



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE

**NUEVAS HERRAMIENTAS PARA LA GESTION TÉCNICA DE
REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA BASADAS
EN EL MODELO MATEMÁTICO Y
LA TOPOLOGÍA DE LA RED**

TESIS DOCTORAL

Presentado Por:

OSCAR TOMAS VEGAS NIÑO

Dirigido Por:

Dr. FERNANDO MARTÍNEZ ALZAMORA

Valencia, diciembre 2022

Dedicado a mi familia

AGRADECIMIENTOS

Una tesis doctoral lleva años de esfuerzo y dedicación, y para lograrlo se necesita el apoyo de personas. Por ello, deseo manifestar mi gratitud a todos y a todas las personas que de alguna manera han aportado con sus conocimientos, comentarios o simplemente palabras de ánimo para llegar a culminar este gran reto.

Primero, agradecer a Fernando Martínez Alzamora, director de Tesis, quien ha sabido conducir este trabajo hasta su culminación, por su amplia experiencia como docente investigador, director de proyectos de investigación y a sus ideas innovadoras en temas relacionados a la hidráulica urbana. También, agradecer su confianza depositada en mi persona para desarrollar diversos trabajos desde el grupo de investigación REDHISP-IIAMA.

A todos mis profesores del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medioambiente, quienes aportaron nuevos conocimientos a mi vida profesional en Hidráulica Urbana y Recursos Hídricos.

A mis compañeros de trabajo del grupo de investigación REDHISP del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), pasados y presentes (Vicente, Hugo, Camilo, Diego, Igor, Joan Carles, Vanesa, Juan, Néstor y Miguel Ángel), por hacer que el día a día sea mejor y por compartir anécdotas, vivencias y conocimientos. Quiero hacer también una mención especial a Vicente Bou, con quien compartí sesiones interesantes sobre programación y la Toolkit de EPANET.

Un agradecimiento también especial a Velitchko Tzatchkov (Investigador del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) y Andrés Segura Azpeitia (Director de la Empresa Ingeniería Integral del Agua S.A, México) con quienes tuve la oportunidad de aprender, trabajar y compartir experiencias profesionales.

A mi familia, que a pesar de la distancia que nos separa siempre me han demostrado su apoyo en las decisiones más difíciles de mi vida con palabras de aliento y muestras de cariño. A Juan Miguel e Ingrid por ser como mis segundos padres en España, y a Estefanía por su amor infinito y apoyo incondicional en esos momentos en que uno más lo necesita.

A Pronabec y Fondecyt (Perú), al Ministerio de Ciencia e Innovación de España, al Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, y a la Universitat Politècnica de València por las ayudas concedidas para cursar los estudios de máster, doctorado y estancias de investigación.

Oscar Vegas
Diciembre, 2022

RESUMEN

Debido a la escasez del recurso hídrico que azota a muchos países del mundo, los gobiernos están implementando políticas públicas para que las entidades gestoras del servicio de agua potable, juntamente con las instituciones públicas y la empresa privada, implementen tecnologías digitales para monitorizar y tener un mejor control de la gestión de las redes hidráulicas. Sin embargo, es posible que las entidades gestoras no posean un modelo matemático que les permita analizar el comportamiento hidráulico de la red ante distintos escenarios como el aumento de la demanda en ciertas zonas, la avería en una tubería principal, la ampliación de la red hidráulica; o tomar decisiones como la ubicación de nuevas fuentes de agua, la ubicación de sensores o elementos que permitan delimitar sectores hidráulicos (caudalímetros y válvulas de corte), entre otras.

El objetivo principal de este trabajo de investigación es desarrollar nuevos métodos basados en el modelo matemático y la topología de la red que ayuden a resolver los retos anteriores. Estos métodos, implementados en aplicaciones informáticas, pretenden ser de gran utilidad a las empresas de agua potable para comprobar la conectividad de la red e identificar las subredes con problemas de suministro o sin demandas de caudal asignadas; analizar la fiabilidad de la red bajo diversas circunstancias; ayudar a ubicar válvulas reductoras de presión, sensores y otros elementos de control, validar el proceso de asignación de las demandas, identificar derivaciones que causen un suministro deficiente en determinadas zonas; delimitar sectores de demanda sin afectar la red arterial de transporte y sectorizar una red hidráulica según el aporte de cada fuente al consumo de cada nodo; simplificar modelos de detalle que permitan minimizar los tiempos de cálculo para optimizar los procesos de toma de decisiones como el diseño de ampliaciones, la mejora energética o para dar una respuesta rápida en la operación en tiempo real; y por último, proporcionar métodos basados en la simulación hidráulica y en unas ecuaciones de tipo potencial-logarítmicas para convertir rugosidades absolutas de Darcy-Weisbach y coeficientes de rugosidad de Chezy-Manning en coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams para calibrar el modelo, en otras aplicaciones.

Todos los métodos han sido implementados en aplicaciones informáticas para automatizar el proceso de cálculo. Para ello, se ha utilizado el entorno de programación de Visual Studio 2019 Community (.NET), la librería de EPANET (v2.2) para ejecutar los cálculos hidráulicos, y la librería shapelib para visualizar los resultados de manera gráfica desde cualquier software de Sistema de Información Geográfica. Los resultados obtenidos han sido verificados con profusión, primero porque cada método se ha desarrollado considerando el modelo de una red real y después se ha validado con otros cinco modelos de redes reales de configuraciones diferentes, tamaños, elementos de regulación y leyes de control. Asimismo, dado que todas las herramientas están publicadas en el portal de investigadores de ResearchGate para su libre acceso, han podido ser testeadas por otros muchos usuarios interesados en su uso para analizar y dar solución a los problemas diversos en la gestión de las redes de abastecimiento de agua. Por último, todos estos algoritmos pueden ser implementados en otras plataformas digitales o entornos SIG desde los cuales se puede mejorar la interacción del usuario con la red, permitiendo al modelador u operador de la red tomar las mejores decisiones.

ABSTRACT

Due to the scarcity of water resources that plagues many countries in the world, governments are implementing public policies so that water management entities, together with public institutions and private companies, implement digital technologies to monitor and have a better control of the management of water networks. However, it is possible that the managing entities do not have a mathematical model that allows them to analyze the hydraulic behavior of the network in different scenarios such as increased demand in certain areas, the failure of a main pipe, the expansion of the hydraulic network; or to make decisions such as the location of new water sources, the location of sensors or elements that allow delimiting hydraulic sectors (flow meters and shut-off valves), among others.

The main objective of this research work is to develop new methods based on the mathematical model and network topology that help to solve the above challenges. These methods, implemented in computer applications, are intended to be of great use to drinking water utilities to check network connectivity and identify sub-networks with supply problems or without assigned flow demands; analyze network reliability under various circumstances; help locate pressure reducing valves, sensors and other control elements; validate the demand allocation process; identify bypasses that cause poor supply in certain areas; delimit demand sectors without affecting the arterial transport network; and sectorize a water network according to the contribution of each source to the consumption of each node; simplify detailed models to minimize calculation times to optimize decision-making processes such as the design of extensions, energy improvement or to provide a quick response in real time operation; and finally, provide methods based on hydraulic simulation and potential-logarithmic equations to convert absolute Darcy-Weisbach roughness and Chezy-Manning roughness coefficients into Hazen-Williams roughness coefficients to calibrate the model in other applications.

All methods have been implemented in software applications to automate the calculation process. For this purpose, the Visual Studio 2019 Community (.NET) programming environment has been used, the EPANET library (v2.2) to execute the hydraulic calculations, and the shapelib library to visualize the results graphically from any Geographic Information System software. The results obtained have been extensively verified, first because each method has been developed considering the model of a real network and then validated with five other real network models of different configurations, sizes, regulation elements and control laws. Also, since all the tools are published in the ResearchGate researcher portal for free access, they have been tested by many other users interested in their use to analyze and provide solutions to various problems in the management of water supply networks. Finally, all these algorithms can be implemented in other digital platforms or GIS environments from which the user's interaction with the network can be improved, allowing the modeler or network operator to make the best decisions.

RESUM

A causa de l'escassetat del recurs hídic que assota a molts països del món, els governs estan implementant polítiques públiques perquè les entitats gestores del servei d'aigua potable, juntament amb les institucions públiques i l'empresa privada, implementen tecnologies digitals per a monitorar i tindre un millor control de la gestió de les xarxes hidràuliques. No obstant això, és possible que les entitats gestores no posseïsquen un model matemàtic que els permeta analitzar el comportament hidràulic de la xarxa davant diferents escenaris com l'augment de la demanda en unes certes zones, l'avaría en una canonada principal, l'ampliació de la xarxa hidràulica; o prendre decisions com la ubicació de noves fonts d'aigua, la ubicació de sensors o elements que permeten delimitar sectors hidràulics (cabalímetres i vàlvules de tall), entre altres.

L'objectiu principal d'aquest treball de recerca és desenvolupar nous mètodes basats en el model matemàtic i la topologia de la xarxa que ajuden a resoldre els reptes anteriors. Aquests mètodes, implementats en aplicacions informàtiques, pretenen ser de gran utilitat a les empreses d'aigua potable per a comprovar la connectivitat de la xarxa i identificar les subxarxes amb problemes de subministrament o sense demandes de cabal assignades; analitzar la fiabilitat de la xarxa sota diverses circumstàncies; ajudar a situar vàlvules reductores de pressió, sensors i altres elements de control, validar el procés d'assignació de les demandes, identificar derivacions que causen un subministrament deficient en determinades zones; delimitar sectors de demanda sense afectar la xarxa arterial de transport i sectoritzar una xarxa hidràulica segons l'aportació de cada font al consum de cada node; simplificar models de detall que permeten minimitzar els temps de càlcul per a optimitzar els processos de presa de decisions com el disseny d'ampliacions, la millora energètica o per a donar una resposta ràpida en l'operació en temps real; i finalment, proporcionar mètodes basats en la simulació hidràulica i en unes equacions de tipus potencial-logarítmiques per a convertir rugositats absolutes de Darcy-Weisbach i coeficients de rugositat de Chezy-Manning en coeficients de rugositat de Hazen-Williams per a calibrar el model, en altres aplicacions.

Tots els mètodes han sigut implementats en aplicacions informàtiques per a automatitzar el procés de càlcul. Per a això, s'ha utilitzat l'entorn de programació de Visual Studio 2019 Community (.NET), la llibreria de EPANET (v2.2) per a executar els càlculs hidràulics, i la llibreria shapelib per a visualitzar els resultats de manera gràfica des de qualsevol programari de Sistema d'Informació Geogràfica. Els resultats obtinguts han sigut verificats amb profusió, primer perquè cada mètode s'ha desenvolupat considerant el model d'una xarxa real i després s'ha validat amb altres cinc models de xarxes reals de configuracions diferents, grandàries, elements de regulació i lleis de control. Així mateix, atés que totes les eines estan publicades en el portal d'investigadors de ResearchGate per al seu lliure accés, han pogut ser testades per molts altres usuaris interessats en el seu ús per a analitzar i donar solució als problemes diversos en la gestió de les xarxes de proveïment d'aigua. Finalment, tots aquests algorismes poden ser implementats en altres plataformes digitals o entorns SIG des dels quals es pot millorar la interacció de l'usuari amb la xarxa, permetent al modelador o operador de la xarxa prendre les millors decisions.

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	IX
RESUM	XI
CAPITULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1. <i>Justificación</i>	1
1.2. <i>Objetivos de la tesis</i>	2
1.3. <i>Estructura de la tesis</i>	3
CAPITULO II.....	6
2. REVISIÓN LITERARIA.....	6
2.1. <i>Las redes de abastecimiento de agua potable</i>	6
2.1.1. Clasificación de las redes según su topología.....	6
2.1.2. Tipos de conducciones en una red de suministro de agua.....	6
2.1.3. Formas de regular el suministro de agua	7
2.2. <i>El software EPANET y la Toolkit de programación</i>	9
2.2.1. Introducción	9
2.2.2. La potencia de la herramienta EPANET	10
2.2.3. Unidades de caudal y fórmulas para el cálculo de las pérdidas de carga.....	11
2.2.4. La Toolkit de EPANET	14
2.2.5. La librería shapelib	16
2.3. <i>Los modelos matemáticos de una red hidráulica</i>	16
2.3.1. Según el tipo de análisis	17
2.3.2. Según su utilidad	17
2.3.3. Modelos de redes reales que se utilizarán como casos de estudio	17
2.3.3.1. Red de abastecimiento de Maspalomas.....	17
2.3.3.2. Red de abastecimiento de Villena	19
2.3.3.3. Red de abastecimiento de Matamoros	20
2.4. <i>La teoría de grafos</i>	21
2.4.1. Introducción	21
2.4.2. Representación de grafos	22
2.4.3. Algoritmos de exploración de grafos	24
2.4.4. Árboles de expansión y bosques	26
2.4.5. Grafos dirigidos	27
2.4.6. Camino más corto	27
2.5. <i>Análisis topológico de modelos de redes de distribución de agua potable</i>	28

2.5.1.	Introducción	28
2.5.2.	Estado del arte	29
2.6.	<i>Sectorización de modelos de redes de suministro de agua</i>	31
2.6.1.	Introducción	31
2.6.2.	Estado del arte	32
2.6.3.	Criterios para el diseño de los sectores.....	35
2.6.4.	Índices de rendimiento para evaluar modelos de redes sectorizadas	36
2.6.5.	Principales beneficios e inconvenientes de sectorizar una red hidráulica	37
2.6.6.	Casos de proyectos de sectorización en el mundo	38
2.7.	<i>Simplificación de modelos de redes de agua potable</i>	40
2.7.1.	Introducción	40
2.7.2.	Estado del arte	41
2.7.3.	Ventajas e inconvenientes	46
2.8.	<i>Coeficientes de rugosidades equivalentes</i>	47
2.8.1.	Introducción	47
2.8.2.	Estado del arte	47
CAPITULO III		50
3.	MÉTODOS APLICADOS AL ANÁLISIS TOPOLÓGICO DE MODELOS DE REDES	50
3.1.	<i>Método para identificar subredes y subsistemas hidráulicos</i>	50
3.2.	<i>Método para clasificar tuberías formando mallas y ramas</i>	55
3.3.	<i>Método para clasificar tuberías principales, secundarias y de distribución</i>	59
CAPITULO IV		65
4.	MÉTODOS DE AYUDA A LA SECTORIZACIÓN DE REDES	65
4.1.	<i>Modelización hidráulica de la red</i>	65
4.2.	<i>Método 1. Sectorización de una red preservando la red arterial y secundaria</i>	66
4.3.	<i>Método 2. Sectorización por fuentes de suministro de agua</i>	67
4.4.	<i>iDistricts. Una herramienta para identificar sectores y/o distritos hidráulicos</i>	70
4.5.	<i>Resultados y discusiones</i>	71
CAPITULO V		76
5.	MÉTODO PARA SIMPLIFICAR MODELOS DE REDES	76
5.1.	<i>Recopilar los datos del modelo de red original</i>	77
5.1.1.	Almacenar los datos iniciales del modelo original	77
5.1.2.	Ejecutar una simulación hidráulica	78
5.1.3.	Eliminar elementos no operativos	78
5.1.4.	Determinar las líneas de entrada y de salida para cada nodo.....	79
5.1.5.	Determinar el grado de conectividad de cada nodo	80
5.1.6.	Declarar los elementos a preservar del modelo original.....	80
5.2.	<i>Fases del proceso de simplificación</i>	80

5.2.1.	Recorte o fusión de los tramos de un ramal de tuberías	81
5.2.2.	Fusionar tuberías en serie	83
5.2.2.1.	Cálculo de los coeficientes de reparto	84
5.2.2.2.	Cálculo de la longitud equivalente	86
5.2.2.3.	Cálculo de la rugosidad equivalente	86
5.2.2.4.	Cálculo del diámetro equivalente	87
5.2.2.5.	Procedimiento general	87
5.2.3.	Asociar tuberías en paralelo	88
5.2.3.1.	Identificación de los nodos extremos y las tuberías paralelas	89
5.2.3.2.	Cálculo del caudal equivalente	89
5.2.3.3.	Cálculo de la longitud y trazado de la nueva tubería equivalente	89
5.2.3.4.	Cálculo de la rugosidad equivalente	89
5.2.3.5.	Cálculo del diámetro equivalente	90
5.2.3.6.	Procedimiento general	90
5.2.4.	Eliminar nodos bi-alimentados	91
5.2.5.	Abrir mallas	92
5.3.	<i>Evaluación de los modelos simplificados</i>	<i>93</i>
5.4.	<i>Resultados y discusiones</i>	<i>94</i>
CAPITULO VI		98
6.	MÉTODOS PARA ESTIMAR COEFICIENTES DE RUGOSIDAD EQUIVALENTES	98
6.1.	<i>Rugosidades equivalentes calculadas a partir de una simulación hidráulica</i>	<i>98</i>
6.2.	<i>Rugosidades equivalentes calculadas para una velocidad óptima de diseño</i>	<i>99</i>
6.3.	<i>Resultados y discusiones</i>	<i>102</i>
CAPITULO VII		108
7.	CONCLUSIONES, APORTES Y FUTUROS DESARROLLOS	108
CAPITULO VIII		116
8.	REFERENCIAS	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Redes zonales alimentadas por depósitos separados	8
Figura 2. Reparto del agua mediante sectores	8
Figura 3. Red alimentada por bombeo directo	8
Figura 4. Archivos que componen la Toolkit de EPANET	14
Figura 5. Ubicación de los elementos que componen la red de Maspalomas	18
Figura 6. Red de tuberías de Maspalomas clasificadas por el tamaño de su diámetro	18
Figura 7. Ubicación de los elementos que componen la red de Villena	19
Figura 8. Red de tuberías de Villena clasificadas por diámetros	20
Figura 9. Modelo de red de Matamoros y la ubicación de sus elementos	21
Figura 10. Red de tuberías de Matamoros clasificadas por el diámetro	21
Figura 11. Ejemplo de un grafo	22
Figura 12. Ejemplo de un árbol de expansión obtenido a partir del grafo G	26
Figura 13. Árbol de mínimo coste (Grafo H)	27
Figura 14. Ejemplo de un dígrafo y su árbol de expansión	27
Figura 15. Camino más corte entre el punto A y C	28
Figura 16. Sistema de suministro de agua con 3 subredes	51
Figura 17. Clasificación de subsistemas hidráulicos	52
Figura 18. Interfaz gráfica de la aplicación Idehisub	54
Figura 19. Identificación de las 8 subredes de la red Maspalomas	54
Figura 20. Clasificación de subsistemas (Tipo A, C, D) en la red Maspalomas	55
Figura 21. Clasificación de tuberías malladas y ramificadas	56
Figura 22. Interfaz gráfica de la aplicación iRamifMallas	57
Figura 23. Clasificación de tuberías malladas y ramificadas para ubicar elementos sobre el mapa. Red Maspalomas	58
Figura 24. Clasificación de tuberías malladas y ramificadas para identificar tuberías críticas ante su posible rotura. Red Maspalomas	58
Figura 25. Clasificación de las tuberías por el tamaño de la tubería. Red Maspalomas	60
Figura 26. Clasificación de tuberías por el caudal trasegado. Red Maspalomas	60
Figura 27. Nodos con demanda de caudal en la red principal y secundaria. Red Maspalomas ...	61
Figura 28. Interfaz de la aplicación para identificar la red arterial, secundaria y de distribución	63

Figura 29. Tuberías principales y secundarias construidos a partir de trayectos. Red Maspalomas	64
Figura 30. Interfaz gráfica de las aplicaciones ConvertGISEpanet y RunEpanetGIS	64
Figura 31. Interfaz gráfica de la aplicación iDistricts (iDistritos en español)	70
Figura 32. Sectorización de la red de Villena. (a) Trayectos de caudales, (b) Sectores conectados a la red principal, (c) Sectores por contribución de fuentes, (d) Sectores basados en el árbol de mínima resistencia hidráulica	72
Figura 33. Sectorización de la red de Matamoros (a) Trayectos de caudales, (b) Sectores conectados a la red principal, (c) Sectores por contribuciones de origen	74
Figura 34. Situaciones en las que se elimina un elemento del modelo de red	79
Figura 35. Fase de recorte o fusión de ramales. (A) Red original, (B) Ramal eliminado, (C) Ramal fusionado.....	82
Figura 36. Tuberías en serie. A) Con caudal circulando en un solo sentido, B) Caudales en sentidos opuestos	83
Figura 37. Traslado de la demanda del nodo intermedio a los nodos extremos de la nueva tubería equivalente	84
Figura 38. Simplificación de tuberías en paralelo	88
Figura 39. Desconexión de la red si el nodo intermedio es eliminado.....	92
Figura 40. Condición para no desconectar la red al eliminar el nodo intermedio y las tuberías que lo conectan	92
Figura 41. Interfaz gráfica de la herramienta SkelEpanet	95
Figura 42. Esqueletización automática de la red de Maspalomas	96
Figura 43. Esqueletización manual de la red de Maspalomas	96
Figura 44. Esqueletización de toda la red, excepto el sector 6.....	97
Figura 45. Relación entre los coeficientes de HW y CM frente a la rugosidad absoluta DW	101
Figura 46. Interfaz gráfica de Corunica para convertir rugosidades y unidades de caudal.....	103
Figura 47. Diagramas de cajas y bigotes de los errores de presión entre el modelo convertido a Hazen-Williams por simulación ($Q_{\text{máx}}$ y $Q_{\text{t=9h}}$) y el modelo original (DW).....	105
Figura 48. Diagrama de cajas y bigotes de los errores de presión entre el modelo convertido a HW por formulas tipo potencial-logarítmicas y el modelo original (DW)	105
Figura 49. Diagramas de cajas y bigotes de los errores de presión entre los modelos convertidos a CM y el modelo original (DW).....	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Unidades de caudal soportadas por EPANET	12
Tabla 2. Descripción de los archivos que componen la Toolkit de EPANET	14
Tabla 3. Red de Villena. Valores de presión máxima y mínima para cada escenario aplicando el segundo método	72
Tabla 4. Presiones, número de nodos, longitud total y desnivel por cada sector	73
Tabla 5. Número de elementos preservados y porcentajes de elementos eliminados	95
Tabla 6. Resultados de evaluar las presiones de los modelos esqueletizados	97
Tabla 7. Red de Maspalomas. Estadística de errores de presión entre el modelo original (DW) y los modelos convertidos a coeficientes de rugosidad de HW	103
Tabla 8. Red de Maspalomas. Estadística de errores de presión entre el modelo original (DW) y los modelos convertidos a coeficientes de rugosidad de CM	106

GLOSARIO DE ABREVIACIONES

DMA	:	District Metered Area
RDAP	:	Red de Distribución de Agua Potable
SIG	:	Sistema de Información Geográfica
USEPA	:	United States Environmental Protection Agency
OWA	:	Open Water Analytics
IIAMA	:	Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente
IMTA	:	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
UPV	:	Universitat Politècnica de València
mca	:	metros de columna de agua
msnm	:	metros sobre el nivel del mar
VRP	:	Válvula Reductora de Presión
IWA	:	International Water Association
NSGA-II	:	Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
SMOSA	:	Spider Monkey Optimization-based Scheduling Algorithm
CAD	:	Computer Aided Design
HW	:	Hazen-Williams
DW	:	Darcy-Weisbach
CM	:	Chezy-Manning
PVC	:	Cloruro de Polivinilo
R	:	Entorno y lenguaje de programación
RG	:	ResearchGate
DFS	:	Depth First Search
BFS	:	Breadth First Search
LIFO	:	Last-In-First-Out
FIFO	:	First-In-First-Out
WDSA	:	Water Distribution Systems Analysis
CCWI	:	Computing and Control in the Water Industry
SWMM	:	Storm Water Management Model
WNTR	:	Water Network Tool for Resilience
CONAGUA	:	Comisión Nacional del Agua (México)
REDHISP	:	Redes Hidráulicas y Sistemas a Presión
CONCYTEC	:	Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica
Pronabec	:	Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo
Fondecyt	:	Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico
GNU-LGPL	:	General Public License - Lesser General Public License

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Justificación

Las empresas encargadas de suministrar el agua a las grandes ciudades y poblaciones de menor tamaño buscan cumplir con los estándares de calidad que debe tener el agua potable según las normativas de cada país. Al mismo tiempo, se ven obligadas a preservar el recurso hídrico y al cuidado del medioambiente. Cada vez más, estas empresas se ven sometidas a una mayor presión por reducir el coste total de explotación y los elevados índices de fugas.

Los desafíos a los que se enfrentan las empresas de servicio de agua son varios entre los que se incluye la incertidumbre en la oferta y la demanda, la calidad del agua, una infraestructura envejecida, baja eficiencia hidráulica, averías en la red de tuberías y ataques por contaminación. Todos ellos tienen el potencial de interrumpir el suministro de agua a la población. En países en vías de desarrollo, a estos desafíos se añade la falta de cobertura y de continuidad del servicio.

Resolver estos desafíos sin la ayuda de los modelos matemáticos es tarea casi imposible, sobre todo en redes de suministro y distribución que configuran un entramado complejo de tuberías, fuentes de suministro y elementos de regulación. Con el fin de superar estos desafíos, las empresas gestoras demandan soluciones digitales que les ayuden analizar el problema y les permitan tomar la mejor decisión. Con el motor de cálculo de la librería de EPANET y los algoritmos de exploración más utilizados en la teoría de grafos, se quiere desarrollar con motivo de esta tesis nuevos métodos con un enfoque práctico que ayuden a las empresas gestoras a mejorar el servicio de agua potable.

En este trabajo de investigación, se desarrollan varios métodos de análisis vinculados con el análisis topológico, sectorización, simplificación y conversión de coeficientes de rugosidad. Todos estos métodos novedosos se basan en el modelo matemático de EPANET y la topología de la red, y son de gran utilidad para mejorar la gestión y operación de las redes de suministro de agua potable. Las empresas que gestionan el servicio de agua, la mayoría de ellas municipales, no cuentan con presupuesto suficiente para adquirir licencias de software. Por tal motivo, un aporte extra de este trabajo va a ser la publicación de las herramientas desarrolladas para su uso libre por parte de las empresas gestoras del servicio de agua, para fines académicos o para comparar con otros métodos que resulten de nuevas investigaciones. Por último, estos métodos se pueden adaptar a cualquier plataforma digital o software SIG que pueda disponer la empresa.

Juntamente con los métodos propuestos, la creciente instalación de contadores inteligentes y otros sensores de nivel, de caudal y de presión van a permitir monitorizar y controlar en tiempo real la eficiencia de la red hidráulica y los consumos. Toda la información que se recoja de cada instrumento de medición, procesados previamente mediante algoritmos de análisis de datos, permitirá a los gestores tomar mejores decisiones, planificar y adaptar la operación de la red de una manera más ágil ante eventos imprevistos.

1.2. Objetivos de la tesis

Objetivo General

El objetivo principal de esta tesis doctoral es desarrollar nuevos métodos basados en el modelo matemático y la topología de la red, que permitan mejorar la gestión técnica de las redes de suministro de agua. Estos nuevos métodos pretenden cubrir el vacío que existe en la falta de herramientas libres que ayuden a analizar el funcionamiento de las redes de abastecimiento de agua y proponer soluciones basadas en el análisis topológico para la sectorización y simplificación de redes. En lo que respecta a la modelización se aporta un estudio sobre la equivalencia de coeficientes de rugosidad en modelos de redes de agua potable, dada su influencia en los resultados que después se utilizarán en la toma de decisiones.

Objetivos Específicos

Para cumplir con el objetivo principal, este trabajo se ha dividido en cuatro objetivos específicos.

1. Análisis topológico

Con base en la topología de la red se busca desarrollar tres métodos distintos para identificar subredes y subsistemas hidráulicos, clasificar a las tuberías en mallas y ramas, y clasificar a las tuberías en principales, secundarias y de distribución. El primer método permitirá identificar posibles “errores” de conexión o identificar conjuntos de nodos con ciertas particularidades en la fase de elaboración del modelo hidráulico; el segundo método ayudará a realizar un análisis de fiabilidad de la red, a ubicar sensores, caudalímetros, válvulas de corte y válvulas reductoras de presión; y el último método se podrá utilizar para validar el proceso de asignación de demandas, identificar derivaciones que causen un suministro deficiente en determinadas zonas, planificar tareas de ampliaciones de una red y realizar propuestas de sectorización donde se excluyan a las tuberías principales y secundarias.

2. Sectorización

En este tema en particular, el objetivo que se persigue es desarrollar dos métodos distintos, pero complementarios a la vez, para ayudar en la toma de decisiones en función de las distintas soluciones que se vayan proponiendo respecto al número de caudalímetros y/o válvulas de corte necesarios para dividir una red hidráulica en sectores. El primer método debe identificar primero a las tuberías principales y secundarias para ser excluidas de los sectores que finalmente se alimentarán de la red arterial. Mientras que el segundo método, se basa en las ecuaciones de balance de masa de un constituyente conservativo para dividir una red en sectores según el aporte de cada una de las fuentes al consumo de cada nodo.

3. Simplificación

Trabajar con modelos de detalle para diseñar una ampliación de la red, analizar las presiones de un sector, analizar un transitorio o dar alguna respuesta en tiempo real, puede llevar mucho tiempo en el cálculo hidráulico si el modelo incluye todos los elementos de la red y los periodos de simulación son largos. Ante la necesidad de trabajar con modelos más reducidos, se plantea el objetivo de desarrollar un método basado en la dirección de los flujos y en un conjunto de técnicas tradicionales para simplificar el modelo de la red.

4. Conversión de los coeficientes de rugosidad

En cada país, por normativa, se suele trabajar con un sistema de unidades de medida y unas fórmulas de pérdidas de carga para el diseño de las redes de abastecimiento de agua. Si bien la conversión de unidades no debe afectar a los resultados, las fórmulas de pérdidas de carga adoptadas, unas más precisas que otras, puede conducir a cierta diversidad en los resultados. Puesto que las funciones de coste utilizadas por los algoritmos de exploración de la red dependen de éstos, las decisiones adoptadas son también dependientes de las fórmulas de pérdidas. Asimismo, la calibración de los parámetros de una red va a depender de la fórmula de pérdidas, y unas son más fáciles de tratar que otras. En este contexto, se ha planteado como cuarto objetivo desarrollar métodos universales para convertir los coeficientes de rugosidad entre las tres fórmulas de pérdidas más utilizadas para el análisis de modelos de redes, tratando de minimizar las diferencias entre ellas. El primer método se basaría en los resultados hidráulicos obtenidos de una simulación para calcular los nuevos coeficientes de rugosidad equivalentes, mientras que el segundo método pretende desarrollar un conjunto de ecuaciones de tipo potencial-logarítmicas basados en la velocidad óptima de diseño para un conjunto de tuberías comerciales clasificados por su tamaño.

Todos estos nuevos métodos serán implementados en herramientas propias desarrolladas con motivo de este trabajo destinadas a automatizar los procesos de cálculo. En casi todos los métodos se aplicarán conceptos de la teoría de grafos para explorar la red a partir de las conexiones existentes entre sus componentes y se utilizará también la librería de EPANET (v2.2) para ejecutar simulaciones hidráulicas.

1.3. Estructura de la tesis

Este documento está dividido en cinco bloques que se detallan a continuación.

Capítulo II. Revisión literaria

Este primer bloque está reservado al marco teórico donde se describen los conocimientos previos requeridos para desarrollar las nuevas metodologías propuestas en los siguientes capítulos. Se hace un repaso a la configuración de los sistemas de abastecimiento de agua (clasificación topológica, tipos de conducciones y formas de regular el suministro), se pone de manifiesto las limitaciones de la interfaz gráfica del software EPANET, y al mismo tiempo las ventajas de trabajar con la librería de EPANET para realizar nuevas investigaciones. Además, se describe la importancia de los modelos matemáticos hidráulicos y su uso según el tipo de análisis que se realicen.

También se aborda la aplicación de la teoría de grafos para representar las redes de suministro de agua y se describe los distintos algoritmos de exploración utilizados para implementar los diferentes métodos propuestos en esta tesis. Se presenta un resumen del estado del arte de las distintas metodologías desarrolladas para el análisis topológico, sectorización, simplificación y el cálculo de rugosidades equivalentes para los modelos de redes de distribución de agua potable.

Finalmente, se describen también en este capítulo los tres casos de estudio que se utilizarán para desarrollar y validar los diferentes métodos propuestos.

Capítulo III. Métodos aplicados al análisis topológico de modelos de redes

En este capítulo se desarrollan tres métodos de análisis. El primero de ellos tiene como objetivo identificar las subredes y subsistemas hidráulicos con algún problema de desconexión, así como los nodos o conjunto de nodos con problemas de suministro para satisfacer las demandas asignadas. Para ejecutar el método se utiliza el algoritmo de exploración en profundidad sobre la red considerada como un grafo no dirigido. El segundo método busca clasificar a las tuberías en mallas o ramas según el propósito del estudio utilizando diferentes algoritmos de recorrido; por ejemplo, si se quiere hacer propuestas para ubicar sensores, caudalímetros o válvulas de corte, se utiliza el algoritmo de recorrido en profundidad y si lo que se busca es identificar tuberías críticas para un análisis de fiabilidad de la red se emplean ambos algoritmos de recorrido (en profundidad y en amplitud); y el último método, permite clasificar a las tuberías en principales, secundarias y de distribución para, por ejemplo, validar el proceso de asignación de las demandas, identificar desviaciones de caudales importantes o para excluir a las tuberías importantes de un proyecto de sectorización de la red hidráulica. En este último método, para definir la red de tuberías más importantes, la red se recorre en el sentido de la dirección del flujo (grafo dirigido) con el algoritmo de Dijkstra.

Capítulo IV. Métodos de ayuda a la sectorización de modelos de redes

En este capítulo se abordan dos nuevos métodos basados en los algoritmos de recorrido de la teoría de grafos, en el balance de masa de una sustancia conservativa y en el modelo hidráulico. El primer método consiste en sectorizar una red identificando previamente la red arterial, de modo que, preservando las tuberías arteriales se identifican a continuación los posibles sectores mediante el algoritmo de recorrido en profundidad, cerrando para ello las tuberías que proceda y ubicando los caudalímetros convenientes. El segundo método permite sectorizar una red a partir de la aportación de cada fuente de suministro al consumo de agua de cada nodo, basándose en las ecuaciones del balance de masas de un constituyente conservativo.

Capítulo V. Método para simplificar modelos de redes

El método que se presenta en este capítulo para simplificar modelos de redes hidráulicas se divide en dos etapas. La primera parte consiste en recopilar toda la información asociada a los atributos de los elementos del modelo, ejecutar una simulación hidráulica de la red y determinar las tuberías de entrada y de salida de caudal de cada nodo. Y en segunda parte, se lleva a cabo el proceso de simplificación propiamente dicho mediante la ejecución paso a paso de cinco etapas de forma sucesiva o combinadas.

Capítulo VI. Métodos para estimar coeficientes de rugosidad equivalentes

En este capítulo se propone dos métodos para calcular los coeficientes de rugosidad equivalentes entre las diferentes fórmulas de pérdidas. En el primer método, se comparan directamente las fórmulas de Hazen-Williams y Chezy-Manning con la fórmula de Darcy-Weisbach para expresar sus coeficientes de rugosidad respectivos en función del factor de fricción. Luego, se ejecuta una simulación hidráulica para obtener los valores de caudal, velocidad y de las pérdidas de carga que intervienen en dichas expresiones. Sin embargo, pueden existir tramos de tuberías por los que no circule caudal y no se puedan calcular los nuevos coeficientes de rugosidad equivalentes.

Por esta razón, y buscando obtener expresiones de equivalencia más universales, independientes de los resultados de una simulación, se desarrolla un segundo método, basado en unas ecuaciones de tipo potencial-logarítmicas obtenidas a partir de la velocidad óptima de diseño dependiente del diámetro de la tubería, de este modo, el diámetro y la rugosidad pasan a ser los únicos parámetros de entrada para calcular los nuevos coeficientes de rugosidad con las fórmulas alternativas. Este método es importante porque permite convertir las rugosidades absolutas y los coeficientes de rugosidad de Chezy-Manning a coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams cuya fórmula resulta mucho más cómoda para tareas de calibración, siendo la más utilizada a tal fin en la literatura científica.

CAPITULO II

2. REVISIÓN LITERARIA

2.1. Las redes de abastecimiento de agua potable

La red de tuberías de un sistema de suministro debe ser capaz de conducir el agua desde los puntos de captación o almacenamiento hasta los puntos de consumo (doméstico e industrial) en unas condiciones mínimas de presión, caudal y calidad.

En caso de producirse cualquier eventualidad en el sistema, como por ejemplo la rotura de una tubería principal o el incremento inesperado en el consumo de agua, el operador de la red debe ser capaz de dar solución a dichos eventos, por lo que es importante tener un buen conocimiento de su funcionamiento. En particular, es necesario conocer por donde discurre el agua (red de tuberías arterial, secundaria y de distribución), su topología (red ramificada, mallada o mixta) y la forma en que se suministra el agua (por depósitos, inyección directa o mixta).

Con un conocimiento pleno de la operación de la red, es posible plantearse nuevos métodos para sectorizar, simplificar y calibrar cualquier modelo de red de suministro de agua.

2.1.1. Clasificación de las redes según su topología

El primer paso para diseñar una Red de Distribución de Agua Potable (RDAP) es definir el trazado de las tuberías, que a su vez dependen de las condiciones topográficas del terreno y de la densidad poblacional. Para ello, existen tres formas posibles de configurar el trazado de una red: mallada, ramificada y mixta.

Las redes malladas frente a las ramificadas ofrecen una mayor seguridad en el suministro de agua en caso de producirse una avería o corte en el servicio, asimismo, se reduce los tiempos de permanencia del agua en la red y se disminuye las pérdidas de carga consiguiendo presiones más equilibradas. Por contra, el presupuesto de la obra es mayor.

En redes en servicio, clasificar la red de tuberías por su diámetro y su topología puede facilitar la tarea de sectorizar, simplificar y calibrar modelos de redes de tamaño medio de manera manual o semi-automática. Por ejemplo, si se ocultan las tuberías ramificadas y aquellas que están por debajo de un diámetro umbral, se pueden identificar las posibles tuberías candidatas sobre las cuales instalar válvulas de corte y/o caudalímetros para realizar propuestas de sectorización.

2.1.2. Tipos de conducciones en una red de suministro de agua

Una red de suministro de agua está conformada en su mayoría por tuberías que transportan el agua y de un conjunto de elementos de maniobra y control para regular la operación del sistema.

Para García-Serra e Iglesias-Rey (2002), las tuberías se pueden clasificar hasta en cinco categorías dependiendo del tamaño de la red. Las tuberías de traídas o aducciones que se encargan de transportar el agua desde las fuentes de suministro hasta las plantas de tratamiento y/o depósitos de regulación o estaciones de bombeo en caso de inyección directa. Las conducciones que

enlazan los depósitos con la red propiamente dicha también reciben el mismo nombre. Las tuberías principales o red arterial son conducciones que alimentan a los conductos secundarios. El tamaño de estas tuberías son de menor diámetro que las tuberías de traídas, y en ellas no se deben realizar tomas directas para los usuarios. Las tuberías secundarias o red secundaria se encargan de transportar el agua desde las arterias hasta la red de servicio, y suelen ser de menor tamaño que la red arterial. En caso de consumidores importantes (hospitales, universidades, centros comerciales, etc.) se recomienda que las tomas se realicen sobre esta categoría. Las tuberías de distribución o red de servicio se alimentan de la red secundaria y en ellas se pueden enlazar la mayor parte de las acometidas a los usuarios. Por último, los ramales o acometidas son un conjunto de tuberías, válvulas y accesorios que enlazan la red pública con las instalaciones interiores de los edificios.

En Valencia (España), la red de suministro de agua está configurada en anillos perimetrales, tanto en la red arterial como en la red secundaria, y una red mallada para las tuberías de servicio. Esto permite un servicio continuo y de calidad a través del resto de las conducciones, y facilita el diseño de los sectores dando mayor flexibilidad a la hora de modificar el esquema de sectorización (Hervás, 2017).

En un proyecto de sectorización, identificar la red principal puede ayudar a los gestores a tomar la decisión de incluir o no a las tuberías principales dentro de los sectores. Si la clasificación de las tuberías principales, secundarias y de distribución se hiciera por su tamaño, es posible que no se garantice un trazado continuo entre los tres tipos de tuberías. En el apartado 3.3 del CAPITULO III, se describirá un método para clasificar los tres tipos de tuberías.

2.1.3. Formas de regular el suministro de agua

Antes de empezar cualquier proyecto de sectorización o simplificación de un modelo de red, es importante conocer la forma en que se regula el suministro de agua. En la práctica, se puede hacer mediante depósitos a presión atmosférica (elevados o semienterrados) o por inyección directa a través de grupos de bombeo de velocidad fija y/o variable.

En países en vías de desarrollo, la regulación del suministro de agua se realiza principalmente mediante depósitos elevados (Figura 1), cada uno de los cuales abastece usualmente a una zona determinada. Otras veces se realiza a través de un único depósito, el cual alimenta a varias zonas sectorizadas (Figura 2) repartiendo el agua por turnos entre los sectores en muchos casos.

En países más avanzados, con una mayor garantía en el mantenimiento de los equipos, el agua se suministra muchas veces por bombeo directo hacia la red (Figura 3) controlando en todo momento las presiones mediante las válvulas reductoras de presión y el caudal mediante las válvulas limitadoras de caudal o variadores de velocidad en las bombas, lo que es una solución bastante más económica que el suministro a través de depósitos. Pero por ahora, el bombeo directo suele limitarse a zonas poco extensas o a instalaciones de riego.

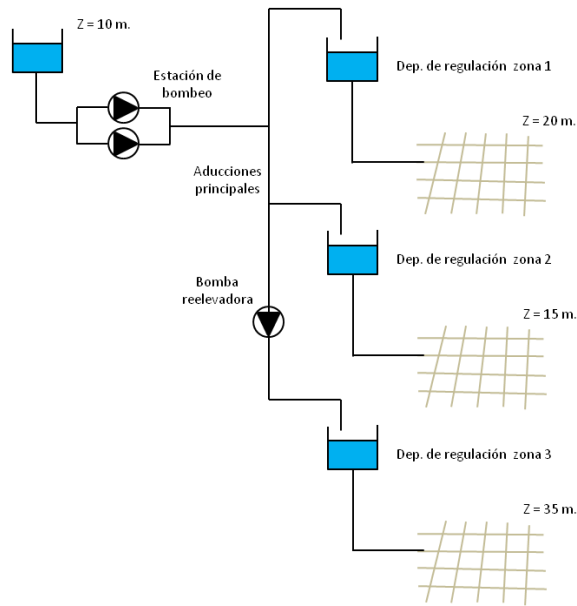


Figura 1. Redes zonales alimentadas por depósitos separados

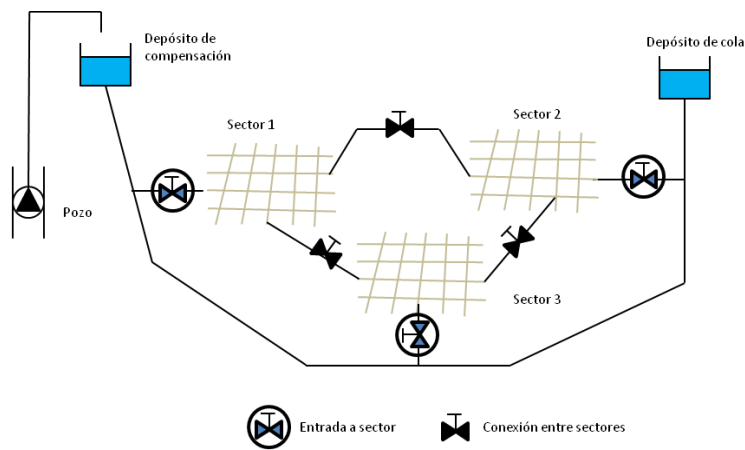


Figura 2. Reparto del agua mediante sectores

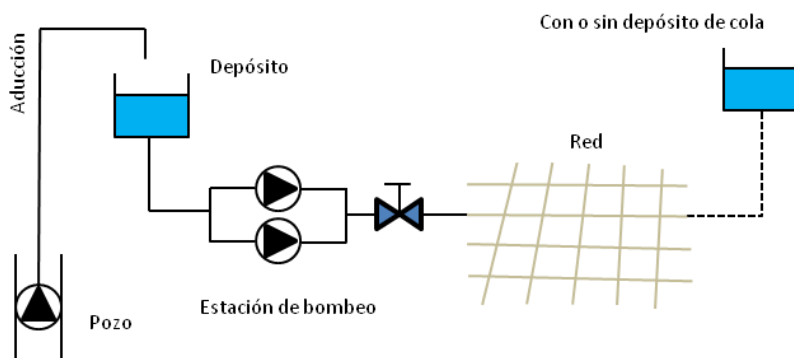


Figura 3. Red alimentada por bombeo directo

2.2. El software EPANET y la Toolkit de programación

2.2.1. Introducción

El software más utilizado mundialmente para confeccionar modelos hidráulicos y de calidad del agua es EPANET. Esto se debe a que es un software de dominio público, con una interfaz gráfica sencilla y fácil de usar, el manual de usuario es muy completo y su código fuente es accesible lo que permite seguir añadiendo mejoras e implementando nuevas funciones tanto en la interfaz gráfica como en la propia librería de cálculo.

EPANET fue desarrollado por la División de Recursos Hídricos y Suministros de Agua del Laboratorio Nacional de Investigación para la Prevención de Riesgos de la Agencia para la Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, más conocida como USEPA (United States Environmental Protection Agency). Dicho proyecto fue liderado por el reconocido investigador Lewis Rossman, cuya primera versión fue lanzada en 1993 y la última en el 2008 (v2.00.12). En adelante, la USEPA dejó de seguir implementado nuevas capacidades. No obstante, el módulo de cálculo o Toolkit fue liberado con una licencia MIT lo que permitió abrir un portal en GitHub (OWA-EPANET) para mejorar el código mediante la colaboración de cualquier investigador. Gracias a ello, diversos grupos a nivel mundial han continuado trabajando en el desarrollo de nuevas funcionalidades, corrigiendo y mejorando el código fuente a partir de su última versión (Vegas *et al.*, 2017), siendo la versión más actual la 2.2.

Inicialmente, EPANET se desarrolló con el fin de apoyar a las compañías a controlar y mejorar la calidad del agua suministrada a los abonados a través de la red mediante procesos de simulación. Para ello, antes de resolver el problema de la calidad había que resolver el problema hidráulico para conocer los caudales circulantes por las tuberías y la evolución de los volúmenes de agua almacenados en los depósitos (Martínez, 2003).

Un modelo de red en EPANET lo conforman objetos físicos y no físicos: los primeros contienen información de los atributos de los elementos y los segundos sobre el modo de operación de la red. Dentro de los objetos físicos están los nodos de demanda, depósitos, embalses, tuberías, bombas y válvulas, y los objetos no físicos lo conforman las curvas de comportamiento, curvas de modulación (patrones), leyes de control simples y leyes basadas en reglas compuestas (Martínez, 2017). Topológicamente los tres primeros elementos son tratados como nodos de la red y los tres siguientes como líneas o arcos que unen a los primeros elementos.

Las demandas aplicadas en los nodos pueden ser simples o múltiples, siendo tratadas en ambos casos como demandas fijas, aunque moduladas en el tiempo. En la última versión de la Toolkit 2.2 de EPANET, desarrollada por la OWA (Open Water Analytics), ya se puede realizar también simulaciones hidráulicas considerando las demandas variables en función de la presión, lo que abre el campo para realizar simulaciones más realistas.

2.2.2. La potencia de la herramienta EPANET

EPANET es una herramienta sencilla y de fácil manejo. Permite editar los datos de entrada de la red, realizar simulaciones hidráulicas y de calidad del agua tanto en periodo estático como extendido en tiempos muy reducidos gracias a su potente algoritmo de cálculo, y analizar los resultados en una amplia variedad de formatos de salida como tablas numéricas, curvas de evolución temporal, mapas de contornos (isolíneas) y mapas de la red ilustrados por códigos de colores.

El motor de cálculo hidráulico de EPANET determina las alturas piezométricas en los nodos y los caudales circulantes por las líneas dados unos niveles iniciales en los embalses y/o depósitos y la sucesión en el tiempo de las demandas aplicadas en los nodos. De un instante al siguiente, se actualizan los niveles en los depósitos según los caudales calculados que entran o salen de los mismos y las demandas en los nodos con sus respectivas curvas de modulación. Para obtener las alturas y los caudales en un determinado instante, se resuelven simultáneamente las ecuaciones de continuidad en los nodos y las ecuaciones de equilibrio de pérdidas en las tuberías. Este proceso conocido como “equilibrio hidráulico”, requiere el uso de métodos iterativos para resolver las ecuaciones de tipo no lineal involucradas. Para tal fin, EPANET utiliza un método híbrido de nodos y mallas. Todini & Pilati (1987), y más adelante Salgado, Todini, & O’Connell (1988) decidieron llamarlo “Método del Gradiente Global” (GGA, por sus siglas en inglés).

Después de ejecutar una simulación, la aplicación proporciona resultados para las distintas variables según el tipo de elemento. En el caso de las tuberías proporciona la evolución del caudal y su velocidad; en los nodos de demanda la altura piezométrica y la presión; y en los depósitos los niveles de agua. Gracias al modelo de calidad incorporado, también se pueden simular las concentraciones de especies químicas transportadas por el agua, el tiempo de permanencia del agua en la red (envejecimiento del agua) y su procedencia desde una fuente determinada.

Entre las prestaciones que ofrece EPANET relacionadas con la calidad del agua se pueden diseñar programas de muestreo, realizar estudios sobre la pérdida de desinfectante y la formación de subproductos derivados, valorar la dosis de contaminante recibida por los abonados, valorar estrategias orientadas a mejorar la calidad del agua (como utilizar fuentes de suministro alternativas), utilizar estaciones de recloración en puntos clave de la red para garantizar los niveles de cloro de consigna o planificar programas de rehabilitación y limpieza de tuberías. Desde el punto de vista hidráulico, entre muchas otras aplicaciones, es posible calibrar el modelo de simulación, mejorar las características de suministro a los abonados o calcular el consumo energético y los costes de operación.

Pero no todo son ventajas. EPANET también tiene algunas deficiencias que podemos agrupar referente a la confección del modelo, el análisis, la modelización, la simulación y visualización de resultados en función de la prestación analizada. Es necesario recordar que EPANET fue desarrollada principalmente para conocer la evolución de los contaminantes en la red.

A continuación, se menciona algunas de esas carencias:

En la **confección de modelos**:

- No importa archivos CAD o shapes. En la versión de EPANET-UI, desarrollada con Python desde la USEPA, se puede importar un shape de líneas y visualizarlo como una imagen.
- No emite avisos cuando se elimina un elemento asociado a alguna ley de control.
- No permite incorporar subredes a un modelo de red cargado previamente.
- No permite cambiar los identificadores de los elementos del modelo de manera automática.
- No dispone de herramientas para la asignación de caudales a los nodos de demanda
- No permite convertir unidades o coeficientes de rugosidad entre fórmulas de pérdidas
- No permite simplificar modelos de detalle.
- No dispone de herramientas para unir o partir tramos de tubería, insertar válvulas o bombas.

En herramientas de **análisis**:

- No permite analizar la conectividad de toda la red.
- No permite cambiar la orientación de las tuberías trazadas en sentido contrario a los flujos.
- No dispone de herramientas para evaluar la confiabilidad de la red de suministro de agua.
- No permite comparar los resultados entre distintos escenarios.

En la **modelización**:

- No se puede predecir si una bomba entra o no en cavitación.
- No permite reducir el tamaño del modelo bajo distintos criterios.
- No permite sectorizar o dividir la red en zonas de demanda controlada.
- No ofrece herramientas de para la calibración automática de los modelos.

En la **visualización de resultados**:

- No se puede visualizar el estado cerrado de las líneas mediante una simbología propia
- No se pueden agrupar los elementos o los resultados por capas
- El editor de leyenda está limitado a cinco rangos de valores y no permite diferenciar los elementos por campos no numéricos (p.ej. el estado).
- No se puede trabajar con varios proyectos en paralelo, aunque sí es multi ejecutable (interfaz 2.00.12). Sin embargo, a partir de la versión 2.2 de la librería de EPANET ya es posible ejecutar múltiples proyectos a la vez para agilizar los cálculos o para comparar los resultados entre una hipótesis y otra a nivel de programación.

2.2.3. Unidades de caudal y fórmulas para el cálculo de las pérdidas de carga

En el análisis topológico de las redes, se utilizan en muchos casos factores de coste asociados a las conducciones a fin de ponderar unos caminos frente a otros al explorar la red. Dichos factores dependen de los caudales circulantes o directamente de las pérdidas en las conducciones y son por tanto sensibles a las unidades como a las fórmulas de pérdidas de carga empleadas. El software EPANET permite trabajar con hasta diez unidades de caudal distintas, las cuales se agrupan en dos sistemas de unidades. Las unidades de caudal más utilizadas para el análisis de modelos de redes de abastecimiento de agua son Litros por Segundo (LPS) y Galones por Minuto (GPM). En la Tabla 1 se listan las unidades de caudal soportadas por la aplicación EPANET.

Tabla 1. Unidades de caudal soportadas por EPANET

Sistema Convencional (US)	Sistema Internacional (SI)
CFS (pies cúbicos por segundo)	LPS (litros por segundo)
GPM (galones por minuto)	LPM (litros por minuto)
AFD (acres-pies por día)	MLD (Megalitros por día)
MGD (megagalones por día)	CMH (metros cúbicos por hora)
IMGD (megagalones imperiales por día)	CMD (metros cúbicos por día)

Según la unidad de caudal que se elija, EPANET determina también unas unidades de medida para expresar otras magnitudes como las elevaciones, presiones, diámetros, velocidad, niveles de agua, etc. En el manual de usuario de EPANET, tanto en la versión original como la española, se puede consultar las distintas unidades de medida, siendo en este caso las unidades únicas para cada magnitud, pero diferentes entre el Sistema Internacional y el Sistema Internacional.

Como ya se ha dicho, EPANET no permite cambiar de manera automática las unidades de todos los parámetros que intervienen en el modelo al elegir una unidad de caudal diferente.

Por otra parte, cuando el agua fluye por un conducto o dispositivo se producen pérdidas de carga debido a la fricción. Tales pérdidas, generan una disminución de la altura piezométrica entre dos nodos de la red en el sentido del flujo y son cruciales a la hora de determinar cómo se distribuyen los flujos en las redes malladas. Desde EPANET, el usuario puede elegir una de las tres fórmulas ofrecidas por el programa: Hazen-Williams (HW), Darcy-Weisbach (DW), y Chezy-Manning (CM).

En esta tesis, se van a utilizar las fórmulas de pérdidas de carga reflejadas en el manual de EPANET en Español (Martínez, 2017) expresadas en el sistema internacional de unidades.

Fórmula de Hazen-Williams

$$h_f = 10,674 * L * D^{-4.871} * (Q/C_{HW})^{1,852} \quad (1)$$

Fórmula de Darcy-Weisbach

$$h_f = 0,0827 * f * L * D^{-5} * Q^2 \quad (2)$$

Fórmula de Chezy-Manning

$$h_f = 10,294 * L * n^2 * D^{-5,33} * Q^2 \quad (3)$$

Si se utiliza la fórmula de Darcy-Weisbach, EPANET emplea distintos métodos para calcular el factor de fricción (f) dependiendo del tipo de régimen del flujo. El Número de Reynolds (R_e) permite determinar qué fórmula aplicar para el cálculo de f , y viene dado por:

$$R_e = \frac{v * D}{\nu} \quad (4)$$

- Para flujo laminar ($R_e < 2.000$) se emplea la fórmula de Hagen-Poiseuille.

$$f = \frac{64}{R_e} \quad (5)$$

- Para flujo turbulento ($R_e > 4.000$), EPANET emplea la aproximación explícita de Swamee y Jain a la fórmula de Colebrook-White.

Fórmula de Colebrook-White

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{R_e * \sqrt{f}} + \frac{\epsilon}{3,7D} \right) \quad (6)$$

Fórmula de Swamee y Jain

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{R_e^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (7)$$

Cuya precisión es de $\pm 1\%$ del valor de f con respecto a la de Colebrook, dentro del intervalo de la rugosidad relativa $10^{-6} \leq \epsilon/D \leq 10^{-2}$ y del Número de Reynolds $4 \times 10^3 \leq R_e \leq 10^8$

- Para el flujo de transición ($2.000 < R_e < 4.000$) emplea la fórmula propuesta por E. Dunlop, que representa una interpolación cúbica entre el flujo laminar y la fórmula de Colebrook-White.

$$f = (X1 + R(X2 + R(X3 + X4))) \quad (8)$$

$$R = R_e/2000$$

$$X1 = 7FA - FB$$

$$X2 = 0,128 - 17FA + 2,5FB$$

$$X3 = -0,128 + 13FA - 2FB$$

$$X4 = R(0,032 - 3FA + 0,5FB)$$

$$FA = (Y3)^{-2}$$

$$FB = FA \left(2 - \frac{0,00514215}{Y2 * Y3} \right)$$

$$Y2 = \frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{R_e^{0,9}}$$

$$Y3 = -0,86859 * \ln \left(\frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{4000^{0,9}} \right)$$

donde:

- h_f : Pérdidas de carga debido a la fricción (m)
- L: Longitud de la tubería (m)
- D: Diámetro de la tubería (m)
- Q: Caudal (m³/s)
- C_{HW} : Coeficiente de rugosidad de HW (adimensional)
- f: Factor de fricción de DW (adimensional)
- n: Coeficiente de rugosidad de CM (adimensional)
- ϵ : Rugosidad absoluta de la pared interna de la tubería (m)
- R_e : Número de Reynolds (adimensional)
- v: Velocidad media del fluido (m/s)
- ν : Viscosidad cinemática del fluido (m²/s). $\nu = 1,1 * 10^{-6}$ m²/s para agua a 20°C

2.2.4. La Toolkit de EPANET

Llamada también Caja o Módulo de Herramientas. Permite a los desarrolladores personalizar el módulo de cálculo de EPANET según sus necesidades particulares, incorporando su librería de funciones al lenguaje de programación que más se adapte al usuario. Esta caja está conformada por siete archivos: cuatro archivos de cabecera, un archivo de ayuda, un archivo de texto y una librería de enlace dinámico. Todos estos archivos se pueden descargar desde la página oficial de la USEPA. En la Figura 4 se muestra los archivos que contiene la Toolkit de EPANET y en la Tabla 2 se describe cada uno de ellos.



Figura 4. Archivos que componen la Toolkit de EPANET

Tabla 2. Descripción de los archivos que componen la Toolkit de EPANET

Archivo	Descripción
epanet2.bas	Módulo de declaración de variables y funciones para ser utilizado con Visual Basic 6.0
epanet2.dll	Librería dinámica de EPANET
epanet2.h	Archivo de cabecera para utilizar las funciones con C/C++ 5.0
epanet2.lib	Archivo de cabecera para utilizar las funciones con Borland C/C++ 5.0 o Microsoft Visual C/C++ 6.0
epanet2.pas	Unidad para importar las funciones con Delphi 5.0 (Object Pascal)
Readme.txt	Describe el contenido de la caja de herramientas
toolkit.hlp	Archivo de ayuda en línea para Windows, donde se describe cómo utilizar las funciones de la librería en cada lenguaje de programación.

La versión más actualizada de la librería de cálculo de EPANET es la 2.2, tiene 125 funciones y está escrita en el lenguaje ANSI C. Posee módulos de código separados para el procesado de los datos de entrada, para el análisis hidráulico, el análisis de calidad del agua, la resolución del sistema de ecuaciones lineales con matrices dispersas y la generación de informes. Las funciones permiten leer o modificar la mayor parte de los datos del sistema bajo el control del programador.

Las variables y las funciones escritas en cada uno de los archivos de cabecera están preparadas para ser utilizadas desde entornos de programación que se ejecutan sobre el Sistema Operativo Windows de 32 bits. Si se quiere utilizar la Toolkit de EPANET en otros entornos de programación, con versiones más actualizadas, se debe modificar el tipo de dato declarado de ciertas variables y funciones, así como también la nueva ubicación de la librería de EPANET.

Investigadores de universidades y empresas, públicas y privadas de todo el mundo, utilizan la librería de EPANET para resolver problemas de diseño, sectorización, simplificación, optimización energética, calibración, fiabilidad y rehabilitación de redes de suministro de agua. Asimismo, la librería de EPANET puede llamarse desde distintas plataformas informáticas (AutoCAD, Matlab, SIG, R o Base de datos) para una mejor visualización de los resultados y añadir otras funciones que EPANET no tiene.

Desde el año 2008 en que se dejó de continuar con los avances en la librería de EPANET por parte de la USEPA, un grupo de investigadores independientes fundaron una comunidad abierta de nombre OWA (Open Water Analytics) para continuar con el desarrollo de herramientas y tecnologías relacionadas con la gestión del agua a nivel de cálculo tanto para EPANET como para SWMM. Todo el código producido es accesible a través de repositorios dentro de la plataforma digital GitHub, no estando ya soportado por la USEPA.

En el página web oficial de la OWA (2020), podemos encontrar unos enlaces que nos direccionan a sitios webs de gran interés. El primer enlace es un foro donde un usuario puede solicitar ayuda, encontrar respuestas o compartir ideas; el segundo enlace muestra los proyectos de software que llevan en marcha y los que colaboran desde cada repositorio de GitHub; en el tercero y cuarto enlace tenemos toda la documentación detallada de las nuevas funcionalidades de la versión más actual y el repositorio de código fuente de la librería de EPANET (epanet2.dll); en el quinto y sexto enlace se puede consultar la documentación y el código fuente de los últimos desarrollos de la librería de SWMM.

La última versión de la librería de EPANET lanzada por la OWA en diciembre del 2019 es la 2.2 y añade un conjunto de funciones para recuperar y establecer valores de todos los parámetros contenidos en un modelo de red, analizar múltiples proyectos en paralelo, realizar un análisis hidráulico por demandas dependientes de la presión, así como para añadir y borrar elementos del modelo de red. Además, es más estable en la convergencia hidráulica bajo condiciones de flujo casi nulo y el tiempo de ejecución del análisis hidráulico es más rápido.

Por iniciativa propia y con la colaboración de otros investigadores del IIAMA-UPV y el IMTA, se publicaron dos libros, uno en español y otro en inglés, con todos los detalles de cómo iniciarse en la programación con la Toolkit de EPANET. Estas obras fueron fruto de una pasantía realizada en el IMTA en el año 2017, con la financiación del Gobierno Peruano a través del CONCYTEC y el

IIAMA-UPV. Asimismo, se desarrollaron algunas herramientas para reducir los tiempos de trabajo en ciertos procesos repetitivos:

- Convertir un modelo de red de EPANET en archivos shapes y viceversa
- Ejecutar una simulación hidráulica y ver los resultados desde cualquier aplicación SIG
- Cambiar el sentido de orientación de las tuberías
- Renombrar los identificadores de los elementos de un modelo de red

Todas estas herramientas serán de gran ayuda para llevar a cabo los métodos propuestos en los siguientes capítulos de esta tesis doctoral. Además, cualquier modelador o investigador puede descargárselo desde la página web de Researchgate del autor de este trabajo.

2.2.5. La librería shapelib

Shapelib es una librería desarrollada por Warmerdam's, 1998, para el manejo de archivos tipo shape (.shp) manejados por los entornos SIG, la cual será utilizada a lo largo de esta tesis. Está programada en el lenguaje C, lo cual, lo hace ser muy rápida en los procesos de escritura y lectura de la información almacenada en un archivo de atributos (.dbf). Asimismo, permite crear nuevos archivos con las extensiones .shp, .dbf, .shx, y definir los tipos de datos para cada campo de una tabla.

Shapelib es de libre acceso y se encuentra disponible bajo licencia GNU-LGPL. El código fuente se puede descargar desde el repositorio de GitHub. Even Rouault, miembro de la fundación Open Source Geospatial (OSGeo) continúa añadiendo nuevas funcionalidades y corrigiendo errores a la extensión. La versión más actualizada es la 1.5 de finales de 2019.

Para visualizar los resultados almacenados en una tabla con extensión .dbf, después de aplicar los métodos que se proponen en los capítulos siguientes, se puede utilizar cualquier aplicación SIG (QGIS, ArcGIS, gvSIG, etc.) que ayude con la tarea de clasificar la información, debido a que el software EPANET no permite hacerlo, a menos que se modifique la rampa de colores y se utilice algunos de los atributos para almacenar los resultados.

2.3. Los modelos matemáticos de una red hidráulica

El modelo hidráulico de una red de abastecimiento, más que un fin, es una herramienta de ayuda para la toma de decisiones estratégicas de cualquier entidad gestora, lo cual, se ha convertido en el elemento clave para la mejora en la planificación, control, operación, el análisis hidráulico y de calidad de la red sin tener que llegar a experimentarlos físicamente (García-Serra & López, 2002). Sin su ayuda es difícil predecir el comportamiento de la red debido sobre todo a la respuesta no lineal de los elementos que la componen, de modo que cada vez más su uso es imprescindible para una moderna gestión de los abastecimientos (Bartolin, 2013).

El modelo matemático de una red de abastecimiento de agua consiste en un conjunto de fuentes de suministro y/o almacenamiento (embalses y/o depósitos), tuberías y elementos de regulación (bombas, válvulas) que sintetizan a un sistema físico real.

El objetivo de todo modelo matemático es reproducir, con ayuda de los algoritmos de análisis y simulación, el comportamiento real del sistema físico representando con la mayor exactitud

posible. Los modelos hidráulicos se pueden clasificar según el tipo de análisis y su utilidad (Lopez *et al.*, 2009). A continuación, se describen brevemente cada uno de ellos.

2.3.1. Según el tipo de análisis

Los modelos estáticos, simulan el estado de una red para un único instante. Generalmente una situación de mínimo o máximo consumo. Los modelos dinámicos, simulan el comportamiento de la red a lo largo del tiempo. Dentro de estos, los modelos cuasi-estáticos o en periodo extendido desprecian el efecto de cualquier transitorio en la red y asumen que los caudales y presiones se mantienen constantes durante cierto periodo de tiempo, actualizando solo los niveles de los depósitos de un periodo a otro. Los modelos inerciales, en cambio, tienen en cuenta la inercia del fluido y reproducen bien el comportamiento de la red siempre que los cambios en los elementos de regulación sean suaves, por ejemplo, al maniobrar las válvulas de control. Finalmente, los modelos elásticos tienen en cuenta los cambios bruscos de presión o golpes de ariete provocados por maniobras rápidas al tener en cuenta la elasticidad del fluido, por ejemplo, ante el arranque o parada de una bomba.

La operación de una red de suministro de agua está siempre en constante cambio debido a que debe cumplir unas condiciones mínimas de servicio. Para cumplir con dichas condiciones, se recurre a maniobras de algunos elementos de regulación (bombas y válvulas) para responder a las múltiples exigencias en las demandas que varían en el tiempo. Debido a todos estos cambios, muy pocas veces se puede considerar una red como algo estático (Bartolin, 2013).

2.3.2. Según su utilidad

Los modelos de detalle incluyen la mayoría de los elementos de la red. Estos modelos se utilizan sobre todo para modelar las operaciones diarias de mantenimiento, para localizar fugas, para planificar ampliaciones de red, para ajustar mejor la distribución de la demanda o para modelar la calidad del agua cuando llega al usuario. Los modelos arteriales son modelos simplificados de la red donde se incluyen todas las tuberías significativas, es decir, aquellas con gran capacidad de transporte. Estos modelos se utilizan para modelar las operaciones de control y gestión de los recursos o para realizar un análisis energético. Por último, los modelos estratégicos o también llamados macromodelos se limitan a incorporar unas pocas líneas y nodos cuyo comportamiento es equivalente al de todo el sistema. Estos modelos se suelen utilizar en el control de la red en tiempo real.

2.3.3. Modelos de redes reales que se utilizarán como casos de estudio

Para validar los métodos que se formulan en los Capítulos 3, 4, 5 y 6, se proponen tres modelos de redes reales: la red de Maspalomas (España), la red de Villena (España) y la red de Matamoros (México). A continuación, se resume las características principales de cada una de ellas.

2.3.3.1. Red de abastecimiento de Maspalomas

La zona de Maspalomas presenta un importante contraste topográfico, cuyo desnivel puede llegar hasta los 135 metros. Los aportes de agua al sistema proceden de cuatro fuentes de

suministro: las plantas desaladoras de Maspalomas I y Maspalomas II, el Pozo Sondeo 35 y el Pozo Filtros El Lomo. La regulación del suministro se realiza exclusivamente a través de seis grandes depósitos de distintas tipologías y con diferentes volúmenes de almacenamiento (Figura 5).

El agua que sale de las plantas desaladoras de Maspalomas I y II son almacenadas en los depósitos Gloria II y Gloria III. De estos depósitos, una parte del agua se inyecta directamente a la red y la otra se bombea hacia el depósito Gloria I. A partir de este depósito, una parte del agua se inyecta a otra zona de la red y el restante es conducido por gravedad hasta un repartidor (arqueta) a donde también llega un volumen de agua procedente del pozo Filtros El Lomo.

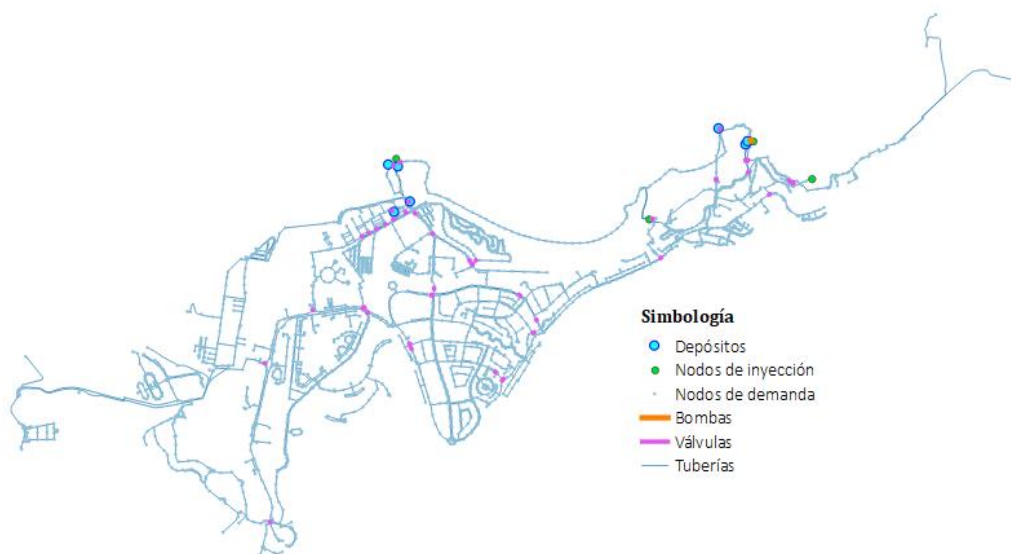


Figura 5. Ubicación de los elementos que componen la red de Maspalomas

En la Figura 6 se visualiza la distribución de los diámetros por tamaños, donde la red arterial es de tipo ramificada y la de distribución de tipo mixta (mallado-ramificado). El 60% de las tuberías conforman mallas y el 40% son ramificaciones.

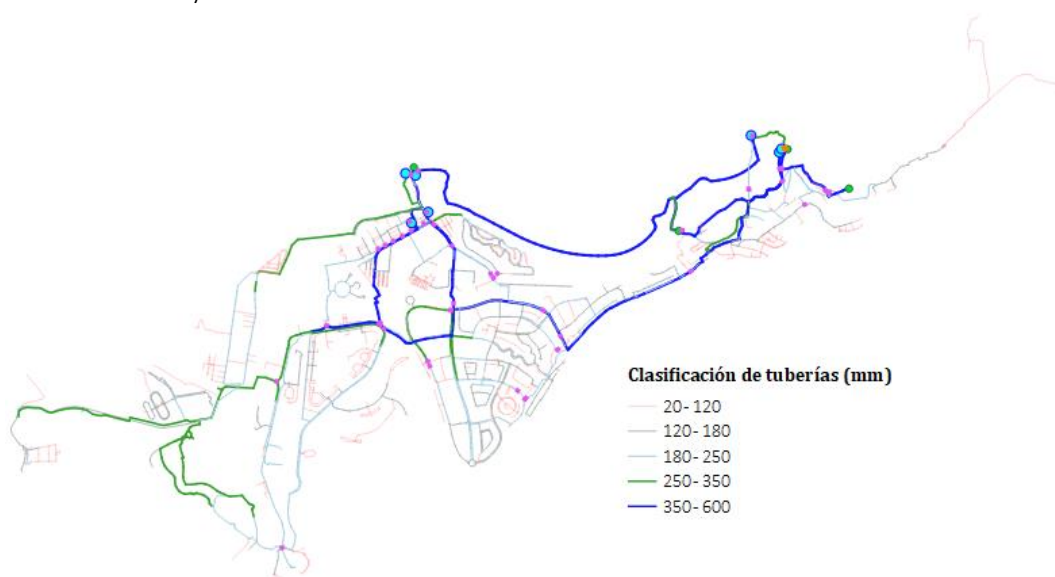


Figura 6. Red de tuberías de Maspalomas clasificadas por el tamaño de su diámetro

Los datos más relevantes de la red de Maspalomas son los siguientes: 2997 nodos de demanda, 7 depósitos, 3110 tuberías (169,26 Km), 3 bombas y 48 válvulas. El rango de diámetros está entre 20 y 600 mm (el 14% de las tuberías tiene un diámetro menor e igual a 100 mm). Las pérdidas de carga se calculan con la fórmula de Darcy-Weisbach y las rugosidades absolutas están entre 0,1 y 0,25 (el 91% de las tuberías tienen asignado el valor de 0,1). Las unidades de caudal empleadas son litros por segundo (lps) y el periodo de simulación es de 24 horas. El sistema es regulado mediante un conjunto de leyes de control.

2.3.3.2. Red de abastecimiento de Villena

Villena es un municipio de la Comunidad Valenciana (España). Tiene una superficie irregular con un desnivel de hasta 70 m y se abastece desde tres pozos de agua: Fisura, Solana y La Mina. El pozo de La Mina sólo entra en funcionamiento en caso de emergencia. El pozo de San Francisco también se incluye en el modelo, pero actualmente está fuera de servicio. El nivel del agua de los pozos en funcionamiento se encuentra a 370 msnm y el caudal bombeado de los pozos Fisura y Solana es de 80 y 56 lps respectivamente.

El suministro de agua a la red se realiza por inyección directa desde ambos pozos. Del pozo Fisura, parte del agua se almacena en los depósitos de Cruces II (6000 m³) y Cruces I (2500 m³) que realizan la función de regulación del sistema de bombeo y aportan caudal a la red en función de la demanda (Figura 7).

Los datos más relevantes de la red son los siguientes: 1198 nodos de demanda, 4 embalses, 2 depósitos, 1332 tuberías (82,77 Km) y 3 bombas. No se incluyen válvulas de regulación en este caso. El rango de diámetros está entre 20 y 400 mm (el 52% de ellos son menores o iguales a 100 mm). La fórmula de pérdidas de carga adoptada es la de Darcy-Weisbach y las rugosidades absolutas están entre 0,1 y 0,3 mm (el 88% de las tuberías tienen una rugosidad igual a 0,2 mm). La red se simula para un periodo de 23 horas y está regulada por un conjunto de leyes de control simples.

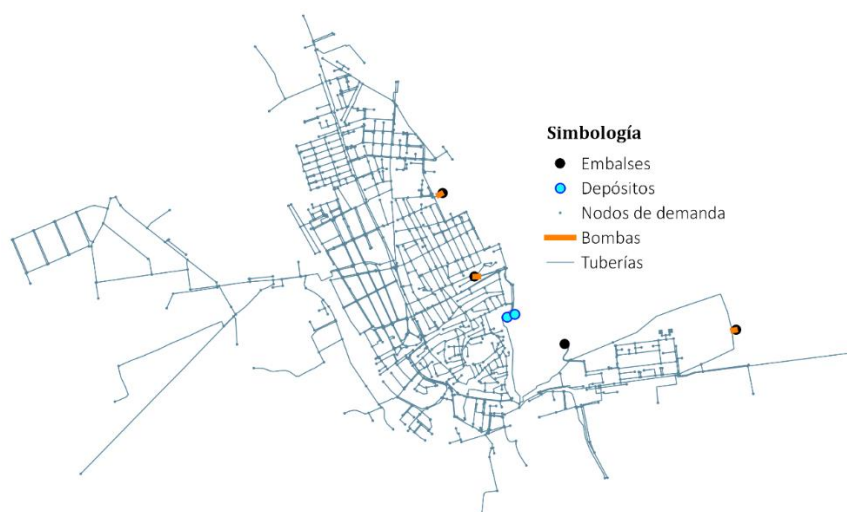


Figura 7. Ubicación de los elementos que componen la red de Villena

En la Figura 8 se visualiza la distribución de los diámetros por su tamaño, siendo la red arterial y de distribución de tipo mixta (mallado-ramificado). El 55% de las tuberías conforman mallas y el 45% son ramas.

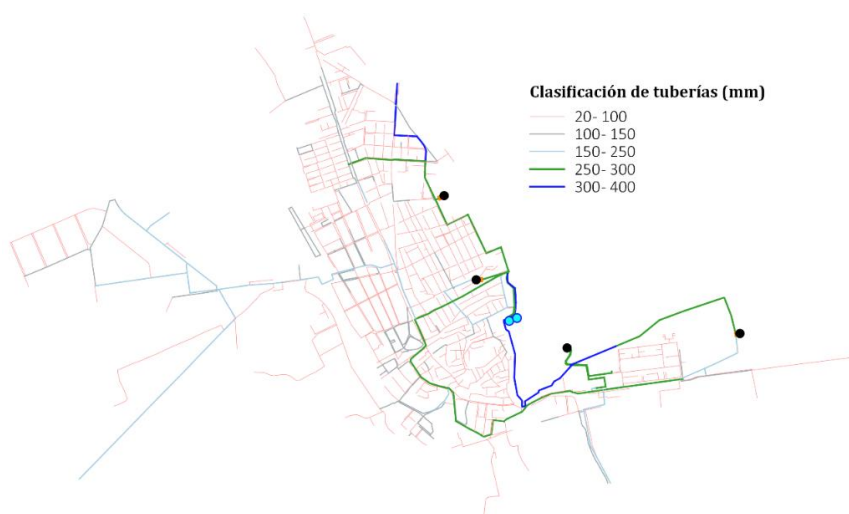


Figura 8. Red de tuberías de Villena clasificadas por diámetros

2.3.3.3. Red de abastecimiento de Matamoros

El Municipio de Matamoros está situado en la Llanura Costera del Golfo Norte, estado de Tamaulipas, con una altitud de 10 metros sobre el nivel del mar. El río Bravo separa este municipio con los Estados Unidos de Norte América y es la principal fuente de abastecimiento de agua tratada en cuatro plantas potabilizadoras. La superficie municipal es de 4634 Km² que representa el 5.8 % del estado de Tamaulipas, y su economía se basa en la agricultura y la industria. El clima es semiárido con precipitaciones anuales entre 600 a 700 mm de lámina de agua. La población actual de la ciudad supera los 600.000 habitantes y el número de conexiones de servicio a la red de distribución de agua de la ciudad asciende de unas 155.000 tomas. La longitud total de tuberías es de 1555 Km con diámetros entre 76 a 914 mm, y materiales diversos como cloruro de polivinilo (PVC), asbesto cemento, hierro fundido y polietileno de alta densidad. Además, el 70% de las tuberías tienen una antigüedad menor de 20 años. El transporte de agua desde las plantas de tratamiento hasta los depósitos elevados se realiza en tuberías de hierro fundido cuya antigüedad supera los 40 años, siendo esta una de las causas de las bajas presiones en algunos puntos de la red debido a los cuellos de botella que ocasionan una reducción de su capacidad hidráulica. Esto también puede provocar que el suministro de agua sea intermitente. Asimismo, existe un gran número de derivaciones conectadas a la red principal de tuberías que hacen que el agua no llegue a los sectores más alejados. El modelo de red (Figura 9) tiene 9 fuentes de suministro de agua representadas mediante embalses (3 depósitos y 6 pozos con sus respectivas bombas), 1280 nodos de demanda y 1648 tuberías.

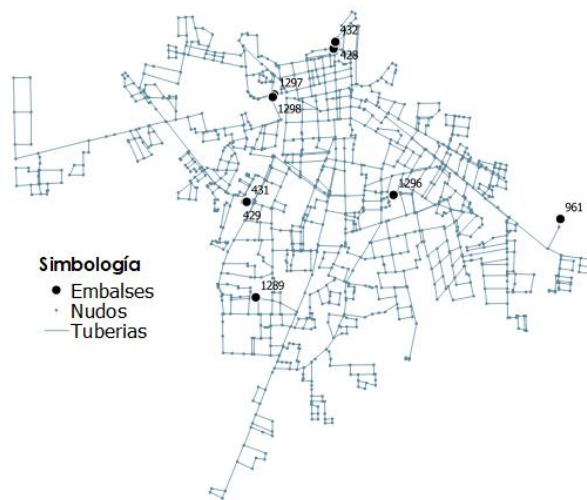


Figura 9. Modelo de red de Matamoros y la ubicación de sus elementos

En la Figura 10, se visualiza la distribución de los diámetros por tamaños, donde la red arterial y la red secundaria no queda bien definida con este tipo de clasificación. La red es totalmente mallada, sin embargo, existen algunos grupos de conducciones que cuelgan de una sola tubería.

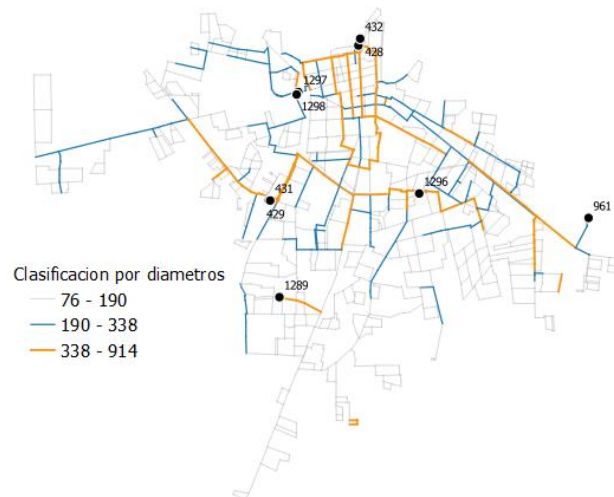


Figura 10. Red de tuberías de Matamoros clasificadas por el diámetro

2.4. La teoría de grafos

2.4.1. Introducción

En la naturaleza existen muchos sistemas físicos cuyo funcionamiento no sólo depende de las propiedades de sus componentes, sino también del modo en que están conectados. Un ejemplo de ello son las redes de suministro de agua cuyos elementos mantienen una localización, un trazado y una conexión entre sí. Si uno de ellos, sea un depósito o cualquier otro elemento, es retirado o se encuentra inoperativo, indudablemente estaremos alterando el funcionamiento de la red.

En matemáticas y ciencias de la computación, la teoría de grafos estudia las propiedades de las redes configuradas por elementos lineales y nodales conectados entre sí, y es una herramienta con multitud de aplicaciones en áreas tan diversas como la logística, investigación operativa, ingeniería, informática, genética, química, entre otras.

Una forma sencilla de representar un sistema es mediante diagramas. En este caso, el diagrama estará constituido por puntos llamados vértices o nodos y por aristas o enlaces. Estas últimas conectan pares de vértices siempre y cuando exista una relación entre ellos.

El comienzo de la teoría de grafos se atribuye a Leonhard Euler (1736), quien resolvió de manera matemática el problema de los puentes de Königsberg basándose en el concepto de grafos. Años después, Kirchhoff (1845) aplicó la teoría de grafos para analizar redes eléctricas y es considerado el primer caso aplicado a un problema de ingeniería. En 1852, con la conjetura de colorear un mapa con sólo cuatro colores, planteado por Francis Guthrie, más matemáticos se interesaron en el estudio de la teoría de grafos.

La teoría de grafos aplicada a las redes de suministro de agua permite analizar y proponer mejoras para aumentar su eficiencia hidráulica. Por ello, se ha utilizado para localizar posibles cuellos de botella, ubicar medidores de caudal de manera óptima, simplificar modelos de redes, analizar la vulnerabilidad de una red en servicio, analizar cerradas en caso de emergencia o rotura de tuberías, dimensionar las tuberías, asignar demandas, cuantificar la conectividad y estimar la redundancia, particionar la red en sectores y también para identificarlos, clasificar subsistemas hidráulicos, identificar zonas de influencia a partir de cada fuente, etc.

En este apartado se describen las formas en que se pueden representar los grafos y los algoritmos más eficientes para explorarlos e identificar árboles y trayectos.

2.4.2. Representación de grafos

Un grafo se suele representar por $G = (V, A)$, donde $V = V(G)$ es el conjunto finito de vértices y $A = A(G)$ es el conjunto de pares no ordenados de vértices, denotados por (i, j) que se denominan aristas. Si la arista $a = (i, j)$ relaciona los vértices i e j , se dice que i e j son vértices adyacentes y también que el vértice i (ó j) y la arista a son incidentes (Figura 11).

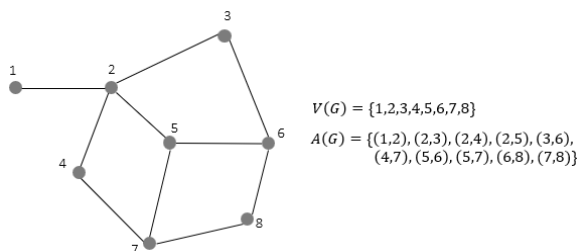


Figura 11. Ejemplo de un grafo

Una característica especial de los grafos es que podemos representarlos mediante estructuras de datos distintas. Según la forma de representar el grafo y el número de vértices y aristas (grafo denso o disperso), los algoritmos que se apliquen sobre ellos pueden tomar tiempos diferentes.

A la hora de representar un grafo se puede elegir entre la matriz de incidencias, la matriz de adyacencias o la lista de adyacencias.

Matriz de incidencias

A un grafo $G = (V, A)$ con v vértices y a aristas, siempre se le puede hacer corresponder una matriz $v \times a$ denominada Matriz de Incidencias de G . Si denotamos los vértices de G por v_1, v_2, \dots, v_v y las aristas por a_1, a_2, \dots, a_a , entonces la Matriz de Incidencias de G es la matriz $M(G) = [m_{ij}]$ donde m_{ij} es el número de veces que la arista a_j incide en el vértice v_i ; los valores pueden ser 0, 1 o 2 (2 en caso de que la arista sea un lazo).

Matriz de adyacencias

Es la forma más común de representación y la más directa. Consiste en una tabla de tamaño $v \times v$, en la que $a[i][j]$ tendrá como valor 1 si existe una arista del nodo i al nodo j , caso contrario, el valor será 0. Cuando se trata de grafos ponderados, en lugar de 1, el valor que tomará será el peso de la arista. Si el grafo es no dirigido, hay que asegurarse que se marque con un valor de 1 (o con el peso) tanto la entrada $a[i][j]$ como la entrada $a[j][i]$ para confirmar que la arista se puede recorrer en ambos sentidos.

Cada problema tendrá una forma de entrada distinta y la inicialización será conveniente adaptarla a cada situación. En todo caso, esta operación es sencilla si el número de nodos es pequeño. Si por el contrario la entrada fuese muy grande, se pueden almacenar los nombres de los nodos en un árbol binario de búsqueda o utilizar una tabla de dispersión asignando un entero a cada nodo que será utilizado en la matriz de adyacencia. Esta matriz de adyacencia siempre ocupa un espacio de $V \times V$, es decir, depende solamente del número de vértices y no el de aristas, lo cual es muy útil para representar grafos densos.

Lista de adyacencias

Otra forma de representar un grafo es por medio de listas que definen las aristas que conectan a los vértices. Lo que se hace es definir una lista enlazada a cada vértice donde se almacena los vértices a los cuales es posible acceder. Es decir, un vértice A tendrá una lista enlazada asociada en la que aparecerá un elemento con una referencia al vértice B, si A y B tienen una arista que los une. Obviamente si el grafo es no dirigido, en la lista enlazada de B aparecerá la correspondiente referencia al vértice A.

Las listas de adyacencia son estructuras que almacenan un valor entero (el número que identifica al vértice destino), así como otro valor numérico que indica el coste en el caso de que el grafo sea ponderado. En este caso, el espacio ocupado será $O(V + A)$ muy distinto del necesario para almacenar la matriz de adyacencia que era de $O(V^2)$. Por lo tanto, esta representación será más adecuada para grafos dispersos.

Hay que tener en cuenta un aspecto importante, y es que la implementación con listas enlazadas determina fuertemente el tratamiento del grafo posterior. Los vértices se van añadiendo a las listas según se leen las aristas por lo que nos encontramos que un mismo grafo con un orden distinto de las aristas en la entrada, producirá listas de adyacencia diferentes y por ello variará el orden en que se procesen los vértices. Una consecuencia de esto es que, si un problema tiene varias soluciones la primera que se encuentre dependerá de la entrada dada. Podría presentarse

el caso de tener varias soluciones y tener que mostrarlas siguiendo un determinado orden. Ante una situación así, podría ser muy conveniente modificar la forma de ingresar los vértices en la lista, por ejemplo, hacerlo al final y no al principio o incluso insertarlos en una posición adecuada de manera que el algoritmo nos diera las soluciones ya ordenadas.

Sea cual sea el modo de representación adoptado, las siguientes definiciones se aplican en todos los casos:

- En un grafo se denomina ruta, trayecto o camino a una secuencia de vértices conectados en la que cada vértice consecutivo de dicho camino (después del primero de ellos) resulta adyacente a su predecesor quedando unidos por una sola arista. En un trayecto simple, los vértices y las aristas no se repiten.
- Una malla o ciclo es un conjunto de enlaces simples configurando un camino, en el que los vértices inicial y final (i, j) coincidan.
- Un grafo G es conexo si para todo par de vértices distintos i, j de G existe un camino de i a j , caso contrario el grafo es inconexo
- En el caso de las redes hidráulicas, cabe señalar que, si un algoritmo de recorrido identifica que la red es inconexa pero los subgrafos están abastecidos por al menos una fuente de suministro, entonces, estaremos ante un sistema constituido por varios grafos independientes.

2.4.3. Algoritmos de exploración de grafos

Para recorrer un grafo completo se pueden aplicar dos métodos distintos. Ambos tienen el mismo objetivo que es explorar todos los vértices o hasta encontrar el vértice deseado. El orden en que estos vértices son visitados decidirá el tiempo de ejecución de un algoritmo. Una forma sencilla de recorrer los vértices es mediante una función recursiva, aunque también puede realizarse con una pila, lo que se denomina búsqueda en profundidad. La sustitución de la recursión por una cola nos proporciona el segundo método de exploración llamado búsqueda en amplitud. Estas dos formas de recorrer un grafo se aplican tanto a grafos dirigidos y no dirigidos.

Búsqueda en profundidad (DFS, Depth First Search)

Desarrollado por Tarjan (1972). Es el más conocido y puede ser implementado de forma recursiva haciendo uso de un contador y un vector para el marcado de los vértices visitados, o bien de forma iterativa mediante una pila de tipo LIFO (Last-In-First-Out), es decir, el último en entrar es el primero en salir.

Dado un grafo $G = (V, A)$ y un vértice $v \in V$, el algoritmo explora sistemáticamente las aristas de manera que primero se visitan los vértices adyacentes a los visitados más recientemente. De esta manera se va profundizando en el grafo, es decir, nos vamos alejando progresivamente del vértice inicial. Cuando el algoritmo alcanza un vértice final, no conectado a ningún otro, se retrocede hasta el nodo no explorado más reciente y se continúa recorriendo los vértices adyacentes. El proceso finaliza cuando se han explorado todos los vértices de un grafo o cuando se llega hasta el vértice buscado.

El pseudocódigo para implementar este método de recorrido en profundidad es el siguiente:

1. Inicializar
 - a) Identificar las líneas adyacentes de cada vértice
 - b) Seleccionar el vértice de origen
 - c) Almacenar el vértice inicial en una pila de tipo LIFO
 - d) Declarar un vector de vértices explorados y añadidos
2. Hasta que la pila quede vacía, aplicar el procedimiento siguiente
 - a) Extraer el último vértice de avance de la pila y eliminarlo
 - b) Marcar el vértice de avance como explorado
 - c) Obtener las aristas adyacentes del vértice de avance y añadir a la pila los vértices adyacentes no explorados y que no hayan sido añadidos anteriormente
 - d) Marcar los nuevos vértices añadidos a la pila como añadidos
3. Finalizar el proceso

Búsqueda en Amplitud (BFS, Breadth First Search)

Este método fue desarrollado por Pohl (1969) y se utiliza una cola de tipo FIFO (First-In-First-Out), es decir, el primer elemento en entrar es el primero en salir. Un ejemplo sencillo es la cola que hace uno para pagar en un comercio, donde, el primero en llegar será el primero en ser atendido.

Dado un grafo $G = (V, A)$ y un vértice $v \in V$, el algoritmo explora sistemáticamente las aristas del grafo G de manera que primero se visitan los vértices más cercanos a v tomando cada uno de ellos como frente de avance. El proceso se repite hasta que todos los vértices del grafo se hayan explorado.

El pseudocódigo para implementar este método de recorrido en amplitud es el siguiente:

1. Inicializar
 - a) Identificar las líneas adyacentes de cada vértice
 - b) Seleccionar el vértice de origen
 - c) Almacenar el vértice inicial en una pila de tipo FIFO
 - d) Declarar un vector de vértices explorados y añadidos
2. Hasta que la pila quede vacía, aplicar el procedimiento siguiente
 - a) Extraer el primer vértice de avance de la pila y eliminarlo
 - b) Marcar el vértice de avance como explorado
 - c) Obtener las aristas adyacentes del vértice de avance y añadir a la pila los vértices adyacentes no explorados y que no hayan sido añadidos anteriormente
 - d) Marcar los nuevos vértices añadidos a la pila como añadidos
3. Finalizar el proceso

Ambos métodos son similares, pero se diferencian al momento de seleccionar el nuevo vértice de avance. Mientras que el de amplitud su frente de avance lo realiza a lo ancho del grafo, el de profundidad lo hace a lo largo del grafo. Estos algoritmos con unas ligeras adaptaciones se van a utilizar en los métodos propuestos en los próximos capítulos de esta tesis.

2.4.4. Árboles de expansión y bosques

Un árbol de expansión o generador es aquel que contiene todos los vértices del grafo conexo y que no contiene ciclos (grafo acíclico). Un grafo conexo tiene al menos un árbol de expansión.

Un bosque es un grafo acíclico, es decir, una unión disjunta de árboles. Esto permite la posibilidad de que el grafo consista en un solo árbol. Una definición equivalente de un bosque sería un grafo que no contiene ciclos.

Se llama rama a cualquiera de las aristas perteneciente al árbol, y cuerda aquella arista que no pertenece al árbol pero que unen dos vértices de este. Y una hoja en un grafo es un vértice de grado uno.

Un grafo H es un subgrafo de un grafo G si $V(H) \subseteq V(G)$ y $E(H) \subseteq E(G)$. Si $V(H) = V(G)$, decimos que H es un subgrafo generador de G (Figura 12).

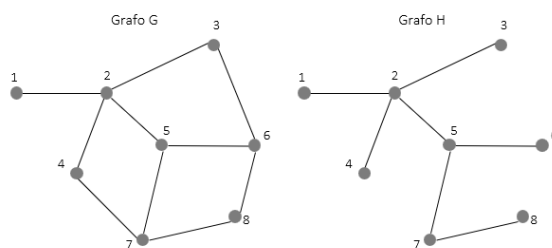


Figura 12. Ejemplo de un árbol de expansión obtenido a partir del grafo G

Si aplicamos los algoritmos de recorrido en profundidad y de amplitud sobre un grafo simple conexo, se van a obtener esquemas de árboles distintos debido a la forma de seleccionar el nuevo nodo de frente de avance. Sin embargo, si el grafo es ponderado, es decir, todas sus aristas tienen asignado un peso w , de modo que, $G = (V, A, w)$, es posible adaptar los algoritmos de recorrido en profundidad o en amplitud para obtener el árbol de expansión de mínimo o máximo coste.

En particular, el árbol de mínimo Coste $H(V, A', w)$ (MST, Minimum Spanning Tree) será aquel que cumpla:

$$Coste(H) = W_H = \sum_{i \in A'} w_i = Min$$

Si los pesos de las aristas son todos diferentes, el árbol de expansión será único. Pero, si algunos costes se repiten el árbol de mínimo coste puede no ser único. En la Figura 13 se visualiza el árbol de mínimo coste (Grafo H) obtenido a partir del Grafo G.

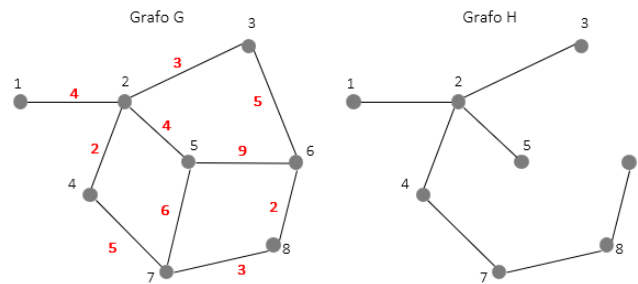


Figura 13. Árbol de mínimo coste (Grafo H)

Entre los algoritmos de búsqueda más utilizados para construir el árbol de expansión de mínimo coste está el de Boruvka, Kruskal y Prim. Los dos primeros construyen el árbol final a partir de la unión de otros árboles perteneciente al mismo grafo. En cambio, el algoritmo de Prim construye el árbol mediante la incorporación de aristas sucesivas.

2.4.5. Grafos dirigidos

Un grafo es dirigido u orientado (dígrafo) cuando a cada una de sus aristas se les atribuye un sentido. Este sentido marcará la manera de recorrer el grafo.

Se dice que un grafo G es dirigido, si las aristas están dadas por un conjunto de pares ordenados de vértices. En este tipo de grafos, se asumen que las aristas se pueden recorrer en un solo sentido afectando al trazado del árbol de expansión (Figura 14). En el caso que las aristas del grafo dirigido tengan asignado un peso, se obtiene un grafo dirigido ponderado $G = (V, A, \vec{w})$.

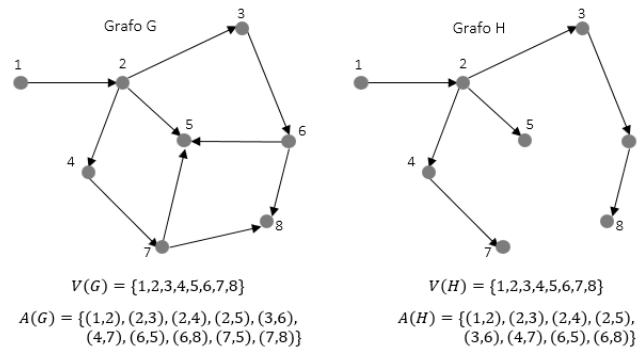


Figura 14. Ejemplo de un dígrafo y su árbol de expansión

2.4.6. Camino más corto

Anteriormente ya se ha definido un camino como una secuencia de vértices conectados por aristas. Para encontrar el camino de mínimo coste desde un nodo de origen a todos los demás nodos del grafo, Dijkstra (1959) desarrolló un algoritmo muy eficiente de complejidad $O(n^2)$ donde n es el número de vértices.

El principio de optimalidad es el fundamento sobre el que se basa este algoritmo: si el camino más corto entre los vértices A y C pasa por el vértice B, entonces la parte del camino que va de B

a C debe ser el camino más corto entre todos los caminos que van de B a C (Figura 15). De esta manera, se van construyendo sucesivamente los caminos de mínimo coste desde un vértice inicial hasta cada uno de los vértices del grafo y se utilizan los caminos conseguidos como parte de los nuevos caminos.

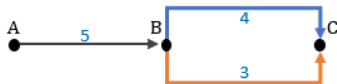


Figura 15. Camino más corte entre el punto A y C

Las aplicaciones de este algoritmo a la vida real son numerosas e importantes, lo cual, hace de él uno de los más relevantes en la teoría de grafos. Algunos ejemplos son el enrutamiento de aviones y tráfico aéreo, el reconocimiento del lenguaje hablado, la extracción de características curvilíneas de imágenes, el encaminamiento de paquetes por los routers, etc.

Mediante pseudocódigo, el algoritmo se puede implementar de la siguiente manera:

1. Se parte de un vértice inicial y se calcula cuál es el más próximo.
2. Se fija el vértice que está a una menor distancia, sino ha sido fijado anteriormente.
3. Se comprueba si, utilizando como punto intermedio el último vértice fijado, se llega a nuevos vértices o se encuentra un camino más corto a los que ya hemos accedido.
4. Con la información anterior se actualizan, si procede, las distancias mínimas desde el vértice inicial a cada vértice y se determina cuál es el vértice anterior en el camino más corto desde el inicial a cada uno de ellos.
5. Se vuelve al paso 2 hasta que todos los vértices estén fijados.

2.5. Análisis topológico de modelos de redes de distribución de agua potable

2.5.1. Introducción

La topología es probablemente la rama clásica más joven de las matemáticas que se encarga de estudiar la estructura de los objetos sin atender a su tamaño y su forma inicial. Leibniz G. fue el primero en utilizar los términos geometría de posición (geometría situs) y análisis de posición (analysis situs) en el siglo XVII para referirse a lo que se conoce hoy en día como topología. Esta rama de las matemáticas estudia de manera intuitiva tres teorías topológicas: la teoría de grafos, la teoría de nodos y la teoría de superficies (Macho, 2002).

En la naturaleza, existen sistemas físicos cuya ejecución depende no sólo de las características de sus componentes sino también de la posición relativa de sus elementos. Un ejemplo claro de esto son los sistemas de suministro de agua. Si algún elemento del sistema sea un depósito, bomba o válvula lo retiramos, o se encuentra inoperativo, indudablemente estaremos alterando algunas de las funciones del sistema. Esto nos indica que el desempeño de una RDAP está íntimamente relacionado con las características de sus componentes y su relación con los elementos contiguos. Las redes de suministro de agua, pueden ser asimiladas a un grafo conexo formado por una serie de arcos que representan a las tuberías, válvulas y bombas, y una serie de nodos que representan

a los embalses, depósitos y puntos de extracción de caudal (Vegas, 2012). La naturaleza geométrica de los arcos no es importante, sólo cuenta la manera en la que los vértices están conectados (Macho, 2002).

La teoría de grafos aplicada a las RDAP nos ayuda a comprender mejor su organización estructural y a buscar nuevas soluciones a los distintos problemas que la afectan. Son numerosos los trabajos llevados a cabo en el área de la hidráulica urbana donde se aplican los algoritmos descritos en el apartado 2.4 para analizar la conectividad de la red, su robustez, identificar las válvulas manuales a cerrar para realizar labores de mantenimiento o reparación, identificar sectores hidráulicos, esqueletizar modelos para su uso en tiempo real o en tareas de optimización como la localización de sensores, entre otras (Bartolin, 2013).

En el siguiente apartado se describen algunos de los trabajos más relevantes en los que se han aplicado los algoritmos de búsqueda o el algoritmo de la ruta más corto para identificar subredes, identificar elementos críticos, localizar elementos de control e identificar las tuberías principales.

2.5.2. Estado del arte

Un sistema de distribución de agua es un conjunto de elementos conectados para transportar cantidades de agua desde las fuentes de suministro hasta los consumidores finales. La teoría de grafos aplicado a las RDAP permite caracterizar su comportamiento explorando los elementos que la componen juntamente con sus propiedades y la relación entre ellos.

En la elaboración de un modelo hidráulico podemos encontrarnos con ciertas dificultades. La primera sería la desconexión de la red en algunas zonas. Esto puede suceder cuando tratamos de convertir el trazado de una red almacenado en un soporte digital como AutoCAD, SIG, Excel o Base de datos en un modelo hidráulico en particular.

EPANET permite modelar RDAP, sin embargo, tal como se comentó en el apartado 2.2, carece de funciones específicas que permitan identificar elementos aislados (subredes) como también caracterizar a las subredes con respecto a las demandas asignadas y las fuentes que las abastece. La desconexión de una red puede ser de dos formas: física (ausencia de enlaces) e hidráulica (por el cierre de algún elemento). EPANET, de forma indirecta, muestra la desconexión de la red si se ejecuta primero una simulación y luego se clasifica a los nodos de demanda con presiones por debajo de cero. Sin embargo, si el grupo de nodos aislados físicamente no tienen asignado los caudales, EPANET no reconoce que existe una desconexión y da por válida la simulación. Sólo es posible identificarlos visualmente después de clasificar los nodos con presiones por debajo de cero. Esto puede crear confusión con los nodos sin demandas asignadas que están correctamente conectados pero que sus presiones puedan ser negativas.

Uno de los primeros estudios en aplicar los algoritmos de exploración de la teoría de grafos para identificar subredes, nodos desconectados y definir sectores hidráulicos es Tzatchkov *et al.* (2006). El algoritmo utilizado para explorar la red es el de profundidad y fue implementado en la herramienta SCARED desde el entorno de AutoCAD 2004. Otra extensión que lleva un módulo para analizar la conectividad de los elementos de un modelo de red es GISRed para ArcView 3.x, desarrollada por Bartolin (2013). El algoritmo de exploración implementado es el de amplitud, pero tiene cierta dificultad de avance cuando se encuentra con un grupo de tuberías en serie

cerradas. Actualmente, existe una nueva versión de GISRed llamada QGISRed (Martínez & Lerma, 2019). Este plugin se ejecuta desde la aplicación de QGIS, cuyos algoritmos implementados para identificar subredes y subsistemas hidráulicos están basados en los desarrollos en esta tesis. En cuanto a los softwares privativos como WaterGEMS e InfoWater WS Pro, estas aplicaciones tienen su propio gestor de errores para solucionar los problemas de conectividad. Asimismo, las plataformas SIG más utilizadas para digitalizar redes hidráulicas (ArcGIS, QGIS y gvSIG) permiten conectar los elementos que hayan podido quedar aislados. Sin embargo, no pueden interpretar las causas de los errores porque no están conectados con algún modelo de análisis hidráulico.

La teoría de grafos aplicado al análisis topológico de las RDAP, ayudan a entender mejor la distribución del flujo red y los procesos dinámicos que pueden afectar su desempeño (Yazdani & Jeffrey, 2010). Además, permite evaluar la capacidad de transporte de la red, detectar cuellos de botella, analizar alternativas de suministro (Bartolin, 2013); identificar las válvulas manuales a cerrar del polígono de corte (Alvisi *et al.*, 2011; Orazio Giustolisi & Savic, 2010; Tiejun, 2014; T. Walski, 1993); evaluar la fiabilidad del suministro en la distribución del agua (Di Nardo *et al.*, 2018; Tzatchkov *et al.*, 2016; Akgun *et al.* 2010; Yannopoulos & Spiliotis 2013; Ostfeld 2004, 2005; Ostfeld & Shamir 1996; Gupta & Bhave 1994; Jacobs & Goulter 1988, 1989).

En los últimos años, está cobrando mucho interés desarrollar metodologías para identificar la red de tuberías principales de los sistemas de suministro de agua que permitan a los operadores comprender mejor su estructura, importancia y criticidad (Fortini *et al.*, 2014). También, su identificación puede ayudar a las empresas que gestionan el servicio de agua a centrar el esfuerzo de supervisión y mantenimiento de las tuberías prioritarias (Di Nardo *et al.*, 2018). Asimismo, se está utilizando a la red principal de tuberías en el diseño de proyectos de sectorización (Campbell, 2017; Vegas, 2012; Zhang *et al.*, 2019) y simplificación (Fortini *et al.*, 2014) de modelos. Existen diferentes propuestas para identificar la red principal de tuberías, la más común es por su diámetro (diámetros mayores sin conexiones menores). Ferrari *et al.* (2014), menciona que la red principal y de distribución está en función del tamaño de la RDAP. Para los autores, la red principal de un sistema de abastecimiento de agua estaría conformado por diámetros superiores a 350 mm. Fortini *et al.* (2014) propone un método para identificar la red principal sobre un grafo conectado y no dirigido, en función de la capacidad máxima de transporte de agua. Lo cual, asume como peso de cada tubería los parámetros geométricos (longitud y diámetro de tubería). En caso de disponer de un modelo calibrado, el peso sería el flujo. Campbell (2017), recomienda realizar un análisis del comportamiento hidráulico de la red para analizar el rol de las tuberías en el abastecimiento para el periodo de máxima demanda. Para definir la red de tuberías principales aplica el algoritmo del camino más corto para establecer una jerarquía de tuberías y mediante un análisis estadístico selecciona a las conducciones principales. Por su parte, Di Nardo *et al.* (2018), desarrolla una metodología basada en un procedimiento heurístico de optimización y en la evaluación de índices topológicos y energéticos para identificar las tuberías primarias que cumpla con el rendimiento hidráulico de diseño (presión mínima de servicio).

2.6. Sectorización de modelos de redes de suministro de agua

2.6.1. Introducción

El gran desafío al que se enfrenta toda empresa gestora de agua es suministrar dicho elemento con unas condiciones mínimas de servicio (calidad, continuidad y presión), y con el mayor rendimiento hídrico y energético. Esta situación puede complicarse si la red es de gran tamaño, y más aún, si existe un desconocimiento de los caudales que discurren por las tuberías. Por tal motivo, las empresas están apostando muy fuerte por sectorizar sus redes para tener un mayor control en la gestión de las presiones y los caudales circulantes, y de esta forma, reducir las fugas y facilitar su localización, mejorando con ello el rendimiento hidráulico de la red.

La sectorización es el proceso de dividir una red en sectores, áreas o distritos más pequeños con entradas y salidas perfectamente controladas, donde cada sector está delimitado por un conjunto de válvulas de corte que lo aíslan de los sectores contiguos y un conjunto de caudalímetros que controlan el volumen de entrada y de salida de cada distrito. A estos sectores también se les conoce como DMA, por sus siglas en inglés (Distric Metered Area). Cada uno de ellos, constituye una unidad de gestión que debe tener suficiente independencia, de modo que pueda llevarse a cabo su control y operación de la manera más rápida y fiable posible (Di Nardo *et al.*, 2013).

En el proceso de dividir una RDAP en sectores, se debe minimizar el número de válvulas de corte y/o caudalímetros, y maximizar la homogeneidad interna de los distritos en términos de elevación y consumo. De esta manera, se evita que el rendimiento hidráulico y la confiabilidad de la red disminuya (Laucelli *et al.*, 2016). Por eso, se dice que la sectorización es una técnica contraria a los criterios tradicionales del diseño de RDAP, según los cuales cuanto más mallada sea la red, mayor será la fiabilidad del suministro ante posibles fallos mecánicos e hidráulicos (Ochoa, 2014).

La sectorización de una RDAP involucra factores técnicos (calidad en el servicio), ambientales (cantidad de uso de agua y energía), sociales (continuidad en el servicio) y financieros (ingresos e inversión en capital), componentes que se deben tener en cuenta a la hora de poner en marcha un proyecto de sectorización (Sousa *et al.*, 2015). A todo esto, los beneficios son múltiples: hay un mayor control de los volúmenes de agua que entran y salen de cada sector, y facilita la creación de un sistema de control permanente de la presión y del caudal, permitiendo reducir y mantener los niveles de fuga en la red (Morrison *et al.*, 2007).

Uno de los problemas más comunes al delimitar una RDAP en sectores es la caída de la presión en algunos puntos de la red debido al aumento del caudal que debe circular por otras tuberías, provocado por el cierre de algunas válvulas, y las altas presiones durante las horas de menor consumo. Generalmente, para mejorar estos inconvenientes se suele optar por añadir nuevos puntos de alimentación a los sectores, instalar válvulas reductoras de presión o añadir nuevas conducciones para mantener unas condiciones óptimas de servicio (CONAGUA, 2007).

En la literatura científica podemos encontrar diversas metodologías que permiten dividir o particionar un modelo de red de abastecimiento de agua en varios sectores controlados. Estos métodos, en su mayoría, proceden en dos fases: agrupamiento y sectorización. En la primera fase se define la configuración óptima de los sectores, y en la segunda se identifica las tuberías donde

se deben instalar las válvulas de corte y/o caudalímetros. A continuación, se presentan los aportes más relevantes en este tema.

2.6.2. Estado del arte

Antes de aparecer las primeras aplicaciones de software para el modelado y diseño de RDAP, el profesional se enfrentaba a una tarea difícil y tediosa que podría costarle días o semanas. En aquellos tiempos, la práctica habitual era diseñar dichos sistemas descomponiendo o dividiendo la red en varios subsistemas, donde el número de elementos que comprendería cada subsistema dependía de la intuición del diseñador basada en sugerencias empíricas (número de propiedades, longitud de tuberías, etc.) y con un enfoque de ensayo y error. Estas condiciones limitaban aplicar esta técnica en grandes sistemas de abastecimiento; además, la capacidad de almacenamiento y el tiempo de cálculo de los computadores de aquella época no eran suficientes para utilizar un software de simulación (Di Nardo *et al.*, 2013).

Dividir una red de suministro de agua en sectores, de manera adecuada, puede ser un gran desafío debido a la complejidad intrínseca de las RDAP. Es así, como la sectorización empieza a tomar importancia a partir de las conferencias ofrecidas por las Naciones Unidas (UN) en los años 70. El concepto de DMA en las RDAP fue introducido por los años 80, cuando la industria del agua del Reino Unido publicó un documento, el Report 26 Leakage Control Policy & Practice (Water Authorities Association, 1985), donde se propone una técnica para dividir la red de suministro en áreas más pequeñas, con el objetivo de mejorar la gestión del control de las fugas. A partir de ese documento, se han venido desarrollado distintas metodologías para sectorizar RDAP basándose principalmente en la combinación de la teoría de grafos (algoritmos de exploración), la estructura de comunidades, los procedimientos basados en modularidad, la partición multinivel, los enfoques espectrales y los enfoques multiagente, con criterios económicos, energéticos y enfoques de optimización (Bui *et al.*, 2020).

Swamee & Sharma (1990), desarrollaron un algoritmo automático para dividir la red en función del alcance de las fuentes de suministro hacia los nodos de consumo, y reducir de esta manera el coste del diseño y los tiempos de cálculo. La metodología consiste en determinar los trayectos que existen entre las fuentes de suministro y los nodos de consumo teniendo en cuenta la dirección del flujo de cada tubería. Luego, se analizan todos los caudales que forman parte de cada trayecto y se selecciona el de menor valor, logrando de esta manera dividir la red en varios subsistemas contiguos.

Tzatchkov *et al.* (2006), demostraron la efectividad de los algoritmos de búsqueda en profundidad y amplitud en grandes RDAP para identificar subredes separadas, nodos aislados, el conjunto de nodos que pertenece a cada sector y la contribución de las fuentes de suministro sobre el consumo de cada nodo (zona de influencia). Estos algoritmos fueron implementados en SCARED, una aplicación desarrollada en AutoCAD 2004. Mientras Di Nardo *et al.* (2009), proponen un sistema de apoyo a la toma de decisiones para identificar un conjunto limitado de tuberías candidatas en función de los resultados de las simulaciones hidráulicas y una metodología derivada de la teoría de grafos para definir las DMA. Este conjunto de tuberías se obtiene a partir de la frecuencia de paso más baja entre todas las rutas de mínima potencia disipada, desde cada

fuentes de suministro hasta todos los nodos de la red. Para ello, utilizan el algoritmo de Dijkstra a partir de las condiciones de funcionamiento de máxima demanda.

Saldarriaga *et al.* (2011), analizan el efecto de la sectorización hidráulica a través del índice de resiliencia, sobre dos modelos de redes ficticias y un modelo de red real, después de aplicar cinco criterios distintos para dividir las redes hidráulicas: mediante límites naturales, pérdidas de energía, caudal, presión y potencia. Los mejores resultados obtenidos según los criterios seleccionados fueron: modelo 1 (por presión), modelo 2 (por caudal), y modelo 3 (por pérdidas de energía). Un cuarto modelo de red real se emplea para validar una metodología de sectorización basada en la red de transporte, las entradas a los sectores y el cierre de tuberías con menor potencia disipada.

Vegas (2012), evaluó distintos pesos asociados a las tuberías para la creación de los árboles de mínimo coste. Estos pesos fueron: longitud, diámetro, caudal, velocidad, pérdidas de carga y la resistencia hidráulica. El árbol obtenido a partir del peso del caudal asociado a cada tubería junto con el criterio para agrupar sectores por el número máximo de abonados, dieron los mejores resultados.

Gomes *et al.* (2012), desarrollaron un método para definir los sectores basado en la simulación de un algoritmo de recorrido para identificar el número y la ubicación de los sectores, válvulas de corte y el refuerzo o reemplazo de tuberías necesarias para cumplir con los requisitos de velocidad y presión. La función objetivo del algoritmo es la diferencia entre los beneficios económicos por la reducción de las fugas de agua y el coste de implementar la red sectorizada.

Bartolin (2013) en su tesis doctoral propuso dos algoritmos, uno para identificar y el otro para diseñar sectores hidrométricos. El primer algoritmo se apoyó en la topología del modelo de red y en los elementos que definen y delimitan cada uno de los sectores, esto es, el estado de las válvulas de corte y la ubicación de los caudalímetros. Para ello, adaptó el algoritmo de recorrido del grafo en amplitud teniendo en cuenta el estado de las líneas (tuberías, bombas, y válvulas) y la localización de los elementos que aíslan los sectores (válvulas de corte y/o caudalímetros). El segundo algoritmo se basa en la topología del árbol de expansión de mínimo coste de la red, tomando como peso asociado a las tuberías la resistencia hidráulica para generar y proponer sectores hidrométricos.

Campbell (2013), en su trabajo de fin de máster, propone un procedimiento para dividir una RDAP teniendo en cuenta la red de alta y la red de distribución, criterios hidráulicos y las fugas en la red. Para definir la red de alta y de distribución recurrió a los diámetros de tubería, y para estimar el número de sectores, manteniendo una homogeneidad dentro de ellas, utilizó el método de clúster jerárquico. Luego, mediante un proceso de clústering espectral logra minimizar el número de válvulas a cerrar, y para identificar las entradas a los sectores aplicó indicadores de disipación de la energía a través de la red.

Diao *et al.* (2013), plantean un nuevo enfoque para determinar de manera automática los límites de los sectores hidráulicos basándose en la estructura comunitaria de los sistemas de distribución de agua.

Ferrari *et al.* (2014), desarrollan un procedimiento basado en la bisección recursiva para crear los distritos considerando el tamaño máximo y mínimo recomendado como criterio de agrupación, la conexión de cada distrito con la fuente de suministro de agua y la ausencia de enlaces entre los distritos para crear DMAs independientes entre sí.

Di Nardo *et al.* (2014), proponen una metodología para sectorizar redes donde cada distrito será abastecido exclusivamente por una o varias fuentes de agua. Para ello, utilizan el algoritmo de búsqueda en profundidad para buscar ramas independientes sobre un grafo no dirigido y un algoritmo genético para identificar las tuberías a cerrar en función de la potencia mínima disipada.

Hajebi *et al.* (2014), presentan una técnica denominada WDN-Clúster para resolver el problema de la partición de RDAP alimentadas sólo por gravedad. Dicha técnica combina la partición de grafos estructurales y la optimización multiobjetivo, basada en NSGA-II, para buscar una buena agrupación de los nodos dentro de cada DMA. Las restricciones estructurales e hidráulicas consideradas en el método son el tamaño de la partición, el acceso directo a la fuente, la diferencia mínima de elevaciones de los nodos, la velocidad del agua y la presión, entre otras.

Pesantez *et al.*, (2018), diseñan la sectorización de una RDAP en base a un análisis geoespacial que permita reducir la variación de demanda de agua entre los distritos propuestos, para lo cual, implementan un código de programación que analiza la demanda, las presiones mínimas y máximas y el número de fuentes por cada distrito.

Saldarriaga *et al.* (2019), resumen los enfoques planteados por los participantes en la Batalla de los modelos celebrado en Colombia en julio del 2016 (18th Water Distribution Systems Analysis Conference) para resolver un problema relacionado con la forma de optimizar el diseño y el funcionamiento de los principales componentes del sistema. El concurso se centró en la división de la red teniendo en cuenta ciertas restricciones como los costes, la uniformidad de la presión y la calidad del agua. Los equipos participantes implementaron métodos de optimización como algoritmos genéticos no clasificatorios, algoritmos genéticos multiobjetivo o algoritmos basados en la teoría de grafos. Asimismo, el criterio ingenieril también estuvo presente.

Zhang *et al.* (2019), plantean un método de optimización multiobjetivo para obtener los esquemas óptimos apoyado en criterios hidráulicos, de calidad del agua y de economía. Este método se basa en el algoritmo genético de ordenación no dominante (NSGA-II). Además, consideran que la experiencia humana en el proceso de optimización es importante. Los autores recomiendan también identificar previamente la red principal de tuberías y excluirla del proceso de creación de los sectores, si es posible.

Giudicianni *et al.* (2020), proponen una metodología para dividir automáticamente un sistema de suministro de agua en sectores hidráulicos autoadaptables de diferentes tamaños para analizar el impacto de un aumento de la demanda como evento anormal, no prevista. El método se basa en los componentes clave del trazado original combinando sus características topológicas con los avances en la modelización y optimización de redes. Es decir, buscan reutilizar los activos de la partición estática para recuperar el rendimiento hidráulico del sistema.

Brentan *et al.* (2022), desarrollan una metodología para diseñar las DMAs aplicando el algoritmo de agrupación k-means modificado para la partición de la red, para ubicar de forma adecuada los dispositivos de partición utilizan un algoritmo de optimización multiobjetivo por enjambre de partículas, para ponderar las cuatro funciones objetivo aplican un proceso de jerarquía analítica difusa, y por último, utilizan la técnica de orden de preferencia por similitud a la solución ideal para clasificar las soluciones de Pareto para apoyar la decisión.

Pesantez *et al.* (2020), participaron en el reto de la batalla de los modelos, celebrado en Colombia en 2016, que consistió en diseñar DMAs tanto de cumplir ciertas restricciones. Los autores de esta investigación aplican el juicio ingenieril para combinar el análisis geoespacial con un simulador hidráulico para diseñar las DMAs de la red en estudio. El grupo se focalizó en diseñar DMAs manteniendo la similitud de la demanda entre ellas y modificaron los ajustes de las válvulas, las operaciones de los depósitos y añadieron nuevas tuberías a la red. La evaluación de las DMAs se hizo en función de los objetivos de minimizar el coste de la implementación, la similitud de la demanda, la uniformidad de la presión y la edad del agua, así como las restricciones relacionadas con la presión y el número de entradas por distrito.

Tuqiao *et al.* (2021), describen un método de sectorización que permite optimizar la reducción de las fugas de fondo. Para ello, identifican primero la red arterial de forma óptima utilizando un índice de evaluación que contiene tres indicadores de referencia. Luego, los macrosectores aislados que conectan con la red arterial se identifican con un algoritmo de exploración de la teoría de grafos. Posteriormente, los macrosectores se dividen mediante un algoritmo modificado de detección de comunidades teniendo en cuenta la uniformidad de la elevación y la uniformidad de la demanda dentro de las DMA diseñadas. A continuación, la disposición óptima de los medidores de flujo (entradas al sector) y las válvulas de corte lo logran resolviendo una optimización de dos objetivos para minimizar el número de medidores de flujo y las diferencias de presión acumuladas. Por último, instalan válvulas reductoras de presión en cada tubería de entrada y se optimizan mediante un algoritmo genético para reducir las fugas.

Bianchotti *et al.* (2021), abordan el problema de la sectorización de RDAP con múltiples fuentes aplicando un enfoque de dos etapas para el diseño óptimo de los sectores. La agrupación se basa en el método Louvain para detección de comunidades y se aplica el algoritmo SMOSA para dividir físicamente el sistema optimizando el número de válvulas de corte y tratando de cumplir con tres índices de rendimiento: desviación estándar, coeficiente de Gini y la pérdida de resiliencia.

2.6.3. Criterios para el diseño de los sectores

Para gestionar eficientemente una RDAP, los profesionales e investigadores proponen dividir la red en sectores adecuados para analizar su comportamiento a un nivel de detalle que permita focalizar las acciones correctoras y establecer objetivos de mejora de la gestión. Asimismo, para dar validez al diseño de los sectores, recomiendan cumplir cuatro condiciones básicas: estar aislados completamente, estar suministrados de manera independiente (en lo posible, ser alimentados desde la red secundaria evitando sectores en cascadas), cumplir con las condiciones mínimas de servicio y garantizar el suministro continuo a los usuarios ante posibles anomalías en la red (Di Nardo *et al.*, 2013). Además, para sectorizar una RDAP exigen tener un conocimiento pleno de la topografía del terreno (zonas de presión), las divisiones naturales (vías de ferrocarril,

grandes avenidas, ríos, barrancas, etc.), la localización e influencia de ciertos elementos (Embalses, depósitos, bombas y válvulas), la geometría de la red (conectividad y tamaño de las tuberías), la identificación de grandes consumidores, y la forma de operación de esta (Campbell, 2013).

Con la aparición de los primeros modelos hidráulicos por computador, la tarea de dividir una RDAP comienza con la propuesta de ubicar válvulas de corte. Seguidamente, se ejecuta una simulación y se comprueba que se cumpla con las condiciones mínimas de servicios. En caso de no cumplirse, se replantea la propuesta inicial o se añade algunas válvulas reductoras de presión (VRP) en los sectores donde la presión supere el límite máximo establecido. Finalmente, se identifican los sectores planteados con ayuda de los algoritmos de recorrido de grafos (de amplitud o en profundidad) y la ubicación de los caudalímetros.

Morrison et al. (2007), a través del grupo especialista para la gestión y operación eficiente de pérdidas de agua de la IWA, publicaron una guía práctica donde recomiendan tomar en cuenta varios aspectos hidráulicos, urbanísticos y económicos en el diseño de los sectores. En cuanto al tamaño de los sectores, la IWA recomienda que sea entre 500 y 3000 conexiones o tomas domiciliarias. Ochoa Alejo (2014), recomienda que el tamaño de los sectores se puede establecer también en función de los kilómetros de tubería (5 a 25 km), el área (1 a 3 km²), el número de usuarios (400 a 4000), la demanda máxima y los estratos de presión. En cuanto al número de entradas que alimentan a cada sector, la IWA también recomienda como mínimo dos (uno en funcionamiento y el otro en caso de emergencia), pero, esto dependerá de la geometría de la red. Todas estas recomendaciones aún se siguen aplicando a falta de herramientas informáticas especializadas que permitan guiar una adecuada división de la red para cumplir con los requisitos mínimos de servicio.

La selección del tamaño de la red tiene una implicación directa sobre la capacidad de identificar las fugas a partir de mediciones continuas de flujo dentro de la RDAP. Se considera que en los sistemas donde el tamaño de las DMAs es inferior a 3000 conexiones, se logra identificar la ocurrencia de una rotura en la red de distribución; si el tamaño del sector es inferior a 1000 conexiones se logran identificar fugas en las tuberías de servicio, y con sectores con un tamaño inferior a 400 conexiones se llegan a identificar las fugas de fondo. Por tal motivo, la elección del tamaño óptimo de los sectores se basa en encontrar un equilibrio entre el coste de creación y mantenimiento de las DMAs y el beneficio que se obtenga de un control activo de fugas (European Commission, 2015). Asimismo, se pone de manifiesto que una reducción del exceso de presión en grandes áreas es beneficiosa para reducir las roturas en las tuberías que conforman distritos más pequeños. Un control activo de fugas sin gestión de la presión es una solución poco eficaz.

2.6.4. Índices de rendimiento para evaluar modelos de redes sectorizadas

Los sistemas de suministro de agua son propensos a dividirse en áreas medibles más pequeñas para llevar un mejor control de las operaciones diarias de la red. Las soluciones obtenidas de sectorizar un modelo de red hidráulica pueden ser distintas y válidas a la vez. Sin embargo, es importante comparar las posibles soluciones para tomar la mejor decisión. Savić & Ferrari (2014), recomiendan evaluar los efectos causados por la introducción de las válvulas en cada diseño, y

luego compararlos entre cada uno de ellos. Los indicadores de evaluación que proponen son el coste, la fiabilidad y la calidad del agua. El coste sería el gasto que implica adquirir e instalar las válvulas de cierre para delimitar los sectores. La fiabilidad se basa en el índice de resiliencia (Todini, 2000) y el indicador para evaluar la calidad del agua suministrada es la edad del agua (USEPA-AWWA, 2002), que es el tiempo medio necesario para que el agua llegue a los usuarios. Cuanto más tiempo tarde el agua en llegar a los nodos de demanda, mayor será el potencial de degradación de la calidad del agua. Dado que la edad del agua está relacionada con el diseño del sistema, es esencial evaluarla cuando se rediseña la red de distribución, con el fin de verificar que los cambios realizados no ponen en peligro la calidad del agua y, por tanto, la salud humana.

Para Hervás (2017), si el tiempo de permanencia del agua en la red está por debajo de las 72 horas el diseño de los sectores es aceptable. Además, recomienda realizar un análisis de las presiones y las velocidades para cumplir con los valores recomendados en la normativa de cada país y un análisis de las tuberías que presenten mayores pérdidas de carga debido al nuevo reparto de caudales que provoca el cierre de las válvulas para aislar los sectores.

Di Nardo *et al.* (2015) proponen un conjunto de índices de rendimiento para evaluar y comparar diferentes diseños de redes sectorizadas con el modelo de red original sin sectorizar. Estos índices son la energía disipada en la red, la resiliencia de la red (Di Nardo *et al.*, 2014; Prasad & Park, 2004a; Todini, 2000), la variación de la presión (presión mínima, presión máxima y desviación estándar de la presión), la capacidad de extinción de incendios, la edad del agua (Rossman, 2000) y la redundancia mecánica (Cheung *et al.*, 2005). Los autores indican que la resiliencia de la red es el indicador más representativo, mientras que el índice de variación de la presión es más apropiado para describir los sectores individuales.

La CONAGUA (2007), recomienda realizar un análisis de fiabilidad para incrementar la seguridad del suministro en caso de presentarse un fallo en los elementos del sistema o cuando se realicen labores de mantenimiento.

Para un análisis más detallado de las presiones, el autor de esta tesis desarrolló una herramienta automática, CheckPressure (Vegas & Tzatchkov, 2020), para comparar las presiones obtenidas para distintas propuestas de sectorización con respecto al modelo original. La herramienta determina las presiones máximas y mínimas calculadas en todo el periodo de simulación juntamente con el identificador del nodo donde ocurren dichas presiones. Otra información adicional que se entrega es el porcentaje de nodos que superan o que no cumplen con unos valores de umbrales de presión, que se solicitan como dato de entrada. La aplicación es de libre acceso.

2.6.5. Principales beneficios e inconvenientes de sectorizar una red hidráulica

Investigadores y profesionales que dedican su tiempo al diseño de sectores hidráulicos, concluyen que esta técnica ofrece muchos beneficios para la mejora de la eficiencia hidráulica del sistema. Pero al mismo tiempo, creen que un mal diseño puede condicionar el buen funcionamiento del sistema. A continuación, se describen los beneficios e inconvenientes de aplicar esta técnica.

Beneficios

- Permite mejorar la gestión de las presiones en la red, evitando valores excesivos en horarios de bajo consumo para favorecer la reducción de las fugas. Los sectores son instrumentos para el control activo de las fugas (Bartolin, 2013).
- Permite reducir el área de inspección del sistema facilitando así la detección, localización y control de anomalías en el suministro (como roturas, fugas, deficiencias de presión). De esta manera, se identifican las zonas que necesitan mayor atención (Morrison, 2004).
- Permite realizar balances de agua y obtener información sobre la cantidad de agua que no se cobra en cada uno de los sectores (Charalambous, 2008).
- Permite aislar los distritos para proteger a la población de una contaminación accidental o maliciosa (Di Nardo *et al.*, 2013).
- En redes de suministro con servicio intermitente, donde sólo se tiene acceso al agua en un periodo de tiempo, se puede utilizar como un proceso de transición para pasar a un sistema de suministro continuo (Ilaya-Ayza *et al.*, 2017).
- Contribuye a ubicar sensores en la red (Ciaponi *et al.*, 2019; Herrera *et al.*, 2011).

Inconvenientes

- Se reduce el grado de mallado de la red (redundancia), con lo cual, puede ser más vulnerable ante una emergencia como un incendio (Saldarriaga *et al.*, 2009; Todini, 2000) o por el corte de suministro ante la rotura de la tubería principal.
- La calidad del agua se puede ver afectada por el aumento del tiempo de permanencia del agua en la red, debido al cierre de algunas tuberías para formar los sectores (Grayman *et al.*, 2009).
- Aumenta el coste de mantenimiento de la red, al tener que revisar un mayor número de elementos de control, muchos de ellos críticos.

En general, sectorizar una red hidráulica permite tener un mayor control sobre el sistema y si a esto le añadimos herramientas de simulación y monitorización, podemos realizar estudios más detallados de cada zona ante diversas condiciones de funcionamiento.

2.6.6. Casos de proyectos de sectorización en el mundo

La European Commission (2015), publicó una guía sobre las buenas prácticas en la gestión de fugas para lograr los objetivos de la Directiva Marco del Agua haciendo un uso más eficiente de los recursos hídricos. En dicho documento se dan una serie de recomendaciones con el respaldo de casos de estudios para todas las partes interesadas desde las empresas gestoras del servicio del agua (públicas y privadas), grupos políticos y reguladores. Analizaron 16 casos de redes de suministro de agua de varios países de la Unión Europea y concluyeron que la división de una red en sectores hidráulicos no es suficiente por sí sola para gestionar eficazmente las fugas; se requiere una combinación continua de la gestión de la presión juntamente con un control activo de las fugas, para asegurar todos los beneficios de la detección y su pronta reparación. Asimismo, se aportó como punto clave para la localización efectiva de las fugas el rediseño de los sectores en función de la densidad de las conexiones.

Desde la Comisión Nacional del Agua de México (CONAGUA, 2007) a través de una ficha técnica, dan a conocer su experiencia en la tarea de sectorizar RDAP como uno de los primeros pasos para facilitar el control gradual de la red. Los casos de estudios llevados a cabo son las redes hidráulicas de las ciudades de Querétaro, Ciudad de México, Mérida, Monterrey y Tijuana. La CONAGUA manifiesta que la red de Querétaro es un claro ejemplo en el que, en tan sólo dos años de trabajo se ha logrado mejorar la eficiencia física de la red obteniendo beneficios para la empresa operadora y para el usuario final (mejor servicio). En el caso de la red de suministro de agua de la Ciudad de México, la sectorización se basó en la topografía, los límites naturales y políticos, las carreteras, la densidad poblacional y la autonomía de las redes primaria y secundaria para evitar que la presión interna de la conducción principal decaiga. Asimismo, esperan sustituir la red secundaria (normalmente ramificada) por redes en bloques o también llamado malla perimetral. El tamaño de los sectores lo determina el número de acometidas (2000 aprox.) con una o dos entradas por sector. Para el diseño de los sectores, recurrieron al modelo matemático de cada una de ellas.

En Perú, para la división de las redes de suministro de agua de las ciudades de Huacho y Lima-Callao se aplicó el criterio del área (3 Km² como máximo) con el cual se daría servicio a unos 400-4000 usuarios. Para estos dos casos, la empresa gestora de agua utilizó los sectores para realizar el reparto del agua por turnos pudiendo cumplir con las presiones mínimas de servicio y las demandas de consumo en algunos sectores. Todos los sectores diseñados se alimentan de un solo punto, teniendo otra entrada en caso de emergencia. En las principales avenidas se desplegaron anillos o circuitos con tuberías de gran capacidad y se instalaron nuevas líneas matrices para mejorar las presiones y la entrega de caudales a los sectores (Vegas, 2012).

En la ciudad de Managua (capital de Nicaragua), el proceso de sectorización de la RDAP se llevó a cabo mediante un proceso empírico utilizando el modelo matemático de la red de alta y la red secundaria, además de las características topológicas de la red y otros aspectos de carácter urbanístico. Los sectores se alimentan de una sola entrada, eliminando otras posibles entradas mediante válvulas de corte. Se aplicó el criterio de longitud de tubería para formar los sectores, de 20 kilómetros de tubería aproximadamente (Campbell, 2013).

Desde el Grupo de Investigación REDHISP, del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente de la Universitat Politècnica de València, también se han llevado a cabo proyectos de sectorización como trabajos fin de máster. Entre los proyectos a comentar tenemos la red de Maspalomas elaborado por Ranedo (2009) y la red de Valencia desarrollado por Hervás (2017). En el caso de la red de Maspalomas el objetivo del estudio de sectorización se hizo con el fin de regular las presiones, controlar el reparto de flujos a partir de los depósitos de regulación y controlar de forma activa las fugas. El autor propuso tres escenarios de sectorización, de los cuales, las dos primeras propuestas incorporaron a la red troncal dentro de los sectores y la última excluyó a la red troncal de formar parte de ellos. Todos los sectores están alimentados por una entrada y se utilizó el criterio de número de abonados para definir su tamaño. En el caso de la red de Valencia, la autora manifiesta que el proyecto consistió en el diseño de 20 nuevos sectores de los 34 ya ejecutados, y para ello, se apoyó en el modelo matemático de la red, las limitaciones físicas del sistema, los costes de implementación y el criterio de la malla perimetral para definir los sectores. Este último punto favorece el reparto de caudales y evita el aumento excesivo del

tiempo de permanencia del agua en la red. El tamaño de los nuevos sectores estaría alrededor de los 30 kilómetros de longitud de tubería, todos ellos alimentados como mínimo desde dos entradas, dependiendo del mallado de la red. Así mismo, propuso renovar algunas tuberías (aumentar su diámetro) y añadir nuevos trazados para mejorar la capacidad de transporte del agua.

2.7. Simplificación de modelos de redes de agua potable

2.7.1. Introducción

La simplificación o esqueletización de modelos de RDAP, es un proceso que consiste en eliminar las tuberías menos importantes o sustituirlas por otras equivalentes que permitan mantener la conectividad de la red y el comportamiento hidráulico del modelo original. La tarea de reducir un modelo se viene realizando desde hace mucho tiempo, incluso antes de la llegada de los primeros computadores y modelos hidráulicos, cuando los operadores diseñaban sus redes considerando solo los tramos de mayor tamaño. Para Walski *et al.* (2003), esqueletizar un modelo de RDAP es identificar, seleccionar y mantener el conjunto de elementos que tienen mayor impacto en el comportamiento hidráulico y en la conectividad del sistema. Mientras que para Saldarriaga *et al.* (2009), es una secuencia de procesos diferentes de eliminación y/o fusión de elementos de menor relevancia dentro del modelo del red que se aplican de forma secuencial.

Hoy en día con el avance de la tecnología, la informática y los modelos hidráulicos ya es posible construir y simular modelos hidráulicos para todos los elementos, sobre todo en redes de tamaño medio. Sin embargo, si consideramos redes de gran tamaño con decenas de miles de elementos, establecemos intervalos de cálculo de 10 minutos o menos y prolongamos los tiempos de simulación a semanas, es posible que el tiempo computacional sea de horas o que la memoria RAM de nuestro ordenador no pueda almacenar la cantidad de resultados proporcionados por el modelo.

La simplificación o esqueletización de un modelo de red hidráulica normalmente se realiza en la etapa de elaboración del modelo matemático con la finalidad de depurar los datos que se vayan recopilando, de manera que se convierta en información útil (García-Serra & López, 2002); y además ante la incertidumbre y la complejidad de las interrelaciones entre los elementos a pequeña escala, un modelo de detalle puede llegar a dificultar la gestión en tiempo real, la monitorización y comprensión de cómo funciona el sistema, la predicción de su desempeño ante distintos escenarios de fallo, la detección de fuentes de contaminación, la supervisión de la calidad del agua y la ubicación de sensores (Perelman & Ostfeld, 2011). Sin embargo, simplificar un modelo trae consigo agrupar las demandas en determinados nodos que en algunos casos puede implicar un cambio en la dirección y la velocidad del flujo, lo cual nos puede llevar a conclusiones equivocadas en el modelado de una RDAP.

Los modelos hidráulicos utilizan algoritmos con un alto costo computacional para desarrollar proyectos de diseño, planificación, rehabilitación y análisis de la calidad del agua. La mayoría de los algoritmos buscan optimizar los resultados globales sin sacrificar el cumplimiento de todas las limitaciones, por lo tanto, cualquier estrategia para acelerar estos algoritmos es una contribución importante al problema (Martínez-Solano *et al.*, 2014).

Los modelos matemáticos son herramientas que se utilizan para simular y analizar escenarios de una red de suministro de agua sin llegar a experimentarlos físicamente. Estos modelos se pueden clasificar en tres categorías: trazado, diseño y operación (Martínez-Solano *et al.*, 2017). Otra clasificación de los modelos propuesto por Cesario (1995) es para abordar tareas de planificación, operación y de calidad del agua, donde cada modelo tiene diferente nivel de detalle y precisión.

En la literatura científica podemos encontrar recomendaciones y métodos que permiten reducir un modelo de detalle a un modelo estratégico, manteniendo un comportamiento hidráulico y de calidad del agua lo más próximo al modelo original. En el siguiente apartado, se describe con más detalle las aportaciones más importantes relacionados a esta temática.

2.7.2. Estado del arte

La Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos ha publicado una guía donde se sugieren una serie de recomendaciones sobre los elementos que debe mantener un modelo esqueletizado, Anguluri *et al.* (2005). Algunas de estas recomendaciones son preservar las válvulas de control activas y delimitadoras de sectores hidráulicos, las tuberías de transmisión de caudal, las estaciones de bombeo, instalaciones de almacenamiento de agua, entre otras. Walski *et al.* (2003) añade a las recomendaciones de la EPA preservar los puntos donde se alimentan los grandes consumidores y donde se ubican los puntos de muestreo.

Las metodologías planteadas para simplificar modelos de RDAP son diversos. Existen métodos que seleccionan las tuberías menos importantes, con ayuda del índice de resiliencia o la curva de consigna, para ser eliminadas manteniendo todos los nodos del modelo original y sus demandas asignadas. Por otra parte, están los métodos que aplican las técnicas convencionales de eliminar ramales y fusionar tuberías en serie y paralelo. Estas técnicas se apoyan en los algoritmos de búsqueda de la teoría de grafos para recorrer la red. También hay métodos que simplifican un modelo por agrupación de elementos (Clúster), y por último están los métodos por agregación donde la red equivalente es determinada mediante un análisis estadístico por correlación.

Es posible que Eggener & Polkowski (1976), fueran los primeros en estudiar cómo reducir modelos de redes hidráulicas. El trabajo consistió en eliminar tuberías del modelo de red de Menomonie (Wisconsin, EEUU) para probar la sensibilidad de los resultados del modelo reducido. En dicho estudio concluyeron que, bajo demandas normales, se puede eliminar un gran número de tuberías y no afectar de manera significativa las presiones del modelo reducido. Chen *et al.* (1988) publicaron una metodología para simplificar redes de distribución de agua basada en el análisis estadístico por correlación y la ecuación nodal Well-Known. El algoritmo se implementó en Fortran 77 dando origen a la herramienta EQUNET.

Hamberg & Shamir (1988a, 1988b) proponen dos metodologías para reducir modelos de redes que serían utilizados de forma preliminar para el diseño de RDAP. La primera aborda las formas de combinar las tuberías en una equivalente, y la segunda, trata de mostrar un sistema continuo no lineal como un todo. Una conductancia regionalmente distribuida y una función de las propiedades de las tuberías y la densidad regional constituyen el enlace entre una función potencial que relaciona las presiones y los caudales del área a estudiar. Estos procedimientos

eran costosos desde el punto de vista computacional (para los ordenadores de la época) y además no había forma de comprobar la exactitud del modelo reducido.

Anderson & Al-Jamal (1995), plantean dos enfoques alternativos para la simplificación: el enfoque elemento por elemento y un enfoque basado en los parámetros de ajuste utilizando para ello la programación no lineal con el fin de minimizar una medida de la diferencia entre el modelo original y los modelos simplificados.

Ulanicki *et al.* (1996), desarrollaron un algoritmo de agregación hidráulica para reducir un modelo hidráulico eliminando nodos y tuberías. El método se basa en la reducción del modelo linealizado del sistema no lineal completo mediante la eliminación de algunas de las variables utilizando la eliminación de Gauss de la matriz jacobiana. El procedimiento consiste en eliminar paso a paso los nodos y las tuberías adyacentes, reasignando la demanda a sus nodos vecinos. Luego, se refuerzan otras tuberías y se crean nuevas tuberías “ficticias” para mantener la conectividad y el comportamiento hidráulicos del modelo original.

Maschler & Savic (1999), demostraron que el algoritmo de esqueletización estática propuesto por Ulanicki *et al.* (1996) puede llevar a cabo enfoques de simplificación basados en componentes del modelo de red como eliminar nodos contiguos, fusionar tuberías en serie y paralelo y la eliminación de ramales. Asimismo, propusieron eliminar las tuberías con muy baja conductancia para tener un modelo de red mucho más reducido.

Shamir & Salomons (2008), presentaron un método para la operación óptima en tiempo real en RDAP apoyados de un modelo de red esqueletizado y la aplicación de algoritmos genéticos para minimizar los costes de explotación. Para esqueletizar el modelo hidráulico utilizan el método de Ulanicki *et al.* (1996).

Deuerlein, (2008), propuso un concepto de descomposición gráfica-teórica de un modelo de RDAP. El enfoque implica una descomposición de varios pasos para obtener un gráfico de bloques del núcleo de la red. Durante ese proceso, las demandas de los nodos raíz aumentan con la demanda total de los árboles conectados para garantizar que la red simplificada replique el comportamiento hidráulico de la red original.

Wu *et al.* (2007) desarrollan dos enfoques, uno para reducir la red aplicando las técnicas de simplificación elemento a elemento (depuración de datos, recorte de ramales, asociación de tuberías en serie, asociación de tuberías en paralelo y reducción de bucles, o técnicas de ajuste de parámetros), y otro enfoque para optimizar la conductancia (modificaciones en la rugosidad y diámetro) de las tuberías del modelo esqueletizado aplicando algoritmo genético.

Perelman *et al.* (2008), plantean un nuevo método para reducir modelos de redes que sean fiables para realizar análisis de la calidad del agua para estudios epidemiológicos y contaminación. Incorporan el algoritmo de agregación de la calidad del agua al algoritmo de agregación de Ulanicki *et al.* (1996). El método trabaja sobre un grafo dirigido y aplican el algoritmo de búsqueda en profundidad para identificar componentes fuertemente conectados y unirlos a un único nodo (metanodo). Años después, Perelman & Ostfeld (2011) sugieren una partición en grupos (clústers) de un modelo de RDAP en función de sus propiedades estructurales y de conectividad. Estos

clústers estarían conectados fuerte y débilmente de acuerdo con las direcciones del flujo. Para identificar los subgrafos aplicaron los algoritmos de búsqueda en profundidad y en amplitud.

Saldarriaga *et al.* (2008), llevaron a cabo una metodología que aplica el concepto del índice de resiliencia de Todini (2000) como criterio de selección de las tuberías a eliminar para generar modelos esqueletizados que reproduzcan con precisión tanto los resultados hidráulicos como los parámetros no permanentes de la calidad del agua del modelo original. Después del proceso de esqueletización, aplican unas ecuaciones de corrección de los coeficientes de masa y de pared que controlan el decaimiento del cloro aplicada. Este método no elimina ningún nodo del modelo original, con lo cual, las demandas asignadas a los nodos y sus curvas de patrón se mantienen. Este método se centra únicamente en la extracción de tuberías. Años más tarde, Saldarriaga *et al.* (2010) aplican algunos criterios hidráulicos y geométricos junto con un software basado en la lógica difusa para reasignar las demandas de los nodos eliminados. Asimismo, añade al método de esqueletización anterior la eliminación de tuberías cortas sin salida y la sustitución de tuberías en serie por una tubería equivalente. Posteriormente, Saldarriaga *et al.* (2012) proponen un método de dos etapas. La primera consiste en reducir el tamaño de un modelo de red aplicando cuatro pasos: agregación de la demanda, eliminación de tuberías usando el concepto de la potencia unitaria, eliminación de nodos terminales y eliminar las tuberías en serie reemplazadas por otra equivalente. En la segunda etapa buscan preservar la equivalencia de la calidad del agua modificando las ecuaciones de decaimiento del cloro para cada tubería relacionando el caudal original y el esqueletizado, de esta forma obtienen unos parámetros adimensionales que modifican de manera individual cada nodo del modelo reducido.

Giustolisi *et al.* (2012), formulan dos estrategias de simplificación basados en el algoritmo de gradiente global mejorado desarrollado por Giustolisi & Todini (2009) para reducir la topología de la red, tanto para un análisis basado en la demanda como en la presión. El método consiste en eliminar los nodos intermedios de grado de conectividad dos (tuberías en serie) manteniendo algunas condiciones de contorno y los circuitos mallados de tuberías para el análisis basado en la presión, y Berardi *et al.* (2012), desarrollan una aplicación para el análisis topológico preliminar de modelos de RDAP donde uno de sus módulos es la esqueletización de modelos de redes basado en el método de Giustolisi *et al.* (2012).

Izquierdo *et al.* (2013), analizan los errores al simplificar los consumos asociados a largo de una tubería al momento de repartirlos a cada nodo extremo de la misma, concretamente la regla más extendida del 50%. Los autores proponen métodos sencillos y directos para cargar la demanda de manera adecuada. El estudio se centra en los ramales de tuberías.

Paluszczyszyn *et al.* (2013) implementaron el algoritmo de simplificación de Ulanicki *et al.* (1996) con un enfoque basado en la auditoria energética de la red y unas restricciones de presión mínima de servicio para obtener un modelo esqueletizado. Además, utilizaron técnicas de programación paralela para reducir los tiempos computacionales en redes a gran escala. Los modelos reducidos serían utilizados para estudiar estrategias de optimización energética y las fugas de RDAP en línea. Dos años más tarde, Paluszczyszyn *et al.* (2015) reducen aún más los tiempos de cálculo aplicando algoritmos de ordenación de matrices dispersas para esqueletizar modelos más grandes con el método de Ulanicki *et al.* (1996).

Boussafeur-Lamoudi (2013), propone un método basado en las técnicas convencionales para eliminar ramales y tuberías en serie y en paralelo, donde la demanda de los nodos eliminados es trasladada o repartida a los nodos más próximos por ponderación según la longitud de la tubería o las demandas existentes en los nodos contiguos. Además, propone un umbral de la demanda en los nodos para ser considerados elementos a eliminar. Los modelos reducidos son utilizados para reducir los tiempos de cálculo en tareas de optimizar los costes energéticos relacionados con la producción y el transporte de agua en RDAP. El algoritmo fue implementado en el software Aquis (Schneider Electric).

Bartolin (2013), en uno de sus capítulos de su tesis doctoral desarrolla un método para reducir modelos de detalles basándose en el árbol de mínima resistencia hidráulica y en ciertos criterios hidráulicos (umbrales de diámetro, de longitud, de demandas en los nodos) para mantener algunos elementos en el modelo reducido. El proceso de reducción sigue cuatro reglas básicas que garantizan la conectividad del sistema y su capacidad de transporte. Las dos primeras reglas buscan reducir las ramificaciones y tramos segmentados, y las dos últimas buscan reducir el nivel de mallado de la red. Este método elimina los nodos que tienen asignado una sola demanda y los nodos vecinos deben tener la misma curva de modulación que el nodo a eliminar.

Martinez Alzamora *et al.* (2014), plantean un nuevo enfoque basado en el método de Ulanicki *et al.* (1996). Este nuevo enfoque sigue los pasos siguientes: formular el modelo lineal completo, linealizar el modelo, reducir el modelo lineal mediante el procedimiento de eliminación de Gauss y obtener el modelo no lineal reducido a partir del modelo lineal reducido. Los autores afirman que los modelos reducidos por este método son apropiados para estudios de optimización.

Martínez-Solano *et al.* (2014), presentaron un método para simplificar tuberías en serie con el fin de rastrear la calidad del agua ante cualquier condición desfavorable. Sin embargo, el método presenta una limitación y es la omisión de la dirección del flujo a través de las tuberías. Años más tarde, Martínez-Solano *et al.* (2017), revelan otro método para asociar pares de tuberías en serie con demandas intermedias teniendo en cuenta la dirección del flujo, las pérdidas de carga de las tuberías a fusionar y el tiempo de viaje. Estos modelos reducidos tienen como finalidad modelar la calidad del agua ante cualquier evento inesperado en la red hidráulica.

Moser *et al.* (2015), presentan una metodología donde comparan varios niveles de modelos reducidos que son utilizados con otra metodología de diagnóstico para la detección de fugas en RDAP. Estos niveles de modelos reducidos se diferencian por la forma de seleccionar los nodos que serán eliminados, por ejemplo, en función del diámetro de las tuberías que confluyen en un nodo o el número de tuberías vinculadas al mismo. La técnica utilizada para reducir un modelo de red es la desarrollada por Ulanicki *et al.* (1996).

Qin & Boccelli (2017), plantean un enfoque de clustering que agrupan nodos con características similares de calidad de agua para mantener la estructura original de la red. El enfoque propuesto utiliza una relación entrada-salida para evaluar la trayectoria hidráulica entre dos nodos cualesquiera. Utilizando la información de la trayectoria hidráulica, un algoritmo de agrupación de K-Means identifica los nodos con trayectorias hidráulicas similares.

Ilaya-Ayza *et al.* (2017), sugiere aplicar la curva de consigna para reducir modelos de RDAP. El proceso consiste en eliminar las tuberías menos importantes dentro de un mallado o circuito

perimetral (eliminar tuberías internas). Para cada tubería eliminada se compara la nueva curva de consigna con la curva de consigna del modelo original.

Huang *et al.* (2019), proponen un nuevo enfoque para esqueletizar modelos de redes basados en los transitorios, con el objetivo de mantener el comportamiento dinámico global del sistema. El método se centra en la esqueletización de tuberías en serie con nodos intermedios sin demanda. La teoría de equivalencia hidráulica y los criterios basados en transitorios (mecanismos de propagación de ondas) son incorporados en el análisis hidráulico dentro del proceso de esqueletización para tuberías en serie. Además, proponen tres métricas de evaluación para medir cuantitativamente los impactos de la esqueletización del modelo en la dinámica transitoria del sistema. Un año más tarde Huang *et al.* (2020), continúan sus estudios investigando el impacto que puede llegar a tener en los análisis de transitorios el reparto de las demandas de los nodos intermedios (tuberías en serie) durante el proceso de esqueletización.

Spaccesi (2020), desarrolla un método para simplificar modelos de redes hidráulicas basado en el análisis hidráulico y aplicando las técnicas convencionales para eliminar y asociar tuberías. Este método, permite al operador configurar unos parámetros iniciales de simplificación y validación, de esta forma el algoritmo se encarga de identificar los elementos que deben de preservarse en el modelo esqueletizado. El proceso se divide en dos etapas, en la primera aplica las técnicas de unión de tuberías paralelas, la eliminación de nodos terminales y la de nodos intermedios, y en la segunda etapa elimina bloques terminales y por último une nodos cercanos. En cuanto a la reasignación de las demandas, el autor propone que se calcule ponderando con el diámetro y la longitud de las tuberías originales, y el cálculo de un nuevo patrón de demanda equivalente para los nodos adyacentes. Asimismo, aplica una evaluación continua en cada paso de la simplificación. Aguilera (2021), añade la etapa de simplificación de bloques con N entradas al método propuesto por Spaccesi (2020). Asimismo, mejora el proceso de identificación de los bloques terminales. Ambos autores aplican la curva de consigna de alturas piezométricas para garantizar las presiones y caudales en el modelo de red simplificado.

En la industria del software, aplicado al análisis y modelación de redes de suministro de agua, existen dos extensiones reconocidas que permiten generar de manera automática y manual modelos esqueletizados, la extensión **Skelebrator** de WaterGEMS/WaterCAD (compañía Bentley) y **Skeletonizer** de InfoWater Pro (compañía Innowyze/Autodesk). Ambas extensiones, usan tecnología avanzada de administración de base de datos y teoría de equivalencia hidráulica. Sus técnicas de simplificación son similares y se pueden combinar sin un orden establecido, lo cual podrían dar como resultado distintas configuraciones de modelos simplificados. Dichas técnicas comprenden la eliminación de ramales, la fusión de tuberías en serie, y la asociación de tuberías en paralelo. Además, es posible indicar qué elementos del modelo se quieren preservar. En cada una de estas técnicas se pueden establecer configuraciones y condiciones basadas en criterios definidos por el usuario sobre los atributos físicos de las tuberías, por ejemplo, eliminar las tuberías con un diámetro por debajo de los 100 mm., eliminar tramos de tuberías en base a su longitud e incluso en función del material de estas. En el proceso de eliminación de ramales, la demanda del nodo a remover es reasignado al nodo aguas arriba hasta llegar a un nodo de grado de conectividad mayor a dos. En el proceso de fusionar tuberías en serie, se eliminan los nodos intermedios y las tuberías que conectan con estos, pero a cambio se crea una nueva tubería

equivalente y se reasigna la demanda del nodo intermedio a los otros nodos extremos en función a tres criterios: ponderado por la distancia, ponderado por la demanda (proporcional a la demanda existente) o uniformemente distribuido. Y en la asociación de tuberías en paralelo se eliminan todas las tuberías que comparten el mismo nodo inicial y final y se crea una nueva tubería hidráulicamente equivalente bajo ciertas configuraciones y criterios definidos por el usuario. Según las opciones especificadas, se puede calcular el nuevo diámetro de la tubería equivalente o un nuevo valor de rugosidad. Por último, un algoritmo de preservación de la topología de la red evita cualquier desconexión del sistema, lo que garantiza la integridad del modelo de red.

WNTR, es un paquete desarrollado con el lenguaje de programación de Python que permite evaluar la resiliencia de las infraestructuras de agua potable ante posibles incidencias. Entre uno de sus módulos está la esqueletización de modelos de redes hidráulicas cuyos algoritmos permite eliminar ramales, asociar tuberías en serie y asociar tuberías en paralelo. En cualquier operación de eliminar o asociar tuberías en serie, la demanda es reasignada o repartida a los nodos adyacentes más próximos si se cumple con la condición de que el diámetro esté por debajo de un umbral. Esta herramienta solo reduce modelos de redes configurados para calcular las pérdidas de carga con la fórmula de Hazen-Williams.

Existen muchos métodos que permiten llevar a cabo el proceso de esqueletización de un modelo de RDAP desde el punto de vista de su aplicación, por lo tanto, no hay criterios absolutos para determinar si un nodo o una tubería debe ser incluido en el modelo reducido, pero puede decirse que todos los modelos originales llegan algún grado de simplificación. Finalmente, el buen criterio del modelador juega un gran papel en la creación de una solución aceptable.

2.7.3. Ventajas e inconvenientes

Los modelos esqueletizados son de gran utilidad para realizar estudios de planificación, analizar la calidad del agua por sectores, optimizar la gestión de la energía, facilitar la localización de fugas, apoyar el monitoreo del estado actual de la red, procesar datos de telemetría, identificar los cuellos de botella y vulnerabilidades, realizar tareas de rehabilitación, tener una mejor visualización de la red y sobre todo comprender el funcionamiento de la misma (Deuerlein, 2007; Jung *et al.*, 2007; Paluszczyszyn *et al.*, 2013).

Sin embargo, no todos los modelos estratégicos son útiles para determinados estudios. Un modelo simplificado puede afectar los resultados en el diseño de un sistema de alerta de contaminantes (Davis & Janke, 2018), y reducir la precisión de los efectos adversos en la salud de los usuarios por posibles eventos de contaminación (Bahadur *et al.*, 2008; Grayman & Rhee, 2004), afectar a la ubicación de los sensores de calidad (Klise *et al.*, 2013), ignorar la interacción de las ondas de presión transitorias en los diferentes componentes y propiedades de las tuberías (Jung *et al.*, 2007), o afectar la precisión en el cálculo de la presión cuando el modelo se reduce de manera excesiva al fusionar tuberías de gran tamaño (Jiang *et al.*, 2013). Los modelos reducidos tendrán tuberías equivalentes que no representan a las tuberías reales, por lo que puede crear confusión sobre qué es real y qué es equivalente. Además, dichas tuberías serán diferentes a las que se encuentran trazadas en un archivo CAD o una base de datos SIG, lo cual dificultaría su mantenimiento, actualización y transferencia (Paluszczyszyn *et al.*, 2013).

2.8. Coeficientes de rugosidades equivalentes

2.8.1. Introducción

El programa EPANET, permite al usuario la posibilidad de elegir entre diez unidades de caudal, agrupadas en dos sistemas de unidades: Métrico (SI) y Convencional (US), y tres fórmulas para el cálculo de las pérdidas de carga: Hazen-Williams (HW), Darcy-Weisbach (DW) y Chezy-Manning (CM). Las unidades en que se expresan el resto de las propiedades de los elementos del modelo dependerán de la unidad de caudal que se seleccione. Asimismo, las rugosidades absolutas o coeficientes de rugosidad de las tuberías dependen de la fórmula seleccionada para el cálculo de las pérdidas de carga. Si se modifican estas dos opciones (unidad de caudal y/o la fórmula de pérdidas de carga) será necesario actualizar todos los datos que dependan de estos cambios. Desde la aplicación EPANET, aún no se ha implementado una función que permita calcular valores equivalentes para ambas situaciones. Un error común es el de obtener resultados incorrectos o simulaciones no válidas debido al cambio de unidad de caudal y/o fórmula de pérdidas de carga.

El uso de una determinada unidad de caudal o fórmula de pérdidas de carga para el cálculo hidráulico de una red de tuberías depende de las normativas de diseño fijado por cada país. Por ejemplo, en España se utilizan litros por segundo (lps) como unidad de caudal y la fórmula de Darcy-Weisbach para el cálculo de las pérdidas de carga, en Estados Unidos se emplean galones por minuto (gpm) y la fórmula de Hazen-Williams, en la India son litros por segundo (lps) y la fórmula de Hazen-Williams, y en Inglaterra galones imperiales por minuto (gipm) y la fórmula de Darcy-Weisbach.

El interés que tiene desarrollar unas fórmulas para convertir coeficientes de rugosidad entre las fórmulas de HW, DW y CM es vario. Por ejemplo, los coeficientes de rugosidad recogidos en los manuales de hidráulica para ciertos materiales pueden estar disponibles para unas fórmulas y para otras no; otras veces el incremento de la rugosidad con el tiempo viene expresado solo para la rugosidad absoluta y se quiere utilizar en cambio la fórmula de Hazen-Williams; por otra parte, muchos autores coinciden en que resulta más fácil calibrar un modelo con la fórmula de Hazen-Williams (Dini & Tabesh, 2014; Reddy *et al.*, 1996), pero en cambio se desea emplear la fórmula de Darcy-Weisbach más general para las simulaciones posteriores, una vez calibrado el modelo; finalmente en el ámbito de las investigaciones y el benchmarking se requiere disponer de modelos hidráulicos universales que conduzcan a los mismos resultados o muy similares, con independencia de la fórmula de pérdidas de carga o unidad de caudal elegida.

El reto está en desarrollar unas fórmulas universales que permitan calcular unos coeficientes de rugosidad equivalentes que solo dependan de dos parámetros: el diámetro de la tubería y su rugosidad. A continuación, se describen las aportaciones más relevantes en este tema.

2.8.2. Estado del arte

En la literatura científica podemos encontrar diversas fórmulas empíricas y semiempíricas que permiten estimar las pérdidas de carga por fricción en los tramos de tuberías. Sin embargo, el programa EPANET solo permite al usuario seleccionar una de las tres fórmulas más utilizadas en el cálculo hidráulico de una red de suministro de agua: HW, DW y CM.

La fórmula de DW ha sido desarrollada a partir del análisis adimensional, y es aplicable a cualquier tipo de fluido (viscosidad, temperatura, etc.) y a diversos regímenes (turbulento, transición y laminar). Sin embargo, su uso no está muy extendido debido a la “complejidad” para calcular el factor de fricción (f) con la fórmula de Colebrook-White (CW), siendo necesario ejecutar varias iteraciones o el uso de métodos numéricos para lograr su resolución. No obstante, existen aproximaciones como la fórmula de Swamee y Jain (SJ) para su cálculo directo. Conforme a la teoría del análisis adimensional, el factor de fricción se expresa en función de la rugosidad relativa (ϵ/D) de la tubería y el Número de Reynolds (R_e). La combinación de las fórmulas de DW y CW es ampliamente aceptada para el cálculo de las pérdidas de carga por fricción (Liou, 1998).

Por su parte, la fórmula de Hazen-Williams es muy utilizada para el diseño de sistemas de redes a presión en países anglosajones. Apareció a principios del siglo XX para facilitar el cálculo de las pérdidas de carga por fricción de una forma más simple que con la fórmula de Darcy-Weisbach, por la dificultad que tenía esta última para ajustar el valor del factor de fricción. Debido a su carácter empírico tiene limitaciones, lo cual, se aplicable solo para el transporte de agua a una temperatura normal de 5 a 25°C y bajo unas condiciones de flujo turbulento en la zona de transición. No se pueden utilizar coeficientes de rugosidad fuera del rango de 60 a 150 y los tamaños de las tuberías deben ser de 0.05 a 1.5 metros (Liou, 1998). Al aumentar el valor del coeficiente de rugosidad disminuyen las pérdidas en las tuberías. Los valores sugeridos en la literatura científica para este coeficiente dependen del material y del estado de la tubería. Por lo general, se utilizan valores de 100 en condiciones normales, 50 para conductos corroídos y 150 para tuberías lisas, plástico o vidrio (Corcho Romero & Duque Serna, 2005).

Por último, la fórmula de Chezy-Manning se utiliza por excelencia en el estudio del flujo a lámina libre. Su coeficiente de rugosidad (n) depende del tipo de material y el régimen de flujo. También se aplica para tuberías llenas de gran diámetro.

En general, los coeficientes de rugosidad de las dos últimas fórmulas empíricas dependen del tipo de material, del diámetro de la tubería y del tiempo de uso. El envejecimiento y la deposición de materiales en suspensión en las paredes internas de las tuberías aumentan su rugosidad y reducen la sección efectiva del paso de agua en la conducción. Por lo tanto, cuando se elabora un modelo de red hidráulica en servicio los coeficientes de rugosidad que se asignen a las tuberías van a depender del tipo de material y de su fecha de instalación.

Flechas (2012), recomienda que para el diseño de nuevas redes de tuberías se debe comparar los resultados hidráulicos con los obtenidos con un único valor de coeficiente de rugosidad para todas las tuberías, sobre todo si se utilizan fórmulas empíricas. La selección de unos coeficientes de rugosidad inadecuados puede afectar al dimensionado de la nueva red de tuberías.

Otros investigadores han evaluado los resultados obtenidos al utilizar un valor único para el coeficiente de rugosidad, sugerido por la literatura científica, para el dimensionado de redes a presión. En sus estudios destacan el grado de sensibilidad a la hora de elegir entre uno u otro valor, afectando el funcionamiento del sistema. Christensen (1984), manifestó que las fórmulas empíricas deben utilizarse respetando las limitaciones para las que fueron desarrolladas. Sharp & Walski (1988), desarrollaron un método que ayuda a predecir la evolución de los coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams en tuberías metálicas sin revestimiento; la fórmula depende de un

parámetro que describe la velocidad lineal de crecimiento de la rugosidad en función de aquellos parámetros de calidad del agua que afectan a la corrosión. Valiantzas (2005), propone aplicar un factor de corrección al coeficiente de fricción para calcular de manera explícita las pérdidas de carga a lo largo de una tubería con salidas múltiple (laterales de riego) utilizando la fórmula de Darcy-Weisbach. Travis & Mays (2007), desarrollaron una ecuación explícita para convertir coeficientes de rugosidad de Hazen-William (C_{HW}) a rugosidades absolutas teniendo en cuenta el diámetro de la tubería, igualando para ello las pérdidas de carga a cierto Número de Reynolds. Dicha solución tiene una precisión de error del 4% para valores de C_{HW} entre 100 y 150. Flechas (2012), analizó los resultados hidráulicos obtenidos después de diseñar una red hipotética para diferentes materiales de tubería y con coeficientes de rugosidad de HW y DW sugeridos en la normativa colombiana; el autor recomienda corregir los valores de C_{HW} utilizados porque pueden dar lugar a un exceso de presión del 70% en ciertos nodos de la red debido a las pocas pérdidas por fricción en las tuberías. Sivakumar & Prasad (2014), evaluaron los resultados hidráulicos calculados para el caudal, velocidad y pérdidas de carga en las tuberías, y las alturas piezométricas en los nodos de demanda después de utilizar unos coeficientes de rugosidad sugeridos por la literatura científica para las fórmulas de HW, DW y CM. Los autores precisaron que con los coeficientes de rugosidad de HW utilizados, se obtienen en general resultados muy parecidos a las rugosidades absolutas de DW, pero para valores bajos de C_{HW} (80-120) se alejan mucho de los resultados obtenidos con el modelo original (DW).

Respecto al cambio de unidades de caudal, Salomons (2006) desarrolló la aplicación optiUnits que permite convertir las magnitudes asociadas a los elementos de una red en función de la unidad de caudal elegida. Sin embargo, las secciones [RULES] y [REACTIONS] de un archivo EPANET no son modificadas. En la versión 2.2 de la librería de EPANET (OWA, 2019), está la función ENsetflowunits que permite cambiar por programación las magnitudes asociadas a la unidad de caudal; sin embargo, desde la propia interfaz de EPANET aún no está disponible.

En el Capítulo 6, se proponen dos métodos alternativos para estimar coeficientes de rugosidad equivalentes entre las tres fórmulas utilizadas por el software EPANET (HW, DW, CM). El objetivo es reproducir los resultados del modelo hidráulico original con los nuevos coeficientes de rugosidad equivalente de la forma más precisa posible. El primer método conduce a un grupo de ecuaciones obtenidas a partir de igualar las fórmulas de pérdidas de carga de DW-HW, DW-CM, HW-CM y de despejar la variable del coeficiente de rugosidad en función del factor de fricción de DW. Para resolver las ecuaciones, se requiere ejecutar una simulación hidráulica y obtener las variables de salida del caudal, velocidad y pérdidas de carga de todas las tuberías. En el segundo método, se proponen unas ecuaciones de tipo potencial-logarítmicas obtenidas a partir de la velocidad óptima de diseño y de un grupo de tuberías comerciales clasificados por su tamaño.

CAPITULO III

3. MÉTODOS APLICADOS AL ANÁLISIS TOPOLÓGICO DE MODELOS DE REDES

Una vez terminado de confeccionar el modelo hidráulico de una RDAP y ejecutar una simulación, es posible que el primer error al que nos enfrentemos sea la desconexión física del sistema debido a un mal trazado de las tuberías o la desconexión hidráulica por el cierre de una tubería, bomba o válvula. Estos sectores o zonas aisladas pueden quedar desabastecidas o simplemente ser zonas en proyección que aún no tienen servicio de agua pero que ya forman parte del modelo. Asimismo, un sector puede tener sus fuentes de agua y sus nodos en cambio no tener asignadas demandas. El caso más común, y que el software EPANET logra detectarlo, es cuando se deja sin suministro de agua a un sector; sin embargo, el resto de las situaciones se hace difícil detectarlas, sobre todo si son redes de gran tamaño.

La mayoría de las redes de suministro de agua se diseñan formando ramificaciones y circuitos cerrados de tuberías para reducir los costes de inversión de la obra en el primer caso y para dar seguridad al suministro de agua en caso de roturas o cortes en el segundo. Con el paso del tiempo, dicho entramado de tuberías puede ir creciendo hasta convertirse en una red compleja de manejar. Por lo tanto, clasificar una red de tuberías por su topología puede ser una herramienta de gran ayuda para analizar la fiabilidad de la red ante posibles roturas en las tuberías o averías en otros elementos, para ubicar sensores, delimitar sectores hidráulicos o ubicar válvulas reductoras de presión sobre el mapa de la red hidráulica.

En cualquier red abastecimiento, es importante tener identificadas la red de tuberías principales y secundarias para realizar diversas tareas como planificar la ampliación de la red hacia nuevos sectores de demandas, verificar que el proceso de asignación de demandas se realice sobre los nodos pertenecientes a la red de distribución (salvo excepciones), identificar derivaciones que causen un suministro deficiente en determinadas zonas, o para proponer sectores de demanda excluyendo las tuberías principales y secundarias.

El objetivo que se persigue en este capítulo es desarrollar tres herramientas robustas basadas en la topología de la red y el estado actual de las líneas, como un análisis preliminar a los métodos que siguen. Estas aplicaciones permitirán identificar posibles “errores” de conexión, realizar un análisis de fiabilidad de la red, ayudar a ubicar sensores, a ubicar elementos delimitadores (caudalímetros y/o válvulas de corte) de los sectores hidráulicos o a validar el proceso de asignación de demandas. A continuación, se describen los tres métodos aplicados a la topología de la red que serán validados para la red de Maspalomas.

3.1. Método para identificar subredes y subsistemas hidráulicos

Para abordar el tema de las subredes desde el punto de vista topológico e hidráulico, mejor se explica sobre un ejemplo las diferentes casuísticas. En la Figura 16, se muestra un sistema de abastecimiento de agua formado por dos subredes desde el punto de vista topológico, debido a una separación física. Sin embargo, desde el punto de vista hidráulico existen tres subredes

debido a la separación física, por una parte, y a la separación causada por el cierre de las tuberías marcadas de color rojo por otra.

En el caso de que las subredes estén sólo divididas por los elementos de control y/o regulación que se cierran y abren, es posible identificar sectores dinámicos provocados por las maniobras de dichos elementos.

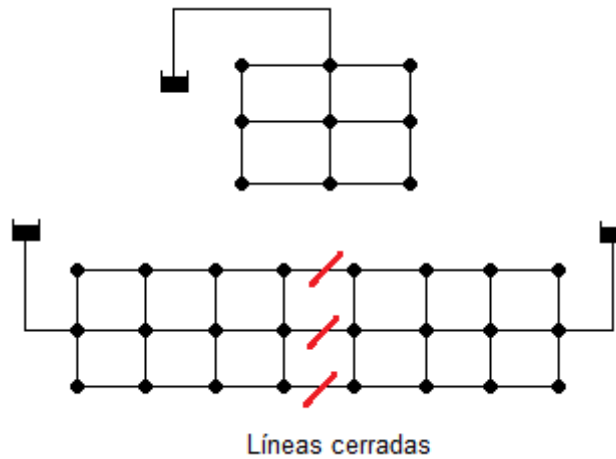


Figura 16. Sistema de suministro de agua con 3 subredes

Identificadas las subredes desde el punto de vista hidráulico, ahora, a cada subred la podemos clasificar en cuatro tipos de subsistemas. Esta clasificación está en función de las fuentes de agua de alimentación y las demandas asignadas a los nodos de caudal de cada subred.

A continuación, se describen los cuatro tipos de subsistemas hidráulicos contemplados.

- Subsistema **Tipo A**: Es aquel que tiene por lo menos una fuente de agua (embalse, depósito) y un nodo de caudal con demanda asignada. Es un subsistema hidráulicamente compatible, donde todos sus nodos pueden ser alimentados, cumpliendo o no con la presión de servicio.
- Subsistema **Tipo B**: Es aquel que tiene por al menos una fuente de agua (embalse, depósito) y ningún nodo de caudal tiene demanda. Es un subsistema hidráulicamente compatible, donde no existe caudal circulante al no existir nodos con demanda (situación de grifos cerrados).
- Subsistema **Tipo C**: No existe fuente de agua y al menos uno de sus nodos lleva asignado una demanda de caudal. Es un subsistema hidráulicamente incompatible, cuyos nodos no pueden ser abastecidos al carecer de fuente de suministro.
- Subsistema **Tipo D**: No existe fuente de agua y ninguno de sus nodos tiene asignado una demanda de caudal. Es un subsistema hidráulicamente compatible, pues sus nodos no necesitan ser abastecidos y por tanto no se requiere una fuente de suministro. Este tipo de subsistemas pueden existir en nuestro modelo cuando estamos trabajando en una ampliación de la red para abastecer a nuevos usuarios.

En la Figura 17 se muestra un ejemplo gráfico con los cuatro tipos de subsistemas desde el punto de vista hidráulico. Las líneas de color rojo indican que la tubería está cerrada y los nodos con una flecha de color azul indican que tienen una demanda asignada.

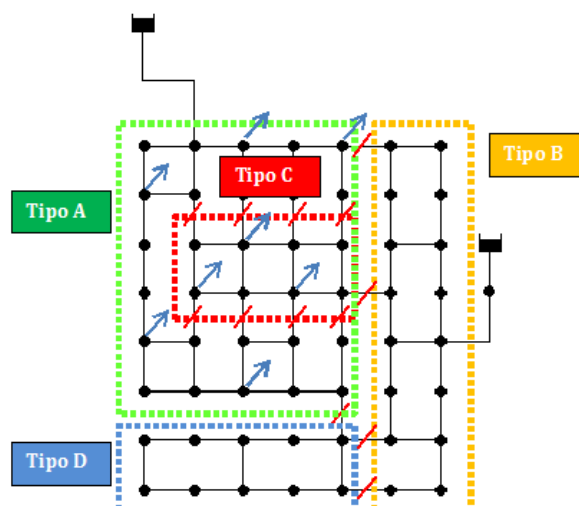


Figura 17. Clasificación de subsistemas hidráulicos

El método que se propone para identificar subredes y subsistemas hidráulicos se divide en dos etapas. Primero se identifican las subredes a partir del estado de las líneas (abiertas/cerradas) y de su conexión física; y luego, por cada subred se identifica a que subsistema pertenece en función de las fuentes de alimentación y de las demandas asignadas a los nodos de caudal de cada subred. Esto se puede hacer para un estado inicial o para cualquier estado dinámico, es decir, el número de subredes y la clasificación de subsistemas puede variar en el tiempo.

Para recorrer la red como un grafo no dirigido, se opta por utilizar el algoritmo de búsqueda en profundidad. A continuación, se describen los pasos a realizar en cada etapa.

Etapas 1: Identificar subredes

1. Comprobar que el modelo de red tenga al menos una fuente de alimentación (embalse o depósito), ya que EPANET sin fuente de agua no ejecuta una simulación hidráulica.
2. Almacenar en una estructura de datos temporal toda la información del archivo de entrada. En caso de que se quiera identificar subredes dinámicas, se debe almacenar previamente el estado de las líneas para cada instante de tiempo (abiertas/cerradas).
3. Almacenar por cada nodo las líneas adyacentes y su grado de conectividad. Este último se obtiene sumando las líneas que conectan a cada nodo.
4. Identificar todas las fuentes de alimentación y almacenarlas en una lista
5. El recorrido del grafo se inicia a partir de una fuente almacenada en la lista. Se comprueba que no ha sido explorada y se elimina de la lista. Esta fuente se añade a la lista de nodos pivotes. A partir de aquí se enumera las subredes y se irá incrementando si desde la primera fuente no se puede llegar al resto de los nodos del grafo.

6. Extraer el último nodo de la lista de nodos pivotes y marcar como explorado.
7. Almacenar en una lista todas las líneas que conectan al nodo pivote siempre y cuando no se hayan añadido previamente. Todas estas líneas deben marcarse como añadido.
8. Para continuar recorriendo el grafo, se selecciona el nuevo nodo pivote a partir de la última línea almacenada de la lista. Esta línea se marca como explorada, se elimina de la lista, se incrementa en uno el número de líneas exploradas y se comprueba que la línea esté abierta. En caso de que esté cerrada se vuelve a seleccionar la última línea de la lista y se repite este paso, y si está abierta el nuevo frente de avance será el nodo adyacente al nodo pivote. Este nuevo frente de avance se almacena en la lista de nodos pivotes.
9. El paso 6 hasta el paso 8 se repite hasta que no existan más líneas almacenadas en la lista. Si la lista está vacía y aún quedan fuentes de alimentación por explorar, se debe seleccionar una de las fuentes para continuar con el recorrido del grafo. En este caso, se debe empezar de nuevo desde el paso 5.
10. Si la lista de las líneas y la lista de las fuentes está vacía, y queda por explorar algunas líneas, hay que recorrer todos los nodos y seleccionar aquel que no haya sido añadido a la lista de nodos pivotes. Aquí se debe incrementar en una unidad el número de subredes que serán asignadas a los nodos y líneas por explorar. Luego, volvemos al paso 6 hacia delante.
11. El algoritmo termina cuando se han explorado todas las líneas del grafo.

Etapa 2: Clasificar subsistemas

1. Dimensionar, según el número de subredes identificadas, dos vectores de tipo booleano y un vector de tipo cadena de texto.
2. Recorrer todos los nodos del modelo, incluido las fuentes de agua, y extraer lo siguiente:
 - a. La subred a la que pertenece
 - b. El tipo de elemento (nodo, embalse o depósito)
 - c. La demanda asignada en caso de ser un nodo de caudal

Con el valor de la subred se apunta al índice de los dos vectores booleanos y se asigna un "true" si el elemento es una fuente de agua o es un nodo de caudal con demanda asignada.

3. El tercer vector, de tipo cadena de texto, se rellena bajo las siguientes condiciones:
 - a. Si la subred tiene al menos una fuente de alimentación y sus nodos, al menos uno, tiene asignado una demanda de caudal, entonces el subsistema es de **Tipo A**
 - b. Si la subred tiene al menos una fuente de alimentación y sus nodos no tienen asignado una demanda de caudal, entonces el subsistema es de **Tipo B**
 - c. Si la subred no tiene fuente de alimentación y sus nodos, al menos uno, tiene asignado una demanda de caudal, entonces el subsistema es de **Tipo C**
 - d. Si la subred no tiene fuente de alimentación y sus nodos no tienen asignado una demanda de caudal, entonces el subsistema es de **Tipo D**

- Recorrer todas las líneas y todos los nodos para asignar a cada elemento el tipo de subsistema al que pertenece. Con el número de subred asociado a cada elemento, es posible realizar esta asignación.

Caso de estudio:

Para validar el método, se aplicó al modelo de red de Maspalomas con ayuda de una herramienta denominada **Idehisub** (Vegas, 2020), la cual fue desarrollada desde el entorno de programación de Microsoft Visual Studio 2019 e implementado con las librerías de EPANET y Shapelib (Figura 18). La aplicación es de libre acceso.

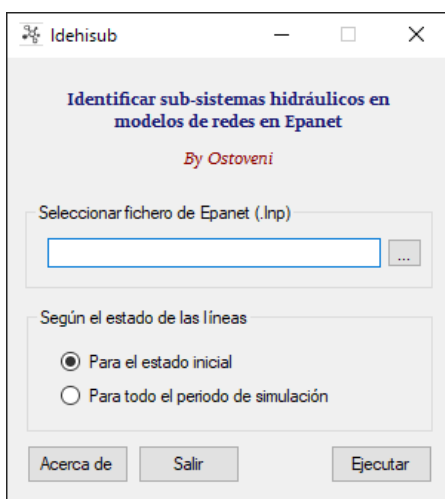


Figura 18. Interfaz gráfica de la aplicación Idehisub

Al modelo original se le modificó el estado de dos tuberías tipo “puente” de abierto a cerrado, de donde cuelgan dos sectores separados. En uno de los sectores se anuló la demanda de caudal de todos sus nodos. Después de ejecutar el algoritmo para el estado inicial de la red, en la Figura 19 se visualizan las **8 subredes** identificadas.



Figura 19. Identificación de las 8 subredes de la red Maspalomas

Por su parte, en la Figura 20 se muestra la clasificación de los subsistemas hidráulicos para cada una de las subredes identificadas (**Tipo A, Tipo C, Tipo D**). El sector de color rojo es un subsistema **Tipo C**, el sector de color celeste es un subsistema de **Tipo D** y el sector más grande de color gris es un subsistema **Tipo A**. No se han identificado en este caso subsistemas **Tipo B**. Los elementos de color naranja son tuberías cerradas.



Figura 20. Clasificación de subsistemas (Tipo A, C, D) en la red Maspalomas

Después de identificar las subredes, se puede empezar a corregir las desconexiones que generen problemas al momento de ejecutar una simulación válida (estado inicial). Asimismo, el método puede utilizarse en modelos de redes tanto en servicio continuo como intermitente para identificar subredes. Sin embargo, la clasificación de subsistemas hidráulicos sólo puede aplicarse a modelos de redes en servicio continuo, ya que, en un sistema intermitente, un sector puede quedar sin servicio de agua unas horas, pero, sin embargo, los usuarios almacenan el agua en sus depósitos domiciliarios hasta el siguiente turno o reparto del agua. En este caso, se estaría interpretando de manera equivocada que dicho sector tiene problemas de suministro de agua (Tipo C).

3.2. Método para clasificar tuberías formando mallas y ramas

Los sistemas de abastecimiento de agua, en su mayoría, están configuradas por tuberías mallas y ramificadas, lo que sería una red mixta según lo explicado en el apartado 2.1.1. Clasificar las tuberías por su topología, puede ser una herramienta de gran ayuda para proponer sobre el mapa la ubicación de sensores, elementos delimitadores de sectores hidráulicos (caudalímetros y/o válvulas de corte) o para ubicar válvulas reductoras de presión.

El método que se propone para clasificar las tuberías de tipo mallas o ramificado tiene doble propósito. Es decir, si el interés es realizar un análisis de la fiabilidad de la red ante la rotura de una o varias tuberías, conviene identificar las tuberías ramificadas como aquellas que no forman parte de un ciclo o mallas. Esto permite visualizar sobre el mapa grupos de bloques de tuberías mallas y aisladas, cuya unión dependa de las tuberías tipo “puente”. De esta forma, podemos identificar rápidamente aquellas tuberías “críticas” que pueden aislar una buena parte de la red

y quedarse sin suministro de agua. En cambio, si se busca realizar propuestas para ubicar sensores o delimitar sectores hidráulicos, conviene identificar como tuberías ramificadas sólo los ramales, así, se evita la “desconexión” de los bloques de tuberías malladas al momento de ocultar las tuberías ramificadas. La presencia de tuberías o válvulas cerradas puede cambiar la clasificación de las tuberías como malladas o ramificadas.

En la Figura 21, se muestra el resultado de clasificar las tuberías ramificadas (tuberías y nodos de color verde claro) según el propósito de estudio. La red clasificada con el tipo A, sería la correcta para ubicar sensores o ubicar elementos delimitadores de los sectores hidráulicos, mientras que la red clasificada con el tipo B sería idónea para identificar tuberías críticas para un análisis de fiabilidad de la red (roturas de tuberías).

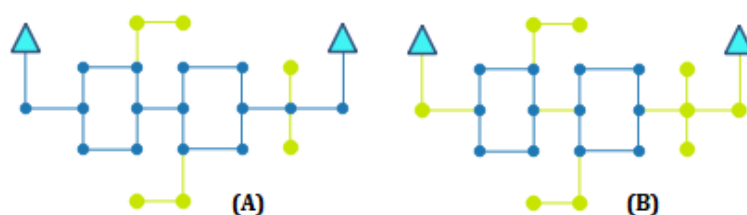


Figura 21. Clasificación de tuberías malladas y ramificadas

Para conseguir clasificar la red de tuberías malladas y ramificadas para el caso de la red tipo A, se utiliza el algoritmo de recorrido en profundidad y se sigue los siguientes pasos.

1. Almacenar información de cada nodo: tipo (nodo de demanda, embalse, depósito) y sus coordenadas; y de las líneas: tipo (tubería, bomba y válvula), su estado inicial y sus vértices.
2. Identificar para cada nodo, las líneas que lo conectan y calcular su grado de conectividad. Se puede considerar o no las líneas cerradas.
3. Declarar inicialmente a todos los nodos y líneas como elementos mallados.
4. Almacenar en una lista los nodos de caudal con grado de conectividad uno
5. Recuperar el último nodo de la lista y eliminarlo de la lista.
6. Recuperar la línea de acceso al nodo e identificar el nodo aguas arriba, se resta en una unidad a los nodos extremos de la línea de acceso y en caso de que el nodo aguas arriba sea de grado de conectividad uno, se añade a lista. La línea de acceso cambia de “mallado” a “ramificado”.
7. Se regresa al paso 5 y el proceso termina cuando la lista está vacía.
8. Para corregir la etiqueta “mallado” por “ramificado” en los nodos de caudal, se recorre todos los nodos del modelo y se comprueba que los nodos deben tener el valor de cero como grado de conectividad.

Para clasificar las tuberías malladas y ramificadas como la red tipo B, se aplica el algoritmo de recorrido en amplitud para comprobar de manera rápida si existe algún ciclo o mallado cerca de la tubería que se está analizando. La idea es que, a partir de uno de los nodos extremos de la tubería se pueda llegar al otro nodo extremo sin utilizar la misma tubería. Este proceso consiste en ir navegando por medio de las líneas que conectan a los nodos hasta llegar al otro nodo extremo. En caso de no encontrar el nodo extremo, significa que la línea es de tipo ramificada. Para llegar a conseguir esta clasificación, primero se debe ejecutar los pasos anteriores y seguir con los que a continuación se proponen.

1. Se recorre todas las líneas del modelo y sólo se analiza aquellas líneas que previamente han sido marcadas como “mallado”. Se identifican sus nodos extremos y se añade sólo el nodo inicial a una lista.
2. Seleccionar el primer nodo de la lista (nodo pivote), luego eliminarlo, incrementar en uno el número de nodos explorados y, por último, marcarlo como nodo explorado y añadido.
3. Comprobar que el nodo pivote es igual al nodo final. De ser así, el proceso termina aquí, caso contrario, continua las siguientes instrucciones.
4. Por cada línea conectada al nodo pivote se añade a la lista el nodo opuesto, siempre y cuando la línea que se evalúa no sea la línea que se está verificando si forma parte de un bloque de tuberías malladas. Además, todos los nodos que no han sido añadidos a la lista se marcan como añadidos
5. Comprobar si el número de nodos explorados es menor que el número total de nodos del modelo y si además la lista está vacía, entonces, significa que la línea no forma parte de un ciclo, por lo tanto, dicha línea debe cambiar de “mallado” a “ramificado”.

Para validar el método, se aplicó al modelo de red de Maspalomas con ayuda de una herramienta **iRamifMallas** (Vegas, 2022), desarrollada desde el entorno de programación de Microsoft Visual Studio 2019 (Visual .NET) e implementado con las librerías de EPANET y Shapelib (Figura 22). La aplicación es de libre acceso.

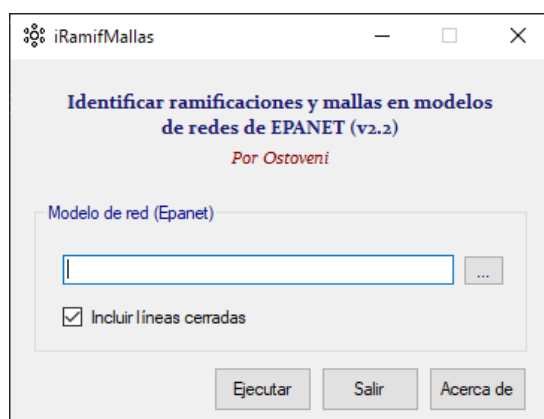


Figura 22. Interfaz gráfica de la aplicación iRamifMallas

Después de ejecutar el algoritmo para el caso de la red de Maspalomas, el resultado se muestra en las siguientes imágenes. En la Figura 23, se visualiza la clasificación de las tuberías malladas (color azul) y ramificadas (color verde claro) para realizar propuestas de ubicar sensores o de ubicar elementos delimitadores de los sectores hidráulicos sobre el mapa. Bajo esta clasificación, el **40%** de las tuberías son ramificadas y el **60%** malladas.

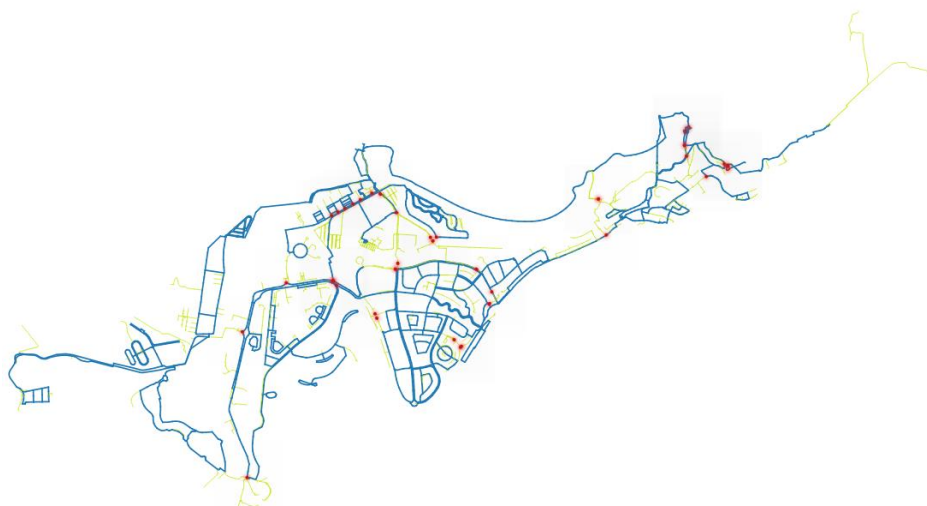


Figura 23. Clasificación de tuberías malladas y ramificadas para ubicar elementos sobre el mapa. Red Maspalomas

En la Figura 24, se visualiza la clasificación de las tuberías malladas (color azul) y ramificadas (color verde claro). Esta clasificación nos permite identificar, de manera visual, qué tuberías ramificadas pueden causar un desabastecimiento de agua en alguna zona si se produce una rotura en alguna de ellas. Bajo esta clasificación, el **55%** de las tuberías son ramificadas y el **45%** malladas.

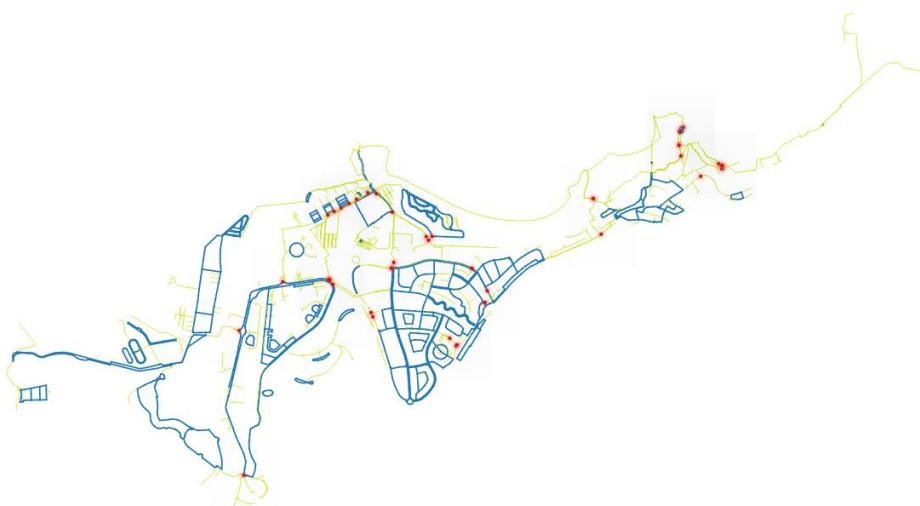


Figura 24. Clasificación de tuberías malladas y ramificadas para identificar tuberías críticas ante su posible rotura. Red Maspalomas

Identificadas las tuberías ramificadas existen algunas que son de tipo “puente”, cuya desconexión puede ocasionar el desabastecimiento de agua de un sector. Ante una posible rotura de este tipo de tubería, conviene estudiar la fiabilidad del sistema. Mediante el cierre de tuberías “puente” y ejecutando simulaciones hidráulicas, se puede evaluar el comportamiento de la red.

En caso de que la red de tuberías fuese totalmente mallada, el método propuesto no se puede utilizar para las tareas antes descritas. Por lo tanto, se deben desarrollar otros métodos apoyados en el árbol de expansión y el conjunto de corte de la teoría de grafos, para identificar posibles combinaciones de tuberías que pueden verse afectadas por una avería y dejar algunas zonas de la red desabastecidas.

3.3. Método para clasificar tuberías principales, secundarias y de distribución

La importancia de clasificar la red de tuberías según lo expuesto en el apartado 2.1.2 tiene muchas aplicaciones prácticas, como por ejemplo verificar que las asignaciones de las demandas sobre los nodos de caudal se realicen en los nodos que unen a las tuberías de distribución y no en los nodos que unen a las tuberías principales o secundarias (salvo que sean grandes consumidores como hospitales, centros educativos, universidades, centros comerciales, etc.), identificar posibles derivaciones sobre las tuberías de conducción que causen un suministro deficiente, mantener las tuberías principales en los modelos de redes simplificados, o para sectorizar una red de modo que las tuberías principales y secundarias formen parte de los sectores para evitar de esta manera sectores en cascada o la instalación de caudalímetros y/o válvulas de corte sobre las tuberías de gran tamaño.

Una forma habitual de clasificar las tuberías principales, secundarias y de distribución es mediante el tamaño de sus diámetros. Esta clasificación puede ser útil para identificar posibles derivaciones inadecuadas o verificar que las asignaciones de las demandas se hayan realizado de manera correcta. Sin embargo, si estamos trabajando en una propuesta de sectorización donde se decide no incluir a las tuberías principales y secundarias dentro de los sectores hidráulicos, es posible que el número de sectores resulte muy elevado y que algunos de ellos lo conformen unos pocos nodos de caudal. En la Figura 25, se visualiza la red de Maspalomas clasificada por el tamaño de las tuberías, donde las tuberías de color naranja vendrían a ser los sectores que se conectan a la red de tuberías primarias y secundarias.

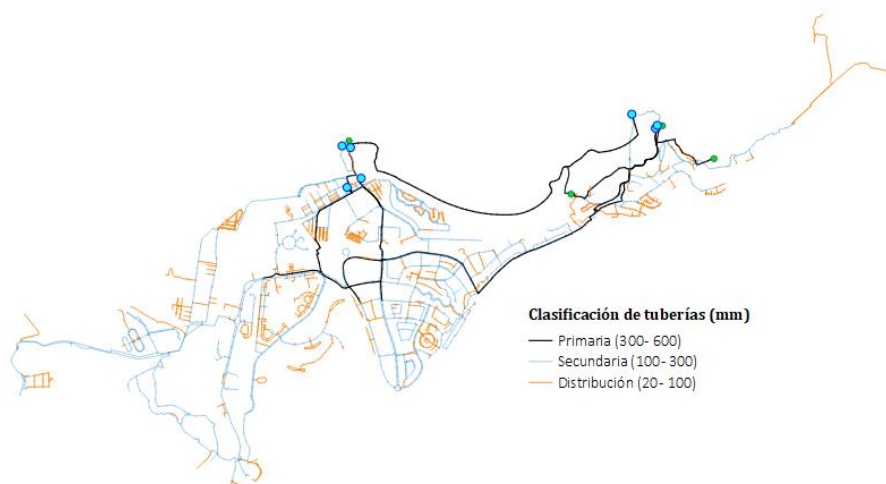


Figura 25. Clasificación de las tuberías por el tamaño de la tubería. Red Maspalomas

Otra alternativa para clasificar las tuberías principales, secundarias y de distribución es en base al caudal que pasa por las tuberías para un determinado instante de tiempo o para el periodo de máxima demanda. Con ayuda del modelo hidráulico, se ejecuta una simulación y se divide la red de tuberías en tres rangos de caudales a criterio del modelador. Con la aplicación EPANET, mediante el gráfico de frecuencias, es posible determinar dichos rangos de valores de caudal.

Aplicando esta nueva opción sobre la red de Maspalomas, la clasificación de las tuberías según el caudal circulante para el instante de máxima demanda ($Q_t=9h$) quedaría como se muestra en la Figura 26, con lo cual, el número de sectores que se alimentan de las tuberías principales y secundarias es mucho menor que la clasificación por el tamaño de los diámetros. Sin embargo, aún existen sectores muy pequeños y sectores con muchas entradas. Una forma posible de reducir el número de sectores pequeños es modificando el rango de caudales o identificando sobre el mapa el nodo final del trayecto de la red secundaria.

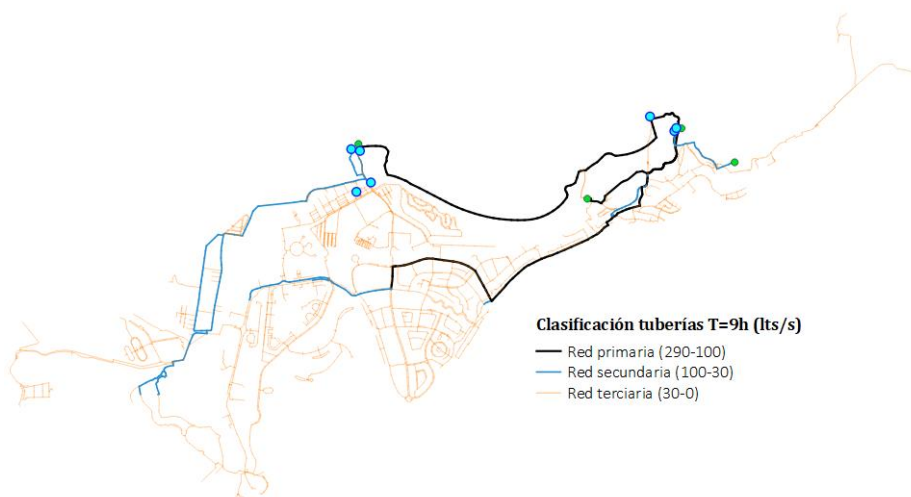


Figura 26. Clasificación de tuberías por el caudal trasegado. Red Maspalomas

Esta forma de clasificar las tuberías mediante el caudal circulante puede ser válida para redes con una sola fuente de suministro o con varias fuentes con elevaciones parecidas. En caso de que una red sea abastecida por más de una fuente, y cada una de ellas aporte un caudal muy diferente, es posible que no se puedan distinguir las tuberías principales y secundarias para alguna de ellas por tener elevaciones muy distintas o por estar reguladas por alguna válvula o bomba. Además, puede haber tuberías principales o secundarias aisladas cuyo caudal de circulación es la suma de caudales que proceden desde otras partes de la red.

Dado por válida la clasificación de las tuberías de la Figura 26, se puede evaluar a continuación el proceso de asignación de las demandas. Una asignación correcta de las demandas sería sobre los nodos que unen las tuberías de distribución y no sobre los nodos que unen las tuberías principales y/o secundarias, salvo que existan grandes consumidores. En el caso de la red de Maspalomas, se comprobó que algunos nodos de caudal que unen las tuberías principales y secundarias (Figura 27) tienen asignado una demanda (puntos de color amarillo). En este caso, será el modelador quién determine si es correcto la asignación de las demandas en dichos nodos.



Figura 27. Nodos con demanda de caudal en la red principal y secundaria. Red Maspalomas

Los dos enfoques anteriores pueden provocar una discontinuidad de las trayectorias de la red de tuberías principales y secundarias o que un conjunto de ellas quede excluido. Debido a estos inconvenientes, se propone un nuevo enfoque donde el usuario debe seleccionar un conjunto de puntos de inicio y final de cada posible trayecto para identificar la red de tuberías principales y secundarias. A continuación, se describen los pasos a seguir:

❖ Paso 1. *Seleccionar los puntos de inicio y fin de los trayectos a construir*

Los puntos de inicio serán las fuentes de suministro (embalses, grandes depósitos, puntos de inyección) y como puntos finales debemos elegir los nodos de demanda y los depósitos de cola. El criterio para elegir los nodos de demanda finales serían los nodos más alejados de las fuentes de suministro de agua. Como recomendación, se pueden elegir entre diez y quince nodos de demanda.

❖ Paso 2. *Guardar las propiedades de los elementos del modelo de red*

Consiste en almacenar toda la información de los atributos de los elementos de la red (longitud, diámetros, elevaciones, demandas, etc.) y los resultados obtenidos después de ejecutar una simulación (caudal, velocidad, estado de las líneas, presión, alturas piezométricas, etc.) para todos los intervalos de tiempo del periodo total de duración. Asimismo, en este paso se validan los identificadores de los nodos propuestos (nodos iniciales y finales).

❖ Paso 3. *Asociar un valor de peso a cada línea del modelo de red*

Para encontrar el mejor camino desde un nodo inicial hasta un nodo final, bajo cierto criterio, necesitamos asociar un peso a cada línea de nuestro modelo de red. Este peso puede estar relacionado con la longitud, el diámetro, la resistencia hidráulica, el caudal, la velocidad de flujo o la pérdida de carga de cada tubería y son las que se utilizarán para analizar los mejores trazados. Si como peso se asocia a la longitud, se buscará el trazado más corto; si se asocia el diámetro, el trazado estará formado por las tuberías de mayor diámetro; si se asocia la resistencia hidráulica, entonces se desea que sea la mínima total; si se asocia el caudal o la velocidad de flujo, entonces se requiere que sea la más alta. Las bombas y las válvulas se asocian con el peso cero cuando se quiere minimizar la longitud y la resistencia hidráulica, y con un valor infinito si se asocia con el diámetro, el caudal o la velocidad de flujo.

❖ Paso 4. *Determinar las líneas adyacentes a cada nodo*

Para recorrer las tuberías que forman parte del recorrido, primero hay que determinar las líneas adyacentes a cada nodo. Si la longitud, diámetro o resistencia hidráulica se elige como peso, nos encontraremos con un grafo no dirigido, es decir, todas las líneas que se conectan a un nodo son adyacentes. En cambio, si se elige el caudal, la velocidad del flujo o la pérdida de carga nos encontraremos con un grafo dirigido, para el cual, en cada instante de tiempo, debemos de identificar las líneas que introducen flujo (líneas de entrada) o reciben flujo (líneas de salida) de cada nodo. Asimismo, debemos de conocer el grado de conectividad de cada nodo (número de líneas que enlazan a cada nodo).

❖ Paso 5. *Identificar los trayectos o recorridos*

La identificación de los recorridos, dado los nodos iniciales y finales, se obtiene con el algoritmo de Dijkstra con una ligera modificación. Pero primero, es necesario comprobar si el nodo inicial y final de cada trayecto pertenecen al mismo subsistema hidráulico; de esta forma, se evita buscar trazados imposibles cuando el modelo hidráulico está físicamente separado. Para ello, es necesario asignar a cada nodo extremo de una línea un identificador numérico del subsistema hidráulico al que pertenece. Este proceso previo se realiza recorriendo la red con el algoritmo de búsqueda en profundidad desde cada fuente de agua hacia todos los nodos, y en caso de que no se llegue a todos los nodos del modelo, se inicia un nuevo camino desde otra fuente.

❖ Paso 6. *Trazado de la red arterial o tuberías principales*

Tras identificar todos los caminos o trayectos mediante el algoritmo de Dijkstra, que proporciona los caminos de coste mínimo desde cada nodo origen a todos los nodos finales, se lleva a cabo un proceso de adaptación de la red arterial. Partiendo de los nodos finales, cada camino se recorre aguas arriba hasta llegar a un nodo que conecta tres o más tuberías identificadas como

parte de las rutas trazadas. Estos nodos y tuberías que han sido navegados ya no formarán parte de la red arterial. De este modo, se define la red arterial.

❖ Paso 7. Trazado de la red de tuberías secundarias

Una vez identificada la red arterial, se debe nuevamente definir los nodos iniciales y finales para identificar las posibles tuberías secundarias. En este caso, los nodos iniciales serían los nodos que unen a las tuberías principales, pero no todos serán considerados como “fuentes virtuales”. Por lo tanto, se debe seleccionar los nodos con mayor caudal saliente, y a partir de estos trazar los nuevos trayectos con el algoritmo de Dijkstra, y finalmente se realiza un proceso de adaptación de las redes secundarias, tal como se realizó con la red troncal. Los nodos finales serán elegidos según el alcance que pueda tener un posible trayecto de tuberías secundarias. Por ahora no es automático, pero con las gráficas de frecuencias de distribución de caudal es posible decirle a EPANET el rango de caudales que queremos que formen parte la red de tuberías secundarias. El resto de las tuberías que no han sido clasificadas, formarán parte de la red de distribución, juntamente con los nodos que las unen. El número de nodos de demanda recomendado sería como máximo de diez.

Todos los pasos anteriores se automatizaron con ayuda de la herramienta **iArterialNet** (Figura 28) que permite evaluar los trayectos generados según los pesos asignados a las tuberías. Aquí también se llegó a utilizar la librería de EPANET y la librería shapelib. Esta herramienta no es de libre acceso, porque solo se ha utilizado para evaluar los trayectos generados por cada uno de los pesos asociados a cada tubería.

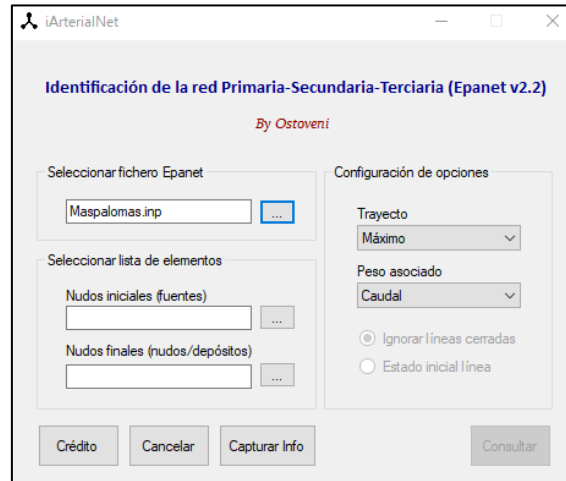


Figura 28. Interfaz de la aplicación para identificar la red arterial, secundaria y de distribución

Al aplicar este nuevo enfoque a la red de Maspalomas, se comprobó que el caudal asociado como peso de las tuberías define mejor los trazados de la red troncal y secundaria que el resto de las opciones asignadas como peso. En la Figura 29 se visualiza el trazado de las tuberías principales y secundarias, que configuran redes prácticamente ramificadas. Las tuberías de color negro son las tuberías principales y las de color celeste las tuberías secundarias. El resto de las tuberías (de color naranja) son las tuberías de distribución.

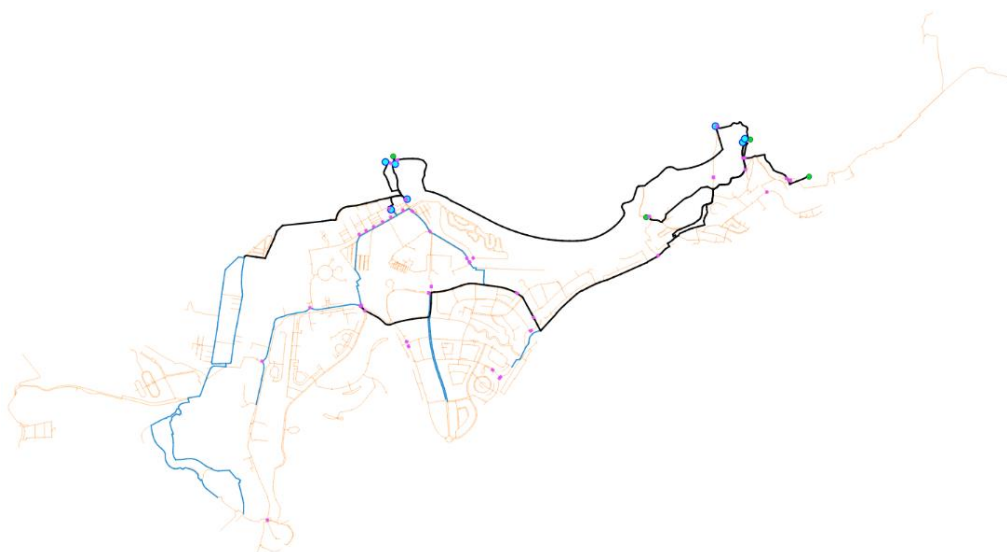


Figura 29. Tuberías principales y secundarias construidos a partir de trayectos. Red Maspalomas

Con esta clasificación se busca que las tuberías principales y las secundarias muestren un trazado más continuo entre ellas, donde a simple vista facilite a los modeladores la toma de decisiones, como por ejemplo a decidir si incluir o no dichas tuberías en el diseño de los sectores hidráulicos o evaluar el proceso de asignación de las demandas sobre los nodos de caudal.

Para construir los modelos de redes mostrados en las imágenes anteriores, se desarrollaron dos aplicaciones: **ConvertGISEpanet** (Vegas *et al.*, 2019) y **RunEpanetGIS** (Vegas, 2019). La primera herramienta se encarga de convertir archivos EPANET (.Inp) a archivos Shape para visualizar todos los elementos del modelo hidráulico desde cualquier aplicación SIG, y la segunda aplicación permite almacenar los resultados hidráulicos y de calidad del agua en unas tablas, después de ejecutar una simulación (Figura 30). Con ayuda de las propias funciones de un SIG, se puede unir o enlazar a cada elemento del modelo de red con los resultados hidráulicos almacenados en dichas tablas, de esta forma se podrá aplicar las clasificaciones y simbologías a criterio del modelador. Ambas herramientas son de libre acceso.

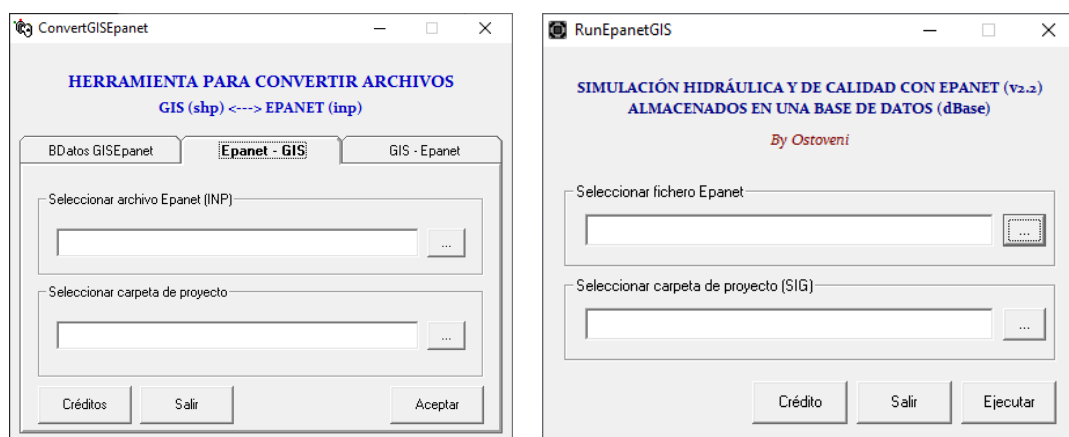


Figura 30. Interfaz gráfica de las aplicaciones ConvertGISEpanet y RunEpanetGIS

CAPITULO IV

4. MÉTODOS DE AYUDA A LA SECTORIZACIÓN DE REDES

Las razones para sectorizar una red de suministro de agua potable son diversas. Se puede dividir la red para tener un mayor control de los caudales circulantes, poder realizar balances de agua y priorizar las zonas con mayores pérdidas de agua, para gestionar la presión y disminuir el caudal fugado, proteger a la población ante una posible contaminación del agua, entre otras.

Antes de empezar con un proyecto de sectorización, se debe primero analizar el comportamiento hidráulico y la calidad del agua. Este análisis se realiza sobre las variables de caudal, velocidad, pérdidas de carga, tiempo de permanencia del agua (para las tuberías) y la presión (para los nodos con demanda). En caso de no cumplir con las condiciones mínimas de servicio, se deben proponer algunas alternativas de mejora como por ejemplo cambiar el diámetro de algunas tuberías, añadir nuevas tuberías, aumentar la capacidad de los depósitos, instalar válvulas de regulación, etc.

Asimismo, es importante identificar previamente si la red hidráulica se encuentra sectorizada por algunos elementos de regulación (embalses, depósitos, y estaciones de bombeo), por elementos delimitadores (caudalímetros y/o válvulas de corte) o la combinación de ambos. De esta forma, podemos enfocar la atención sobre una porción de la red o sobre la totalidad de esta.

En este capítulo se proponen dos propuestas diferentes basadas en la topología de la red y en los resultados hidráulicos de la simulación para sectorizar una red bajo los siguientes objetivos: a) delimitar los puntos de suministro a los diferentes sectores manteniendo los parámetros de calidad, y b) diferenciar los sectores en función de la fuente de suministro. Para ello, primero hay que obtener los caudales circulantes de las tuberías y su dirección para un instante de tiempo determinado (normalmente la hora de máxima demanda), los cuales serán utilizados por los algoritmos de búsqueda; en segundo lugar determinaremos el porcentaje de contribución de cada fuente de agua al consumo de cada nodo, lo que será utilizado por el segundo método para dividir los sectores por fuentes y también por el primer método para completar la sectorización; por último, en cada propuesta se evaluarán las presiones máximas y mínimas en los nodos interiores de cada sector.

4.1. Modelización hidráulica de la red

Las redes de distribución de agua pueden modelarse mediante un análisis basado en la demanda o un análisis basado en la presión. Se supone que la demanda de agua es independiente de la presión de suministro, mientras que en el segundo caso la demanda se reduce en función de la presión, cuando éstas descienden por debajo de un umbral. Aunque el caudal en los nodos de demanda finales depende siempre de la presión, cuando ésta es suficiente, los usuarios pueden ajustar los caudales a sus necesidades haciendo que la demanda en la práctica puede modularse en el tiempo según sus necesidades, con independencia de la presión de suministro. No ocurre igual cuando la presión es insuficiente.

Garantizar una presión suficiente en todos los nodos es una de las condiciones que debe cumplir cualquier propuesta de sectorización en la fase de diseño; por lo tanto, un análisis basado en la demanda puede ser adecuado, excepto en el caso de modelos de redes con déficit de presión.

Por otra parte, aunque el consumo de agua se distribuye realmente a lo largo de las tuberías a través de las conexiones de servicio, debido a que éstas terminarán perteneciendo a un determinado sector, se puede suponer que las demandas se agrupan en los nodos extremos de cada tubería a efectos de la sectorización.

Con todas estas consideraciones, un análisis de la red de distribución en función de las demandas agrupadas en los nodos de caudal puede ser suficiente para nuestro propósito. De este modo, se supondrá que el usuario dispone de un modelo hidráulico operativo y debidamente calibrado en EPANET, sobre el cual, se ejecutarán las simulaciones necesarias. Asimismo, en la etapa de elaboración de un modelo hidráulico se recomienda lo siguiente:

- El modelo hidráulico debe representar todos los elementos tal como son, es decir, si en la realidad existen dos fuentes de suministro (embalses o puntos de inyección) y cinco depósitos (tanques de almacenamiento), deben representarse exactamente de la misma manera en el modelo. En el caso de que los depósitos sean modelados como fuentes de suministro los resultados esperados pueden no interpretarse correctamente.
- Comprobar el trazado de las tuberías y corregirlos si es necesario. Esto es importante para determinar el número de caudalímetros que alimentan a los sectores y para conocer la procedencia del agua cuando se trata de sectores en cascada. Para ello, se ha desarrollado una herramienta que permite cambiar la orientación de las tuberías, si se comprueba que el caudal que atraviesa estos elementos es siempre negativo durante todo el periodo de simulación. Esta aplicación se denomina **Reverse-Pipes** (Vegas, 2018) y es de libre acceso.
- Si el trazado de toda la red de tuberías no está completamente conectado, las diferentes subredes separadas físicamente o por elementos de cierre deben ser identificadas primero. Esto ayudará a comprender mejor los resultados obtenidos de los esquemas de sectorización. Con la herramienta **Idehisub**, desarrollada en el apartado 3.1, es posible identificar las subredes y subsistemas hidráulicos que configuran la red de suministro de agua potable.

4.2. Método 1. Sectorización de una red preservando la red arterial y secundaria

Las redes urbanas de distribución de agua potable se componen de un gran número de elementos (tuberías, conectores o nodos de demanda, depósitos, bombas, válvulas, etc.), donde cualquier trabajo de sectorización aplicado requiere realizar un gran número de cálculos repetitivos. Estos cálculos deben ejecutarse en poco tiempo, por lo que se necesitan algoritmos especiales que procesen los datos rápidamente. Los algoritmos de búsqueda en profundidad y en amplitud, junto con el algoritmo del camino más corto de Dijkstra, son los algoritmos más voraces para identificar la red arterial y secundaria. Este conjunto de tuberías conformado normalmente por los diámetros más grandes, son los encargados de extraer y transportar el agua desde las fuentes de suministro hasta la red de distribución.

Separar la red arterial y secundaria de los sectores hidráulicos, evita instalar caudalímetros en las tuberías de gran tamaño e impide la proliferación de sectores en cascada, por lo tanto, la red se vuelve más robusta ante posibles roturas dentro de los sectores. A esto, se añade la flexibilidad para operar la red ante posibles aumentos de la demanda, permitiendo modificar el esquema de sectorización actual.

El método de ayuda a la sectorización propuesto comienza identificando la red de tuberías principales y secundarias, proceso que se ha explicado en el apartado 3.3. El paso siguiente es definir los sectores a partir de los nodos que unen el resto de la red con las tuberías principales y secundarias siguiendo la dirección del flujo que circula por las tuberías. A continuación, se describen las dos últimas etapas utilizadas para completar la identificación de los sectores:

1. Identificar particiones

Este proceso consiste primero en identificar todas las tuberías de la red de distribución que conectan con los nodos de caudal de las tuberías principales y secundarias, y almacenarlas en una lista. Con cada una de estas tuberías, se recorre la red de distribución mediante el algoritmo de búsqueda en profundidad y el proceso termina cuando la lista se vacía. Si se trata de un grafo dirigido, las tuberías de salida serán aquellas que recojan el agua que sale de los nodos de las tuberías principales y secundarias. Cabe recordar que, si la red principal y secundaria se extiende mucho el número de sectores puede aumentar. Esto dependerá de la configuración topológica de la red y de su grado de conectividad.

2. Posicionar caudalímetros y válvulas de corte para cada sector

Identificadas todas las tuberías que conectan con la red de tuberías principales y secundarias de cada sector, éstas se ordenan de forma decreciente por su caudal para el período de máxima demanda. Inicialmente, se cierran todas las tuberías y luego se van abriendo una a una. Cada apertura de tuberías genera un escenario para el que se obtiene la presión máxima y mínima de todo el periodo de simulación por cada sector con ayuda del simulador de EPANET. Todos los escenarios generados se guardan en un archivo de texto para comprobar posteriormente cuál de ellos cumplen con las condiciones de presión de la red. Asimismo, por cada escenario se generan dos archivos de texto, uno para los caudalímetros y el otro para las válvulas de corte que serán utilizados por la herramienta **iDistricts** (Vegas Niño *et al.*, 2021) para visualizar los sectores desde cualquier software SIG.

4.3. Método 2. Sectorización por fuentes de suministro de agua

La regulación del suministro de agua en varios países en vías de desarrollo se lleva a cabo mediante grandes depósitos elevados cuya función es abastecer a un determinado sector. Sin embargo, debido al crecimiento desordenado de la ciudad y al aumento de la población, existen zonas dentro de los sectores que ya no reciben agua en condiciones mínimas de servicio o en el peor de los casos ya no les llega el agua. Esto se debe, en buena parte, a las nuevas ampliaciones que se conectan de manera directa a la red principal sin aplicar ningún criterio técnico y mucho menos utilizar los modelos matemáticos para analizar los resultados hidráulicos. También, es posible que dos o más sectores abastecidos inicialmente por fuentes separadas lleguen a crear un solo sector alimentado por varias fuentes pudiendo redistribuirse los caudales entre las zonas.

Ante esta problemática, se propone desarrollar un método que permita sectorizar una red de abastecimiento en función de las contribuciones de las fuentes de agua. Para llevar a cabo este proceso, el método se divide en dos etapas: división de la red e instalación de válvulas de corte y/o caudalímetros. A continuación, se describen las etapas del método.

1. Almacenar las propiedades de los elementos de la red

Consiste en guardar todos los datos, en una estructura de datos personalizada, de los atributos de los elementos del modelo de red (longitud, diámetro, elevación demanda, etc.) y los resultados hidráulicos obtenidos después de ejecutar una simulación (caudal, velocidad, estado de la línea, demanda actual, presión, etc.).

2. Identificar las tuberías de entrada y de salida de caudal por cada nodo

Para cada nodo se asocia las tuberías de entrada y de salida de caudal según la dirección del flujo, así como también su grado de conectividad. Como la red se examina en el sentido del flujo, se debe de comprobar la velocidad y el caudal de cada tubería. Si la velocidad del flujo es superior a 10^{-6} y el caudal es negativo, entonces el nodo aguas arriba de la tubería es un nodo de entrada y el nodo aguas abajo es un nodo de salida. Si no se cumple la condición anterior, el caudal sale del nodo de aguas arriba y el nodo de aguas abajo recibe el flujo. En el caso de las bombas y válvulas, el caudal sale del nodo aguas arriba y el nodo aguas abajo recibe el caudal.

3. Determinar la contribución de cada fuente al consumo en los nodos

En esta etapa, se calcula la concentración de una hipotética sustancia química conservativa en los nodos de la red dada su concentración en las fuentes de suministro de agua bajo el supuesto de un flujo constante (estado estacionario). Si un nodo "i" tiene una sola tubería de entrada, su concentración será igual a la del nodo aguas arriba de esa tubería y todas las tuberías que salgan del nodo "i" llevarán la concentración de ese nodo. En el caso de un nodo con varias tuberías de entrada, su concentración se calcula mediante la ecuación (9).

$$C_{N_i} = \frac{\sum_{p \in T} Q_p C_p}{\sum_{p \in T} Q_p} \quad (9)$$

donde C_{N_i} representa la concentración en el nodo i; T es el conjunto de tuberías de entrada; Q_p es el caudal de la tubería de entrada p y C_p es la concentración en la tubería de entrada p.

El algoritmo comienza en las fuentes de suministro de agua, para ello, se debe de seleccionar la primera fuente y almacenarla en una lista de nodos pivote (una pila). De la lista de nodos pivote se extrae el primer elemento y se comprueba si tiene tuberías de entrada para calcular su concentración con la ecuación (9). A continuación, se comprueba si el nodo pivote tiene tuberías de salida para añadir el siguiente nodo pivote a la lista, pero con la condición de que haya sido visitado el mismo número de veces como el número de tuberías de entrada de cada fuente. Esto evitará bucles infinitos en rutas de flujo cerradas. El proceso finaliza cuando se vacía la lista de nodos pivote.

4. Asignar a cada nodo la fuente de suministro con mayor contribución

Cada nodo tendrá asociado unos valores en porcentajes de contribución según el alcance de cada fuente. Todos estos valores se ordenan de mayor a menor y se asigna a cada nodo la fuente de mayor aportación. Asimismo, a cada línea se le asigna una fuente bajo el siguiente criterio: si los nodos extremos de cada línea pertenecen a la misma fuente, la línea asume la fuente asociada a cualquiera de los nodos extremos; en caso de ser diferentes, la asignación de la fuente estará condicionada por las alturas piezométricas de los nodos extremos.

5. Post procesamiento de la asignación de fuentes

Después de determinar la fuente de agua que más contribuye al consumo de cada nodo, es posible que algunos nodos no se les haya asignado ninguna fuente (nodos aislados). Esto puede ocurrir en el caso de los nodos terminales que no tengan asignado una demanda de caudal, y cuya única tubería de acceso puede estar abierta o cerrada, o en una rama de tuberías consecutivas cuyos nodos de unión no tienen asignado una demanda. Para asignar una fuente de agua a estos nodos, y a sus respectivas tuberías de acceso, se implementa una rutina especial en la que todas las tuberías que se conectan a estos nodos aislados se almacenan en un vector. Luego, en otro vector, se almacenan los nodos aislados identificados para cada tubería y se extrae el primer nodo pivote. A partir de este nodo y recorriendo la red con el algoritmo en amplitud, se llega hasta un nodo con una fuente de agua asignada. Al conjunto de nodos y tuberías recorridos se les asigna la fuente de agua identificada.

6. *Identificar las tuberías candidatas a ser cerradas o a instalar medidores de caudal*

En esta etapa, se selecciona un conjunto de tuberías candidatas en las que se pueda instalar una válvula de corte como primera opción, o un caudalímetro si el cierre de la tubería genera presiones negativas en determinados puntos del modelo de red. Las tuberías candidatas se seleccionan con la condición de que sus dos nodos extremos pertenezcan a diferentes fuentes de suministro. Las tuberías candidatas identificadas se clasifican en orden decreciente en función del caudal que transportan para un determinado instante de tiempo. El primer escenario resulta de cerrar todas las tuberías candidatas del modelo original. En el siguiente escenario, se abre la primera tubería manteniendo el resto de ellas cerradas; de este modo, las tuberías se abren secuencialmente hasta agotar todas las tuberías candidatas. Por lo tanto, el número de escenarios posibles está en función del número de tuberías candidatas más una (para el caso en que todas las tuberías candidatas están cerradas). Para cada escenario, se realiza una simulación hidráulica del modelo de red y se extraen las presiones máximas y mínimas, así como el número de caudalímetros y/o válvulas de corte para comparar después con el resto de los escenarios.

7. Guardar los resultados

Las fuentes de suministro que más contribuyen al consumo en los nodos de demanda se almacenan en un conjunto de archivos shape de tipo punto y de tipo línea para su posterior visualización desde cualquier software SIG. Los identificadores de las tuberías donde se instalará un caudalímetro y/o válvula de corte se guardan en archivos de texto por separado para cada escenario. Con estos archivos de texto y el modelo de red original, se identifican los sectores y/o distritos hidráulicos mediante la herramienta iDistricts que se describe a continuación.

4.4. iDistricts. Una herramienta para identificar sectores y/o distritos hidráulicos

iDistricts, o iDistritos en español, es una herramienta que se basa en el algoritmo de búsqueda en amplitud de la teoría de grafos para proponer o identificar sectores y/o distritos hidráulicos, y con el simulador hidráulico de EPANET determinar los valores resultantes de las variables de salida (presiones, demandas, caudales y velocidades) de cada sector y/o distrito. Además, en cada uno de estos sectores y/o distritos se informa sobre el número de caudalímetros y/o válvulas de corte necesarios para aislar cada sector, el número de fuentes de suministro de agua, el número de bombas, válvulas y nodos con demanda, la longitud total de tuberías, las elevaciones máximas, medias y mínimas, y el desnivel que existe dentro de cada sector.

El proceso para identificar los sectores y/o distritos hidráulicos a partir de un conjunto de tuberías donde se propone instalar válvulas de corte y/o caudalímetros, se resume en cuatro pasos:

Paso 1. almacenar las propiedades de los elementos del modelo en una estructura de datos temporal y comprobar que todos los identificadores de tuberías donde se instale una válvula de corte o un caudalímetro sean válidos.

Paso2. “cerrar” las tuberías de la lista de caudalímetros y/o de la lista de válvulas de corte y determinar las líneas adyacentes “abiertas” de cada nodo.

Paso 3. Recorrer la red mediante el algoritmo de búsqueda en amplitud y realizar un postproceso para reajustar el número de sectores.

Paso 4. Ejecutar una simulación hidráulica de la red sectorizada.

iDistricts (Vegas *et al.*, 2021), se desarrolló desde el entorno de programación de Microsoft Visual Basic 2019 (.NET) y se ejecuta de manera independiente a la aplicación EPANET. Su interfaz gráfica (Figura 31), permite organizar todos los escenarios propuestos en la sectorización de un modelo de red. Cada escenario propuesto se puede visualizar desde cualquier software SIG. Es una herramienta de libre acceso.

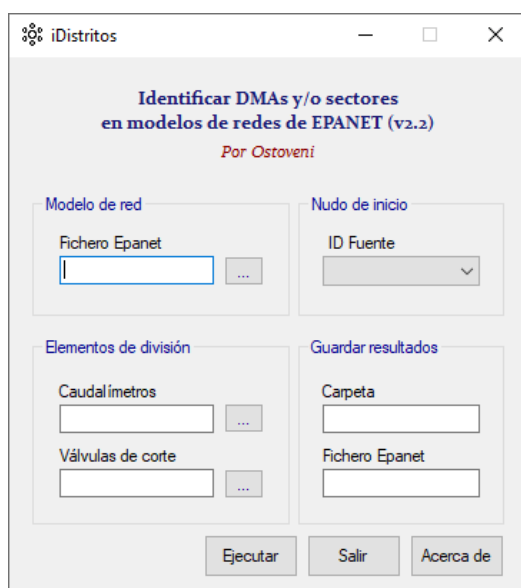


Figura 31. Interfaz gráfica de la aplicación iDistricts (iDistritos en español)

4.5. Resultados y discusiones

Para validar ambos métodos propuestos, se utilizarán como casos de estudio los modelos hidráulicos de la red de Villena y de Matamoros, descritos en los apartados 2.3.3.2 y 2.3.3.3. Para automatizar todas las etapas de los dos métodos se desarrollaron dos aplicaciones desde el entorno de programación de Microsoft Studio 2019 (Visual .Net) desde donde se llaman a otras dos librerías (epanet.dll y shapelib.dll) para la lectura de los datos de entrada y la escritura de los resultados.

Red de Villena

La red de Villena suministra el agua a la red desde sus dos fuentes principales, los pozos Solana y Fisura. El agua de estas dos fuentes llega a mezclarse en determinados puntos de la red en función de la ubicación, elevación y demanda de caudal en los nodos. La red original presenta un índice de resiliencia (Ir) de 0.452 (para una presión de diseño de 20 mca), una presión máxima de 72.32 mca, una presión media de 52.42 mca y una presión mínima de 19.57 mca. Todos los datos de entrada extraídos después de ejecutar una simulación (caudales, velocidades, presiones y alturas piezométricas) corresponden al periodo de máxima demanda (14:00 horas).

Con el primer método propuesto, se trazaron todos los trayectos a partir de un conjunto de nodos iniciales y finales (Figura 32a) sugeridos. A continuación, se definió la red de tuberías principales y secundarias mediante un postproceso, y se identificaron 19 sectores (Figura 32b). Un total de 16 sectores tienen una sola conexión con la red principal y secundaria, por lo tanto, son sectores ramificados. La mayoría de ellos, agrupan solo unos pocos nodos. Los otros 3 sectores tienen más de 4 conexiones con la red principal y secundaria. El sector más grande tiene 24 conexiones con la red principal y secundaria. La extensión de la red principal y secundaria está condicionada por los nodos finales elegidos, por lo tanto, el número de sectores puede aumentar o disminuir según la extensión de la red de tuberías principales y secundarias.

Sectorizar la red de Villena apartando la red de tuberías principales y secundarias, no ha dado los resultados esperados debido a que dichas tuberías se encuentran formando numerosas mallas y ello dificulta la identificación de posibles sectores alimentados desde cada uno de estos dos grupos de tuberías. Sin embargo, sí proporcionó información relevante sobre las tuberías importantes de la red por donde se conduce los mayores caudales y se distribuyen a las distintas zonas, que antes se desconocían. Además, se podrá realizar labores de prevención sobre la red principal de tuberías que permita garantizar el suministro de agua.

El segundo método divide la red en dos subsistemas hidráulicos (Figura 32c), cada uno de los cuales se abastece de sus propias fuentes (los pozos Solana y Fisura). Los resultados se muestran en la Tabla 3 donde se observa que, cerrando 7 tuberías (escenario 0) la presión máxima (189,33 mca) resulta muy superior a la presión máxima del modelo original (72.32 mca), pero, si se instala un caudalímetro en una de las tuberías cerradas, la que aporta más caudal (escenario 1), la presión máxima se reduce ya a 94.56 mca y la presión mínima aumenta a 17.83 mca. Si se quiere aproximar las presiones a las de la red original, habrá que mantener alguna conexión entre ambos sectores, instalando caudalímetros en dichas conexiones. En la Tabla 3 se observa que ello ocurre a partir de la instalación de 5 caudalímetros en otras tantas vías de comunicación entre los dos

sectores. A partir de los resultados que proporciona la herramienta (Tabla 3), el gestor puede tomar una decisión sobre qué escenario implementar en su red. La Tabla 4 muestra los resultados de la presión máxima, media y mínima, el número de nodos de demanda, la longitud total y el desnivel de cada sector obtenidos con la herramienta iDistricts. Dichos resultados corresponden al escenario 1, donde se indica la ubicación del caudalímetro y las 6 válvulas de corte.

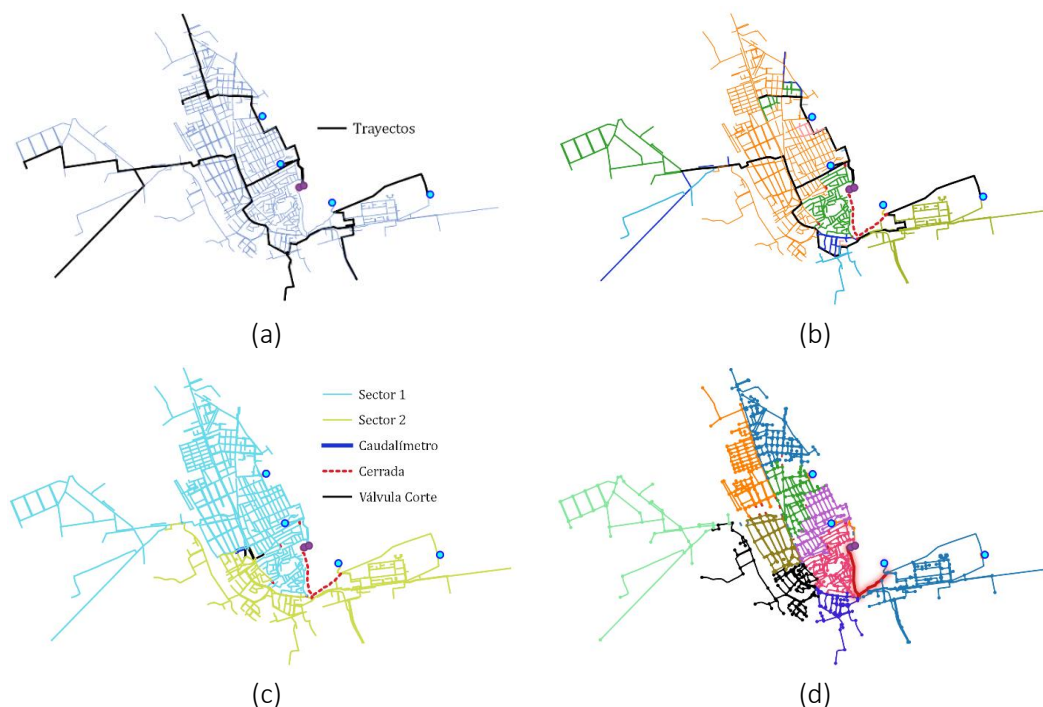


Figura 32. Sectorización de la red de Villena. (a) Trayectos de caudales, (b) Sectores conectados a la red principal, (c) Sectores por contribución de fuentes, (d) Sectores basados en el árbol de mínima resistencia hidráulica

Tabla 3. Red de Villena. Valores de presión máxima y mínima para cada escenario aplicando el segundo método

Número de escenario	Número de medidores	Número de válvulas de corte	Presión máxima	Presión mínima	ID Nodo (P _{Máx})	ID Nodo (P _{Mín})
0	0	7	189.33	15.17	J1651	J373
1	1	6	94.56	17.83	J1651	J373
2	2	5	82.54	17.89	J1651	J373
3	3	4	79.35	17.91	J758	J373
4	4	3	78.01	17.92	J758	J373
5	5	2	72.33	17.94	J1651	J373
6	6	1	72.32	17.94	J1651	J373
7	7	0	72.32	17.94	J1651	J373

Tabla 4. Presiones, número de nodos, longitud total y desnivel por cada sector

Sectores	Presión máxima (mca)	Presión media (mca)	Presión mínima (mca)	Número de nodos	Longitud total (Km)	Desnivel (m)
1	70,57	52,27	17,83	610	55,92	49,15
2	94,56	70,51	41,12	236	25,26	28,03

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos de los dos métodos aplicados a la red de Villena se decide incorporar las tuberías principales y secundarias a los sectores hidráulicos, porque aislando dichas tuberías de los sectores no se obtiene los resultados esperados como se ha explicado anteriormente. El número final de sectores adoptado es de 10 (Figura 32d) y la división de la red se consiguió a través del árbol de mínima resistencia y de algunos criterios hidráulicos. Los detalles de esta nueva metodología no forman parte de los objetivos de este trabajo, pero es interesante para continuar investigando en futuros trabajos.

Como dato de comparación, en el año 2004, desde el Grupo de Investigación REDHISP-UPV, se propusieron dos escenarios de sectorización para la misma red de distribución de agua. El objetivo era reducir las altas presiones en determinados puntos de la red y para ello utilizaron la extensión GISRed (Martínez & Bartolín, 2005). Para el primer escenario se identificaron 5 sectores y en el segundo escenario 8. El método implementado en GISRed se basa en el árbol de mínima resistencia hidráulica, el número máximo de conexiones por sector con las restricciones de presión máxima y con una sola entrada por sector (Bartolin, 2013).

Red de Matamoros

El suministro de agua en el modelo Matamoros se realiza a partir de tres depósitos y seis pozos con sus respectivas bombas. Se trata de una red interconectada, donde el agua de las fuentes se mezcla en ciertos puntos de la red. El objetivo que se busca es dividir la red mediante los dos métodos propuestos. La red original presenta un índice de resiliencia (I_r) de 0,439 (para una presión de diseño de 12 mca), una presión máxima de 31,34 mca, una presión media de 17,46 mca y una presión mínima de 2,93 mca.

Después de identificar la red arterial a partir de las trayectorias generadas del conjunto de nodos iniciales y finales (Figura 33a) se determinaron 24 sectores (Figura 33b), donde 6 sectores son de gran tamaño con un número de conexiones entre 10 y 20 a la red principal, y 18 sectores son de menor tamaño con un número de conexiones entre 1 y 6 a la misma red principal. Además, se comprobó que en tres sectores el flujo de agua entra satisfaciendo su demanda y vuelve a salir a la red principal. Esto podría ser una de las causas de la baja presión en algunas zonas de la red, debido a que el agua pierde más presión en la red de distribución del sector donde las tuberías son de menor diámetro. En total, 123 tuberías se conectan a la red principal y posicionar caudalímetros y/o válvulas de corte en todas estas tuberías no es económicamente viable. En caso de que la red principal requiera ser renovada por antigüedad, este análisis ofrece la oportunidad de revisar todas las tuberías que se conectan a la red principal y plantear unas nuevas conexiones que permitan formar sectores con algunas pocas entradas por cada sector.

Con el segundo método, la red queda dividida en 9 subsistemas hidráulicos. El mayor en extensión de los sectores, tuberías de color verde según la Figura 33c, distribuye el caudal a otros sectores contiguos porque es la fuente de agua que más caudal aporta al sistema. A la salida de dicho sector, hay que instalar 9 caudalímetros para contribuir con la demanda de cinco sectores contiguos. Además, otros tres sectores necesitan aportaciones de otras fuentes para igualar la presión en el modelo de red original. En total, se necesitan 12 caudalímetros y 26 válvulas de corte para dividir la red en 9 subsistemas hidráulicos.

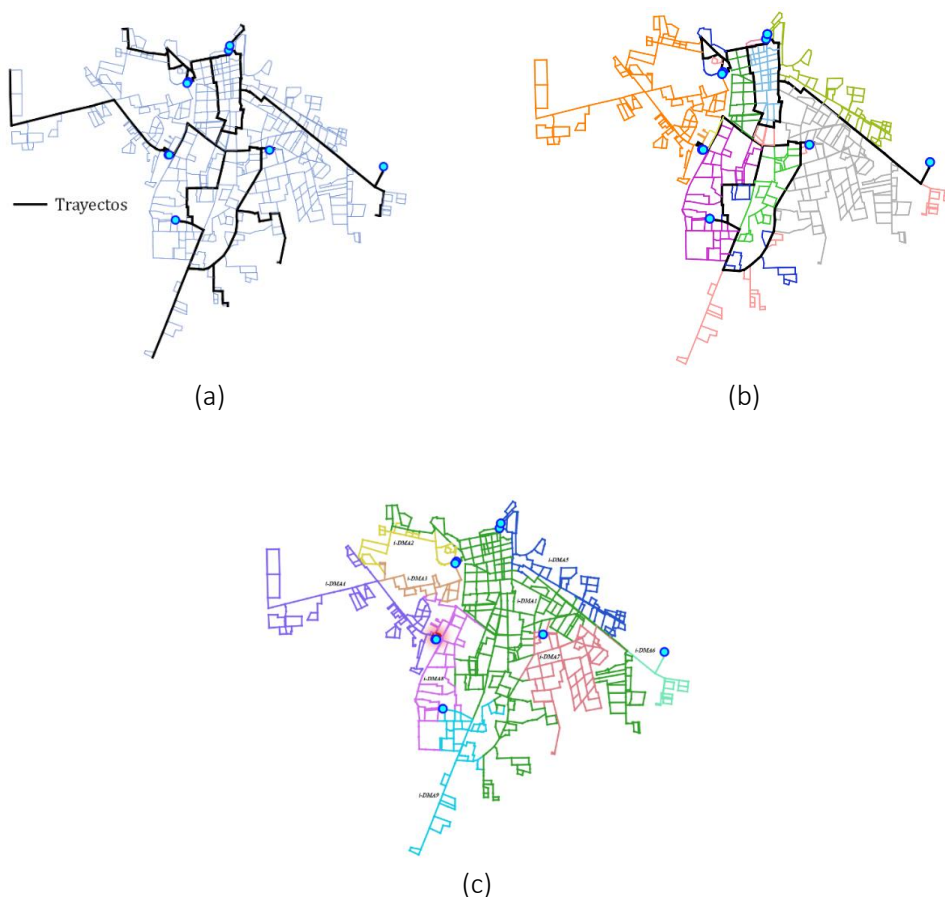


Figura 33. Sectorización de la red de Matamoros (a) Trayectos de caudales, (b) Sectores conectados a la red principal, (c) Sectores por contribuciones de origen

Di Nardo *et al.*, (2015), obtuvieron el mismo número de sectores con un enfoque totalmente diferente. Independientemente, Di Nardo *et al.*, (2016) examinaron la misma red para diferentes números de sectores (de 2 a 16 sectores) con una técnica de optimización simultánea de costes y energía obteniendo el mismo número de nueve sectores para el caso óptimo.

Algunas de las limitaciones de ambos métodos se describen a continuación:

Sectorización aislando previamente la red principal y secundaria:

La declaración de un número excesivo de puntos estratégicos y, por consiguiente, de trayectos para formar parte de la red de tuberías principales y secundarias, puede dar lugar a bucles y trayectos redundantes. Una red arterial demasiado extensa puede aumentar innecesariamente el número de conexiones y sectores.

Por el contrario, la declaración de un número demasiado reducido de puntos estratégicos, y por tanto de trayectos en la red de tuberías principales y secundarias, puede llevar a cerrar conducciones importantes, que pasarían a formar parte de los sectores, reduciendo así la capacidad de transporte de la red, o, alternativamente, a posicionar costosos caudalímetros sobre las tuberías de gran diámetro.

Por lo tanto, no existe a priori un número óptimo de puntos estratégicos para definir la red de tuberías principales y secundarias y su trazado final se deja a decisión del usuario. Así, los procedimientos descritos en el primer método constituyen únicamente una herramienta de ayuda a la toma de decisiones. Además, en cualquier caso, es necesario asegurarse de que los nodos que unen a las tuberías principales y secundarias no tengan ningún consumo asignado, ya que el objetivo de la sectorización es agrupar todos los nodos de consumo dentro de los sectores. En este caso, dichas demandas deben ser transferidas a otros nodos cercanos (nodos que conecten a las tuberías de distribución).

Sectorización según la contribución de las fuentes a la demanda de agua en los nodos

Hay que tener cuidado al identificar las fuentes de suministro reales. El suministro directo de agua a la red desde una planta de tratamiento de agua, un pozo de sondeo o una laguna constituyen claramente puntos de suministro bien diferenciados, sin embargo, los depósitos no son directamente fuentes de suministro. Un depósito de regulación puede alimentarse de las líneas de transmisión y suministrar agua a una zona cercana, siempre que las entradas y las salidas de caudal estén bien diferenciadas; y asegurando que la entrada de caudal no se vea afectada por el cierre de las tuberías, es posible tratar esos depósitos como fuentes de suministro independientes a efectos de la sectorización. Sin embargo, un depósito de equilibrio de caudal que se llena de la red en las horas de bajo consumo (normalmente por la noche) y que luego devuelve el volumen de agua acumulado en las horas de mayor consumo (normalmente por la mañana) no debe considerarse en absoluto como un punto de suministro, porque no puede aislarse de la red de distribución cercana de la que depende su llenado.

Como limitación adicional, este método permite identificar pequeños sectores que logren fusionarse con otros sectores contiguos para reducir el número de válvulas de corte y/o caudalímetros. La tarea de fusionar sectores contiguos aún no está implementada, pero se piensa hacerlo en una futura versión de la herramienta.

CAPITULO V

5. MÉTODO PARA SIMPLIFICAR MODELOS DE REDES

Simplificar el modelo de una red de suministro de agua en fase de elaboración o en servicio no es una tarea fácil de realizar, sobre todo cuando se trabaja con modelos complejos cargados de mucha información como nodos con múltiples demandas, nodos con emisores para modelar las fugas, nodos con curvas de modulación distintas y elementos asociados a leyes de control. Además, puede existir el riesgo de que el modelo reducido no sea lo suficientemente equivalente al modelo original o que pueda quedar desconectado al eliminar un elemento clave de la red, lo cual, convertiría al modelo reducido en una herramienta no válida para los fines que se persigue. Ante estas dificultades, se requiere de métodos robustos que garanticen en todo momento la conectividad y la equivalencia hidráulica entre el modelo simplificado y el original.

Distintos métodos se han propuesto para abordar esta tarea de manera fiable y con tiempos de ejecución razonables según el tamaño del modelo de red y su configuración. Estos métodos incluyen las técnicas de simplificación tradicionales que se han venido utilizando para eliminar ramales de tuberías, fusionar tuberías en serie y asociar tuberías en paralelo. En cada una de estas técnicas, se suelen aplicar restricciones como por ejemplo un umbral de diámetro para eliminar o reemplazar tuberías y/o un umbral de demanda para eliminar un nodo.

En el proceso de eliminación de ramales, las demandas asignadas a los nodos que forman parte de un ramal de tuberías se acumulan en el nodo de grado de conectividad mayor a dos. Si se fusionan dos tuberías en serie, primero se debe repartir la demanda del nodo intermedio (si existe) hacia los nodos extremos y luego calcular las propiedades de la tubería equivalente. Para repartir la demanda del nodo intermedio se aplican distintas estrategias de redistribución de cargas por ponderación o de manera uniforme. Y en la fase de asociar tuberías en paralelo se estudia la sensibilidad del bucle o se aplican criterios para seleccionar la tubería predominante.

Si un modelo simplificado está mal elaborado puede generar cambios en el arranque y/o parada de las bombas y/o variaciones en los niveles de agua de los depósitos, por lo tanto, la clave para obtener un modelo reducido cuyo comportamiento hidráulico sea lo más próximo al modelo original, es calcular correctamente el reparto de las demandas de caudal asignados a los nodos intermedios y determinar los nuevos atributos de la tubería equivalente manteniendo siempre la conectividad de los elementos que existan en el modelo reducido.

El método que se propone para simplificar un modelo de red de suministro de agua se divide en dos etapas. La primera etapa está dedicada a recoger toda la información requerida (datos iniciales y resultados hidráulicos) para que, en la segunda etapa, se ejecute cada una de las fases del proceso de simplificación de manera secuencial o combinada. Las cinco fases comprenden la eliminación de ramales de tuberías o su fusión, la fusión de tuberías en serie, la asociación de tuberías en paralelo, la eliminación de nodos bi-alimentados y abrir mallas.

Por ahora, el método sólo se aplica a modelos de análisis con demandas prefijadas, porque el reparto de las demandas de caudal asignadas a los nodos intermedios depende de la demanda actual de cada nodo para el instante de tiempo seleccionado.

5.1. Recopilar los datos del modelo de red original

Para simplificar un modelo de red hidráulica se requiere conocer los valores de los atributos iniciales de los elementos que conforman la red, su conectividad entre los nodos (topología) y los resultados hidráulicos de las tuberías y nodos de demanda después de ejecutar una simulación. Toda esta información previa se puede recuperar con la librería de EPANET v2.2. A continuación, se describen los procedimientos a seguir para recopilar datos del modelo original.

5.1.1. Almacenar los datos iniciales del modelo original

El primer paso es almacenar todos los atributos de las tuberías y de los nodos de demanda en una estructura de datos temporal. Asimismo, se debe identificar la fórmula de pérdidas de carga y la unidad de caudal para aplicar, si es necesario, unos factores de conversión de unidades con la finalidad de trabajar con un único sistema de unidades para el cálculo de los atributos de las nuevas tuberías equivalentes.

Para los elementos de tipo nodo de demanda se almacena su identificador, la demanda base, su curva de modulación, el coeficiente de emisor, las demandas múltiples y los patrones de demanda o curvas de modulación. Y para los elementos de tipo tubería se almacena su identificador, la longitud, el diámetro, la rugosidad, los identificadores de los nodos extremos de cada tubería y sus vértices.

Los modelos de redes de suministro de agua están conformados en su mayoría por tuberías y un grupo menor de elementos especiales encargados de regular la operación del sistema, como los depósitos de almacenamiento, las bombas y las válvulas. Asimismo, es posible encontrar en un modelo emisores para modelar las fugas de agua localizadas en las tuberías. A priori, todos estos elementos especiales se consideran importantes en el modelo simplificado; sin embargo, es posible prescindir de algunos de ellos si se cumplen ciertas condiciones. A continuación, se listan los elementos a preservar en el modelo simplificado:

En la categoría de nodos, se preservan:

- Los embalses y los depósitos
- Los nodos con demanda negativa (nodos de inyección de caudal)
- Los nodos de demanda con coeficiente de emisor (para simular las fugas)
- Los nodos de demanda declarados como fuente contaminante o de calidad (opcional)
- Los nodos de demanda declarados en las leyes de control simples y complejas
- Los nodos adyacentes a cualquier fuente de suministro

En la categoría de líneas, se preservan:

- Las válvulas y las bombas
- Las tuberías con válvulas de retención
- Las tuberías con coeficientes de pérdidas menores
- Las tuberías que conectan cualquier fuente de suministro de agua
- Las tuberías declaradas en las leyes de control simples o complejas.

Tal como se indicó anteriormente, existe la posibilidad de que ciertos elementos del modelo de la red se puedan eliminar en el proceso de simplificación. Por ejemplo, si un nodo de demanda lleva asignado un valor de contaminación o de calidad inicial se puede ignorar dicha regla sino se va a analizar la calidad del agua con el modelo simplificado; y en el caso de nodos con emisores, es posible transformar dichos elementos en nodos de demandas simples convirtiendo el caudal fugado en una curva de modulación asignando el valor de uno como demanda y modificando su coeficiente de emisor a cero. Esta transformación se puede realizar de manera automática con la herramienta **iEmittersToNodes** (Vegas & Grau, 2022), que es de libre acceso.

En cuanto a los nodos adyacentes a los depósitos y a las tuberías que los une, estos elementos se mantienen siempre en el modelo reducido. Esto se debe a que el programa EPANET activa una regla automática donde la tubería se cierra cuando se alcanza el nivel máximo o mínimo de agua del depósito.

5.1.2. Ejecutar una simulación hidráulica

Este paso es fundamental para llegar a simplificar modelos de RDAP. A partir de los resultados hidráulicos de una simulación se determinan las tuberías de entrada y de salida de caudal para cada nodo, se identifican las líneas que están cerradas en todo el periodo de simulación o aquellas líneas por las que no circula caudal debido al cierre de las válvulas (una zona aislada sin demanda) o debido a que en ciertos nodos terminales de un ramal no tiene asignado un valor de demanda. Todas estas líneas pueden ser eliminadas por no estar operativas.

En el caso de los nodos, se extraen los valores de presión, demanda actual y altura piezométrica; y para las tuberías se extraen el caudal, velocidad, pérdida de carga y estado (abierta o cerrada) para el instante de tiempo a confeccionar el modelo simplificado.

5.1.3. Eliminar elementos no operativos

Dado que el método de simplificación se ejecuta sobre la base de un grafo dirigido, que está en función de la dirección del flujo, es necesario identificar las tuberías que transportan caudal para definir las tuberías de entrada y de salida de caudal para cada nodo. Después de elaborar el modelo de red hidráulica y ejecutar una simulación, es posible que en determinadas líneas (tubería, válvula o bomba), no circule caudal por las siguientes razones:

Caso A. *Ramales de tuberías sin caudal.* Esta situación se da cuando el nodo final del ramal no tiene asignado una demanda, por lo tanto, el módulo de cálculo de EPANET determina que no existe caudal en todo el ramal. Bajo esta situación, todas las tuberías que forman parte del ramal y los nodos que las unen no son considerados en el proceso de simplificación.

Caso B. *Zonas aisladas sin demandas.* Este caso es común cuando se integra en el modelo el trazado de tuberías de futuras urbanizaciones. Estas ampliaciones pueden estar aisladas por válvulas de corte o conectadas directamente al modelo de red general. Los nodos de estas zonas no llevan asignada una demanda, con lo cual, al ejecutar una simulación hidráulica los caudales que circulan por dichas tuberías serán siempre cero. En este caso, las tuberías y sus nodos aislados no formarán parte del modelo simplificado.

Caso C. Línea de aducción cerrada. Este caso es común en modelos donde se proyectan nuevas fuentes de agua para abastecer determinadas zonas, pero que, sin embargo, la línea de aducción se encuentra cerrada por una tubería, válvula o bomba. Ante esta situación, la línea de aducción, los nodos intermedios y la fuente de alimentación no forman parte del proceso de simplificación.

En la Figura 34 se visualizan todos los casos antes expuestos donde d_i es la demanda del nodo “i”. Como recomendación, antes de iniciar un proceso de simplificación con cualquier método se debe verificar que la asignación de las demandas a los nodos se haya realizado de forma correcta, ya que puede condicionar los resultados hidráulicos del modelo simplificado.

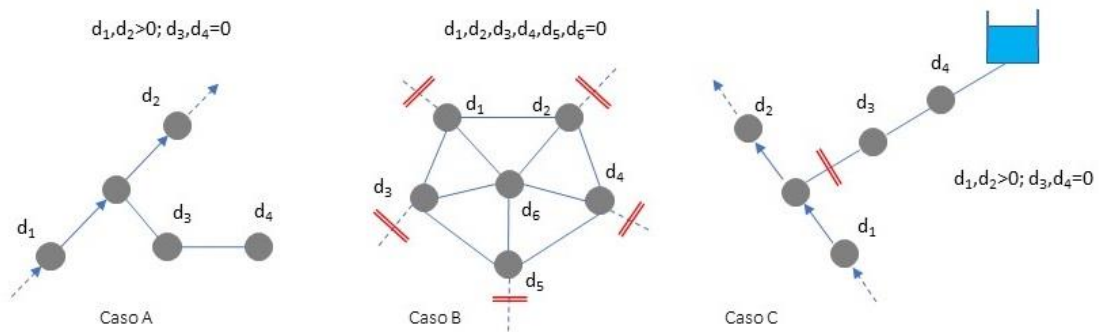


Figura 34. Situaciones en las que se elimina un elemento del modelo de red

En resumen, las líneas que no participan en el proceso de simplificación son aquellas que estando abiertas o cerradas no circulan caudal, por lo tanto, se marcan como elementos a no preservar. Sin embargo, es posible mantener en el modelo simplificado los elementos cerrados si se indica al algoritmo que los preserve. Esto permite simplificar modelos sectorizados cuyos elementos delimitadores (válvulas de corte) están siempre cerrados y se quiere mantener la forma de los sectores.

En el caso de las tuberías con válvulas de retención, preservadas inicialmente, se pueden cambiar a tuberías simples y entrar en el proceso de simplificación, siempre y cuando circule caudal en todo el periodo de simulación y no cumpla su función de retener el paso del agua en sentido contrario.

5.1.4. Determinar las líneas de entrada y de salida para cada nodo

Para determinar las líneas de entrada y de salida de caudal de un nodo, para un instante de tiempo, se requiere conocer los valores de las alturas piezométricas de los nodos extremos de cada línea. Estas alturas piezométricas han sido calculadas en el apartado 5.1.2. Asimismo, cabe recordar que las líneas que participan en este proceso son aquellas que están operativas.

En el caso de las tuberías, el nodo extremo con mayor altura piezométrica asociará a la tubería como línea de salida mientras que el otro nodo extremo, de menor altura piezométrica, asociará a la misma tubería como línea de entrada. Para el caso de las bombas y las válvulas, el nodo aguas arriba, según la dirección del trazado, asociará a dicho elemento como línea de salida, mientras que el nodo aguas abajo asociará al mismo elemento como línea de entrada.

Asimismo, para cada nodo se determina el número de líneas de entrada, el número de líneas de salida, una lista con los identificadores de las líneas de entrada y otra lista con los identificadores de las líneas de salida. Esta información puede variar de un instante a otro, porque está en función de la dirección del caudal.

5.1.5. Determinar el grado de conectividad de cada nodo

Para iniciar un proceso de simplificación de forma ordenada, se recomienda empezar por los ramales y luego continuar con las tuberías en serie; y la forma de hacerlo es consultando el grado de conectividad de cada nodo. Para ello, se recorre todas las líneas del modelo y por cada línea válida (con caudal circulante) se identifican los nodos extremos. Por cada nodo identificado, se incrementa en una unidad su grado de conectividad. En caso de que todas las líneas que conectan a un nudo no circulan caudal, su grado de conectividad será cero. Estos nodos, “huérfanos” o “desconectados”, juntamente con sus líneas adyacentes se eliminan del modelo simplificado.

5.1.6. Declarar los elementos a preservar del modelo original

Antes de ejecutar el algoritmo de simplificación, es posible indicar qué elementos del modelo original queremos preservar en el modelo reducido. Esto es posible, si escribimos en un archivo de texto bajo las etiquetas de [NODOS] y [LINEAS] los identificadores de algunos nodos y/o líneas que deseamos mantener en el modelo reducido por alguna de las siguientes razones:

- Tuberías importantes que cambian de dirección de flujo. Estas tuberías pueden condicionar el comportamiento hidráulico del modelo reducido.
- Puntos de control de caudal y de presión. Se debe localizar la tubería y el nodo donde se encuentra el dispositivo de medición.
- En caso de simplificar un modelo de red por el tamaño de las tuberías o por el caudal de circulación, se debe de declarar los nodos de demanda que hacen límite entre los grupos de valores para cada variable. Los nodos frontera se pueden identificar con ayuda de cualquier herramienta SIG.
- Calibrar un modelo de red por sectores, donde se preservan todos los elementos dentro del sector y se simplifica el resto. De esta forma, se pueden ajustar los atributos de las tuberías y de los nodos de demanda de forma localizada.

Todos los elementos declarados en el archivo de texto se preservan, salvo que sean elementos no operativos del sistema, tal como se comentó en el apartado 5.1.3.

5.2. Fases del proceso de simplificación

El proceso de simplificar un modelo de RDAP pasa por aplicar un conjunto ordenado de fases que permitan reducir el número de elementos manteniendo un comportamiento hidráulico lo más próximo al modelo original.

Esta tarea se puede llevar a cabo aplicando el concepto de equivalencia hidráulica, es decir, que la nueva tubería equivalente que reemplaza a dos o más tuberías en serie o en paralelo afecte lo menos posible el comportamiento hidráulico del sistema.

Este concepto es el que se utiliza para reducir un modelo de red hidráulica donde la nueva tubería equivalente debe reproducir la misma pérdida de carga que las tuberías a reemplazar, dejando como variable de ajuste final al diámetro teórico equivalente. Asimismo, el recorte o fusión de ramales de tuberías es un método que también se utiliza para simplificar un modelo de red.

A continuación, se describen las cinco fases que se pueden aplicar para reducir un modelo de red de forma ordenada o combinada.

5.2.1. Recorte o fusión de los tramos de un ramal de tuberías

El recorte de un ramal de tuberías consiste en eliminar todos sus tramos y acumular la demanda de sus nodos internos en el nodo de grado de conectividad mayor que dos. Si las demandas de los nodos están afectadas por la misma curva de modulación estos se acumulan, caso contrario, se añade al nodo aguas arriba como demanda múltiple con su respectiva curva de modulación. Este mismo criterio de reasignación de demandas se aplica a los nodos con demandas múltiples. Asimismo, es posible que todo el ramal no se elimine por completo si existe algún elemento que esté declarado como elemento a preservar.

Otra opción de reducir un ramal de tuberías es la de fusionar todos sus tramos y reemplazarlas por una tubería equivalente donde sus nodos internos, excepto los nodos extremos del ramal son eliminados y sus demandas reasignadas al primero y último nodo de la nueva tubería equivalente. La fusión de tramos de un ramal de tuberías se realiza de dos en dos.

En la Figura 35, se muestra el resultado gráfico de como quedaría simplificado un ramal según las dos alternativas. La red original (A), cuenta con 6 nodos. El nodo N_1 , N_2 , y N_4 no tienen asignado un valor de demanda, mientras que los nodos N_3 , N_5 , y N_6 sí ($N_3=0,05$, $N_5=0,06$ y $N_6=0,04$ lps) con sus respectivas curvas de modulación ($N_3=CM1$, $N_5=CM2$ y $N_6=CM1$). En caso de recortar todo el ramal, el nodo N_3 se convierte en un nodo de demandas múltiples: 0,09 (CM1) y 0,06 (CM2). En cambio, si se fusiona solo los nodos internos del ramal, los nodos N_3 y N_6 pasan a ser nodos de demandas múltiples: $N_3 \rightarrow 0,05$ (CM1); 0,04 (CM2) y $N_6 \rightarrow 0,04$ (CM1); 0,02 (CM2). La forma de repartir la demanda del nodo N_5 no sigue ningún criterio de fraccionamiento, sólo se ha sugerido dichos valores a modo de ejemplo. En la fase de fusionar tuberías en serie, se explica con más detalle el criterio de reparto a utilizar para estos casos.

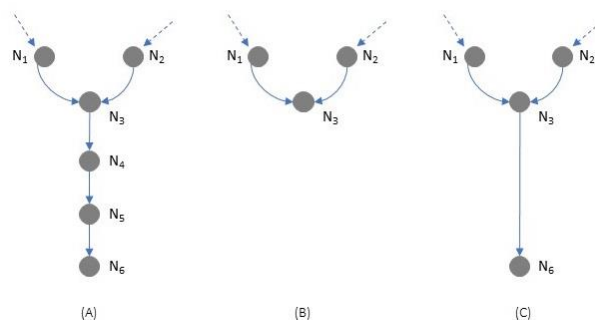


Figura 35. Fase de recorte o fusión de ramales. (A) Red original, (B) Ramal eliminado, (C) Ramal fusionado

Para ejecutar la opción de recortar un ramal de tuberías, se plantea el siguiente procedimiento:

- Identificar y almacenar en una lista todos los nodos de grado de conectividad uno.
- Extraer el último nodo almacenado de la lista (nodo pivote).
- Recuperar la línea de acceso del nodo pivote.
- Identificar el nodo adyacente del nodo pivote, es decir, el nodo aguas arriba.
- Comprobar que el nodo aguas arriba es un nodo de demanda para acumular la demanda del nodo aguas abajo (nodo pivote). Caso contrario, el nodo aguas abajo y la línea de acceso se preservan en el modelo reducido.
- Si se cumple el apartado “e”, el nodo aguas abajo y su línea de acceso se marcan como elementos no preservados y se resta una unidad al grado de conectividad de los nodos extremos de la línea de acceso.
- Añadir a la lista el nodo aguas arriba si su grado de conectividad es igual a uno y si es un elemento declarado como no preservado.
- Repetir el proceso desde el apartado “b” mientras exista nodos almacenados en la lista.

Para ejecutar la opción de fusionar un ramal de tuberías, se plantea el siguiente procedimiento:

- Primero, se busca identificar los ramales de un solo tramo para eliminarlos. Para esto, se identifica los nodos de grado de conectividad mayor a dos y a partir de estos (nodos aguas arriba), junto con sus tuberías adyacentes de salida, se seleccionan los nodos opuestos con grado de conectividad uno (nodos aguas abajo) y se almacenan en una lista si cumplen con la condición de ser un nodo de demanda y no estar declarado como elemento a preservar. Luego, se extrae el primer nodo de lista y se reasigna la demanda del nodo aguas abajo al nodo aguas arriba y las demandas múltiples si procede. Si las curvas de modulación de ambos nodos son iguales las demandas se suman, caso contrario, se crea una nueva demanda múltiple con su respectiva curva de modulación. Finalmente, se elimina el nodo aguas abajo juntamente con la tubería de acceso y se resta en una unidad el grado de conectividad de ambos nodos. El proceso se repite hasta vaciar la lista.
- Después de eliminar los ramales de un solo tramo, se identifica nuevamente los nodos de demanda con grado de conectividad uno y se marcan como elementos a preservar. Luego,

en la fase de fusionar tuberías en serie se eliminan los nodos intermedios, previo reparto de las demandas hacia los nodos extremos, de todo el ramal y se calcula los atributos de la nueva tubería equivalente (longitud, rugosidad y diámetro) manteniendo el trazado de las tuberías eliminadas.

5.2.2. Fusionar tuberías en serie

Después de eliminar o fusionar los ramales de tuberías, el paso siguiente es continuar reduciendo aún más el modelo de red fusionando las tuberías en serie. Esta fase del método también se puede ejecutar de manera independiente del resto de fases.

La fusión de tuberías en serie es la más utilizada para simplificar modelos de RDAP. Básicamente, consiste en sustituir dos tuberías continuas, con diferentes valores de atributos o no, por una tubería equivalente que mantenga la misma pérdida de carga (F. Martínez-Solano *et al.*, 2017). Esta definición solo se ajusta si la dirección de los caudales circulantes tiene el mismo sentido (Figura 36A). Sin embargo, también se puede dar el caso que el nodo intermedio se alimente de ambas tuberías (Figura 36B).

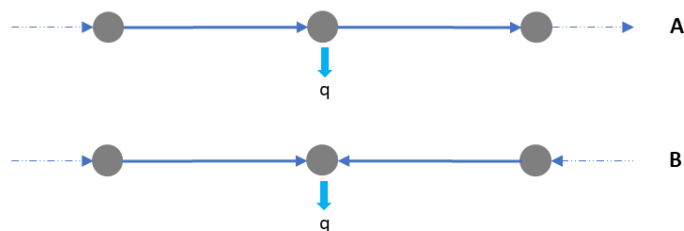


Figura 36. Tuberías en serie. A) Con caudal circulando en un solo sentido, B) Caudales en sentidos opuestos

En el caso de que el nodo intermedio sea alimentado por dos tuberías, al ser reemplazadas por una tubería equivalente se estaría produciendo una nueva dirección del caudal y por lo tanto una pérdida de la bidireccionalidad del caudal circulante (Aguilera, 2021; Bartolin, 2013). Por esta razón, la falta de conocimiento de la dirección de los caudales puede llegar a provocar variaciones importantes en los resultados hidráulicos del modelo reducido respecto al original.

En este apartado se estudia el primer caso y la alimentación bidireccional se estudia en la sección 5.2.4.

Como condiciones para llevar a cabo el proceso de fusionar dos tuberías en serie se debe cumplir:

- Que el nodo intermedio sea un nodo de demanda de grado de conectividad dos
- Que el nodo intermedio no esté declarado como nodo a preservar
- Que los nodos adyacentes al nodo intermedio también sean nodos de demanda
- Que las tuberías que conectan con el nodo intermedio sean tuberías simples y que no estén declaradas como elementos a preservar.

A continuación, se plantean las ecuaciones a utilizar para calcular los porcentajes de reparto de la demanda del nodo intermedio y el cálculo de los atributos de la nueva tubería equivalente (longitud, rugosidad y diámetro) cuando el caudal no cambia de sentido.

5.2.2.1. Cálculo de los coeficientes de reparto

Si un nodo intermedio tiene asignado uno o varias demandas de caudal con sus respectivas curvas de modulación, lo primero es calcular los coeficientes de reparto que multiplicarán a las demandas del nodo intermedio para luego ser reasignadas a sus nodos extremos. Asimismo, se debe calcular el caudal trasegado de la nueva tubería equivalente para determinar sus nuevos atributos.

En cambio, si el nodo intermedio es un nodo de paso, es decir, que no lleva asignado un valor de demanda, es posible reemplazar las dos tuberías en serie por una tubería equivalente teniendo en cuenta el caudal que transita por una de ellas y la suma de las pérdidas de carga de ambas tuberías.

Para repartir la(s) demanda(s) del nodo intermedio se han propuesto diferentes criterios como la distribución equitativa del 50% a cada nodo extremo, en proporción inversa a las longitudes de cada tramo (de manera que el nodo más cercano recibe la mayor parte de la demanda), en proporción al tamaño de la tubería y a porcentajes de reparto prefijados por el usuario.

Bartolín (2013) planteó unas ecuaciones para repartir la demanda del nodo intermedio entre sus dos nodos adyacentes en función del caudal que ingresa al nodo intermedio, las pérdidas de carga y las resistencias hidráulicas de las dos tuberías que lo conectan. Estas ecuaciones se aplican de manera directa sobre los nodos intermedios con una sola demanda, donde el reparto se realiza si sus nodos extremos tienen una sola demanda y si las curvas de modulación son iguales para los tres nodos. En caso de que el nodo intermedio sea un nodo de múltiples demandas, el nodo se preserva en el modelo simplificado.

El planteamiento propuesto por Bartolín es el siguiente. Sean conocidas las características físicas de las dos conducciones, sus resistencias hidráulicas (R_{h1} , R_{h2}), las pérdidas de carga (h_{f1} , h_{f2}), el caudal que ingresa al nodo intermedio (Q_1) y la dirección del flujo (Figura 37-A).

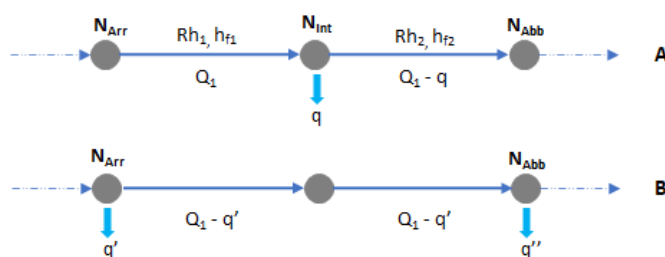


Figura 37. Traslado de la demanda del nodo intermedio a los nodos extremos de la nueva tubería equivalente

Se divide la demanda “q” entre dos partes q’ y q’’ (Figura 37-B), cada una asignada a un extremo de modo que $q = q' + q''$. El caudal circulante por la tubería equivalente se determina con la ecuación (10)

$$Q_{eq} = Q_1 - q' \quad (10)$$

Mientras que la equivalencia de las pérdidas de carga conduce a la ecuación (11).

$$h_{f1} + h_{f2} = Rh_1 Q_1^B + Rh_2 (Q_1 - q)^B = (Rh_1 + Rh_2) (Q_1 - q')^B \quad (11)$$

Al despejar la variable q’ de la ecuación (11) resulta:

$$q' = Q_1 - \left(\frac{h_{f1} + h_{f2}}{Rh_1 + Rh_2} \right)^{1/B} \quad (12)$$

$$q'' = q - q' \quad (13)$$

donde:

- N_{Arr} : Nodo aguas arriba
- N_{int} : Nodo intermedio o interior
- N_{Abb} : Nodo aguas abajo
- q : Demanda en el nodo intermedio
- q’ : Fracción de demanda asignada al nodo aguas arriba
- q’’ : Fracción de demanda asignada al nodo aguas abajo
- Q_{eq} : Caudal equivalente
- Rh_1, Rh_2 : Resistencia hidráulica de las tuberías 1 y 2
- Q_1 : Caudal circulante por la tubería 1
- h_{f1}, h_{f2} : Pérdidas de carga de las tuberías 1 y 2
- B : Exponente de caudal para la fórmula de pérdidas. Hazen-Williams (B=1,852), Darcy-Weisbach (B=2) y Chezy-Manning (B=2)

En el caso de que el nodo intermedio (N_{Int}) sea un nodo de múltiples demandas o que su curva de modulación sea diferente a la de los nodos extremos, las ecuaciones (12) y (13) no pueden aplicarse de manera directa. Ante esta situación y para continuar reduciendo aún más el modelo hidráulico, se propone calcular unos coeficientes de reparto a partir de las ecuaciones anteriores y la demanda total consumida en el nodo intermedio para un instante de tiempo determinado.

Los coeficientes de reparto se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$C_{r1} = q' / q_t \quad (14)$$

$$C_{r2} = 1 - C_{r1} \quad (15)$$

donde:

- C_{r1}, C_{r2} : Coeficientes de reparto
- q’ : Proporción de la demanda total consumida para el nodo aguas arriba
- q_t : Demanda total consumida

Cada uno de los coeficientes de reparto multiplican a la(s) demanda(s) asignada(s) en el nodo intermedio para repartirlas a los nodos extremos de la tubería equivalente. Si las demandas del nodo intermedio tienen asignado curvas de modulación distintas a las curvas de modulación de los nodos extremos se crea una nueva demanda con su curva de modulación, caso contrario las demandas se suman. Una vez comprobado que se cumplen las condiciones para fusionar tuberías en serie y reasignada la demanda del nodo intermedio a los nodos extremos, ya se puede aplicar las ecuaciones universales de asociación de tuberías en serie para sustituir las dos tuberías continuas por una tubería equivalente.

5.2.2.2. Cálculo de la longitud equivalente

La longitud de la nueva tubería equivalente (L_{eq}) será la suma algebraica de las longitudes de los dos tramos de tuberías (L_1, L_2), ecuación (16). Su trazado empieza desde el nodo de mayor altura piezométrica al nodo de menor altura piezométrica, manteniendo todos los vértices de cada tubería y la incorporación del nodo intermedio como un vértice más al trazado.

$$L_{eq} = L_1 + L_2 \quad (16)$$

5.2.2.3. Cálculo de la rugosidad equivalente

El cálculo de la rugosidad junto con el diámetro, son los parámetros utilizados para igualar las pérdidas de carga de la nueva tubería equivalente y las pérdidas de las dos tuberías a fusionar. En este caso, se propone que la rugosidad equivalente se pondere de manera proporcional a la longitud de los tramos de tubería o de sus respectivos diámetros. Seleccionar uno u otro atributo no afecta de manera significativa en el cálculo final de la rugosidad equivalente. Finalmente, la rugosidad para la nueva tubería equivalente se calcula de manera proporcional a la longitud de los tramos de tuberías.

$$R_{eq} = (R_1 L_1 + R_2 L_2) / (L_1 + L_2) \quad (17)$$

donde:

- R_{eq} : Coeficiente de rugosidad equivalente
- L_1, L_2 : Longitud de los tramos de tubería 1 y 2
- R_1, R_2 : Coeficiente de rugosidad de los tramos de tubería 1 y 2

Con las extensiones de Skelebreter (WaterGEMS), Skeletonizer (InfoWorks WS Pro) y el paquete de Python WNTR, la rugosidad equivalente se calcula después de igualar la resistencia hidráulica de la nueva tubería equivalente y la suma de las resistencias hidráulicas de cada tramo de tubería. Mientras que el diámetro equivalente se determina como el mayor de las dos tuberías en serie y su longitud como la suma algebraica de los dos tramos de tuberías. Esta opción sólo se aplica para la fórmula de Hazen-Williams, por lo tanto, no es necesario ejecutar una simulación hidráulica porque todos los cálculos se realizan con los parámetros físicos de las tuberías.

5.2.2.4. Cálculo del diámetro equivalente

Calculada la longitud y la rugosidad de la nueva tubería equivalente, el último parámetro por determinar es el diámetro equivalente. Esta variable será la que iguale las pérdidas de carga de la nueva tubería equivalente y las generadas por las dos tuberías a asociar.

El nuevo diámetro equivalente se calcula a partir de la fórmula utilizada para el cálculo de las pérdidas de carga. De las ecuaciones presentadas en el apartado 2.2.3, el diámetro equivalente se determina de la siguiente manera.

Para Hazen-Williams:

$$D_{eq} = \left(\frac{10,674 * L_{eq} * Q_{eq}^{1,852}}{H_{feq} * R_{eq}^{1,852}} \right)^{1/4,871} \quad (18)$$

Para Darcy-Weisbach:

$$D_{eq} = \left(\frac{8 * f_{eq} * L_{eq} * Q_{eq}^2}{9,81 * H_{feq} * \pi^2} \right)^{1/5} \quad (19)$$

El factor de fricción equivalente (f_{eq}) se calcula en función del Número de Reynolds, ecuación (4), y éste a su vez depende del diámetro de la tubería equivalente. Para resolver la incógnita, se debe realizar un proceso iterativo donde el diámetro equivalente vaya variando hasta que la diferencia absoluta entre la pérdida de carga generada por las dos tuberías y la pérdida de carga calculada para f_{eq} y D_{eq} sea menor a 0,001.

Para Chezy-Manning:

$$D_{eq} = \left(\frac{10,294 * L_{eq} * R_{eq}^2 * Q_{eq}^2}{H_{feq}} \right)^{1/5,33} \quad (20)$$

donde:

- D_{eq} : Diámetro equivalente (m)
- L_{eq} : Longitud equivalente (m)
- Q_{eq} : Caudal equivalente (m³/s)
- H_{feq} : Pérdida de carga equivalente ($h_{f1} + h_{f2}$) (m)
- R_{eq} : Rugosidad equivalente. HW y CM (adimensional), DW (m)
- f_{eq} : Factor de fricción de Darcy (adimensional)

5.2.2.5. Procedimiento general

La secuencia de pasos para ejecutar esta fase se describe a continuación.

- a. Almacenar en una lista los nodos de demanda con grado de conectividad dos, con una sola entrada y salida de caudal, y que no estén declarados como nodos a preservar.
- b. Extraer el primer nodo de la lista e identificar las tuberías y los nodos extremos adyacentes al nodo intermedio.

- c. Realizar las siguientes comprobaciones: que los nodos extremos sean nodos de demanda, que las tuberías que conectan al nodo intermedio sean tuberías simples y que no estén declaradas como elementos a preservar. Si estas condiciones no se cumplen, preservar el nodo intermedio y volver al punto “a” para seleccionar otro nodo de la lista.
- d. Si las condiciones del punto “c” se cumplen, lo siguiente es repartir las demandas del nodo intermedio hacia los nodos extremos y calcular las propiedades de la tubería equivalente.
- e. Eliminar el nodo intermedio y las dos tuberías adyacentes, y restar dos unidades al grado de conectividad del nodo intermedio.
- f. Trazar la nueva tubería equivalente desde el nodo de mayor a menor altura piezométrica. La nueva tubería equivalente debe incluir los vértices de ambas tuberías eliminadas y añadir las coordenadas del nodo intermedio como un vértice más.
- g. El proceso se repite hasta vaciar la lista de nodos intermedios.

5.2.3. Asociar tuberías en paralelo

Después de aplicar las dos primeras fases del proceso de simplificación, en el modelo simplificado no debe existir ramales (si la opción eliminar ramales ha sido seleccionada) ni nodos intermedios; salvo que se haya declarado algún elemento a preservar o que no pueda ser eliminado por algunas de las condiciones expuestas en las dos fases anteriores.

En esta fase, los nodos que aún permanecen en el modelo hidráulico son en su mayoría nodos de grado de conectividad mayor o igual a tres; por lo tanto, las tuberías que conectan con dichos nodos se encuentran formando circuitos cerrados (mallas). Sin embargo, es posible encontrar en esta fase nodos de grado de conectividad dos formando una malla simple con otro nodo de grado de conectividad mayor a dos. Esto es posible, si se eliminan ramales de tuberías y que los nodos aguas arriba de cada ramal sea un nodo de grado de conectividad tres.

Asociar dos o más tuberías en paralelo (Figura 38), significa reemplazar dichas tuberías por una equivalente que transporte el mismo caudal total para la misma diferencia de altura piezométrica entre los dos nodos de conexión. Esta operación no reduce el número de nodos de la red y no conlleva reasignar las demandas de los nodos extremos.

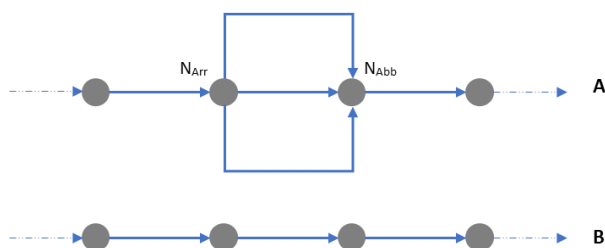


Figura 38. Simplificación de tuberías en paralelo

Aplicaciones informáticas como WaterGEMS (Skelebrator), InfoWorks Pro (Skeletonizer) y WNTR, tienen implementado esta fase del proceso de simplificación con un conjunto de parámetros, ajustes y condiciones que el usuario debe de especificar para determinar que tuberías se incluyen

en el proceso de esqueletización. La asociación de tuberías en paralelo se ejecuta agrupando las tuberías de dos en dos y manteniendo la longitud y trazado de la tubería dominante (el de mayor diámetro de las dos tuberías). A continuación, se puede seleccionar la rugosidad o el diámetro de la tubería dominante a mantener mientras que la otra variable se ajusta de manera que la pérdida de carga de la nueva tubería equivalente sea igual a la diferencia de alturas piezométricas de los dos nodos extremos.

El método que se propone en esta fase del proceso de esqueletización contempla la opción de asociar dos o más tuberías paralelas a la vez, consiguiendo optimizar el tiempo consumido por otras aplicaciones que asocian tuberías de dos en dos. Los pasos para identificar las tuberías en paralelo y calcular los atributos de la nueva tubería equivalente se detallan a continuación:

5.2.3.1. Identificación de los nodos extremos y las tuberías paralelas

La identificación de tuberías en paralelo empieza recorriendo todos los nodos de demanda del modelo de red original. Cada nodo de demanda evaluado debe cumplir dos condiciones para identificar a las tuberías paralelas y sus dos nodos extremos: el número de tuberías de salida desde el nodo inicial debe ser igual o mayor que dos, y los nodos finales de cada una de las tuberías de salida deben ser el mismo.

Si se cumplen todas las condiciones anteriores, lo siguiente es almacenar en una lista todas las tuberías que no están declaradas como elemento a preservar. Para proceder a asociar tuberías en paralelo, el mínimo número de tramos almacenados debe ser dos.

5.2.3.2. Cálculo del caudal equivalente

El caudal que debe circular por la nueva tubería equivalente será la suma de todos los caudales que trasiegan por cada una de las tuberías en paralelo almacenados en la lista.

$$Q_{eq} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (21)$$

5.2.3.3. Cálculo de la longitud y trazado de la nueva tubería equivalente

Del conjunto de tuberías almacenadas en la lista, la nueva tubería equivalente será la tubería que menor longitud tenga, con lo cual, el valor de dicha propiedad se mantiene, pero la rugosidad y el diámetro equivalente deben calcularse. Al seleccionar una tubería que pertenece al modelo original, no es necesario crear una nueva tubería, por lo tanto, su trazado se mantiene.

$$L_{eq} = \text{Min} (L_1, L_2, \dots, L_n) \quad (22)$$

5.2.3.4. Cálculo de la rugosidad equivalente

Lo mismo que para la fase de fusionar tuberías en serie, la rugosidad y el diámetro de las tuberías son las variables a utilizar para igualar las pérdidas de carga de la nueva tubería equivalente con cualquiera de las tuberías en paralelo. Para este caso, se propone también que la nueva rugosidad equivalente se calcule de manera proporcional a las longitudes de las tuberías que están almacenadas en la lista.

$$R_{eq} = (R_1L_1 + R_2L_2 + \dots + R_nL_n)/(L_1 + L_2 + \dots + L_n) \quad (23)$$

donde:

Q_{eq}	:	Caudal equivalente
Q_i	:	Caudal trasegado por las tuberías i...n
L_{eq}	:	Longitud equivalente
R_{eq}	:	Coefficiente de rugosidad equivalente
L_1, L_2, L_n	:	Longitudes de los tramos de tubería 1, 2, ..., n
R_1, R_2, R_n	:	Coefficiente de rugosidad de los tramos de tubería 1, 2, ..., n

5.2.3.5. Cálculo del diámetro equivalente

El diámetro equivalente se calcula con las mismas ecuaciones formuladas en la fase de fusión de tuberías en serie, ecuaciones (18)(19)(20) y dependerá de la fórmula de pérdidas de carga con la que se esté trabajando.

En el caso de la pérdida de carga equivalente (H_{feq}), esta se puede obtener por la diferencia de alturas piezométricas del nodo inicial y final de las tuberías equivalentes o por la pérdida de carga de una de las tuberías paralelas.

5.2.3.6. Procedimiento general

Después de presentar las ecuaciones que se van a utilizar para calcular las propiedades de las nuevas tuberías equivalentes, se describe a continuación el procedimiento general que se debe seguir para asociar tuberías en paralelo.

- Identificar los nodos inicial y final del conjunto de tuberías en paralelo.
- Calcular las propiedades de la nueva tubería equivalente que reemplazará a los atributos de la tubería con menor longitud (rugosidad y diámetro se calculan). El trazado de la tubería con menor longitud se mantiene.
- Todas las tuberías en paralelo se eliminan excepto la tubería con menor longitud. Por cada tubería eliminada se reduce una unidad al grado de conectividad de cada nodo extremo. Es posible que uno de los nodos extremos llegue a tener grado de conectividad cero, por lo tanto, estos nodos no deben preservarse en el modelo simplificado.
- Al restar una unidad a los nodos extremos de cada tubería paralela eliminada, es posible llegar a tener nodos con grado de conectividad dos e incluso uno. Estos nodos se deben almacenar en listas separadas para volver a lanzar el algoritmo de eliminación de ramales o de fusionar tuberías en serie. Esto nos va a permitir seguir reduciendo aún más el modelo.

Esta fase del proceso de simplificación también se puede ejecutar de manera independiente, sin embargo, la posibilidad de encontrar tuberías en paralelo es mucho menor que después de aplicar la fase de eliminar ramales y la de fusionar tuberías en serie. Por lo tanto, se recomienda que esta fase se ejecute siempre después de las dos primeras.

5.2.4. Eliminar nodos bi-alimentados

Un nodo de demanda alimentado desde dos tuberías es un caso poco común de ver en los modelos de RDAP. Sin embargo, si se ejecutan las tres primeras fases del proceso de simplificación de manera secuencial, es posible que queden nodos bi-alimentados en el modelo reducido. Bajo esta situación, aún es posible continuar reduciendo el modelo sin llegar a afectar los resultados hidráulicos. Se plantea aquí una forma sencilla y práctica de reasignar la(s) demanda(s) del nodo intermedio hacia los dos nodos adyacentes calculando unos coeficientes de reparto. Una vez repartida la(s) demanda(s), el nodo intermedio y sus dos tuberías conectadas se eliminan del modelo.

Los coeficientes de reparto se calculan dividiendo el caudal que transporta cada tubería y la demanda actual del nodo intermedio para un instante de tiempo en particular (24).

$$C_{r1} = \frac{Q_{T1}}{q_{int}}; \quad C_{r2} = \frac{Q_{T2}}{q_{int}} \quad (24)$$

Donde Q_{T1} y Q_{T2} son los caudales trasegados por las tuberías 1 y 2 respectivamente, q_{int} es la demanda actual del nodo intermedio, C_{r1} y C_{r2} son los coeficientes de reparto.

Calculados los coeficientes de reparto, se aplican sobre la(s) demanda(s) del nodo intermedio para reasignarla(s) a cada nodo extremo. Tal como sucede en el reparto de las demandas en las fases anteriores, si la curva de modulación del nodo intermedio es igual a la curva de modulación de los nodos extremos las demandas se suman, caso contrario, se crea una nueva demanda múltiple con su respectiva curva de modulación en cada nodo extremo.

Pero, antes de calcular los porcentajes de reparto se debe cumplir dos condiciones. La primera es que el nodo intermedio y las dos tuberías que lo alimentan no estén declarados como elementos a preservar, y la segunda, que los elementos eliminados (el nodo intermedio y las dos tuberías) no desconecten la red porque invalidaría el modelo simplificado. Esto puede ocurrir si el nodo es alimentado desde dos fuentes de suministro de agua distintos (Figura 39).

Para comprobar si un nodo intermedio bi-alimentado desconecta la red, hay que recorrer el grafo en sentido aguas arriba, mediante las tuberías de entrada, hasta encontrar un nodo común que cierre la malla (Figura 40).

La secuencia de pasos a seguir para llevar a cabo este procedimiento es el siguiente:

- a. Almacenar en una lista los nodos de demanda con grado de conectividad dos que cumplen con la condición de ser un nodo alimentado por dos tuberías y que estos tres elementos no estén declarados a preservar.
- b. Recuperar las dos tuberías que conectan al nodo intermedio y los dos nodos extremos adyacentes al nodo intermedio.
- c. Comprobar si el nodo intermedio forma parte de un mallado que evite la desconexión de la red. Para ello, se debe de buscar un nodo en común al que se pueda llegar desde las dos tuberías conectadas al nodo intermedio.

- d. Si no se llega a encontrar el nodo en común preservar el nodo intermedio y las dos tuberías que lo conectan, caso contrario, reasignar la(s) demandas(s) del nodo intermedio a los nodos extremos con los coeficientes de reparto calculados con la ecuación (24), restar en una unidad el grado de conectividad de los nodos extremos y en dos unidades al nodo intermedio; y por último eliminar el nodo intermedio y las dos tuberías.
- e. Consultar el grado de conectividad de los nodos extremos adyacentes al nodo intermedio. Si el grado de conectividad de cualquiera de los dos nodos fuese dos o no, estos se almacenan en listas distintas para continuar con el proceso de simplificación (tuberías en serie o ramal de tuberías).
- f. El proceso termina cuando la lista de nodos intermedios bi-alimentados está vacía.

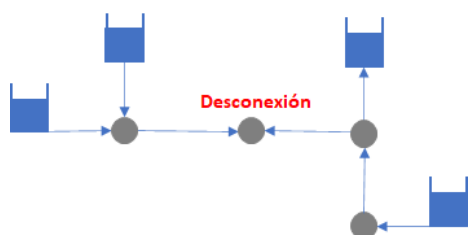


Figura 39. Desconexión de la red si el nodo intermedio es eliminado

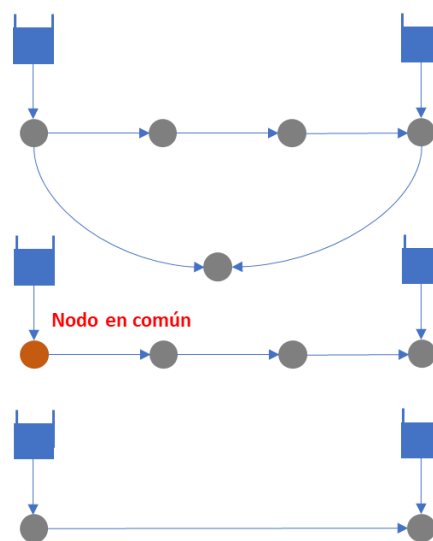


Figura 40. Condición para no desconectar la red al eliminar el nodo intermedio y las tuberías que lo conectan

5.2.5. Abrir mallas

Llegados a esta fase del proceso de simplificación, solo deben quedar las tuberías que forman parte de un mallado y algunas tuberías que no se hayan podido eliminar en fases anteriores. A partir de aquí, se trata de eliminar una a una las tuberías que transportan el menor caudal entre todas las que vayan quedando para un instante de tiempo determinado. Pero, antes de eliminar la tubería se debe de comprobar que no desconecte la red y que un porcentaje limitado de nodos no varíe en más de un tanto por ciento la presión con respecto a las presiones de los mismos nodos del modelo original. Superadas estas dos condiciones, la tubería candidata ya se puede eliminar y reducir en una unidad el grado de conectividad de sus nodos extremos. Esto hace posible que el proceso de simplificación pueda continuar si los nodos extremos de la tubería eliminada son nodos de grado de conectividad dos y/o uno.

Los pasos por seguir para ejecutar esta fase de la simplificación son:

- a. Ejecutar una simulación hidráulica del modelo simplificado hasta la fase de eliminar nodos bi-alimentados y almacenar los resultados de los caudales transportados en cada tubería para el instante de tiempo indicado (sólo las tuberías que no están declaradas a preservar).
- b. Ordenar los valores de caudal de menor a mayor y seleccionar la primera tubería (de menor caudal). Las tuberías cerradas con caudal cero no participan de este proceso de selección.
- c. Verificar que la tubería candidata a eliminar no desconecte la red; y si se diera el caso, dicha tubería debe preservarse y volver al punto "a". Para determinar si existe desconexión se aplica un algoritmo de recorrido en amplitud, donde a partir de uno de los nodos extremos se recorre el grafo hasta intentar llegar al otro nodo extremo. En caso de no cumplirse, la red quedará desconectada y por lo tanto la tubería debe preservarse. Y si se cumple la condición, la tubería candidata se cierra de manera provisional y se ejecuta una simulación hidráulica para determinar las presiones en los nodos. Si para cada instante de tiempo se cumple la condición de que un número determinado de nodos varíe su presión en un rango de tolerancia, la tubería candidata se elimina y se reduce el grado de conectividad de los nodos extremos. En caso de que la condición no se cumpla, la tubería se vuelve a abrir y se preserva en el modelo reducido.
- d. Volver al punto "a" hasta que se hayan evaluado todas las tuberías.

5.3. Evaluación de los modelos simplificados

Todo modelo simplificado debe ser comparado con el modelo original para determinar su grado de desviación y poder ser utilizado en las operaciones diarias. Por lo tanto, se propone calcular las diferencias de errores mínimo y máximo, el error absoluto medio, el error relativo medio, el error cuadrático medio y la raíz del error cuadrático medio sobre las variables de presión en los nodos de demanda, de los niveles de agua en los depósitos, y de la producción y consumo de agua del sistema. En función del grado de simplificación del modelo, los errores pueden ser de mayor o menor valor debido a las reasignaciones de las demandas y al cálculo de los atributos de las nuevas tuberías equivalentes. Los errores así calculados nos van a permitir tomar la decisión de seleccionar qué modelo simplificado se aproxima mejor a los resultados hidráulicos del modelo original. A continuación, se describe cada uno de los errores.

Las **diferencias de errores mínimo y máximo** se obtienen de la resta entre el valor medido y el valor considerado como exacto para cada una de las variables de salida anteriormente descritas. Estos valores se determinan para todos los elementos preservados del modelo simplificado y a lo largo de todo el periodo de simulación, y nos indican los valores extremos en las variaciones de error que pueden darse a lo largo de la simulación.

El **error absoluto medio** se obtiene como la suma de los valores absolutos obtenidos al restar el valor medido y el valor considerado como exacto para todos los instantes de tiempo de todos los elementos preservados, según la variable hidráulica a analizar, dividida por el producto del número de elementos preservados y el número de intervalos de tiempo.

El **error relativo medio** se obtiene como la suma de los cocientes entre el error absoluto y el valor exacto para cada instante de tiempo de todos los elementos preservados, dividida por el producto del número de elementos preservados y el número de intervalos de tiempo.

El **error cuadrático medio** se obtiene como la suma de las diferencias cuadráticas entre el valor medido y el valor considerado como exacto para cada instante de tiempo de todos los elementos preservados, dividida por el producto del número de elementos preservados y el número de intervalos de tiempo.

Si extraemos la raíz cuadrada al error anterior obtendremos la raíz **del error cuadrático medio**, el cual permite expresar el error cuadrático en las mismas unidades que el error absoluto.

De todos los errores calculados, se debe prestar más atención al error absoluto medio y al error relativo medio a la hora de seleccionar el mejor modelo simplificado. Todos estos errores se expresan según el sistema de unidades con el que se está trabajando, excepto el error relativo medio que se expresa en porcentaje. Por ejemplo, el error en la presión se puede expresar en metros de columna de agua (mca) o libras por pulgadas al cuadrado (PSI).

El error de las presiones se calcula con los nodos de demanda positiva, y si el modelo de red tiene depósitos, se calcula el error en la variación de los niveles de agua. Sin embargo, en el cálculo del error en el balance de caudales para la producción se tienen en cuenta los embalses y los nodos con demanda negativa; mientras que para el consumo se tienen en cuenta los nodos de demanda positiva y los embalses.

Para automatizar el cálculo de los errores de presión, los errores en los niveles de agua de los depósitos y los errores en el balance de caudales, se desarrolló la aplicación **CheckSkelEpanet** (Vegas, 2021) que permite ejecutar una simulación hidráulica del modelo original y el de todos los modelos reducidos. Se utilizó el lenguaje Visual Basic .NET y se codificó desde el entorno de Visual Studio Community 2019, donde se llaman a las funciones de la librería de EPANET para recuperar los atributos de los elementos de la red y ejecutar las simulaciones. La aplicación es de libre acceso.

5.4. Resultados y discusiones

Como modelo de red hidráulica utilizado para el desarrollo del método de esqueletización, se trabajó con la red de Maspalomas por tener casi todos los elementos que EPANET considera que pueden formar parte de un modelo. Para validar el método y corregir algunos errores del algoritmo, se utilizaron otros cinco modelos de redes reales entre los que se incluyen la red de Villena y Matamoros. Por ejemplo, uno de los errores identificado y que se corrigió en el código fue la desconexión de la red cuando se elimina un nodo intermedio bi-alimentado o cuando se elimina una tubería en la etapa de abrir mallas.

Para automatizar el proceso de simplificación se desarrolló la aplicación **SkelEpanet** (Vegas & Martínez, 2021). Esta herramienta de libre acceso (Figura 41) está codificada con el lenguaje de programación de Visual Basic .NET, y su interfaz gráfica es sencilla e intuitiva, lo cual, permite al usuario comprender rápidamente su uso.

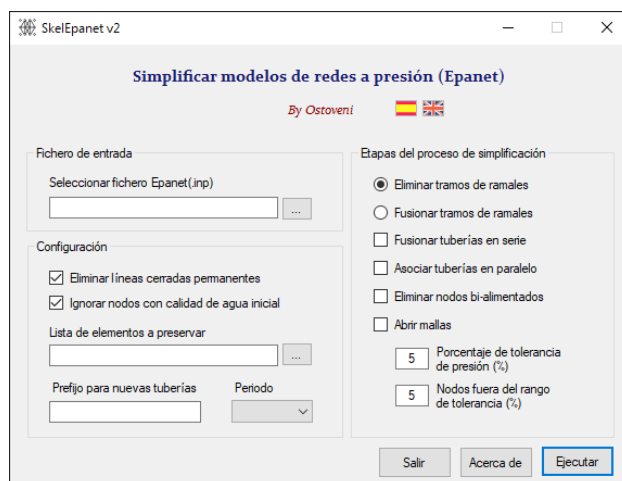


Figura 41. Interfaz gráfica de la herramienta SkelEpanet

La simplificación del modelo de una red puede tener diversos propósitos. Se puede utilizar el modelo reducido para realizar tareas de optimización energética, en cuyo caso habrá que mantener todos los elementos de regulación (embalses, depósitos, válvulas y bombas) y eliminar la mayor parte de las tuberías sin llegar a desconectar la red. Un modelo esqueletizado también se puede utilizar para abordar tareas de calibración por sectores, donde todos los elementos del sector se preservan y el resto se puede eliminar o fusionar con otros elementos. Otra utilidad de los modelos reducidos, en tareas de operación en tiempo real, en la monitorización de los elementos más importantes de una red hidráulica, como puede ser las tuberías de transmisión y los puntos de control de presiones y caudales que juegan un papel importante en la toma de decisiones.

Luego de ejecutar una simplificación automática, manual y por sectores, sobre el modelo de red de Maspalomas, para todos los instantes de tiempo, los resultados acerca del número de elementos preservados y el porcentaje de los elementos eliminados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5. Número de elementos preservados y porcentajes de elementos eliminados

Tipo de simplificación	# Nodos preservados	# Tuberías preservadas	% Nodos eliminados	% Tuberías eliminados
Automática	42	43	98,5	98,6
Manual	66	74	97,8	97,6
Sector	291	307	90,3	90,1

Los resultados que se muestran de la Tabla 5, se han obtenidos después de haber aplicado todas las etapas del proceso de esqueletización (eliminar ramales, fusionar tuberías en serie, asociar tuberías en paralelo, eliminar nodos bi-alimentados y abrir mallas con un 5% de tolerancia de presión y un 5% de nodos fuera del rango de tolerancia). Además, se ha indicado a la aplicación que elimine las líneas cerradas de manera permanente y que ignore los nodos con datos de calidad de agua o de ingreso de alguna sustancia contaminante, es decir, estos nodos pueden ser eliminados. Por último, los valores que aparecen en tabla son los que más se repiten en cada

instante de tiempo seleccionado. Esto indica que la dirección del flujo se mantiene constante a lo largo del periodo de simulación.

Para el tipo de simplificación **automática** (Figura 42), la configuración descrita anteriormente ha logrado reducir el modelo hidráulico un poco más del 98% de los elementos, tanto de nodos como de tuberías. En la simplificación de tipo **manual** (Figura 43) y por **sector** (Figura 44), además de configurar las opciones para una reducción automática, se han seleccionado un conjunto de nodos a preservar a criterio del usuario. Para la esqueletización manual, el objetivo es mantener la red de tuberías principales de cada uno de los sectores y en el caso de la esqueletización por sector, la idea es mantener todos los elementos del sector 6 y eliminar el resto.

En cuanto a los resultados hidráulicos alcanzados, para cada modelo esqueletizado y en cada instante de tiempo y según el tipo de simplificación, han sido satisfactorios en todos los casos. Esto significa que los modelos simplificados tendrán un comportamiento hidráulico muy similar al modelo de red completo. Sin embargo, uno de los modelos esqueletizados será quien presente los mejores resultados que los demás y no siempre coincidirá con la hora de máxima demanda.

En el caso de los modelos simplificados de manera automática, manual y preservando el sector hidráulico 6, los instantes de tiempo que mejores resultados han dado no han coincidido. Esto se debe en buena parte, al grado de simplificación y a los elementos seleccionados a ser preservados en el modelo esqueletizado.

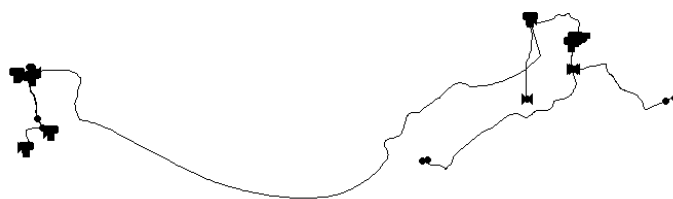


Figura 42. Esqueletización automática de la red de Maspalomas

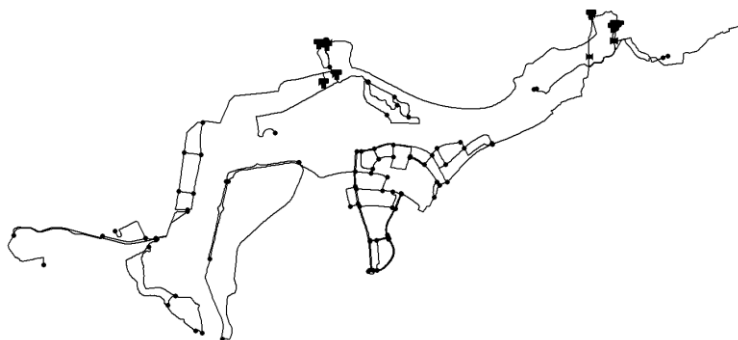


Figura 43. Esqueletización manual de la red de Maspalomas



Figura 44. Esqueletización de toda la red, excepto el sector 6

En la Tabla 6, se muestran los resultados de las diferencias de presión y los errores calculados de todos los modelos esqueletizados comparados con el modelo hidráulico original.

Tabla 6. Resultados de evaluar las presiones de los modelos esqueletizados

Tipo de simplificación	Rango de las diferencias de presión (mca)	Error absoluto medio (mca)	Error relativo medio (%)	Raíz cuadrada del error cuadrático medio (mca)
Automática	-0,081 a 0,049	0,005	0,07	0,013
Manual	-0,072 a 0,164	0,025	0,11	0,044
Sector	-0,081 a 0,168	0,075	0,19	0,087

La esqueletización de un modelo de red hidráulica, también puede afectar los niveles de agua de los depósitos debido al reparto de las demandas de caudal asignados a los nodos. Por lo tanto, es importante comparar con el modelo original si las variaciones de nivel en los depósitos pueden afectar al correcto uso del modelo simplificado. En el caso de los modelos esqueletizados para la red de Maspalomas, estas diferencias son del orden de $\pm 0,006$ m, con un error absoluto medio de 0,0007 m. Otra magnitud por evaluar es el balance de caudales, para comprobar que el caudal producido y el consumido sean los más cercanos al modelo original; en este caso, el error absoluto medio de los caudales producidos es 0 l/s y el error absoluto medio de los caudales consumidos es de 0.0002 l/s.

CAPITULO VI

6. MÉTODOS PARA ESTIMAR COEFICIENTES DE RUGOSIDAD EQUIVALENTES

La herramienta más utilizada mundialmente para el análisis y diseño de RDAP es Epanet. Esto se debe en gran parte a que es una aplicación de uso libre y es muy potente en el cálculo hidráulico y de calidad del agua. Pero, también tiene limitaciones y una de ellas es que no permite convertir los coeficientes de rugosidad de las tuberías de manera automática al cambiar de fórmula para el cálculo de las pérdidas de carga por Darcy-Weisbach (DW), Hazen-Williams (HW) y Chezy-Manning (CM). En la bibliografía suelen darse valores de los coeficientes de pérdidas para una u otra fórmula, pero no para todas ellas, y la conversión no es inmediata. Además, los resultados hidráulicos pueden cambiar de elegir una u otra fórmula, y en consecuencia también los resultados de todos los procesos analizados en capítulos anteriores, sobre todo aquellos en los que intervienen los caudales circulantes. Asimismo, calibrar el modelo de una red con rugosidades de Hazen-Williams es más rápido que hacerlo con rugosidades de Darcy-Weisbach por los tiempos consumidos en el cálculo del factor de fricción, y además porque la mayoría de los métodos de calibración se han desarrollado para esta fórmula (HW).

En base a estas consideraciones, se proponen dos métodos independientes y complementarios a la vez para calcular los nuevos coeficientes de rugosidad equivalentes. El primer método consiste en aplicar un conjunto de ecuaciones obtenidas igualando las fórmulas de pérdidas de carga de DW-HW, DW-CM, HW-CM y despejando la variable del coeficiente de rugosidad en función del factor de fricción de DW. Para resolver estas ecuaciones se requiere ejecutar una simulación hidráulica y obtener las variables de salida del caudal, velocidad y pérdidas de carga de todas las tuberías. En el segundo método, se proponen unas ecuaciones de tipo potencial-logarítmicas obtenidas a partir de la velocidad óptima de diseño para un conjunto de tuberías comerciales clasificadas por tamaño, de modo que el diámetro y la rugosidad de la tubería son los únicos parámetros de entrada que se necesitan para calcular los nuevos coeficientes de rugosidad equivalente.

6.1. Rugosidades equivalentes calculadas a partir de una simulación hidráulica

Para calcular los nuevos coeficientes de rugosidad equivalentes de las tuberías de una red hidráulica, se requiere primero ejecutar una simulación y recuperar los resultados hidráulicos como el caudal, velocidad y las pérdidas de carga de cada tubería, así como también sus propiedades físicas (diámetro, rugosidad y longitud).

Los nuevos coeficientes de rugosidad equivalentes se pueden calcular en base a tres criterios: para un instante de tiempo del periodo de simulación (por ejemplo, para el instante de máxima demanda), para una media de los caudales circulantes de cada tubería, o para el caudal máximo circulante. En este último criterio, cabe mencionar, que no todas las tuberías alcanzan el máximo caudal en el mismo instante de tiempo.

Una vez obtenida toda la información requerida de cada tubería, se calcula el Número de Reynolds (4) y el factor de fricción " f " a partir de la fórmula de pérdidas de carga de DW (2). Estos

dos parámetros son importantes porque van a actuar como condicionantes para resolver los nuevos coeficientes de rugosidad por las ecuaciones (25), (26) y (27), según corresponda. En caso de existir tuberías con caudal nulo debido al cierre de válvulas, a la ausencia de valores de demandas asignadas a los nodos de un ramal, o que el flujo se encuentre en un régimen laminar debido a las bajas velocidades, el nuevo coeficiente de rugosidad equivalente se calcula con las ecuaciones propuestas en el segundo método, que corresponden a unas condiciones de flujo consideradas habituales.

La primera condición es que el Número de Reynolds debe ser mayor a 4000. Esto nos indica que el caudal que transita por una tubería debe estar siempre en régimen turbulento para aplicar las fórmulas de equivalencia. Asimismo, esta condición guarda relación con los límites aplicados en el desarrollo de las fórmulas de Hazen-Williams y Chezy-Manning. La segunda condición es que el factor de fricción debe ser menor a 0,1. Este último valor, expresa el rango de validez de la fórmula de Swamee Jain (7) conforme al diagrama de Moody.

Después de igualar las fórmulas de pérdidas de carga entre Hazen-Williams (1) y Darcy-Weisbach (2), o bien la fórmula de Chezy-Manning (3) y Darcy-Weisbach (2), despejando la rugosidad absoluta (ϵ) de la fórmula de Swamee Jain (7), se obtienen las expresiones que permiten calcular los nuevos coeficientes de rugosidad equivalente.

$$C_{HW} = \left(\frac{129}{f} D^{0,129} Q^{-0,148} \right)^{1/1,852} \quad (25)$$

$$n = \sqrt{\frac{f}{124,6}} D^{1/3} \quad (26)$$

$$\epsilon = (3,71 * D) \left[10^{-\sqrt{0,25/f}} - \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right] \quad (27)$$

donde:

- C_{HW} : Coeficiente de rugosidad de HW (adimensional)
- n : Coeficiente de rugosidad de CM (adimensional)
- ϵ : Rugosidad absoluta de la pared interna de la tubería (m)
- D : Diámetro de la tubería (m)
- Q : Caudal (m^3/s)
- f : Factor de fricción de DW (adimensional)
- Re : Número de Reynolds (adimensional)

6.2. Rugosidades equivalentes calculadas para una velocidad óptima de diseño

Debido a que el método anterior necesita obtener previamente los resultados hidráulicos como el caudal, la velocidad y las pérdidas de carga de cada tubería, en algunos casos estos valores pueden ser cero y no es posible calcular los nuevos coeficientes equivalentes. Ante esta situación, los coeficientes de rugosidad equivalente serán calculados por un método novedoso basado en la estimación de las condiciones normales de trabajo para cada tubería según su diámetro y la

velocidad óptima de diseño. También, es posible determinar todos los coeficientes de rugosidad con este método.

Una de las expresiones más utilizadas para determinar la velocidad óptima de circulación del flujo para una tubería de diámetro "D" es la fórmula de Mougne (28). Dicha fórmula responde a consideraciones de tipo económico en la que se compara el coste de la tubería con el coste de las pérdidas de carga que ésta provoca. Esta fórmula se considera válida para presiones entre 20 y 50 mca, un rango bastante habitual en la mayoría de las RDAP urbanas.

A partir de la velocidad óptima, se puede deducir el caudal normal de transporte previsto para cada diámetro mediante la fórmula (29).

$$v = 1,5\sqrt{D + 0,05} \quad (28)$$

$$Q = v \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (29)$$

donde:

- v: Velocidad óptima de diseño (m/s)
- D: Diámetro de la tubería comercial (m)
- Q: Caudal de diseño óptimo (m³/s)

Para obtener unas ecuaciones generales que permitan convertir unos coeficientes de rugosidad en otros, se ha considerado un conjunto de diámetros de tuberías comprendidos entre 100 y 2000 mm., con incrementos de 100 mm y unas rugosidades absolutas de 0,001; 0,005; 0,01; 0,05; 0,1; 0,5; 1; 10 y 50 mm.

Para cada diámetro de tubería se determina el caudal óptimo con las fórmulas (28) y (29); luego, para cada rugosidad absoluta se calcula el factor de fricción "f" con la fórmula de Swamee Jain (7) y por último, se calcula las pérdidas de carga unitarias con la fórmula de Darcy-Weisbach (2). Este proceso se repite también para las fórmulas de Hazen-Williams (25) y Chezy-Manning (26), pero, en ese caso se utilizan los valores del coeficiente de fricción "f" calculados para DW, para obtener los nuevos coeficientes de rugosidad equivalentes.

En la Figura 45, se muestra un diagrama en el que se relacionan los valores calculados de C_{HW} y n frente a los valores de ε, donde cada curva representa a un diámetro distinto, lo que demuestra que éste afecta la relación entre los tres coeficientes de rugosidad, aunque no de forma significativa.

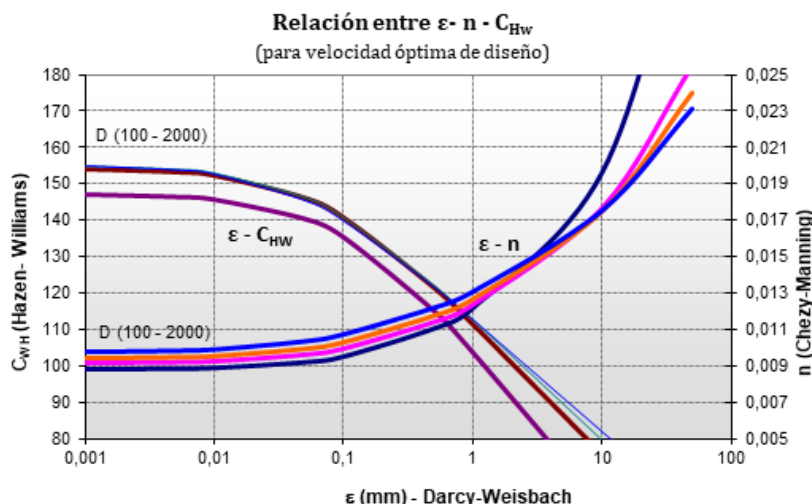


Figura 45. Relación entre los coeficientes de HW y CM frente a la rugosidad absoluta DW

Puesto que el diagrama está expresado en forma logarítmica para el eje X, se propuso realizar un ajuste analítico potencial del tipo $A + B(\log \epsilon + 3)^C$ tanto para la fórmula de Hazen-Williams y Chezy-Manning. Dado que la función logarítmica no está acotada inferiormente, se introdujo el sumando 3 dentro del paréntesis para anular el valor del paréntesis cuando $\epsilon = 0,001$ mm, que es el valor mínimo de la rugosidad considerado.

A continuación, se ajustan los parámetros A, B y C por regresión para cada fórmula teniendo en cuenta su dependencia con el diámetro de la tubería. Para ello, se eligen cuatro diámetros de tuberías lo suficientemente espaciados (100, 500, 1000 y 2000 mm), a fin de expresar dichos parámetros en función de los diámetros ensayados, lo que conlleva un nuevo ajuste de tipo logarítmico para cada parámetro de forma independiente.

Después de calcular los coeficientes de rugosidad de C_{HW} en función del factor de fricción para un rango de diámetros de tuberías y rugosidades absolutas, y tras realizar unos ajustes de tipo potencial-logarítmicos a los parámetros A, B y C se obtienen las siguientes expresiones:

$$C_{HW} = A + B(\log_{10}\epsilon + 3)^C \tag{30}$$

$$\text{Si } \epsilon < 0.001 \rightarrow \epsilon = 0.001 \text{ mm}$$

Con:

$$\begin{aligned} A &= 157 - 12(e^{-5D}); & e &(2,718281828) \\ B &= -4,89 - 1,15(\log_{10}D); & D &(\text{m}) \\ C &= 1,97 - 0,263(\log_{10}D) \end{aligned}$$

Para valores de rugosidades absolutas “ ϵ ” inferiores a 0,001 mm., fuera del rango de ajuste, la rugosidad se fija en dicho valor para evitar errores de cálculo en la ecuación. Realmente, por debajo de dicho valor las tuberías se comportan como hidrodinámicamente lisas y las curvas de ϵ/D convergen en el diagrama de Moody, de modo que apenas se producen desviaciones debidas a esta limitación.

De la fórmula anterior, podemos expresar la rugosidad absoluta “ ε ” en función de C_{HW} . En este caso, el valor de C_{HW} no debe superar el valor del parámetro A. En cuyo caso, se iguala al mismo sin apreciarse desviaciones importantes.

$$\varepsilon = 10^{\left[\left(\frac{C_{HW}-A}{B} \right)^{1/C} - 3 \right]} \quad (31)$$

$$\text{Sí } C_{HW} > A \rightarrow C_{HW} = A$$

El error cuadrático medio calculado al aplicar la ecuación ajustada (30) con respecto a los valores de partida es de 2,21 unidades de C_{HW} , o lo que es lo mismo un error del 1,83 % para todo el rango ensayado. Puesto que los valores de C_{HW} figuran elevados al exponente -1,852 en la fórmula de Hazen-Williams, dicho error equivale a un error en sentido contrario del 3,3 % para el cálculo de las pérdidas de carga. Sin embargo, en la práctica, el rango de variación de los valores de C_{HW} es bastante menor que el utilizado para realizar el ajuste, lo que supondrá errores menores al aplicar las ecuaciones para las situaciones más usuales.

Para el caso de los coeficientes de rugosidad de Chezy-Manning calculados en función del factor de fricción para el mismo rango de diámetros de tubería y rugosidades absolutas, y tras realizar un ajuste analítico similar para las expresiones de HW y DW, se tienen las siguientes expresiones:

$$n = A + B(\log_{10}\varepsilon + 3)^C \quad (32)$$

$$\text{Sí } \varepsilon < 0,001 \rightarrow \varepsilon = 0,001$$

Con:

$$\begin{aligned} A &= 0,0101 + 0,00115(\log_{10}D), & D \text{ (m)} \\ B &= 7,77 * 10^{-6} + 1,02 * 10^{-5} * e^{-5D}, & e \text{ (2,718281828)} \\ C &= 4,84 \end{aligned}$$

Para valores de rugosidad absoluta (ε) inferiores a 0,001 mm., se debe limitar igualmente la rugosidad a dicho valor, y también, se puede obtener la rugosidad absoluta en función del coeficiente de rugosidad de Chezy-Manning (n), quedando los valores de los coeficientes de rugosidad de Chezy-Manning (n) limitados inferiormente por el valor del coeficiente “A”.

$$\varepsilon = 10^{\left[\left(\frac{n-A}{B} \right)^{1/C} - 3 \right]} \quad (33)$$

$$\text{Sí } n < A \rightarrow n = A$$

6.3. Resultados y discusiones

Para validar los métodos propuestos de los apartados 6.1 y 6.2, se aplicó a la red de Maspalomas con ayuda de la herramienta **Corunica** (Vegas, 2020a) desarrollada desde el entorno de programación de Visual Studio Community 2019 (Visual .NET) que permite enlazar con la librería de EPANET (v2.2) y ejecutar simulaciones hidráulicas para recuperar las propiedades físicas y los atributos de salida de las tuberías (Figura 46).

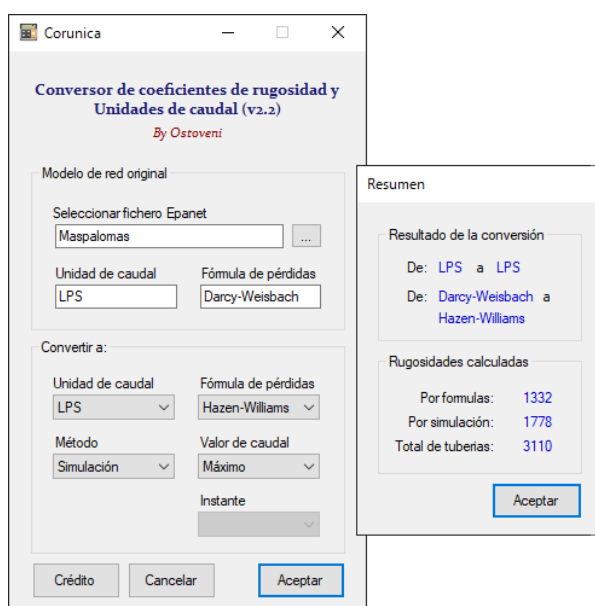


Figura 46. Interfaz gráfica de Corunica para convertir rugosidades y unidades de caudal

El modelo original de la red de Maspalomas utiliza la fórmula de Darcy-Weisbach para el cálculo de las pérdidas de carga. Por lo tanto, los nuevos coeficientes de rugosidad equivalentes serán calculados para las fórmulas de Hazen-Williams y Chezy-Manning.

Para evaluar el comportamiento hidráulico de los modelos resultantes, una vez convertidos los coeficientes de rugosidad, se analiza la dispersión o concentración de los errores a lo largo de todo el periodo de simulación mediante el diagrama de cajas y bigotes sobre la variable de presión en los nodos y el nivel de agua de los depósitos, respecto al modelo original.

Red de Maspalomas

Al aplicar el método de simulación ya sea para un caudal máximo ($Q_{\text{máx}}$), caudal medio (Q_{medio}) o para el instante de tiempo de máxima demanda ($Q_t=9:00$ horas), el **43% de las tuberías** se calculan con las ecuaciones de tipo potencial-logarítmica porque no cumplen con algunas de las condiciones descritas en el apartado 6.1 para el cálculo de los nuevos coeficientes de rugosidad.

En la Tabla 7, se muestra el rango de errores máximo y mínimo, el Error Absoluto Medio (EAM), y la Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (RCECM), para la variable hidráulica de la presión entre el modelo original y los modelos resultantes con los nuevos coeficientes de rugosidad de HW calculados por ambos métodos.

Tabla 7. Red de Maspalomas. Estadística de errores de presión entre el modelo original (DW) y los modelos convertidos a coeficientes de rugosidad de HW

Variables estadísticas	Por simulación			Por ecuaciones
	$Q_{\text{máx}}$	Q_{medio}	$Q_t=9\text{h}$	
Rango de errores (mca)	-0,33 a 0,13	-0,50 a 0,06	-0,33 a 0,04	-1,05 a 0,50
EAM (mca)	0,056	0,113	0,056	0,257
RCECM (mca)	0,057	0,116	0,057	0,264

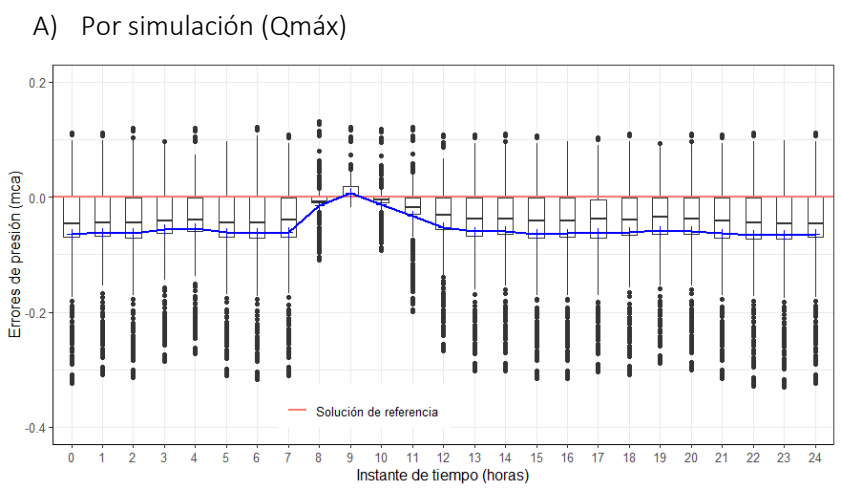
En el caso de la variación de los niveles de agua de los depósitos, los nuevos coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams, calculados por ambos métodos, no alteran de manera significativa el comportamiento hidráulico de la red, siendo el error absoluto medio de $\pm 0,001$ m.

Si los nuevos coeficientes de rugosidad equivalentes se calculan para la fórmula de HW por el método de simulación con valores de caudales medios (Q_{medio}), la presión se verá ligeramente afectada en comparación con los coeficientes de rugosidad calculados con los caudales máximos ($Q_{máx}$) o con los caudales para el instante de tiempo de máxima demanda ($Q_t=9h$).

Si bien los resultados de la Tabla 7 muestran que los valores del EAM, y de la RCECM son iguales para $Q_{máx}$ y $Q_t=9h$, los nuevos coeficientes de rugosidad de HW calculados para los caudales máximos ($Q_{máx}$) incrementan la presión a razón de 0.1 mca en algunos nodos del modelo de red (Figura 47A). En cambio, los nuevos coeficientes de rugosidad de HW calculados para el instante de tiempo de máxima demanda ($Q_t=9h$) proporcionan presiones ligeramente inferiores a las presiones calculadas en el modelo original.

La línea de color azul de la Figura 47 A-B, indica el error medio de la presión en cada instante de tiempo de todos los nodos del modelo de red. Los errores negativos de las presiones ubicados por debajo de la solución de referencia, línea roja, indican que los nuevos coeficientes de rugosidad equivalente de HW calculados para $Q_{máx}$ y $Q_t=9h$ generan más pérdidas de carga que las rugosidades del modelo original (DW).

Los nuevos coeficientes de rugosidad de HW, calculados por el método de simulación para $Q_t=9h$ y por el método de las ecuaciones de tipo potencial-logarítmica, están en el rango de **96 a 148**.



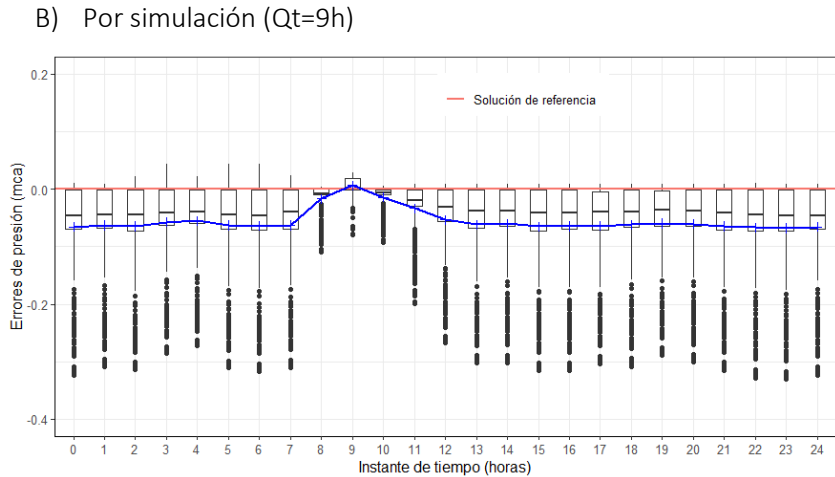


Figura 47. Diagramas de cajas y bigotes de los errores de presión entre el modelo convertido a Hazen-Williams por simulación (Q_{máx} y Q_t=9h) y el modelo original (DW)

En el caso de que los nuevos coeficientes de rugosidad de HW se calculen solo con las fórmulas de tipo potencial-logarítmicas y luego se ejecute una simulación hidráulica, el error absoluto medio calculado para la presión es de $\pm 0,257$ mca. Esto significa, que los nuevos coeficientes de rugosidad no van a afectar de manera significativa el comportamiento hidráulico de la red. En este caso, las presiones serán ligeramente mayor que en el modelo hidráulico original. El rango en que quedan comprendidos los nuevos coeficientes de rugosidad es de **123 a 137**.

En cuanto a los errores en los niveles de agua de los depósitos, se ha calculado el error absoluto medio en $\pm 0,001$ m. La línea de color azul de la Figura 48, marca el error medio de la presión para cada instante de tiempo. Estos valores medios están por debajo de la solución de referencia, línea roja, esto significa que los nuevos coeficientes de rugosidad de HW generan más pérdidas de carga que las rugosidades del modelo original (DW).

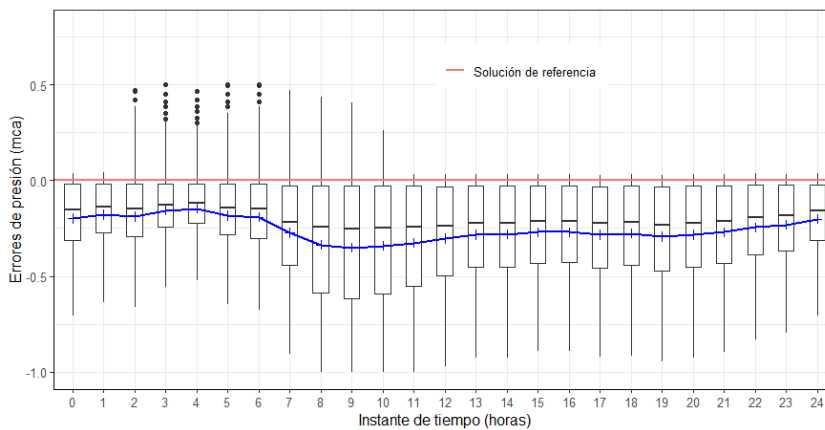


Figura 48. Diagrama de cajas y bigotes de los errores de presión entre el modelo convertido a HW por formulas tipo potencial-logarítmicas y el modelo original (DW)

Si se opta por convertir las rugosidades absolutas de DW del modelo original a unos coeficientes de rugosidad de CM por medio de los dos métodos propuestos, vamos a poder comparar con el modelo original la precisión en los resultados de la presión en los nodos de caudal y en los niveles de agua en los depósitos. En la Tabla 8, se muestran los resultados de las variables estadística del rango de errores, el EAM y la RCECM, para los nuevos coeficientes de rugosidad de CM calculados por el método de simulación y por el método de las ecuaciones de tipo potencial-logarítmicas.

Tabla 8. Red de Maspalomas. Estadística de errores de presión entre el modelo original (DW) y los modelos convertidos a coeficientes de rugosidad de CM

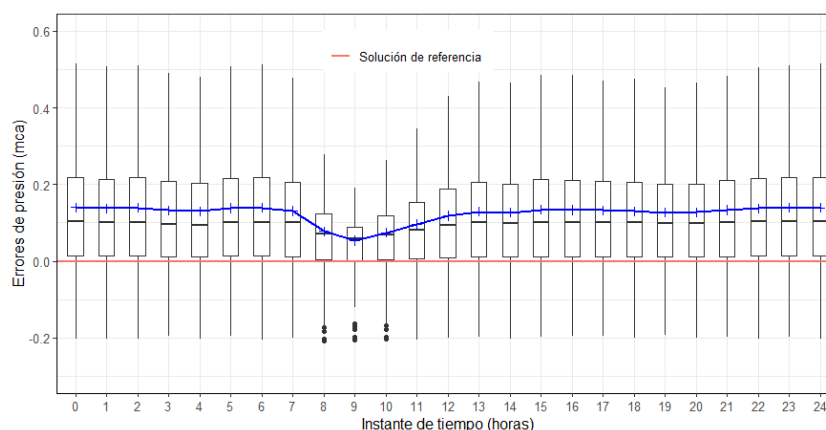
Variables estadísticas	Por simulación			Por ecuaciones
	Qmáx	Qmedio	Qt=9h	
Rango de errores (mca)	-0,21 a 0,51	-1,62 a 0,09	-0,21 a 0,51	-0,83 a 1,07
EAM (mca)	0,126	0,143	0,126	0,103
RCECM (mca)	0,127	0,194	0,127	0,113

De la Tabla 8, se puede comentar que los resultados obtenidos sobre los errores por ambos métodos son muy parecidos, a excepción del método por simulación (Qmedio) cuyos resultados son ligeramente diferentes al resto. Los mejores resultados son obtenidos por el método de simulación (Qmáx y Qt=9h) y el método por ecuaciones.

En la Figura 49 A-B, la línea azul representa el error medio de la presión para cada instante de tiempo y se encuentra por encima de la solución de referencia, línea roja. Esto indica que los nuevos coeficientes de rugosidad de CM calculados por ambos métodos generan menos pérdidas de carga que las rugosidades originales (DW).

Con respecto a la variación de los niveles de los depósitos, para los nuevos coeficientes de rugosidad de CM calculados con ambos métodos, las diferencias son muy bajas comparados con el modelo original (DW).

A) Por simulación (Qt=9h)



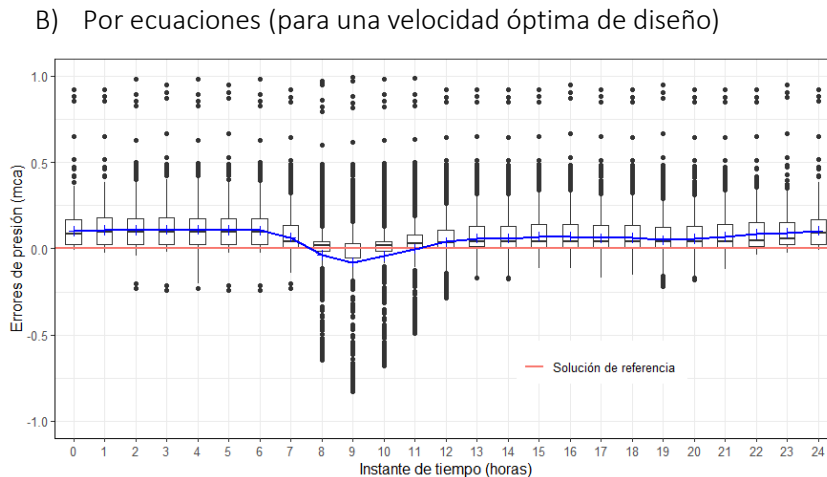


Figura 49. Diagramas de cajas y bigotes de los errores de presión entre los modelos convertidos a CM y el modelo original (DW)

En caso de que existan tuberías y nodos de caudal sin demandas agrupados en sectores, debido al cierre de válvulas (subsistema tipo D), convertir coeficientes de rugosidad por el método de simulación es imposible. Sin embargo, con las ecuaciones de tipo potencial-logarítmicas si es posible, pero, las presiones calculadas con los nuevos coeficientes de rugosidad pueden ser bastante distintas a las obtenidas por el modelo original en los nodos del sector. Por lo tanto, se recomienda revisar antes cualquier modelo si existen subsistemas Tipo D con ayuda de la herramienta **Idehisub** desarrollada en el apartado 3.1.

El problema en este caso quizá sea la configuración del sistema de ecuaciones, las condiciones de contorno o la propia matriz de cálculo del programa EPANET. Porque, al modificar los nuevos coeficientes de rugosidad equivalentes, para las tuberías aisladas, dentro de un rango de valores de rugosidades adecuadas, los resultados de las presiones no mejoran. Resolver esta incógnita escapa a los objetivos de este capítulo y puede ser materia de investigación futura.

CAPITULO VII

7. CONCLUSIONES, APORTES Y FUTUROS DESARROLLOS

Análisis topológico

La gestión de una red de suministro de agua depende en gran medida de su estructura topológica. Hoy en día, analizar el comportamiento de los sistemas hidráulicos es posible gracias a la creciente potencia de cálculo y la disponibilidad de información. Los análisis topológicos aplicados a los modelos hidráulicos buscan comprobar que todos sus elementos estén conectados, que el agua llegue a todos los puntos de consumo o que ante una rotura de una tubería las presiones no se vean afectadas, entre otras.

- El primer método desarrollado en esta Tesis busca identificar zonas de la red que estén desconectadas debido a un mal trazado de la red de tuberías o por el cierre de alguna tubería, bomba o válvula. Asimismo, se puede identificar cuatro tipos de subsistemas hidráulicos en función de las demandas asignadas a los nodos de consumo y a las fuentes de suministro de agua.
- El segundo método aportado en la Tesis pretende clasificar la red de tuberías por su topología (ramas y mallas) para distinguirlas de forma visual sobre un mapa y poder analizar la fiabilidad de la red ante una posible avería en las tuberías, bombas y válvulas, o para ubicar sensores, válvulas reductoras de presión y elementos que delimiten un sector hidráulico.
- El último método de análisis desarrollado permite identificar las tuberías principales de una red, las cuales se pueden utilizar como herramienta para planificar ampliaciones (nuevos sectores de demanda), asignar las demandas exclusivamente sobre los nodos pertenecientes a la red de distribución (salvo excepciones), identificar derivaciones que causen un suministro deficiente en determinadas zonas o para proponer sectores donde se excluyan a las tuberías principales.

Los resultados obtenidos han demostrado que los métodos desarrollados son de gran ayuda para el análisis de redes de abastecimiento de agua. Todas estas aplicaciones se han utilizado como herramientas de apoyo para proponer soluciones al problema de convertir un suministro intermitente en continuo, propuesto en la batalla de los suministros intermitentes (BIWS) con motivo del Segundo Congreso Internacional de Análisis de los Sistemas de Distribución de Agua e Informática y Control en la Industria del Agua (WDSA/CCWI, por sus siglas en inglés) celebrado en Valencia (España) en el mes de julio del 2022. Las herramientas son de gran utilidad para gestionar mejor los sistemas de abastecimiento de agua potable de todo el mundo que desean comprender mejor cómo se distribuye el agua y para reforzar ciertas zonas ante posibles averías en algunos elementos críticos que pueden dejar sin suministro de agua a buena parte de la ciudad.

- Como **trabajo futuro**, se pondrá en marcha el desarrollo de un nuevo algoritmo más preciso para identificar el conjunto de válvulas de corte (polígono de corte) que permitan

aislar un grupo de tuberías y realizar las labores de reparación y/o mantenimiento oportuno sobre el elemento que presente la avería. Asimismo, reutilizando el algoritmo del polígono de corte se propone implementar el algoritmo del polígono de corte predictivo para analizar el número de válvulas a cerrar, su distribución, longitud total de tuberías aisladas, número de acometidas aisladas, número de clientes afectados, etc.

Sectorización

Los métodos propuestos en el Capítulo 4 se han desarrollado con el objetivo de determinar los macrosectores que se alimentan desde la red de tuberías principales y/o secundarias y desde las fuentes de suministro de agua. Ambos métodos están basados en la topología de la red y en los resultados hidráulicos de la simulación.

- El primer método desarrollado se ha aplicado a dos casos de estudio dando como resultado macrosectores de diversos tamaños alimentados por una o varias entradas. Esto se debe en buena parte al diseño del trazado de la red de tuberías y a su dimensionamiento, poco favorable para su sectorización. Varios de estos macrosectores no resultan en este caso económicamente viables para la instalación de caudalímetros y/o válvulas de corte. Sin embargo, pese a los resultados obtenidos, se ha proporcionado información relevante sobre las tuberías importantes de la red por donde circulan los mayores caudales y cómo se distribuyen a las distintas zonas. Gracias a ello, se podrán realizar labores de prevención sobre la red principal de tuberías para garantizar el suministro y evaluar la posible bajada de presión en ciertas zonas debido a que el agua circula primero por sectores cuyas tuberías son de menor tamaño.
- El segundo método propuesto en esta tesis divide la red en función de las aportaciones de cada fuente de suministro de agua. Este método crea dependencia entre los sectores contiguos para mantener unas presiones internas en cada sector lo más próximo al modelo original. Por lo tanto, el número de medidores de caudal y/o válvulas de corte dependerá de las variaciones de presión permitidas entre los distintos escenarios de sectorización.
- Como aportación original, se ha desarrollado una herramienta con dos métodos de análisis previo a la partición óptima de sectores hidráulicos que permite evaluar el número de entradas a los macrosectores para cumplir con las restricciones de presión mínima sin forzar a tener que ser entrada única, siendo ésta otra clara ventaja de los métodos propuestos. De esta forma, el gestor de la red puede apoyarse de esta herramienta para tomar la decisión de aislar la red principal o de sugerir algunos cambios en el trazado de las tuberías para evitar instalar caudalímetros en las tuberías de gran tamaño e impedir la formación de sectores en cascada logrando una mayor robustez ante posibles roturas dentro de los sectores. Una sectorización excluyendo la red principal, permite una mayor flexibilidad a la hora de modificar los esquemas de los sectores ante posibles aumentos de la demanda.
- Como **trabajos futuros**, se propone implementar un algoritmo que identifique los sectores más pequeños y ofrezca alternativas para integrarlos en otros sectores contiguos, reduciendo así el número de caudalímetros y/o válvulas de corte.

Simplificación

- El método desarrollado para esqueletizar modelos de RDAP, implementado a través de cinco pasos basados en la topología de la red y en el sentido de los caudales circulantes, permite reducir modelos que superan el 92% de los elementos eliminados manteniendo la conexión topológica y garantizando un comportamiento hidráulico similar al modelo original.
- Gran parte del éxito de este método está en el reparto de las demandas al momento de fusionar tuberías en serie, en la eliminación de los nodos bi-alimentados, y en el cálculo correcto de las nuevas propiedades de las tuberías equivalentes que se van creando.
- Una de las contribuciones adicionales ha consistido en contemplar las numerosas situaciones particulares que aparecen cuando las metodologías de tipo genérico se aplican a redes reales, lo que confiere una gran robustez a los algoritmos desarrollados.
- Además, el método ha sido diseñado pensando en eliminar todas las restricciones con que se enfrentan otras aplicaciones con la finalidad de reducir el máximo número de elementos.
- Finalmente, el método se diferencia de los propuestos en otras aplicaciones en que trabaja con modelos de redes en servicio y no sobre modelos en fase de elaboración. El método implementado en la herramienta SkelEpanet, ya se está utilizando en empresas gestoras de agua de Países Bajos para esqueletizar modelos de redes que serán utilizados para el análisis de transitorios.
- Como **trabajos futuros**, está pendiente completar el algoritmo del método de abrir mallas para continuar reduciendo el modelo de red cuando existan nodos de grado de conectividad dos al momento de eliminar una tubería; fusionar algunos tipos de válvulas con tramos de tuberías, por ejemplo, las válvulas de aislamiento que están siempre abiertas; fusionar tuberías en serie con coeficientes de pérdidas menores, las cuales por ahora se conservan; desarrollar un método para simplificar modelos de redes para el análisis de calidad de agua; identificar y preservar todos los nodos importantes del modelo original de manera automática para reducir las diferencias en los resultados hidráulicos del modelo esqueletizado, por ejemplo, cuando se simplifica modelos de redes abastecidos por múltiples fuentes o cuando existen válvulas limitadoras de caudal que terminan cambiando su estado después de ejecutar una simulación del modelo simplificado (pasar de activas a abiertas). Este último caso se debe a que la demanda de los nodos aguas abajo de la válvula se ha visto disminuida, lo cual, al ser la consigna de la válvula mayor, esta se abre. Este problema se origina al repartir las demandas de los nodos que se van eliminando. También, se está evaluando la opción de implementar el método de identificación de la red de tuberías principales y secundarias para preservar parte del trazado continuo de ambas clasificaciones.

Coefficientes de rugosidad equivalentes

El objetivo principal de los métodos desarrollados para convertir coeficientes de rugosidad de un modelo hidráulico es uniformar los resultados de la simulación independientemente de la fórmula de pérdidas de carga utilizada, así como poder aplicar los métodos desarrollados en la literatura científica para calibrar modelos de redes con coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams. Países como España y Australia, utilizan fórmulas distintas a la de Hazen-Williams para el cálculo de las pérdidas de carga.

- Inicialmente se planteó desarrollar unas ecuaciones con las fórmulas de pérdidas de carga soportadas por el programa Epanet para obtener otras ecuaciones en función del factor de fricción y poder calcular los nuevos coeficientes de rugosidad. Sin embargo, en los modelos de redes pueden existir tuberías por las que no circule caudal y las ecuaciones no son resolubles en este caso.
- Ante dicha situación, se planteó desarrollar unas ecuaciones de tipo potencial-logarítmicas que complementen al primer método. Este último método no requiere ejecutar una simulación hidráulica para calcular los nuevos coeficientes de rugosidad, lo cual, es uno de los aportes novedosos de la tesis y que podría implementarse en la herramienta Epanet.

Los coeficientes de rugosidad calculados por el método de simulación para los caudales máximos de circulación de cada tubería y para el instante de tiempo de máximo consumo, mantienen un comportamiento hidráulico muy similar al modelo original (en presiones en los nodos y nivel de agua en los depósitos) comparado con los resultados hidráulicos si se aplica el método de las ecuaciones de tipo potencial-logarítmico. La ventaja de este segundo método está en que no se necesita ejecutar una simulación hidráulica para obtener los nuevos coeficientes de rugosidad equivalentes y sus resultados son también válidos. Con el primer método, el porcentaje de error medio en las presiones de los nodos de demanda suele estar en $\pm 0,5\%$ y con el método de las ecuaciones de tipo potencial-logarítmico en $\pm 1,3\%$. Sin embargo, se observan valores atípicos de presión cuando un grupo de tuberías están aisladas por el cierre de válvulas y no hay consumo en dicho sector.

- Como **desarrollo futuro** en este apartado se propone adaptar las velocidades óptimas de circulación adoptadas para cada diámetro a los consumos reales de cada red, para así ajustar aún mejor los resultados de las ecuaciones de tipo potencial-logarítmico a los proporcionados por el método de simulación, dado el mayor interés despertado en la comunidad científica por este segundo método, cuya publicación en el portal RG ha tenido más de 16.000 visitas desde 2018.

Como conclusión general, todos los métodos planteados en la tesis doctoral tienen una relación secuencial. Un análisis topológico de la red nos va a permitir encontrar posibles errores iniciales de desconexión o que ciertos nodos de la red principal de tuberías tengan asignadas demandas cuando en realidad no deberían tenerlas, lo cual, puede dificultar el trabajo de diseñar los sectores de demanda si se busca aislar la red arterial. Una vez sectorizada la red podemos tener un mayor control del sistema, de esta manera, se puede priorizar los sectores con menor rendimiento hidráulico para realizar tareas de detección y localización de fugas. Otra forma de aprovechar el modelo sectorizado es poder utilizarlo en la gestión diaria de la red en tiempo real; para ello, debemos esqueletizar primero gran parte de nuestro modelo preservando las tuberías importantes de cada sector y así centrarnos en determinadas zonas donde se requiera más atención. Por último, la calibración es la etapa final del proceso de elaboración de un modelo hidráulico y ésta se puede llevar a cabo por sectores de manera independiente, es decir, manteniendo todos los elementos de cada sector y simplificando el resto. De esta forma, se empezaría por calibrar los sectores más alejados de las fuentes de suministro; al calibrar el modelo de una forma secuencial, además de ser una guía para detectar posibles incoherencias, se reducen también los tiempos de cálculo; y si para ello convertimos primero las rugosidades absolutas de las tuberías en coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams, los procedimientos de calibración se simplifican, además de constituir un puente para provechar las metodologías ya desarrolladas para calibrar modelos de redes, la mayoría de las cuales utilizan los coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams.

PUBLICACIONES REALIZADAS CON MOTIVO DE LA TESIS

Como resumen final a las conclusiones de este trabajo de tesis doctoral, quiero compartir la gran satisfacción que tengo por contribuir con 3 publicaciones científicas a revistas, 2 publicaciones de libros que cuentan con más de 20 mil descargas, 11 publicaciones en congresos y 11 herramientas informáticas de libre acceso que están siendo utilizadas por profesionales que laboran en empresas que gestionan el servicio de agua potable y por parte de la academia que investiga su aplicabilidad a distintos casos de estudios reales. Las herramientas más utilizadas son Reverse-Pipes, ConvertGISEpanet, RunEpanetGIS, iDistricts, y SkelEpanet.

Libros

- | | |
|---------------|--|
| Julio
2018 | Using The Epanet Toolkit v2.00.12 With Different Programming Environments.
Oscar Vegas Niño, Fernando Martínez Alzamora, Joan Carles Alonso Campos, Velitchko G. Tzatchkov. Mexican Institute of Water Technology. ISBN: 978-607-9368-97-5. |
| Julio
2017 | Iniciación a la Programación con la Toolkit de Epanet v2.00.12 en un Entorno Windows.
Oscar Vegas Niño, Fernando Martínez Alzamora, Joan Carles Alonso Campos, Velitchko G. Tzatchkov. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. ISBN: 978-607-9368-72-2. |

Artículos en revistas

- Abril 2021 **A Decision Support Tool for Water Supply System Decentralization via Distribution Network Sectorization**
Oscar Vegas Niño, Fernando Martínez Alzamora, Velitchko Tzatchkov
Revista Processes 9(4):642 DOI: 10.3390/pr9040642
- Abril 2021 **iDistritos: sectorización de modelos de redes hidráulicas de Epanet**
Oscar Vegas Niño, Fernando Martínez Alzamora, Velitchko Tzatchkov
Revista HidroLatinoamericana Vol. 5
- Mayo 2016 **Importación y exportación de los datos de EPANET al entorno gvSIG con el módulo de programación v2.1**
Oscar Vegas Niño, Fernando Martínez Alzamora, Vicente Bou Soler.
Revista Mapping. International Journal of Geomatics and Earth Sciences. Vol. 25, 177, 60-65. ISSN: 1131-9100.

Comunicación en congresos

- Noviembre 2022 **Aplicación de la curva de consigna para el análisis y optimización de redes de distribución de agua**
Gustavo Delgado, Christian Briceño, Anselmo Carrasco, Vegas Oscar
XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Brasil.
- Julio 2022 **Modeling the final solution using multilevel sector analysis for optimizing progressive investments in a distribution water network**
Torret X., Cufiño Y., Grau S., Marques P., Vegas O., Guedes D., Fusté E., Maspons S., Pérez R.
2nd International Joint Conference on Water Distribution Systems Analysis & Computing and Control in the Water Industry. Universitat Politècnica de València (España)
- Marzo 2021 **Comparativa de Plugins de QGIS para elaborar y simular modelos de redes hidráulicas con Epanet**
Vegas Niño Oscar
Jornadas de SIG Libre 2021. Universitat de Girona Servei de Sistemes d'Informació Geogràfica i Teledetecció (España).
- Marzo 2021 **QGISRed, un plugin libre y profesional sobre QGIS para gestionar modelos avanzados de redes de distribución de agua**
Fernando Martínez Alzamora, Néstor Lerma, Oscar Vegas Niño
Jornadas de SIG Libre 2021. Universitat de Girona Servei de Sistemes d'Informació Geogràfica i Teledetecció (España).
- Noviembre 2019 **Sectorización manual de modelos de redes de abastecimiento de agua desde gvSIG con ayuda de las herramientas ConvertGISEpanet y RunEpanetGIS**
Vegas Niño Oscar
15as Jornadas Internacionales gvSIG. Universitat Politècnica de València (España).

- Septiembre 2019 **Upgrade of the GISRed application for the free analysis of WDN under GIS environment**
 Martínez Alzamora Fernando, Lerma Nestor, Bartolín Ayala Hugo, Vegas Niño Oscar, 17th International Computing & Control for the Water Industry Conference, CCWI 2019. University of Exeter (United Kingdom).
- Septiembre 2018 **Modelación del comportamiento real de suministro de agua con depósitos domiciliarios mediante Epanet**
 Fernando Martínez Alzamora, Oscar Vegas Niño, Velitchko Tzatchkov XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Universidad Católica Argentina.
- Octubre 2017 **Modelación eficiente de suministros de agua con aljibes domiciliarios mediante EPANET. De su necesidad a su erradicación.**
 Martínez Alzamora Fernando, Kesteloot Diego, Vegas Niño Oscar, Jiménez Bello Miguel Ángel.
 V Jornadas de Ingeniería del Agua (JIA-2017). Universidade da Coruña. España
- Septiembre 2016 **Metodología para evaluar la confiabilidad del suministro en la distribución del agua y su incremento**
 Tzatchkov Velitchko, Vegas Niño Oscar, Bourguett O. Víctor XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Lima, Perú.
- Septiembre 2016 **Aplicación de la teoría de grafos a la identificación de subsistemas hidráulicos en redes de distribución de agua**
 Vegas Niño Oscar, Martínez Alzamora Fernando, Tzatchkov Velitchko. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Lima, Perú
- Diciembre 2015 **Importación y exportación de los datos de EPANET al entorno gvSIG con el módulo de programación v2.1**
 Vegas Niño Oscar, Martínez Alzamora Fernando, Bou Soler Vicente. 11as Jornadas Internacionales gvSIG. Valencia, España.

Aplicaciones informáticas desarrolladas

iEmittersToNodes	Convertir emisores en nodos de demanda (Epanet)
CheckSkelEpanet	Evaluar modelos de redes esqueletizados (Epanet)
SkelEpanet	Tool to simplify Models of hydraulic networks (Epanet)
iDistricts	A tool to propose or identify hydraulic sectors
CheckPressure	Evaluar las presiones en múltiples escenarios de Epanet
Corunica	Convertir coeficientes de rugosidad y unidades de caudal
Idehisub	Identificar subsistemas hidráulicos en modelos de Epanet
RunEpanetGIS	Visualizar resultados de una simulación con Epanet desde cualquier GIS
ConvertGISEpanet	Convertir modelos de redes de agua de formato Shape a Epanet y viceversa
Rename-IDs	Renombrar identificadores de los elementos de una red de Epanet
Reverse-Pipes	Cambiar la orientación de las tuberías de una red de Epanet

CAPITULO VIII

8. REFERENCIAS

- Aguilera, M. (2021). *Desarrollo de algoritmos de simplificación de modelos de redes de abastecimiento basados en la teoría de grafos y el uso del software EPANET 2.2* [Universitat Politècnica de València]. <http://hdl.handle.net/10251/175211>
- Akgun, I., Kandakoglu, A., & Ozok, A. F. (2010). Fuzzy integrated vulnerability assessment model for critical facilities in combating the terrorism. *Expert Systems with Applications*, 37(5), 3561–3573. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.10.035>
- Alvisi, S., Creaco, E., & Franchini, M. (2011). Segment identification in water distribution systems. *Urban Water Journal*, 8(4), 203–217. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2011.595803>
- Anderson, E. J., & Al-Jamal, K. H. (1995). Hydraulic-Network Simplification. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121(3), 235–240. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1995\)121:3\(235\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1995)121:3(235))
- Anguluri, S., Grayman, W., Clark, R., Garner, L., & Haught, R. (2005). *Water Distribution System Analysis: Field Studies, Modeling and Management*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://doi.org/EPA/600/R-06/028>, 2005
- Bahadur, R., Johnson, J., Janke, R., & Samuels, W. (2008). Impact of model skeletonization on water distribution model parameters as related to water quality and contaminant consequence assessment. *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*. [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)64](https://doi.org/10.1061/40941(247)64)
- Bartolin, H. (2013). *Confección de modelos de redes de distribución de agua desde un SIG y desarrollo de herramientas de apoyo a la toma de decisiones* [Tesis doctoral]. <http://hdl.handle.net/10251/33152>
- Berardi, L., Laucelli, D., & Giustolisi, O. (2012). A Tool for Preliminary WDN Topological Analysis. *12th Annual Conference on Water Distribution Systems Analysis (WDSA 2010)*, 241–262. [https://doi.org/10.1061/41203\(425\)23](https://doi.org/10.1061/41203(425)23)
- Bianchotti, J., Denardi, M., Castro-Gama, M., & Puccini, G. (2021). Sectorization for Water Distribution Systems with Multiple Sources: A Performance Indices Comparison. *Water*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/w13020131>
- Boussafeur-Lamoudi, K. (2013). *Automated simplification of water networks models*.
- Brentan, B., Carpitella, S., Izquierdo, J., Luvizotto, E., & Meirelles, G. (2022). District metered area design through multicriteria and multiobjective optimization. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 45(6), 3254–3271. <https://doi.org/10.1002/mma.7090>
- Bui, X. K., Marlim, M. S., & Kang, D. (2020). Water network partitioning into district metered areas: A state-of-the-art review. *Water (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/W12041002>
- Campbell, E. (2013). *Propuesta para una metodología de sectorización de redes de abastecimiento de agua potable* [Tesis máster]. <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/39139>
- Campbell, E. (2017). *Sectorización de Redes de Abastecimiento de Agua Potable basada en detección de comunidades en redes sociales y optimización heurística* [Tesis doctoral]. <http://hdl.handle.net/10251/86206>

- Cesario, L. (1995). *Modeling, Analysis, and Design of Water Distribution Systems*. American Water Works Association.
- Charalambous, B. (2008). Use of district metered areas coupled with pressure optimisation to reduce leakage. *Water Science and Technology: Water Supply*, 8(1), 57–62. <https://doi.org/10.2166/ws.2008.030>
- Chen, Y., Coulbeck, B., & Orr, C. (1988). *Network Simplification By Equivalent Modelling*. [https://doi.org/Report N° 64](https://doi.org/Report%20N%2064)
- Cheung, P., Van Zyl, J., & Reis, L. (2005). Extension of Epanet for Pressure Driven Demand modeling in Water Distribution System. *Proceedings of CCWI2005 – Water Management for the 21st Century*, 215–226.
- Christensen, B. (1984). Discussion on “Flow velocities in pipelines” by R. D. Pomeroy. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), 1510–1512. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:10\(1510\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1510))
- Ciaponi, C., Creaco, E., Di Nardo, A., Di Natale, M., Giudicianni, C., Musmarra, D., & Santonastaso, G. (2019). Reducing Impacts of Contamination in Water Distribution Networks: A Combined Strategy Based on Network Partitioning and Installation of Water Quality Sensors. *Water*, 11(6), 1315. <https://doi.org/10.3390/w11061315>
- CONAGUA. (2007). Sectorización en redes de agua potable. In *Comisión Nacional del Agua* (Primera Ed). CONAGUA. www.cna.gob.mx
- Corcho Romero, F. H., & Duque Serna, J. I. (2005). *Acueductos. Teoría y Diseño* (5ta ed.). Sello Editorial Universidad de Medellín.
- Davis, M. J., & Janke, R. (2018). The effect of a loss of model structural detail due to network skeletonization on contamination warning system design: Case studies. *Drinking Water Engineering and Science*, 11(1), 49–65. <https://doi.org/10.5194/dwes-11-49-2018>
- Deuerlein, J. (2008). Decomposition Model of a General Water Supply Network Graph. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(6), 822–832. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:6\(822\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:6(822))
- Deuerlein, J. (2007). Efficient supply network management based on linear graph theory. *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, 63. [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)63](https://doi.org/10.1061/40941(247)63)
- Di Nardo, A., Di Natale, M., & Ciarmiello, M. (2009). Graph Theory As A Tool For Design Of District-Metered Water Supply Networks. *33rd IAHR 2009 Congress - Water Engineering for a Sustainable Environment*. <https://www.researchgate.net/publication/245542805>
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Giudicianni, C., Santonastaso, G., & Savic, D. (2018). Simplified Approach to Water Distribution System Management via Identification of a Primary Network. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000885](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000885)
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G. F., Tzatchkov, V. G., & Alcocer-Yamanaka, V. H. (2013). Water network sectorization based on a genetic algorithm and minimum dissipated power paths. *Journal Water Science and Technology: Water Supply*, 13(4), 951–957. <https://doi.org/10.2166/ws.2013.059>

- Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G. F., Tzatchkov, V. G., & Alcocer-Yamanaka, V. H. (2014). Water Network Sectorization Based on Graph Theory and Energy Performance Indices. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(5), 620–629. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000364](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000364)
- Di Nardo, Armando, Di Natale, M., Giudicianni, C., Santonastaso, G. F., Tzatchkov, V., Rodriguez Varela, J. M., & Alcocer Yamanaka, V. H. (2016). Water Supply Network Partitioning Based on Simultaneous Cost and Energy Optimization. *Procedia Engineering. International Conference on Efficient & Sustainable Water Systems Management toward Worth Living Development*, 162, 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.048>
- Di Nardo, Armando, Di Natale, M., Guida, M., & Musmarra, D. (2013). Water Network Protection from Intentional Contamination by Sectorization. *Water Resources Management*, 27(6), 1837–1850. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0133-y>
- Di Nardo, Armando, Di Natale, M., Santonastaso, G., Tzatchkov, V., & Alcocer-Yamanaka, V. (2015). Performance indices for water network partitioning and sectorization. *Water Science and Technology: Water Supply*, 15(3), 499–509. <https://doi.org/10.2166/ws.2014.132>
- Diao, K., Zhou, Y., & Rauch, W. (2013). Automated Creation of District Metered Area Boundaries in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(2), 184–190. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000247](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000247)
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269–271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
- Dini, M., & Tabesh, M. (2014). A New Method for Simultaneous Calibration of Demand Pattern and Hazen-Williams Coefficients in Water Distribution Systems. *Water Resources Management*, 28(7), 2021–2034. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0592-4>
- Eggenger, C. L., & Polkowski, L. B. (1976). Network Models and the Impact of Modeling Assumptions. *Journal AWWA*, 68(4), 189–196. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1976.tb02385.x>
- European Commission. (2015). *EU Reference Document Good Practices on Leakage Management WFD CIS WG PoM: Case Study Document*. <https://doi.org/10.2779/102151>
- Ferrari, G., Savic, D., & Becciu, G. (2014). Graph-Theoretic Approach and Sound Engineering Principles for Design of District Metered Areas. *Water Resources Planning and Management*, 140(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000424](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000424)
- Flechas, R. A. (2012). Efecto del uso de la ecuación de Darcy-Weisbach Vs la ecuación de Hazen-Williams en el diseño de redes matrices. *XX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*.
- Fortini, M., Bragalli, C., & Artina, S. (2014). Identifying the High-level Flow Model of Water Distribution Networks Using Graph Theory. *Procedia Engineering. 16th Water Distribution System Analysis Conference, WDSA2014: Urban Water Hydroinformatics and Strategic*, 89, 1192–1199. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.249>
- García-Serra, J., & Iglesias-Rey, P. (2002). Introducción a las redes de abastecimiento. In *Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua* (1era ed., pp. 1–37). Editorial UPV.
- García-Serra, J., & López, G. (2002). Elaboración de modelos. In *Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua* (1era ed., pp. 77–104). Editorial UPV.

- Giudicianni, C., Herrera, M., Di Nardo, A., & Adeyeye, K. (2020). Automatic Multiscale Approach for Water Networks Partitioning into Dynamic District Metered Areas. *Water Resources Management*, 34(2), 835–848. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02471-w>
- Giustolisi, O., Savic, D., & Kapelan, Z. (2012). Analysis of Simplification Errors for Water Distribution Models. *12th Annual Conference on Water Distribution Systems Analysis WDSA 2010*, 1400–1412. [https://doi.org/10.1061/41203\(425\)125](https://doi.org/10.1061/41203(425)125)
- Giustolisi, O., & Todini, E. (2009). Pipe hydraulic resistance correction in WDN analysis. *Urban Water Journal*, 6(1), 39–52. <https://doi.org/10.1080/15730620802541623>
- Giustolisi, Orazio, & Savic, D. (2010). Identification of segments and optimal isolation valve system design in water distribution networks. *Urban Water Journal*, 7(1), 1–15. <https://doi.org/10.1080/15730620903287530>
- Gomes, R., Marques, A., & Sousa, J. (2012). Decision support system to divide a large network into suitable District Metered Areas. *Water Science and Technology*, 65(9), 1667–1675. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.061>
- Grayman, W., Murray, R., & Savic, D. (2009). Effects of Redesign of Water Systems for Security and Water Quality Factors. *World Environmental and Water Resources Congress 2009*, 1–11. [https://doi.org/10.1061/41036\(342\)49](https://doi.org/10.1061/41036(342)49)
- Grayman, W., & Rhee, H. (2004). Assessment of skeletonization in network models. *Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000*, 10. [https://doi.org/10.1061/40517\(2000\)196](https://doi.org/10.1061/40517(2000)196)
- Hajebi, S., Temate, S., Barrett, S., Clarke, A., & Clarke, S. (2014). Water Distribution Network Sectorisation Using Structural Graph Partitioning and Multi-Objective Optimization. *Procedia Engineering*. *16th Water Distribution System Analysis Conference WDSA2014*, 89, 1144–1151. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.238>
- Hamberg, D., & Shamir, U. (1988a). Schematic models for distribution systems design. I: Combination concept. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(2), 129–140. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1988\)114:2\(129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:2(129))
- Hamberg, D., & Shamir, U. (1988b). Schematic models for distribution systems design. II: Continuum approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(2), 141–162. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1988\)114:2\(141\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:2(141))
- Herrera, M., Gutiérrez-Pérez, J., Izquierdo, J., & Perez-Garcia, R. (2011). Ubicación de sensores en un sistema de abastecimiento de agua basada en un criterio de zonas hidráulicas. *VII SELASI. Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería*.
- Hervás, M. (2017). *Proyecto de sectorización de la red de abastecimiento de agua potable a la ciudad de Valencia*. Tesis máster, Universitat Politècnica de València.
- Huang, Y., Zheng, F., Duan, H.-F., Zhang, Q., & Shen, Y. (2020). Impacts of Nodal Demand Allocations on Transient-Based Skeletonization of Water Distribution Systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001787](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001787)
- Huang, Y., Zheng, F., Duan, H.-F., Zhang, T., Guo, X., & Zhang, Q. (2019). Skeletonizing pipes in series within urban water distribution systems using a transient-based method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(2), 04018084. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001560](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001560)

- Ilaya-Ayza, A., Izquierdo, J., Pérez-García, R., Martins, C., & Ayala-Cabrera, D. (2017). La curva de consigna, una herramienta útil para la esqueletización, sectorización y determinación de la capacidad de una red de suministro de agua. *Acta Universitaria Multidisciplinary Scientific Journal*, 26, 54–63. <https://doi.org/10.15174/au.2016.1026>
- Ilaya-Ayza, Amilkar, Martins, C., Campbell, E., & Izquierdo, J. (2017). Implementation of DMAs in Intermittent Water Supply Networks Based on Equity Criteria. *Water (Switzerland)*, 9(11), 851. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w9110851>
- Izquierdo, J., Campbell, E., Montalvo, I., Pérez-garcía, R., & Ayala-cabrera, D. (2013). Error Analysis of Some Demand Simplifications in Hydraulic Models of Water Supply Networks. *Abstract and Applied Analysis*, 2013, 13. <https://doi.org/10.1155/2013/169670>
- Jiang, B., Shi, Y., Gao, J., & Zhao, H. (2013). Study on the simplification of the large water distribution network model. *ICPTT 2012: Better Pipeline Infrastructure for a Better Life - Proceedings of the International Conference on Pipelines and Trenchless Technology 2012*, 441–452. <https://doi.org/10.1061/9780784412619.048>
- Jung, B. S., Boulos, P. F., & Wood, D. J. (2007). Pitfalls of water distribution model skeletonization for surge analysis. *Journal American Water Works Association*, 99(12), 87–98. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2007.tb08109.x>
- Klise, K. A., Phillips, C. A., & Janke, R. J. (2013). Two-Tiered Sensor Placement for Large Water Distribution Network Models. *Journal of Infrastructure Systems*, 19(4), 465–473. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000156](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000156)
- Laucelli, D., Simone, A., Berardi, L., & Giustolisi, O. (2016). Optimal Design of District Metering Areas. *Procedia Engineering*, 162, 403–410. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.081>
- Liou, C. P. (1998). Limitations and proper use of the Hazen-Williams equation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(9), 951–954. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:9\(951\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:9(951))
- Lopez, G., Fuertes, V., & Ayza, M. (2009). Modelización matemática de una red en funcionamiento. In *Ingeniería Hidráulica. Aplicada a los sistemas de distribución de agua* (Tercera, pp. 655–681).
- Macho Stadler, M. (2002). ¿Qué es la topología? In *Sigma: Revista de matemáticas* (Issue 20, pp. 63–77). Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco-Eusko Jaurlaritzaren Argitalpen Zerbitzu Nagusia.
- Martínez-Solano, F., Iglesias-Rey, P., Mora-Meliá, D., & Fuertes-Miquel, V. (2017). Exact Skeletonization Method in Water Distribution Systems for Hydraulic and Quality Models. *Procedia Engineering. 18th International Conference on Water Distribution Systems WDSA 2016.*, 186, 286–293. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.246>
- Martínez-Solano, F. J., Iglesias-Rey, P. L., Mora-Meliá, D., & Fuertes-Miquel, V. S. (2014). Using the set point concept to allow water distribution system skeletonization preserving water quality constraints. *Procedia Engineering. 16th International Conference on Water Distribution System Analysis, WDSA 2014*, 89, 213–219. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.179>
- Martinez Alzamora, F., Ulanicki, B., & Salomons, E. (2014). Fast and Practical Method for Model Reduction of Large-Scale Water-Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(4), 444–456. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000333](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000333)

- Martínez, F. (2003). EPANET. Una potente herramienta para el análisis de redes de distribución de agua a presión. *Revista Hidropres. Tecnología de Captación, Gestión y Tratamiento Del Agua.*, 30–37.
- Martínez, F. (2017). *Manual de Usuario Epanet v2.00.12*. Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente - UPV. www.iiama.upv.es/iiama/es/transferencia/software/epanet-esp
- Martínez, F., & Bartolín, H. (2005). GISRed 1.0, a GIS-based Tool for Water Distribution Models for Master Plans. *Journal of Water Management Modeling*, 13, 79–92. <https://doi.org/10.14796/JWMM.R223-05>
- Martínez, F., & Lerma, N. (2019). *QGISRed* (v0.16). <https://qgisred.upv.es/>
- Maschler, T., & Savic, D. (1999). *Simplification of water supply network models through linearisation*. 1–119.
- Morrison, J. (2004). Managing leakage by District Metered Areas: A practical approach. *Water* 21, 6(1), 44–46.
- Morrison, J., Tooms, S., & Rogers, D. (2007). District Metered Areas: Guidance Notes. In *International Water Association (IWA)*. https://iwa-network.org/learn_resources/district-metered-areas-guidance-notes/
- Moser, G., German Paal, S., & Smith, I. F. C. (2015). Performance comparison of reduced models for leak detection in water distribution networks. *Advanced Engineering Informatics*, 29(3). <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.07.003>
- Ochoa Alejo, L. (2014). *Sectorización en redes de agua potable* (Primera). Asociación Mexicana de Empresas de Agua y Saneamiento de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- OWA. (2019). *The Water Distribution System Hydraulic and Water Quality Analysis Toolkit*. <https://github.com/OpenWaterAnalytics/EPANET/releases/tag/v2.2>
- Paluszczyszyn, D., Skworcow, P., & Ulanicki, B. (2013). Online simplification of water distribution network models for optimal scheduling. *Journal of Hydroinformatics*, 15(3), 652–665. <https://doi.org/10.2166/hydro.2013.029>
- Paluszczyszyn, D., Skworcow, P., & Ulanicki, B. (2015). A Tool for Practical Simplification of Water Networks Models. *Procedia Engineering. Computing and Control for the Water Industry (CCWI2015) Sharing the Best Practice in Water Management*, 119(1), 486–495. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.871>
- Perelman, L., Maslia, M., Ostfeld, A., & Sautner, J. (2008). Using aggregation/skeletonization network models for water quality simulations in epidemiological studies. *Journal American Water Works Association*, 100(6), 122–133. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2008.tb09659.x>
- Perelman, L., & Ostfeld, A. (2011). Topological clustering for water distribution systems analysis. *Environmental Modelling and Software*, 26(7), 969–972. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.01.006>
- Pesantez, J., Berglund, E., & Mahinthakumar, G. (2018). Automatic approach to design district metered areas for water distribution systems. *1st International WDSA / CCWI 2018 Joint Conference*.

- Pesantez, J., Zechman, B., & Mahinthakumar, G. (2020). Geospatial and Hydraulic Simulation to Design District Metered Areas for Large Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001243](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001243)
- Pohl, I. . (1969). *Bi-directional and heuristic search in path problems* [Stanford University]. <https://doi.org/10.2172/4785039>
- Prasad, T. D., & Park, N.-S. (2004). Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1), 73–82. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:1\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:1(73))
- Qin, T., & Boccelli, D. (2017). Grouping Water-Demand Nodes by Similarity among Flow Paths in Water-Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000788](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000788)
- Ranedo, D. (2009). *Elaboración del modelo matemático de la red de agua potable de Maspalomas (Gran Canaria) y estudio de sectorización de la misma* [Universitat Politècnica de València]. <http://hdl.handle.net/10251/14224>
- Reddy, P., Sridharan, K., & Rao, P. (1996). WLS Method for Parameter Estimation in Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(3), 157–164. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1996\)122:3\(157\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:3(157))
- Robert E. Tarjan. (1972). Depth-First Search and Linear Graph Algorithms. *SIAM Journal on Computing*, 1, 146–160. <https://doi.org/https://doi.org/10.1137/0201010>
- Rossman, L. A. (2000). EPANET 2. Users Manual. In *Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory* (Vol. 38). <https://doi.org/10.1177/0306312708089715>
- Saldarriaga, J., Bohorquez, J., David, C., Vega, L., Paez, D., Savic, D., Dandy, G., Fillion, Y., Grayman, W., & Kapelan, Z. (2019). Battle of the Water Networks District Metered Areas. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(4), 04019002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001035](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001035)
- Saldarriaga, J. G., García, S., & Leön, N. (2012). A Methodology to Preserve Water Quality Modeling in Skeletonized Network Models. In *World Environmental and Water Resources Congress 2012* (pp. 2932–2942). <https://doi.org/10.1061/9780784412312.294>
- Saldarriaga, J. G., Naranjo, G., & Rothstein, E. (2011). Metodologías para la sectorización de redes existentes de distribución de agua potable. *XIX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, 15.
- Saldarriaga, J. G., Ochoa, S., Nieto, L., & Rodríguez, D. (2010). Methodology for the skeletonization of water distribution network models with demand aggregation. *Integrating Water Systems - Proceedings of the 10th International on Computing and Control for the Water Industry, CCWI 2009*, 423–429.
- Saldarriaga, J. G., Ochoa, S., Rodriguez, D., & Arbelaez, J. (2009). Water Distribution Network Skeletonization Using the Resilience Concept. In K. Van Zyl (Ed.), *Proceedings of the 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference, WDSA 2008* (pp. 852–864). ASCE. [https://doi.org/10.1061/41024\(340\)74](https://doi.org/10.1061/41024(340)74)
- Salgado, R., Todini, E., & O’Connell, P. . (1988). Extending the gradient method to include pressure regulating valves in pipe networks. *International Symposium on Computer Modeling of Water Distribution Systems*, 12–13.

- Salomons, E. (2006). optiUnits - EPANet unit converter tool. In *Water Simulation*. <http://www.optiwater.com/optiunits/>
- Savić, D., & Ferrari, G. (2014). Design and performance of district metering areas in water distribution systems. *Procedia Engineering*, 89, 1136–1143. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.236>
- Shamir, U., & Salomons, E. (2008). Optimal Real-Time Operation of Urban Water Distribution Systems Using Reduced Models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(2), 181–185. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2008\)134:2\(181\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:2(181))
- Sharp, W. W., & Walski, T. M. (1988). Predicting Internal Roughness in Water Mains. *American Water Works Association*, 80(11), 34–40. <https://www.awwa.org/publications/>
- Sivakumar, P., & Prasad, R. (2014). Analysis of looped water distribution network with different head loss formula. In P. Lingfa & S. Gautam (Eds.), *Aspects of Mechanical Engineering and Technology for Industry. Volumen II* (pp. 178–185). Excel India Publishers. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1011.4640>
- Sousa, J., Ribeiro, L., Muranho, J., & Marques, A. S. (2015). Locating Leaks in Water Distribution Networks with Simulated Annealing and Graph Theory. *Procedia Engineering*, 119, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.854>
- Spaccesi, H. (2020). *Desarrollo de metodología para la simplificación de modelos de redes de abastecimiento de agua realizados con el software EPANET 2.2* [Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/10251/151172>
- Swamee, P., & Sharma, A. (1990). Descomposition of Large Water Distribution Systems. *Environment Engineering*, 116(2), 269–283. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1990\)116:2\(269\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1990)116:2(269))
- Tiejun, G. (2014). Efficient Identification of Segments in Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(6), 4014003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000395](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000395)
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(2), 115–122. [https://doi.org/10.1016/s1462-0758\(00\)00049-2](https://doi.org/10.1016/s1462-0758(00)00049-2)
- Todini, E., & Pilati, S. (1987). A gradient method for the analysis of pipe networks. *International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution*.
- Travis, Q., & Mays, L. (2007). Relationship between Hazen–William and Colebrook–White roughness values. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(11), 1270–1273. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:11\(1270\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:11(1270))
- Tuqiao, Z., Huaqi, Y., Shipeng, C., Tingchao, Y., & Yu, S. (2021). Optimized DMA Partition to Reduce Background Leakage Rate in Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001465](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001465)
- Tzatchkov, V., Alcocer-Yamanaka, V., & Bourguett, V. (2006). Graph Theory Based Algorithms for Water Distribution Network Sectorization Projects. *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium (WDSA)*, 1–15. [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)172](https://doi.org/10.1061/40941(247)172)

- Ulanicki, B., Zehnpfund, A., & Martínez, F. (1996). Simplification of Water Distribution Network Models. *Proc., 2nd Int. Conf. on Hydroinformatics*, 493–500. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4340.8404>
- USEPA-AWWA. (2002). *Effects of Water Age on Distribution System Water Quality*.
- Valiantzas, J. D. (2005). Modified Hazen–Williams and Darcy–Weisbach equations for friction and local head losses along irrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(4), 342–350. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:4\(342\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:4(342))
- Vegas Niño, O. (2012). *Herramientas de ayuda a la sectorización de redes de abastecimiento de agua basadas en la teoría de grafos aplicando distintos criterios* [Universitat Politècnica de València]. <http://hdl.handle.net/10251/18008>
- Vegas Niño, O. (2018). *Reverse-Pipes. Herramienta para cambiar la orientación de tuberías en modelos de Epanet*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24463.69282/1>
- Vegas Niño, O. (2019). *RunEpanetGIS. Almacenar los resultados de una simulación con EPANET y su posterior visualización desde cualquier software GIS (v0.5)*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33922.43208>
- Vegas Niño, O. (2020a). *Corunica. Herramienta para convertir coeficientes de rugosidad entre las fórmulas de pérdidas de Epanet*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18391.83364>
- Vegas Niño, O. (2020b). *Idehisub. Identificar subsistemas hidráulicos en modelos de Epanet*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11286.91206>
- Vegas Niño, O. (2021). *CheckSkelEpanet. Evaluación de modelos de redes simplificadas*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12820.83840>
- Vegas Niño, O. (2022). *iRamifMallas. Herramienta para identificar tuberías tipo puente y para ubicar elementos de control (v0.4)*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22270.25925>
- Vegas Niño, O., & Martínez Alzamora, F. (2021). *SkelEpanet: Tool to simplify models of hydraulic networks*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20488.55040/1>
- Vegas Niño, O., Martínez Alzamora, F., Alonso Campos, J. C., & Tzatchkov, V. (2017). *Iniciación a la Programación con la Toolkit de Epanet v2.00.12 en un Entorno Windows®* (1st ed.). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Vegas Niño, O., Martínez Alzamora, F., & Tzatchkov, V. (2021). *iDistricts. A tool to propose or identify hydraulic sectors*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16029.13284>
- Vegas Niño, O., & Tzatchkov, V. (2020). *CheckPressure. Herramienta para evaluar las presiones en múltiples escenarios de Epanet*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19981.77284>
- Vegas, O., & Grau, S. (2022). *iEmittersToNodes. Herramienta para convertir emisores en nodos de demanda*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21107.60964>
- Vegas, O., Santos-Tellez, R., Delgado-Galván, X., Rodríguez, J., & Martínez, F. (2019). Herramienta para convertir un modelo de datos de una red de suministro de agua en formato Shape y Epanet. *5tas Jornadas México – 11vas Jornadas Latinoamericanas y Del Caribe de GvSIG*, 9.
- Walski, T. (1993). Water distribution valve topology for reliability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 42(1), 21–27. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0951-8320\(93\)90051-Y](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0951-8320(93)90051-Y)
- Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., & Beckwith, S. (2003). *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Haestad Press.

-
- Warmerdam's, F. (1998). *Shapefile C Library*. <http://shapelib.maptools.org/>
- Water Authorities Association. (1985). *Leakage Control Policy and Practice*.
- Wu, Z., Hartell, W., Cook Jr, J., & Mankowski, R. (2007). *Technique for optimization of a simplified network model* (Patent No. US7302372B1).
- Yannopoulos, S., & Spiliotis, M. (2013). Water Distribution System Reliability Based on Minimum Cut-Set Approach and the Hydraulic Availability. *Water Resources Management*, 27(6), 1821–1836. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0163-5>
- Yazdani, A., & Jeffrey, P. (2010). A complex network approach to robustness and vulnerability of spatially organized water distribution networks. *Physics and Society*, 18. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1008.1770>
- Zhang, K., Yan, H., Zeng, H., Xin, K., & Tao, T. (2019). A practical multi-objective optimization sectorization method for water distribution network. *Science of the Total Environment*, 656. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.273>