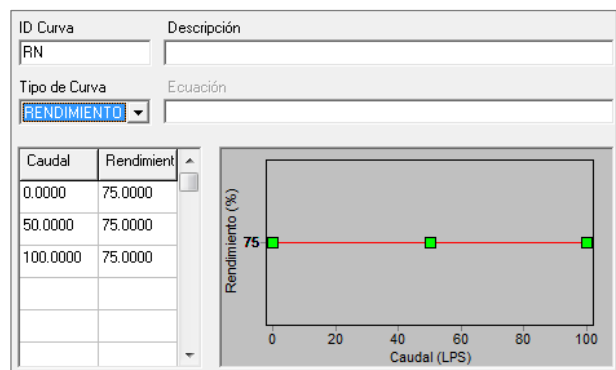


Fig. 18. Curva de rendimiento RN

Según Boulos et al. cabrían distintas medidas para disminuir el consumo de energía ([08]). La primera sería elegir las bombas de manera que, para el volumen demandado a bombear, la altura aportada fuera la justa para cubrir las necesidades de presión de la zona a la que atienden. Una altura excesiva, además de conllevar mayores costes de bombeo, podría

agravar los problemas de fugas en el sistema. Otra forma sería acomodar la operación de las bombas a las horas de menor precio de la energía, procurando el llenado de los depósitos durante las horas valle de la tarifa para consumir su volumen en las horas punta, en las que se evitaría bombear. Además de con programación horaria, la operación de los bombeos se puede controlar ajustando los niveles de arranque y parada en el correspondiente depósito de control.

Para mejorar la operación, se modifican algunos de los controles simples originales, basados en niveles de depósito, y se introducen otros nuevos para forzar el apagado de las bombas en las horas punta.

Aunque el periodo de simulación sólo es de una semana, 168 horas, el funcionamiento del sistema debería garantizar cierta periodicidad hidráulica para un siguiente ciclo de operación, acabando con los depósitos al mismo nivel con el que comenzaron. Se introduce una programación horaria de los bombeos, mediante controles programados, de manera que hacia las últimas horas de la simulación cuando el precio de la energía es menor los bombeos funcionen o no según el nivel en el depósito de control esté por encima o por debajo de su nivel inicial, que se tratará de alcanzar. Si el nivel del depósito está por encima de su nivel inicial, el bombeo para, de manera que se consuma parte del volumen del depósito y su nivel descienda hacia el inicial. Si por el contrario el nivel está por debajo del nivel inicial, se fuerza el funcionamiento del correspondiente bombeo para tratar de alcanzarlo.

Con la TOOLKIT de EPANET tampoco es posible modificar o introducir nuevos controles programados, de manera que éstos son introducidos manualmente en la red, en un segundo paso previo al margen del problema de optimización:

CONTROLES PROGRAMADOS	
RULE 1 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T2 LEVEL ABOVE 2.95 THEN LINK V2 STATUS IS CLOSED	RULE 11 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T5 LEVEL ABOVE 2.25 THEN PUMP PU08_9 STATUS IS CLOSED

CONTROLES PROGRAMADOS

<p>RULE 2 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T2 LEVEL BELOW 2.95 THEN LINK V2 STATUS IS OPEN</p>	<p>RULE 12 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T5 LEVEL BELOW 2.25 THEN PUMP PU08_9 STATUS IS OPEN</p>
<p>RULE 3 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T3 LEVEL ABOVE 3.38 THEN PUMP PU04_9 STATUS IS CLOSED</p>	<p>RULE 13 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T5 LEVEL ABOVE 2.25 THEN PUMP PU09_9 STATUS IS CLOSED</p>
<p>RULE 4 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T3 LEVEL BELOW 3.38 THEN PUMP PU04_9 STATUS IS OPEN</p>	<p>RULE 14 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T5 LEVEL BELOW 2.25 THEN PUMP PU09_9 STATUS IS OPEN</p>
<p>RULE 5 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T3 LEVEL ABOVE 3.38 THEN PUMP PU05_9 STATUS IS CLOSED</p>	<p>RULE 15 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T7 LEVEL ABOVE 2.5 THEN PUMP PU10_11 STATUS IS CLOSED</p>
<p>RULE 6 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T3 LEVEL BELOW 3.38 THEN PUMP PU05_9 STATUS IS OPEN</p>	<p>RULE 16 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T7 LEVEL BELOW 2.5 THEN PUMP PU10_11 STATUS IS OPEN</p>
<p>RULE 7 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T4 LEVEL ABOVE 2.35 THEN PUMP PU06_10 STATUS IS CLOSED</p>	<p>RULE 17 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T7 LEVEL ABOVE 2.5 THEN PUMP PU11_11 STATUS IS CLOSED</p>
<p>RULE 8 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T4 LEVEL BELOW 2.35 THEN PUMP PU06_10 STATUS IS OPEN</p>	<p>RULE 18 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T7 LEVEL BELOW 2.5 THEN PUMP PU11_11 STATUS IS OPEN</p>
<p>RULE 9 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T4 LEVEL ABOVE 2.35 THEN PUMP PU07_10 STATUS IS CLOSED</p>	<p>RULE 19 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T1 LEVEL ABOVE 3.25 THEN PUMP PU12_8 STATUS IS CLOSED</p>
<p>RULE 10 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T4 LEVEL BELOW 2.35 THEN PUMP PU07_10 STATUS IS OPEN</p>	<p>RULE 20 IF SYSTEM TIME > 144 AND TANK T1 LEVEL BELOW 3.25 THEN PUMP PU12_8 STATUS IS OPEN</p>

Puesto que, como se ha visto, no es posible optimizar la propiedad de curva característica, las únicas variables de decisión serán los niveles de arranque y parada de algunas bombas en los controles simples. Cuando no son variable de decisión se mantienen los niveles de control originales.

Por otro lado, las bombas de la estación S1 de la red original, cuando están en marcha, impulsan caudales muy altos, por encima de los 80 l/s, muy próximos a su máximo caudal de operación de 100 l/s, el cual superan en algún momento dando lugar a un funcionamiento que es indeseable desde el punto de vista de la eficiencia. Por otra parte, con la dotación de 3 bombas, dadas las características originales de la red (diámetros, controles, etc.), la altura aportada por la estación no es suficiente para evitar que el depósito se quede vacío durante periodos de varias horas. Esta situación llega a afectar a algunos nudos del sector donde se registran presiones por debajo de la mínima e incluso, aunque puntualmente, presiones negativas.

Con la instalación de una cuarta bomba de curva tipo 8, la PU12, el caudal total se reparte y el parcial por cada una disminuye, aumentando la altura aportada por el conjunto lo suficiente para que, tras vencer el desnivel entre estación y depósito y las pérdidas por fricción del recorrido, parte de esa energía contribuya a llenar el depósito, reduciéndose considerablemente el número de horas en que se encuentra vacío. Es por ello que se decide instalar la nueva bomba PU12.

En cuanto a los controles de operación, en la red original las bombas PU2 y PU3 arrancan con niveles muy bajos del depósito T1, con 1 m y 0,5 m respectivamente. La bomba PU2 permanece en marcha durante todo el periodo de simulación mientras que la bomba PU3, por el contrario, arranca cuando el nivel en T1 desciende hasta los 0,5 m. Este bajo nivel de arranque hace que el depósito se vacíe antes de llegue a apreciarse el efecto de la bomba PU3 en funcionamiento. Conviene, entonces, aumentar los respectivos niveles de arranque en estas bombas de manera que, hasta apreciarse la influencia del bombeo, el nivel en el depósito descienda pero no se vacíe.

Para mayor simplicidad en el funcionamiento de la estación S1, la operación de la nueva bomba PU12 también será controlada según niveles en el depósito T1.

Se plantean los siguientes rangos de niveles para la optimización:

BOMBAS S1	CURVA H-Q	DEPÓSITO CONTROLA OPERACIÓN BOMBA		NIVEL EN DEPÓSITO PARA ARRANQUE DE BOMBA (m)		NIVEL EN DEPÓSITO PARA PARADA DE BOMBA (m)	
		ORIGINAL	OPTIMIZACIÓN	NIVEL ORIGINAL	RANGO OPTIMIZACIÓN	NIVEL ORIGINAL	RANGO OPTIMIZACIÓN
PU2	8	T1	T1	1	3 - 4	4,5	5 - 6
PU3	8	T1	T1	0,5	3 - 4	2,5	5 - 6
PU12	8	-	T1	-	3 - 3,5	-	4 - 4,5

Tabla 9. Rangos de optimización de los niveles en depósito T1 para control de las bombas de S1

En la estación S5, las bombas PU10 y PU11 originales eran de curva característica tipo 11. Con el análisis de la red se vio que estas bombas no eran capaces de aportar suficiente presión para que en algunos nudos, en particular en el nudo J297 inmediatamente aguas abajo del depósito T7, la presión estuviese en todo momento por encima de la mínima de 25 mca. Para solucionar esto cabían tres posibilidades, instalar una nueva bomba de curva tipo 11 en paralelo, remplazar las bombas existentes por otras que aportasen mayor altura, lo que además implicaría aumentar el rendimiento global de la estación del 65 % al 75 %, o mantener las dos bombas originales asegurando un nivel por encima de los 3 m en el depósito T7.

Se opta por esta última opción por ser la más económica desde el punto de vista de la inversión de capital, ya que no requiere. Sólo será necesario optimizar, por tanto, la operación del conjunto bombas-depósito para asegurar un nivel en el depósito por encima del mencionado nivel crítico y que se mantenga la presión en los nudos por encima de la mínima requerida.

En cuanto a la operación, en la red original ambas bombas están controladas por el depósito T7 y, mientras que éste llega incluso a vaciarse, provocando que en algunos nudos aguas

abajo las presiones caigan por debajo de la mínima, el depósito T6 permanece casi lleno durante la mayor parte del tiempo.

Se plantea mantener los controles de ambas bombas vinculados a niveles en T7 pero modificando los respectivos niveles de arranque y parada:

BOMBAS S5	CURVA H-Q	DEPÓSITO CONTROLA OPERACIÓN BOMBA		NIVEL EN DEPÓSITO PARA ARRANQUE DE BOMBA (m)		NIVEL EN DEPÓSITO PARA PARADA DE BOMBA (m)	
		ORIGINAL	OPTIMIZACIÓN	NIVEL ORIGINAL	RANGO OPTIMIZACIÓN	NIVEL ORIGINAL	RANGO OPTIMIZACIÓN
PU10	11	T7	T7	2,5	3 – 3,5	4,8	4,5 - 5
PU11	11	T7	T7	1	3 – 3,5	3	4 – 4,5

Tabla 10. Rangos de optimización de los niveles en depósito T7 para control de las bombas de S5

6.3.3. DEPÓSITOS

En el diseño de un depósito las variables que pueden intervenir van desde propiedades físicas como su localización, cota, volumen, diámetro o altura hasta propiedades de operación como los niveles inicial, máximo o mínimo (aportando un volumen de reserva).

En el diseño óptimo de la red problema no está permitido modificar ni el emplazamiento, ni la cota ni la altura de los depósitos (*“new tanks are assumed to have the same height and bottom elevation as the existing adjacent tanks”*). Sí es posible modificar su volumen, en base a unos volúmenes de ampliación estándar.

Puesto que no se puede cambiar la altura de depósito, la única forma de introducir un cambio de volumen es incrementando su diámetro (*“the addition of new tanks can be modelled by increasing the tank diameters so that the resulting volume is equal to the existing tank volume plus the new tank volume”*). Para obtener el nuevo diámetro es necesario, además del volumen del depósito, conocer su altura (del cilindro que encierra el volumen, no la altura hidráulica). Como no se dispone de este dato, se asume el nivel máximo del agua en cada depósito como referencia de la altura en cada uno.

$$\text{Volumen óptimo} = \text{Volumen añadido} + \text{Volumen original} \quad [\text{EC.15}]$$

$$D_{\text{ópt,depósito}} = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{\text{añadido}}}{\pi \cdot H_{\text{máx}}} + D_{\text{orig}}^2}$$

Como en el caso de los diámetros de tubería, una forma de manejar los volúmenes a añadir es asignando un valor de índice a cada posible volumen. Los índices toman valores enteros que van desde 1 hasta 7. El índice 1 se refiere a la opción de no ampliar el depósito, añadir 0 m³, y mantener su volumen original. Los índices 2 a 7 corresponden a los volúmenes estándar disponibles, pasando de uno al siguiente mayor aumentando el índice en una unidad.

ÍNDICE DE VOLUMEN A AÑADIR	VOLUMEN (m3)
1	0
2	500
3	1.000
4	2.000
5	3.750
6	5.000
7	10.000

Tabla 10. Índices de volumen de depósito

Los depósitos están forzados a trabajar entre sus niveles mínimo y máximo. En EPANET, cuando un depósito se encuentra a su nivel mínimo, el programa impide la salida del agua cerrando la tubería de entrada/salida del depósito. Cuando alcanza su nivel máximo, procede de la misma forma para impedir la entrada.

En general, los niveles mínimo y máximo de los depósitos son variables que se pueden modificar en vistas a mejorar la operación del sistema. En la red problema, sólo cabría la posibilidad de modificar el nivel mínimo ya que el máximo se ha tomado como una propiedad invariable del diseño para poder obtener el diámetro del depósito ampliado. Sin embargo, se ha optado por mantener el nivel mínimo original de 0 m, y no se ha incluido este parámetro como variable de decisión.

También son variables de decisión que afecten a los depósitos, como se vio en el punto anterior, los niveles de arranque y parada para control de algunos bombeos.

La operación ideal de los depósitos sería aquella con la que los depósitos se llenasen y vaciasen a lo largo del periodo de simulación, acabando con el mismo nivel que tenían al inicio para garantizar la periodicidad hidráulica. Este nivel de inicio y de final deber ser la mitad del nivel máximo del depósito.

Sin embargo, en la red original de partida para la optimización los niveles de inicio no coinciden con el nivel mitad del volumen máximo de cada depósito, por lo que se fuerza este valor modificándolo mediante la función ENset de TOOLKIT ENset EN_TANKLEVEL:

DEPÓSITOS	NIVEL INICIAL RED ORIGINAL (m)	NIVEL MAXIMO (m)	NIVEL INICIAL MODIFICADO (m)
T3	3,00	6,75	3,38
T1	3,00	6,50	3,25
T7	2,50	5,00	2,50
T6	5,20	5,50	2,75
T5	1,00	4,50	2,25
T2	0,50	5,90	2,95
T4	2,50	4,70	2,35

Tabla 11. Niveles iniciales en depósito modificados

En la realidad, lo más probable es que exista una pequeña diferencia y que los niveles al principio y al final de la simulación no coincidan. Para guiar al AG en la búsqueda de soluciones que cumplan esta condición, se introduce un término de penalización en la función objetivo. Esta penalización se basa en la diferencia de niveles entre el principio y el final del periodo, que se multiplicará por un factor de penalización de valor constante 100 \$/m para que el orden de magnitud de la penalización introducida sea comparable al de los demás términos que intervienen en la función objetivo.

6.3.4. VÁLVULAS

Las válvulas son un elemento fundamental para controlar la operación de todo el sistema ya que tanto su estado como su consigna influirán en las variables de estado aguas abajo de su punto de instalación.

Se han considerado las siguientes variables de decisión según válvulas:

- válvulas reductoras de presión V45, V47 y v1: no puede dejarse ninguna fuera de servicio y sólo es posible modificar su presión de consigna, que no puede ser mayor de 60 mca. Esto supone considerar tres variables de decisión, el valor de la consigna de cada una de las tres válvulas. La presión de consigna podrá adoptar cualquier valor entre 40 mca (su consigna original) y 60 mca (la máxima permitida).
- válvula reductora de presión N15: está válvula podrá instalarse o no según lo haga la tubería 2 de conexión de la red con la nueva zona residencial. A pesar de ser una válvula de nueva instalación, no se considera su diámetro como variable de decisión y adoptará el mismo que la tubería 2 si finalmente ésta se instala. De no instalarse, tanto tubería como válvula N15 adoptan un diámetro de cero.

Para esta válvula se plantean dos variables de decisión que sólo tienen efecto si la válvula se instala. La primera sería el parámetro estado, el cual podría tomar valor de abierta (índice 1) o regulando (índice 2). La segunda variable de decisión sería la presión de consigna, también entre 40 mca y 60 mca, que sólo se introducirá en la red de resultar el estado óptimo regulando.

- válvula de regulación v2: para esta válvula se consideran tres variables de decisión. Como en la válvula N15, la primera variable de decisión sería el parámetro de estado que en este caso podría ser abierta (índice 1) o controlada (índice 2). Las otras dos serían los niveles del depósito T2 que, mediante dos controles simples, modifican el estado de la válvula a abierta o cerrada. Si el AG encuentra que el estado óptimo de la válvula es abierta, se ignoran los controles y los niveles de T2 no se introducen en el modelo.

6.4. LA FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo tiene en cuenta el coste de capital de los materiales y equipos, el coste de operación de los bombeos y las emisiones de CO₂ (en términos de coste) debidas a ambos. Dos términos de penalización al coste guían al algoritmo a buscar soluciones que satisfagan las condiciones de presión mínima en todos los nudos y de igualdad de niveles en depósitos al principio y final del periodo de simulación. Todos los costes son de carácter anual y vienen dados en \$/año.

La función propuesta presenta la siguiente estructura:

$$C = \min \{ C_{\text{CAPITAL}} + C_{\text{OPERACIÓN}} + C_{\text{CO}_2} + P_{\text{déficit presión}} + P_{\text{nivel depósitos}} \} \quad [\text{EC.16}]$$

Costes de capital

$$C_{\text{CAPITAL}} (\$) = \sum_1^{\text{tuberías}} C_i \cdot L_i + \sum_1^{\text{bombas}} C_b + \sum_1^{\text{válvulas}} C_v + \sum_1^{\text{depósitos}} C_d \quad [\text{EC.17}]$$

El coste asociado a las tuberías se refiere a aquellas a reemplazar o a las nuevas a colocar en paralelo a alguna existente, con el coste unitario por metro de tubería (C_i) correspondiente según el caso y L_i la longitud en metros de la tubería.

Hay tuberías que no requieren ninguna de estas operaciones y se mantienen en su estado original, por lo que obviamente no suponen ningún coste.

El coste debido a las bombas se debe a la adquisición de la nueva bomba PU12 instalada en la estación de bombeo S1.

El coste por nuevas válvulas se debe únicamente a la instalación de la válvula N15, que junto con la tubería 2, permite la conexión de la red con la nueva zona residencial. Este coste

aparece sólo en el caso de que la tubería 2 no quede fuera de servicio bien porque la solución óptima resulte alimentar la nueva zona a través de esta tubería exclusivamente o junto con la tubería 1.

El coste por depósitos sólo aparece cuando es necesario ampliar la capacidad de algunos de ellos.

Costes de operación

$$C_{OPERACIÓN} (\$) = \frac{52}{1,3} \cdot \left(\sum_1^{\text{bombas}} \sum_{t=1}^{\text{horas}} p_{kwh} \cdot \frac{\gamma \cdot Q_{b,t} \cdot H_{b,t}}{\eta_b} \right)$$

[EC.18]

Se debe a la operación de los bombeos y es consecuencia del consumo de energía de cada bomba en las horas que entra en funcionamiento. El precio de la energía es el que corresponde en cada hora según la tarifa eléctrica.

Este coste de operación semanal se obtiene durante la ejecución de una de las macros programadas, mediante la función EN_ENERGY de la TOOLKIT de EPANET, que extrae del archivo .INP de la red la energía consumida por una bomba, en kwh. El cálculo del coste semanal implementado en la macro es el siguiente:

$$C_{OPERACIÓN} = \frac{52}{1,3} \cdot \left(\sum_1^{\text{bombas}} \sum_{t=1}^{\text{horas}} p_{kwh} \cdot EN_ENERGY \right)$$

Costes por emisión de CO₂

$$C_{CO_2} (\$) = \left[\sum_1^{\text{tuberías}} \left(\frac{\text{kg CO}_2 - e}{m} \right)_i \cdot L_i + 52 \cdot \sum_1^{\text{bombas}} \sum_{t=1}^{\text{horas}} \frac{\gamma \cdot Q_{b,t} \cdot H_{b,t}}{\eta_b} \cdot \left(\frac{\text{kg CO}_2 - e}{\text{kwh}} \right) \right] \cdot p_{CO_2}$$

[EC.19]

Las emisiones de CO₂ se obtienen a partir de los kg CO₂-equivalentes derivados del capital, dados por metro de tubería, y de la operación del sistema, a través de un factor de emisión de valor 1,04 kg CO₂-e/kwh. El coste se calcula aplicando el precio de mercado del CO₂ (pCO₂) que, por coherencia de unidades, irá expresado en \$/kg.

PRECIOS CO2		21/08/2014
Precios	EUA (Spot)	CER (Spot)
Cierre	6,30 € -1,41 %	0,17 € -5,56 %
Máximo	6,40 €	0,19 €
Mínimo	6,08 €	0,17 €
Media (30 días)	6,15 €	0,17 €
Volumen Día	0	0
Volumen Año	0	0

Fig. 19. Precios de CO₂ expresados en €/Tn

Fuente: <http://www.sendeco2.com/>

1 € = 1,33 \$ (el 21/08/2014)

Las emisiones por la operación se calculan a partir del consumo semanal de energía por los bombeos multiplicado por 52 semanas para tener el valor anual.

$$C_{CO_2} = \left[\sum_1^{\text{tuberías}} \left(\frac{\text{kg CO}_2 - e}{m} \right)_i \cdot L_i + 52 \cdot \sum_1^{\text{bombas}} \sum_{t=1}^{\text{horas}} \text{EN_ENERGY} \cdot \left(\frac{\text{kg CO}_2 - e}{\text{kwh}} \right) \right] \cdot p_{CO_2}$$

Penalización por déficit de presión

El valor de esta penalización, como se ha justificado anteriormente, se basa en el déficit de presión en los nudos en los que no se cumple la condición de presión mínima establecida:

$$\text{Penalización} = \sum_{t=1}^{\text{horas}} \gamma \cdot p_{\text{kwh}} \cdot \Delta P_{\text{total}, t} \cdot \left(\sum_{b=1}^{\text{bombas}} \frac{Q_{b,t}}{\eta_b} \right) \quad [\text{EC.20}]$$

Penalización por distinto nivel al principio y al final

Esta penalización se obtiene multiplicando la diferencia entre el nivel de los depósitos al principio y al final del periodo por un factor de penalización. Estaría permitido que el depósito acabe con un nivel mayor que el inicial (se dice que “al menos” sea el inicial). Se ha tomado un factor de penalización de valor constante de 100 \$/m para que la penalización, de producirse, sea de un orden de magnitud comparable a los demás términos que intervienen en la función objetivo (costes de adquisición de tuberías, depósitos, bombas, operación de bombeos, etc.).

Edad del agua

El objetivo de reducir al mínimo la edad del agua en la red no se considera un objetivo explícitamente y no interviene en la función objetivo, ni como valor a minimizar ni como penalización. Sin embargo, un mejor diseño de la infraestructura y operación de la red llevarán a disminuir el tiempo que el agua permanece en la red, alcanzando este objetivo de forma adicional.

6.5. RESTRICCIONES Y VARIABLES DE DECISIÓN

El problema a resolver presenta una serie de restricciones y variables de decisión que, recapitulando, son:

Restricciones

1. Conservación de la masa: la que la suma de todos los caudales entrantes en un nudo debe ser igual a la suma de los caudales salientes.
2. Conservación de la energía: la diferencia de energía entre dos puntos debe ser la misma independientemente del camino que se tome entre esos dos puntos (Bernoulli).

3. Presión mínima: la mínima requerida para dar un servicio adecuado al usuario. En los nudos con un consumo aplicado es de 25 mca y en los nudos sin consumo de 0 mca.
4. Restricciones de diseño:
 - i. Los nuevos diámetros de tuberías y válvulas deben pertenecer a una serie de diámetros comerciales.
 - ii. Los volúmenes de ampliación de depósitos deben estar dentro de una serie de tamaños estándar predefinidos.
 - iii. Las nuevas bombas que se instalen deben elegirse de entre los 10 modelos de bombas disponibles.
5. Restricciones en general: aquí se incluye la condición de igualdad de niveles en los depósitos al principio y al final del periodo de simulación.

Al utilizar el simulador hidráulico EPANET en conexión con el programa de optimización EVOLVER, las restricciones 1 y 2 de carácter hidráulico salen fuera del problema de optimización y son manejadas en el simulador, donde se satisfacen necesariamente.

Variables de decisión

1. En tuberías: el diámetro de las nuevas tuberías a colocar reemplazando a originales o en paralelo con éstas (en las tuberías 1 y 2 de conexión de la nueva zona residencial cabe la posibilidad de poner una de ellas fuera de servicio, con diámetro 0 mm).
2. En válvulas:
 - i. Consigna de las válvulas reductoras de presión V45, V47 y v1.
 - ii. Estado de la válvula reductora N15 y consigna si estado regulando.
 - iii. Estado de la válvula de regulación v2 y niveles de control en depósito T2.
3. En bombas: para algunas bombas, el nivel de parada y arranque en el correspondiente depósito de control.
4. En depósitos: el volumen a añadir en cada depósito para optimizar la operación del sistema.

El número total de variables de decisión asciende a 468 (443 en tuberías, 8 en válvulas, 10 en bombas y 7 en depósitos).

6.6. CÁLCULOS, RESULTADOS Y ANÁLISIS

El programa de optimización EVOLVER dispone de varios métodos de resolución. Para la optimización de la red se ha empleado el denominado método de receta que permite ajustar los valores de unas variables de decisión que son independientes las unas de las otras. El AG del programa proporciona un valor, entero o real según se especifique, para cada variable de decisión dentro de su rango de valores admisibles.

Para la optimización, son inputs del problema el tamaño de la población, las probabilidades de cruce y mutación del AG y el tiempo de cálculo. Se ha adoptado un tamaño de la población de 500 individuos, dentro de los límites sugeridos por algunos autores (entre 50 ó 100 y 1000). Las probabilidades de cruce y mutación son las que por defecto ofrece EVOLVER, de 0,5 y 0,1 respectivamente. La probabilidad de cruce está dentro del intervalo de 0,5 a 1 sugerido en la bibliografía. La probabilidad de mutación, sin embargo, es algo superior al rango entre 0,001 y 0,01 propuesto por algunos autores. En EVOLVER la probabilidad de mutación puede ajustarse entre 0,0 y 1,0 (lo que significaría obviar la operación de cruce y dar soluciones completamente aleatorias), siendo los cambios típicos de 0,06 a 0,2, donde se encontraría el valor por defecto, por lo que se decide mantenerlo.

Se han llevado a cabo múltiples cálculos de optimización para ir acotando los valores que debían adoptar algunas variables de decisión, como los niveles de depósito de arranque y parada de bombas.

Debido al carácter aleatorio del AG, la posición de partida en el espacio de búsqueda influye sobre el AG para encontrar la solución deseada en la optimización multiobjetivo ([01], [55]). Por ello en cada cálculo se inicializan aleatoriamente algunas de las variables con valores dentro de su rango (diámetros de tubería, volumen a añadir a los depósitos, consigna y estado de válvulas), comenzando desde distintos valores para el mismo proceso.

Ajustados los rangos de todas las variables, el tiempo de cálculo para obtener la mejor solución, la óptima que se presenta, ha sido de unas 22 horas³.

En el curso de la optimización, se ejecutan consecutivamente dos macros programadas en VBA que, mediante llamadas a funciones de la librería TOOLKIT de EPANET, conectan el programa de optimización con el simulador hidráulico, sacando las restricciones fuera del problema de optimización para manejarlas con el simulador. Con la primera macro, llamada “metovalores”, se introducen en un archivo .INP de la red los valores de las distintas variables de decisión que EVOLVER propone con cada una de las soluciones candidatas que lanza (“trial”). Con la segunda, llamada “corromodelo”, se simula cada solución en EPANET y se obtienen los parámetros de estado que permitirán, por un lado, calcular los costes derivados de la operación del sistema, por consumo eléctrico y emisiones de CO₂, y por otro, evaluar la violación de las restricciones para, en su caso, calcular las penalizaciones. Si la solución propuesta por EVOLVER es factible se le asociará el valor de la función objetivo.

Con esta segunda macro se obtiene la presión de todos los nudos en todas las horas y se calcula el déficit de presión con respecto a la presión mínima que es de 25 mca ó de 0 mca según haya o no un consumo aplicado en el nudo. También se obtiene el caudal impulsado por cada bomba en cada hora, que junto con el déficit de presión permite calcular la penalización por incumplimiento de la restricción de presión mínima, y la energía consumida por cada bomba durante su funcionamiento.

Comenzado el proceso de optimización, en un primer momento se produce un rápido descenso del valor de la función objetivo, debido a la eficiente contribución de los operadores de selección y cruce, pero a medida que la optimización avanza la población es cada vez más homogénea y el mecanismo que entonces gobierna la búsqueda es la mutación. En consecuencia, es en la primera fase donde se producen las mejoras más importantes mientras que en la segunda los valores de la función objetivo se estabilizan, el

³ En un ordenador Intel® Core™ i5-2435M CPU 2.40 GHz

progreso del algoritmo es mucho más lento y es más difícil encontrar nuevas soluciones que mejoren los valores de la función objetivo ([45]).

Además, conforme aumentan la complejidad de la red y el número de variables se precisa un mayor número de generaciones para converger a la solución.

La solución óptima es aquella que, tras repetir el proceso de optimización en varias ocasiones, proporciona el menor valor de la función objetivo. A continuación se presentan los valores obtenidos para algunas de las variables de decisión que se han planteado:

TUBERÍAS	Nº DE TUBERÍAS	COSTE ADQUISICIÓN (\$)
TUBERÍAS A REMPLAZAR	107	124.211,78
TUBERÍAS EN PARALELO	4	1.582,48

VÁLVULAS	ESTADO	CONSIGNA (mca) ó CONTROLES	COSTE ADQUISICIÓN (\$)
VRP v1	(NO ES VD)	40	SIN COSTE
VRP V45	(NO ES VD)	50	SIN COSTE
VRP V47	(NO ES VD)	60	SIN COSTE
VRP N15	ABIERTA	NO APLICA	SIN COSTE
VRG V2	CONTROLANDO	ABRE CUANDO $T2 < 0,6$ CIERRA CUANDO $T2 > 5,3$	SIN COSTE

El estado de la válvula N15 en la solución óptima es abierta. En este caso, puesto que debe permanecer abierta en todo el periodo de simulación, no tendría sentido instalarla y la nueva zona residencial quedaría conectada a la red principal a través de la tubería 2.

BOMBAS (ID_Nº CURVA_ESTACIÓN)	NIVEL ARRANQUE	NIVEL PARADA	COSTE ADQUISICIÓN (\$)	COSTE DE OPERACIÓN SEMANTAL (\$)
PU02_8 (S1)	3,01 en T1	5,95 en T1	SIN COSTE	490,86
PU03_8 (S1)	3,25 en T1	5,08 en T1	SIN COSTE	564,12
PU10_11 (S5)	3,49 en T7	4,57 en T7	SIN COSTE	349,98
PU11_11 (S5)	3,47 en T7	4,00 en T7	SIN COSTE	75,38
PU12_8 (S1)	3,45 en T1	4,45 en T1	4.133,00 \$	495,39

DEPÓSITOS	VOLUMEN AÑADIR (m3)	NIVEL INICIAL ⁴ (m)	NIVEL FINAL ⁴ (m)	DIFERENCIA DE NIVEL (m)	COSTE (\$)
T3	0	3,38	3,31	- 0,061	SIN COSTE
T1	0	3,25	3,06	- 0,186	SIN COSTE
T7	0	2,50	3,49	+ 0,99	SIN COSTE
T6	0	2,75	2,69	- 0,0551	SIN COSTE
T5	0	2,25	2,26	+ 0,01	SIN COSTE
T2	0	2,95	2,73	- 0,216	SIN COSTE
T4	0	2,35	2,35	0,00	SIN COSTE

Como los depósitos deben acabar a un nivel igual o mayor que el inicial, la penalización por incumplimiento de esta restricción sólo tiene en cuenta la diferencia de nivel en los depósitos que acaban por debajo de su respectivo valor inicial. Por tanto, la penalización se calcula en base a los 0,5181 m (0,52 m) de déficit de nivel.

En la celda objetivo, a minimizar, han intervenido los siguientes conceptos, expresados como coste anual en \$/año:

1. Total anual costes de capital
Que comprende coste tuberías + coste depósitos + coste bombas + coste válvulas
2. Total anual costes de operación
3. Total anual por emisiones de CO₂
4. Penalización por déficit de presión
5. Penalización por nivel depósitos al año

Se optimiza la red, por tanto, tratando de alcanzar los objetivos de reducción de costes (al introducir en la función objetivo el montante de costes de capital y de operación), reducción de las emisiones de CO₂ (expresadas en términos económicos gracias al precio de mercado del carbono a fecha 21/08/2014 tomado como referencia), presión mínima en los nudos (a través de una penalización por déficit de presión global en la red) e igualdad de niveles en depósito al principio y final de la simulación (también mediante una penalización).

⁴ Valores redondeados

El objetivo de reducir la edad del agua en la red no se considera explícitamente, pero se alcanzará con la modificación de algunos elementos físicos de la red y una mejor operación.

Los resultados finalmente obtenidos fueron:

1. MINIMIZAR COSTE ANUAL (CAPITAL + OPERACIÓN)		
COSTE DE CAPITAL (ANUAL)		
COSTE TUBERÍAS	125,794.26	\$/año
COSTE DEPÓSITOS	0.00	\$/año
COSTE ADQUISICIÓN BOMBAS	4,133.00	\$/año
COSTE VÁLVULAS	0.00	\$/año
PENALIZACIONES:		
Déficit presión en la red	45.25	m/semana
Penalización por presión semana	16.57	\$/semana
Penalización por presión al año	861.45	\$/año
Diferencia total nivel depósitos inicio - fin semana	0.52	m/semana
Factor de penalización	100.00	\$/m
Penalización por nivel inicio semana ≠ fin semana	51.99	\$/semana
Penalización por nivel depósitos al año	2,703.33	\$/año
TOTAL ANUAL COSTES CAPITAL	129,927.26	\$/año
COSTE DE OPERACIÓN (ANUAL)		
Coste semanal bombeos	5,230.74	\$/semana
TOTAL ANUAL COSTES OPERACIÓN	209,229.51	\$/año
TOTAL ANUAL COSTES (CAPITAL+OPERACIÓN)	339,156.77	\$/año
2. MINIMIZAR EMISIONES DE CO2		
EMISIÓN POR CAPITAL (ANUAL)		
EMISIÓN CO2 TUBERÍAS	144.030,05	kg CO2-e/año
EMISIÓN POR OPERACIÓN (ANUAL)		
Consumo semanal energía por bombeos	45.176,50	kwh
Consumo anual energía por bombeos	2.349.177,80	kwh
Factor de emisión	1,04	kgCO2-e/kwh
EMISIÓN CO2 BOMBEOS	2.443.144,91	kgCO2-e/año
TOTAL ANUAL EMISIONES CO2 (CAPITAL+OPERACIÓN)	2.587.174,96	kg CO2-e/año
Precio CO2 (Tn) 4.55 \$/Tn (21/08/2014)	4,55	\$/Tn CO2-e
Precio CO2 (Kg)	0,00455	\$/kg CO2-e
TOTAL ANUAL EMISIONES CO2 (CAPITAL+OPERACIÓN)	11.771,65	\$/año

Siendo el valor mínimo alcanzado en la función objetivo de:

SUMA A MINIMIZAR

354.493,19 \$/año

El tiempo de permanencia del agua en la red, medida con el parámetro WA_{net} es de 3,47 horas en la solución óptima. Este valor indica que en algún nudo, el tiempo que el agua permanece en la red es superior a 48 horas. De no ser así, por la propia definición del índice WA_{net} hubiese alcanzado un valor de cero. Sin embargo, la reducción es considerable.

Como se puede observar, debido al mayor coste que supone aumentar el tamaño de los depósitos frente al coste de instalar nuevas tuberías y bombas, la optimización tiende a minimizar el tamaño de los depósitos. Es por ello que finalmente no resulta necesario ampliar ningún depósito.

A pesar de que la solución es bastante buena (en comparación con los resultados de otros autores como se verá a continuación) no se ha conseguido cumplir con la restricción de presión mínima de 25 mca en algunos nudos de consumo. Sí en los nudos que no tienen un consumo aplicado, la presión siempre está por encima de los 0 mca y en ningún momento se tienen en la red problemas por presiones negativas. Concretamente, los nudos en los que puntualmente no se alcanza la presión mínima son:

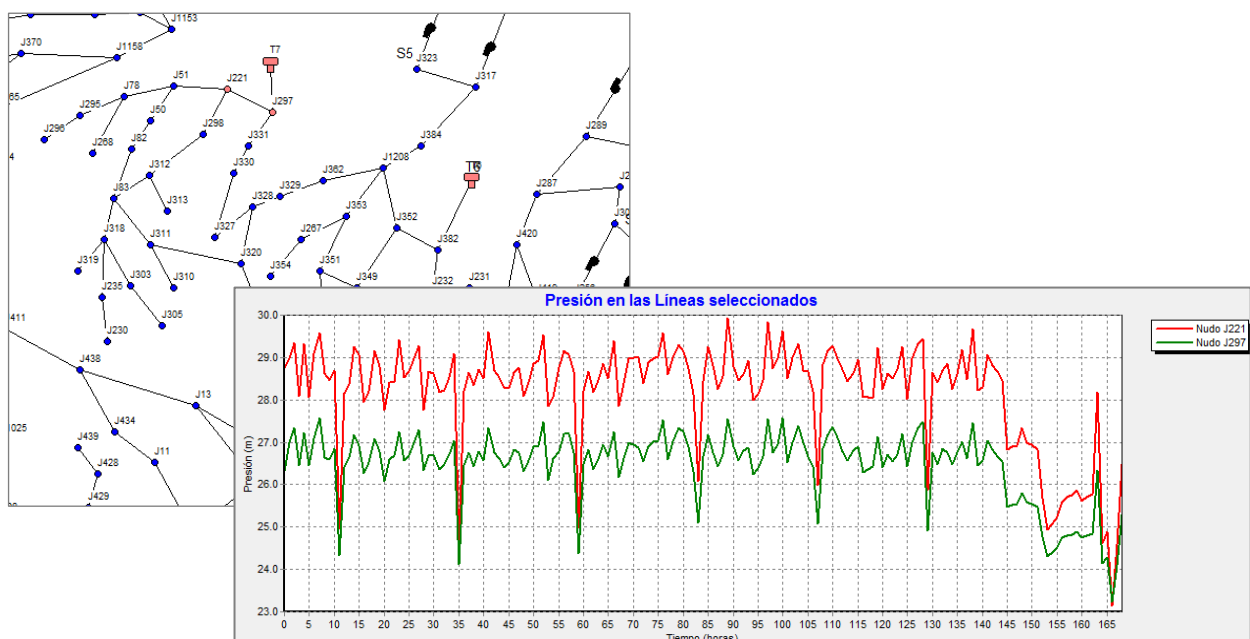


Fig.20. Nudos con déficit de presión en algún momento de la simulación

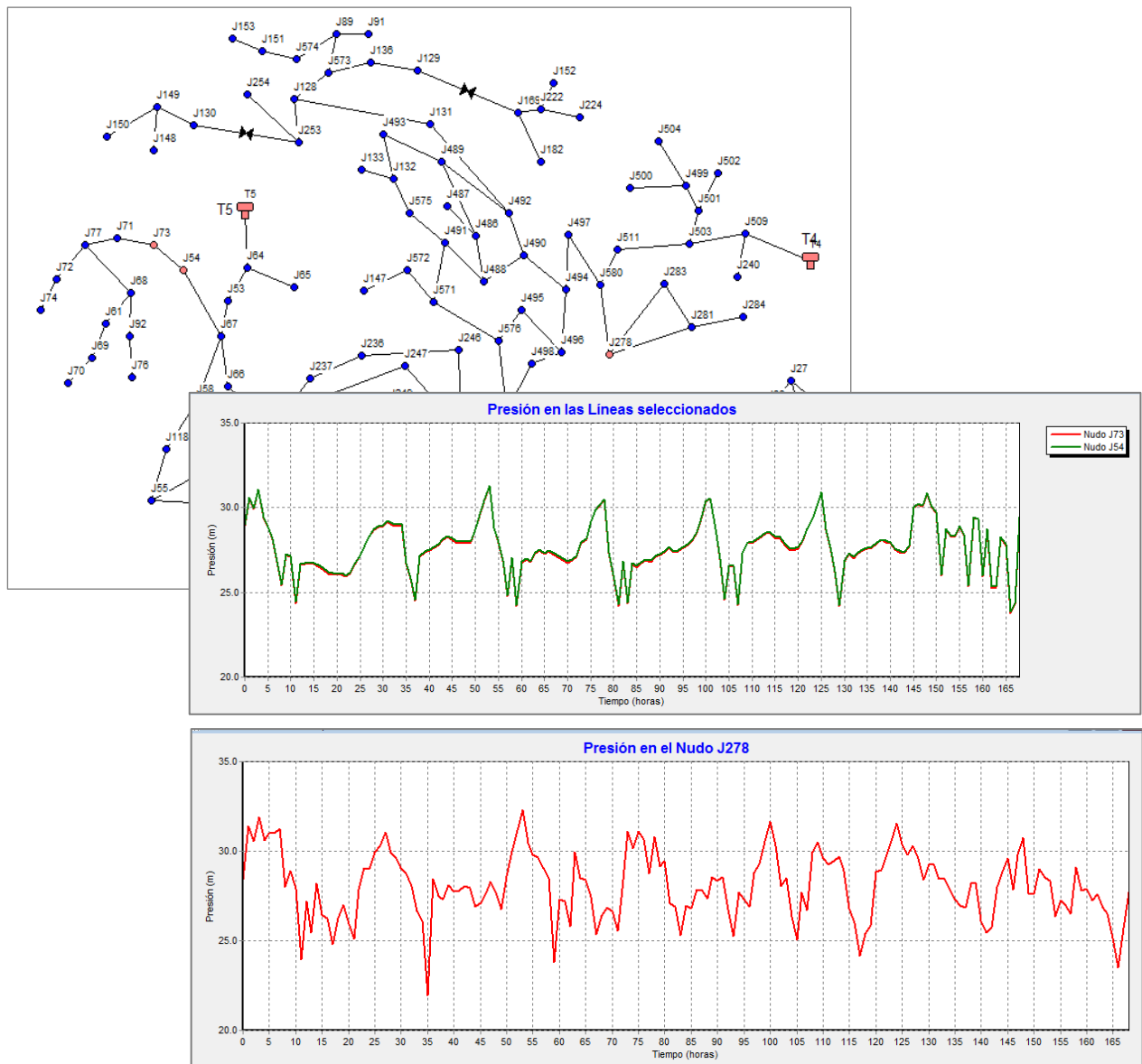


Fig.21. Nudos con déficit de presión en algún momento de la simulación

Tampoco se ha conseguido que todos los depósitos lleguen al final de la semana con el mismo nivel con el que la comenzaron. Podría decirse que estos depósitos son, básicamente, el T1, 19 cm por debajo, y el T2, 22 cm por debajo, ya que la diferencia en los depósitos T3 y T6, de 6 cm en ambos, no se considera significativa (aunque en cualquier caso intervienen en la penalización a la función objetivo). La evolución de niveles en T1 y T2 es:

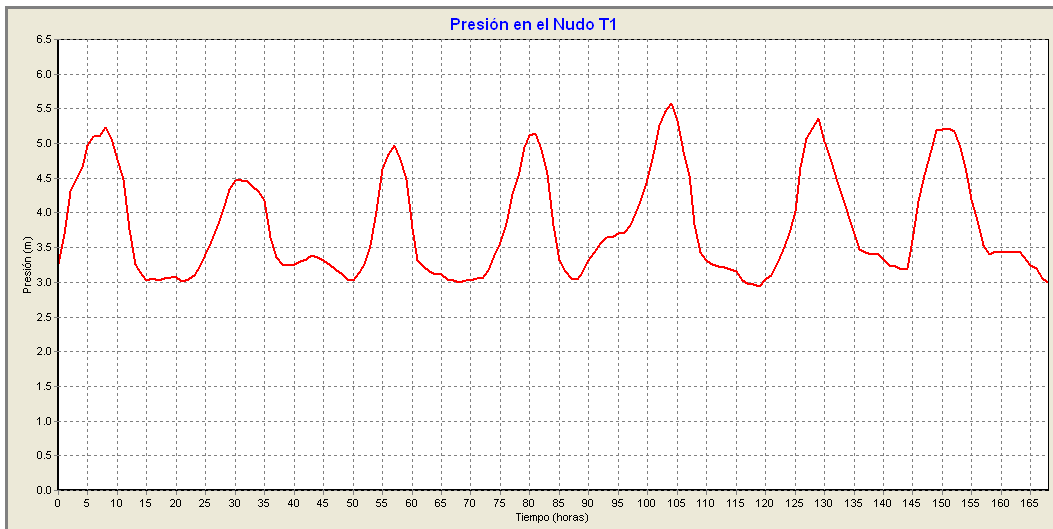


Fig.22. Evolución del nivel en el depósito T1 a lo largo de la simulación, con la solución óptima

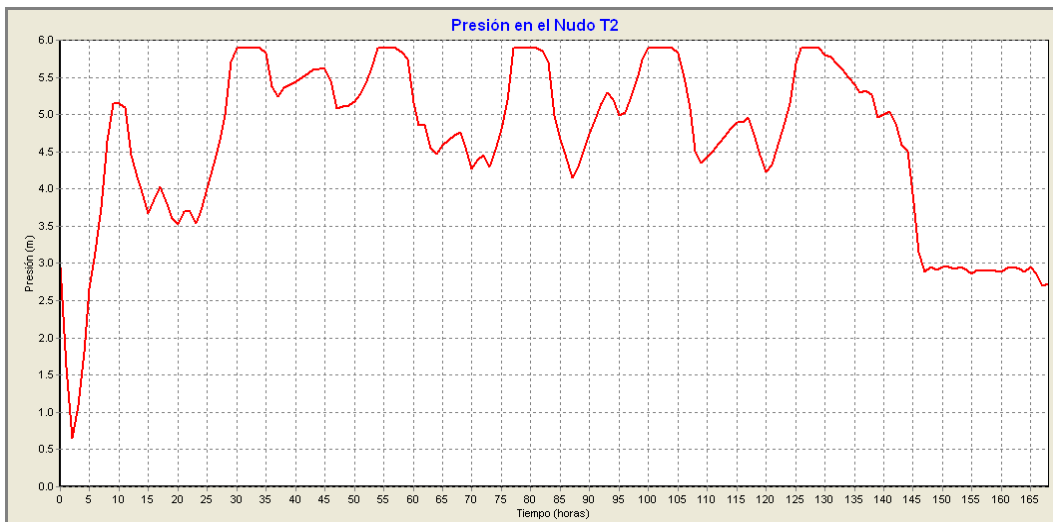


Fig.23. Evolución del nivel en el depósito T2 a lo largo de la simulación, con la solución óptima

Salvo el depósito T2 en las primeras horas, en general los depósitos se van llenando en los periodos de menor demanda, que se corresponden con las primeras horas del día. Cuando la demanda aumenta, el caudal aportado por los bombeos no es suficiente y los depósitos contribuyen a cubrir dicha demanda.

Por último, los controles simples de operación de la red son:

LINK PU01_8 1.0000 IF NODE T1 BELOW 4.0000
 LINK PU01_8 0.0000 IF NODE T1 ABOVE 6.3000
 LINK PU02_8 1.0000 IF NODE T1 BELOW 3.0054
 LINK PU02_8 0.0000 IF NODE T1 ABOVE 5.9491
 LINK PU03_8 1.0000 IF NODE T1 BELOW 3.2508
 LINK PU03_8 0.0000 IF NODE T1 ABOVE 5.0769
 LINK PU04_9 1.0000 IF NODE T3 BELOW 3.0000
 LINK PU04_9 0.0000 IF NODE T3 ABOVE 5.3000
 LINK PU05_9 1.0000 IF NODE T3 BELOW 1.0000
 LINK PU05_9 0.0000 IF NODE T3 ABOVE 3.5000
 LINK PU06_10 1.0000 IF NODE T4 BELOW 2.0000
 LINK PU06_10 0.0000 IF NODE T4 ABOVE 3.5000
 LINK PU07_10 1.0000 IF NODE T4 BELOW 3.0000
 LINK PU07_10 0.0000 IF NODE T4 ABOVE 4.5000
 LINK PU08_9 1.0000 IF NODE T5 BELOW 1.5000
 LINK PU08_9 0.0000 IF NODE T5 ABOVE 4.5000
 LINK PU09_9 1.0000 IF NODE T5 BELOW 0.5000
 LINK PU09_9 0.0000 IF NODE T5 ABOVE 3.0000
 LINK PU10_11 1.0000 IF NODE T7 BELOW 3.4884
 LINK PU10_11 0.0000 IF NODE T7 ABOVE 4.5745
 LINK PU11_11 1.0000 IF NODE T7 BELOW 3.4734
 LINK PU11_11 0.0000 IF NODE T7 ABOVE 4.0031
 LINK PU12_8 1.0000 IF NODE T1 BELOW 3.4491
 LINK PU12_8 0.0000 IF NODE T1 ABOVE 4.4499
 LINK PU01_8 0.0000 AT TIME 11.0000 HOURS
 LINK PU01_8 0.0000 AT TIME 35.0000 HOURS
 LINK PU01_8 0.0000 AT TIME 59.0000 HOURS
 LINK PU01_8 0.0000 AT TIME 83.0000 HOURS
 LINK PU01_8 0.0000 AT TIME 107.0000 HOURS
 LINK PU02_8 0.0000 AT TIME 11.0000 HOURS
 LINK PU02_8 0.0000 AT TIME 35.0000 HOURS
 LINK PU02_8 0.0000 AT TIME 59.0000 HOURS
 LINK PU02_8 0.0000 AT TIME 83.0000 HOURS
 LINK PU02_8 0.0000 AT TIME 107.0000 HOURS
 LINK PU03_8 0.0000 AT TIME 11.0000 HOURS
 LINK PU03_8 0.0000 AT TIME 35.0000 HOURS
 LINK PU03_8 0.0000 AT TIME 59.0000 HOURS
 LINK PU03_8 0.0000 AT TIME 83.0000 HOURS
 LINK PU03_8 0.0000 AT TIME 107.0000 HOURS
 LINK PU04_9 0.0000 AT TIME 11.0000 HOURS
 LINK PU04_9 0.0000 AT TIME 35.0000 HOURS
 LINK PU04_9 0.0000 AT TIME 59.0000 HOURS
 LINK PU04_9 0.0000 AT TIME 83.0000 HOURS
 LINK PU04_9 0.0000 AT TIME 107.0000 HOURS

LINK PU05_9 0.0000 AT TIME 11.0000 HOURS
 LINK PU05_9 0.0000 AT TIME 35.0000 HOURS
 LINK PU05_9 0.0000 AT TIME 59.0000 HOURS
 LINK PU05_9 0.0000 AT TIME 83.0000 HOURS
 LINK PU05_9 0.0000 AT TIME 107.0000 HOURS
 LINK PU06_10 0.0000 AT TIME 11.0000 HOURS
 LINK PU06_10 0.0000 AT TIME 35.0000 HOURS
 LINK PU06_10 0.0000 AT TIME 59.0000 HOURS
 LINK PU06_10 0.0000 AT TIME 83.0000 HOURS
 LINK PU06_10 0.0000 AT TIME 107.0000 HOURS
 LINK PU07_10 0.0000 AT TIME 11.0000 HOURS
 LINK PU07_10 0.0000 AT TIME 35.0000 HOURS
 LINK PU07_10 0.0000 AT TIME 59.0000 HOURS
 LINK PU07_10 0.0000 AT TIME 83.0000 HOURS
 LINK PU07_10 0.0000 AT TIME 107.0000 HOURS
 LINK PU08_9 0.0000 AT TIME 11.0000 HOURS
 LINK PU08_9 0.0000 AT TIME 35.0000 HOURS
 LINK PU08_9 0.0000 AT TIME 59.0000 HOURS
 LINK PU08_9 0.0000 AT TIME 83.0000 HOURS
 LINK PU08_9 0.0000 AT TIME 107.0000 HOURS
 LINK PU09_9 0.0000 AT TIME 11.0000 HOURS
 LINK PU09_9 0.0000 AT TIME 35.0000 HOURS
 LINK PU09_9 0.0000 AT TIME 59.0000 HOURS
 LINK PU09_9 0.0000 AT TIME 83.0000 HOURS
 LINK PU09_9 0.0000 AT TIME 107.0000 HOURS
 LINK PU10_11 0.0000 AT TIME 11.0000 HOURS
 LINK PU10_11 0.0000 AT TIME 35.0000 HOURS
 LINK PU10_11 0.0000 AT TIME 59.0000 HOURS
 LINK PU10_11 0.0000 AT TIME 83.0000 HOURS
 LINK PU10_11 0.0000 AT TIME 107.0000 HOURS
 LINK PU11_11 0.0000 AT TIME 11.0000 HOURS
 LINK PU11_11 0.0000 AT TIME 35.0000 HOURS
 LINK PU11_11 0.0000 AT TIME 59.0000 HOURS
 LINK PU11_11 0.0000 AT TIME 83.0000 HOURS
 LINK PU11_11 0.0000 AT TIME 107.0000 HOURS
 LINK PU12_8 0.0000 AT TIME 11.0000 HOURS
 LINK PU12_8 0.0000 AT TIME 35.0000 HOURS
 LINK PU12_8 0.0000 AT TIME 59.0000 HOURS
 LINK PU12_8 0.0000 AT TIME 83.0000 HOURS
 LINK PU12_8 0.0000 AT TIME 107.0000 HOURS
 LINK V2 1.0000 IF NODE T2 BELOW 0.6030
 LINK V2 0.0000 IF NODE T2 ABOVE 5.3297

PU_x_y donde “x” es el número de bomba e “y” el número de su curva característica.

6.7. LA SOLUCIÓN ÓPTIMA. DISCUSIÓN.

Esta red ideal fue propuesta para su resolución a los participantes de la 14ª Conferencia Análisis de las Redes de Distribución de Agua (WDSA por sus siglas en inglés) que se celebró en Adelaida (Australia) en septiembre de 2012. El objeto del reto de la “Batalla de las Redes de Agua II” (The Battle of the Water Networks II, BWN-II) era la sana competencia en la búsqueda de nuevas estrategias y algoritmos para obtener buenas soluciones, próximas a la óptima, en el diseño y operación de redes de distribución de agua complejas como las que se pueden encontrar en la realidad.

Muchos de los participantes son reputados profesionales y docentes con un profundo conocimiento del funcionamiento de las redes de distribución de agua y, en la mayoría de casos, expertos en alguna técnica de optimización que adaptan o perfeccionan para resolver la red de la “batalla”.

La mayoría aplicaron técnicas heurísticas para manejar un problema tan grande y complejo. Muchos se valieron de su experiencia y juicio ingenieril para reducir el número de variables de decisión, acotar sus rangos o simplemente introducir algunas mejoras al objeto de guiar la búsqueda de la solución óptima. Y los planteamientos también fueron distintos. Algunos resolvieron este problema de múltiples objetivos aplicando técnicas mono-objetivo con una única función conteniendo a todos los objetivos, otros técnicas multi-objetivo con diferentes funciones a minimizar y otros, directamente, convinieron optimizar la red en base a uno o dos de los objetivos.

Ejemplo de algunas de las soluciones que se presentaron en la Conferencia son las que se resumen a continuación. Sus resultados permiten comparar la aptitud de las hipótesis y técnicas que emplearon y al mismo tiempo, con las que se han aplicado en el desarrollo de esta Tesina Final de Máster.

Saldarriga et al. aplican una metodología basada los conceptos “superficie de presión óptima” (Optimal Pressure Surface, OPS), que asigna una presión total para cada nudo, y “potencia unitaria” (Unitary Power, UPO), que es una medida de la potencia disipada por

cada tubería. Primero plantean minimizar los costes de capital de los cambios que es necesario introducir en la red para que la presión de todos los nudos sea superior a la mínima en todo momento. Para ello comparan las distintas superficies de presiones actuales con la que correspondería a todos los nudos con una presión superior a la mínima. Para ajustarse a esta última, van cambiando tuberías gradualmente según un orden que viene marcado por la UP. Cada cambio de tubería requiere simular el modelo para comprobar si las presiones están por encima de la mínima. Posteriormente plantean minimizar los costes de operación cambiando el estado de las bombas de abierto a cerrado en determinadas horas, en particular en horas punta de tarifa eléctrica. Dividen la red en 4 sectores y localizan el nudo crítico de cada uno en el que se fijarán para resolver ambos problemas. Para el cambio de tuberías comienzan por la primera con mayor UP y que esté aguas arriba del nudo crítico. Para el ajuste de la operación modifican los patrones de funcionamiento de todas las bombas de manera que en el nudo crítico de cada sector la presión siempre esté por encima de la mínima, ya que entonces los demás nudos de cada sector también la superarán ([47]).

Yoo et al. plantean una optimización multiobjetivo para minimizar a la vez los tres objetivos (costes, emisiones de CO₂ y edad del agua) tratando de encontrar una única solución que los satisfaga y no un conjunto de soluciones óptimos de Pareto. Emplean una modificación de la metaheurística Harmony Search donde los valores de los parámetros HMCR y PAR cambian a lo largo de la optimización en vez de tomar un valor constante prefijado. Sobre un esqueleto de la red comparan dos posibles funciones objetivo, una que minimiza costes y otra que minimiza la suma de costes (en \$) y emisiones (en kg CO₂-e). El diseño que se obtiene con la primera función implica menores costes (de capital y de operación) mientras que el diseño que se obtiene con la segunda implica menores emisiones. Aplican sendos diseños a un análisis de la red por sectores y conviene combinarlos, en un único diseño de partida para una posterior optimización más fina, configurando cada sector según aquel diseño que minimizaba la suma de costes y emisiones en cada sector. Efectivamente el diseño así planteado lleva a un menor valor de los tres objetivos. Para minimizar la edad del agua consideran no aumentar el volumen en ningún depósito así que el parámetro WA no está explícitamente considerado en la función objetivo. Con el esqueleto de la red determinan el número de nuevas bombas que es necesario instalar y con la optimización fina las tuberías a modificar con nuevas tuberías en paralelo. Finalmente, para que los depósitos alcancen al

final un nivel mayor o igual que el que tenían al principio, introducen nuevos controles que fuerzan el funcionamiento de las bombas en las últimas horas, cuando la energía es más barata ([59]).

Stokes et al. utilizan un AG, el NSGA-II ([13]), en un planteamiento multiobjetivo del problema donde que tratan de minimizar tres funciones, una por cada objetivo. En una primera fase de análisis ingenieril deciden ampliar la estación de bombeo S1 (para aumentar la capacidad y poder atender las demandas) y modificar algunos controles (para ajustar las presiones de algunos nudos a la mínima). Fijan el número y tipo de bombas y optimizan 4 posibles escenarios según mantienen o sustituyen algunas bombas. Para una segunda fase eligen el escenario que da mejores resultados, principalmente en los objetivos de coste y emisiones, y utilizan el AG para optimizar su diseño, encontrando varias soluciones de compromiso que valoran globalmente mediante la suma normalizada del valor de cada uno de los tres objetivos en cada solución. Eligen algunos de los mejores diseños, los de menor suma, y optimizan su operación. Dado que la optimización multiobjetivo ofrece un conjunto de buenas soluciones, de las nuevas obtenidas al optimizar la operación, ofrecen como mejor solución aquella que minimiza el valor de la suma normalizada de los tres objetivos ([52]).

Tolson et al. también utilizan una técnica multiobjetivo para minimizar los tres objetivos individualmente, partiendo de una solución factible que obtienen manualmente tras un análisis de la red. El algoritmo de optimización sólo requiere de un parámetro, que dejan con su valor por defecto. Las soluciones factibles encontradas durante la optimización se almacenan en un archivo y las no factibles son directamente descartadas por lo que no es necesario definir ningún tipo de penalización. El primer paso consiste en obtener la solución de partida para la que deciden aumentar algunos depósitos, remplazar algunas tuberías con mucha pérdida de carga, conectar la nueva zona residencial a través de la tubería 2 y renovar aquellas bombas en las que el ahorro anual en operación compense la instalación de una nueva bomba del mismo tipo pero con mayor rendimiento. En el segundo paso se optimiza la red partiendo de la solución anterior. Excepto las bombas y la conexión de la nueva zona residencial, todos los demás parámetros y los niveles en algunos controles son variables de decisión. En un tercer paso se optimiza la operación de las soluciones de

compromiso obtenidas en el paso anterior. Ahora las variables de decisión afectan a los controles de tiempo y son las horas en las que forzar el apagado o encendido de las bombas, según el mayor o menor precio de la energía. Del conjunto de soluciones obtenidas en este paso, eligen aquella que minimiza la suma de las funciones normalizadas para los 3 objetivos ([54]).

Iglesias-Rey et al. aplican un AG modificado para la optimización de la red, simplificada previamente en base al concepto de curva de consigna con el que detectan los nudos críticos que se aseguran de mantener en la red simplificada. Para no perder información, el esqueleto de la red acumula las demandas en los nudos y algunos tramos se sustituyen por tuberías equivalentes. Proponen una única función objetivo que engloba a los tres objetivos (costes, emisiones y edad) y las penalizaciones por violación de las restricciones de presión mínima en nudos, nivel en depósito por encima del mínimo e igualdad de niveles al principio y al final de la simulación. En un principio, son variables de decisión todas las tuberías, a las que se podría instalar una tubería en paralelo, el estado de todas las bombas en cada hora y la posibilidad de instalar nuevas bombas. Sin embargo, para simplificar el problema y reducir los tiempos de cálculo asumen, entre otras, las siguientes hipótesis: nuevas tuberías en paralelo sólo para aquellas que tengan mucha pérdida de carga (más de 50 m/Km) con nudos próximos que presenten problemas de presión, sólo controles de bombeos basados niveles en depósito, evitando programar las bombas según las horas del día y, aparte de dos nuevas bombas en S1, no reemplazar bombas ni ampliar ninguna otra estación. Minimizan una sola función pero no se quedan con la solución que daría el mínimo valor de la misma sino que buscan las soluciones con el mejor valor (el menor) para cada objetivo y les asignan una puntuación global que depende del valor normalizado por cada objetivo con respecto su máximo y mínimo obtenidos tras varias simulaciones. Como es un problema de minimización finalmente presentan la solución de menor puntuación ([28]).

Alvisi et al. resuelven el problema en dos pasos. En el primero analizan la red e identifican algunas buenas soluciones, que refinan en el segundo paso con la optimización multiobjetivo, reduciendo el número de variables de decisión. El análisis revela que la estación S1 es insuficiente para atender el caudal demandado y que los controles de la operación no tienen en cuenta la tarifa eléctrica. Por ello añaden una bomba a S1 y

reprograman la operación de todas las bombas mediante controles programados (en los seis primeros días encendidas y apagadas en las horas de menor y mayor precio de la energía, respectivamente, y en el séptimo, cuando el precio es bajo durante todo el día, encendidas para que los depósitos acaben a un nivel próximo al de inicio). Tras el análisis, optimizan las buenas soluciones mejoradas mediante un AG multiobjetivo, de nuevo el NSGA-II ([13]) buscando minimizar los 3 objetivos, y donde las variables de decisión son el tipo de bomba a instalar en S1, las tuberías a remplazar o colocar en paralelo, el volumen a añadir a depósitos y las horas a las que encender y apagar las bombas según los controles programados. Posteriormente, llevan a cabo una segunda optimización partiendo de las soluciones de la primera. En esta ocasión consideran sólo dos objetivos, minimizar los costes y las emisiones, y la condición de $WA=0$ la introducen como una restricción más. Como solución final presentan una de las soluciones de compromiso a las que llegan tras la doble optimización ([04]).

Wu et al. emplean una variante de AG para optimizar la red. Como otros autores, resuelven el problema en varios pasos. En el primero optimizan la red considerando modificar las tuberías con mayores pérdidas de carga, para instalar nuevas en paralelo, y las estaciones de bombeo (añaden dos bombas nuevas en S1 y una en el resto). A continuación optimizan esta red mejorada siendo las variables de decisión el diámetro de las tuberías de la nueva zona residencial, los volúmenes de ampliación de depósitos y la operación de las bombas, con controles basados en nivel para las bombas nuevas y basados en tiempo para las existentes. Por último, optimizan de nuevo la red teniendo en cuenta los criterios de operación obtenidos, buscando ajustar el diámetro de las tuberías en paralelo del primer paso. En cada proceso de optimización consideran distintas funciones objetivo, todas ellas basadas en los costes, según las variables de decisión que consideran en cada momento. Por tanto, en la solución óptima a la que llegan, las emisiones de CO_2 y la edad del agua son consecuencia del diseño y operación de la red optimizados en coste ([57]).

	Saldarriaga et al.	Yoo et al.	Stokes et al.	Tolson et al.	Iglesias-Rey et al.	Alvisi et al.	Wu et al.
COSTES ANUALES DE CAPITAL (\$/año)	106.809,01	712.242	ND⁵	95.770,85	87.093,37	ND	194.470
TUBERÍAS	92.789,01	680.400	ND	65.012,35	79.160,37	ND	127.318
DEPÓSITOS	14.020	0	ND	14.020	0	ND	58.680
BOMBAS	0	40.519	ND	16.738	7.404	ND	8.472
VÁLVULAS	0	323	ND	0	529	ND	0
COSTES ANUALES DE OPERACIÓN (\$/año)	212.791,88	161.029	ND	221.687,20	239.006,15	ND	1.319.915
COSTES ANUALES (\$/año)	319.600,89	882.271	1.000.000	317.457,55	326.099,52	414.257	1.514.385
EMISIONES CO₂ (kgCO₂-e/año)	2.506.219,04	2.600.656	3.620.000	1.922.531,56	2.055.239,27	2.913.365	2.183.931
CAPITAL	138.371,39	785.491	ND	60.228,94	81.590,46	ND	146.767
OPERACIÓN	2.367.847,65	1.815.165	ND	1.862.302,62	1.973.648,81	ND	2.037.164
EDAD DEL AGUA (horas)	5,30	0,19	0,12	0,14	0,61	0,00	0,11

Tabla 12. Resultados de los citados participantes en la BWN-II

A la vista de estos resultados, la solución óptima alcanzada en esta TFM se encuadra dentro de los valores alcanzados por los participantes. Sin embargo, cabe decir que en este caso no se ha llegado a una solución que cumpla perfectamente con las restricciones ya que se obtiene un déficit de presión global en la red de 45,25 mca/semana y una diferencia 0,52 m/semana entre los niveles en depósito al principio y al final de la simulación. Pero no olvidemos que, en mayor o menor medida todos introdujeron alguna simplificación, o se decantaron por una solución de entre las varias soluciones de compromiso que consiguieron.

⁵ No disponible

	SOLUCIÓN ÓPTIMA
COSTES ANUALES DE CAPITAL (\$/año)	129.927,26
TUBERÍAS	125.794,26
DEPÓSITOS	0
BOMBAS	4.133,00
VÁLVULAS	0
COSTES ANUALES DE OPERACIÓN (\$/año)	209.229,51
COSTES ANUALES (\$/año)	339.156,77
EMISIONES CO₂ (kgCO₂-e/año)	2.587.174,96
CAPITAL	144.030,05
OPERACIÓN	2.443.144,91
EDAD DEL AGUA (horas)	3,47

Tabla 13. Resultados

CAPÍTULO 07: CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han introducido algunos de los problemas que pueden presentarse en las redes de distribución de agua, las cuales deben ser capaces de hacer frente a unas demandas que pueden cambiar en el tiempo o diferir de las estimadas inicialmente, entregando el agua a los usuarios en unas adecuadas condiciones de calidad y servicio. Todo ello al tiempo que la infraestructura y los equipos envejecen y requieren de un mayor desembolso en operaciones de reparación y mantenimiento.

Tales problemas son objeto de investigación de muchos profesionales que buscan obtener o mejorar las técnicas de resolución y diseño en un contexto donde los objetivos pueden ser muchos y distintos, la mayoría de veces interrelacionados, entrando en conflicto entre sí. Sobre todo debido al avance de la informática, estas técnicas han evolucionado hacia procesos cada vez más sofisticados pero también más eficientes.

Dentro de dichas técnicas están las heurísticas que, entre otras ventajas, permiten manejar variables de tipo discreto lo que es especialmente idóneo para el caso de las redes de distribución de agua donde los elementos deben ajustarse a tamaños comerciales. En particular los algoritmos genéticos, que destacan por su versatilidad y relativa sencillez, lo que hace que puedan ser aplicados a problemas de carácter muy distinto y por personas no especialmente familiarizadas con los problemas de optimización ni los algoritmos genéticos gracias a los paquetes de software comercial que, precisamente por esto, los incorporan.

Quizá lo más dificultoso ha sido la conexión del programa de optimización, EVOLVER, con el simulador hidráulico, EPANET. Utilizar EVOLVER permite trabajar en el entorno de la hoja de cálculo EXCEL, evita la programación de la optimización de manera específica para el problema a resolver y hace posible la conexión con otros programas a través de macros. Sin embargo, aunque se puede conectar con EPANET gracias a la TOOLKIT, no es posible sacar el máximo partido al AG de EVOLVER debido a algunas limitaciones a la hora de utilizar las funciones de esta herramienta. De no existir esas limitaciones, probablemente, se hubiera llegado a obtener un mejor diseño de la red.

Las limitaciones que se han encontrado en el desarrollo de esta TFM han sido:

- ✓ La opción EN_TANKDIAM de la función ENgetnodevalue no funciona, por lo que no se pudo utilizar para trasladar el valor del diámetro de los depósitos de EPANET a EVOLVER. Este valor se calculó indirectamente a partir del volumen y nivel iniciales del depósito, que sí se pudieron extraer mediante EN_INITVOLUME y EN_TANKLEVEL. (La opción EN_TANKDIAM para insertar el diámetro a través de ENsetnodevalue, en cambio, sí funciona)
- ✓ No es posible insertar la propiedad de curva característica de una bomba mediante TOOLKIT, por tanto, la curva de una bomba no se puede modificar. No existe función. Y esto es un gran inconveniente en un problema de optimización porque la curva característica podría haber sido una variable de decisión del problema a tener en cuenta por el AG.
- ✓ No es posible insertar nuevos controles simples. Sólo se pueden modificar las líneas de control simple escritas en el archivo .INP de la red, para cambiar el objeto, el atributo y/o el operador de relación.
- ✓ No es posible insertar nuevos ni modificar los controles programados existentes.
- ✓ Las funciones ENrunH y ENnextH permiten simular la red en periodo extendido obteniendo los valores de las variables de estado de la red en un determinado instante t. Sin embargo el lapso de tiempo tstep entre un instante y el siguiente es computado automáticamente como el menor de una serie de tiempos, que no necesariamente coinciden con los intervalos de cálculo y de presentación de valores al simular el modelo de la red en EPANET.
- ✓ En la AYUDA de EPANET se llama depósito a lo que en el modelo se llama embalse (fuente infinita) y tanque a los que en el modelo se llama depósito (almacén variable con el tiempo). Esto llevó a confusión durante el desarrollo de la TFM ya que los depósitos (embalses en el modelo) tienen la propiedad "patrón de carga", que permite modelizar la variación de carga (altura piezométrica) con el tiempo, mediante un patrón de tiempo, mientras que los tanques (depósitos en el modelo) no la tienen.

Para los depósitos del modelo, la idea era implementar, mediante un patrón de tiempo, un nivel mínimo que variase con el tiempo y que al final de la simulación fuese igual al nivel inicial. De esta manera, o bien el depósito acabaría al mínimo, esto es, con su nivel inicial, o bien con un nivel mayor. Para mayor claridad, esta idea puede apreciarse en la siguiente imagen:

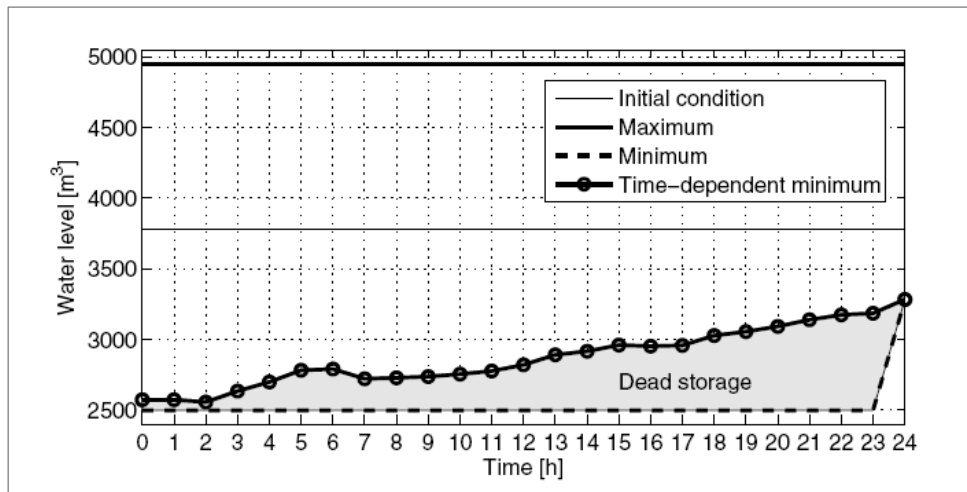


Fig.24. Nivel mínimo en depósito variable con el tiempo

Fuente: Bene, József Gergely ([07])

Sin embargo, no es posible asignar un patrón de este tipo a un depósito en el modelo. El nivel mínimo en un depósito es un valor fijo que se mantiene a lo largo de toda la simulación.

Quizá resolver alguna de estas limitaciones podría ser objeto de desarrollos futuros. No obstante, a pesar de estas limitaciones, se ha conseguido resolver una red compleja, casi real, utilizando unas herramientas que están al alcance de cualquier profesional, consiguiendo una buena solución, óptima, dentro de los órdenes de magnitud de las conseguidas por otros autores con mayor experiencia.

ANEXOS

ANEXO 1. MACROS PROGRAMADAS

METOVALORES

Sub metovalores()

'Declaración de variables

'Para tuberías y nudos

Dim hora, nudo, tubería As Integer

Dim num_horas, num_nudos, num_tuberías As Variant

Dim presión_nudo() As Single

Dim pmin As Variant

Dim base, def As Variant

Dim dem_base(), deficit() As Single

'Para las válvulas

Dim consigna As Variant

Dim diametro_N15 As Variant

'Para los bombeos

Dim energía() As Single

Dim cindex, ctype, tub, setting, nudocontrola, level As Variant

Dim x, var As Variant

Dim depositocontrola As Variant

'Para los depósitos

Dim hminini(), hmax(), hini(), volini(), volfin(), tankdiam(), hfin() As Single

Dim hmin() As Single

'Para el cálculo en general

Dim it, i, diametro, nuevocoef_HW, aux As Variant

Dim tipo, estado As Variant

num_horas = 168

pmin = 25

'Abrir el motor de cálculo

ENopen "D:\TFM\WDSA01.inp", "D:\TFM\WDSA01.rpt", ""

'Redimensionar matrices

ENgetcount EN_NODECOUNT, num_nudos

ENgetcount EN_LINKCOUNT, num_tuberías

'Tuberías y nudos

ReDim presión_nudo(1 To num_horas, 1 To num_nudos)

ReDim dem_base(1 To num_nudos)

ReDim deficit(1 To num_horas, 1 To num_nudos)

'Bombeos

ReDim energía(1 To num_horas, 1 To num_tuberías)

'Depósitos

ReDim hini(1 To num_nudos)

```

ReDim hfin(1 To num_nudos)
ReDim volini(1 To num_nudos)
ReDim volfin(1 To num_nudos)
ReDim tankdiam(1 To num_nudos)
ReDim hminini(1 To num_nudos)
ReDim hmin(1 To num_nudos)
ReDim hmax(1 To num_nudos)

```

```

.....
'"METO VALORES DE LA OPTIMIZACIÓN A EPANET"'
.....

```

'Meto el diámetro (Se elige en el Excel)

```

For tuberia = 1 To 443
    diametro = Worksheets("Tuberias").Cells(4 + tuberia, 3)
    nuevocoef_HW = Worksheets("Tuberias").Cells(4 + tuberia, 11)
    ENsetlinkvalue tuberia, EN_DIAMETER, diametro
    ENsetlinkvalue tuberia, EN_ROUGHNESS, nuevocoef_HW
Next

```

'Meto nuevas consignas Válvulas Reductoras Presión (tipo=3 es VRP)(V1,V45,V47) (la N15 va a parte)

```

i = 1
For tuberia = 458 To 460
    consigna = Worksheets("Valvulas").Cells(4 + i, 8)
    ENsetlinkvalue tuberia, EN_INITSETTING, consigna
    i = i + 1
Next

```

'La válvula de regulación V2 (índice de tubería 461)

'Y funcionará según CONTROLES

```

estado = Worksheets("Valvulas").Cells(12, 5)
ENsetlinkvalue 461, EN_INITSTATUS, estado

```

'Y el estado inicial de la válvula para el nuevo sector (la N15)(índice de tubería 462)

```

diametro_N15 = Worksheets("Tuberias").Cells(435, 3)
ENsetlinkvalue 462, EN_DIAMETER, diametro_N15
estado = Worksheets("Valvulas").Cells(8, 7)
Select Case estado
    'Abierta
    Case 1
        ENsetlinkvalue 462, EN_INITSTATUS, 1
    'Regulando
    Case 2
        consigna = Worksheets("Valvulas").Cells(8, 8)
        ENsetlinkvalue 462, EN_INITSETTING, consigna
End Select

```

'Meto los valores de DISEÑO DE DEPÓSITOS (nuevo diámetro y nivel mínimo)

```

i = 0
For nudo = 1 To num_nudos
    ENgetnodetype nudo, tipo
    If tipo = 2 Then
        hmax(nudo) = Worksheets("Depositos").Cells(5 + i, 13)
    End If
Next

```

```

hini(nudo) = Worksheets("Depositos").Cells(5 + i, 14)
hmin(nudo) = Worksheets("Depositos").Cells(5 + i, 15)

ENsetnodevalue nudo, EN_MAXLEVEL, hmax(nudo)
ENsetnodevalue nudo, EN_TANKLEVEL, hini(nudo)
'Tanklevel es initial water level in tank
ENsetnodevalue nudo, EN_MINLEVEL, hmin(nudo)
tankdiam(nudo) = Worksheets("Depositos").Cells(5 + i, 12)
ENsetnodevalue nudo, EN_TANKDIAM, tankdiam(nudo)
i = i + 1
End If
Next

.....
''''CONSIGNAS EN CONTROLES COMO VARIABLES DE DECISIÓN''''
.....

'Introduzco CONTROLES SEGÚN NIVELES DEPÓSITOS con Harranque y Hparada
x = 0

'Pongo sólo las bombas. Así no recorro todas las tuberías buscando las tipo=2
For tuberia = 446 To 457
    tub = tuberia

    var = (2 * x) + 1
    cindex = var
    ctype = 0 'de arranque
    setting = 1 'porque arranque
    nudocontrola = Worksheets("Bombas").Cells(5 + x, 7)
    level = Worksheets("Bombas").Cells(5 + x, 15)

    Worksheets("Bombas").Cells(5 + x, 9) = cindex
    ENsetcontrol cindex, ctype, tub, setting, nudocontrola, level

    var = (2 * x) + 2
    cindex = var
    ctype = 1 'de parada
    setting = 0 'porque parada
    nudocontrola = Worksheets("Bombas").Cells(5 + x, 11)
    level = Worksheets("Bombas").Cells(5 + x, 19) 'OJO

    Worksheets("Bombas").Cells(5 + x, 13) = cindex
    ENsetcontrol cindex, ctype, tub, setting, nudocontrola, level

    x = x + 1
Next 'del for tuberia

'Introduzco CONTROLES SEGÚN HORAS DEL DÍA

'Ya hay metidos 24 controles, 2 por cada una de las 12 bombas (1 de arranque y 1 de parada)
'Los controles de tiempo empiezan en el 25
x = 25

```

i = 0

'Aplico controles de tiempo a todas las bombas

For tuberia = 446 To 457

tub = tuberia

depositocontrola = Worksheets("Bombas").Cells(8 + i, 7)

For hora = 1 To num_horas

Select Case hora

Case 11, 35, 59, 83, 107

aux = hora * 3600

var = x

cindex = var

ctype = 2 'tipo timer

setting = 0 'parada

nudocontrola = 0 'pq tipo de control timer

level = aux

'que pare en hora punta (es la hora 11 del día lunes a viernes)

ENsetcontrol cindex, ctype, tub, setting, nudocontrola, level

x = x + 1

End Select

Next 'del for hora

i = i + 1

Next 'del for tuberia

'Introduzco CONTROLES PARA LA VÁLVULA V2, según niveles depósito T2

'Ya hay metidos:

'24 controles, 2 por cada una de las 12 bombas (1 de arranque y 1 de parada)

'60 controles de tiempo por cada tubería, de la 446 a la 457. Total=12x5=60

'El control de la V2 será el 85 PQ 24+60=84

x = 85

estado = Worksheets("Valvulas").Cells(12, 5)

If estado = 2 Then 'V2 regulando

tub = 461

var = x

cindex = var

ctype = 0 'cuando nivel T2 caiga por debajo de level, abrir válvula

setting = 1 'porque apertura

nudocontrola = Worksheets("Valvulas").Cells(18, 1)

level = Worksheets("Valvulas").Cells(18, 4)

Worksheets("Valvulas").Cells(18, 3) = cindex

ENsetcontrol cindex, ctype, tub, setting, nudocontrola, level

```
var = x + 1
cindex = var
ctype = 1 'cuando nivel T2 supere nivel de level, cerrar válvula
setting = 0 'porque cierre
nudocontrola = Worksheets("Valvulas").Cells(18, 5)
level = Worksheets("Valvulas").Cells(18, 8)
```

```
Worksheets("Valvulas").Cells(18, 7) = cindex
ENsetcontrol cindex, ctype, tub, setting, nudocontrola, level
```

End If

If estado = 1 Then 'V2 estaría fijada abierta, quito control poniendo tubería =0

```
tub = 0
```

```
var = x
cindex = var
ctype = 0 'cuando nivel T2 caiga por debajo de level, abrir válvula
setting = 1 'porque apertura
nudocontrola = Worksheets("Valvulas").Cells(18, 1)
level = Worksheets("Valvulas").Cells(18, 4)
```

```
Worksheets("Valvulas").Cells(18, 3) = cindex
ENsetcontrol cindex, ctype, tub, setting, nudocontrola, level
```

```
var = x + 1
cindex = var
ctype = 1 'cuando nivel T2 supere nivel de level, cerrar válvula
setting = 0 'porque cierre
nudocontrola = Worksheets("Valvulas").Cells(18, 5)
level = Worksheets("Valvulas").Cells(18, 8)
```

```
Worksheets("Valvulas").Cells(18, 7) = cindex
ENsetcontrol cindex, ctype, tub, setting, nudocontrola, level
```

End If

'Guardo archivo

```
ENsaveinpfiler "D:\TFM\WDSA02.inp"
```

'Cierro el motor de cálculo

```
ENclose
```

End Sub

CORROMODELO

Sub corromodelo()

'Declaración de variables

'Para tuberías y nudos

Dim hora, nudo, tubería As Integer

Dim num_horas, num_nudos, num_tuberías As Variant

Dim pmin As Variant

Dim presion_nudo() As Single

Dim dem_base() As Single

'Para la penalización por presión

Dim deficitnudo() As Single

Dim deficit_hora As Variant

Dim rdto(), Q_rdto() As Single

Dim penaliza_hora As Variant

Dim Q_rdto_totalhora As Variant

Dim deficit_total, penaliza_total As Variant

Dim pkwh As Variant

'Para los bombeos

Dim energia(), caudalbomba() As Single

Dim costesem_total, costesembomba, ener_total As Variant

'Para los depósitos

Dim hini(), hmin(), hmax(), tankdiam(), hfin(), volfin() As Single

'Para el cálculo en general

Dim tipo, i, difinifin As Variant

Dim t, tstep As Long

Dim aux As Variant

num_horas = 168

pmin = 25

'Abrir el motor de cálculo

ENopen "D:\TFM\WDSA02.inp", "D:\TFM\WDSA02.rpt", ""

'Redimensionar matrices

ENgetcount EN_NODECOUNT, num_nudos

ENgetcount EN_LINKCOUNT, num_tuberías

'Tuberías y nudos

ReDim presion_nudo(1 To num_horas, 1 To num_nudos)

ReDim dem_base(1 To num_nudos)

'Penalización por presión

ReDim deficitnudo(1 To num_horas, 1 To num_nudos)

ReDim rdto(1 To num_tuberías)

ReDim Q_rdto(1 To num_tuberías)

'Bombeos

ReDim energia(1 To num_horas, 1 To num_tuberías)

ReDim caudalbomba(1 To num_horas, 1 To num_tuberías)

'Depósitos

```

ReDim hini(1 To num_nudos)
ReDim hmin(1 To num_nudos)
ReDim hmax(1 To num_nudos)
ReDim hfin(1 To num_nudos)
ReDim volfin(1 To num_nudos)
ReDim tankdiam(1 To num_nudos)

```

```

.....
""CORRER EL MODELO Y OBTENER RESULTADOS"
.....

```

'Abrir módulo hidráulico y empezar simulación

```

ENopenH
ENinitH 0

```

'Obtengo la demanda base para cada nudo (la usaré con el déficit de presión)

```

For nudo = 1 To num_nudos
  ENgetnodevalue nudo, EN_BASEDEMAND, dem_base(nudo)
Next

```

'Obtengo info para cada hora ENrunH

```

aux = 0
ener_total = 0
For hora = 1 To num_horas
  tstep = (hora - 1) * 3600
  Do
    ENrunH t
  If t = tstep Then

```

'Obtengo la presión en cada nudo

```

For nudo = 1 To num_nudos
  ENgetnodevalue nudo, EN_PRESSURE, presion_nudo(hora, nudo)
  If presion_nudo(hora, nudo) <= -10.33 Then
    presion_nudo(hora, nudo) = -10.33
  End If
Next

```

'Y el nivel y volumen en depósitos al final simulación

```

i = 0
For nudo = 1 To num_nudos
  ENgetnodetype nudo, tipo
  If tipo = 2 Then
    If hora = 168 Then
      tankdiam(nudo) = Worksheets("Depositos").Cells(5 + i, 12)
      volfin(nudo) = presion_nudo(168, nudo) * 3.1415 * (tankdiam(nudo) / 2) ^ 2
      Worksheets("Depositos").Cells(5 + i, 18) = presion_nudo(168, nudo)
      Worksheets("Depositos").Cells(5 + i, 19) = volfin(nudo)
      i = i + 1
    End If
  End If
Next

```

'Y el caudal y la energía consumida por los bombes (líneas 448 a 460)

For tuberia = 446 To num_tuberias

ENgetlinktype tuberia, tipo

If tipo = 2 Then

ENgetlinkvalue tuberia, EN_FLOW, caudalbomba(hora, tuberia)

ENgetlinkvalue tuberia, EN_ENERGY, energia(hora, tuberia)

ener_total = ener_total + energia(hora, tuberia)

'Para sacar el CO2 por operación bombes

End If

Next

'Fin del If t=tstep

End If

ENnextH 3600

Loop Until t = tstep

Next

'Cierro simulador hidráulico

ENcloseH

.....
 """"CÁLCULOS Y RESULTADOS A HOJA EXCEL""""

'Energía total consumida por bombes para cálculo del CO2 por operación bombes

Worksheets("RESUMEN").Cells(32, 2) = ener_total

'Calculo la DIFERENCIA DE NIVEL entre principio y fin de la semana

difinifin = 0

i = 0

For nudo = 403 To 409

ENgetnodetype nudo, tipo

If tipo = 2 Then

hini(nudo) = Worksheets("Depositos").Cells(5 + i, 14) 'debe ser la mitad de Hmáx

hfin(nudo) = Worksheets("Depositos").Cells(5 + i, 18) 'nivel final obtenido

If hini(nudo) > hfin(nudo) Then

difinifin = difinifin + Abs(hini(nudo) - hfin(nudo))

End If

i = i + 1

End If

Next

Worksheets("RESUMEN").Cells(13, 2) = difinifin

'Se multiplicará por un factor de penalización que está en la hoja "RESUMEN" del Excel

'Calculo el DÉFICIT DE PRESIÓN TOTAL y lo llevo a la hoja Excel "RESUMEN"

'Utilizo el caudal bombeado por cada bomba, en cada t, para calcular la penalización por déficit presión

deficit_total = 0


```
penaliza_total = 0
i = 0
For tuberia = 446 To 457
  'Saco el rdto bomba, nueva 75% existente 65%
  aux = Worksheets("Bombas").Cells(5 + i, 3)
  If aux = "E" Then
    rdto(tuberia) = 0.65
  End If
  If aux = "N" Then
    rdto(tuberia) = 0.75
  End If
  i = i + 1
Next

For hora = 1 To num_horas

  i = 0
  deficit_hora = 0

  'Déficit en los 399 nudos de consumo
  For nudo = 1 To 399

    If dem_base(nudo) <> 0 And presion_nudo(hora, nudo) >= pmin Then
      deficitnudo(hora, nudo) = 0
    End If

    If dem_base(nudo) <> 0 And presion_nudo(hora, nudo) < pmin Then
      deficitnudo(hora, nudo) = pmin - presion_nudo(hora, nudo)
    End If

    If dem_base(nudo) = 0 And presion_nudo(hora, nudo) >= 0 Then
      deficitnudo(hora, nudo) = 0
    End If

    If dem_base(nudo) = 0 And presion_nudo(hora, nudo) < 0 Then
      deficitnudo(hora, nudo) = 0 - presion_nudo(hora, nudo)
    End If

    deficit_hora = deficit_hora + deficitnudo(hora, nudo)
  Next

  'La penalización depende de la tarifa eléctrica
  Select Case hora
    Case 1 To 7, 22 To 31, 46 To 55, 70 To 79, 94 To 103, 118 To 127, 141 To 161, 166 To 168
      pkwh = 0.0672
    Case 8 To 10, 18 To 21, 32 To 34, 42 To 45, 56 To 58, 66 To 69, 80 To 82, 90 To 93, 104 To 106,
    114 To 117, 128 To 140, 162 To 165
      pkwh = 0.1094
    Case 11 To 17, 35 To 41, 59 To 65, 83 To 89, 107 To 113
      pkwh = 0.2768
  End Select
```

```

'Arriba he sacado el caudalbomba (hora, tubería)
Q_rdto_totalhora = 0
For tubería = 446 To 457
  Q_rdto(tubería) = caudalbomba(hora, tubería) / (1000 * rdto(tubería))
  'Divido entre 1000 para pasar caudalbomba que son l/s a m3/s
  Q_rdto_totalhora = Q_rdto_totalhora + Q_rdto(tubería)
Next

'Calculo la penalización por déficit de P por cada hora
penaliza_hora = 9.81 * pkwh * Q_rdto_totalhora * deficit_hora
deficit_total = deficit_total + deficit_hora
penaliza_total = penaliza_total + penaliza_hora
Next

Worksheets("RESUMEN").Cells(9, 2) = deficit_total
Worksheets("RESUMEN").Cells(10, 2) = penaliza_total
'Penaliza_total son dólares/semana. En el Excel, multiplicados por 52 para tener penalización en
dólares/año

'Calculo el COSTE DE OPERACIÓN SEMANAL de los bombeos y lo llevo a la hoja "RESUMEN"
costesem_total = 0
i = 0
For tubería = 446 To 457
  costesembomba = 0
  For hora = 1 To num_horas
    Select Case hora
      Case 1 To 7, 22 To 31, 46 To 55, 70 To 79, 94 To 103, 118 To 127, 141 To 161, 166 To 168
        costesem_total = costesem_total + energia(hora, tubería) * 0.0672
        costesembomba = costesembomba + energia(hora, tubería) * 0.0672
      Case 8 To 10, 18 To 21, 32 To 34, 42 To 45, 56 To 58, 66 To 69, 80 To 82, 90 To 93, 104 To 106,
114 To 117, 128 To 140, 162 To 165
        costesem_total = costesem_total + energia(hora, tubería) * 0.1094
        costesembomba = costesembomba + energia(hora, tubería) * 0.1094
      Case 11 To 17, 35 To 41, 59 To 65, 83 To 89, 107 To 113
        costesem_total = costesem_total + energia(hora, tubería) * 0.2768
        costesembomba = costesembomba + energia(hora, tubería) * 0.2768
    End Select
  Next
  Worksheets("Bombas").Cells(5 + i, 5) = costesembomba
  i = i + 1
Next
Worksheets("RESUMEN").Cells(21, 2) = costesem_total

'Cierro el motor de cálculo
ENclose
End Sub

```

ANEXO 2. RESULTADOS DE DISEÑO

TUBERÍAS

Diámetro óptimo y opción de remplazar o nueva tubería en paralelo:

ID	DIÁMETRO ORIGINAL	DIÁMETRO ÓPTIMO AG	DIÁMETRO FINAL	D comercial	Coste	D	D comercial	Coste	Coste	
			mm	remplazar	REEMPLAZAR	paralelo	paralelo	PARALELO	SOLUCIÓN	
P10	76.00	102.0	102.0	102	658.40	68.03	102	789.92	658.40	R
P100	406.00	711.0	711.0	711	4323.83	583.68	610	4617.26	4323.83	R
P1000	203.00	406.0	406.0	406	2120.93	351.61	356	2178.84	2120.93	R
P1025	76.00	102.0	102.0	102	325.59	68.03	102	390.62	325.59	R
P1026	76.00	102.0	102.0	102	379.02	68.03	102	454.73	379.02	R
P1027	51.00	102.0	102.0	102	684.08	88.33	102	820.73	684.08	R
P1028	51.00	102.0	102.0	102	79.53	88.33	102	95.41	79.53	R
P102	76.00	102.0	102.0	102	1018.97	68.03	102	1222.52	1018.97	R
P1030	76.00	102.0	102.0	102	791.53	68.03	102	949.64	791.53	R
P1040	152.00	762.0	762.0	762	1254.57	746.69	762	1505.19	1254.57	R
P1044	203.00	457.0	457.0	457	1460.76	409.44	457	1753.57	1460.76	R
P11	101.60	102.0	102.0	102	693.47	9.02	102	832.00	693.47	R
P126	76.00	102.0	102.0	102	910.78	68.03	102	1092.71	910.78	R
P130	76.00	102.0	102.0	102	471.92	68.03	102	566.20	471.92	R
P131	76.00	102.0	102.0	102	718.82	68.03	102	862.41	718.82	R
P132	76.00	102.0	102.0	102	559.68	68.03	102	671.48	559.68	R
P134	76.00	102.0	102.0	102	571.64	68.03	102	685.84	571.64	R
P144	76.00	102.0	102.0	102	1086.86	68.03	102	1303.98	1086.86	R
P155	101.60	102.0	102.0	102	493.45	9.02	102	592.02	493.45	R
P158	76.00	102.0	102.0	102	580.70	68.03	102	696.70	580.70	R
P160	76.00	102.0	102.0	102	570.73	68.03	102	684.74	570.73	R
P161	76.00	203.0	203.0	203	487.75	188.24	203	584.09	487.75	R
P166	101.60	102.0	102.0	102	1952.85	9.02	102	2342.95	1952.85	R
P184	101.60	102.0	102.0	102	493.45	9.02	102	592.02	493.45	R
P195	76.00	102.0	102.0	102	1199.38	68.03	102	1438.97	1199.38	R
P201	76.00	102.0	102.0	102	849.20	68.03	102	1018.83	849.20	R
P211	76.00	102.0	102.0	102	1681.36	68.03	102	2017.23	1681.36	R
P22	406.00	711.0	711.0	711	22737.38	583.68	610	24280.44	22737.38	R
P220	76.00	102.0	102.0	102	567.82	68.03	102	681.25	567.82	R
P228	76.00	102.0	102.0	102	355.00	68.03	102	425.92	355.00	R
P230	76.00	102.0	102.0	102	952.41	68.03	102	1142.66	952.41	R
P231	76.00	102.0	102.0	102	101.47	68.03	102	121.73	101.47	R
P233	76.00	102.0	102.0	102	487.46	68.03	102	584.84	487.46	R
P234	76.00	102.0	102.0	102	345.95	68.03	102	415.05	345.95	R
P235	76.00	102.0	102.0	102	770.67	68.03	102	924.62	770.67	R
P249	51.00	102.0	102.0	102	236.25	88.33	102	283.45	236.25	R
P255	51.00	102.0	102.0	102	632.72	88.33	102	759.12	632.72	R
P264	101.60	102.0	102.0	102	97.48	9.02	102	116.95	97.48	R
P266	101.60	102.0	102.0	102	459.46	9.02	102	551.24	459.46	R
P270	101.60	102.0	102.0	102	734.27	9.02	102	880.95	734.27	R
P284	76.20	102.0	102.0	102	1653.44	67.81	102	1983.73	1653.44	R

ID	DIÁMETRO	DIÁMETRO	DIÁMETRO	D	Coste	D	D	Coste	Coste	
	ORIGINAL	ÓPTIMO AG	FINAL mm	comercial reemplazar	REEMPLAZAR	paralelo	comercial paralelo	PARALELO	SOLUCIÓN	
P285	76.20	102.0	102.0	102	1086.20	67.81	102	1303.18	1086.20	R
P286	101.60	203.0	203.0	203	1882.52	175.75	203	2254.35	1882.52	R
P287	254.00	406.0	406.0	406	875.78	316.73	356	899.69	875.78	R
P288	76.20	102.0	102.0	102	1884.21	67.81	102	2260.60	1884.21	R
P29	152.00	457.0	457.0	457	455.32	430.98	457	546.59	455.32	R
P290	76.20	102.0	102.0	102	384.59	67.81	102	461.41	384.59	R
P292	305.00	762.0	762.0	762	576.80	698.30	711	651.54	576.80	R
P295	76.00	102.0	102.0	102	1107.14	68.03	102	1328.30	1107.14	R
P296	76.00	102.0	102.0	102	1926.84	68.03	102	2311.74	1926.84	R
P298	305.00	711.0	711.0	711	1607.61	642.26	711	1930.09	1607.61	R
P303	76.00	102.0	102.0	102	1096.42	68.03	102	1315.44	1096.42	R
P304	101.60	102.0	102.0	102	2233.23	9.02	102	2679.34	2233.23	R
P309	101.60	102.0	102.0	102	1070.33	9.02	102	1284.14	1070.33	R
P322	610.00	762.0	583.7	762	489.90	456.67	457	306.48	306.48	P
P323	610.00	762.0	578.5	762	488.62	456.67	457	305.68	305.68	P
P330	76.00	508.0	508.0	508	1647.04	502.28	508	1975.65	1647.04	R
P331	51.00	102.0	102.0	102	776.65	88.33	102	931.80	776.65	R
P338	76.00	406.0	406.0	406	1443.72	398.82	406	1730.08	1443.72	R
P344	152.00	305.0	305.0	305	688.86	264.43	305	827.35	688.86	R
P346	51.00	102.0	102.0	102	456.30	88.33	102	547.45	456.30	R
P349	305.00	356.0	297.0	356	650.17	183.61	203	566.85	566.85	P
P372	101.60	356.0	356.0	356	106.70	341.19	356	128.01	106.70	R
P38	76.00	102.0	102.0	102	1408.46	68.03	102	1689.82	1408.46	R
P380	254.00	508.0	508.0	508	118.12	439.94	457	127.65	118.12	R
P384	76.00	203.0	203.0	203	316.29	188.24	203	378.77	316.29	R
P386	152.00	203.0	203.0	203	98.25	134.55	152	98.25	98.25	R
P409	152.40	356.0	356.0	356	438.44	321.73	356	526.02	438.44	R
P445	254.00	762.0	762.0	762	332.28	718.42	762	398.66	332.28	R
P492	101.60	102.0	102.0	102	1307.33	9.02	102	1568.48	1307.33	R
P501	152.40	457.0	457.0	457	251.30	430.84	457	301.68	251.30	R
P502	76.20	102.0	102.0	102	76.37	67.81	102	91.62	76.37	R
P53	203.00	762.0	762.0	762	439.63	734.46	762	527.46	439.63	R
P54	51.00	102.0	102.0	102	927.98	88.33	102	1113.35	927.98	R
P55	76.00	152.0	152.0	152	1008.59	131.64	152	1208.31	1008.59	R
P596	76.00	102.0	102.0	102	634.80	68.03	102	761.61	634.80	R
P609	76.00	102.0	102.0	102	715.24	68.03	102	858.12	715.24	R
P610	76.00	102.0	102.0	102	1716.68	68.03	102	2059.60	1716.68	R
P754	51.00	102.0	102.0	102	768.59	88.33	102	922.13	768.59	R
P784	102.00	152.0	152.0	152	898.50	112.69	152	1076.42	898.50	R
P787	102.00	152.0	152.0	152	1283.51	112.69	152	1537.67	1283.51	R
P801	203.00	508.0	508.0	508	233.53	465.68	508	280.12	233.53	R
P806	152.00	203.0	203.0	203	393.37	134.55	152	393.37	393.37	R
P813	152.00	711.0	711.0	711	1236.47	694.56	711	1484.50	1236.47	R
P815	102.00	762.0	762.0	762	2152.15	755.14	762	2582.08	2152.15	R
P823	76.00	102.0	102.0	102	156.56	68.03	102	187.83	156.56	R
P826	76.00	102.0	102.0	102	2786.26	68.03	102	3342.84	2786.26	R
P827	76.00	102.0	102.0	102	989.47	68.03	102	1187.13	989.47	R
P83	610.00	762.0	567.3	762	644.96	456.67	457	403.48	403.48	P
P830	76.00	254.0	254.0	254	1157.33	242.36	254	1388.62	1157.33	R

ID	DIÁMETRO	DIÁMETRO	DIÁMETRO	D	Coste	D	D	Coste	Coste	
	ORIGINAL	ÓPTIMO AG	FINAL mm	comercial reemplazar	REEMPLAZAR	paralelo	comercial paralelo	PARALELO	SOLUCIÓN	
P831	76.00	356.0	356.0	356	1033.76	347.79	356	1240.27	1033.76	R
P841	76.00	152.0	152.0	152	3513.08	131.64	152	4208.74	3513.08	R
P842	52.00	102.0	102.0	102	535.25	87.75	102	642.17	535.25	R
P85	76.00	305.0	305.0	305	557.05	295.38	305	669.05	557.05	R
P850	101.60	102.0	102.0	102	2003.79	9.02	102	2404.07	2003.79	R
P851	76.00	102.0	102.0	102	1901.16	68.03	102	2280.94	1901.16	R
P859	152.00	356.0	356.0	356	1509.26	321.92	356	1810.75	1509.26	R
P880	76.00	102.0	102.0	102	937.70	68.03	102	1125.01	937.70	R
P892	254.00	762.0	762.0	762	1294.61	718.42	762	1553.23	1294.61	R
P94	305.00	762.0	762.0	762	2187.51	698.30	711	2470.96	2187.51	R
P943	76.00	102.0	102.0	102	699.79	68.03	102	839.57	699.79	R
P976	76.00	102.0	102.0	102	692.47	68.03	102	830.80	692.47	R
P977	102.00	203.0	203.0	203	556.36	175.51	203	666.25	556.36	R
P978	76.00	102.0	102.0	102	1487.24	68.03	102	1784.33	1487.24	R
P981	76.00	102.0	102.0	102	300.74	68.03	102	360.81	300.74	R
P983	101.60	102.0	102.0	102	1497.46	9.02	102	1796.59	1497.46	R
P984	101.60	356.0	356.0	356	266.42	341.19	356	319.64	266.42	R
P986	101.60	102.0	102.0	102	1907.48	9.02	102	2288.51	1907.48	R
P987	101.60	102.0	102.0	102	785.79	9.02	102	942.76	785.79	R
P988	101.60	102.0	102.0	102	80.94	9.02	102	97.11	80.94	R
P989	51.00	102.0	102.0	102	761.11	88.33	102	913.15	761.11	R

Diámetro óptimo, coeficiente de rugosidad final, coste de capital por tuberías y emisiones CO₂ por tuberías:

ID	DIÁMETRO ÓPTIMO AG	COEF H-W TRAS OPTIM	LONGITUD	coste tub/m	coste tub	CO2/m	CO2 tub
			m	\$/m/año	\$/año	kgCO2-e/m/año	kgCO2-e/año
P10	102.0	120.00	79.23	8.31	658.40	5.9	467.46
P100	711.0	120.00	107.88	40.08	4323.83	66.57	7181.57
P1000	406.0	120.00	109.27	19.41	2120.93	33.09	3615.74
P1025	102.0	120.00	39.18	8.31	325.59	5.9	231.16
P1026	102.0	120.00	45.61	8.31	379.02	5.9	269.10
P1027	102.0	120.00	82.32	8.31	684.08	5.9	485.69
P1028	102.0	120.00	9.57	8.31	79.53	5.9	56.46
P102	102.0	120.00	122.62	8.31	1018.97	5.9	723.46
P1030	102.0	120.00	95.25	8.31	791.53	5.9	561.98
P1040	762.0	120.00	29.45	42.6	1254.57	72.58	2137.48
P1044	457.0	120.00	65.80	22.2	1460.76	38.35	2523.43
P11	102.0	120.00	83.45	8.31	693.47	5.9	492.35
P126	102.0	120.00	109.60	8.31	910.78	5.9	646.64
P130	102.0	120.00	56.79	8.31	471.92	5.9	335.06
P131	102.0	120.00	86.50	8.31	718.82	5.9	510.35
P132	102.0	120.00	67.35	8.31	559.68	5.9	397.36
P134	102.0	120.00	68.79	8.31	571.64	5.9	405.86
P144	102.0	120.00	130.79	8.31	1086.86	5.9	771.66
P155	102.0	120.00	59.38	8.31	493.45	5.9	350.34
P158	102.0	120.00	69.88	8.31	580.70	5.9	412.29
P160	102.0	120.00	68.68	8.31	570.73	5.9	405.21
P161	203.0	120.00	40.31	12.1	487.75	13.94	561.92
P166	102.0	120.00	235.00	8.31	1952.85	5.9	1386.50
P184	102.0	120.00	59.38	8.31	493.45	5.9	350.34
P195	102.0	120.00	144.33	8.31	1199.38	5.9	851.55
P201	102.0	120.00	102.19	8.31	849.20	5.9	602.92
P211	102.0	120.00	202.33	8.31	1681.36	5.9	1193.75
P22	711.0	120.00	567.30	40.08	22737.38	66.57	37765.16
P220	102.0	120.00	68.33	8.31	567.82	5.9	403.15
P228	102.0	120.00	42.72	8.31	355.00	5.9	252.05
P230	102.0	120.00	114.61	8.31	952.41	5.9	676.20
P231	102.0	120.00	12.21	8.31	101.47	5.9	72.04
P233	102.0	120.00	58.66	8.31	487.46	5.9	346.09
P234	102.0	120.00	41.63	8.31	345.95	5.9	245.62
P235	102.0	120.00	92.74	8.31	770.67	5.9	547.17
P249	102.0	120.00	28.43	8.31	236.25	5.9	167.74
P255	102.0	120.00	76.14	8.31	632.72	5.9	449.23
P264	102.0	120.00	11.73	8.31	97.48	5.9	69.21
P266	102.0	120.00	55.29	8.31	459.46	5.9	326.21
P270	102.0	120.00	88.36	8.31	734.27	5.9	521.32
P284	102.0	120.00	198.97	8.31	1653.44	5.9	1173.92
P285	102.0	120.00	130.71	8.31	1086.20	5.9	771.19
P286	203.0	120.00	155.58	12.1	1882.52	13.94	2168.79
P287	406.0	120.00	45.12	19.41	875.78	33.09	1493.02
P288	102.0	120.00	226.74	8.31	1884.21	5.9	1337.77

ID	DIÁMETRO ÓPTIMO AG	COEF H-W TRAS OPTIM	LONGITUD	coste tub/m	coste tub	CO2/m	CO2 tub
			m	\$/m/año	\$/año	kgCO2-e/m/año	kgCO2-e/año
P29	457.0	120.00	20.51	22.2	455.32	38.35	786.56
P290	102.0	120.00	46.28	8.31	384.59	5.9	273.05
P292	762.0	120.00	13.54	42.6	576.80	72.58	982.73
P295	102.0	120.00	133.23	8.31	1107.14	5.9	786.06
P296	102.0	120.00	231.87	8.31	1926.84	5.9	1368.03
P298	711.0	120.00	40.11	40.08	1607.61	66.57	2670.12
P303	102.0	120.00	131.94	8.31	1096.42	5.9	778.45
P304	102.0	120.00	268.74	8.31	2233.23	5.9	1585.57
P309	102.0	120.00	128.80	8.31	1070.33	5.9	759.92
P322	762.0	100.42	11.50	26.65	306.48	38.35	441.03
P323	762.0	97.38	11.47	26.65	305.68	38.35	439.87
P330	508.0	120.00	66.79	24.66	1647.04	43.76	2922.73
P331	102.0	120.00	93.46	8.31	776.65	5.9	551.41
P338	406.0	120.00	74.38	19.41	1443.72	33.09	2461.23
P344	305.0	120.00	45.26	15.22	688.86	23.16	1048.22
P346	102.0	120.00	54.91	8.31	456.30	5.9	323.97
P349	356.0	104.07	39.12	14.49	566.85	13.94	545.33
P372	356.0	120.00	6.42	16.62	106.70	28.09	180.34
P38	102.0	120.00	169.49	8.31	1408.46	5.9	999.99
P380	508.0	120.00	4.79	24.66	118.12	43.76	209.61
P384	203.0	120.00	26.14	12.1	316.29	13.94	364.39
P386	203.0	120.00	8.12	12.1	98.25	13.94	113.19
P409	356.0	120.00	26.38	16.62	438.44	28.09	741.01
P445	762.0	120.00	7.80	42.6	332.28	72.58	566.12
P492	102.0	120.00	157.32	8.31	1307.33	5.9	928.19
P501	457.0	120.00	11.32	22.2	251.30	38.35	434.12
P502	102.0	120.00	9.19	8.31	76.37	5.9	54.22
P53	762.0	120.00	10.32	42.6	439.63	72.58	749.03
P54	102.0	120.00	111.67	8.31	927.98	5.9	658.85
P55	152.0	120.00	99.86	10.1	1008.59	9.71	969.64
P596	102.0	120.00	76.39	8.31	634.80	5.9	450.70
P609	102.0	120.00	86.07	8.31	715.24	5.9	507.81
P610	102.0	120.00	206.58	8.31	1716.68	5.9	1218.82
P754	102.0	120.00	92.49	8.31	768.59	5.9	545.69
P784	152.0	120.00	88.96	10.1	898.50	9.71	863.80
P787	152.0	120.00	127.08	10.1	1283.51	9.71	1233.95
P801	508.0	120.00	9.47	24.66	233.53	43.76	414.41
P806	203.0	120.00	32.51	12.1	393.37	13.94	453.19
P813	711.0	120.00	30.85	40.08	1236.47	66.57	2053.68
P815	762.0	120.00	50.52	42.6	2152.15	72.58	3666.74
P823	102.0	120.00	18.84	8.31	156.56	5.9	111.16
P826	102.0	120.00	335.29	8.31	2786.26	5.9	1978.21
P827	102.0	120.00	119.07	8.31	989.47	5.9	702.51
P83	762.0	91.60	15.14	26.65	403.48	38.35	580.62
P830	254.0	120.00	89.30	12.96	1157.33	18.43	1645.80
P831	356.0	120.00	62.20	16.62	1033.76	28.09	1747.20
P841	152.0	120.00	347.83	10.1	3513.08	9.71	3377.43
P842	102.0	120.00	64.41	8.31	535.25	5.9	380.02
P85	305.0	120.00	36.60	15.22	557.05	23.16	847.66
P850	102.0	120.00	241.13	8.31	2003.79	5.9	1422.67

ID	DIÁMETRO ÓPTIMO AG	COEF H-W TRAS OPTIM	LONGITUD	coste tub/m	coste tub	CO2/m	CO2 tub
			m	\$/m/año	\$/año	kgCO2-e/m/año	kgCO2-e/año
P851	102.0	120.00	228.78	8.31	1901.16	5.9	1349.80
P859	356.0	120.00	90.81	16.62	1509.26	28.09	2550.85
P880	102.0	120.00	112.84	8.31	937.70	5.9	665.76
P892	762.0	120.00	30.39	42.6	1294.61	72.58	2205.71
P94	762.0	120.00	51.35	42.6	2187.51	72.58	3726.98
P943	102.0	120.00	84.21	8.31	699.79	5.9	496.84
P976	102.0	120.00	83.33	8.31	692.47	5.9	491.65
P977	203.0	120.00	45.98	12.1	556.36	13.94	640.96
P978	102.0	120.00	178.97	8.31	1487.24	5.9	1055.92
P981	102.0	120.00	36.19	8.31	300.74	5.9	213.52
P983	102.0	120.00	180.20	8.31	1497.46	5.9	1063.18
P984	356.0	120.00	16.03	16.62	266.42	28.09	450.28
P986	102.0	120.00	229.54	8.31	1907.48	5.9	1354.29
P987	102.0	120.00	94.56	8.31	785.79	5.9	557.90
P988	102.0	120.00	9.74	8.31	80.94	5.9	57.47
P989	102.0	120.00	91.59	8.31	761.11	5.9	540.38

VÁLVULAS

Consigna óptima VRP:

ID	Diámetro INI	Consigna INI	CONSIGNA
	(mm)	(mca)	ÓPTIMA (mca)
v1	203.20	40	40
V45	152.40	40	50
V47	101.60	40	60

ID	Diámetro INI	Consigna INI	DIÁMETRO	Índice	CONSIGNA
	(mm)	(mca)	ÓPTIMO (mm)	ESTADO	ÓPTIMA (mca)
N15	12.00	0	102	1	48

1= ABIERTA

2 =REGULANDO

Estado óptimo VRG V2 y controles:

ID	Diámetro INI	Estado INI	Índice
	(mm)	0 = CERRADA	ESTADO
V2	254.00	0	2

1= ABIERTA

2 =CON CONTROLES

Nudo controla abre V2 índice	Nudo controla abre V2 ID	Nº control abre V2	H depósito para abre V2	Nudo controla cierra V2 índice	Nudo controla cierra V2 ID	Nº control cierra V2	H depósito para cierra V2
408	T2	85	0.60	408	T2	86	5.33

BOMBEO

Coste de instalación y de operación bombes:

ID	índice	existente	Coste instalación	Coste operación	Coste operación
	línea toolkit	o nueva	(\$/año)	semanal (\$/semana)	anual (\$/año)
PU01_8	446	E	0.00	873.53	34,941.40
PU02_8	447	E	0.00	490.86	19,634.36
PU03_8	448	E	0.00	564.12	22,564.96
PU04_9	449	E	0.00	507.79	20,311.51
PU05_9	450	E	0.00	15.51	620.54
PU06_10	451	E	0.00	206.57	8,262.87
PU07_10	452	E	0.00	1,104.41	44,176.34
PU08_9	453	E	0.00	521.78	20,871.25
PU09_9	454	E	0.00	25.40	1,016.19
PU10_11	455	E	0.00	349.98	13,999.17
PU11_11	456	E	0.00	75.38	3,015.29
PU12_8	457	N	4,133.00	495.39	19,815.64
SUMA			4,133.00	5,230.74	209,229.51

Niveles en depósito para control de bombes (controles simples):

ID	índice	Nudo controla arranque	Nudo controla arranque	H arranque	Nudo controla parada	Nudo controla parada	H parada
	línea toolkit	índice	ID	(m)	índice	ID	(m)
PU01_8	446	404	T1	4.00	404	T1	6.30
PU02_8	447	404	T1	3.01	404	T1	5.95
PU03_8	448	404	T1	3.25	404	T1	5.08
PU04_9	449	403	T3	3.00	403	T3	5.30
PU05_9	450	403	T3	1.00	403	T3	3.50
PU06_10	451	409	T4	2.00	409	T4	3.50
PU07_10	452	409	T4	3.00	409	T4	4.50
PU08_9	453	407	T5	1.50	407	T5	4.50
PU09_9	454	407	T5	0.50	407	T5	3.00
PU10_11	455	405	T7	3.49	405	T7	4.57
PU11_11	456	405	T7	3.47	405	T7	4.00
PU12_8	457	404	T1	3.45	404	T1	4.45

DEPÓSITOS

Cálculo de diámetro original a partir de otros parámetros de los depósitos:

ID	lo saca macro nec para calc Diám	lo saca macro	calculado pq toolkit lo saca mal	lo saca macro	calculado
	Nivel ini ORIG (m)	Vol ini ORIG (m3)	Diám ORIG (m3)	Nivel máx ORIG (m)	Vol máx ORIG (m3)
T3	3.00	444.17	13.73	6.75	999.39
T1	3.00	2,308.34	31.30	6.50	5,001.40
T7	2.50	100.10	7.14	5.00	200.20
T6	5.20	283.39	8.33	5.50	299.74
T5	1.00	111.03	11.89	4.50	499.65
T2	0.50	169.57	20.78	5.90	2,000.93
T4	2.50	266.03	11.64	4.70	500.14

Volumen a añadir a los depósitos:

ID	Vol añadir	Vol añadir (m3)	V'max	Diámetro D'	H' ini	Nivel h=168	V' fin OBTENIDO
	ÍNDICE AG	TRAS OPTIM	(m3)	(m)	(m)	(m)	(m3)
T3	1	0.00	999.39	13.73	3.38	3.31	490.57
T1	1	0.00	5,001.40	31.30	3.25	3.06	2,357.22
T7	1	0.00	200.20	7.14	2.50	3.49	139.81
T6	1	0.00	299.74	8.33	2.75	2.69	146.86
T5	1	0.00	499.65	11.89	2.25	2.26	250.57
T2	1	0.00	2,000.93	20.78	2.95	2.73	926.91
T4	1	0.00	500.14	11.64	2.35	2.35	250.38

REFERENCIAS

- [01] Abdel-Gawad, Hossama A. "Optimal design of pipe network by an improved genetic algorithm". Sixth international water technology conference, Alexandria, Egypt. IWTC 2001.
- [02] Abebe, A.J.; Solomatine, D.P. "Application of global optimization to the design of pipe networks". International Conference on Hydroinformatics, Copenhagen. Agosto 1998.
- [03] Alperovits, E.; Shamir, U. "Design of optimal water distribution systems". Water resources research. Vol 13. Diciembre 1977.
- [04] Alvisi S., Creaco E., Franchini M. (2012). "A multi-step approach for optimal design of the D-Town pipe network model". Proceedings of the 14th water distribution systems analysis symposium, Engineers Australia. Adelaida, Australia.
- [05] Babayan, Artem; Kapelan, Zoran; Savic, Dragan; Walters, Godfrey. "Least-cost design of water distribution networks under demand uncertainty". Journal of water resources, planning and management. Septiembre/octubre 2005.
- [06] Baños Navarro, Raúl. "Metaheurísticas híbridas para optimización monoobjetivo y multiobjetivo. Paralelización y aplicaciones". Tesis doctoral. Universidad de Almería. Departamento de Arquitectura de Computadores y Electrónica. Diciembre 2006.
- [07] Bene, József Gergely. "Pump schedule optimization techniques for water distribution systems". Tesis doctoral. ISBN 978-952-62-0266-2. Universidad de Oulu. 2013.
- [08] Boulos, Paul F.; Wu, Zheng; Orr, Chun Hou; Moore, Michael; Hsiung, Pau; Thomas, Devan. "Optimal pump operation of water distribution systems using genetic algorithms". Distribution system symposium. AWWA. San Diego, 2001.
- [09] Coello Coello, Carlos A.; Lamont, Gary B.; Van Veldhuizen, David A. "Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems". 2nd Edition. ISBN 978-0-387-33254-3. Springer Science & Business Media, LLC. 2007.

-
- [10] Costa, A.L.H.; de Medeiros, J.L.; Pessoa, F.L.P. "Optimization of pipe networks including pumps by simulated annealing". *Brazilian Journal of chemical engineering*. Vol 17. Diciembre 2000.
- [11] Cunha, Maria da Conceição; Ribeiro, Luisa. "Tabu search algorithms for water network optimization". *European Journal of Operational Research*. Vol. 157, pp. 746–758. 2004.
- [12] Dandy, Graeme C.; Simpson, Angus R.; Murphy, Laurence J. "An improved genetic algorithm for pipe network optimization". *Water resources research*. Vol 32. Febrero 1996.
- [13] Deb, Kalyanmoy; Pratap, Amrit; Agarwal, Sameer; Meyarivan, T. "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. Vol. 6. Abril 2002.
- [14] Duan, Qingyun; Sorooshian, Soroosh; Gupta, Vijai. "Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models". *Water resources research*. Vol 28. Abril 1992.
- [15] Eusuff, Muzaffar M.; Lansey, Kevin E. "Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm". *Journal of water resources, planning and management*. Mayo/junio 2003.
- [16] Farmani, Raziye; Wright, Jonathan A. "Self-adaptative fitness formulation for constrained optimization". *IEEE Transactions on evolutionary computation*. Octubre 2003.
- [17] Farmani, Raziye; Wright, Jonathan A.; Savic, Dragan A.; Walters, Godfrey A. "Self-adaptative fitness formulation for evolutionary constrained optimization of water systems". *Journal of computing in civil engineering*. Abril 2005.
- [18] Farmani, Raziye; Walters, Godfrey; Savic, Dragan. "Evolutionary multi-objective optimization of the design and operation of water distribution network: total cost vs. reliability vs. water quality". *Journal of hydroinformatics*. 2006.
- [19] Geem, Zong Woo; Kim, Joong Hoon; Loganathan, G. V. "A new heuristic optimization algorithm: harmony search". *Simulation*. Febrero 2001.
- [20] Geem, Zong Woo. "Improved harmony search from ensemble of music players". *KES 2006, Part I, LNAI 4251*, pp. 86 – 93. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.

-
- [21] Geem, Zong Woo; Cho, Yoon-Ho. "Optimal design of water distribution networks using parameter-setting-free harmony search for two major parameters". *Journal of water resources, planning and management*. Julio/agosto 2011.
- [22] Geem, Zong Woo. "Optimal cost design of water distribution networks using harmony search".
- [23] Gil Montoya, Francisco. "Optimización de tensión en redes de distribución utilizando técnicas evolutivas". Tesis doctoral. ISBN: 978-84-692-2258-4. Universidad de Granada. 2009.
- [24] Haestad Methods; Walski, Thomas M.; Chase, Donald V.; Savic, Dragan A.; Grayman, Walter; Beckwith, Stephen; Koelle, Edmundo. "Advanced water distribution modeling and management". 1st Edition. ISBN 0-9714141-2-2. Haestad Press. 2003.
- [25] Halhal, D.; Walters, G.A.; Ouazar, D.; Savic, D.A. "Water network rehabilitation with a structured messy genetic algorithm".
- [26] Hendrickson, Thomas P.; Horvath, Arpad. "A perspective on cost-effectiveness of greenhouse gas reduction solutions in water distribution systems". Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, USA. *Environmental Research Letters*. Febrero 2014.
- [27] Herstein, L.M.; Filion, Y.R.; Hall, K.R. "Evaluating environmental impact in water distribution system design". *Journal of infrastructure systems*. ASCE. Septiembre 2009.
- [28] Iglesias Rey P.L., Martínez Solano F.J., Mora Meliá, D., Ribelles Aguilar (2012). "The battle water networks II: combination of meta-heuristic technics with the concept of setpoint function in water network optimization algorithms". *Proceedings of the 14th water distribution systems analysis symposium*, Engineers Australia. Adelaida, Australia.
- [29] Kadu, Mahendra S.; Gupta, Rajesh; Bhave, Pramod R. "Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space". *Journal of water resources, planning and management*. Marzo/abril 2008.
- [30] Kennedy, James; Eberhart, Russell. "Particle swarm optimization". 1995.
- [31] Lansey, Kevin E. "Optimal design of water distribution systems". Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics. University of Arizona. Tucson, AZ.
-

-
- [32] Liong, Shie-Yui; Atiquzzaman, Md. "Optimal design of water distribution network using shuffled complex evolution". Journal of the institution of engineers, Singapore. Vol. 44. 2004.
- [33] López Herradón, Javier. "Experimentación con algoritmos genéticos para la búsqueda de funciones de distancia en RNBR". PFC. Universidad Carlos III de Madrid.
- [34] López-Ibáñez, Manuel; Prasad, T. Devi; Paechter, Ben. "Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks". Journal of water resources, planning and management. Julio/agosto 2008.
- [35] Marchi, Angela; Dandy, Graeme; Wilkins, Andrew; Rohrlach, Hayley. "A methodology for comparing evolutionary algorithms for the optimization of water distribution networks". Journal of water resources, planning and management. Octubre 2012.
- [36] Martí Cunqueiro, Rafael. "Procedimientos metaheurísticos en optimización combinatoria". Universidad de Valencia. Departamento de de estadística e investigación operativa.
- [37] Montalvo, Idel; Izquierdo, Joaquín; Pérez, Rafael; Tung, Michael M. "Particle swarm optimization applied to the design of water supply systems". Computers and mathematics with applications. Vol. 56, pp. 769–776. 2008.
- [38] Montalvo, I.; Izquierdo, J.; Pérez, R., Iglesias, P. L. "A diversity-enriched variant of discrete PSO applied to the design of Water Distribution Networks". Engineering optimization journal. Diciembre 2010.
- [39] Montesinos, Pilar; García-Guzmán, Adela; Ayuso, José Luis. "Water distribution network optimization using a modified genetic algorithm". Water Resources Research. Vol.35. Noviembre 1999.
- [40] Mora Melia, Daniel. "Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia". Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería hidráulica y medio ambiente. UPV. Julio 2012.
- [41] Nicklow, John; Reed, Patrick; Savic, Dragan; Dessalegne, Tibebe; Harrell, Laura; Chan-Hilton, Amy; Karamouz, Mohammad; Minsker, Barbara; Ostfeld, Avi; Singh, Abhishek; Zechman, Emily. "State of the art for genetic algorithms and beyond in water resources

planning and management”. Journal of water resources, planning and management. Julio/agosto 2010.

[42] Ostfeld, Avi; Tubaltzev, Ariel. “Ant colony optimization for least-cost design and operation of pumping water distribution systems”. Journal of water resources, planning and management. Marzo/abril 2008.

[43] Pérez García, Rafael. “Dimensionado óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando los elementos de regulación”. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería hidráulica y medio ambiente. UPV. Octubre 1993.

[44] Raad, Darian Nicholas. "Multi-objective optimisation of water distribution systems design using metaheuristics". Tesis, 2011.

[45] Reza, Juan; Martínez, Juan. “Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks”. Water resources research. Vol 42. Mayo 2006.

[46] Riojas Cañari, Alicia Cirila. “Conceptos, algoritmo y aplicación al problema de las N – reinas. Capítulo3. Búsqueda de tabú”. Monografía. Lima, 2005.

[47] Saldarriaga J., Páez D., Hernández D., Bohórquez, J. (2012). “An energy based methodology applied to D-Town”. Proceedings of the 14th water distribution systems analysis symposium, Engineers Australia. Adelaida, Australia.

[48] Savic, Dragan A.; Walters, Godfrey A. "Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks". Journal of water resources, planning and management. Abril 1997.

[49] Simpson, Angus R.; Dandy, Graeme C.; Murphy, Laurence J. "Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization". Journal of water resources, planning and management. Agosto 1994.

[50] Simpson, A.R.; Maier, H.R.; Foong, W.K.; Phang, K.Y.; Seah, H.Y.; Tan, C.L.. “Selection of parameters for ant colony optimisation applied to the optimal design of water distribution systems”. 2001.

[51] Sousa, Joaquim; Cunha, Maria da Conceição; Marques, Alfeu Sá. “A simulated annealing algorithm for the optimal operation of water distribution networks”. Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering. Montreal – Canadá. Junio 2006.

-
- [52] Stokes C., Wu W., Dandy G. (2012) "Battle of the water networks II: combining engineering judgement with genetic algorithm optimization". Proceedings of the 14th water distribution systems analysis symposium, Engineers Australia. Adelaide, Australia.
- [53] Tolson, Bryan A.; Maier, Holger R.; Simpson, Angus R.; Lence, Barbara J. "Genetic algorithms for reliability-based optimization of water distribution systems". Journal of water resources, planning and management, 2004.
- [54] Tolson B.A., Khedr A., Asadzadeh M. (2012) "The battle of the water networks (BWN-II): PADDs based solution approach". Proceedings of the 14th water distribution systems analysis symposium, Engineers Australia. Adelaide, Australia.
- [55] Wu, Wenyan; Simpson, Angus R.; Maier, Holger R. "Accounting for greenhouse gas emissions in multiobjective algorithm optimization of water distribution systems". Journal of water resources planning and management. Marzo/abril 2010.
- [56] Wu, Wenyan; Maier, Holger R.; Simpson, Angus R. "Single-objective versus multiobjective optimization of water distribution systems accounting for greenhouse gas emissions by carbon pricing". Journal of water resources planning and management. Septiembre/octubre 2010.
- [57] Wu Z.Y., Elsayed S.M., Song Y. (2012) "High performance evolutionary optimization for Battle of the Water Network II". Proceedings of the 14th water distribution systems analysis symposium, Engineers Australia. Adelaide, Australia.
- [58] Yaseen, Ashraf El-Sayed Mohamed. "Reliability-based optimization of potable water networks using genetic algorithms and Monte Carlo simulation". Tesis. Mansoura University. 2007.
- [59] Yoo D.G., Lee H.M., Kim J.H. (2012) "Optimal design of D-Town network using multi-objective harmony search algorithm". Proceedings of the 14th water distribution systems analysis symposium, Engineers Australia. Adelaide, Australia.
- [60] Zecchin, Aaron C.; Maier, Holger R.; Simpson, Angus R.; Leonard, Michael; Nixon, John B. "Ant colony optimization applied to water distribution system design: comparative study of five algorithms". Journal of water resources, planning and management. Enero/febrero 2007.

-
- [61] Zecchin, Aaron Carlo; Simpson, Angus Ross; Maier, Holger R.; Marchi, Angela; Nixon, John B. “Improved understanding of the searching behavior of ant colony optimization algorithms applied to the water distribution design problem”. Water Resources Research. Vol.48. 2012.
- [62] “Estrategia valenciana ante el cambio climático 2013-2020. Mitigación y adaptación”. Conselleria d’infraestructures, territori i medi ambient. Generalitat Valenciana.
- [63] “Guía para el usuario de Evolver. Solver de algoritmo genético para Excel. Versión 6”. Marzo 2013. Palisade Corporation. <http://www.palisade.com>.
- [64] “Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero”. BOE de 10 de marzo de 2005.
- [65] “Manual del usuario de EPANET”. Grupo REDHISP. Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. Octubre 2002.

Recursos web:

- [66] www.sendeco2.com
- [67] www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4060014/html/contenido.html
- [68] www.epa.gov