



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE

**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

AUTOR:
D. HUGO J. BARTOLÍN AYALA

DIRECTOR:
Dr. D. FERNANDO MARTÍNEZ ALZAMORA

Valencia, Octubre de 2013

*Dedicado
a mis padres y hermana*

AGRADECIMIENTOS

No me gustaría dar por concluido el documento sin mostrar mi agradecimiento a todas esas personas que en mayor o menor medida han contribuido al avance y desarrollo de esta tesis doctoral.

En primer lugar a mi director de tesis D. Fernando Martínez Alzamora, por sus innovadoras ideas en materia de modelación y análisis de redes de abastecimiento urbano, por su gran capacidad de trabajo, por sus muchas sugerencias y sus buenos consejos a lo largo de estos últimos años de esfuerzo y dedicación en el grupo de investigación de Redes Hidráulicas y Sistemas a Presión (REDHISP). Huelga decir que sin él, esta tesis no hubiese sido posible.

A todos los miembros pasados y presentes del grupo REDHISP del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, por su ayuda y colaboración cuando la requerí, y en especial a mi compañero de trabajo Vicente Bou por el tiempo que dedicó a resolver mis dudas de programación y gestión de bases de datos. No hubo ni una sola que no fuese correctamente aclarada por su parte.

Quiero acordarme también de toda la gente de las empresas con las que he colaborado a lo largo de esos años de investigación en la Universidad. Desde aquí mi más sincero agradecimiento a los compañeros del departamento de explotación de Aguas de Valencia, por sus interesantes sugerencias y valiosos datos reales para mis pruebas de modelación y programación; igualmente, a los compañeros de la división de explotación de Aguas de Málaga por transmitirme su experiencia y visión práctica de lo que debe ser la gestión eficiente de una red de abastecimiento. A partir de sus ideas y observaciones he tratado de proporcionar un enfoque más pragmático y funcional a las herramientas desarrolladas con motivo de la tesis, intentando de este modo adaptarlas a las necesidades reales de una empresa.

A todos los miembros del *Centre for Water Systems* de la Universidad de Exeter (Reino Unido), y en especial a su líder y fundador, el profesor Dragan Savic, y al profesor Zoran Kapelan, con los que tuve la gran suerte de trabajar durante algunos meses. Ellos fueron los que me introdujeron en el apasionante mundo de la calibración y optimización de los modelos mediante el uso de algoritmos genéticos. A ellos les debo el módulo de calibración automática que incluye la aplicación GISRed.

A mis amigos de siempre, esos que nunca me han fallado ni me fallarán jamás. Mi agradecimiento a todos ellos por las muchas experiencias y vivencias compartidas en estos años de duro trabajo. Seguiremos adelante con determinación y sacrificio; ya sabíamos que el camino elegido no sería el más fácil.

Por último, la muestra de agradecimiento más importante y personal va dirigida a mis padres y a mi hermana, por todo su ánimo y apoyo incondicional en esos momentos difíciles que surgen a lo largo de una vida. A ellos, simplemente debo agradecerles todo.

Hugo J. Bartolín

Abu Dhabi (EAU), Septiembre de 2013

TESIS DOCTORAL

CONFECCIÓN DE MODELOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA DESDE UN SIG Y DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES

RESUMEN

Los importantes avances tecnológicos de las dos últimas décadas en el campo de las tecnologías de la información, y en concreto en el ámbito de la informática doméstica e industrial, han originado un cambio de paradigma en la gestión y la explotación de los sistemas urbanos de abastecimiento de agua por parte de las empresas gestoras. Las tradicionales políticas de gestión pública centradas en garantizar una mínima calidad de servicio con independencia de los costes asociados a los procesos de captación, tratamiento y distribución de agua, en muchos casos incluso desconocidos, han evolucionado hacia nuevos modelos más eficientes de gestión mixta o privada, al objeto de mejorar no solo la calidad del servicio que se ofrece a los usuarios, sino también optimizar los recursos reduciendo el coste económico y ocasionando el menor impacto ambiental posible.

Los nuevos retos que ha planteado la Directiva Marco del Agua¹ en Europa han supuesto un profundo cambio en todos los niveles de gestión del agua, donde la recuperación de los costes se impone como medida para el uso eficiente del agua y la sostenibilidad medioambiental de la actividad. En consecuencia, se han establecido nuevas prioridades en la forma de gestionar las infraestructuras. Estas prioridades pasan por la reducción de las pérdidas de agua y el aumento del rendimiento hídrico en las redes urbanas de abastecimiento de agua para el consumo humano. Asimismo, en un contexto más general que engloba el binomio agua-energía, también es deseable la mejora del rendimiento energético de estas instalaciones.

La **estrategia más extendida hoy en día para mejorar la gestión de las redes y aumentar su rendimiento es la sectorización**, que consiste básicamente en dividir la red en diversos sectores hidráulicos de menor tamaño, cuyas entradas y salidas de agua estén perfectamente controladas. Ello facilita la realización periódica de balances hídricos en cada uno de los sectores, y por ende, la evaluación del volumen de pérdidas de agua, para un determinado período de tiempo.

La configuración de los sectores no resulta trivial, por lo que conviene disponer de herramientas informáticas que asistan en el diseño de los mismos. Aquí es donde entran en juego los **modelos matemáticos de las redes de distribución de agua como instrumentos de apoyo en el estudio de las redes**.

La tesis doctoral que se presenta tiene por **objeto abordar la problemática actual de la gestión de las redes de agua urbanas mediante la conjunción de las nuevas tecnologías de tratamiento de la información con técnicas innovadoras para la construcción de modelos** de las redes de distribución, con el propósito último de facilitar su diagnóstico y **extender su uso en la toma de decisiones** que redunden en la consecución de los objetivos marcados.

Para ello se ha desarrollado una aplicación informática que trabaja sobre un **sistema de información geográfica (SIG)**, la cual integra: el programa de **simulación hidráulica y de calidad del agua EPANET 2**, herramientas novedosas de **análisis y diagnóstico de modelos**, herramientas automáticas de **sectorización** y herramientas de cálculo para la **realización de balances hídricos** en una red sectorizada a partir de medidas reales.

El trabajo pone de manifiesto la total **compatibilidad y complementariedad de los SIG y los modelos hidráulicos**, como tecnologías de apoyo a la evaluación y diagnóstico de las redes. Teniendo en cuenta que gran parte de la información vinculada a las redes posee alguna referencia geográfica, no sorprende que los sistemas de información geográfica se hayan convertido en destacadas herramientas para el manejo de dicha información. Al mismo tiempo, la integración de herramientas de modelación matemática y simulación, confiere a los SIG una nueva dimensión en el ámbito del estudio hidráulico de las redes. Si además se dota a esta integración de nuevas funcionalidades específicas orientadas no solo a facilitar la construcción del modelo, sino también a asistir al usuario en la toma de decisiones mediante potentes algoritmos basados en la aplicación de la teoría de grafos a los sistemas hidráulicos reales, se obtiene una herramienta de gran capacidad analítica y de patente actualidad, que abre nuevas posibilidades en el campo de la gestión y explotación eficiente de los sistemas de abastecimiento urbanos.

¹ Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas DO L 327 22/12/2000.

TESI DOCTORAL

**CONFECCIÓ DE MODELS DE XARXES DE DISTRIBUCIÓ D'AIGUA
MITJANÇANT UN SIG I DESENVOLUPAMENT DE FERRAMENTES DE SUPORT A
LA PRESA DE DECISIONS**

RESUM

Els importants avanços tecnològics de les dos últimes dècades en el camp de les tecnologies de la informació, i en concret en l'àmbit de la informàtica domèstica i industrial, han originat un canvi de paradigma en la gestió i l'explotació dels sistemes urbans d'abastiment d'aigua per part de les empreses gestores. Les tradicionals polítiques de gestió pública centrades a garantir una mínima qualitat de servici amb independència dels costos associats als processos de captació, tractament i distribució d'aigua, en molts casos inclús desconeguts, han evolucionat cap a nous models més eficients de gestió mixta o privada, a fi de millorar no sols la qualitat del servici que s'ofereix als usuaris, sinó també optimitzar els recursos reduint el cost econòmic i ocasionant el menor impacte ambiental possible.

Els nous reptes que ha plantejat la Directiva Marco de l'Aigua¹ a Europa han suposat un profund canvi en tots els nivells de gestió de l'aigua, on la recuperació dels costos s'imposa com a mesura per a l'ús eficient de l'aigua i la sostenibilitat mediambiental de l'activitat. En conseqüència, s'han establert noves prioritats en la forma de gestionar les infraestructures. Estes prioritats passen per la reducció de les pèrdues d'aigua i l'augment del rendiment hídric en les xarxes urbanes d'abastiment d'aigua per al consum humà. Així mateix, en un context més general que engloba el binomi aigua-energia, també és desitjable la millora del rendiment energètic d'estes instal·lacions.

L'estratègia més estesa hui en dia per a millorar la gestió de les xarxes i augmentar el seu rendiment és la sectorització, que consisteix bàsicament a dividir la xarxa en diversos sectors hidràulics més xicotets, les entrades i eixides d'aigua dels quals han d'estar perfectament controlades. Això facilita la realització periòdica de balanços hídrics en cadascun dels sectors, i per tant, l'avaluació del volum de pèrdues d'aigua, per a un determinat període de temps.

La configuració dels sectors no resulta trivial, per la qual cosa convé disposar de ferramentes informàtiques que assistisquen en el disseny dels mateixos. Ací és on entren en joc els **models matemàtics de les xarxes de distribució d'aigua com a instruments de suport en l'estudi de les xarxes**.

La tesi doctoral que es presenta té com a **objecte abordar la problemàtica actual de la gestió de les xarxes d'aigua urbanes mitjançant la conjunció de les noves tecnologies de tractament de la informació amb tècniques innovadores per a la construcció de models** de les xarxes de distribució, amb el propòsit últim de facilitar el seu diagnòstic i **estendre el seu ús en la presa de decisions** que redunden en la consecució dels objectius marcats.

Per a això s'ha desenvolupat una aplicació informàtica que treballa sobre un **sistema d'informació geogràfica (SIG)**, el qual integra: el programa de **simulació hidràulica i de qualitat de l'aigua EPANET 2**, ferramentes noves **d'anàlisi i diagnòstic de models**, ferramentes automàtiques de sectorització i ferramentes de càlcul per a la **realització de balanços hídrics** en una xarxa sectoritzada a partir de mesures reals.

El treball posa de manifest la total **compatibilitat i complementarietat dels SIG i els models hidràulics**, com a tecnologies de suport per a l'avaluació i diagnòstic de les xarxes. Tenint en compte que gran part de la informació vinculada a les xarxes posseix alguna referència geogràfica, no sorprén que els sistemes d'informació geogràfica s'hagen convertit en destacades ferramentes per al maneig d'eixa informació. Al mateix temps, la integració de ferramentes de modelació matemàtica i simulació, confereix als SIG una nova dimensió en l'àmbit de l'estudi hidràulic de les xarxes. Si a més a més es dota a esta integració de noves funcionalitats específiques orientades no sols a facilitar la construcció del model, sinó també a assistir a l'usuari en la presa de decisions mitjançant potents algorismes basats en l'aplicació de la teoria de grafs als sistemes hidràulics reals, s'obté una ferramenta de gran capacitat analítica i de patent actualitat, que obri noves possibilitats en el camp de la gestió i explotació eficient dels sistemes d'abastiment urbans.

¹ Directiva 2000/60/CE del Parlament Europeu i del Consell, de 23 d'octubre de 2000, per la qual s'estableix un marc comunitari d'actuació en l'àmbit de la política d'aigües DO L 327 22/12/2000.

BUILDING WATER DISTRIBUTION NETWORK MODELS FROM A GIS AND DEVELOPMENT OF DECISION SUPPORT TOOLS

ABSTRACT

Advances in information technology in the past two decades have seen innovations in the field of domestic and industrial computing that led to a paradigm shift in the management and operation of urban water systems by water utility companies. The traditional public management policy that focused on ensuring a minimum quality of service regardless of the costs associated with the processes of catchment, treatment and distribution of water, in many cases even unknown, have evolved towards more efficient cost sensitive models. These new wholly or partly public funded management systems improve not only the quality of service offered to users, but also optimize resources by reducing the cost and causing the minimum environmental impact.

The new challenges raised by the European Water Framework¹ Directive by imposing cost recovery to improve water efficiency and environmental sustainability have led to a significant change at all levels of water management. Consequently, new priorities have been established in terms of infrastructure management that require the reduction of water losses and the improvement of the water efficiency in urban networks for human consumption. Likewise, in a broader context which includes the water-energy binomial, it is also desirable to improve the energy efficiency and carbon emissions of these systems.

Today, **network sectoring is the most commonly used strategy to improve management and increase network performance**. It basically consists of dividing the network into several smaller hydraulic sectors, where water inlets and outlets are perfectly controlled. This simplifies the task of carrying out periodic water balances in each of the sectors, and allows water loss volume to be assessed for a given period of time.

As configuring network sectors is not a trivial task, it is therefore important to have appropriate tools to perform the task efficiently and effectively. **Mathematical models can play an important role as decision support tools to help water managers assess the performance of water network distribution systems**.

This thesis aims to **address the current problems of managing urban water networks by combining new information-processing technologies with innovative network modelling techniques**. It intends to facilitate the system diagnosis and **extend the use of models on the decision-making process** to provide better solutions to the management of urban water networks.

For this purpose a software extension that works on a **geographic information system (GIS)** has been developed. It integrates: the **hydraulic and water quality simulation program EPANET 2**, innovative tools for model **analysis and diagnostic**, **automatic tools for sectoring** and **computing tools to conduct water balances in the sectors** using actual measurements.

The work demonstrates the **compatibility and complementarity of GIS and hydraulic models** as technologies that can be used to support the assessment and diagnosis of water distribution networks. Considering that the majority of information linked to the network system has some geographic reference, it is not surprising that GIS has become a popular tool for dealing with such information. At the same time, the integration of mathematical modelling and simulation tools, offers the GIS a new dimension in the realm of hydraulic study of water networks. Furthermore, if this specific integration is provided with new features aimed not only to facilitate the model building, but also to assist the user in decision-making using powerful algorithms based on the application of the graph theory, the result is a powerful up-to-date analytical tool, which opens up new possibilities in the field of management and efficient operation of urban water supply systems.

¹ Directive (2000/60/CE) of the European Parliament, 23 October 2000, which establishes a European framework for community action in the water policy (DO L 327 22/12/2000).

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Parte 1ª. UTILIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA MODELIZACIÓN DE DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	25
1.1 JUSTIFICACIÓN	25
1.2 OBJETIVOS DE LA TESIS.....	27
1.3 CONTEXTO GENERAL	28
1.4 ANTECEDENTES	31
1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS	35
CAPÍTULO 2. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y SU APLICACIÓN A LA GESTIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE	41
2.1 DEFINICIÓN DE SIG.....	41
2.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	42
2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS SIG	44
2.3.1 Modelos de datos geográficos.....	44
2.3.2 Funciones analíticas de un SIG.....	45
2.4 APLICACIÓN DE LOS SIG EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO URBANO DE AGUA....	46
2.5 NECESIDAD DE INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS	48
CAPÍTULO 3. MODELOS HIDRÁULICOS. EL SOFTWARE SIMULACIÓN EPANET 2	53
3.1 LOS MODELOS MATEMÁTICOS HIDRÁULICOS	53
3.1.1 Tipos de modelos	54
3.1.1.1 Modelos Estáticos y Dinámicos.....	54
3.1.1.2 Modelos de Calidad y Cantidad	55
3.1.2 Componentes de un modelo. Ecuaciones de comportamiento	55
3.1.3 Ecuaciones de equilibrio del sistema	60
3.1.4 Simulaciones en periodo prolongado	63
3.1.4.1 Simulación en régimen estacionario o permanente (Steady-state simulation).....	63
3.1.4.2 Simulación en período prolongado o extendido (Extended-period simulation, EPS).....	64
3.2 EL SIMULADOR HIDRÁULICO EPANET 2	64
3.2.1 Introducción.....	64
3.2.2 Características generales de EPANET 2.....	65
3.2.3 El módulo de cálculo y la caja de herramientas.....	67
3.2.4 Inconvenientes de EPANET 2	68
CAPÍTULO 4. CONFECCIÓN DE MODELOS. APLICACIONES.....	73
4.1 TIPOS DE MODELOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN	73
4.1.1 Modelos Estratégicos	73
4.1.2 Modelos de Detalle	73
4.1.3 Modelos Operacionales.....	74
4.2 CAMPOS DE APLICACIÓN DE LOS MODELOS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA....	74

ÍNDICE DE CONTENIDOS

4.3 PASOS PARA LA CONFECCIÓN DE UN MODELO	76
4.3.1 Recopilación de información	76
4.3.2 Esqueletización de la red	78
4.3.3 Medidas de campo	78
4.3.4 Asignación de consumos	80
4.3.5 Calibración del modelo	82
4.3.6 Análisis y mantenimiento	83
4.4 EVOLUCIÓN Y TENDENCIA FUTURA DE LOS MODELOS.....	84
4.5 VENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DE LOS MODELOS EN UN ENTORNO SIG	85

CAPÍTULO 5. INTEGRACIÓN DE MODELOS EN UN SIG. LA APLICACIÓN GISRED .. 89

5.1 INTRODUCCIÓN	89
5.2 LA APLICACIÓN GISRED	90
5.2.1 Justificación del desarrollo de la aplicación GISRed.....	90
5.2.2 Concepción general de la aplicación.....	91
5.2.3 Principales prestaciones de la aplicación	92
5.2.4 Diagrama del flujo de trabajo de la aplicación GISRed.....	93
5.2.5 Estructura básica de datos de la aplicación	94
5.2.6 Temáticas gráficas.....	96
5.2.7 Descripción del procedimiento de construcción de un modelo con GISRed	97
5.2.7.1 Creación de Proyectos. Importación de la Información	97
5.2.7.2 Herramientas de Edición y Propiedades.....	99
5.2.7.3 Herramientas de Depuración y Verificación.....	101
5.2.7.4 Herramientas de simplificación de modelos.....	102
5.2.7.5 Interpolación de Cotas.....	102
5.2.7.6 Asignación de Demandas.....	103
5.2.7.7 Calibración del modelo.....	104
5.2.7.8 Cálculo y análisis de resultados.....	105
5.3 APLICACIONES	106
5.4 CONCLUSIONES.....	107

Parte 2ª. APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS A LA TOMA DE DECISIONES EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION DE AGUA

CAPÍTULO 6. CONCEPTOS DE LA TEORÍA DE GRAFOS

6.1 INTRODUCCIÓN	111
6.2 DEFINICIONES	111
6.3 REPRESENTACIÓN DE GRAFOS	114
6.3.1 Matriz de adyacencias	114
6.3.2 Listas de adyacencias.....	115
6.3.3 Grado de conectividad	115
6.4 ALGORITMOS DE BÚSQUEDA EN GRAFOS.....	116
6.4.1 Búsqueda en profundidad (Depth-First Search, DFS).....	116
6.4.2 Búsqueda en amplitud (Breadth-First Search, BFS).....	117

6.5	ÁRBOLES GENERADORES O DE EXPANSIÓN Y ÁRBOLES DE EXPANSIÓN DE MÍNIMO COSTE (MINIMUM SPANNING TREE)	118
6.5.1	Algoritmo de Boruvka	121
6.5.2	Algoritmo de Kruskal	122
6.5.3	Algoritmo de Prim	123
6.5.4	Árbol de trayectos mínimos. El algoritmo de Dijkstra	124
6.5.5	Topología de árbol	125
6.5.6	Ordenación topológica	126
6.6	MALLAS BÁSICAS O INDEPENDIENTES DE UN GRAFO	127
6.7	CONJUNTO DE CORTE (CUT-SET)	128
6.8	BOSQUES DE ÁRBOLES	129
6.9	GRAFOS DIRIGIDOS (DÍGRAFOS)	129

CAPÍTULO 7. APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS A LA GESTIÓN DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA 135

7.1	INTRODUCCIÓN	135
7.2	APLICACIONES A LA GESTION DE REDES DE DISTRIBUCIÓN	135
7.3	PROPIEDADES TOPOLÓGICAS DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA	137
7.4	ALGORITMO DE VERIFICACIÓN DE LA CONECTIVIDAD DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA	138
7.5	ANÁLISIS DE LAS SUBREDES Y SUBSISTEMAS HIDRÁULICOS EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA	140
7.6	ÁRBOL DE EXPANSIÓN DE MÍNIMO COSTE (MINIMUM SPANNING TREE)	142
7.6.1	Criterios de ponderación de las líneas de una red	142
7.6.2	Identificación de las ramas y cuerdas de un árbol de expansión	144
7.6.3	Identificación del árbol de mínima resistencia. Creación de la topología de árbol	146
7.6.3.1	MST mediante el algoritmo de Kruskal	146
7.6.3.2	MST mediante el algoritmo de Prim	148
7.6.3.3	MST mediante el algoritmo de Prim apoyado en una caché de memoria	150
7.6.4	Conjuntos de corte y mallas básicas	152
7.6.5	Generalización a redes con varias fuentes de suministro	155
7.6.6	Orden topológico de doble índice. Identificación por consulta de trayectos, subárboles, subredes y conjuntos de corte	157
7.6.7	Mantenimiento actualizado del MST. Cambios en tiempo real	162
7.7	PROCEDIMIENTOS PARA ACUMULAR UNA PROPIEDAD ASIGNADA A LOS NUDOS O TUBERÍAS DE LA RED SITUADOS AGUAS ABAJO DE UNA RAMA	163
7.7.1	Acumulación de propiedades asociadas a nudos situados aguas abajo de una rama	164
7.7.2	Acumulación de propiedades asociadas a tuberías situadas aguas abajo de una rama	166
7.8	Estructura de datos para albergar las propiedades topológicas de una red de distribución	168

CAPÍTULO 8. APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS AL ANÁLISIS DE FLUJOS Y LA SECTORIZACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA..... 173

8.1	EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE LA RED. DETECCIÓN DE CUELLOS DE BOTELLA Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE SUMINISTRO	173
8.1.1	Ejemplo. Análisis de los cuellos de botella en una red de transporte	177

ÍNDICE DE CONTENIDOS

8.2	ANÁLISIS DE CERRADAS EN UNA RED (POLÍGONOS DE CORTE)	181
8.2.1	Exploración e identificación de cerradas	181
8.2.2	Detección de zonas aisladas tras la identificación de la cerrada	185
8.2.3	Análisis de criticidad en la red.....	188
8.3	APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS A LA SECTORIZACIÓN	190
8.3.1	Introducción.....	190
8.3.2	Identificación de sectores hidrométricos básicos	190
8.3.3	Agrupación de sectores hidrométricos básicos. Sectores hidrométricos de modulación.....	193
8.3.4	Ejemplo de identificación de sectores básicos y sectores de modulación	196
8.3.5	Ayudas a la sectorización	204
8.3.5.1	Ejemplo de sectorización automática de una red.....	207
 CAPÍTULO 9. APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS A LA ESQUELETIZACIÓN DE MODELOS DE REDES		219
9.1	INTRODUCCIÓN	219
9.2	METODOLOGÍA DE ESQUELETIZACIÓN DE UN MODELO	220
9.3	ELIMINACIÓN DE RAMAS TERMINALES	221
9.3.1	Procedimiento implementado en ordenador.....	222
9.3.1.1	Observaciones.....	223
9.4	ELIMINACIÓN DE NUDOS INTERMEDIOS	224
9.4.1	Criterios para llevar a cabo la simplificación	225
9.4.1.1	Traslado de la demanda en el nudo intermedio (si existe)	226
9.4.1.2	Obtención de las características físicas de la tubería equivalente.....	227
9.4.2	Procedimiento implementado en ordenador.....	228
9.4.2.1	Observaciones.....	229
9.5	REDUCCIÓN DE MALLAS SIMPLES	230
9.5.1	Criterios prácticos para la identificación y eliminación de mallas simples.....	232
9.5.1.1	Identificación de las mallas simples y sus líneas de mayor y menor resistencia.....	232
9.5.1.2	Obtención de las características físicas de la tubería equivalente.....	233
9.5.2	Procedimiento implementado en ordenador.....	234
9.5.2.1	Observaciones.....	235
9.5.2.2	Caso particular de mallas aparentemente simples formadas dos cuerdas	236
9.6	REDUCCIÓN DE MALLAS COMPLEJAS	238
9.6.1	Criterios prácticos para llevar a cabo la simplificación	241
9.6.1.1	Identificación de las mallas básicas candidatas a ser abiertas	241
9.6.1.2	Identificación del subtrayecto de la malla a reforzar	241
9.6.1.3	Refuerzo de las tuberías del subtrayecto.....	242
9.6.1.4	Estrangulamiento de las tuberías del subtrayecto complementario.....	243
9.6.2	Procedimiento implementado en ordenador.....	244
9.6.2.1	Observaciones.....	245
9.7	PROCEDIMIENTO GENERAL IMPLEMENTADO DE SIMPLIFICACIÓN DE UNA RED COMPLEJA	247
9.8	PARÁMETROS LÍMITES Y PRECISIÓN DEL MODELO SIMPLIFICADO	248
9.9	EJEMPLO DE ESQUELETIZACIÓN DEL MODELO DE UNA RED	250

Parte 3ª. OBTENCION DE MODELOS HIDRAULICOS MEJOR AJUSTADOS A LA REALIDAD

CAPÍTULO 10. PROBLEMÁTICA DE LOS MODELOS REALES.....	265
10.1 INTRODUCCIÓN.....	265
10.2 ALMACENAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PARA LA CONFECCIÓN DE ARCHIVOS HISTÓRICOS	266
10.3 NUEVAS FUNCIONALIDADES PARA LA GESTIÓN INTEGRADA DE LA INFORMACIÓN DE LA RED	270
10.4 NUEVAS FUNCIONALIDADES PARA LA GESTIÓN DE LA DEMANDA AUTORIZADA ...	271
10.4.1 Introducción.....	271
10.4.2 Cálculo de la demanda por acometidas	272
10.4.3 Agrupación de las demandas por sectores hidrométricos de consumo (DMAs)	272
10.4.4 Modelo conceptual del sistema de suministro a una red urbana de distribución de agua orientado a la Gestión de la Demanda	273
10.4.4.1 Entidades.....	273
10.4.4.2 Puntos de suministro (individual, parcial y totalizador)	274
10.4.4.3 Relaciones.....	276
 CAPÍTULO 11. BALANCES HÍDRICOS EN LOS SECTORES HIDROMÉTRICOS DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA.....	 281
11.1 INTRODUCCIÓN.....	281
11.2 JUSTIFICACIÓN DEL MÉTODO ADOPTADO	285
11.3 CÁLCULO DEL VOLUMEN INYECTADO A CADA DISTRITO HIDROMÉTRICO	287
11.3.1 Introducción.....	287
11.3.2 Tratamiento de los datos en tiempo real	289
11.3.3 Datos de partida.....	290
11.3.4 Procedimiento básico para el cálculo del volumen inyectado a cada DMA.....	292
11.3.5 Procedimiento implementado para el cálculo volumen inyectado a cada DMA.....	293
11.3.5.1 Identificación de los subperiodos de agrupación	294
11.3.5.2 Cálculo de los volúmenes acumulados por los caudalímetros en cada subperiodo	296
11.3.5.3 Cálculo de los volúmenes acumulados por cada asociación DMA-Caudalímetro en cada subperiodo	296
11.3.5.4 Cálculo del volumen suministrado / almacenado en los depósitos en cada subperiodo....	297
11.3.5.5 Cálculo de los volúmenes inyectados a cada DMA.....	299
11.3.6 Resumen de tablas de resultados generadas durante el proceso de cálculo del volumen inyectado a cada DMA	300
11.4 CÁLCULO DEL VOLUMEN AUTORIZADO EN LOS PUNTOS DE SUMINISTRO.....	304
11.4.1 Introducción.....	304
11.4.2 Procedimiento para llevar a cabo la corrección del consumo	307
11.4.2.1 FASE 1: Determinación del volumen registrado en las acometidas.....	307
11.4.2.2 FASE 2: Distribución del volumen de las acometidas entre los puntos de suministro terminales	310
11.4.3 Ejemplo gráfico de aplicación del procedimiento.....	311
11.5 CÁLCULO DEL RENDIMIENTO HÍDRICO	317
11.5.1 Introducción.....	317
11.5.2 Procedimiento básico para el cálculo del rendimiento	319
11.5.3 Ejemplo gráfico de aplicación del procedimiento.....	321
11.6 CONCLUSIONES.....	328

CAPÍTULO 12. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.....	333
12.1 CONCLUSIONES.....	333
12.2 APORTACIONES ORIGINALES DE LA TESIS	336
12.3 DESARROLLOS FUTUROS	340
ANEXO 1. MODELO LÓGICO GEODATABASE DE LA EXTENSIÓN GISRED	351
A1.1 MODELO LÓGICO DE LA GEODATABASE PRINCIPAL DE LA EXTENSIÓN GISRED.....	351
A1.1.1 Tablas de Declaraciones.....	351
A1.1.2 Tablas de Usuarios.....	354
A1.1.3 Tablas de Cartografía de Red.....	358
A1.1.4 Tablas de Operaciones.....	372
A1.1.5 Tablas de Mediciones	379
A1.1.6 Tablas de Sectores.....	386
A1.1.7 Tablas de Suministros	393
A1.1.8 Tablas de Consumos	403
A1.1.9 Auditoría	409
A1.2 INCORPORACIÓN DE INFORMACIÓN A LA GDB	411
ANEXO 2. CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA A PRESIÓN MEDIANTE LA EXTENSIÓN GISRED.....	415
A2.1 INTRODUCCIÓN.....	415
A2.2 INSTALACIÓN DE LA EXTENSIÓN GISRED.....	415
A2.3 CARGA DE LA EXTENSIÓN	415
A2.4 CONFIGURACIÓN DE UN PROYECTO GISRed.....	417
A2.5 VALORES POR DEFECTO DEL PROYECTO	417
A2.6 AGREGAR ARCHIVOS CAD AL ESCENARIO Y FIJAR PROPIEDADES.....	418
A2.6.1 Fijar las propiedades de los temas procedentes de dibujos CAD	420
A2.7 IMPORTAR LA CAPA DE TUBERÍAS	421
A2.8 DETECCIÓN Y DEPURACIÓN DE ERRORES	424
A2.8.1 Comprobación de la conectividad de la red	424
A2.8.2 Herramientas de edición	426
A2.8.3 Añadir elementos.....	427
A2.8.4 Edición de propiedades.....	429
A2.9 INTERPOLACIÓN DE COTAS	430
A2.9.1 Generación de un temático de cotas	432
A2.10 ASIGNACIÓN DE CONSUMOS.....	433
A2.10.1 Reparto de consumos por calles.....	434
A2.10.2 Definición de una curva de modulación	434
A2.10.3 Asignación de consumos registrados por calles	435
A2.10.4 Asignación del consumo no registrado	436
A2.11 LEYES DE CONTROL.....	437
A2.11.1 Definir leyes de control simples para la válvula reductora de presión	437
A2.12 OPCIONES DE CÁLCULO	439
A2.13 SIMULACIÓN	440
A2.13.1 Exportación del modelo a Epanet 2.....	440
A2.13.2 Simulación desde GISRed.....	440

ANEXO 3. EXAMPLE OF A NETWORK MODEL CALIBRATION	445
A3.1 INTRODUCTION	445
A3.2 NETWORK PROPERTIES	445
A3.3 CALIBRATION PROCESS	448
A3.4 GROUPING THE NETWORK	452
A3.5 CALIBRATION INPUT FILES	453
A3.6 RUNNING A CALIBRATION AND IMPORTING RESULTS	454
A3.7 VIEWING CALIBRATION RESULTS	454
A3.7.1 STATISTICS.....	457
ANEXO 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	463

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. COMPONENTES BÁSICOS DE UN MODELO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA	55
FIGURA 2. REPRESENTACIÓN DE UNA LÍNEA Y SUS NUDOS EXTREMOS.....	58
FIGURA 3. NOMENCLATURA EMPLEADA PARA FORMULAR LAS ECUACIONES DE EQUILIBRIO DE UNA RED.....	62
FIGURA 4. FLUJO DE DATOS DURANTE EL PROCESO DE ANÁLISIS DE UNA RED UTILIZANDO LA CAJA DE HERRAMIENTAS DE EPANET.....	67
FIGURA 5. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO DE LA RED UTILIZANDO LA EXTENSIÓN GISRED.	94
FIGURA 6. ESTRUCTURA RELACIONAL BÁSICA DE TABLAS EN LA APLICACIÓN GISRED.	96
FIGURA 7. IDENTIFICACIÓN DE LAS CONDUCCIONES SOBRE EL FONDO URBANO EN FORMATO CAD, COMO PASO PREVIO A LA IMPORTACIÓN.....	98
FIGURA 8. MODELO TOPOLÓGICO DE LA RED, GENERADO TRAS LA CAPTURA DE LA CAPA CAD	99
FIGURA 9. FORMULARIOS DE PROPIEDADES DE LOS ELEMENTOS FÍSICOS.....	100
FIGURA 10. OTROS DIÁLOGOS DE PROPIEDADES.....	100
FIGURA 11. NAVEGADOR DEL TEMA DE ERRORES EN NUDOS.	101
FIGURA 12. COMPROBACIÓN DE LA CONECTIVIDAD DE LA RED TRAS LA IMPORTACIÓN. EN COLOR LOS SEGMENTOS DE RED DESCONECTADOS.	102
FIGURA 13. NUBE DE PUNTOS DE COTA Y SUPERFICIE DE INTERPOLACIÓN (GRID) PARA LA ASIGNACIÓN DE COTAS A LOS NUDOS DEL MODELO.	103
FIGURA 14. ASIGNACIÓN DE CONSUMOS (NUDOS CARGADOS EN VERDE).	104
FIGURA 15. DIÁLOGO DE INTRODUCCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL ALGORITMO GENÉTICO.	105
FIGURA 16. MAPA DE PRESIONES TRAS UNA SIMULACIÓN EN GISRED Y VISUALIZACIÓN ALTERNATIVA DE LOS RESULTADOS EN EPANET 2.....	106
FIGURA 17. EJEMPLO DE GRAFO. EN ESTE CASO SE TRATA DE UN MULTIGRAFO.	112
FIGURA 18. IDENTIFICACIÓN DE UN TRAYECTO SOBRE UN GRAFO.	112
FIGURA 19. EJEMPLO DE UN GRAFO INCONEXO.....	113
FIGURA 20. EJEMPLO DE UNA MALLA O CICLO.....	113
FIGURA 21. EJEMPLO DE ÁRBOL (IZQUIERDA) Y ÁRBOL DE EXPANSIÓN O GENERADOR (DERECHA).	114
FIGURA 22. EJEMPLO DE UN GRAFO Y SU MATRIZ DE ADYACENCIAS.	114
FIGURA 23. LISTA DE ADYACENCIAS DEL MISMO GRAFO ANTERIOR.	115
FIGURA 24. DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE BÚSQUEDA EN PROFUNDIDAD.....	117
FIGURA 25. DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE BÚSQUEDA EN AMPLITUD.....	118
FIGURA 26. BÚSQUEDA DEL ÁRBOL DE EXPANSIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE BÚSQUEDA EN PROFUNDIDAD (DFS).	119
FIGURA 27. BÚSQUEDA DEL ÁRBOL DE EXPANSIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE BÚSQUEDA EN AMPLITUD (BFS).	120
FIGURA 28. EJEMPLO DE ÁRBOL DE EXPANSIÓN DE UN GRAFO Y SU TOPOLOGÍA. LÍNEAS DE ACCESO A CADA NUDO Y GRADO DE CONECTIVIDAD DEL ÁRBOL.	125
FIGURA 29. GRAFO DIRIGIDO Y SU HOMÓLOGO REORDENADO TRAS APLICAR UNA ORDENACIÓN TOPOLÓGICA.....	126
FIGURA 30. EJEMPLO DE MALLAS BÁSICAS O INDEPENDIENTES.	127
FIGURA 31. IDENTIFICACIÓN DE UNA MALLA BÁSICA.....	127
FIGURA 32. EJEMPLO DE CONJUNTO DE CORTE DE UN GRAFO.	128
FIGURA 33. EJEMPLO DE UN GRAFO DIRIGIDO O DÍGRAFO.	129
FIGURA 34. EJEMPLO DE UN ÁRBOL DIRIGIDO.	130
FIGURA 35. EJEMPLO DE UN BOSQUE DE ÁRBOLES DIRIGIDOS (COLORES ROJO Y AZUL).	131
FIGURA 36. RELACIÓN TOPOLÓGICA INTRODUCIDA POR EULER.....	137
FIGURA 37. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN DE LA CONECTIVIDAD.	139

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 38. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE ANÁLISIS DE LAS SUBREDES Y SUBSISTEMAS.....	141
FIGURA 39. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL ÁRBOL DE EXPANSIÓN.	145
FIGURA 40. IDENTIFICACIÓN DE LAS RAMAS Y CUERDAS DEL ÁRBOL DE EXPANSIÓN DE MÍNIMO COSTE MEDIANTE EL ALGORITMO DE KRUSKAL.....	147
FIGURA 41. IDENTIFICACIÓN DEL ÁRBOL DE EXPANSIÓN DE MÍNIMO COSTE MEDIANTE EL ALGORITMO DE PRIM Y CREACIÓN DE LA TOPOLOGÍA DE ÁRBOL.....	149
FIGURA 42. OBTENCIÓN DE LA TOPOLOGÍA DEL ÁRBOL DE EXPANSIÓN DE MÍNIMO COSTE MEDIANTE EL ALGORITMO DE PRIM APOYADO EN UNA CACHÉ DE MEMORIA.	151
FIGURA 43. CONJUNTO DE CORTE ASOCIADO A UNA RAMA DE UNA RED.....	152
FIGURA 44. OBTENCIÓN DEL CONJUNTO DE CORTE ASOCIADO A CADA UNA DE LAS RAMAS DE UN ÁRBOL DE EXPANSIÓN EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN.	154
FIGURA 45. OBTENCIÓN DE LOS DIFERENTES ÁRBOLES DE EXPANSIÓN MÍNIMOS DESDE CADA UNA DE LAS FUENTES DE SUMINISTRO DE LA RED.	156
FIGURA 46. RECORRIDO (COLOR AMARILLO) DESDE UN NUDO DE LA RED HASTA EL NUDO DE CABECERA DEL QUE DEPENDE SEGÚN EL ANÁLISIS TOPOLÓGICO.	156
FIGURA 47. ORDENACIÓN TOPOLÓGICA DE LAS RAMAS DEL ÁRBOL DE EXPANSIÓN.	158
FIGURA 48. ACUMULACIÓN DE DEMANDAS SOBRE LOS NUDOS DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN.	165
FIGURA 49. ACUMULACIÓN DE ACOMETIDAS EN LAS RAMAS DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN.	167
FIGURA 50. ESTRUCTURA DE TABLAS PARA ALBERGAR LA INFORMACIÓN TOPOLÓGICA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN.....	168
FIGURA 51. PROCEDIMIENTO DE DETECCIÓN DE LOS CUELLOS DE BOTELLA DE LA RED.	175
FIGURA 52. EJEMPLO DE ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE. ÁRBOL DE MÍNIMA RESISTENCIA DE LA RED.	178
FIGURA 53. EJEMPLO DE ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE. DETECCIÓN DE LOS CUELLOS DE BOTELLA.	179
FIGURA 54. EJEMPLO DE ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE. ANÁLISIS DEL CONJUNTO DE CORTE DEL CUELLO DE BOTELLA DETECTADO.	180
FIGURA 55. IDENTIFICACIÓN DE LA CERRADA PARA AISLAR EL TRAMO DE TUBERÍA EN EL QUE SE HA PRODUCIDO UNA INCIDENCIA.	184
FIGURA 56. IDENTIFICACIÓN DE LA NUEVA CERRADA EN EL CASO DE DESCARTAR DOS VÁLVULAS DE SECCIONAMIENTO POR IMPOSIBILIDAD DE MANIOBRA.	185
FIGURA 57. POSTPROCESO EN BUSCA DE NUEVOS TRAMOS AISLADOS A CONSECUENCIA DE LA CERRADA GENERADA.....	186
FIGURA 58. DETECCIÓN DE TODAS LAS TUBERÍAS AISLADAS TRAS LA IDENTIFICACIÓN DE LA CERRADA.	187
FIGURA 59. ANÁLISIS DE CRITICIDAD EN LA RED.....	189
FIGURA 60. PROCESO DE IDENTIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE DISTRITOS HIDROMÉTRICOS.	190
FIGURA 61. PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE LAS DMA'S BÁSICAS.	192
FIGURA 62. PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE LAS DMA'S AGRUPADAS.	195
FIGURA 63. RED DE EJEMPLO CLASIFICADA POR DIÁMETROS.	197
FIGURA 64. MODELO MATEMÁTICO DE LA RED REAL DE EJEMPLO. UBICACIÓN DE MEDIDORES DE CAUDAL Y VÁLVULAS DE SECCIONAMIENTO CERRADAS.....	198
FIGURA 65. DMAS BÁSICAS IDENTIFICADAS POR EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA.	199
FIGURA 66. IDENTIFICACIÓN DE LOS DISTRITOS HIDROMÉTRICOS DE MODULACIÓN.....	201
FIGURA 67. AGRUPACIÓN DE LAS DMA'S BÁSICAS 2, 3, 4 Y 5 EN DOS NUEVAS DMAS DE MODULACIÓN.	202
FIGURA 68. DETALLE DE LA AGRUPACIÓN DE DMA'S BÁSICAS EN UNA DMA DE MODULACIÓN.	203
FIGURA 69. PROCESO DE SECTORIZACIÓN AUTOMÁTICA.	206
FIGURA 70. ÁRBOL DE EXPANSIÓN DE MÍNIMO COSTE (MST) ORDENADO TOPOLÓGICAMENTE, LISTO PARA SER SECTORIZADO.	208
FIGURA 71. RED SECTORIZADA AUTOMÁTICAMENTE SIGUIENDO UN CRITERIO DE 500 ACOMETIDAS POR SECTOR.....	210
FIGURA 72. RED SECTORIZADA AUTOMÁTICAMENTE SIGUIENDO UN CRITERIO DE 620 ACOMETIDAS POR SECTOR.....	212

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 73. COMPARACIÓN DE LA SECTORIZACIÓN CLÁSICA Y LA SECTORIZACIÓN AUTOMÁTICA PARA UN CRITERIO DE 1.000 ACOMETIDAS POR SECTOR.....	215
FIGURA 74. REGLA 1. ELIMINACIÓN DE RAMAS TERMINALES.	221
FIGURA 75. PROCEDIMIENTO DE ELIMINACIÓN DE RAMAS TERMINALES (ETAPA 1).....	223
FIGURA 76. ELIMINACIÓN DE UN NUDO DE CONECTIVIDAD 3 SIGUIENDO LA REGLA 1.....	224
FIGURA 77. REGLA 2. ELIMINACIÓN DE NUDOS INTERMEDIOS.....	225
FIGURA 78. TRASLADO DE LA DEMANDA EN EL NUDO INTERMEDIO A LOS NUDOS EXTREMOS.	226
FIGURA 79. SUSTITUCIÓN DE DOS TUBERÍAS EN SERIE CON EL MISMO CAUDAL POR UNA EQUIVALENTE.	227
FIGURA 80. PROCEDIMIENTO DE ELIMINACIÓN DE NUDOS INTERMEDIOS (ETAPA 2).	229
FIGURA 81. MALLA SIMPLE CONFIGURADA POR SÓLO DOS NUDOS.	231
FIGURA 82. REGLA 3. REDUCCIÓN DE MALLAS SIMPLES.	232
FIGURA 83. CONDICIÓN DE IDENTIFICACIÓN DE UNA MALLA SIMPLE.	233
FIGURA 84. SUSTITUCIÓN DE DOS TUBERÍAS SIMPLES EN PARALELO POR UNA EQUIVALENTE.	233
FIGURA 85. PROCEDIMIENTO DE ELIMINACIÓN DE MALLAS SIMPLES (ETAPA 3).....	235
FIGURA 86. CUERDA NO ELIMINABLE EN LA ETAPA 3 POR NO CERRAR UNA MALLA SIMPLE.....	236
FIGURA 87. CONFIGURACIÓN DE UNA MALLA APARENTEMENTE SIMPLE A PARTIR DE DOS MALLAS.	237
FIGURA 88. DIVERSAS CONFIGURACIONES DE MALLAS COMPLEJAS.	238
FIGURA 89. REGLA 4. CANCELACIÓN DEL CAUDAL CIRCULANTE POR UNA CUERDA PARA PERMITIR SU ELIMINACIÓN.	240
FIGURA 90. CÁLCULO DE LOS DIÁMETROS EQUIVALENTES DEL SUBTRAYECTO A REFORZAR.....	243
FIGURA 91. PROCEDIMIENTO DE ELIMINACIÓN DE MALLAS COMPLEJAS (ETAPA 4).	245
FIGURA 92. PROCEDIMIENTO GENERAL IMPLEMENTADO MEDIANTE CÓDIGO PARA LA SIMPLIFICACIÓN DE UN MODELO DE RED.	248
FIGURA 93. RED DE EJEMPLO A SIMPLIFICAR.....	250
FIGURA 94. CAUDALES Y PRESIONES MEDIAS DIARIAS EN EL MODELO ORIGINAL NO SIMPLIFICADO.	252
FIGURA 95. CAUDALES Y PRESIONES MEDIAS DIARIAS EN EL MODELO SIN RAMALES TERMINALES.	253
FIGURA 96. CAUDALES Y PRESIONES MEDIAS DIARIAS EN EL MODELO SIN NUDOS INTERMEDIOS.	254
FIGURA 97. CAUDALES Y PRESIONES MEDIAS DIARIAS EN EL MODELO SIN MALLAS SIMPLES.....	255
FIGURA 98. CAUDALES Y PRESIONES MEDIAS DIARIAS EN EL MODELO SIN MALLAS COMPLEJAS.	256
FIGURA 99. CAUDALES Y PRESIONES MEDIAS DIARIAS EN EL MODELO SIN MALLAS COMPLEJAS (CRITERIO DE ELIMINACIÓN DE MALLAS COMPLEJAS MENOS RESTRICTIVO).	257
FIGURA 100. ESTRUCTURA DE DATOS SOPORTADA POR LA ÚLTIMA VERSIÓN DE GISRED.	270
FIGURA 101. DMAs UNIDAS POR TUBERÍA CERRADA Y TUBERÍA CON CAUDALÍMETRO.	294
FIGURA 102. SUPERPOSICIÓN DEL PERÍODO DE CONSULTA CON LOS TIEMPOS DE ASOCIACIÓN DMA-CAUDALÍMETRO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS SUBPERÍODOS DE CÁLCULO.....	294
FIGURA 103. SUPERPOSICIÓN DEL PERÍODO DE CONSULTA CON LOS TIEMPOS DE ASOCIACIÓN DMA-CAUDALÍMETRO Y CON LOS INSTANTES EN LOS QUE SE PRODUCE UNA AVERÍA EN ALGÚN CAUDALÍMETRO O SE DETECTA POCA FIABILIDAD EN LAS LECTURAS DE LOS MISMOS.	295
FIGURA 104. SUPERPOSICIÓN DEL PERÍODO DE CONSULTA CON LOS TIEMPOS DE ASOCIACIÓN DMA-CAUDALÍMETRO Y CON LOS INSTANTES EN LOS QUE SE PRODUCE LA APERTURA DE UNA VÁLVULA FRONTERA.	296
FIGURA 105. OBTENCIÓN DE LOS SUBPERÍODOS DE CÁLCULO.	297
FIGURA 106. CONSIDERACIÓN DEL VOLUMEN SUMINISTRADO / ALMACENADO EN LOS DEPÓSITOS EN CADA SUBPERÍODO.	299
FIGURA 107. ESTRUCTURA ARBÓREA DE LOS PUNTOS DE SUMINISTRO.	305
FIGURA 108. EJEMPLO GRÁFICO DE APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO.....	312
FIGURA 109. PERÍODOS DE VIGENCIA DE ACOMETIDAS, SUMINISTROS TOTALIZADORES Y SUMINISTRO TERMINAL.	313
FIGURA 110. DIVISIÓN DE LOS INTERVALOS DE VALIDEZ DE LOS SUMINISTROS POR EL PERÍODO DE CONSULTA.	314

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 111. DIVISIÓN DE LOS INTERVALOS DE VALIDEZ DE LOS SUMINISTROS SEGÚN EL TIPO DE VOLUMEN DEL MISMO (REGISTRADO/ESTIMADO).	314
FIGURA 112. INTERSECCIÓN DE LAS FECHAS DE VALIDEZ DE LAS ACOMETIDAS CON LAS FECHAS DE VALIDEZ DE LOS SUMINISTROS ASOCIADOS A LAS MISMAS, CONSERVANDO EL CARÁCTER REGISTRADO O ESTIMADO DE ÉSTOS.	315
FIGURA 113. SUBPERÍODOS EN LOS QUE VAN A QUEDAR DIVIDIDOS LOS SUMINISTROS TERMINALES, TRAS COMPARAR Y CRUZAR TODAS LAS FECHAS DE VIGENCIA DE ACOMETIDAS, TOTALIZADORES Y SUMINISTROS TERMINALES.....	316
FIGURA 114. SECTOR HIDROMÉTRICO TOMADO COMO EJEMPLO PARA EL CÁLCULO DEL RENDIMIENTO.	321
FIGURA 115. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ESTADO DEL SECTOR HIDROMÉTRICO DEL EJEMPLO ENTRE T1 Y T2.	321
FIGURA 116. SUBPERÍODOS DE VALIDEZ PROVISIONALES DE LA DMA DEL EJEMPLO.	322
FIGURA 117. SUBPERÍODOS DE TIEMPO EN LOS QUE SE DEBE TENER EN CUENTA EL DEPÓSITO CONTENIDO EN LA DMA.....	322
FIGURA 118. SUBPERÍODOS DE VALIDEZ DEFINITIVOS QUE SE DEBEN CONSIDERAR EN EL BALANCE HÍDRICO DE LA DMA DEL EJEMPLO.	323
FIGURA 119. INTERSECCIÓN DE LOS SUBPERÍODOS DE VALIDEZ DE LA DMA CON LOS SUBPERÍODOS DE VALIDEZ DE LAS ACOMETIDAS.....	324
FIGURA 120. IDENTIFICACIÓN DE LOS SUBPERÍODOS DE VALIDEZ EN LA DMA Y TRASLADO A LAS ACOMETIDAS. CÁLCULO DEL VOLUMEN INYECTADO EN LOS PERÍODOS DE VALIDEZ.	325
FIGURA 121. ESQUEMA SIMPLIFICADO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN CONSIDERADA EN EL EJEMPLO DE LA DMA.....	326
FIGURA 122. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN AUTORIZADO EN LOS PERIODOS DE VALIDEZ DE LA DMA.....	327
FIGURA 123. SECUENCIA DE TRABAJO EN GISRED.....	339
FIGURA 124. TABLAS DE DECLARACIONES.	351
FIGURA 125. TABLAS DE USUARIOS.	354
FIGURA 126. TABLAS DE CARTOGRAFÍA DE RED.....	358
FIGURA 127. TABLAS DE LÍNEAS.	364
FIGURA 128. TABLAS DE NUDOS.	370
FIGURA 129. TABLAS DE CURVAS.	371
FIGURA 130. TABLAS DE OPERACIONES.	372
FIGURA 131. TABLA DE CONTROLES SIMPLES.....	372
FIGURA 132. TABLAS DE CONTROLES COMPUESTOS.....	376
FIGURA 133. TABLA DE MANIOBRAS DE LAS VÁLVULAS DE CORTE.....	377
FIGURA 134. TABLA DE INYECCIONES DE CALIDAD.....	377
FIGURA 135. TABLAS DE MEDICIONES.....	379
FIGURA 136. TABLAS DE PUNTOS DE MEDIDA Y MEDIDORES.....	382
FIGURA 137. TABLAS DE SECTORES.....	386
FIGURA 138. TABLAS DE SUMINISTROS.....	393
FIGURA 139. TABLAS DE ACOMETIDAS.....	394
FIGURA 140. TABLAS DE PUNTOS DE SUMINISTRO.....	396
FIGURA 141. TABLAS DE ASOCIACIONES ENTRE SUMINISTROS Y USOS.....	400
FIGURA 142. TABLAS DE CNAE Y PHCS.....	401
FIGURA 143. TABLAS DE ASOCIACIONES DE LÍNEAS Y DMA'S CON ACOMETIDAS.....	402
FIGURA 144. TABLAS DE CONSUMOS.....	403
FIGURA 145. TABLAS DE CONSUMOS REGISTRADOS Y ESTIMADOS.....	406
FIGURA 146. TABLA DE CONTADORES.....	408
FIGURA 147. TABLAS DE AUDITORÍA.....	409
FIGURA 148. CARGA DE LA EXTENSIÓN GISRED.....	416
FIGURA 149. DOCUMENTO 'SCENARIOS'.....	416
FIGURA 150. NUEVO PROYECTO GISRED.....	417

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 151. VALORES POR DEFECTO DEL PROYECTO.....	418
FIGURA 152. DIBUJO CAD EN LA TABLA DE CONTENIDOS DEL ESCENARIO (TOC).....	419
FIGURA 153. CAPA DE ETIQUETAS DE DIÁMETRO EN EL TEMA CAD DE ANOTACIONES.....	420
FIGURA 154. CAPA DE TUBERÍAS EN EL TEMA CAD DE LÍNEAS.....	420
FIGURA 155. CAPAS DE CAD A IMPORTAR.....	421
FIGURA 156. SELECCIÓN DEL TIPO DE DATOS A IMPORTAR.....	422
FIGURA 157. DIÁLOGO DE IMPORTACIÓN DE FICHEROS CAD.....	422
FIGURA 158. MODELO DE RED TRAS LA IMPORTACIÓN DEL FICHERO CAD.....	424
FIGURA 159. DIÁLOGO DE COMPROBACIÓN DE LA CONECTIVIDAD DE LA RED.....	425
FIGURA 160. PARTES DESCONECTADAS DE UNA RED IMPORTADA.....	425
FIGURA 161. BARRAS DE HERRAMIENTAS DE GISRED.....	426
FIGURA 162. CONEXIÓN DE TUBERÍAS.....	427
FIGURA 163. AÑADIR UN ÉMBALSE SOBRE UN NUDO.....	428
FIGURA 164. INSERTAR UNA VÁLVULA REDUCTORA EN UNA TUBERÍA.....	428
FIGURA 165. PROPIEDADES DE LA VÁLVULA REDUCTORA.....	429
FIGURA 166. EDICIÓN DE PROPIEDADES EN GRUPO. ASIGNACIÓN DE RUGOSIDAD.....	430
FIGURA 167. CURVAS DE NIVEL.....	431
FIGURA 168. GRID CON EFECTO DE RELIEVE (HILLSHADE).....	431
FIGURA 169. DIÁLOGO DE INTERPOLACIÓN DE COTAS.....	432
FIGURA 170. GENERACIÓN DE UN TEMÁTICO DE COTAS EN NUDOS.....	433
FIGURA 171. CALLEJERO DE LA POBLACIÓN.....	434
FIGURA 172. IMPORTAR CURVA DE MODULACIÓN.....	435
FIGURA 173. DIÁLOGO DE ASIGNACIÓN DE DEMANDAS.....	436
FIGURA 174. AJUSTE DEL CONSUMO NO REGISTRADO.....	436
FIGURA 175. ESTADÍSTICAS DE CONSUMOS.....	437
FIGURA 176. DIÁLOGO DE LEYES DE CONTROL.....	437
FIGURA 177. AÑADIR LEYES DE CONTROL SIMPLES AL MODELO DE RED.....	438
FIGURA 178. LEYES DE CONTROL SIMPLES PARA LA VÁLVULA REDUCTORA.....	438
FIGURA 179. OPCIONES DE CÁLCULO.....	439
FIGURA 180. SIMULACIÓN DEL MODELO DESDE EPANET2.....	440
FIGURA 181. SIMULACIÓN DEL MODELO DESDE GISRED V1.0.....	441
FIGURA 182. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN. PRESIONES (15H) DISTRIBUIDAS POR PARCELAS.....	441
FIGURA 183. ANYTOWN NETWORK LAYOUT.....	445
FIGURA 184. CALIBRATION EXAMPLE. DEMAND PATTERN.....	447
FIGURA 185. GISRED CALIBRATION PROCESS. FLOWCHART.....	448
FIGURA 186. NEW CALIBRATION CONFIGURATION.....	449
FIGURA 187. LOADING CONDITIONS DIALOG.....	449
FIGURA 188. IMPORTING FIELD DATA.....	450
FIGURA 189. FIELD DATA AFTER THE IMPORTATION.....	450
FIGURA 190. GA PARAMETERS DIALOG.....	451
FIGURA 191. CALIBRATION MANAGER.....	452
FIGURA 192. CALIBRATION MENU BAR OPTIONS.....	452
FIGURA 193. GROUP EDITING DIALOG.....	453
FIGURA 194. PIPE PROPERTY DIALOG. CHANGING CALIBRATION ROUGHNESS GROUP.....	453
FIGURA 195. CALIBRATION RESULTS DIALOG.....	455
FIGURA 196. DIFFERENT TYPES OF GRAPHS SHOWING CALIBRATION RESULTS.....	456

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. FÓRMULAS DE PÉRDIDAS DE CARGA EN CONDUCCIONES.	58
TABLA 2. CRITERIOS PARA LA INSTALACIÓN DEL NÚMERO DE MEDIDORES EN UNA RED SEGÚN EL WRC.....	79
TABLA 3. CRITERIOS PARA LA INSTALACIÓN DEL NÚMERO DE MEDIDORES EN UNA RED SEGÚN EL ECAC.	79
TABLA 4. CAPACIDAD DE TRANSPORTE TEÓRICA DEL CUELLO DE BOTELLA Y DE LAS TUBERÍAS QUE CONFORMAN SU CONJUNTO DE CORTE.	180
TABLA 5. CAPACIDAD TEÓRICA DE TRANSPORTE DE LA RAMA Y SU CONJUNTO DE CORTE.	180
TABLA 6. RELACIÓN ENTRE EL CAUDAL TEÓRICO A ABASTECER Y LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE TOTAL DE LA RAMA Y SU CONJUNTO DE CORTE.	181
TABLA 7. PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA CERRADA. PRIMER PASO.....	183
TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DE LOS SECTORES HIDROMÉTRICOS BÁSICOS IDENTIFICADOS CON EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA.	200
TABLA 9. CARACTERÍSTICAS DE LOS SECTORES HIDROMÉTRICOS DE MODULACIÓN IDENTIFICADOS CON EL ALGORITMO DE AGRUPACIÓN DE DMAS BÁSICAS.	200
TABLA 10. CARACTERÍSTICAS DE LA SECTORIZACIÓN AUTOMÁTICA PARA UN CRITERIO DE 500 ACOMETIDAS.....	209
TABLA 11. CARACTERÍSTICAS DE LA SECTORIZACIÓN AUTOMÁTICA PARA UN CRITERIO DE 620 ACOMETIDAS.....	211
TABLA 12. CARACTERÍSTICAS DE LA SECTORIZACIÓN AUTOMÁTICA PARA UN CRITERIO DE 1.000 ACOMETIDAS.....	213
TABLA 13. RED SECTORIZADA AUTOMÁTICAMENTE SIGUIENDO UN CRITERIO DE 1.000 ACOMETIDAS POR SECTOR.....	214
TABLA 14. CUADRO RESUMEN DE LAS ETAPAS DE SIMPLIFICACIÓN DEL MODELO DE RED.	258
TABLA 15. RESULTADOS DE PRESIÓN EN LOS MODELOS SIMPLIFICADOS OBTENIDOS.	261
TABLA 16. ERRORES EN LAS PRESIONES MEDIAS EN LOS NUDOS DE CADA UNO DE LOS MODELOS CON RESPECTO A LOS NUDOS DEL MODELO ORIGINAL.....	261
TABLA 17. BALANCE HÍDRICO-ECONÓMICO. INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION (IWA), [ALEGRE ET AL, 2000].	282
TABLA 18. DISTRIBUCIÓN DEL VOLUMEN INYECTADO A UN SECTOR DESDE UN PUNTO DE VISTA PURAMENTE HIDRÁULICO..	283
TABLA 19. FASE 1: DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN REGISTRADO EN LAS ACOMETIDAS.....	308
TABLA 20. FASE 2: DISTRIBUCIÓN DEL VOLUMEN DE LAS ACOMETIDAS ENTRE LOS PUNTOS DE SUMINISTRO TERMINALES..	311

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 JUSTIFICACIÓN

Los significativos avances tecnológicos que se han producido en estas dos últimas décadas en el campo de las tecnologías de la información y la informática doméstica e industrial, han provocado cambios substanciales en la manera de gestionar los sistemas de abastecimiento urbano. La tradicional gestión de los abastecimientos urbanos ha evolucionado hacia nuevas técnicas de supervisión y explotación de las infraestructuras hidráulicas al objeto de mejorar la calidad del servicio que se ofrece a los usuarios, optimizando los recursos y ocasionando el menor impacto ambiental posible.

Las actuales políticas de gestión han dejado de centrarse única y exclusivamente en satisfacer la demanda de los abonados a cualquier precio, para adoptar una nueva concepción basada en satisfacer las necesidades de agua de los consumidores, siguiendo una serie de criterios sostenibles encaminados a ahorrar costes asociados a la explotación y minimizar las pérdidas de agua y de energía.

En los últimos años, se ha experimentado un notable cambio de actitud en la utilización de los recursos hídricos por parte de las compañías gestoras, debido fundamentalmente a la mayor escasez de agua de calidad y al aumento de los costes energéticos asociados a los procesos de captación, tratamiento y distribución de agua para el consumo humano. Si a todo ello se añade el constante incremento de la demanda derivado del aumento de la población y de los usos agrícolas, industriales y turísticos, no sorprende que las compañías hayan optado por invertir fuertes sumas de dinero en modernizar sus infraestructuras, y en implantar nuevas técnicas y métodos de gestión, respaldados por aplicaciones informáticas que ofrezcan un excelente soporte en las tareas diarias de control, operación y mantenimiento del sistema de abastecimiento.

Asimismo, los nuevos retos que ha planteado la Directiva Marco del Agua en Europa han supuesto un profundo cambio en todos los niveles de gestión del agua, donde la recuperación de los costes se impone como medida para el uso eficiente del agua y la sostenibilidad medioambiental de la actividad.

Con el fin de promover un desarrollo social sostenible, el agua debe ser gestionada de una manera eficiente. Para mejorar la eficiencia en la gestión, deben perseguirse diversos objetivos entre los que cabe destacar: la reducción de las pérdidas de agua y el aumento del rendimiento hidráulico en las redes, la reducción de la energía consumida en la captación, tratamiento y distribución del agua, el aseguramiento de la calidad final del agua suministrada a los abonados, la garantía de unas presiones suficientes y no excesivas en todos los puntos de la red, la garantía del suministro minimizando el tiempo de interrupción del servicio, etc.

Las redes urbanas de distribución de agua potable están formadas por complejos entramados de tuberías que conectan usualmente diversas fuentes de suministro, para garantizar así el servicio. En la mayoría de casos, la gran complejidad a la que han llegado estos sistemas se traduce en un desconocimiento del funcionamiento real de la red y por tanto, del recorrido que realiza el agua a lo largo del conjunto de tuberías, desde los puntos de producción hasta los puntos de consumo.

La solución más extendida hoy en día para mejorar la gestión de la red con el objetivo principal de aumentar su rendimiento hídrico es la **sectorización**, que consiste básicamente en dividir la red en diversos sectores de menor tamaño, cuyas entradas y salidas de agua estén perfectamente controladas. La sectorización se ha empleado tradicionalmente para regular las presiones de suministro en zonas específicas de la red, si bien recientemente ha adquirido una nueva dimensión con el objeto de controlar y reducir las fugas de agua.

La realización de balances hídricos en cada uno de esos sectores es posible mediante la instalación de caudalímetros en todos aquellos puntos de entrada y salida y la medición del consumo en su interior mediante la instalación de contadores de agua en todos los puntos de suministro a los abonados. Para definir y delimitar los distintos sectores, es necesario identificar aquellas tuberías que conecten sectores adyacentes y cerrar las válvulas de seccionamiento existentes o bien instalar unas nuevas para su aislamiento, configurando lo que se conocen como válvulas frontera. La identificación de las tuberías de entrada y salida, y de las válvulas de seccionamiento a cerrar para configurar los distintos sectores no resulta trivial, por lo que conviene disponer de mapas, digitales en el mejor de los casos, sobre los que diseñar y plantear las posibles configuraciones y alternativas de sectorización.

Una vez dividida la red en sectores hidrométricos, resulta más fácil evaluar la distribución de caudales en cada sector y con ello evaluar las fugas, sobre todo en períodos nocturnos. Por tanto, el estudio de sectorización supone la medida más efectiva para la detección de pérdidas de agua y su posterior localización y reparación en función de la prioridad que se atribuya a cada sector.

La sectorización no debe definirse sólo en términos de configuración de la red, sino que debe entenderse como un método de gestión permanente. Para ello es imprescindible diseñar un sistema de información capaz de recibir, almacenar y tratar diariamente los datos obtenidos por los equipos de medición, vinculando dichos datos con el inventario de la red, la información de facturación de la empresa, las tareas de operación y mantenimiento, etc, de forma que se pueda analizar el estado y funcionamiento real del sector. Esto permitirá llevar a cabo un diagnóstico del sector en términos hidráulicos, que facilitará la toma de decisiones ligadas a tareas de explotación y planificación de inversiones en la red. La sectorización es, en definitiva, una opción estratégica que reduce el área de inspección para la detección y localización de anomalías como roturas, fugas o deficiencias de presión.

En muchas ocasiones la sectorización termina siendo un proceso dinámico, lo que complica la gestión de una red sectorizada. En efecto, mientras que para efectuar balances globales conviene definir sectores estables de gran tamaño, para el análisis de los mínimos nocturnos conviene en cambio declarar sectores relativamente pequeños, lo que conlleva un incremento notable de los costes de sectorización. Pero los sectores pequeños dificultan el mantenimiento de la red, obligando en muchas ocasiones a abrirlos para dar servicio mientras se efectúa una reparación; el hecho de que algunos de los sectores no sean permanentes, complica la realización de balances hídricos en los mismos. Una solución práctica consiste en agrupar los sectores para poder obtener balances fiables; otras veces el gestor prefiere configurar solo temporalmente los sectores más pequeños cuando hay que confirmar la existencia de una fuga sospechosa. Todo ello viene a complicar el diseño y la gestión de una red sectorizada, dependiendo de los objetivos buscados en cada caso.

La elaboración de un modelo matemático de la red de abastecimiento capaz de simular el comportamiento de la red sectorizada bajo diversas hipótesis de funcionamiento, facilita enormemente el proceso de diseño de la sectorización en su etapa de gabinete y ahorra

muchos costes en la etapa de implantación y ejecución posterior de los sectores. Asimismo disponer del modelo de la red resulta esencial para la fase de explotación, a la hora de delimitar los sectores activos en cada caso.

1.2 OBJETIVOS DE LA TESIS

La tesis doctoral que se presenta tiene por objeto **abordar la problemática actual de la gestión avanzada de toda la información** vinculada a las redes de abastecimiento urbano, mediante la **conjunción de diversas tecnologías de tratamiento de la información** y otras **técnicas innovadoras de análisis de redes**, que permitan abordar y asistir de una manera eficiente en el complejo proceso de construcción y análisis de un **modelo matemático** de una red en servicio, la posterior sectorización de la red y la explotación de los datos tomados, una vez en servicio.

El contenido de la tesis queda justificado ante la inexistencia en el mercado de herramientas de análisis integral de la información asociada con las redes de abastecimiento de agua, cuyo objetivo principal sea mejorar su rendimiento hidráulico a través de la conjunción e integración de: un potente **sistema informático de gestión de información espacial y alfanumérica**, un **programa de simulación hidráulica y de calidad** del agua, **técnicas** novedosas de **análisis y diagnóstico de redes** de tuberías, **técnicas automáticas de sectorización** y el **desarrollo de eficientes algoritmos de cálculo para la realización de balances hídricos** en la red sectorizada.

Para ello se abordan inicialmente las capacidades de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y se analizan sus posibilidades en la gestión de las redes urbanas en conexión con el modelo hidráulico de la misma. Con tal motivo se desarrollarán herramientas orientadas a facilitar la confección de dicho modelo, integrándolas en el propio entorno SIG a través de la aplicación GISRed, confeccionada con motivo de la Tesis.

Sin embargo, las aportaciones principales de la Tesis se centrarán en el desarrollo de herramientas orientadas a gestionar una red hidráulica basadas en la configuración topológica de la misma. Para ello, tras revisar algunos conceptos asociados con la teoría de grafos, se adaptarán y desarrollarán nuevos algoritmos destinados a resolver muchos de los problemas reales que se plantean en la gestión diaria de las redes de suministro de agua, como la detección de cuellos de botella, la identificación de las líneas de flujo, rutas de suministro alternativas, etc. Entre ellos se concederá especial importancia a los algoritmos dedicados a la sectorización de las redes, y otros destinados a reducir la complejidad de las redes reales mediante su esqueletización.

Finalmente se abordará la problemática de la explotación de las redes reales, destacando la gestión de la demanda como uno de los objetivos prioritarios. Así, a la configuración topológica de la red y la declaración de los sectores hidrométricos, habrá que añadir acometidas, puntos de suministro y contadores, y también el estado real de válvulas y medidores, para poder efectuar balances hídricos con garantías, que permitan orientar adecuadamente las inversiones y rentabilizar éstas.

Todo ello supone dar un salto cualitativo en el campo de la confección y la utilización de los modelos de simulación hidráulica y de calidad como herramientas de estudio y diseño de la red, abriendo las puertas a la futura investigación y desarrollo de **nuevas técnicas de diagnóstico de redes** en servicio. Con ello se proporciona además una filosofía de trabajo y una plataforma única para la implantación de novedosas herramientas que asistan en la toma de decisiones a

propósito de la gestión óptima de las redes, con una inversión mínima en recursos humanos y económicos.

1.3 CONTEXTO GENERAL

La tendencia generalizada y en muchos casos ineludible en relación al uso eficiente de los recursos hídricos y al ahorro de costes de explotación de las redes en servicio, ha provocado una mayor inversión en tecnología por parte de las empresas suministradoras, buscando soluciones integrales que permitan gestionar de forma eficiente las diversas fuentes de información corporativa acerca de la red. Una de las soluciones más innovadoras ha sido la integración de los modelos hidráulicos de simulación en los sistemas de información geográfica. En esta última década, los sistemas de información geográfica han madurado lo suficiente como para incorporar datos de modelación hidráulica que históricamente han sido difíciles de manejar o incluso incompatibles con las estructuras de datos manejadas por el SIG. Gracias a los últimos avances en las tecnologías de gestión de la información, las grandes compañías suministradoras pueden hacer un uso conjunto de herramientas tradicionalmente independientes, dando lugar a un cambio en la forma de gestionar las redes de abastecimiento urbano.

Los SIG y los modelos hidráulicos son tecnologías complementarias, por lo que su integración bajo una misma plataforma de trabajo aumenta el valor que añade cada tecnología por separado. Los resultados de la modelación hidráulica pueden ser manejados desde el SIG proporcionando un acceso rápido a datos cartográficos adicionales que permitan, por ejemplo, analizar el riesgo o probabilidad de fallo de una tubería, planificar tareas de reparación y mantenimiento de la red, estudiar la capacidad de transporte de determinadas arterias, analizar la garantía de suministro de un sector de la red o planificar inversiones. La clave para una óptima integración reside en asegurar la compatibilidad de las estructuras de datos del SIG y del motor de simulación hidráulica y permitir una eficiente sincronización entre las mismas. La integración de los modelos hidráulicos en los SIG proporciona accesibilidad inmediata a información actualizada, tanto cartográfica como de campo, y permite hacer uso de todas las herramientas y funcionalidades propias del SIG.

Siguiendo esa línea de investigación, los **primeros desarrollos** de la tesis que se presenta tienen su **origen** en la **integración del software de modelación matemática de redes de distribución de agua a presión EPANET en el sistema de información geográfica ArcView**, mediante el diseño de un modelo de datos común capaz de gestionar la información del modelo de la red desde el propio sistema de información geográfica.

La integración transparente del programa de modelación y simulación hidráulica requirió una compleja labor de desarrollo, personalización y adaptación al entorno de trabajo propio del SIG. De este modo se dotó al SIG de capacidad adicional para la **modelación y calibración** de redes de distribución de agua a presión, ofreciendo un mayor potencial para la construcción eficiente de modelos y para la **toma de decisiones derivadas de los resultados de la simulación** de los mismos. Entre todas las funcionalidades desarrolladas y ofrecidas por la integración SIG-modelo, destacan: la captura de datos geográficos y alfanuméricos de fuentes diversas para la generación de la topología de red; las diversas opciones disponibles para la asignación espacial de la demanda del sistema; la interpolación de cotas en los nudos del modelo; la calibración del modelo mediante un algoritmo genético incorporado; la simulación del modelo y la recuperación de los resultados de la simulación con el fin de tomar decisiones en la gestión y operación del sistema de abastecimiento.

Sin embargo, tras el manejo de todas las herramientas implementadas en proyectos reales de modelación hidráulica y simulación, y sobre todo con la utilización práctica de los modelos **como instrumentos de apoyo en la redacción de planes directores** de redes de abastecimiento, surgieron nuevas **necesidades de análisis y diagnóstico** de las redes mediante el empleo de los modelos matemáticos.

Como consecuencia, se abordó una segunda etapa de desarrollo en la que se diseñaron **nuevas funcionalidades** en el entorno SIG que permitieran analizar las características y particularidades de las redes **desde un punto de vista topológico**, es decir, atendiendo únicamente a la relación entre las líneas y nudos del modelo y sus propiedades físicas, y cuyos resultados se pudieran emplear para tomar decisiones en la gestión diaria de los abastecimientos. El resultado fue una serie de herramientas de análisis topológico, desarrolladas a partir de **algoritmos basados en la teoría de grafos**, capaces de: verificar la **conectividad** del modelo de la red, detectar **partes aisladas de la red hidráulicamente compatibles**; **evaluar la capacidad de transporte** de las tuberías detectando los **cuellos de botella**; identificar rápidamente las válvulas de seccionamiento a cerrar para **aislar un determinado tramo** de tubería y **detectar las acometidas** que quedan fuera de servicio como consecuencia del cierre; llevar a cabo un análisis de la **criticidad de las tuberías** de la red; **identificar** de forma automática los **sectores hidrométricos** existentes en una red en servicio; **sectorizar de forma automática** una red en función del número máximo de acometidas admitidas en cada sector hidrométrico y **simplificar el modelo** para la obtención de modelos estratégicos hidráulicamente compatibles. Todas estas herramientas aportan un gran valor añadido a la aplicación SIG de modelación hidráulica y **umentan la capacidad de diagnóstico** y análisis de la red a través del modelo, todo ello **desde el mismo entorno SIG**.

La última etapa de la Tesis, surge como consecuencia de un proyecto de investigación llevado a cabo en el seno del grupo de Redes Hidráulicas y Sistemas a Presión (REDHISP) del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), en cuyo seno se ha desarrollado la misma. El proyecto planteaba la necesidad de **extender las funcionalidades** ya disponibles en la aplicación desarrollada hasta ese momento, **hacia la gestión informatizada de las pérdidas de agua en las redes** y su aplicación a un caso de estudio de una red en servicio de gran tamaño. En ese contexto, se decidió potenciar las herramientas de modelación y sectorización existentes en ese momento, mediante un **nuevo modelo de datos** que permitiera por una parte identificar y/o **configurar nuevos sectores hidrométricos** en el modelo de la red y por otra, poder realizar balances hídricos al objeto de **diagnosticar el nivel de pérdidas de agua y el origen de las mismas** en cada uno de ellos.

Una vez realizada y/o validada la sectorización de la red con la ayuda del modelo, e instalados los caudalímetros y transductores de presión requeridos, resultaba imperioso realizar una **conexión** eficiente con las **bases de datos históricos** generados por las señales ligadas a los medidores de agua inyectada, monitorizadas por el sistema **SCADA**, y su **comparación** con el **agua registrada por el parque de contadores** con posibilidad de **telelectura**, lo que iba a exigir nuevos algoritmos de cálculo ante el evidente aumento del volumen de datos registrados a manejar. La consecuencia fue el desarrollo de un conjunto de herramientas informáticas para el tratamiento de dicha información y la implementación de complicados algoritmos que tuviesen en cuenta toda la **problemática real, tanto en la medida del agua inyectada en la red como en el registro de las lecturas de los contadores**, al objeto de poder elaborar balances hídricos fiables. Así por ejemplo, se desarrollaron nuevas funcionalidades orientadas al análisis de los consumos realizados en los puntos de suministro domiciliarios, considerando toda la casuística real existente entre acometidas, puntos de suministro, contadores y lecturas de éstos. Por otra

parte se mejoró el acceso a los datos de campo del sistema SCADA con el que trabaja la compañía gestora para la realización de los balances hídricos por sectores y el posterior cálculo de sus rendimientos.

Como resultado de la conjunción de todas las herramientas y funciones desarrolladas, es posible finalmente: **crear modelos matemáticos** de una red de abastecimiento urbano desde un entorno SIG; **analizar y simular hidráulicamente** el comportamiento de la red bajo diversos escenarios y efectuar un **diagnóstico** de la misma; evaluar y mejorar el funcionamiento del modelo hasta **obtener un modelo calibrado** que se asemeje al funcionamiento real del sistema; **optimizar la operación del sistema, detectar anomalías y analizar los posibles fallos de suministro** en caso de alguna eventualidad o emergencia, mediante la utilización de las diversas herramientas de análisis implementadas.

En definitiva, los **esfuerzos de desarrollo se han orientado a prestar asistencia al diagnóstico de las redes, sirviendo como base para la implantación de una estrategia de localización de pérdidas reales de agua en el sistema**, todo ello con la finalidad última de mantener en todo momento la calidad del servicio a los usuarios del sistema. La gran ventaja es que por el hecho de trabajar en un entorno GIS, toda la información puede ser consultada geográficamente y contrastarse tanto con la cartografía de la red como con otros fondos cartográficos georreferenciados que aporten información complementaria.

El resultado final de todos los desarrollos implementados es el conjunto de herramientas que se presentan y describen en profundidad a lo largo de los próximos capítulos de la tesis.

El **objetivo** último que se ha pretendido alcanzar con la redacción de la tesis **es poner de manifiesto la gran utilidad de los modelos matemáticos de las redes de abastecimiento urbano en la toma diaria de decisiones relacionadas con la planificación, explotación y operación de las redes**, y ofrecer una visión objetiva de todas las **ventajas que puede aportar la integración** de los modelos en entornos SIG.

1.4 ANTECEDENTES

Los primeros esfuerzos realizados en el pasado al objeto de modelar matemáticamente el comportamiento de las redes de distribución, se dedicaron al desarrollo de sofisticados programas de simulación. Sin embargo, con los años, la experiencia demostró que el mayor problema a la hora de utilizar los modelos matemáticos no residía tanto en la capacidad de simulación de éstos, como en la **disponibilidad y tratamiento de los datos de partida, y en la depuración y verificación** de los mismos. La labor de recopilación y comprobación de los datos en la fase de construcción de los modelos ha sido siempre la más costosa, ya que una red de distribución es un sistema dinámico y cambiante. Solo a modo de ejemplo, cabe destacar que los elementos de regulación modifican su estado continuamente, las demandas varían día a día, el estado de las tuberías depende de las operaciones de mantenimiento y rehabilitación de las redes y pueden cambiar en cuestión de semanas, e incluso los trazados cambian también con el tiempo, aunque a más largo plazo, debido a la continua ampliación y mejora de la redes.

Debido a los **inconvenientes que presentaba la introducción y tratamiento de grandes volúmenes de datos** desde los simuladores, empezaron a aparecer en el mercado herramientas, tanto comerciales como gratuitas, que asistían al usuario en la recopilación y tratamiento de la información desde un SIG, para su posterior exportación a un simulador hidráulico mediante un archivo de texto plano. Entre las aplicaciones pioneras y gratuitas orientadas a la construcción de modelos desde un SIG, destacan: **Hydrogen** (Salgado, 2000) y **DC Water Design Extension** (Macke, 2001), ambas trabajando bajo el entorno de **ArcView GIS** (ESRI).

Asimismo, aparecieron otros programas informáticos comerciales como WaterCAD, H2O Net o Infoworks que empezaron a incluir herramientas de ayuda a la construcción de modelos desde un entorno de trabajo propio (véase el informe presentado por Doe & Duncan, 2003), aunque en un principio, sin la posibilidad de integración con el SIG.

En este contexto, surge **GISRed** (Bartolin, H.; Martínez, F.; 2001), como herramienta de ayuda para la construcción y calibración de modelos de redes de distribución de agua a presión, con la particularidad inicial de **poder simular y analizar el modelo desde el propio entorno SIG, recuperando los resultados de la simulación en forma de mapas temáticos, con la capacidad de compaginar las tareas de edición y consulta**. Otras de las funcionalidades que ofrecía era una potente herramienta de importación de información desde CAD, un **calibrador basado en un algoritmo genético** (Savic et Kapelan, 2002) y un asistente para la introducción de datos al calibrador. En su momento, supuso una apuesta seria por la **integración de los modelos y el SIG**, y el **diseño de una estructura de base de datos relacional en el entorno SIG** basada en los estudios pioneros de White, C. (1999 y 2001) en la materia. Con los años, la estructura relacional ideada se convertiría en el modelo lógico actual de la geodatabase, que se describe en profundidad en el Anexo I de la tesis.

Conseguido este primer hito en la integración SIG-modelos, se **hizo necesario dotar a GISRed de mayor funcionalidad analítica** aprovechando las ventajas que ofrecía el SIG en términos de análisis topológico y vectorial. Los algoritmos programados y las herramientas implementadas, se basaron en la **teoría clásica de grafos** así como en los últimos desarrollos en materia de búsqueda y rastreo de grafos aplicados a redes eléctricas. En el campo de las redes de agua, los pioneros en el empleo de la teoría de grafos fueron Alperovits y Shamir (1977), que aplicaron el concepto de árbol de expansión para convertir redes malladas en redes ramificadas análogas, configurando árboles de distribución que después utilizaban en el diseño y optimización de las redes. Tras algunos años sin aportaciones relevantes en este campo, Yang et

al (1996) comenzaron a aplicar la teoría de grafos y en particular el **análisis de conectividad de las redes al estudio de la fiabilidad** de las mismas; Varma et al (1997) utilizaron la teoría de grafos para obtener árboles de expansión y los conjuntos de corte de cada una de sus ramas con el objetivo de emplearlos en el **diseño óptimo de redes de distribución utilizando métodos de programación no lineal**. Sin embargo, el primer trabajo relevante en este ámbito se atribuye Gupta, R. y Prasad, T. D. (2000) que fueron los primeros en aplicar la teoría de grafos en el análisis de una red de tuberías. El método numérico que desarrollaron utilizaba la teoría de grafos lineal para el análisis en régimen permanente de la red de tuberías, incluyendo todos sus componentes hidráulicos (bombas, válvulas, nudos de caudal, etc.). El método que proponían, basado en la selección de uno de los árboles de expansión de la red, era capaz de **actualizar los caudales de las tuberías en sucesivas iteraciones y simulaciones del árbol asociado al modelo**. Posteriores trabajos como el de Deuerlein (2006) en materia de conectividad de grafos, fueron aplicados a la **gestión eficiente, la vulnerabilidad y la fiabilidad de redes de distribución**, así como al **análisis de los cambios en la conectividad de la red** derivados de las acciones de control que son necesarias para operar el sistema de suministro.

Ha sido más recientemente cuando algunos autores han empezado a mostrar verdadero interés en los algoritmos basados en la teoría de grafos, profundizando en el análisis de la conectividad y el estudio de los conjuntos de corte de la red, con el objetivo de identificar la **vulnerabilidad de las redes de distribución de agua frente a posibles averías, fallos o ataques deliberados**, como consecuencia de la **preocupación internacional en materia de seguridad de las redes**. Es el caso de Yazdani, A. y Jeffrey, P. (2011), que a partir del análisis del nivel de conectividad en las redes, establecen la densidad de conexiones malladas entre tuberías, y de esta manera establecen la **redundancia en la trayectoria que siguen los caudales** hasta los puntos de alimentación del sistema. Para ello utilizan técnicas de análisis topológico para identificar los conjuntos de corte más críticos en caso de fallo o ataque en elementos sensibles del sistema de abastecimiento.

Por otra parte, Perelman, L. y Ostfeld, A. (ASCE, 2011) están empleando la teoría de grafos para configurar esquemas topológicos genéricos de las redes que faciliten la tarea de análisis de las mismas. La metodología se basa en clasificar los sistemas de distribución en grafos fuertemente conexos y grafos débilmente conexos en base a los **algoritmos de búsqueda en profundidad (DFS) y en amplitud (BFS)**.

A pesar de los últimos avances en estas técnicas, es necesario destacar que se conocen muy pocos trabajos en relación al análisis de la red en base a su **árbol de expansión de mínimo coste (MST)**. Esta es por tanto la aportación más innovadora de la tesis, es decir, la dedicada a la aplicación de la teoría de grafos para la modelación y toma de decisiones en los sistemas de distribución de agua potable. Todos los desarrollos y herramientas que se presentan en este sentido, están **basados en el concepto de árbol de expansión (dirigido y no dirigido) de mínimo coste**.

En materia de sectorización de redes, en 1980 la Asociación de Autoridades del Agua del Reino Unido (*UK Water Authorities Association*), publicó el informe titulado 'Políticas y Prácticas del Control de Fugas' (*Leakage Control Policy & Practice – Report 26, UK*), que se puede considerar como el origen del uso de la sectorización como técnica para el control de pérdidas de agua en las redes de abastecimiento urbano, y más concretamente para la detección de fugas. En la década de los 90, diversas instituciones internacionales del sector del agua publicaron documentación técnica para la implementación de sectores hidrométricos en las redes. Así en el año 1.999 el *UK Water Industry Research Ltd* lanzó una recopilación de buenas prácticas para el diseño de distritos hidrométricos en las redes (*Manual of DMA Practice*). En 2007, la

International Water Association (IWA), publica una guía práctica para la sectorización de redes, (*District Metered Areas; Guidance Notes; by the DMA Team of the Water Loss Task Force*). En ella, se exponen por primera vez las mejores prácticas para la gestión óptima de sectores hidrométricos en las redes de distribución de agua. Todas estas prácticas y métodos de gestión se basaban en la experiencia en campo y en el diseño manual de los sectores hidrométricos, lo que requería un buen conocimiento de la red de abastecimiento.

Los primeros desarrollos técnicos en materia de sectorización de redes asistida por ordenador aparecen publicados recientemente, describiendo métodos de ayuda a la sectorización de redes basada en la teoría de grafos de la red. En este sentido, uno de los trabajos publicados más destacables pertenece a Tzatchkov y Arreguín (ASCE, 2006), que aborda la sectorización de un modelo de red mediante el uso de algoritmos basados en la teoría de grafos para la **identificación de sectores independientes**, el conjunto de nudos pertenecientes a cada sector, el conjunto de nudos desconectados y las fuentes de suministro; dichos algoritmos fueron implementados en un software llamado Sistema de Cómputo de Análisis y Diseño de Redes (SCADRED) basado en AutoCAD (presentado en *el 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium*). Hunaidi & Brothers contribuyen en el año 2007 con un artículo cuyo objetivo es describir el método de **búsqueda del tamaño óptimo de los distritos hidrométricos (DMA)** basándose en diferentes criterios y teniendo en cuenta su coste económico. Saldarriaga et al. (2008) **analizan diversos criterios de sectorización y su efecto sobre la red en caso de fallo** en alguno de sus elementos. Vairavamoorthy et al (2008), desarrollan una **metodología para la división de la red en diversas zonas de demanda con el objetivo de realizar estudios del volumen de agua no registrada**; para ello utilizan un **algoritmo automático de 'zonificación' (optimal zoning tool)** que utiliza la analogía de la teoría de grafos para proponer esquemas óptimos de zonificación utilizando como parámetros de diseño, la longitud de tuberías, así como la demanda de los nudos y el caudal circulante por las líneas del modelo de la red. Di Nardo y Di Natale (2010) presentan una **metodología de apoyo al diseño de distritos hidrométricos** en redes de abastecimiento de agua. Sin embargo, hasta la fecha, cabe destacar que no ha habido ninguna aportación relevante en relación al diseño y configuración automática de sectores hidrométricos, basada en el árbol de expansión de mínimo coste (MST) del modelo matemático de una red, y utilizando las técnicas de búsqueda y análisis de árboles en grafos.

En relación a la simplificación de redes, **no se conoce ningún antecedente** que aborde el problema de la **esqueletización** de redes desde un **punto de vista puramente topológico considerando el MST** de la red. Los trabajos más destacables en materia de esqueletización de redes se basan en técnicas estrictamente analíticas de **condensación matricial y linealización** de los elementos de la red en base a sus características físicas y topológicas. Así, aportaciones relevantes en ese sentido son: Martínez, F. y Ulanicki, B. (1996); Maschler, Savic et al (1999), y sobre todo la metodología empleada en algunos paquetes comerciales de software como WaterGEMS *Skelebrator* (Bentley Systems), cuyas opciones de simplificación son semejantes a las incorporadas en GISRed, aunque la tecnología de simplificación que aplica es muy diferente y no está basada en el MST.

Con todo, construir un modelo no consiste solo en 'ensamblar' de forma correcta todos los elementos actualizados y sus datos asociados disponibles en el SIG. En realidad, muchos de los datos que configuran el modelo son desconocidos, y otros cambian muy rápidamente, como pueden ser las demandas. Los modelos deben además estar calibrados para que resulten fiables, y para ello se necesita acceder a los datos de campo capturados por el sistema SCADA (Tiburce et al, 1999), algunos de los cuales servirán para fijar las 'condiciones de contorno' de la simulación y otros para contrastar los resultados del modelo con los valores observados, y en base a ello ajustar los parámetros del mismo. Por tanto, **para construir un modelo no basta con**

disponer únicamente de la información cartográfica más actual almacenada en el SIG. El modelo requiere además el acceso a determinada información almacenada en bases de datos externas y la posibilidad de incorporar **datos calculados específicamente como las demandas a partir de las lecturas de contadores.** Este es el motivo por el cual se decidió enfocar los nuevos desarrollos hacia herramientas concretas de cálculo que pudiesen suministrar información específica al modelo (*curvas de modulación, caudales inyectados, caudales registrados, caudales autorizados, rendimientos de los sectores hidrométricos, etc*).

El primer precedente en esta materia fue el proyecto **CALNET** (Martínez, Hernández et al, 2004), cuyo objetivo era el **desarrollo de herramientas informáticas orientadas a facilitar el uso de los modelos hidráulicos en la gestión y operación diaria de las redes** de distribución de agua urbanas. Estas herramientas fueron incorporadas a GISRed (Martínez, Bartolín et al, AEAS 2004), concediéndole nuevas funcionalidades orientadas a la integración de la **información cartográfica con la procedente del sistema de gestión de abonados** (con la intención de actualizar las demandas del modelo), la base de datos de **operación y mantenimiento** para actualizar el estado de todos los componentes y la **información del sistema SCADA** para acceder a los datos de campo.

Una vez desarrolladas las prestaciones de modelación, integración con el SIG, análisis de la red y conexión con el SCADA, se decidió dar un paso más y dotar a GISRed de herramientas de análisis para la **estimación del agua no registrada y la detección y el control de fugas en los sectores** de la red. En esta línea cabe reseñar los trabajos de May (1994), que introdujo el concepto de área de descarga fija y variable de una fuga (FAVAD) para evaluar las fugas en sectores hidrométricos; Maksimovic y Carmi (1999) en relación a la dependencia de las fugas con la presión, y de Tabesh (1998-2003) en materia de análisis y estimación de las pérdidas reales y aparentes de agua en los sectores de una red de distribución de agua potable. Destacan también los trabajos de Bostanian (PhD Thesis, 2001) en la aplicación combinada de los **modelos y el SIG para realizar balances hídricos con el fin de estimar el volumen de pérdidas de agua y en particular el volumen no registrado.** En el año 2007 la *International Water Association (IWA)* lanzó dos guías de referencia para el estudio y la gestión de pérdidas de agua en distritos hidrométricos: *District Meter Area Management* y *Leak Detection Practices, Techniques and Repair*. Como última reseña, destacamos el trabajo de Tabesh, Asadiyani y Burrows (2009), que desarrollaron una **metodología para la realización de balances hídricos anuales y el estudio de los caudales mínimos nocturnos** en los sectores hidrométricos de una red.

La transformación de GISRed para la implementación de una **nueva metodología adaptada a la localización de fugas, supuso ampliar el alcance de la base de datos** para mantener actualizados, no solo los datos relativos a cartografía de la red, consumos registrados, operaciones de mantenimiento y medidas en tiempo real procedentes de los caudalímetros instalados, sino también a todos aquellos datos relacionados con el consumo no controlado, como consumos públicos, parque de contadores, población censada por parcela y acometida, fugas localizadas, etc, así como los resultados de las campañas de localización de fugas.

El propósito iba dirigido, por una parte, a **delimitar los sectores hidrométricos operativos en cada momento y mantenerlos actualizados** en función de las operaciones de mantenimiento efectuadas, y por otra, a **analizar la evolución con el tiempo del rendimiento hídrico de cada uno de los sectores** en estudio, así como la evolución de cada una de las variables que intervienen. El objetivo último era **analizar a fondo los distintos factores que pudiesen justificar el consumo no controlado**, como errores de contador, suministros sin lectura, tomas ilegales, fugas detectadas en las campañas de localización, fugas latentes atribuibles al caudal mínimo nocturno y su distribución la red, etc.

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis se ha estructurado en **tres grandes bloques** bien diferenciados. El primero de ellos está dedicado a la **UTILIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA MODELIZACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA A PRESIÓN**. En este primer bloque se ha pretendido por una parte, ofrecer una visión general acerca de los sistemas de información geográfica (SIG) y por otra, describir el proceso de modelización matemática de una red de distribución de agua a presión. En ese contexto se plantea la problemática asociada a la integración de los modelos matemáticos en los SIG y se ofrece una **solución práctica a la integración** en forma de aplicación informática. La aplicación, llamada **GISRed** y desarrollada con motivo de la presente tesis, integra gran parte de las funcionalidades del simulador hidráulico y de calidad EPANET 2 en el entorno de ArcView GIS. Trabaja como una extensión del SIG orientada a la construcción y calibración de modelos matemáticos de redes con una interfaz similar a la que ofrece EPANET.

Este primer apartado de la tesis incluye cuatro capítulos. El capítulo 2 titulado '**Sistemas de Información Geográfica y su aplicación a la Gestión de Sistemas de Distribución de Agua Potable**', ofrece una visión general de los sistemas de información geográfica vectoriales, centrándose en su potencial analítico. Además, describe la idoneidad de los SIG como plataforma base para la integración de herramientas orientadas a la modelación matemática de las redes de abastecimiento, sin dejar de lado la problemática que dicha integración conlleva.

El capítulo 3, '**Modelos Hidráulicos, El software de Simulación EPANET 2**', introduce al lector en el campo de la modelación matemática de las redes de distribución de agua, describiendo los distintos tipos de modelos que se utilizan y los diferentes elementos básicos que puede incluir un modelo. Asimismo, se definen las ecuaciones de comportamiento y equilibrio que deben cumplir dichos elementos. Se reserva un último apartado para hablar de las ventajas e inconvenientes de EPANET como simulador hidráulico y de calidad, puesto que es el software de simulación hidráulica que se ha empleado en la integración SIG-modelo.

El capítulo 4, '**Confeción de Modelos y Aplicaciones**', expone los principales campos de aplicación de los modelos matemáticos de las redes de abastecimiento de agua y describe las diferentes etapas que es necesario abordar para la construcción de un modelo matemático, justificando además su uso como herramientas de análisis y diagnóstico. El capítulo concluye con las ventajas de la utilización e integración de los modelos en un entorno SIG.

El primer bloque finaliza con el capítulo 5, '**Integración de los Modelos en un SIG. La Aplicación GISRed**', y está enteramente dedicado a la aplicación informática desarrollada con motivo de la Tesis, la cual proporciona una interfaz orientada a la modelación matemática de redes e integra el simulador hidráulico EPANET en un sistema de información geográfica. La aplicación trabaja como una extensión de ArcView GIS que ha sido desarrollada como herramienta de modelación y calibración de redes. Tras justificar el diseño y desarrollo de la aplicación, el capítulo ofrece una descripción general de la aplicación y de sus capacidades y funcionalidades más destacables.

El segundo bloque de la tesis se ha dedicado a la **APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS EN LA MODELIZACIÓN Y TOMA DE DECISIONES EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE**. En este bloque se presentan los algoritmos desarrollados para el análisis y diagnóstico de redes, cuyo objetivo es asistir en el proceso de toma de decisiones en la gestión y operación diaria de los sistemas de abastecimiento urbano. Todos los algoritmos desarrollados se basan en la teoría

de grafos y se han implementado en la aplicación GISRed en forma de herramientas adicionales de análisis y diagnóstico de la red.

Este bloque está dividido en cuatro capítulos, el primero de los cuales, el capítulo 6 '**Conceptos de la Teoría de Grafos**', introduce los conceptos clásicos en los que se fundamenta la teoría de grafos, así como los algoritmos básicos empleados tradicionalmente en la búsqueda y tratamiento de grafos. Explica también los conceptos de árbol generador o de expansión y árbol de expansión de mínimo coste (*minimum spanning tree*, MST), describiendo los algoritmos clásicos de búsqueda de árboles de expansión, así como el significado del conjunto de corte de un grafo y de grafo dirigido.

El capítulo 7, titulado '**Aplicación de la Teoría de Grafos a la Gestión de las Redes de Distribución de Agua**', traslada todos los conceptos descritos en el capítulo anterior al campo de la modelación de redes de abastecimiento urbano. Pone de manifiesto que los principios básicos de la teoría de grafos pueden ser adaptados a fin de extender el mero análisis topológico al campo de los modelos matemáticos. En este contexto, se describen las técnicas y algoritmos desarrollados para poder llevar a cabo análisis topológicos avanzados aplicados a los modelos matemáticos, e implementados en herramientas específicas tales como: verificación de la conectividad de una red; análisis de las subredes y subsistemas hidráulicos; creación de la topología de árbol o análisis de los conjuntos de corte de una red.

El capítulo 8, '**Aplicación de la Teoría de Grafos al Análisis de Flujos y la Sectorización de Redes de Distribución de Agua**', introduce tres novedosas herramientas de análisis y diagnóstico de redes basadas en el análisis topológico. La primera de ellas permite detectar rápidamente aquellas tuberías cuya capacidad de transporte sea inferior al caudal que debe ser suministrado a la subred situada aguas abajo, lo que supone una primera aproximación en la detección de **cuellos de botella** en el entramado de tuberías sin necesidad de conocer a priori el caudal que atraviesa cada tubería en un determinado instante. La segunda herramienta práctica permite buscar e identificar aquellas válvulas de corte que han de cerrarse para **aislar adecuadamente el tramo de tubería** en el que se ha producido una incidencia, identificando posteriormente todos aquellos tramos adicionales que quedan aislados como consecuencia indirecta del cierre de las válvulas. La última herramienta se centra en la **sectorización de la red** permitiendo, por una parte, identificar de manera automática los sectores hidrométricos existentes en una red en servicio en base a la topología del modelo y a los elementos que delimitan cada uno de los sectores (válvulas de corte y medidores de caudal), y por otra, **configurar automáticamente nuevos sectores hidrométricos** en función de la topología del árbol de expansión de mínimo coste (MST) de la red y del número máximo de acometidas admitidas en cada sector. Al final del capítulo se ofrecen ejemplos prácticos de todas las herramientas y aplicaciones mencionadas.

El noveno y último capítulo de este bloque, aplica la teoría de grafos a la '**Esqueletización de Redes**'. En él se describe pormenorizadamente cada una de las cuatro etapas del procedimiento que se sigue para simplificar el modelo de la red, pudiendo convertir un modelo de detalle en un modelo estratégico hidráulicamente compatible. Como criterio de esqueletización, el usuario debe imponer el límite máximo del diámetro de tubería que se permite simplificar o eliminar, así como la demanda máxima permitida en un nudo para que éste pueda ser eliminado (trasladando su demanda a los nudos contiguos).

El tercer bloque de la tesis pretende ser un primer avance en la **OBTENCIÓN DE MODELOS HIDRÁULICOS MEJOR AJUSTADOS A LA REALIDAD**. En él se expone toda la problemática asociada a los modelos y se argumenta la necesidad de su integración con las diversas fuentes de

información corporativa directamente relacionadas con la red de abastecimiento (el SIG corporativo, el sistema SCADA, la base de datos de abonados y la base de datos de las tareas de operación y mantenimiento en la red), para poder obtener modelos a la carta, ajustados a la realidad y actualizados. Por último, se describe el **procedimiento desarrollado para el cálculo de balances hídricos en redes sectorizadas**, con el propósito de obtener una **estimación lo más precisa posible de las pérdidas de agua en cada sector**. Los balances hídricos se llevan a cabo en base al volumen inyectado y autorizado calculado minuciosamente en cada sector hidrométrico. Para ello ha sido necesario ampliar considerablemente el modelo de datos diseñado inicialmente en GISRed, orientado exclusivamente a la modelación de redes. En el Anexo I se describe pormenorizadamente la estructura de datos diseñada e implementada en GISRed para la realización de balances hídricos en la red. Esta parte ha sido programada en el nuevo entorno de trabajo de ArcGIS 9.2 (ESRI).

Este tercer bloque incluye dos capítulos. Así, el capítulo 10 está dedicado a la '**Problemática de los Modelos Reales**', donde se comentan los principales inconvenientes para la obtención de modelos ajustados a la realidad dada la naturaleza cambiante de las redes en servicio y se tratan cuestiones como la estructura diseñada para el almacenamiento de la información al objeto de confeccionar archivos históricos, la gestión integrada de la información que requiere un modelo ajustado a la realidad, así como la manera óptima de **conectar la gestión comercial con la gestión técnica, a través del concepto** genérico de **punto de suministro**, que representa un punto de la instalación (con entidad física en la base de datos) que conduce el agua desde la acometida hasta el abonado, en el cual se ha previsto controlar el volumen de paso. El punto de suministro constituye por tanto el nexo de unión entre los contadores de los abonados y las acometidas del SIG, y resulta clave para el cálculo de la demanda autorizada a partir de las lecturas de los contadores y la carga de los nudos del modelo para un periodo de tiempo determinado.

Esto último se analiza en el capítulo 11, titulado '**Balances Hídricos en los Sectores Hidrométricos de una Red de Distribución de Agua**', que se presenta como última aportación de la tesis, y describe de forma detallada cada uno de los algoritmos desarrollados e implementados en GISRed para el cálculo del volumen inyectado, el volumen autorizado y el rendimiento hídrico en cada sector hidrométrico para un período de tiempo dado, teniendo en cuenta la casuística real que puede afectar a los cálculos, como la apertura o cierre de válvulas frontera, la existencia de depósitos en el interior de los distritos hidrométricos, las altas y bajas de acometidas, puntos de suministro y/o contadores, la agrupación temporal de sectores hidrométricos, etc.

Todos los capítulos incluyen ejemplos e ilustraciones, así como diagramas explicativos de los procedimientos y rutinas programadas.

Como bloque final, se han añadido cinco anexos. El Anexo I, como se ha comentado anteriormente, presenta el **Modelo Lógico de la Geodatabase de la Extensión GISRed**, donde se detalla la estructura de todas las tablas de la base de datos geográfica y sus relaciones. El Anexo II ilustra mediante un ejemplo paso a paso el proceso de **Construcción de un Modelo de una Red de Distribución de Agua a Presión mediante la Extensión GISRed**. El Anexo III, ilustra de igual modo el proceso paso a paso de **Calibración de una Red mediante el Algoritmo Genético implementado en GISRed**. El Anexo IV contiene la lista de **publicaciones** derivadas de los desarrollos realizados con motivo de la tesis, y las **referencias bibliográficas** utilizadas en la consecución de la misma. Finalmente, el Anexo V y más extenso, presenta el **Manual de Usuario de la extensión GISRed enfocado a la modelación, calibración y simulación de una red de distribución de agua a presión**.

1ª PARTE

UTILIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA MODELIZACIÓN DE REDES
DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA A PRESIÓN

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y SU APLICACIÓN A
LA GESTIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

CAPÍTULO 2. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y SU APLICACIÓN A LA GESTIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

2.1 DEFINICIÓN DE SIG

A lo largo de estas tres últimas décadas y con el avance de las nuevas tecnologías se han publicado infinidad de definiciones acerca de los Sistemas de Información Geográfica (SIG); la mayoría de las cuales destacan las múltiples posibilidades de análisis que ofrecen estos sistemas de información y los diversos campos de aplicación de los mismos.

Una definición simple de SIG (DoE, 1987) se refiere al mismo como 'un sistema para la recogida, el almacenamiento, la verificación, manipulación, análisis y restitución de datos espacialmente referenciados en la superficie de la Tierra'.

La funcionalidad básica de un SIG se centra en la descripción de un territorio de tal manera que se mejore su conocimiento y que se permita la descripción y el análisis de los fenómenos naturales o humanos que en él se producen.

En el libro '*Sistemas de Información geográfica*', Joaquín Bosque Sendra (1997) recoge una serie de definiciones generales de autores diversos, que ofrece una visión lo más aproximada posible al concepto de SIG. Algunas de estas definiciones se presentan a continuación.

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) se puede definir como una «Base de datos computerizada que contiene información espacial» (Cebrián y Mark, 1986c) o también como «una tecnología informática para gestionar y analizar información espacial». Otra definición más amplia sería: «*Un conjunto de herramientas para reunir, introducir, almacenar, recuperar, transformar y cartografiar datos espaciales sobre el mundo real*» (Burrough, 1986). Otros autores insisten más en su componente informática: «Un sistema de información geográfica es un tipo especializado de base de datos, que se caracteriza por su capacidad de manejar datos geográficos, es decir, datos espacialmente referenciados, los cuales se pueden representar gráficamente como imágenes» (Bracken y Webster, 1989).

Una definición muy extendida es la difundida por el NCGIA (*National Center for Geographic Information and Analysis*) de EE.UU: «*Un sistema de hardware-software, y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión*» (NCGIA, 1990).

De manera más escueta, un Sistema de Información Geográfica se puede contemplar como un conjunto de mapas de la misma porción del territorio, donde un lugar concreto tiene la misma localización (las mismas coordenadas) en todos los mapas incluidos en el sistema de información. De este modo, resulta posible realizar análisis de sus características espaciales y temáticas para obtener un mejor conocimiento de esa zona (Bosque Sendra, 1997).

En esencia, un SIG puede considerarse como una tecnología aplicada a la resolución de problemas espaciales, con una componente territorial subyacente en la mayoría de situaciones.

Es obvio que el concepto de SIG lleva de manera inherente un componente informático, tanto a nivel de hardware como de software. De hecho, de no ser por los avances en materia de equipos informáticos a lo largo de las 3 últimas décadas, difícilmente estaríamos hablando en la actualidad de aplicaciones o proyectos SIG.

En '*Understanding GIS. The ArcInfo method (1992). ESRI*', se hace mención al concepto de SIG como: «Un conjunto de equipos informáticos, de programas, de datos geográficos y técnicos organizados para recoger, almacenar, actualizar, manipular, analizar y presentar eficientemente todas las formas de información georreferenciada». Aquí de manera explícita se hace referencia al componente humano en la concepción global del sistema de gestión, tratamiento y explotación de un gran volumen de información.

En '*The rough guide to GIS, Longman, GeoInformation*', Ireland, P. (1994), se dice que un SIG es un tipo especial de sistema de información en el que la base de datos consiste en un conjunto de entidades distribuidas espacialmente, definidas como puntos, líneas o áreas (superficies poligonales). Los SIG son capaces de manipular datos relacionados con estos puntos, líneas y superficies, recuperar resultados producto de consultas y analizar dichos resultados.

En síntesis, según Tomlin, D. (1990) en '*Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*', (Prentice-Hall), un SIG es una configuración de hardware y software diseñada específicamente para la adquisición y mantenimiento de datos cartográficos.

Las áreas de uso práctico de un SIG son muy variadas (Chorley, 1987): desde el inventario de los recursos naturales y humanos hasta el control y la gestión de los datos catastrales y de propiedad urbana y rústica (catastro multipropósito), la planificación y la gestión urbana y de los equipamientos, la cartografía y el control de grandes instalaciones (red telefónica, redes de abastecimiento y evacuación de aguas, redes de transportes...), el marketing geográfico, etc. En realidad un SIG es generalmente útil en cualquier área donde sea necesario el manejo de información espacial.

2.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

En la década de los años 50 se inicia dentro de la Geografía una corriente que propone nuevos conceptos, métodos y técnicas de análisis que acabarán conformando, 10 años más tarde, el llamado paradigma cuantitativo o de análisis espacial, principal fundamento teórico de los SIG. Otras innovaciones tecnológicas y nuevos conceptos, métodos y técnicas de análisis de datos (estadístico-matemáticas, modelado) desarrollados en los años 60 y 70, propiciaron, junto a la disponibilidad de nueva información (de teledetección), el nacimiento de los SIG.

El origen de los SIG se remonta pues, 40 años atrás, cuando un grupo de diversos especialistas acometieron con instrumental informático el procesado de volúmenes considerables de datos geográficos para diferentes propósitos: planeamiento regional, percepción del paisaje, asignación de usos del suelo, etc; el hecho de no tratarse de "técnicos" informáticos condicionó, en cierta medida, la evolución de los SIG. A mitad de la década de los 60, estos pioneros desarrollaron los primeros "prototipos SIG", hoy legendarios, como SYMAP, GRID, IMGRID y otros, que funcionaban en equipos grandes y costosos, que precisaban muchas instrucciones "manuales", y cuya finalidad última era formar e imprimir mapas.

El primer ejemplo de Sistema de Información Geográfica que encontramos es el denominado *Canadian Geographical Information System (CGIS)*. Era el año 1964 y se utilizó en el inventario y

planeamiento de la ocupación del suelo en grandes zonas de Canadá. IBM fue la empresa informática que aportó el hardware necesario.

En pocos años mejoró el hardware y se perfeccionaron los programas, de tal forma que se dilató el ámbito de las aplicaciones y creció la aceptación entre los profesionales. Entre 1970 y 1972 se afianza la expresión "Sistemas de Información Geográfica" y se anuncia su lanzamiento, enfatizando en su capacidad para abordar problemas prácticos, casi siempre en el contexto de un modelo social tecnocrático y muy sensible a todo lo que diera muestras de progreso y desarrollo.

En la década de los ochenta, diversos factores se sumaron para hacer de los SIG actuales herramientas maduras y versátiles, muy distintas de sus antecesores. Por un lado, aparecieron avances técnicos que afectaron a todas las fases de manejo de información: en la captura (datos de teledetección por satélite y los de GPS), y en la visualización, merced a periféricos más precisos y veloces. Por otro, se ganó en velocidad y exactitud en los procesos de cálculo, por la aplicación de algoritmos más eficientes en el tratamiento de las bases temáticas y la geometría de los objetos, a la par que los resultados se diversificaron en nuevos formatos, como los hipermedia y realidad virtual.

El incremento de las posibilidades de análisis geográfico ha venido unido, inicialmente, a la creación de sistemas '*raster*', dada la mayor facilidad para ello de este tipo de representación del espacio. Sin embargo, la realización de inventarios no encaja bien con una descripción '*raster*'. Por ello han subsistido dos líneas de desarrollo, el enfoque '*raster*' y el vectorial. A veces se elaboran sistemas mixtos, que mantienen la base de datos vectorial para el inventario y la recuperación selectiva de los datos, y la transforman a '*raster*' cuando necesitan realizar algunos análisis, en especial la superposición de mapas. A finales de los años setenta y con el desarrollo de una estructura topológica para los datos espaciales, han aparecido en el mercado Sistemas de Información Geográfica vectoriales con mayores capacidades analíticas y de uso más general, como es el caso de ARC/INFO. La mayoría de estos programas han sido elaborados por empresas comerciales como ESRI, INTERGRAPH (TIGRIS), SIEMENS (SICAD), GE SMALLWORLD (*Core Spatial Technology*)...

La tendencia actual de los SIG está claramente dirigida hacia la especialización. La posibilidad de implementación en ordenadores personales y el desarrollo de bases de datos distribuidas y corporativas, ha originado la aparición de múltiples entornos de análisis, específicos para multitud de campos. Así pues, existen programas SIG especializados en la toma y representación de datos, SIG exclusivamente de análisis espacial en formato *raster*, SIG para la gestión, servidores de mapas a través de internet, SIG enfocado al manejo de redes: eléctricas, de gas, de abastecimiento de agua y saneamiento, telefónicas, etc. Con todo ello, podemos asegurar que los SIG han logrado ocupar una posición importante dentro de lo que hoy en día se denomina sociedad de la información, si se tiene en cuenta el gran número de programas SIG o relacionados existentes en el mercado.

2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS SIG

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un sistema para la gestión, análisis y visualización de datos con una componente geográfica inherente. Los SIG se estructuran en diferentes conjuntos de información:

Mapas interactivos

Proporcionan una visión interactiva de la información geográfica que permite dar respuesta a cuestiones concretas, y presentar un resultado de dichas respuestas. Los mapas proporcionan al usuario las herramientas necesarias para interactuar con la información geográfica.

Datos Geográficos

En la base de datos se incluye información vectorial y matricial (*raster*), modelos digitales del terreno, redes lineales, información procedente de estudios topográficos, topologías y atributos.

Modelos de Geoprocesamiento

Son flujos de procesos y operaciones de tratamiento de la información espacial, que permiten automatizar tareas que se repiten con frecuencia, pudiendo enlazar unos modelos con otros.

Modelos de datos

La información geográfica en la base de datos geográfica, es algo más que un conjunto de tablas almacenadas en un Sistema Gestor de Base de Datos. Incorpora, al igual que otros sistemas de información, reglas de comportamiento e integridad de la información. Tanto el esquema, como el comportamiento y las reglas de integridad de la información geográfica juegan un papel fundamental en un SIG.

Metadatos

Son los datos que describen la información geográfica, facilitando información como propietario, formato, sistema de coordenadas, extensión, etc de la información geográfica. Un catálogo de metadatos permite al usuario organizar, realizar búsquedas y acceder a información geográfica compartida. Cualquier catálogo de metadatos debe tener herramientas disponibles para generar, editar y sincronizarse de forma automática con la información que describen.

2.3.1 Modelos de datos geográficos

La distribución espacial de los datos geográficos puede representarse en formato digital mediante dos tipos básicos de modelos: **el modelo vectorial y el modelo 'raster' o también llamado matricial**. Tomando como referencia las definiciones incluidas en el libro Sistemas de Información Geográfica (Bosque Sendra, J.), cabe destacar que:

El **modelo vectorial**, representa los objetos espaciales codificando, de modo explícito, sus 'fronteras' (el límite o perímetro que separa el objeto del entorno). Las líneas que actúan de fronteras son representadas mediante las coordenadas de los puntos o vértices que delimitan los segmentos rectos que las forman. El elemento fundamental de referencia en este tipo de representación es el segmento lineal, delimitado por dos vértices, esto es válido en general si se admite que un punto es una línea de longitud cero. Por lo tanto, en la representación vectorial el elemento esencial es la línea o segmento recto. La representación vectorial está unida a una geocodificación 'continua' de las coordenadas, por ello se emplean números reales en los valores de las coordenadas reseñadas.

En este modelo de datos, la forma en la que los elementos espaciales se relacionan entre sí es lo que denominamos **topología**. La topología más extendida en los SIG vectoriales es la denominada topología arco-nodo.

En la topología arco-nodo, se entiende que arco es un elemento lineal orientado compuesto por un punto inicial, una serie de puntos intermedios y un punto final. A los puntos extremos se les conoce con el nombre de nudos y a los intermedios se les denomina vértices.

Los SIG vectoriales son recomendables cuando se requieren salidas gráficas de alta calidad y gran precisión en la medida de áreas y distancias, como es el caso de la generación de cartografía, obras públicas o gestión catastral. Igualmente, en el caso de modelos de análisis de redes (modelos de simulación y optimización de redes de distribución de agua para riego, modelos de distribución de agua en sistemas hidrológicos, etc.) es más eficiente la estructura vectorial arco-nodo, ya que de esta forma queda perfectamente descrita la topología de la red.

El **modelo de datos 'raster'** (matricial) es el dual lógico del anterior planteamiento vectorial. Ahora en lugar de codificar las fronteras de los objetos, se registra el interior y sus límites quedan implícitamente representados. Para realizar este tipo de codificación se superpone al mapa analógico una malla o cuadrícula regular (de ahí el nombre de modelo matricial), en la que todas las celdas tienen la misma forma y tamaño, y en cada unidad de la rejilla se registra el valor correspondiente al mapa analógico. Las celdas pueden adoptar las siguientes figuras geométricas elementales: cuadrados/rectángulos, triángulos regulares o hexágonos.

Una cuestión crucial en el modelo *raster* es el tamaño de la unidad base de la rejilla, cuanto más pequeña sea, más precisa será la representación digital del mapa. La longitud de los lados de la cuadrícula base o píxel, en unidades del terreno, nos proporcionaran la escala del mapa *raster* generado.

El SIG *raster* está más orientado hacia la construcción de modelos distribuidos de alta variabilidad y donde la precisión de las dimensiones de los elementos espaciales no es tan importante. Este es el caso de modelos hidrológicos, para los que el SIG *raster* incorpora funciones eficientes de generación de mapas de orientaciones, elevaciones, redes de drenaje, etc. En este tipo de modelos es frecuente realizar operaciones de superposición de diferentes mapas temáticos (pendientes, longitud de pendiente, cubierta vegetal o erosionabilidad del suelo).

2.3.2 Funciones analíticas de un SIG

Las funciones analíticas son el elemento más característico de un SIG. Facilitan el procesamiento de los datos almacenados en el propio sistema de modo que sea posible generar nueva información como resultado de consultas, que ayuden en la toma de decisiones. Un SIG permite que información procedente de diversas fuentes sea convertida a un formato común para su posterior análisis. Es lo que se denomina integración de la información.

Algunas de las capacidades de análisis que presentan estos sistemas son:

- consultas a la base de datos
- análisis espaciales (distancias, longitudes, perímetros, superficies, proximidad, trayectos, etc.)
- georeferenciación y geocodificación

- análisis de redes (distancias y recorridos mínimos a través de una red, rutas, accesibilidad, etc.)
- análisis estadísticos de variables temáticas (patrones de comportamiento, tendencias y evolución de datos,...)
- modelado cartográfico
- superposición de mapas (coberturas o temas diversos)
- análisis de modelos digitales del terreno (pendientes, visibilidad, relieve, orientación, cuencas de drenaje,...)

Los SIG también poseen la capacidad de generar mapas temáticos que muestran de manera muy ilustrativa e intuitiva los resultados de las distintas operaciones realizadas con los datos almacenados en la base de datos. La mayoría de aplicaciones SIG permiten la generación de gráficos, tablas de atributos, mapas clasificados por temas, curvas de nivel, etc. y además permiten la salida a impresoras, trazadores, vídeo, internet, intranet, etc.

2.4 APLICACIÓN DE LOS SIG EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO URBANO DE AGUA

Si se analizan con cierta diligencia las funciones de una empresa dedicada a la gestión de un abastecimiento de agua, se constata la compleja interconexión y dependencia existente entre la información disponible, las herramientas y módulos informáticos que facilitan ciertas tareas de administración, además de las discrepancias y repeticiones latentes en el ejercicio de los cometidos diarios del abastecimiento. La gestión queda supeditada a la prioridad fundamental en la empresa que debe ser el aseguramiento de la calidad del servicio, garantizada a través de la sistematización del mantenimiento y la actualización constante de los inventarios.

En estos últimos años, se ha hecho un gran esfuerzo por proponer una serie de reformas paulatinas que aseguran un uso correcto de nuevos criterios y herramientas de gestión mediante una serie de estrategias y recomendaciones para la implantación de nuevos sistemas de información corporativos encargados de agilizar las labores cotidianas de la empresa gestora, manteniendo la prioridad de preservar al máximo un buen servicio al cliente.

Uno de los principales inconvenientes a la hora de implantar estos sistemas de información en empresas de gran tamaño, es la disgregación existente a nivel departamental dentro de las mismas, con sistemas informáticos de gestión comercial y de gestión de infraestructuras que funcionan de manera separada e independiente y con redundancia de equipos y operaciones.

Cualquier proceso de tecnificación dentro de una empresa ha de tener el respaldo de un estudio de viabilidad que garantice la rentabilidad como primer condicionante. Este proceso debe tener en cuenta además factores importantes como el económico, el normativo y el relativo a la calidad del servicio. Por tanto, el cumplimiento de estándares de calidad de servicio, mejoras en la gestión del recurso hídrico, la eficacia en la gestión económico-financiera, así como la eficiencia en la atención al cliente son consideraciones que no resultan triviales a la hora de implantar un sistema de información que resulte adecuado.

La aparición de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha supuesto un avance importante dentro de los procesos innovadores en el ámbito de la gestión de las redes de distribución de agua y más en concreto en el tratamiento masivo de información ligada a un abastecimiento y los sistemas relacionados con la operación y explotación de la propia red de distribución.

La principal aplicación innovadora de esta herramienta reside en la posibilidad de aglutinar bajo un mismo núcleo o entorno, todos los sistemas y módulos (hasta entonces inconexos) empleados en la gestión diaria de la compañía (cartografía de red, base de datos de abonados, base de datos de históricos de las principales variables hidráulicas,...).

La idoneidad de estos sistemas reside en las relaciones topológicas e hidráulicas de los clientes con el recurso agua, precisando por ello referencias geográficas de ubicación de cada uno de ellos. Esta necesidad de información georreferenciada se plantea desde el primer contacto con un cliente potencial, al solicitar éste el suministro. Es necesario, por ejemplo, ubicar las infraestructuras próximas (existentes y en proyecto) y conocer la capacidad de las mismas para atender al nuevo suministro.

Una vez establecida la capacidad de distribución, es necesario el seguimiento de la calidad de servicio que se presta tanto a nivel de clientes como de su circunscripción geográfica, la localización y tratamiento de las anomalías, la evaluación de indicadores de rendimiento y necesidades de renovación y rehabilitación, el seguimiento de obras y actuaciones, etc. Por tanto, queda patente que la mayor parte de actuaciones que se plantean, presentan de manera inherente una componente geográfica que hace del SIG la plataforma ideal para el manejo y explotación de toda la información.

Como se señalaba en apartados anteriores, la parte esencial de un SIG reside en su base de datos espacial georreferenciada. Sobre esta base podemos hacer girar sistemas tan desagregados y a priori tan heterogéneos desde el punto de vista funcional como los sistemas de atención al cliente, los sistemas de planificación y diseño, sistemas de operación y explotación, sistemas de gestión de proyectos y obras, sistemas de gestión eficiente del recurso o sistemas de gestión patrimonial. Todos estos sistemas tienen en común bien una componente espacial, bien un gran volumen de datos circunscritos y ligados a un área geográfica.

Las aplicaciones de los sistemas de información geográfica en el ámbito de las redes de distribución de agua y más en concreto en su gestión diaria, son múltiples. Como muestra se destacan las siguientes:

- Gestión de inventario
- Gestión de averías y mejoras
- Gestión de abonados
- Gestión lecturas de contador
- Gestión datos de telemetría
- Localización y reparación de fugas puntuales
- Gestión de consumos, balances y rendimiento
- Aplicaciones de mantenimiento preventivo
- Confección de modelos de simulación hidráulica
- Calibración y mantenimiento de modelos
- Control y seguimiento de calidad del agua
- Diagnóstico del estado de la red y de la calidad del servicio

2.5 NECESIDAD DE INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS

Los SIG se están consolidando en el panorama actual como potentes herramientas de gestión de toda la información relacionada con la explotación de las redes de distribución de agua potable. El vínculo directo entre la información alfanumérica y la información geográfica que permite un SIG, proporciona la base para llevar a cabo un sinfín de tareas que van desde los trabajos de inventario, a la obtención de planos, gestión de averías, gestión de la demanda, actuaciones de mantenimiento, planificación de campañas de medición, planificación de campañas de búsqueda y localización de fugas, etc. Entre las muchas tareas se incluye también la confección de modelos hidráulicos de la red de abastecimiento desde el propio SIG. No obstante, hay que tener presente que la información requerida para llevar a cabo las tareas de gestión no es la misma que se necesita para confeccionar un modelo. A pesar de ello, se están realizando grandes esfuerzos para lograr este objetivo, puesto que los modelos hidráulicos son cada vez más necesarios para complementar las tareas de explotación y planificación de la red. Ahora bien, para que un modelo pueda utilizarse con garantías para estos propósitos, es necesario que sea fiable, lo que exige mantenerlo permanentemente actualizado y calibrado.

Los SIG se han convertido en el núcleo de toda la información relacionada con las redes de suministro de las empresas que gestionan los abastecimientos de agua. La capacidad de los SIG para combinar la información geográfica con la información alfanumérica hace de éstos el soporte ideal para tareas de consulta, inventario, gestión de acometidas, gestión de averías, análisis de la demanda, etc.

En los últimos años se han realizado progresos muy importantes en el campo de la integración de los modelos matemáticos de las redes hidráulicas en el SIG, enriqueciendo así la información meramente inventariada para que pueda ser utilizada también en el proceso de toma de decisiones. Sin embargo, la información requerida en un SIG para llevar a cabo las tareas de gestión no es la misma que se necesita para confeccionar un modelo. De hecho, hay elementos que nunca se reflejarán en el modelo, como válvulas de corte, ventosas, purgas, etc, y en cambio puede faltar otro tipo de información relevante para los modelos como la rugosidad de las tuberías. Tampoco conviene reflejar en el modelo todas las tuberías almacenadas en el SIG, para evitar un exceso de información que pueda llegar a confundir posteriormente. Por otra parte, válvulas, bombas y otros elementos de regulación, representados de una forma simple en el SIG como elementos puntuales, resultan ser críticos para la confección de un modelo, siendo además sus características hidráulicas de funcionamiento a la entrada, distintas a las de salida.

Pero para que los modelos hidráulicos sean verdaderamente útiles, deben estar permanentemente actualizados y calibrados, y para ello es necesario conocer el modo en el que la red opera realmente, lo que a su vez requiere conectar el SIG con el **Sistema de Gestión de Abonados (SGA)** al objeto de actualizar las demandas, con el **Centro de Control de Operaciones** para actualizar el estado de todos los componentes, y con el sistema **SCADA** (*Supervisory Control and Data Acquisition*) para acceder a los datos de medidas en campo. Estas y otras muchas dificultades hacen que la elaboración de un modelo a partir de un SIG no resulte una tarea inmediata, pero son muchas las ventajas que existen cuando se confiere al SIG la capacidad adicional de abstraer modelos de red a partir de toda la información disponible en el propio entorno geográfico o en fuentes de información alternativa igualmente disponibles mediante conexiones o accesos directos desde el mismo entorno.

El objetivo final de la integración de los modelos hidráulicos en los sistemas de información geográfica, es el uso de dichos modelos en la toma de decisiones que afectan directamente a

las empresas que gestionan los servicios de abastecimiento de agua. Sin embargo, la construcción de un modelo no es una tarea fácil y requiere un esfuerzo notable.

El problema actual para la utilización de los modelos no reside tanto en la capacidad de simulación de éstos, como en la disponibilidad de los datos de partida, y en el filtrado y verificación de los mismos. La labor de toma y verificación de los datos en la construcción de los modelos ha sido siempre la más costosa, y por desgracia, tanto esfuerzo no ha servido, en general, más que para resolver los problemas más acuciantes en ese momento, ya que una red de distribución es algo dinámico y cambiante, y los datos tomados hoy quedan obsoletos en pocos meses. En efecto, los elementos de regulación modifican su estado continuamente, la demanda varía día a día, el estado de las tuberías depende de las operaciones de mantenimiento y rehabilitación de las redes y pueden cambiar en cuestión de semanas, e incluso los trazados cambian también con el tiempo, aunque a más largo plazo, debido a la continua ampliación y mejora de la redes.

Afortunadamente empieza a ser un objetivo prioritario entre las empresas gestoras la posibilidad de confeccionar un modelo adaptado a la realidad de cada momento a partir del SIG implantado inicialmente para gestionar toda la información concerniente a la red de distribución.

Confeccionar un modelo no consiste solo en ensamblar de forma correcta todos los datos actualizados disponibles en el SIG. En realidad, muchos de los datos que configuran el modelo son desconocidos, y otros cambian de forma muy rápida, como pueden ser las demandas. Los modelos deben además estar calibrados para que resulten fiables, y para ello se necesita acceder a los datos de campo capturados por el sistema SCADA. No basta pues con disponer de la información más actual del SIG. En base a los datos del SCADA, el modelo debe estar en sintonía con lo que está ocurriendo realmente en la red; así, parte de los datos del SCADA servirán para fijar las 'condiciones de contorno' de la simulación, mientras que otros serán utilizados para contrastar los resultados del modelo con los valores observados, y en base a ello ajustar los parámetros del mismo, es decir, aquellos datos inicialmente desconocidos que forman parte de la información almacenada en el SIG, y que habrá que determinar durante el proceso de calibración para poder ser utilizados con garantías en la confección de nuevos modelos.

La posibilidad de mantener conectados el SIG con el SCADA permite de este modo mantener el modelo siempre actualizado, no sólo en cuanto a demandas y estado de los elementos de la red, sino también en lo que respecta a los parámetros de calibración, que podrán revisarse cuantas veces sea necesario.

En definitiva, el simple hecho de vislumbrar que es posible mantener permanentemente actualizado un modelo, abre las puertas a la utilización de éstos no solo en planificación, sino también en la operación diaria de las redes y en la toma de decisiones importantes que puedan afectar al funcionamiento del sistema de distribución. La integración de los modelos hidráulicos en los SIG es precisamente el tema principal que se aborda en la tesis que se presenta.

CAPÍTULO 3

MODELOS HIDRÁULICOS
EL SOFTWARE DE SIMULACIÓN EPANET 2

CAPÍTULO 3. MODELOS HIDRÁULICOS. EL SOFTWARE DE SIMULACIÓN EPANET 2

3.1 LOS MODELOS MATEMÁTICOS HIDRÁULICOS

Un modelo matemático de una red de distribución de agua a presión es un esquema aproximado de la misma que reproduce el comportamiento real del sistema físico con mayor o menor fiabilidad y que puede ser simulado utilizando un programa de ordenador específico.

El modelo de red queda supeditado al programa de simulación que se vaya a utilizar, aunque en líneas generales, todos se basan en la abstracción del sistema real a un conjunto de tuberías, depósitos, bombas y válvulas (elementos de regulación y control). De esta forma el ingeniero debe interpretar la red hidráulica existente y sintetizarla en un modelo utilizando sólo aquellos elementos que el programa de simulación es capaz de interpretar.

La confección del modelo matemático de una red en servicio exige recopilar y procesar una gran cantidad de información. Todo ello supone un gran despliegue de medios y una inversión nada desdeñable que a la postre revertirá en beneficio del abastecimiento y por ende de la empresa que lo gestiona.

Los beneficios a los que se hace mención se traducen en la mejora en la planificación, control y operación de la red, como consecuencia directa del uso de dicho modelo tras una validación exhaustiva. Otro de los aspectos fundamentales de la modelización, es la capacidad de análisis que proporciona ante diversas hipótesis del estado de la red, es decir, el modelo validado es una herramienta de gran utilidad para poder anticiparse a la incertidumbre que plantearía una emergencia insospechada.

Diversos aspectos irrumpen inevitablemente al hablar de modelización de redes, entre ellos el más destacable es el concepto de calibración. Por ahora, es suficiente con indicar que el proceso de calibración es una parte estrechamente ligada a la modelación. Si bien es verdad que es posible realizar un modelo de red y no calibrarlo, resulta obvio que éste tendrá poca utilidad a efectos prácticos. Puesto que el proceso de calibración es un mero proceso de 'ajuste', es inmediato deducir que un modelo no calibrado presentará grandes desviaciones entre los valores calculados y los valores reales medidos (normalmente caudales y presiones), debido a lo cual, no será factible su uso en la mayoría de los casos.

Puesto que la inclusión de todos y cada uno de los elementos de que consta la red real no añade en general mayor precisión al modelo, sino únicamente incertidumbre, en la práctica, se recurre a técnicas de simplificación. De esta manera, las líneas del modelo corresponden a tuberías reales o a determinada asociación de las mismas (líneas ficticias); ciertas válvulas especiales se corresponden con elementos de regulación o protección existentes en el sistema real; bombas individuales equivalentes a estaciones de bombeo, etc. Por su parte, los nudos, definidos como intersección de las líneas del modelo, pueden corresponder a la confluencia de dos o más tuberías, a un consumo aplicado en sustitución de una ramificación poco importante, o bien a un gran consumidor (fábrica, complejo deportivo, parque,...).

3.1.1 Tipos de modelos

3.1.1.1 Modelos Estáticos y Dinámicos

Las redes hidráulicas a presión se encuentran en permanente transformación cuando se operan. Las válvulas son maniobradas, las bombas paran o arrancan, el nivel de agua en depósitos va cambiando, y todo ello, las más de las veces para dar respuesta a unas demandas que varían en el tiempo y que, consecuentemente, exigen diferentes condiciones de suministro. En otras ocasiones el estado de la red experimenta cambios mucho más bruscos debidos, por ejemplo, a la rotura de una conducción, el arranque o parada de una bomba o, sencillamente, una brusca demanda de caudal en una serie de tomas de agua al objeto de tratar de extinguir un incendio.

La red muy pocas veces puede ser considerada en un sentido estricto como algo "estático" toda vez que las variables y los elementos hidráulicos (caudales circulantes, consumos, presiones, niveles de los depósitos, bombas, válvulas, etc.) modifican sus valores o posiciones a lo largo del tiempo.

En función del tratamiento que se dé a la variable temporal, podemos clasificar los modelos en:

- a) **Modelos estáticos.** Aquellos que representan el estado de la red en un instante determinado. En este tipo de modelos las variables características del sistema no varían con el tiempo. Se utilizan con fines estratégicos y de planificación. Se emplean para comprobar cómo se va a comportar la red ante un determinado estado de carga, como por ejemplo un corte del servicio por avería o mantenimiento, una ampliación de la red, o una nueva estrategia de regulación.
- b) **Modelos dinámicos.** Son aquellos que simulan el comportamiento de la red a lo largo del tiempo. En ellos, las variables principales (caudal y presión) se consideran variables en el tiempo. Dentro de los modelos dinámicos están aquellos que tratan el fenómeno transitorio que se produce en las maniobras de los elementos de regulación. Sin embargo, los fenómenos transitorios en redes urbanas sólo adquieren cierta importancia en las tuberías de traida desde los puntos de producción. En el resto de la red los transitorios se disipan en las muchas ramificaciones existentes, por lo que no se suelen tener en cuenta. Dentro de los modelos dinámicos encontramos:
 - Los **modelos inerciales** tienen en cuenta, como su propio nombre indica, la inercia del fluido aunque no los cambios bruscos de presión provocados por la elasticidad del fluido. En definitiva, permiten simular el comportamiento dinámico de la red siempre que no hayan cambios bruscos. La consideración del término de inercia, complica notablemente, sin embargo, la formulación del problema, por lo que son poco utilizados. A su vez estos modelos inerciales se pueden subdividir en **modelo rígido u oscilación en masa** y el **modelo elástico o golpe de ariete**.
 - Finalmente, los **modelos no inerciales, cuasi-estáticos** o en **período extendido**, no tienen en cuenta los fenómenos transitorios, sino que simulan el comportamiento de la red como una sucesión de diferentes estados estáticos a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta tan solo las variaciones en los consumos, posiciones de los elementos de regulación y alturas en los depósitos. Para la mayoría de casos prácticos, esta simplificación es perfectamente admitida, y son por ello los más utilizados.

3.1.1.2 Modelos de Calidad y Cantidad

En los últimos años, ha habido un creciente interés en el estudio de la calidad del agua en sistemas de distribución usando modelos matemáticos.

Los **modelos de calidad** se componen básicamente de dos partes: un modelo hidráulico y un modelo de calidad del agua propiamente dicho. Los modelos hidráulicos determinan los caudales y las presiones en la red bajo unas determinadas condiciones iniciales y de contorno, mientras que los modelos de calidad predicen la variación temporal y espacial de la concentración residual de cualquier agente externo (reactivo o no) o fuente contaminante existente en la red, usando para ello la información de la distribución de caudales en el sistema. Estos dos modelos pueden realizarse conjuntamente, o bien, puede desarrollarse primero el modelo hidráulico y utilizar posteriormente los resultados hidráulicos para llevar a cabo el modelo de calidad del agua.

Los modelos de calidad del agua se aplican al estudio del transporte de contaminantes conservativos en las redes de distribución de agua potable, determinando sus rutas, procedencias y tiempos de permanencia en la misma. También permiten analizar el transporte y reacción de los contaminantes bajo condiciones variables en el tiempo, como sucede en la realidad con las demandas, cambios de nivel en los depósitos, cierre y apertura de válvulas, arranque y paro de bombas, etc.

3.1.2 Componentes de un modelo. Ecuaciones de comportamiento

A continuación se describe el modo en que se modelan los distintos componentes físicos que configuran un sistema de distribución de agua, y sus parámetros operacionales.

En general, un sistema de distribución de agua se modela como un conjunto de líneas conectadas a una serie de nudos. Las líneas representan tuberías, bombas, o válvulas de control. Los nudos representan puntos de conexión entre tuberías o extremos de las mismas, con o sin demanda (en adelante los denominaremos en general nudos de caudal o nudos de consumo), y también depósitos o embalses. La Figura 1 muestra cómo se interconectan estos objetos entre sí para formar el modelo de una red.

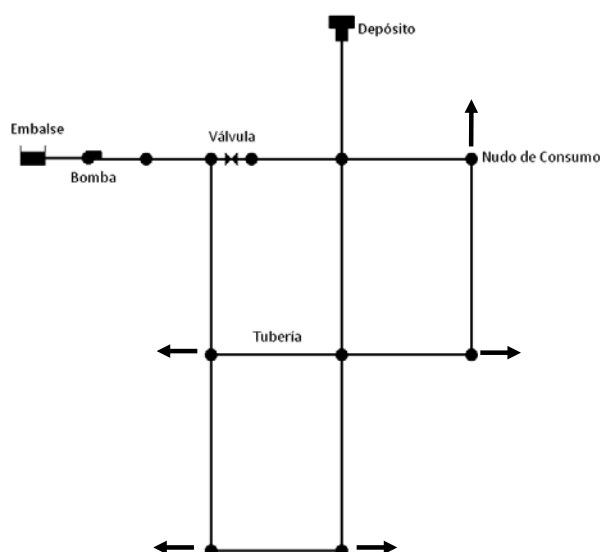


FIGURA 1. COMPONENTES BÁSICOS DE UN MODELO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

► NUDOS DE CAUDAL

Los nudos de caudal son los puntos de la red donde confluyen las tuberías, y a través de los cuales el agua entra o sale de la misma (también pueden ser sólo puntos de paso). Las propiedades básicas asociadas a los nudos son la cota respecto a un nivel de referencia (usualmente el nivel del mar), la demanda de agua (flujo que abandona la red) y la calidad inicial del agua.

Los resultados obtenidos para los nudos en cada uno de los periodos de simulación son la altura piezométrica (energía interna por unidad de peso del fluido, o bien suma de la cota más la altura de presión), la presión y la calidad del agua.

Los nudos de caudal pueden también presentar una demanda variable en el tiempo, tener asignados distintos tipos de demanda (doméstica, industrial, etc), presentar una demanda negativa, indicando que el caudal entra a la red a través del nudo, ser punto de entrada de un contaminante a la red o tener asociado un emisor (o hidrante) cuyo caudal de salida depende de la presión.

► EMBALSES

Los embalses son nudos que representan una fuente externa de alimentación, de capacidad ilimitada, o bien un sumidero de caudal. Se utilizan para configurar elementos como lagos, captaciones desde ríos, acuíferos subterráneos, o también puntos de entrada a otros subsistemas. Los embalses pueden utilizarse también como puntos de entrada de contaminantes. Dado que un embalse actúa como un elemento de contorno del sistema, su altura o calidad del agua no se verán afectadas por lo que pueda ocurrir en la red.

Las propiedades básicas de un embalse son su altura piezométrica (que coincidirá con la cota de la superficie libre del agua si éste se encuentra a la presión atmosférica), y la calidad del agua en el mismo en el caso de realizar un análisis de calidad.

► DEPÓSITOS

Los depósitos son nudos con cierta capacidad de almacenamiento, en los cuales el volumen de agua almacenada puede variar con el tiempo durante la simulación. Los datos básicos de un depósito son la cota de solera (para la cual el nivel del agua es cero), el diámetro (o su geometría si no es cilíndrico), el nivel inicial del agua, mínimo y máximo, y la calidad inicial del agua.

Los principales resultados asociados a un depósito, a lo largo de la simulación, son la altura piezométrica (cota de la superficie libre) y la calidad del agua. El nivel del agua en los depósitos debe oscilar entre el nivel mínimo y el nivel máximo.

► TUBERÍAS

Las tuberías son líneas que transportan el agua de un nudo a otro. Se debe asumir que las tuberías están completamente llenas en todo momento, esto es, que el flujo es a presión. La dirección del flujo es siempre del nudo de mayor altura piezométrica al de menor altura piezométrica. Los principales parámetros de una tubería son: los nudos inicial y final, el diámetro, la longitud, el coeficiente de rugosidad (para calcular las pérdidas de carga) y su estado, esto es, si se encuentra abierta, cerrada, o posee válvula de retención.

Las tuberías del sistema físico real, poseen normalmente accesorios adicionales como codos, válvulas de corte o válvulas de retención. A efectos de pérdidas de carga, estos accesorios quedan representados en el modelo definiendo una propiedad o parámetro adicional a las características hidráulicas del segmento de tubería considerado, llamado 'coeficiente de

pérdidas menores', que contempla las pérdidas de carga originadas por todos los accesorios existentes en ese tramo. Además, el parámetro de estado permite simular el hecho de que una tubería posea o no válvulas de corte o válvulas de retención sin tener que modelar estos elementos explícitamente.

Los datos de una tubería relacionados con los modelos de calidad son: el coeficiente de reacción en el medio y el coeficiente de reacción en la pared.

En relación a los resultados de la simulación, los asociados a las tuberías son: el caudal de circulación, la velocidad del flujo, la pérdida de carga unitaria, el factor de fricción para la fórmula de Darcy-Weisbach, la velocidad media de reacción a lo largo de la tubería y la calidad media del agua a lo largo de la conducción.

► PÉRDIDAS DE CARGA

La pérdida de carga (o de altura piezométrica) en una tubería debida a la fricción por el paso del agua, puede calcularse utilizando tres fórmulas de pérdidas diferentes:

- la fórmula de *Hazen-Williams*
- la fórmula de *Darcy-Weisbach*
- la fórmula de *Chezy-Manning*

La fórmula de Hazen-Williams es la más utilizada en EEUU. Sin embargo, no puede utilizarse para líquidos distintos del agua, y fue desarrollada originalmente sólo para flujo turbulento. Desde el punto de vista académico, la fórmula de *Darcy-Weisbach* es la más correcta, y es aplicable a todo tipo de líquidos y regímenes. Finalmente, la fórmula de *Chezy-Manning* es utilizada usualmente para canales y tuberías de gran diámetro, donde la turbulencia está muy desarrollada.

Todas las fórmulas emplean la misma ecuación básica para calcular la pérdida de carga entre el nudo de entrada y el de salida:

$$h_L = A q^n$$

donde h_L = pérdida de carga (en unid. longitud), q = caudal (en unid. volumen/tiempo), R = coeficiente de resistencia, y n = exponente del caudal.

En la siguiente tabla se listan las expresiones del coeficiente de resistencia y el valor del exponente del caudal para cada una de las fórmulas de pérdidas indicadas. Cada fórmula utiliza un coeficiente de rugosidad distinto, el cual debe determinarse empíricamente.

Fórmula	Coeficiente de Resistencia (*) (R)	Expon. Caudal (n)
Hazen-Williams	10,64 C ^{-1,852} d ^{-4,871} L (1)	1,852
Darcy-Weisbach	0,0826 f(ε,d,q) d ⁻⁵ L (2)	2
Chezy-Manning	10,3 n ² d ^{-5,33} L (3)	2

donde: C = Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams
 ϵ = Coeficiente de rugosidad de Darcy-Weisbach (m)
 f = factor de fricción (depende de ϵ , d, y q)
 n = Coeficiente de rugosidad de Manning
 d = diámetro de la tubería (m)
 L = longitud de la tubería (m)
 q = caudal (m³/s)
 (*) Expresiones válidas para unidades del SI

TABLA 1. FÓRMULAS DE PÉRDIDAS DE CARGA EN CONDUCCIONES.

- (1) En unidades US la fórmula de Hazen-Williams es: $4,727 C^{-1,852} d^{-4,871} L$. El coeficiente de resistencia se ve modificado para que los valores del coeficiente C resulten universales.
- (2) En unidades US la fórmula de Darcy-Weisbach es: $0,0252 f(e,d,q)d^{-5}L$, debiendo expresarse los valores del coeficiente e en pies.
- (3) En unidades US la fórmula de Chezy- Manning es: $4,66 n^2 d^{-5,33} L$. De nuevo el coeficiente de resistencia se ve modificado, de modo que los valores del coeficiente n son universales.

Así pues, la expresión general de la ecuación de comportamiento de una tubería (línea) es:

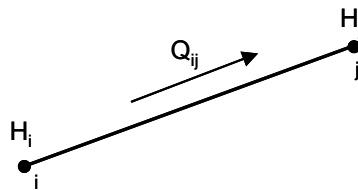


FIGURA 2. REPRESENTACIÓN DE UNA LÍNEA Y SUS NUDOS EXTREMOS.

$$h_{ij} = H_i - H_j = R_{ij} Q_{ij} |Q_{ij}|^{n-1}$$

donde h_{ij} representa la pérdida de carga a lo largo de la línea, H_i y H_j son las alturas piezométricas en los nudos i y j respectivamente; Q_{ij} es el caudal circulante desde i hasta j ; R_{ij} es la resistencia hidráulica de la línea y representa la pérdida de carga desde i hasta j ; n es el exponente del caudal utilizado en la ecuación de pérdidas.

► PÉRDIDAS MENORES

Las pérdidas menores, también denominadas pérdidas localizadas, son debidas al incremento de la turbulencia cuando el flujo pasa por un codo o un accesorio. La importancia de incluir o no tales pérdidas depende del tipo de red modelada y de la precisión deseada de los resultados. Para tenerlas en cuenta hay que incluir entre los datos de la tubería el coeficiente de pérdidas menores. El valor de la pérdida será el producto de dicho coeficiente por la altura dinámica en la tubería, esto es:

$$h_L = K \cdot \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

donde K = coeficiente de pérdidas menores, v = velocidad del flujo (unid. longitud/tiempo), y g = aceleración de la gravedad (unid. longitud/tiempo²).

► BOMBAS

Las bombas son líneas que comunican energía al fluido elevando su altura piezométrica. Los datos principales de una bomba son sus nudos de aspiración e impulsión y su curva característica (o relación entre caudal trasegado y la altura comunicada). La curva característica de una bomba girando a su velocidad nominal viene dada por:

$$H = H_0 - r \cdot Q^n$$

Si se considera una bomba con velocidad de giro variable, entonces la expresión anterior queda en función de la relación entre la velocidad de giro en un determinado instante y su velocidad de giro nominal, ω :

$$H = -\omega^2 (H_0 - r(Q/\omega)^n)$$

donde H_0 es la altura a caudal nulo, ω es la velocidad relativa de giro, y r y n son coeficientes de la curva de la bomba.

En lugar de dar la curva característica, el comportamiento de una bomba puede también modelarse suponiendo que aporta una cantidad de energía constante al fluido por unidad de tiempo (potencia constante), lo que permite determinar la altura comunicada al fluido en función del caudal de paso. Al igual que las tuberías, las bombas deben poder pararse o arrancarse durante la simulación en instantes prefijados, o cuando se cumplan determinadas condiciones en la red. El modo de operación de una bomba puede también imponerse asignando una curva de modulación a su velocidad relativa.

El resultado principal asociado a una bomba es el incremento de altura comunicada al fluido.

► VÁLVULAS

Las válvulas son líneas que limitan la presión o el caudal en un punto determinado de la red. Las propiedades principales asociadas a una válvula son los nudos aguas arriba y aguas abajo, el diámetro, la consigna y su estado.

Los resultados de la simulación asociados con una válvula son el caudal de paso y la pérdida de carga que origina.

Los tipos básicos de válvulas contemplados normalmente en un modelo son:

- Válvulas Reductoras de Presión (**VRP**) (en inglés **PRV**)
- Válvulas Sostenedoras de Presión (**VSP**) (en inglés **PSV**)
- Válvulas de Rotura de Carga (**VRC**) (en inglés **PBV**)
- Válvulas de Control del Caudal (**VCQ**) (en inglés **FCV**)
- Válvulas de Regulación (**VRG**) (en inglés **TCV**)
- Válvulas de Propósito General (**VPG**) (en inglés **GPV**).

Las **VRP's** tratan de limitar la presión en el nudo aguas abajo de la válvula. En un modelo, la válvula puede presentar cualquiera de los tres estados siguientes:

- **parcialmente abierta** (activa) para mantener la presión aguas abajo en el valor de consigna prefijado, siempre y cuando la presión aguas arriba sea superior al valor de consigna.
- **completamente abierta** si la presión aguas arriba es inferior al valor de consigna.
- **cerrada** si la presión aguas abajo excede a la del nudo aguas arriba (para impedir el flujo inverso).

Las válvulas **VSP's** tratan de mantener la presión en el nudo aguas arriba de la válvula. En un modelo, la válvula puede presentar cualquiera de los tres estados siguientes:

- **parcialmente abierta** (activa) para mantener la presión aguas arriba en el valor de consigna prefijado, siempre y cuando la presión aguas arriba sea inferior al valor de consigna.
- **completamente abierta** si la presión aguas abajo es superior al valor de consigna.
- **cerrada** si la presión aguas abajo excede a la del nudo aguas arriba (para impedir el flujo inverso).

Las válvulas **VRC's** fuerzan la caída de presión a través de la válvula. El flujo a través de la válvula puede ser en cualquier dirección. Estas válvulas no representan a ningún componente físico, pero son muy útiles para modelar situaciones en las que la caída de presión a través de la válvula es conocida.

Las válvulas **VCQ's** limitan el caudal de paso a través de la válvula a un valor prefijado. Las válvulas **VCQ** son unidireccionales, y deben orientarse según el sentido del flujo a limitar.

Las válvulas **VRG's** son bidireccionales y simulan una válvula parcialmente cerrada, cuyo comportamiento queda determinado por el valor del coeficiente de pérdidas en la válvula. Usualmente los fabricantes proporcionan la relación entre dicho coeficiente y el grado de apertura de la válvula.

Las **VPG's** se utilizan para representar una línea cuya relación pérdida-caudal es proporcionada por el usuario, en lugar de seguir el comportamiento típico de las válvulas, establecido por la ecuación de pérdidas. Pueden utilizarse para modelizar una turbina, el descenso dinámico de un pozo o una válvula reductora de presión controlada por caudal.

Las válvulas de corte (tipo compuerta) y las válvulas de retención (o antirretorno), cuya acción es abrir o cerrar totalmente el paso del flujo, no se consideran como líneas independientes, sino que se suelen incorporar como propiedades de la tubería en la cual se instalan.

Cada tipo de válvula tiene una consigna diferente, relacionada con su comportamiento (la presión en el caso de las **VRP's** y **VSP's**, la caída de presión para las **VRC's**, el caudal para las **VCQ's**, el coeficiente de pérdidas para las **VRG's** y la curva de pérdidas para las **VPG's**).

La ecuación de comportamiento que caracteriza la pérdida de carga a través de una válvula es análoga a la que se introdujo para considerar pérdidas menores:

$$\Delta H = K \cdot \frac{V \cdot |V|}{2g}$$

donde K es el coeficiente de pérdidas de la válvula. Dependiendo del tipo de válvula, el coeficiente K puede ser fijado como parámetro de entrada al modelo o variable (determinado por el modelo). El valor de K depende del grado de apertura relativo de la válvula y de las características físicas de la misma (diámetro, material, morfología, etc.)

3.1.3 Ecuaciones de equilibrio del sistema

El cálculo de redes hidráulicas consiste en determinar los caudales que circulan por las tuberías y las presiones en todos los nudos de la red, dadas las demandas en éstos, y conocidas las características de las conducciones y otros elementos de regulación presentes, como bombas o

válvulas, su estado abierto o cerrado, así como los niveles de los depósitos desde los cuales se alimenta la red o a los cuales fluye el agua a través de la misma.

En principio, la red puede contener un número muy elevado de tuberías conectadas de cualquier forma (algunas cerrando mallas), uno o varios depósitos, estaciones de bombeo en cabecera de red o rebombes intermedios, válvulas automáticas que mantienen la presión aguas arriba o aguas abajo, hidrantes en los que el consumo depende de la presión, etc.

Dicho así el problema puede parecer bastante complejo, sin embargo, se puede formular de una manera relativamente sencilla, planteando las ecuaciones de equilibrio del sistema. Se va a suponer también que sólo existen tuberías y depósitos, sin límite en cuanto a número de componentes y modo de conexión entre ellos. Sea L en número de tuberías y N el número de nudos de nuestra red, entendiendo por nudos todas las conexiones de dos o más tuberías, tengan o no consumo en el mismo, los extremos de las tuberías y los propios depósitos. Además, se admite que los caudales de demanda en todos los nudos de consumo son un dato de partida.

Lo primero que hay que resaltar, es que el reparto de caudales a través de las tuberías no depende de las cotas de los nudos de la red y por tanto, no importa que sea ésta plana o de topografía irregular. Lo único que importa son las cotas de los depósitos. En éstos, como la presión va a ser 0 (por estar en contacto con la atmósfera), la altura piezométrica será igual al nivel del agua en los mismos, y por tanto un dato de partida. En los demás nudos la altura piezométrica será la suma de la cota más la presión que resulte, la cual es por ahora desconocida.

A efectos de cálculo de la red, lo importante son las diferencias de alturas piezométricas entre los extremos de cada tubería, y dicha diferencia depende, como sabemos, de las pérdidas de carga en la misma. Si adoptamos la ecuación de *Darcy-Weisbach* para expresar las pérdidas, tendremos:

$$h_f = \frac{8fL}{\pi^2 g D^5} \cdot Q^2 = R \cdot Q \cdot |Q|$$

donde el coeficiente R incluye todos los parámetros propios de cada tubería, como son la longitud L , el diámetro D , y el factor de fricción f , si bien éste sabemos que depende en parte del caudal Q a través del número de Reynolds, además de la rugosidad del material ϵ . El término Q^2 se ha escrito como $Q \cdot |Q|$, donde $|Q|$ representa el valor absoluto del caudal, para que de este modo la pérdida tome el mismo signo que el caudal.

Sea ahora la Fig. 3, en la que se ha representado una parte genérica de la red. Los nudos son denominados por las letras i, j, k, \dots y las tuberías por el par de letras correspondiente a sus nudos extremos: ij, ik, \dots . Si se tiene en cuenta además que la pérdida en cada tubería es igual a la diferencia de las alturas piezométricas en sus nudos extremos, la ecuación anterior puede reescribirse como:

$$\Delta H = H_i - H_j = R_{ij} Q_{ij} |Q_{ij}|$$

En total, si en la red existen L tuberías, podremos formular L ecuaciones como la anterior.

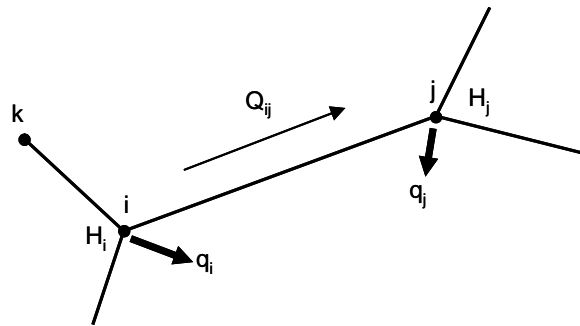


FIGURA 3. NOMENCLATURA EMPLEADA PARA FORMULAR LAS ECUACIONES DE EQUILIBRIO DE UNA RED.

Denominando ahora por q a los caudales demandados en cada nudo, a los que se asigna como subíndice la letra del nudo en el cual está aplicado, la formulación de la ecuación de continuidad en cada nudo conduce ahora a otro conjunto de ecuaciones del tipo:

$$\sum_{j \in A_i} Q_{ij} = q_i$$

que expresa que la suma algebraica (considerando el signo de cada caudal) de los caudales que confluyen en cualquier nudo i debe ser igual a la demanda en dicho nudo q_i . Obsérvese que el símbolo sumatorio extiende el subíndice j a aquellos nudos que rodean al nudo i , los cuales se representan por A_i , de modo que sólo los caudales que confluyen en el nudo i son considerados en cada ecuación.

En total, teniendo N nudos en la red, se pueden formular N ecuaciones como la anterior, que con las L ecuaciones de línea, se obtiene un conjunto de $N+L$ ecuaciones en total. Las incógnitas del problema son los caudales que circulan por cada línea, es decir, L incógnitas, más las alturas piezométricas en cada nudo, es decir, otras N incógnitas. En total, $N+L$ incógnitas, el mismo que el número de ecuaciones. Luego la formulación del sistema anterior es completa y su resolución permite obtener los resultados buscados.

En el razonamiento anterior se puede argumentar que algunas alturas piezométricas serán conocidas a priori, como es el caso de los depósitos. Es más, al menos una altura debe ser dato para que el sistema sea resoluble, lo que en la práctica significa que debe haber al menos un depósito que nos fije las presiones de referencia en todo el sistema. En tal caso, el balance anterior de ecuaciones e incógnitas seguirá siendo válido, puesto que en los depósitos el caudal que entre o salga de los mismos será desconocido a priori, sustituyendo así una incógnita por otra.

Finalmente, una vez resuelto el sistema anterior, o lo que es lo mismo, una vez equilibrada la red hidráulicamente, se conocerán las alturas piezométricas en cada nudo, y restando su cota obtendremos la presión correspondiente.

En la formulación anterior se han considerado sólo tuberías, pero una 'línea' podría representar también una bomba o una válvula. **En el caso de considerar bombas y válvulas la formulación es análoga, sólo que la ecuación de pérdidas de Darcy debe sustituirse por la ecuación propia de comportamiento del elemento en cuestión.**

Para resolver el sistema planteado en toda su generalidad, se han propuesto numerosas formulaciones y métodos de resolución durante las últimas décadas. Entre las formulaciones más conocidas se hallan la **formulación por líneas** (ecuaciones en Q), la formulación por nudos (ecuaciones en H), **formulación por mallas** (ecuaciones en Δq o caudales correctores de malla).

Entre los métodos de resolución más empleados, se encuentran el método **iterativo de Cross**, y los métodos de linealización como el **método de Newton-Raphson** y el método de la **Teoría Lineal**.

Uno de los métodos de resolución de las ecuaciones de equilibrio del sistema modelado que más impacto y difusión ha tenido en los últimos años es un método híbrido de nudos y mallas. *Todini y Pilati* (1987), y más tarde *Salgado et al.* (1988) decidieron llamarlo '**método del gradiente**'. Métodos similares fueron propuestos anteriormente por *Hamam y Brameller* (1971) (el '*método híbrido*') y por *Osiadacz* (1987) (el '*método de Newton para nudos y mallas*'). La única diferencia entre estos métodos es la forma en que se actualizan los caudales de línea, después de haber encontrado una nueva solución provisional para las alturas en los nudos. En el método del gradiente, las ecuaciones de línea son resueltas simultáneamente para Q y H, incrementando la eficiencia frente a otros métodos y reduciendo el número de iteraciones. Además este método permite el análisis de bombas y válvulas sin perturbar la estructura de la matriz de ecuaciones cuando se modifica el estado de estos componentes.

El planteamiento descrito anteriormente responde únicamente a la situación de régimen permanente. Sin embargo, el comportamiento dinámico real de una red de distribución puede simularse como una sucesión de estados permanentes como se verá a continuación.

3.1.4 Simulaciones en periodo prolongado

Dependiendo del propósito último para el cual se ha construido el modelo de red, existen diversos tipos de simulaciones, que proporcionarán información relevante acerca del sistema real dependiendo de lo que se pretenda observar o predecir. Los dos tipos más comunes son las simulaciones en régimen estacionario o permanente y las simulaciones en período prolongado o extendido.

3.1.4.1 Simulación en régimen estacionario o permanente (*Steady-state simulation*)

Este tipo de simulación computa el estado del sistema (caudales, presiones, propiedades de operación de las bombas, posiciones de válvulas, etc.) asumiendo que las demandas y las condiciones de contorno no cambian con respecto al tiempo. El término '*permanente*' hace referencia al comportamiento del sistema cuando alcanza el estado de equilibrio. Por tanto, este tipo de simulación proporciona información relativa a los caudales y presiones (o alturas piezométricas) de equilibrio, así como otras variables que definen el estado de la red para un único conjunto de demandas y condiciones de contorno.

Los niveles en los depósitos y embalses, las demandas y las operaciones de bombas y válvulas, se considera que permanecen constantes durante la simulación, definiendo las condiciones de contorno.

En la realidad, el flujo no se desarrolla en régimen estacionario en casi ninguna ocasión, por lo que este tipo de simulaciones no dejan de ser meras aproximaciones matemáticas, pero cuando los cambios en el tiempo son de pequeña magnitud o se desarrollan muy lentamente, la hipótesis resulta válida.

Las simulaciones en régimen permanente se utilizan generalmente para analizar los casos más desfavorables o extremos que se pueden presentar, como condiciones de demanda punta, estado de la red en caso de incendio o fallos en elementos o componentes del sistema modelado (análisis de emergencias).

3.1.4.2 Simulación en período prolongado o extendido (*Extended-period simulation, EPS*)

Existen situaciones en las que las simulaciones en régimen estacionario no resultan válidas, ya que se requiere analizar la respuesta del sistema frente a cambios en el tiempo de las principales variables hidráulicas. Por ejemplo, cuando se pretende observar el ciclo de llenado/vaciado de un depósito o la respuesta de las bombas y válvulas al introducir cambios en el sistema. Obviamente, este tipo de simulaciones requieren de un número considerable de parámetros de entrada, con lo que el volumen de datos a especificar inicialmente es mayor que en el caso de simulaciones en régimen permanente.

Una simulación en período extendido, no es más que una sucesión de simulaciones en régimen permanente enlazadas entre sí, en las que los resultados de cada simulación para un instante determinado, se utilizan como condiciones iniciales de contorno en la simulación para el instante siguiente.

Este tipo de modelo de simulación hidráulica calcula las alturas piezométricas en los nudos y los caudales en las líneas, dados los niveles iniciales en los embalses y depósitos, y la sucesión en el tiempo de las demandas aplicadas en los nudos. De un instante al siguiente se actualizan los niveles en los depósitos conforme a los caudales calculados que entran o salen de los mismos, y las demandas en los nudos y niveles en los embalses conforme a sus curvas de modulación. Para obtener las alturas y caudales en un determinado instante se resuelven simultáneamente las ecuaciones de conservación del caudal en los nudos y las ecuaciones de pérdidas en todos los tramos de la red. Este proceso, conocido como 'equilibrado hidráulico', requiere el uso de métodos iterativos para resolver las ecuaciones de tipo no lineal involucradas.

3.2 EL SIMULADOR HIDRÁULICO EPANET 2

3.2.1 Introducción

Por lo general, se entiende por simulador hidráulico aquella aplicación informática capaz de reproducir con la mayor exactitud posible, el comportamiento real del sistema que representa, utilizando para ello un modelo matemático del mismo, evitando así la necesidad de recurrir a la experimentación real sobre la red.

En lo referente al modelo matemático de una red, éste debe comprender un conjunto de líneas y nodos, que representen todo el conjunto de tuberías, bombas, estaciones de bombeo, válvulas reguladoras, depósitos y embalses que la configuran.

Además de las características físicas de los elementos de una red es conveniente conocer la ubicación o trazado de los mismos, lo que conduce a la utilización de bases de datos georreferenciados. Sin embargo, el modelo de la red no está completo con el simple conocimiento de sus correspondientes parámetros físicos y geográficos, sino que para proceder a la calibración del modelo, previo a los procesos de simulación, se requiere información relativa a toda una serie de factores, que se enumeran a continuación:

- Estado de cada una de las válvulas
- Distribución temporal de los consumos
- Localización y valor de las fugas de la red
- Leyes de control del sistema
- Medidas realizadas en determinados puntos de la red

Conocidos todos estos datos, es posible proceder, tras el necesario filtrado, a la introducción de los mismos en el correspondiente simulador, con la finalidad de validar en la medida de lo posible las estimaciones e hipótesis simplificadoras realizadas a la hora de la confección del modelo. Una vez llevada a cabo esta validación será posible la simulación de diferentes estados de la red, sin más que alterar las correspondientes entradas al simulador, obteniéndose en consecuencia datos sobre el comportamiento de la red en diferentes circunstancias de funcionamiento.

En general, los simuladores requieren la entrada de una serie de valores relativos al estado de la red y proporcionan una serie de resultados relativos a los parámetros de funcionamiento de la misma.

3.2.2 Características generales de EPANET 2

Dentro del amplio campo de simuladores hidráulicos destaca especialmente por sus capacidades y su reconocimiento a nivel mundial, la aplicación **EPANET**, y en concreto su última versión **EPANET 2**¹.

EPANET 2 es una aplicación que permite realizar simulaciones en periodo extendido del comportamiento hidráulico y la evolución de la calidad del agua en redes de distribución de agua a presión. Una red puede estar constituida por tuberías, nudos, bombas, válvulas, depósitos de almacenamiento o reservas de agua (embalses, lagos, etc.). EPANET 2 proporciona la evolución del caudal en cada tubería de la red, de la presión en cada nudo, de los niveles de agua en los depósitos, y de las concentraciones de las especies químicas transportadas por el agua, a lo largo de todo el periodo de simulación, descompuesto en una serie de intervalos de cálculo. Además de la evolución de las especies químicas puede simularse también el envejecimiento del agua y su procedencia de una fuente determinada.

EPANET proporciona un entorno integrado para editar los datos de entrada de la red, realizar simulaciones hidráulicas y de la calidad del agua y analizar los resultados en una amplia variedad de formatos hidráulicos, como mapas de la red ilustrados por códigos de colores, tablas numéricas, curvas de evolución temporal y mapas de contornos (isolíneas).

Asimismo, es capaz de dar respuesta a objetivos tan variados como el diseño de programas de muestreo, la calibración de modelos hidráulicos o el análisis de la calidad del agua, entre otros. Las posibilidades que ofrece de cara al estudio de los diversos estados de la red también son muy grandes, ya que permite fijar diferentes ciclos de funcionamiento para las bombas, determinar los ciclos de vaciado y llenado de los diferentes depósitos y embalses, trabajar con diferentes modelos de calidad del agua, etc.

EPANET contiene un **simulador hidráulico** muy avanzado con las siguientes prestaciones:

- no existe límite en cuanto al tamaño de la red que puede procesar
- las pérdidas de carga pueden calcularse mediante las fórmulas de *Hazen-Williams*, de *Darcy-Weisbach* o de *Chezy-Manning*
- contempla pérdidas menores en codos, accesorios, etc.
- admite bombas de velocidad fija o variable
- determina el consumo energético y sus costes

¹ Desarrollado por la Water Supply and Water Resources Division del National Risk Management Research Laboratory de la Environmental Protection Agency de E.E.U.U.

- permite modelar varios tipos de válvulas, tales como válvulas de corte, de retención, y reguladoras de presión o caudal.
- admite depósitos de geometría variable (esto es, cuyo diámetro varíe con el nivel)
- permite considerar diferentes tipos de demanda en los nudos, cada uno con su propia curva de modulación en el tiempo
- puede modelar salidas de agua cuyo caudal dependa de la presión (p.ej. emisores)

Además de la confección de modelos hidráulicos, ofrece las siguientes prestaciones para la confección de **modelos de calidad**:

- modela el desplazamiento de trazadores no reactivos por toda la red, a lo largo del tiempo
- modela el avance y destino final de las sustancias reactivas cuya concentración o bien crece en el tiempo (p.ej. los subproductos derivados de la desinfección) o bien decrece (p.ej. el cloro residual)
- modela el tiempo de permanencia (o envejecimiento) del agua mientras discurre por la red
- permite seguir la evolución en el tiempo de la fracción de caudal que llega a cada nudo de la red procedente de un nudo determinado (análisis de procedencias)
- modela las reacciones que tienen lugar tanto en el seno del agua como en las paredes de las tuberías
- tiene en consideración las limitaciones de transferencia de masa al modelar las reacciones en las paredes de las tuberías
- admite reacciones de crecimiento o decrecimiento de la concentración de una sustancia hasta llegar a un valor límite
- permite definir coeficientes de reacción globales para toda la red, y modificar éstos posteriormente para determinadas tuberías
- permite correlacionar los coeficientes de velocidad de reacción en la pared de las tuberías con su rugosidad
- permite considerar la inyección en cualquier punto de la red de un caudal másico o de concentración definida, variable en el tiempo
- la evolución de la calidad del agua en los depósitos puede modelarse como una mezcla homogénea, mediante un modelo de pistón, o como un reactor de dos compartimentos.

Mediante estas prestaciones, EPANET permite estudiar fenómenos relacionados con la calidad del agua tales como:

- la mezcla de agua procedente de diversas fuentes
- el envejecimiento del agua mientras discurre por la red
- la pérdida de cloro residual
- el crecimiento de los subproductos derivados de la cloración
- el seguimiento del avance de un contaminante, tras su intrusión en la red

Además del transporte de sustancias químicas, puede también modelar la evolución del **tiempo de permanencia del agua en la red de distribución**. El tiempo de permanencia, o '**edad**' del agua, es el tiempo que permanece una determinada partida de agua en el interior de la red. El agua que entra en la red procedente de un embalse o de una fuente de suministro se supone que lo hace con tiempo de permanencia cero. El cálculo de tiempos de permanencia es una forma simple de valorar la calidad del agua en la red, sin necesidad de efectuar ninguna medida.

En el caso del **análisis de procedencias**, el software efectúa un seguimiento en el tiempo del porcentaje de agua que alcanza cada nudo de la red, procedente de un nudo determinado. El nudo origen puede ser cualquier nudo de la red, incluyendo depósitos y embalses. El análisis de procedencias es una herramienta útil para estudiar el alcance del agua en la red procedente de una fuente de suministro, cuando la red se alimenta desde más de un punto. Al mismo tiempo nos informa sobre cómo se lleva a cabo el proceso de mezcla, y cómo el porcentaje de mezcla varía espacialmente a lo largo del tiempo.

3.2.3 El módulo de cálculo y la caja de herramientas

El módulo de cálculo de EPANET se ha estructurado en un conjunto de funciones diferenciadas, las cuales se han compilado conjuntamente en una librería de enlace dinámico (DLL). Ello permite una total integración del módulo de cálculo, ya sea completo o descompuesto en funciones más elementales, en cualquier otro entorno de programación externo, bien en lenguaje nativo o en lenguaje propietario como sería el caso de Excel o de un entorno SIG. Utilizando individualmente las funciones del módulo de cálculo, es posible incluso modificar la secuencia de operación típica de una simulación, al objeto de incorporar técnicas de optimización, o realizar cálculos iterativos para la determinación de las fugas de una red, por ejemplo.

El módulo de herramientas está escrito en lenguaje ANSI C, y posee módulos de código separados para el procesamiento de los datos de entrada, el análisis hidráulico, el análisis de calidad del agua, la resolución del sistema de ecuaciones lineales con matrices dispersas y la generación de informes. El diagrama siguiente muestra el flujo de datos durante el proceso de análisis de una red mediante el módulo de herramientas.

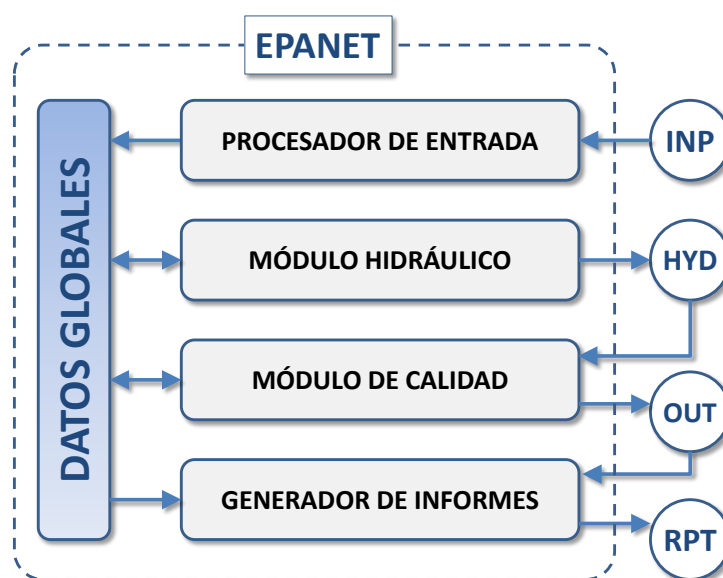


FIGURA 4. FLUJO DE DATOS DURANTE EL PROCESO DE ANÁLISIS DE UNA RED UTILIZANDO LA CAJA DE HERRAMIENTAS DE EPANET.

Los pasos mostrados en dicho diagrama pueden resumirse como sigue:

- El procesador de los datos de entrada, recibe una descripción de la red que se va a simular a partir de un fichero de entrada externo, con extensión .INP. El contenido del

fichero se comprueba para detectar errores de sintaxis, se interpreta y se almacena en un área de memoria compartida.

- El módulo de cálculo hidráulico realiza la simulación hidráulica en periodo extendido. Los resultados obtenidos para cada intervalo de cálculo, son volcados a un fichero de resultados hidráulicos externo, de tipo binario y sin formato predefinido, con extensión *.HYD*. Algunos de los resultados almacenados pueden corresponder a instantes de tiempo intermedios, en los cuales han cambiado las condiciones del sistema debido al llenado o vaciado de algún depósito, o al arranque o paro de alguna bomba como consecuencia de una ley de control temporal o establecida por consignas.
- Si se pretende llevar a cabo una simulación de la calidad del agua, el módulo de cálculo de la calidad del agua accede a los datos de caudal obtenidos tras el análisis hidráulico, para efectuar el seguimiento del transporte y reacción de la sustancia analizada, a través de toda la red y para cada intervalo de cálculo hidráulico. Durante este proceso es posible volcar a un fichero binario de salida (extensión *.OUT*), tanto los resultados hidráulicos previamente calculados como los referentes a la calidad del agua.
- Si se desea, el módulo de generación de informes puede volver a leer los resultados de la simulación del fichero binario de salida (*.OUT*) para los instantes de observación preestablecidos, y escribir los valores seleccionados en un fichero de informe de resultados (*.RPT*) formateado. Cualquier mensaje de error o aviso generado durante la ejecución, será volcado igualmente a dicho fichero.

Las funciones del módulo de herramientas permiten llevar a cabo todos estos pasos bajo el control del programador, incluyendo la capacidad de leer o modificar la mayor parte de los datos del sistema.

3.2.4 Inconvenientes de EPANET 2

Son muchas las ventajas que por sí mismo ofrece EPANET 2 desde el punto de vista de la confección, simulación y visualización de resultados de un modelo de red, pero también presenta una serie de inconvenientes cuando es comparado con un entorno SIG, en el que se ha integrado la capacidad de simulación de EPANET a través de su módulo de herramientas.

Aunque EPANET ofrece una interfaz muy desarrollada para analizar la evolución de resultados a lo largo del periodo de simulación, en general los SIG ofrecen muchas más opciones para facilitar la construcción de modelos. Algunas de estas opciones se echan de menos cuando se trabaja directamente con EPANET, convirtiendo sus carencias en verdaderos inconvenientes. Algunos de ellos son:

1. **No permite trabajar con capas (temas) simultáneamente** sobre la misma ventana gráfica, a lo sumo permite trabajar con un fondo de referencia no interactivo, con lo cual no es posible establecer relaciones entre la red de distribución tras su simulación y el fondo urbano para conocer, por ejemplo, la población afectada por una avería.
2. **No permite trabajar con ficheros CAD**, que suele ser el formato habitual en el que reside la información de red, o capturar dichos ficheros generando una topología de red de forma automática.
3. **No ofrece demasiadas facilidades** a nivel de edición de elementos de red, como por ejemplo, herramientas para partir o unir tramos de tubería, generar conexiones en 'T', unir extremos de tubería anclándolas en un único nudo, insertar bombas o válvulas en

una tubería generando la línea correspondiente, etc. Además, dibuja por nudos en vez de por líneas, con lo cual se requiere saber de antemano el número de nudos total de la red.

4. **No garantiza la conectividad de toda la red**, ni dispone de herramientas de chequeo y comprobación de dicha conectividad. La detección de partes de la red desconectadas (subredes) debe hacerse manualmente.
5. **No permite la incorporación parcial de una subred** a una ya existente, es decir, no permite la fusión de redes en una sesión de EPANET. La fusión habría que realizarla a nivel de ficheros de entrada mediante la edición manual de los mismos, con los peligros que ello conlleva.
6. **No permite aplicar criterios de simplificación** a un modelo de red.
7. **No permite la interpolación automática de cotas** a partir de datos de campo como una nube de puntos de cota, curvas de nivel o información más sofisticada como la que ofrece un modelo digital del terreno.
8. La **asignación de consumos es manual** (nudo por nudo), lo que convierte el proceso en una labor hartamente tediosa. A modo de ejemplo, no ofrece demasiadas facilidades para la asignación del consumo no registrado, con lo cual, llevar a cabo una asignación a nivel de sectores de consumo en los que se conoce el rendimiento hidráulico de antemano, también se convierte en una tarea poco inmediata.
9. EPANET permite contrastar los resultados del modelo con las medidas de campo almacenadas en los ficheros de calibración, y confeccionar informes en torno a las desviaciones entre valores calculados y medidos. Sin embargo, **no ofrece herramientas para seleccionar uno o más escenarios de calibración, agrupar las variables de ajuste** según diversos criterios, y determinar los valores de éstas en base a los escenarios de calibración especificados, mediante la utilización de algoritmos de calibración automática.
10. Una de las limitaciones que pueden achacarse a la interfaz de EPANET es que la ventana principal **no es multiproyecto**. Ello significa que sólo puede ejecutarse un proyecto simultáneamente en una sesión. No obstante, es multi-ejecutable, de modo que varias sesiones pueden coexistir simultáneamente a efectos de comparar resultados entre una hipótesis y otra.
11. EPANET **tampoco permite comparar resultados entre escenarios**.

CAPÍTULO 4

CONFECCIÓN DE MODELOS. APLICACIONES

CAPÍTULO 4. CONFECCIÓN DE MODELOS. APLICACIONES

4.1 TIPOS DE MODELOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN

Desde el punto de vista del **nivel de detalle** con que se confecciona un modelo de una red de distribución de agua a presión, es posible realizar la siguiente clasificación: modelos **estratégicos**, modelos de **detalle** y modelos **operacionales**.

4.1.1 Modelos Estratégicos

Estos modelos, también llamados **modelos arteriales**, contienen sólo los componentes principales de un sistema de abastecimiento. Los subsistemas más pequeños (los cuales tienen poco impacto sobre el sistema total) se representan simplemente por un caudal demandado en los puntos de suministro.

Los modelos estratégicos pueden realizarse a un nivel muy alto, incluyendo tan sólo la representación de las arterias principales. Estos modelos constituyen esencialmente instrumentos para la planificación mediante la investigación de estrategias de abastecimiento a nivel global. Normalmente se construyen a partir de los elementos pertenecientes a modelos previamente existentes y calibrados. A pesar de que incluyen tan sólo las tuberías principales y los depósitos, pueden alcanzar una gran complejidad y tamaño debido al gran número de condiciones y dispositivos de control requeridos. Los modelos estratégicos son útiles para la comprensión global del abastecimiento y conocer cómo circula el agua entre los distintos subsistemas. Sin embargo, no cubren todos los requisitos necesarios en un entorno operativo.

4.1.2 Modelos de Detalle

Para conseguir un uso amplio de los modelos y obtener el máximo provecho, es necesario utilizar modelos detallados de los sistemas de distribución, también llamados **modelos cartográficos**.

Para un propósito operativo general, el modelo detallado debe contar con un grado elevado de representación. Debería incluir todas las tuberías a partir de diámetros de 150 mm y la mayoría de las tuberías comprendidas entre 50 y 150 mm, con un reparto de los consumos tal que cada nudo comprenda aproximadamente 75 viviendas (Martínez et al, 1993)¹. Este nivel de detalle requiere una labor importante de registro de datos utilizando equipos diversos.

Los programas de simulación actualmente disponibles son capaces de modelar redes muy grandes, incluyendo todas las tuberías de distribución si fuese necesario. **Esto no mejoraría el comportamiento del modelo en lo referente a las presiones**, puesto que en este nivel de detalle se presentan pequeñas variaciones de la altura piezométrica. El caudal en tuberías locales o individuales es pequeño (normalmente están sobredimensionadas), aunque en el caso de sistemas rurales sencillos puede que no suceda así. La inclusión de todas las tuberías conduce de forma inevitable al aumento de los costes de realización del modelo.

¹ Capítulo: Modelización Matemática de redes de distribución de Agua en Servicio. Abastecimientos de Agua Urbana. Estado Actual y tendencias (1993). ISBN 84-482-0200-7. Generalitat Valenciana. Conselleria de Indústria, comerç i turisme.

La modelización de todas las tuberías de la red proporciona una representación gráfica completa y una simulación más realista de las velocidades en las tuberías. Esto resulta ser esencial en la **estimación detallada de los parámetros de calidad del agua** (por ejemplo, cloro residual), que requiere de una mejor comprensión de los diferentes regímenes de circulación a nivel local.

4.1.3 Modelos Operacionales

La precisión esperada de los modelos computacionales debe estar relacionada con el conocimiento que se posee sobre el sistema, con los datos que es posible recopilar, y con el uso previsto para los mismos. Los planes directores o maestros requerirán un menor nivel de detalle que un modelo de calidad del agua o un modelo para el estudio de los caudales de incendio. Según el objetivo que persiga el modelo operacional, podemos diferenciar entre:

- Modelo para la **simulación en tiempo real**. La simulación en tiempo real requiere que sean entregadas al modelo solamente las variables de control seleccionadas por el operador, mientras que la parte del proceso operado por PLCs es incorporada y determinada por el modelo, sin ninguna intervención humana. Es decir, se condensa la información, de manera que trabaja a modo de 'caja negra' que recibe información en tiempo real del sistema de supervisión y adquisición de datos (SCADA, *Supervisory Control and Data Acquisition*), la procesa y envía las órdenes oportunas a los elementos de regulación. Se requiere un importante grado de simplificación para poder actuar en tiempo real. El esquema del modelo se aleja en este caso de la distribución física de los elementos.
- Modelo de **operación**. Generalmente la operación de la red apenas tiene en cuenta el conocimiento detallado del comportamiento del sistema. No requiere un conocimiento analítico, pero sí necesita una descripción amplia y sintética de todas las condiciones que deben ser cumplidas por el sistema para operar adecuadamente. El conjunto de condiciones, referidas como restricciones operacionales, incluyen condiciones que pertenecen a todos los diferentes niveles de la dinámica del sistema: arranque de bombas niveles en los depósitos, etc.

4.2 CAMPOS DE APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Martínez et al, (1993)², enumeran una serie de casos en los que resulta prácticamente imprescindible el uso de un modelo matemático de red. Según el estudio a llevar a cabo y atendiendo a la variable temporal en la simulación, se requerirá un modelo estático o dinámico. El problema planteado condicionará el tipo de modelo a utilizar.

Las aplicaciones más usuales de modelos estáticos son:

- Determinación de las **presiones de servicio** en todos los nudos del modelo y de los caudales circulantes por todas las líneas para cualquier estado de carga, y en particular para las situaciones de: consumos punta, averías, incendios, etc.

² Capítulo: Modelización Matemática de redes de distribución de Agua en Servicio. Abastecimientos de Agua Urbana. Estado Actual y tendencias (1993). ISBN 84-482-0200-7. Generalitat Valenciana. Conselleria de Indústria, comerç i turisme.

- Establecimiento de **planes de actuación** ante posibles **averías** o **roturas** en puntos estratégicos de la red.
- Influencia que sobre la red ocasionan modificaciones en la topología, como **instalación de nuevos tramos, sustitución** de otros antiguos, nuevas conexiones entre nudos, etcétera.
- Estudio del efecto que sobre los niveles de presión tienen los **incrementos de demanda por ampliaciones**.
- Determinación del **suministro máximo que puede facilitarse a un punto**, de forma que se asegure un nivel mínimo de presiones en los adyacentes a los que afecta ese nudo (este problema se conoce normalmente como obtención del caudal de incendio en un nudo).
- **Dimensionado de una tubería** destinada a abastecer un consumo, dado un nivel mínimo en la calidad de servicio.
- Previsión del efecto que introducirá en la red la **incorporación de un nuevo punto de inyección o la eliminación** de uno existente, por ejemplo por problemas de salinización o exceso de nitratos.
- Determinación de las **curvas de consigna de los puntos de inyección**, así como la estrategia de regulación a implementar por medio de las válvulas reguladoras a fin de garantizar una presión mínima en todos los puntos de la red.
- Estudio de los **niveles de presión a la entrada de la red**, necesarios para que la demanda no supere un determinado valor (restricciones).
- Análisis de posibilidades de "**sectorización**" de la red, para delimitar zonas de la misma, a fin de mejorar su control y realizar balances hídricos (comparar el volumen inyectado y el autorizado en cada zona).

En el caso de modelos cuasi-estáticos o en **período extendido**:

- **Simulación de las evoluciones diarias en los niveles de los depósitos** para un determinado esquema de producción (estaciones de bombeo), con vistas a elegir, por ejemplo, el esquema de bombeo más económico atendiendo a la tarificación horaria de la energía eléctrica, o bien con vistas a analizar la capacidad máxima de regulación de un depósito que realice esta función.
- Aplicaciones de **control en tiempo real** a fin de garantizar el servicio en todo momento con presión suficiente.
- Aplicaciones de **control de calidad** del agua con el fin de garantizar el servicio adecuado en cualquier punto en todo momento.

En el caso de utilizar el modelo para el control en tiempo real, es preciso sacrificar en parte la definición del modelo en aras de la rapidez de cálculo. En consecuencia, conviene operar con modelos simplificados o macromodelos que tengan en cuenta únicamente los puntos vitales que requieran un estricto seguimiento, así como los más representativos.

Tal y como se deduce de la relación anterior, el espectro de tareas que pueden acometerse gracias a la utilización de un modelo matemático es amplio. En definitiva, los modelos constituyen una herramienta muy útil para el conocimiento integral de la red, la determinación de consignas de explotación y la planificación de inversiones.

4.3 PASOS PARA LA CONFECCIÓN DE UN MODELO

Un modelo matemático de una red de distribución de agua no es más que una abstracción matemática capaz de reproducir el estado del sistema físico real bajo unas condiciones deseadas. La construcción de un modelo de una red hidráulica es una tarea laboriosa que requiere una metodología bien definida. Para la construcción de un modelo es necesario abordar una serie de etapas relacionadas con el trabajo de campo, las técnicas de simplificación, asignación de cargas (demandas), análisis de mediciones, ajuste de parámetros, etc. siendo la perfecta conjunción de todas estas etapas lo que, en definitiva, garantizará la fiabilidad y los límites de utilización del modelo obtenido.

El *Water Research Centre* del Reino Unido (WRC, 1989), propone cinco etapas sucesivas encaminadas a la modelización de un sistema de distribución de agua:

1. Construcción de un modelo de red
2. Obtención de medidas de campo
3. Asignación de consumos
4. Calibración del modelo
5. Análisis y mantenimiento del modelo

Martínez *et al* (1993) proponen sin embargo 7 etapas algo más específicas:

1. Recopilación de información.
2. Esqueletización de la red.
3. Análisis de los consumos registrados y asignación de los mismos a los diferentes nudos del modelo.
4. Reparto de los consumos "no registrados".
5. Medición de parámetros de la red tales como curvas características de las bombas, ubicación de los depósitos, consignas de las válvulas reguladoras, etc.
6. Comprobación del modelo inicial, lo que implica procesar el modelo para diferentes estados de la red y realizar mediciones de las variables hidráulicas (presiones y caudales) en el sistema real para las mismas situaciones.
7. Calibración del modelo inicial en base a las medidas de campo realizadas.

Como quiera que sea, cualquier proceso de modelación de una red de distribución de agua a presión, debe abordar las etapas básicas que se describen a continuación.

4.3.1 Recopilación de información

Esta etapa consiste en la recopilación de la información física de todos los elementos que van a formar parte del modelo de red, así como la esquematización y condensación del sistema real que dé lugar a un esquema con un nivel de detalle sujeto al uso final que se vaya a hacer de dicho modelo.

Lo habitual a la hora de construir el esquema de red es seleccionar los nudos y tuberías más relevantes de la red real. Por simplicidad, los consumos van a ser imputados en ciertas confluencias de tuberías, con lo que aparecerán nudos cargados y nudos sin consumo.

En el caso de **tuberías**, la información más relevante a efectos de modelización hidráulica es el diámetro interno, la longitud, el valor de rugosidad, el trazado, la conectividad (conexionado de los nudos extremos), el material, tipo de revestimiento (si existiese) y la edad. Normalmente, se

suele empezar con una estimación inicial de la rugosidad en base al material y la edad de la tubería, ajustando este valor en la etapa de calibrado del modelo.

En el caso de los **nudos**, la información requerida hace referencia a las coordenadas espaciales, con especial énfasis en la cota y la variación de la demanda diaria. La cota de un nudo de consumo es siempre una propiedad requerida cuando se trabaja con un simulador hidráulico. Es un dato fundamental a la hora de plantear las ecuaciones básicas del cálculo hidráulico de una red de distribución y de obtener las presiones en los nudos.

Además, es necesario recoger toda la información posible acerca de los elementos de provisión de agua, tales como **depósitos, torres de almacenamiento, pozos**, etc, bombas, válvulas y otros elementos considerados importantes para la modelación dinámica de la red. De los sistemas de almacenamiento se requiere conocer su ubicación, dimensiones, cota de solera, niveles máximo y mínimo, dispositivos de regulación y medida existentes, modo de operación, etc.

Para el caso de **válvulas**, es necesario conocer la ubicación de las mismas, diámetro, tipo (reguladora, reductora, sostenedora...), modo de operación, material, estado de conservación, etc.

En cuanto a las **instalaciones de producción y estaciones de bombeo** es importante tener una descripción general de las instalaciones, equipos de regulación, operación de los equipos a lo largo de una jornada, dispositivos de medida, curvas características y de rendimiento de las bombas, niveles de aspiración, etc.

Otro de los puntos principales es el que concierne a los **caudales inyectados al sistema**. En este sentido, sería deseable conocer la evolución diaria y estacional de los caudales inyectados desde cada uno de los puntos de suministro, o al menos una estimación de ésta en base a la variación de nivel en los depósitos, horas de funcionamiento de las bombas, la energía consumida por éstas, etc.

Se deberá conseguir la máxima información sobre los **consumos facturados** por abonado, así como sobre los **consumos públicos, fugas, errores de contadores**, etc. Es conveniente también detallar la ubicación y tipo de cada abonado (doméstico, industrial, etc), con indicación de la tubería de la red a la que conecta cada una de las acometidas. Si se dispone de un histórico detallado de datos de consumos, resulta inmediato obtener las curvas de modulación de la demanda en función de la hora del día, día de la semana, época del año y tipo de consumidor. Esta información debe ser proporcionada por la compañía encargada de la explotación de la red.

Todos estos datos nos permitirán conocer con gran precisión el comportamiento dinámico del sistema para poder reproducirlo en un modelo. Así pues, cuanta más información sea posible recopilar, mayor será el grado de fiabilidad del modelo final.

Por último, cabe destacar la gran ayuda que puede proporcionar un sistema de información geográfica para este cometido, por estar orientados a la gestión de grandes volúmenes de información, no sólo alfanumérica sino espacial. Si además el SIG tiene integrado un simulador hidráulico, las ventajas se multiplican desde el punto de vista del análisis de la red. Por ejemplo, resulta muy útil poder comparar diversas hipótesis de consumos y realizar reasignaciones espaciales todo bajo un mismo entorno de trabajo, esto es, con una interfaz común en el SIG. De esta manera, resulta inmediato gestionar la información geográfica y lanzar simulaciones del modelo en cualquier momento, pudiendo recuperar los resultados finales para ser analizados.

4.3.2 Esqueletización de la red

El proceso de esqueletización de una red de distribución de agua consiste en la representación esquemática del sistema real mediante un conjunto de tuberías representativas. Se trata de un compromiso al que hay que llegar entre la precisión que puede proporcionar un modelo de detalle y su coste inherente relacionado con el proceso de recopilación de datos, construcción del modelo, mayores tiempos de simulación, etc.

La decisión más importante a la hora de abordar el problema de simplificación de la red, es la que se refiere a las tuberías que hay que incluir en el modelo. Esta decisión dependerá en parte del uso que se vaya a dar al modelo final, ya que en este punto entran en juego factores tales como el nivel de precisión que proporcionará el modelo, el coste en su elaboración, ámbito de aplicación del modelo, fiabilidad en los resultados, tiempo de respuesta del modelo, etc.

Según Martínez et al (1993), desde un punto de vista hidráulico, cuando el uso del modelo queda relegado a fines de análisis y diseño, no tiene sentido descender a un gran nivel de detalle, ya que normalmente no es necesario conocer las presiones en cada uno de los nudos y acometidas de la red, siendo por otra parte insignificante la contribución hidráulica de las tuberías menores y de servicio sobre el comportamiento de la red arterial. Por ello pueden eliminarse muchas tuberías pequeñas de la red real sin que por ello se pierda exactitud en los cálculos, y ganando a cambio rapidez en la ejecución y comodidad en el manejo los datos.

Entre las técnicas más utilizadas para obtener modelos simplificados para su utilización en aplicaciones de análisis y diseño, se encuentran:

- Combinación de nudos próximos.
- Asociación de tuberías en serie.
- Asociación de tuberías en paralelo.
- Eliminación de ramificaciones de la red, sustituyéndolas por un consumo en el punto de entronque con la arteria de la que parten.
- Eliminación de tuberías de distribución de pequeño diámetro.

Una excesiva simplificación del sistema real puede dar lugar a valores de presión inferiores a los valores medidos, con lo que se hace necesario aumentar la capacidad conductiva del modelo, incluyendo tuberías descartadas en un primer momento.

4.3.3 Medidas de campo

Las medidas de campo son fundamentales para demostrar que el comportamiento del modelo de red es similar al del sistema que representan. El objetivo de la recopilación de datos es poder identificar con cierta precisión, en etapas posteriores, los parámetros físicos del sistema. Normalmente se suelen obtener medidas de caudal en ciertas líneas relevantes del modelo y de presión en determinados puntos de la red. Además, resulta fundamental obtener información acerca de los grandes consumidores, así como de consignas de válvulas de control, curvas características de las bombas y nivel en depósitos. Estos datos resultarán básicos durante la etapa de calibración del modelo.

Generalmente, conviene disponer de las siguientes medidas:

- Aportaciones a la red desde las estaciones de bombeo y depósitos.
- Presiones a la salida de las estaciones de bombeo y niveles en los depósitos.
- Control de los grandes consumidores por medio de sus contadores.

- Mediciones de presión y/o caudal en puntos estratégicos de la red. La elección de su número y emplazamiento estará en función del tamaño de la red.

Existen multitud de estudios teóricos centrados en la obtención de la mejor ubicación de los puntos de medida (de Schaetzen, 2000)³ y (Kapelan, 2002)⁴. En la práctica, para la determinación de dicha ubicación se consideran diversos aspectos, como son la facilidad de instalación de los medidores, la importancia estratégica de las zonas, los niveles de consumo de las mismas, los problemas de suministro en determinadas zonas, la antigüedad de las canalizaciones de un determinado sector, etc. En cualquier caso hay que cubrir, en lo posible, toda la extensión de la red para así tener definido el nivel de presiones en prácticamente la totalidad de zonas existentes.

En cuanto al número de dispositivos de medida a instalar para obtener un buen grado de confianza, existen diversas directrices dependiendo del país o de las compañías encargadas de realizar las mediciones. Así por ejemplo, en el Reino Unido, el *Water Research Centre* (1989) fija los siguientes criterios en base al número de habitantes abastecidos por la red:

TIPO	Nº MEDIDORES DE PRESIÓN	Nº MEDIDORES DE CAUDAL	TRANSDUCTORES DE NIVEL
Poblaciones de menos de 30.000 habitantes	de 20 a 40	de 2 a 6	de 2 a 4
Poblaciones de alrededor de 300.000 habitantes	de 40 a 80	de 5 a 15	de 4 a 8
Poblaciones de alrededor de 1.000.000 hab.	de 60 a 120	de 15 a 30	de 10 a 20

TABLA 2. CRITERIOS PARA LA INSTALACIÓN DEL NÚMERO DE MEDIDORES EN UNA RED SEGÚN EL WRC.

Sin embargo en Estados Unidos, el *American Engineering Computer Applications Committee* (ECAC, 1999), formula estos otros atendiendo al nivel de detalle y al uso que se va a dar al modelo:

USO (nivel de detalle)	MEDIDORES DE PRESIÓN	MEDIDORES DE CAUDAL
Planificación a largo plazo (bajo)	El 2 % de los nudos	El 1 % de las tuberías
Diseño (de moderado a alto)	Del 5 % al 10 % de los nudos	El 3 % de las tuberías
Operación (de bajo a alto)	Del 2 % al 10% de los nudos	El 2 % de las tuberías
Calidad de Agua (alto)	El 10 % de los nudos	El 5 % de las tuberías

TABLA 3. CRITERIOS PARA LA INSTALACIÓN DEL NÚMERO DE MEDIDORES EN UNA RED SEGÚN EL ECAC.

Según Martínez et al (1993), un número adecuado de puntos de medida sería hasta un 30% en modelos de 100 nudos, un 20% en modelos de 200 nudos y un 15% en modelos de mayor envergadura.

Debido al mayor coste económico a la hora de obtener medidas de caudal, en la mayoría de ocasiones, los modelos se ajustan exclusivamente en base a las medidas de presión. Además, otra de las razones que llevan al uso generalizado de medidores de presión, es que los

³ Tesis Doctoral: *Optimal Calibration and Sampling Design for Hydraulic Network Models*. Werner de Schaetzen (2000). University of Exeter.

⁴ Tesis Doctoral: *Calibration of Water Distribution System Hydraulic Models*. Z. Kapelan (2002). University of Exeter.

transductores de presión empleados para tal fin, pueden proporcionar lecturas instantáneas mientras que la mayoría de caudalímetros son incapaces de reaccionar instantáneamente frente a cambios bruscos del caudal circulante. Es preferible que todas las medidas se realicen simultáneamente, puesto que en caso contrario reflejarán diferentes condiciones de funcionamiento de la red.

El apartado de medidas debe completarse con la determinación in situ de las curvas características de los grupos de inyección y la ubicación de los depósitos; de esta manera la caracterización de los elementos activos quedará al margen del problema de ajuste, lo que contribuye a simplificarlo.

4.3.4 Asignación de consumos

En la etapa de asignación de consumos, se suele recurrir a métodos aproximados. Estos métodos pueden estar basados en la definición de áreas de consumo en torno a cada nudo (imputación por sectores o áreas), en la asignación de las calles más próximas a cada nudo cuando los registros de consumos vienen especificados por calles (imputación por calles), en los diámetros de las tuberías que abastecen a los diversos sectores desde la red arterial y el número de habitantes o facturaciones localizadas en cada sector (imputación en base a características físicas de tuberías y número de habitantes suministrados).

Existe una gran componente de incertidumbre a la hora de realizar la distribución de cargas. Esta incertidumbre es consecuencia directa no sólo de la variación horaria del consumo, sino también de la existencia de fugas, conexiones ilegales, errores de contador, y en definitiva, de los consumos incontrolados mencionados anteriormente, que deben ser distribuidos de alguna manera entre los nudos del sistema.

En general, el único dato fiable que se dispone es la evolución temporal del caudal inyectado al sistema, es decir, la modulación de la inyección. En algunas ocasiones este dato está particularizado por sectores, si la red está sectorizada. No obstante, en algunos casos no existe ni siquiera registro horario del caudal de inyección, por lo que se hace necesario efectuar mediciones para estimar su evolución.

Para realizar una carga del modelo con garantías se debe disponer de datos de:

► **Lecturas de contadores.** Éstos proporcionan el volumen consumido por cada uno de los usuarios en un período de tiempo determinado. Normalmente se dispone de una base de datos con toda esta información. Esto nos permite relacionar a cada usuario con una tubería de servicio de la red de la que parte la acometida correspondiente, que a su vez estará relacionada con uno de los nudos del modelo matemático.

Es frecuente que los contadores presenten errores en las medidas (tanto por defecto como por exceso). En algunos casos se ha llegado a detectar que hasta un 15% del agua inyectada en el sistema era consumida por los abonados pero no contabilizada y, por lo tanto, no facturada (Martínez et al, 1993). Así pues será necesario corregir los volúmenes contabilizados para ajustar los volúmenes realmente consumidos en base a información estadística. Otra manera de tener en cuenta esta diferencia de volumen no registrado cuando no se dispone de datos estadísticos o de muestreo fiables, es contabilizar el error de contador como un 'consumo incontrolado' asimilable a fugas, tomas clandestinas, etc.

Para los casos de 'consumos no leídos' por ausencia del abonado o avería del contador, será necesario realizar una estimación del consumo. Asimismo, será necesario realizar una estimación en el caso de que el sistema no disponga de contadores domiciliarios.

En cualquier caso, la suma de los volúmenes de agua contabilizados (corregidos o no con los errores de los contadores), deberá ser inferior al volumen de agua inyectado al sistema en el mismo período de tiempo.

► **Evolución temporal de la demanda.** Para tener en cuenta la variación del consumo a lo largo de un período de tiempo (normalmente un día, un mes o un año), se considera una modulación del mismo, generalmente sujeta a:

- tipo de consumidor: doméstico, industrial, de servicios públicos, etc.
- el nivel socioeconómico del abonado
- la estacionalidad
- el tipo de instalación interior (con aljibes, suministro directo,...)
- el nivel de presiones en la red.

► **Consumidores importantes:** Es conveniente realizar un seguimiento del caudal suministrado a grandes consumidores, como grandes industrias, hospitales o superficies comerciales o de ocio, para tener una distribución de consumos en el sistema lo más aproximada posible al caso real. Durante la asignación, se suele modelar un nudo por cada uno de los grandes consumidores existentes al que se le asigna un consumo acorde con las mediciones efectuadas.

► **Consumos incontrolados y fugas:** La diferencia entre el volumen inyectado y el volumen registrado corresponde a un volumen no controlado que incluye tanto volúmenes consumidos legalmente pero no contabilizados, como volúmenes atribuidos a fugas. Al cociente entre el volumen de agua registrada y el volumen de agua inyectada en un determinado período de tiempo se le denomina rendimiento global de la red en el citado período.

El caudal instantáneo de agua "no controlada" en un abastecimiento no se puede determinar con precisión, por lo que es necesario acudir siempre a estimaciones. Asimismo resulta prácticamente imposible repartirlo de una forma objetiva entre los nudos del modelo. De este modo es necesario realizar estimaciones de los caudales achacables a conexiones ilegales, fugas, pequeños defectos en las tuberías de distribución, defectos en los entronques de las acometidas, etc. Todos estos consumos estimados, deberán estar sometidos también a una modulación diaria y estacional.

En general, las fugas no-localizadas son debidas a pequeños defectos en las tuberías de distribución o en los diferentes elementos de unión entre éstas. Dado que en la mayoría de los casos estos defectos son una propiedad intrínseca de los materiales, no será viable su localización ni reparación al menos de manera sistemática por lo que se plantean diferentes métodos de evaluación y reparto de lo que se denominan las fugas latentes.

En principio cabe diferenciar entre una caracterización de las fugas no-localizadas en nudos o bien en tuberías. Para este último caso será necesario contar con la descripción de las tuberías de la red y de sus características fundamentales, tales como los coeficientes de fugas en función del material o de la edad de las tuberías. Por lo general, una vez realizada la evaluación de las fugas, se procederá a su reparto entre los nudos del modelo en base a un criterio escogido. Normalmente el criterio menos exhaustivo consiste en el reparto equitativo del volumen incontrolado a todos los nudos de la red, otro criterio suele ser el de corregir la

demanda media en un nudo con un coeficiente (factor corrector de demanda) que tenga en cuenta las estimaciones del volumen no controlado.

4.3.5 Calibración del modelo

La calibración de una red de distribución de agua se puede definir como el proceso de ajuste de una serie de parámetros del modelo de red para los cuales el comportamiento de dicho modelo se asemeja al del sistema físico real. Los cambios en la distribución de consumos, reajustes en las rugosidades de las tuberías, o bien variaciones en la operación de las bombas, son algunos de los parámetros susceptibles de ser modificados durante el proceso de ajuste del modelo.

Para incrementar la fiabilidad del modelo inicial es necesario minimizar las desviaciones entre la predicción que proporciona el modelo simulado y el valor medido en campo. La experiencia demuestra que los parámetros de ajuste más aconsejables a adoptar son en primera aproximación, la rugosidad en las tuberías y los consumos en nudos, siendo menos utilizado como variable de ajuste el diámetro interno de las tuberías. Otro parámetro importante es el que concierne a los coeficientes de pérdidas en válvulas que jugarán un papel fundamental en el proceso preliminar de calibración.

Según Gregg A. Herrin⁵ de la antigua Haestad Methods, la importancia de la calibración queda patente a varios niveles, el primero de ellos referente al nivel de certidumbre en la respuesta del modelo que proporciona dicho proceso. El proceso de calibración otorga al ingeniero una noción del comportamiento de la red real, es decir, durante el proceso de ajuste quedan de manifiesto muchos de los aspectos de funcionamiento del sistema físico que se pretende calibrar, con todas las ventajas que ello aporta. También supone una inestimable ayuda a la hora de localizar discrepancias entre lo que predice el modelo y lo que ocurre en la red real. Por otra parte, la calibración ha de efectuarse en condiciones extremas de funcionamiento, ya que se sabe que los errores en el modelo serán más acusados para caudales altos (picos de consumo). Sin embargo, las diferencias o errores del modelo para caudales bajos, con frecuencia revelan errores en las cotas de los nudos de consumo o en los niveles de los depósitos. Sin embargo, para caudales altos, los errores son básicamente debidos a la relación exponencial entre la pérdida de carga y el caudal que circula por la tubería.

T. Walski (1983)⁶, precisa en su definición y expone que la calibración de un modelo de distribución de agua es un proceso de dos etapas consistente en: (1) la comparación de presiones y caudales predichos con presiones y caudales observados para condiciones de operación conocidas, por ejemplo operación de bombas, niveles de depósitos, consignas de válvulas reductoras de presión, etc. y (2) el ajuste de los datos de entrada al modelo que permitan una mejora en la correspondencia entre valores observados y predichos.

Son muchos los procedimientos y técnicas enfocados a la calibración de modelos de redes de distribución de agua que se han desarrollado a lo largo de las últimas décadas. Estos métodos se pueden agrupar en tres categorías: (1) métodos iterativos (prueba y error), (2) métodos explícitos o de simulación hidráulica y (3) métodos implícitos o de optimización.

⁵ Herrin, G., (1997). *"The Fundamentals of Calibration"*. Current Methods. Volume 1, number 1. <http://www.haestad.com>

⁶ Walski, T., (1983). *"Technique for Calibrating Network Models"*. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 109, No. 4, October, 1983. ASCE.

- **MÉTODOS ANALÍTICOS O ITERATIVOS.** Estos métodos se basan en un procedimiento de prueba y error, en el que los parámetros de calibración se intentan ajustar en cada iteración en base a los resultados de caudal y altura piezométrica que proporciona la simulación hidráulica del modelo, tomando como referencia las medidas de campo de caudal y presión disponibles. Requiere de la resolución de un sistema de ecuaciones en régimen permanente (ecuaciones de continuidad y de balance de energía).
- **MÉTODOS EXPLÍCITOS O DE SIMULACIÓN.** Estos métodos se basan en la resolución de una serie de ecuaciones de continuidad y de balance de energía en régimen permanente junto a un conjunto de ecuaciones adicionales que introducen información de medidas realizadas sobre el sistema (una ecuación por cada una de las medidas de caudal o altura piezométrica disponibles). Obviamente, el número de incógnitas (parámetros de calibración) queda limitado al número de medidas de campo disponibles. Cuando existen más incógnitas que medidas, los parámetros de calibración se deben agrupar.
- **MÉTODOS IMPLÍCITOS O DE OPTIMIZACIÓN.** Estos métodos se basan en la formulación del problema de calibración como un problema de optimización no lineal consistente en una función objetivo sujeta a restricciones lineales y no lineales. Generalmente se pretende la minimización de la función objetivo que normalmente proporciona una medida de la diferencia entre los datos que proporciona el modelo y los datos registrados. La manera de trabajar de estos métodos consiste en la generación de un vector de variables de decisión mediante el algoritmo de optimización elegido, que se utiliza como entrada a un simulador hidráulico donde se comprueban y evalúan las restricciones implícitas del sistema. El simulador proporcionará unos valores para los parámetros considerados como incógnitas (normalmente alturas piezométricas y caudales), que a su vez se emplearán para evaluar la función objetivo.

4.3.6 Análisis y mantenimiento

Una vez validado el modelo hidráulico, puede ser utilizado como un instrumento de análisis y consulta de la operación y evolución del sistema real bajo diferentes condiciones de trabajo. De hecho, existen diversas tareas y proyectos, cuya inversión no se justificaría si no se dispusiera de un modelo calibrado. Tal es el caso de la rehabilitación de determinadas zonas existentes en la red, ampliaciones de la misma, planes de sectorización, estrategias de limpieza de tuberías, etc.

Resulta muy ventajoso contar con un modelo hidráulico de la red con el que poder simular diversos escenarios de funcionamiento y evaluar posibles soluciones a problemas planteados, así como disponer de una herramienta de asistencia en la toma de decisiones en el análisis, operación y diseño de redes.

Además surgen nuevas ventajas inherentes a la modelización, como la de probar y analizar nuevos esquemas de operación de bombas y válvulas, analizar y simular diversas hipótesis de carga bajo la suposición de nuevas zonas de implantación, planes de contingencia para afrontar situaciones adversas como roturas, incendios, etc.

Al objeto de mantener la precisión del modelo, éste debería actualizarse periódicamente para contemplar los últimos cambios en la red real. También es conveniente llevar a cabo una recalibración cuando varíe sustancialmente el esquema de funcionamiento general del sistema real. Por ejemplo, el *Water Research Centre* (1989), establece que para zonas en expansión, la recalibración debería hacerse cada 2 años, mientras que para zonas existentes ya implantadas sin una progresión destacable, sería suficiente cada 5 años.

4.4 EVOLUCIÓN Y TENDENCIA FUTURA DE LOS MODELOS

El desarrollo de herramientas informáticas que permitan el uso de los modelos hidráulicos en el proceso de toma de decisiones en las empresas gestoras de los servicios de abastecimiento de agua, debe ser la tendencia en los próximos años.

Resulta paradójico comprobar cómo los modelos hidráulicos de redes de distribución de agua, eran utilizados esporádicamente por las empresas en función de las necesidades de cada momento, quedando desfasados en poco tiempo.

Lamentablemente no existe aún la plena conciencia de que los modelos deberían utilizarse en la toma diaria de decisiones. El motivo principal es que la construcción de un modelo, no es una tarea fácil y requiere un esfuerzo notable.

Los primeros esfuerzos realizados en el pasado al objeto de modelar el comportamiento de las redes de distribución, se dedicaron al desarrollo de paquetes de software de simulación, cada vez más sofisticados. De los modelos estáticos, formulados con la intención de simular tan solo la situación más desfavorable con fines de diseño, se ha pasado a los modelos dinámicos que permiten incorporar la evolución de la demanda y las leyes de control con que opera el sistema, ya sean temporales o por consignas, para observar la evolución de los niveles en depósitos, de las presiones y caudales en toda la red, e incluso de los parámetros de calidad del agua.

Así pues, el problema actual para la utilización de los modelos no reside ya en la capacidad de simulación de éstos, sino en la **disponibilidad de los datos de partida, y en el filtrado y verificación de los mismos**. La labor de toma y verificación de los datos en la construcción de los modelos ha sido siempre la más costosa, y por desgracia, tanto esfuerzo no ha servido, en general, más que para resolver los problemas más acuciantes en ese momento, ya que una red de distribución es algo dinámico y cambiante, y los datos tomados hoy quedan obsoletos en pocos meses. En efecto, los elementos de regulación modifican su estado continuamente, la demanda varía día a día, el estado de las tuberías depende de las operaciones de mantenimiento y rehabilitación de las redes y pueden cambiar en cuestión de semanas, e incluso los trazados cambian también con el tiempo, aunque a más largo plazo, debido a la continua ampliación y mejora de las redes.

Confeccionar un modelo no consiste sólo en 'ensamblar' de forma correcta todos los datos actualizados disponibles en el SIG. En realidad, muchos de los datos que configuran el modelo son desconocidos, y otros cambian de forma muy rápida, como pueden ser las demandas. Los modelos deben además estar calibrados para que resulten fiables, y para ello se necesita acceder a los datos de campo capturados por el sistema SCADA. No basta pues con disponer de la información más actual del SIG. En base a los datos del SCADA, el modelo debe 'sintonizar' con lo que está ocurriendo realmente en la red; así, parte de los datos del SCADA servirán para fijar las 'condiciones de contorno' de la simulación, mientras que otros serán utilizados para contrastar los resultados del modelo con los valores observados, y en base a ello ajustar los parámetros del mismo, es decir, aquellos datos inicialmente desconocidos que forman parte de la información almacenada en el SIG, y que habrá que determinar durante el proceso de calibración para poder ser utilizados con garantías en la confección de nuevos modelos.

La posibilidad de mantener conectados el SIG con el SCADA nos permitirá de este modo mantener el modelo siempre actualizado, no sólo en cuanto a demandas y estado de los elementos de la red, sino también en lo que respecta a los parámetros de calibración, que podrán revisarse cuantas veces sea necesario.

Finalmente, el simple hecho de vislumbrar que es **posible mantener permanentemente actualizado un modelo**, abre las puertas a la utilización de éstos no sólo en **planificación**, sino también en la **operación diaria de las redes**, lo que se llevaría a cabo integrando el modelo calibrado más reciente en el sistema SCADA de la compañía.

4.5 VENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DE LOS MODELOS EN UN ENTORNO SIG

Los SIG son el instrumento ideal para proporcionar información actualizada orientada a las tareas de planificación, diseño, operación y explotación de las empresas gestoras de los abastecimientos. Estos sistemas de información permiten enlazar registros geográficos a datos alfanuméricos, facilitando la consulta y análisis de grandes volúmenes de datos de una manera más eficiente y visual.

La funcionalidad de estos sistemas se ve considerablemente aumentada con la integración de herramientas adicionales orientadas a extraer información relevante para la confección de modelos de red que puedan ser analizados mediante el uso de simuladores hidráulicos. Más aún, si la integración incluye un módulo de cálculo capaz de simular una red de distribución y presentar los resultados de dicha simulación de manera transparente al usuario, tendremos entonces una completa herramienta de modelación y análisis que ampliará las posibilidades de diagnóstico y estudio de los sistemas de abastecimiento reales.

Resulta evidente que un SIG ofrece toda una serie de funcionalidades que facilitan el trabajo con grandes volúmenes de información provenientes de fuentes muy diversas, ya que es posible incorporar en un mismo entorno de trabajo la representación gráfica del área geográfica objeto de estudio, y las propiedades de los elementos asociados a dicho área.

Sin embargo, como carencia fundamental, cabe destacar el hecho de que a pesar de las capacidades de gestión de la información SIG, normalmente la plataforma base elegida, **no cuenta con la posibilidad de efectuar un análisis directo en materia de comportamiento hidráulico y de calidad del agua**, ya que entre otras cosas, se requiere una estructura de base de datos compatible con el simulador hidráulico que se pretenda utilizar. En consecuencia, es complicado encontrar sistemas que incorporen esta capacidad y en la mayoría de los casos la deficiencia se subsana con una labor de desarrollo para adaptar y aumentar la funcionalidad y potencialidad del software base seleccionado. En ese sentido, cobra mayor interés el hecho de implementar de manera transparente al usuario un programa de simulación dentro del correspondiente sistema de información geográfico.

La posibilidad de integrar un programa de simulación hidráulica y de calidad como EPANET en un gestor de bases de datos georreferenciados, supone la obtención de una serie de ventajas evidentes desde el punto de vista de la modelación y análisis de las redes de abastecimiento. Entre los objetivos iniciales para los cuales se concibe la integración, cabe destacar:

- **Construcción de modelos** capaces de ser simulados hidráulicamente desde el entorno SIG.
- **Integración del módulo de cálculo de EPANET** como parte inherente del propio SIG.
- **Salida gráfica de resultados de simulación en el SIG.**
- **Desarrollo de técnicas de simplificación y carga de modelos.**
- Desarrollo de herramientas de cálculo para la **realización de balances hídricos en la red.**

- Desarrollo de un modelo para la **evaluación y localización de fugas**.
- Desarrollo e integración de modelos para la **optimización de recursos**.
- Verificación de **modelos de mantenimiento predictivo**.
- Evaluación de indicadores de gestión e índices de calidad (benchmarking).

Las ventajas más destacables de la integración incluyen:

- **Conexión a una base de datos contenedora de los atributos de los elementos que componen la red y de las medidas de campo procedentes del sistema SCADA**, que puede ser permanentemente actualizada, incluso en tiempo real, mediante la adecuada implementación de un sistema de gestión corporativo.
- **Capacidad de sectorización** de las redes a partir de las herramientas ofrecidas por los SIG, gracias a la interacción del usuario con la red de detalle.
- **Capacidad de simplificación de las redes** mediante técnicas de esqueletización implementadas en el entorno GIS.
- **Mejora de las capacidades de visualización y tratamiento de la información gráfica**, gracias a las herramientas proporcionadas por el propio SIG, sin duda mucho más potentes y generales, frente a las del programa de simulación.
- Capacidades de **interactuar con fondos urbanos y cartográficos**, para determinar los consumos en los nudos, o las zonas de una población afectadas por una avería, por ejemplo.

En definitiva, la capacidad potencial de una aplicación que permita la materialización de todos estos cometidos es enorme de cara a una mejor gestión de las redes de suministro, lo que justifica plenamente el interés de la implementación del simulador EPANET en un sistema de información geográfica.

Asimismo, con una integración de esta naturaleza se pretende dar una visión de mayor alcance a las compañías encargadas de gestionar el agua, eliminando los posibles prejuicios adquiridos por parte de éstas, acerca de la verdadera utilidad de los sistemas de información geográfica. Con el desarrollo de aplicaciones de estas características, los SIG pasan a ser algo más que un mero instrumento de almacenamiento y consulta de datos, adquiriendo mayor protagonismo en cuestiones tales como la toma de decisiones en la gestión diaria o la implantación de políticas de actuación en las empresas de servicios.

Todo ello va a repercutir positivamente en todas aquellas estrategias corporativas enfocadas a ofrecer un mejor servicio a sus abonados, así como a tomar mejores decisiones respaldadas por el modelo hidráulico de la red.

CAPÍTULO 5

INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS EN UN SIG.
LA APLICACIÓN GISRed

CAPÍTULO 5. INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS EN UN SIG. LA APLICACIÓN GISRED

5.1 INTRODUCCIÓN

La utilización de modelos matemáticos de las redes de distribución de agua ha irrumpido de manera muy positiva en la gestión actual de los abastecimientos de agua. Sin embargo, su construcción es una tarea tediosa que exige el manejo de un volumen considerable de datos, obligando en la práctica a efectuar numerosas simplificaciones. Afortunadamente, los sistemas de información geográfica (SIG) ofrecen una gran cantidad de herramientas y funcionalidades que facilitan esta tarea y permiten acceder ágilmente a una gran cantidad de información digital, caracterizada por presentar una componente geográfica y estar vinculada a multitud de atributos alfanuméricos que posibilitan la configuración de la red de suministro y definen su modo de operación. Gracias a los SIG, los modelos matemáticos pueden construirse en la actualidad con mayor detalle y, además, mantenerse actualizados.

Algunos de los inconvenientes más frecuentes que aparecen en el momento de generar y ensamblar un modelo matemático desde un sistema de información geográfica son:

1. La necesidad de mantener en todo momento la topología de red actualizada como requisito fundamental del modelo hidráulico.
2. El tratamiento especial de todos los elementos singulares de la red (por ejemplo, las bombas y válvulas de regulación).
3. La consideración de algunas propiedades hidráulicas especiales que exigen los modelos de red (rugosidades, parámetros de calidad, coeficientes de pérdidas, etc).
4. La necesidad de simplificación del modelo de red.
5. La definición de escenarios de simulación para diferentes condiciones de funcionamiento.
6. La gestión de dichos escenarios para diferentes condiciones de contorno.
7. La recuperación de los resultados de una simulación hidráulica y de calidad desde el propio entorno SIG.

Las ventajas de los SIG en términos de gestión y manejo de grandes volúmenes de información de fuentes muy diversas, son incuestionables, puesto que permiten incorporar en un mismo entorno de trabajo la representación gráfica del área geográfica objeto de estudio y las propiedades de los elementos vinculadas a dicho área.

Sin embargo, como inconveniente fundamental, cabe destacar el hecho de que a pesar de las capacidades de gestión de la información SIG, estos sistemas no cuentan con la posibilidad de efectuar un análisis del comportamiento hidráulico y de calidad del agua, ya que ello requiere de un modelo de datos y una estructura de base de datos adaptados al simulador hidráulico que se pretenda utilizar. En consecuencia, es complicado a priori encontrar aplicaciones y herramientas no comerciales que incorporen esta capacidad. En la mayoría de los casos la inexistencia se ha de subsanar con una ardua labor de desarrollo que permita personalizar, adaptar y aumentar la funcionalidad y potencialidad de la plataforma SIG base. En este contexto adquiere gran interés la integración de forma transparente de un programa de simulación hidráulica en el seno de un sistema de información geográfica.

La posibilidad de integrar un programa como EPANET en un gestor de bases de datos georreferenciados como ArcView GIS (ESRI), ofrece multitud de ventajas. Esto es precisamente lo que se ha perseguido con el desarrollo de GISRed, la aplicación que se va a describir a lo largo de este capítulo.

GISRed es una extensión de ArcView GIS orientada a la modelación y calibración de redes de distribución de agua a presión. La aplicación se ha concebido no solo como una herramienta de modelación que emula todas las funcionalidades del simulador hidráulico y de calidad, EPANET, desde el propio entorno de ArcView GIS, sino que además ofrece funcionalidades adicionales para la construcción eficiente de los modelos y para la toma de decisiones derivadas de la simulación del modelo. Entre las muchas funcionalidades de la aplicación destacan las siguientes: *capturar datos geográficos y alfanuméricos de fuentes diversas para la generación de la topología de red; asignar espacialmente las demandas del sistema; interpolar cotas en los nudos del modelo; calibrar el modelo mediante un algoritmo genético; simular el modelo mediante un simulador y recuperar los resultados de la simulación para poder tomar decisiones en la gestión y operación del sistema de abastecimiento.*

5.2 LA APLICACIÓN GISRED

La aplicación GISRed, desarrollada bajo el entorno de ArcView GIS, ha sido programada con el objetivo de aplicar las tecnologías SIG para la gestión técnica de los abastecimientos urbanos, prestando especial atención en la etapa de construcción de los modelos matemáticos de las redes como soporte para la toma de decisiones.

La aplicación desarrollada viene a suplir de algún modo los inconvenientes que presenta EPANET en materia de entrada y manipulación de los datos del modelo de la red, aportando diversas herramientas originales y novedosas para el diagnóstico y análisis de las redes de distribución de agua a presión, mediante la ayuda de los modelos matemáticos combinados con técnicas de exploración de grafos.

Uno de los campos en los que GISRed resulta más útil, es en el desarrollo de planes directores para las redes de abastecimiento. En un plan director, la tarea principal es configurar un modelo de la red actual y realizar un diagnóstico del funcionamiento del sistema. En base a este modelo se proponen nuevos escenarios de funcionamiento a corto y largo plazo, teniendo en cuenta tanto los cambios demográficos como las nuevas zonas de expansión de la ciudad. Finalmente, se plantean mejoras sobre la red real y se simulan con la ayuda del modelo calibrado para comprobar la viabilidad de las alternativas propuestas y secundar las estrategias de ejecución.

5.2.1 Justificación del desarrollo de la aplicación GISRed

ArcView GIS es una potente herramienta de visualización, exploración, consulta y análisis de datos geográficos. Sin embargo, desde el punto de vista de la preparación de modelos de redes de abastecimiento, presenta multitud de inconvenientes. Entre los principales inconvenientes están:

- ArcView **no gestiona topología**, con lo que resulta necesario desarrollar por código una serie de scripts o módulos de programación que garanticen en todo momento las relaciones topológicas y la conectividad de la red.
- ArcView **no lleva implícito el manejo de bases de datos relacionales**. Es necesario emular por programación el comportamiento de este tipo de estructura de base de datos.

- **Imposibilidad de edición gráfica sobre dos temas simultáneamente.** De cara a la modelación de tuberías, es necesario que cada vez que se introduce una tubería, se añadan también dos nudos en sus puntos extremos. Esto no resulta inmediato en ArcView y hay que recurrir de nuevo al desarrollo de scripts de programación que permitan esta operación.
- El obstáculo más complicado de abordar es el relativo a los elementos singulares de la red, tales como **bombas y válvulas**. Desde el punto de vista de un SIG, estos elementos son considerados como entidades puntuales, representados con un punto y su símbolo correspondiente. Desde el punto de vista del **simulador hidráulico**, estos elementos **deben ser líneas**, con sus correspondientes nudos extremos aguas arriba y aguas abajo, con lo que resulta crítico llegar a una solución adecuada que permita la fácil interpretación de dichos elementos desde ambos puntos de vista.
- Otro punto importante en el entorno de ArcView es el relacionado con el objeto 'vista (view)' que va a albergar toda la información relativa a la red modelada y sus hipótesis de trabajo. Para ello debe existir y desarrollarse el concepto de **proyecto y escenario de simulación**.

Por tanto, el objetivo perseguido tras la elección de la plataforma SIG de trabajo, ha sido compensar la serie de carencias e inconvenientes que presentaba el software ArcView GIS, desde el punto de vista de la integración SIG-modelos. Para ello se ha personalizado el entorno de trabajo de ArcView, desarrollando una herramienta orientada a la construcción y calibración de modelos de redes de distribución de agua a presión, que integra todas las capacidades del simulador hidráulico EPANET 2, pero desde el propio entorno SIG.

5.2.2 Concepción general de la aplicación

Como ha quedado de manifiesto, la **aplicación GISRed ha sido ideada** con la intención fundamental de **crear y calibrar modelos de redes hidráulicas a presión desde un sistema de información geográfica**.

GISRed resulta especialmente útil a la hora de importar y reunir en un mismo escenario de trabajo, información dispersa en formatos diversos. Para ello, la aplicación permite generar, importar, editar y trabajar con modelos hidráulicos incluyendo una serie de herramientas personalizadas para estos cometidos. La principal ventaja de la aplicación es su manejo intuitivo y su integración total en el entorno de ArcView.

La aplicación se presenta como una herramienta útil para modeladores inexpertos en materia de SIG, capaz de facilitar tareas tales como la preparación de los datos, la depuración del modelo de red, el análisis y diagnóstico del mismo y la interpretación de los resultados derivados de una simulación hidráulica o de calidad del agua.

GISRed está compuesto por más de 600 módulos o scripts escritos en lenguaje Avenue, que es el lenguaje propietario de ArcView GIS, y 40 formularios/asistentes que permiten la interacción de la aplicación con el usuario.

GISRed introduce un nuevo concepto de proyecto, el denominado 'proyecto GISRed'. Frente al clásico proyecto ArcView, que no es más que un fichero de texto con extensión 'apr' que contiene la serie de referencias y rutas a la información espacial y alfanumérica almacenada en disco y vinculada a la sesión de trabajo actual, se constituye la idea de proyecto GISRed,

consistente en una base de datos que alberga a un conjunto de tablas relacionadas entre sí, conformando por tanto una estructura relacional, con una serie de campos y propiedades predefinidas de antemano por programación. Cada vez que el usuario genera un proyecto, lo que realmente está haciendo es definir un espacio de trabajo vinculado a una serie de tablas en formato shapefile y dBase (extensión *.dbf), que almacenará la información de un escenario de la red sujeto a una serie de condiciones de contorno e hipótesis de trabajo.

El escenario está directamente asociado a la base de datos relacional propia del proyecto actual e incluye dos temas básicos para la creación del modelo de red, un tema de líneas y un tema de puntos. Estos dos temas serán descritos con mayor detalle más adelante.

5.2.3 Principales prestaciones de la aplicación

A continuación se enumeran las principales prestaciones de GISRed:

- Desarrollada como una extensión de ArcView GIS 3.2.
- Totalmente compatible con las prestaciones de ArcView GIS y sus extensiones.
- Integra el simulador hidráulico y de calidad EPANET 2 en el propio entorno SIG.
- Posee una estructura de proyecto propia. Esta estructura propia se caracteriza por:
 - Base de datos relacional inherente al proyecto.
 - Ventana escenario con temas propios característicos (líneas, nudos, acometidas,...)
 - Gestor de proyectos (altas, bajas, copias, regeneración, importación,...).
 - Reconocimiento de la estructura propia de los temas.
 - Gestión propia de la visualización de los temas.
- Dispone de todas las herramientas propias del SIG para efectuar zooms, desplazamientos, consultas, diagramas, mapas, conexión con datos externos, etc.
- Importa redes en formato CAD, shapefiles y ficheros de entrada a Epanet (*.inp).
- Lleva implícita la generación automática de la topología y el mantenimiento de la misma durante las operaciones de edición.
- Proporciona herramientas básicas de edición de nudos y líneas (añadir, borrar y mover objetos; partir tuberías; editar vértices; generar conexiones en T; etc).
- Proporciona herramientas de chequeo y depuración de errores de topología.
- Permite la verificación de rangos para las propiedades de los elementos de la red (diámetros, rugosidad, cotas, etc).
- Comprueba en todo momento la conectividad del trazado y detecta las posibles desconexiones derivadas de la edición de la red.
- Incluye una serie de herramientas de verificación topológica y otras de análisis basadas en la topología de la red.
- Ofrece menús especiales para la edición de las leyes de control.
- Es capaz de asignar propiedades a grupos de elementos seleccionados de forma manual o mediante una consulta SIG.
- Asigna de forma automática las demandas a los nudos de la red.
- Permite la interpolación de cotas en los nudos de la red utilizando varios métodos de interpolación.
- Es posible realizar consultas directas sobre parámetros hidráulicos de la red (temáticos por diámetros, rugosidades, demandas, cotas,...).
- Permite la incorporación de fondos no inteligentes (CAD, fotografías aéreas, etc) y fondos inteligentes bajo el control de la aplicación (callejero, temas de componentes auxiliares como válvulas y acometidas,...).

- Realiza simulaciones hidráulicas y de calidad en conexión con el motor de cálculo de EPANET.
- Recupera y presenta los resultados de la simulación en temáticos específicos.
- Ofrece la posibilidad de crear múltiples escenarios de simulación.
- Permite la calibración mediante algoritmos genéticos.

La base de datos de la aplicación dispone de diversas tablas para almacenar los datos cartográficos de la red, los consumos registrados, las operaciones de mantenimiento efectuadas día a día, así como los datos de campo brutos y filtrados procedentes de un sistema SCADA. Asimismo dispone de herramientas implementadas para mantener todas estas tablas actualizadas, consultar sus datos, realizar estadísticas, etc.

También dispone de herramientas destinadas a efectuar un análisis detallado de los balances de agua inyectada a los diferentes sectores de la red, teniendo en cuenta el estado de las válvulas de la red que en la práctica puedan afectar a la correcta interpretación de los mismos. Para ello tiene en cuenta los datos de los caudalímetros dados de alta en la base de datos y sus registros asociados.

Se contemplan tablas para almacenar los consumos registrados por acometidas con frecuencia mensual, bimestral o trimestral. Adicionalmente la base de datos incluye tablas para almacenar las lecturas a nivel de contador y las fechas reales de lectura en todos los casos.

5.2.4 Diagrama del flujo de trabajo de la aplicación GISRed

Los pasos a seguir para construir un modelo matemático de una red de distribución de agua utilizando la extensión GISRed son:

- Digitalizar la red de distribución, partiendo de cero mediante las herramientas de edición, o bien importar una red en cualquiera de los formatos soportados por la extensión (CAD, Shapefiles, coberturas, etc).
- En el caso de realizar una importación, conviene comprobar posibles defectos o errores de importación. Para ello se dispone de múltiples herramientas de chequeo y verificación.
- Simplificar la red si fuera necesario, eliminando tuberías o nudos.
- Editar las propiedades hidráulicas de la red a través de los diversos diálogos creados al efecto y añadir los elementos hidráulicos necesarios (bombas, válvulas, bombas, depósitos, etc).
- Introducir las curvas de modulación, curvas características de bombas, leyes de control, etc.
- Interpolan cotas en los nudos seleccionados del modelo a partir de otros temas auxiliares (nube de puntos de cota, modelo digital del terreno, o un TIN).
- Cargar el modelo a partir de los datos de consumo disponibles, asociados a la base de datos.
- Seleccionar las opciones de análisis (definición del escenario de simulación).
- Exportar el fichero de datos para ejecutar el modelo externamente en EPANET, o ejecutar directamente un análisis hidráulico o de calidad e importar los resultados al SIG.
- Definir y configurar un escenario de calibración y lanzar el calibrador mediante un algoritmo genético. Repetir este proceso hasta alcanzar un buen ajuste.
- Consolidar en el modelo los resultados obtenidos tras el proceso de calibración.
- Ejecutar una nueva simulación y analizar los resultados para comprobar si se ajustan a lo esperado.

El diagrama de trabajo para la construcción y calibración de un modelo matemático con GISRed, se resume en el siguiente diagrama:

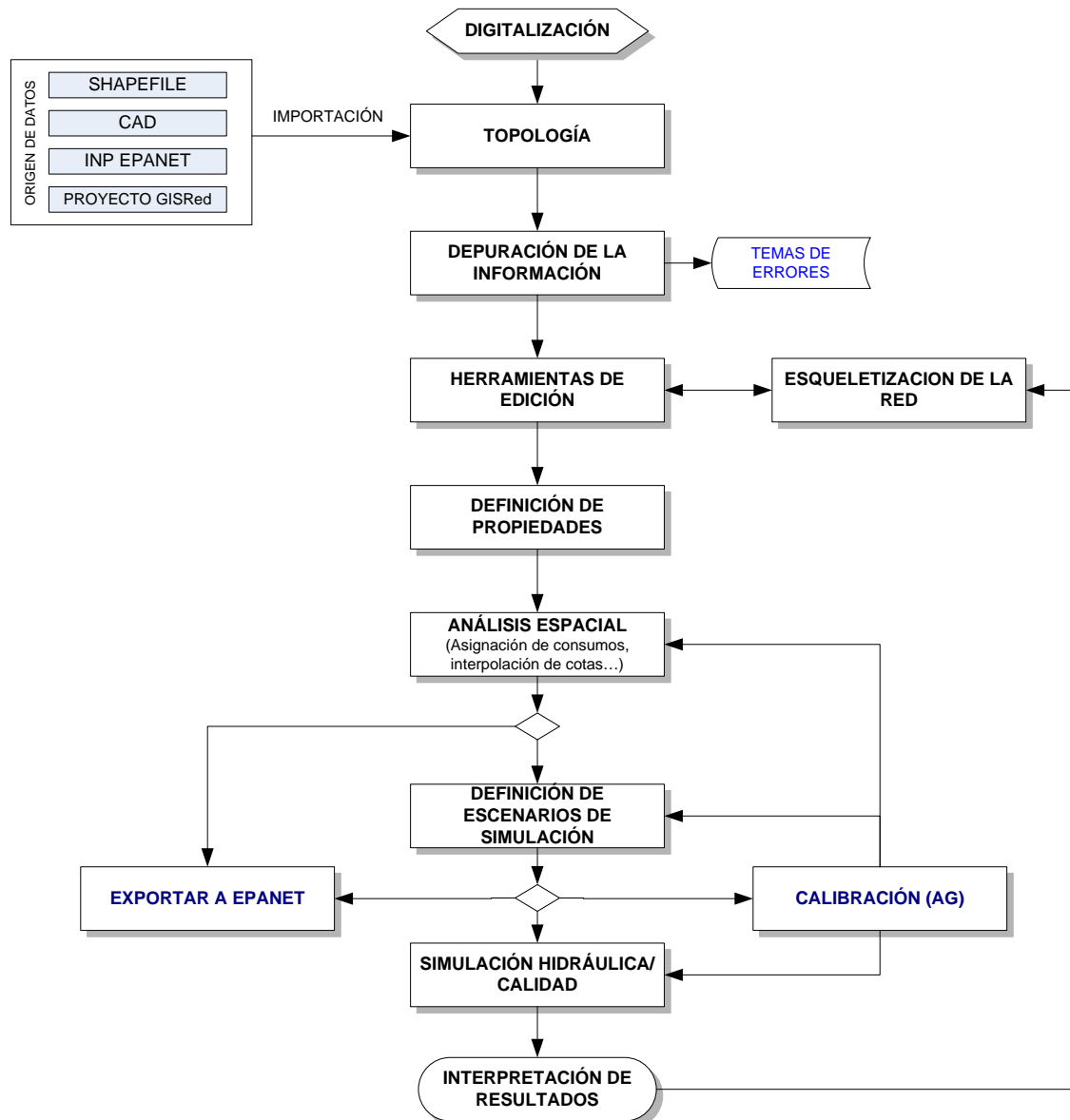


FIGURA 5. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO DE LA RED UTILIZANDO LA EXTENSIÓN GISRED.

5.2.5 Estructura básica de datos de la aplicación

La característica fundamental de cualquier sistema de almacenamiento de datos es permitir el acceso rápido a la información y las referencias cruzadas. Existen varias formas de conseguir esto, desde la simple lista de archivos, los archivos ordenados secuencialmente y los archivos indexados, hasta estructuras más complejas utilizadas por el gestor de base de datos. A medida que el número de registros de la base de datos aumenta, su estructura pasa a jugar un papel primordial. La estructura elegida para la base de datos de GISRed es del tipo relacional, estructura que hubo de ser emulada mediante programación, ya que ArcView GIS no soporta este tipo de bases de datos.

En una base de datos relacional, los datos se almacenan en diversos ficheros planos llamados tablas, que a su vez se pueden entender como entidades bidimensionales interconectadas. Cada tabla tiene una serie de filas (o registros), y un conjunto único de columnas (o campos) de atributos predefinidos. Las tablas están enlazadas mediante un conjunto de claves, una primaria y el resto secundarias. De esta forma la redundancia queda reducida al mínimo. Establecer nuevas asociaciones entre elementos es sencillo ya que los datos no deben ser reestructurados cada vez, lo que le confiere mucha flexibilidad. Aprovechando el lenguaje de programación propio de ArcView, se han desarrollado rutinas para: la realización de búsquedas eficientes de registros en tablas, indexación de los campos clave más utilizados, el reordenamiento de registros, etc.

El objetivo básico es evitar la redundancia de la información, optimizar la memoria, flexibilizar la estructura de la información y crear un modelo estándar de almacenamiento de datos orientado a la obtención de modelos hidráulicos. Toda la información se estructura en tablas, las cuales se relacionan a través de campos clave que almacenan los identificadores internos de cada elemento. La información se manipula mediante operaciones básicas del álgebra relacional: selección, concatenación, agrupamiento, unión, intersección, diferencia, etc. Las operaciones se efectúan a nivel de tabla en conjunto, obteniendo como resultado una nueva tabla (virtual o física).

Un proyecto GISRed, por tanto, establece una base de datos relacional consistente en un conjunto de tablas estructuradas con una serie de campos definidos, que delimitan la configuración funcional de la aplicación. Dichas tablas están enlazadas entre sí por medio de un identificador único (campo clave).

Existen dos tablas principales directamente asociadas a los temas básicos de nodos y líneas, existentes en cualquier escenario. Éstas se caracterizan por contener el campo Shape que alberga la información gráfica y espacial de los elementos que conformarán el modelo de red.

En la tabla de nodos, los registros hacen referencia a todos los elementos puntuales de la red con representación gráfica, es decir, nudos de consumo, depósitos, embalses y nudos extremos de bombas y válvulas, y contienen información general de estos elementos tales como identificadores internos, identificadores de usuario, leyenda a mostrar, etc. Esta tabla también contiene el grado de conectividad físico de cada nudo y el ángulo de rotación del símbolo asociado en el caso de bombas y válvulas.

En el caso de la tabla de líneas, los registros hacen referencia a todos los elementos lineales existentes en la red con representación gráfica, es decir, las tuberías y los pequeños tramos que definen las válvulas y las bombas, ya que estos elementos son considerados como líneas por el simulador hidráulico. Esta tabla contiene además la topología de la red, así como el estado de cada línea (abierta o cerrada).

Cada una de estas dos tablas está asociada y vinculada a una serie de tablas sin contenido gráfico (tablas de datos alfanuméricos) con formato *.dbf, que almacenan toda la información relevante a efectos de construcción del modelo, esto es, las propiedades hidráulicas de los diferentes elementos representados por los nudos y líneas.

Además de estas tablas, existen otras que almacenan la información relativa a las curvas de modulación, curvas de comportamiento, leyes de control, opciones de simulación, datos de lecturas de contadores, datos registrados por los medidores instalados en la red, sectores

hidrométricos, etc. Todas estas tablas resultan fundamentales para generar la entrada al simulador hidráulico.

En la Figura 6 se muestra parte de la estructura relacional de la base de datos asociada a un proyecto GISRed. Para obtener más detalles acerca del modelo de datos que sustenta la aplicación, véase el ANEXO 1. En ella se pueden observar las relaciones que ligan las tablas de nudos y líneas con las tablas auxiliares que contienen las propiedades de los diferentes elementos.

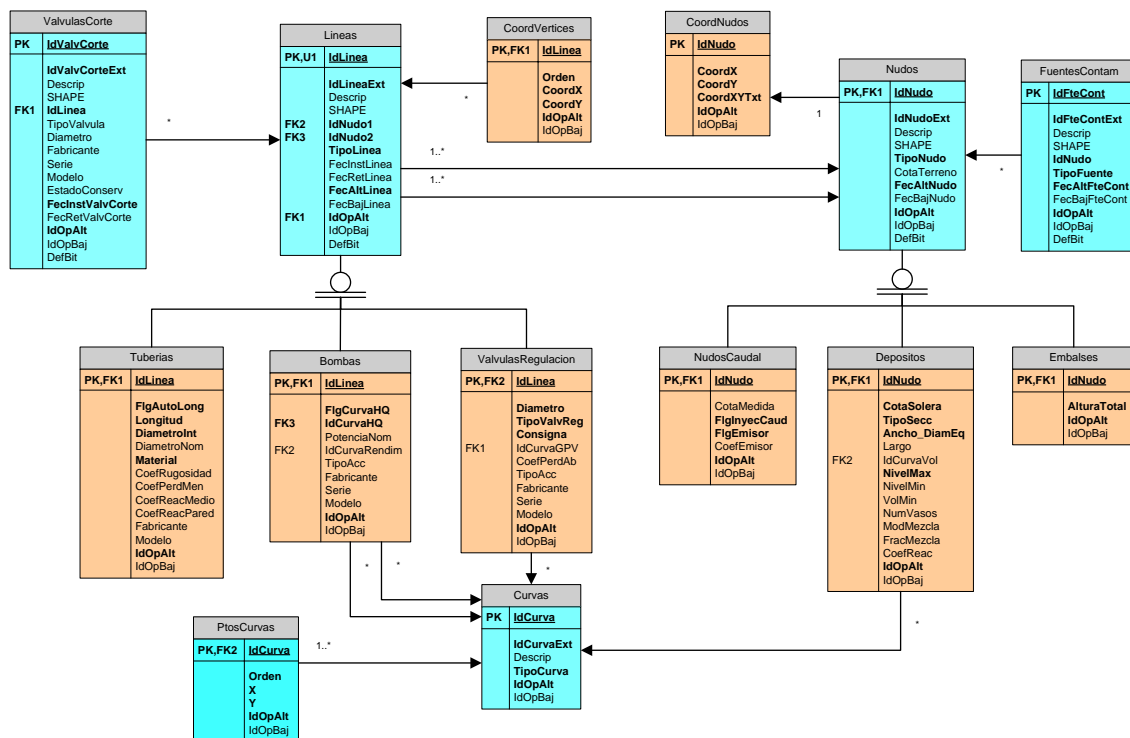


FIGURA 6. ESTRUCTURA RELACIONAL BÁSICA DE TABLAS EN LA APLICACIÓN GISRED.

Como ilustra el diagrama, cada uno de los temas básicos lleva asociado una tabla caracterizada por el campo SHAPE (campo de tipo binario que alberga la información espacial). Ambas tablas están íntimamente relacionadas por medio de una serie de identificadores internos asignados automáticamente por la aplicación conforme se van digitalizando o importando tuberías, por lo que la integridad de la topología de la red se garantiza en todo momento. Se diferencia entre identificadores internos (aquellos controlados por la aplicación) y los externos o de usuario definidos por el usuario o importados durante un proceso de captura de información. Cada una de estas tablas (lineas y nudos) está a su vez vinculada a una serie de tablas que contienen información adicional de cada uno de los elementos existentes en la red. Los campos *TipoNudo* y *TipoLinea* establecen la tabla externa a la que se refiere el registro gráfico de las tablas de los temas básicos, mientras que los campos *IdLinea* e *IdNudo* contienen los identificadores únicos que permiten identificar los registros con las propiedades del elemento de red en cuestión dentro de cualquiera de las tablas de depósitos, embalses, nudos de consumo, tuberías, válvulas y bombas.

5.2.6 Temas gráficos

Un escenario GISRed admite los mismos temas que soportaría una vista en ArcView, pero además ofrece la posibilidad de incluir una serie de temas controlados por la aplicación con

una estructura definida. Por ejemplo, temas de componentes y de tuberías que no interactúan con la topología del modelo de red y que únicamente proporcionan información adicional como los catálogos de imágenes ráster o los callejeros geocodificados. Cada uno de estos temas gráficos lleva asociado una serie de herramientas particulares y unos formularios específicos.

No existe número máximo de temas admitidos por un escenario. Además, para facilitar la gestión de todos los temas existentes en la tabla de contenidos de un escenario, se dispone de un gestor de temas que mantiene las características de las leyendas de los mismos en todo momento.

5.2.7 Descripción del procedimiento de construcción de un modelo con GISRed

Construir un modelo de detalle de una red de distribución de agua sólo es viable si se cuenta con las herramientas apropiadas para ello, debido fundamentalmente al gran volumen de información que se maneja. Con GISRed es posible capturar la información en 'bruto', normalmente suministrada en formatos CAD, para generar el modelo de la red. La información digital de partida incluye en la mayoría de casos la cartografía urbana distribuida en multitud de capas, a saber, manzanas, parcelas, curvas de nivel, conducciones de la red, válvulas, etc y en ocasiones incluso las propiedades físicas de los elementos representados, como diámetros, cotas, materiales de tubería, etc. Toda esta información debe ser analizada y filtrada inicialmente, para seguidamente proceder a generar los temas en formato shape, los cuales podrán ser utilizados, editados y manipulados desde cualquier entorno SIG.

En este punto resulta fundamental identificar la(s) capa(s) donde reside la información relativa a las conducciones de agua. Esta información es esencial para ensamblar el modelo de red, proporcionándole una topología coherente como veremos en un apartado posterior.

Alternativamente, si se dispone de ficheros shape sin topología con la cartografía de red y sus propiedades, GISRed incorpora del mismo modo a su base de datos toda la información relevante, creando la topología de la red automáticamente y detectando posibles incoherencias en la misma.

5.2.7.1 Creación de Proyectos. Importación de la Información

Una vez creado el escenario de trabajo, la extensión GISRed permite construir el modelo de la red desde cero o bien importando la red desde un formato original diferente. Este último caso es el más frecuente. Los formatos que GISRed permite importar son: coberturas ArcInfo, shapefiles de ArcView, ficheros CAD (dgn, dwg, dxf), ficheros input (*.inp) de EPANET y proyectos GISRed (para la regeneración o importación de proyectos corruptos). Cada uno de estos formatos requiere una interpretación de la información en origen, ya que la aplicación debe leer la información original, interpretarla, depurarla (si es necesario) e incorporarla a la base de datos propia del proyecto. Se han desarrollado varios módulos que contemplan cada uno de los tipos de importación admitidos. La parte crítica del proceso de introducción de elementos de red en el escenario de trabajo, bien digitalizando desde cero (utilizando para ello las herramientas de edición existentes) o bien mediante la importación de la información, reside en el hecho de generar una topología coherente y preservarla durante el proceso de edición de la red. Para ello las herramientas de edición de red llevan implícitas una serie de acciones como son: el anclaje de las tuberías en los nudos extremos de las ya existentes siempre que éstos se hallen dentro de una tolerancia que marca automáticamente la aplicación; la edición automática de los nudos extremos de una tubería, etc.

Al final del proceso de importación, la aplicación muestra una serie de temas auxiliares con información de posibles errores encontrados durante el proceso, que no se pudieron corregir. Además se facilitan herramientas para la corrección de dichos errores, por ejemplo se dispone de un navegador que salta de error en error destacando el posible error existente.

A modo de ejemplo, si se dispone de información digital en formato CAD (dgn, dxf, dwg,...) es posible utilizar las herramientas de importación propias de la extensión GISRed para capturar la capa correspondiente a la red de abastecimiento y generar un primer escenario de trabajo con la red actual. La importación de la red es automática, con la ventaja añadida de poder capturar las etiquetas de texto adjuntas al dibujo CAD que suelen hacer referencia a los diámetros y/o materiales. La información de origen se interpreta, se depura inicialmente (conexiones entre tuberías, anclaje de finales de tubería próximos, adición automática de nudos extremos en las tuberías, etc.) y se incorpora a la base de datos propia del proyecto GISRed. La aplicación genera automáticamente una topología coherente y la preserva actualizada en todo momento durante posteriores procesos de edición de la red.



FIGURA 7. IDENTIFICACIÓN DE LAS CONDUCCIONES SOBRE EL FONDO URBANO EN FORMATO CAD, COMO PASO PREVIO A LA IMPORTACIÓN.

Alternativamente, si se dispone de ficheros shape sin topología con la cartografía de red y sus propiedades, GISRed incorpora del mismo modo a su base de datos toda la información relevante, creando la topología de la red automáticamente y detectando posibles incoherencias en la misma.

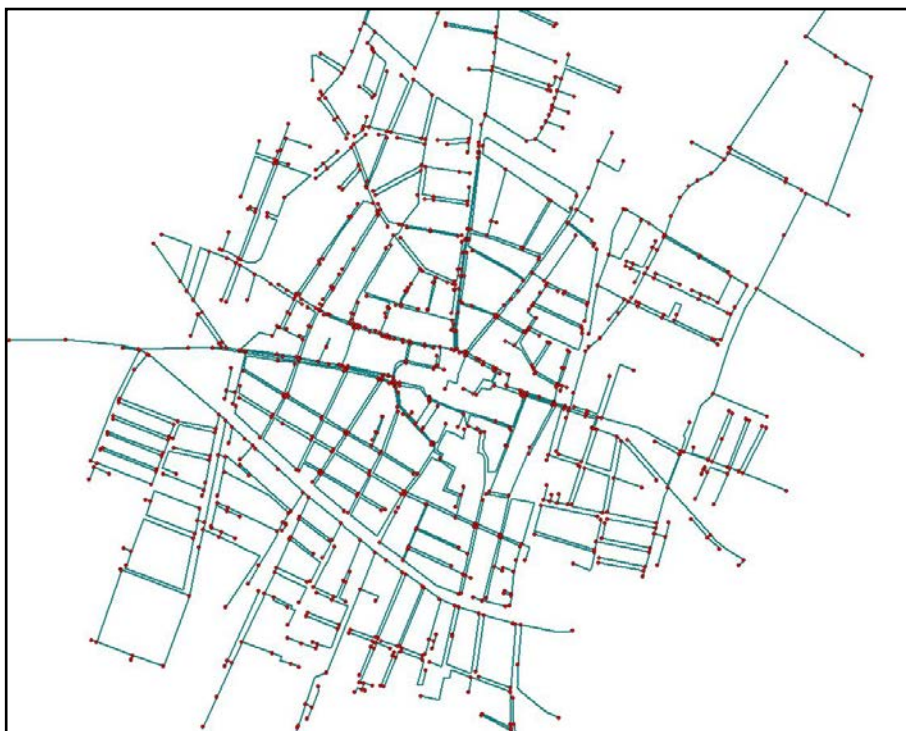


FIGURA 8. MODELO TOPOLÓGICO DE LA RED, GENERADO TRAS LA CAPTURA DE LA CAPA CAD.

5.2.7.2 Herramientas de Edición y Propiedades

GISRed presenta una serie de herramientas de edición agrupadas en diferentes barras de herramientas que son dependientes del tema activo en la tabla de contenidos del escenario. Las barras de herramientas disponibles en GISRed son:

- Barra de herramientas de **Líneas**: permite introducir tuberías al modelo, editar y modificar vértices, dibujar tuberías mediante coordenadas de todos sus vértices y borrar tuberías.
- Barra de herramientas de **Nodos**: permite añadir nudos de consumo, bombas, válvulas, depósitos, embalses, mover nudos (y consecuentemente todas las tuberías conectadas a él), conectar extremos de tuberías, generar T's, y borrar nudos (fundiendo las correspondientes tuberías siempre que lo permitan sus propiedades). Es también posible convertir el tipo de nudo en cualquier momento, así pues, una válvula puede ser convertida a nudo de caudal y viceversa.
- Barra de herramientas para **los temas de líneas y componentes no pertenecientes al modelo**: la forma de trabajar de las herramientas de estos temas es similar a la comentada para los temas básicos, pero con la diferencia de que en este caso no se atiende a la topología de los elementos.
- Herramientas para **catálogo de imágenes**: estas herramientas permiten situar imágenes de fondo en el escenario. Facilitan las tareas de posicionado y georreferenciación de la fotografía o imagen aérea en el escenario correspondiente. Existe también la posibilidad de eliminación de las imágenes del catálogo.

Para introducir las propiedades hidráulicas de los elementos que componen el modelo de red, existen una serie de diálogos asociados a cada elemento, llamados **editores de propiedades**.

Las propiedades que pueden editarse con estos diálogos son las propiedades fundamentales para construir un modelo hidráulico y de calidad. Asimismo, existen editores de patrones y curvas de comportamiento, así como editores especiales para la introducción de controles simples y reglas compuestas de control de ciertos elementos de la red.

Por último destacar también los asistentes desarrollados para la interpolación de cotas y la asignación de demandas. En el primer caso se requiere un tema de puntos que se toma como base para la interpolación. Para la asignación de demandas, es necesario disponer de datos de consumo distribuidos por áreas, por calles o bien por puntos georreferenciados. En el caso de datos de consumo distribuidos por calles, resulta imprescindible la utilización de un callejero (viario) de la ciudad objeto de estudio.

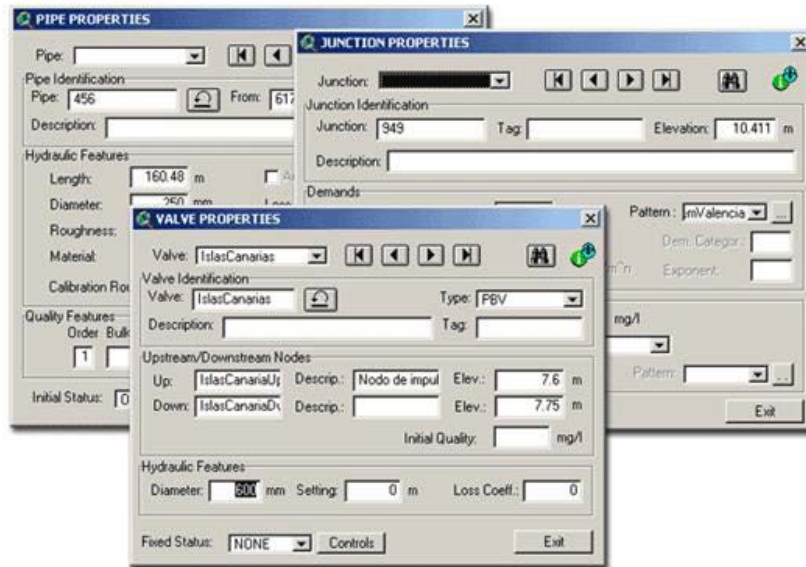


FIGURA 9. FORMULARIOS DE PROPIEDADES DE LOS ELEMENTOS FÍSICOS.

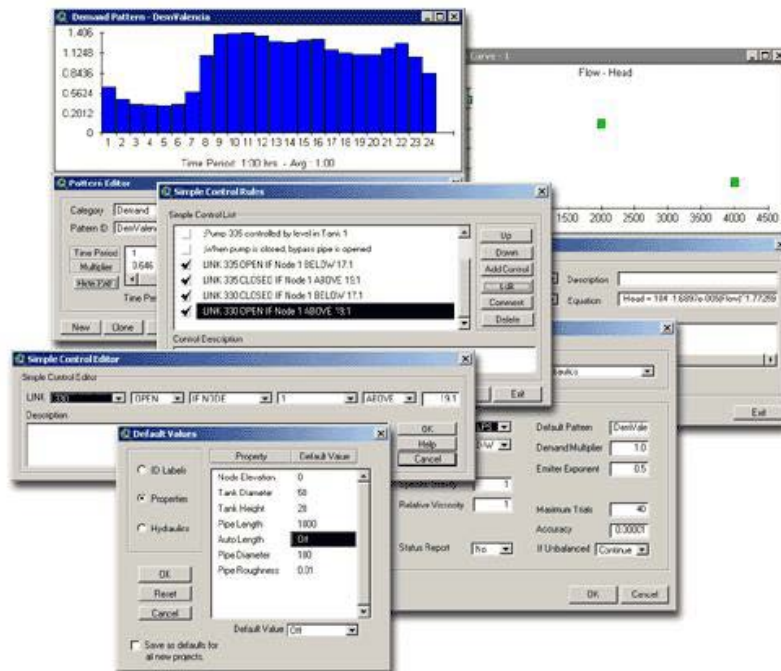


FIGURA 10. OTROS DIÁLOGOS DE PROPIEDADES.

5.2.7.3 Herramientas de Depuración y Verificación

Al finalizar el proceso de importación, la aplicación muestra una serie de temas auxiliares con información sobre 'posibles' errores detectados, que no se pudieron corregir durante el proceso de captura. GISRed facilita una serie de herramientas para la corrección de dichos errores. Por ejemplo, se dispone de un navegador que salta de error en error destacando mediante un determinado símbolo la posible causa de error.

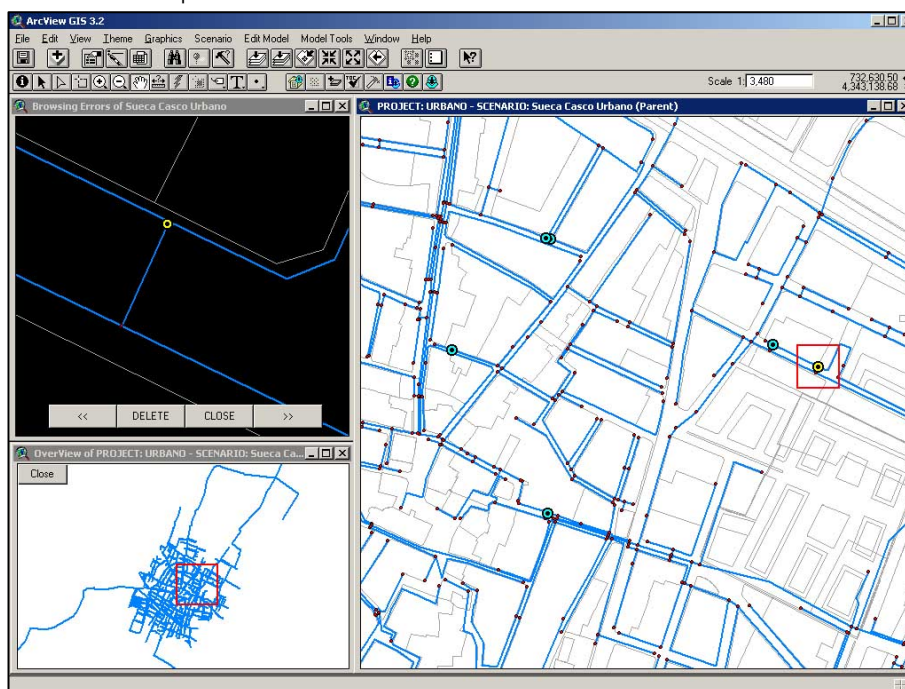


FIGURA 11. NAVEGADOR DEL TEMA DE ERRORES EN NUDOS.

Adicionalmente, la extensión incluye una serie de herramientas enfocadas a la detección y reparación de errores e inconsistencias en el modelo de red. Por ejemplo, la detección de nudos extremos de tuberías que quedan muy cerca unos de otros dentro de una tolerancia definida; localización de elementos con parámetros de red no definidos o inexistentes (diámetros, rugosidades, cota, material, etc.). Tras este proceso de verificación, si se detecta alguna anomalía la aplicación genera un nuevo tema de errores en la tabla de contenidos del escenario, mostrando los elementos en los que se detectó dicha anomalía.

De todas las herramientas de depuración, la más destacable es la que comprueba la conectividad de la red haciendo uso de algoritmos propios basados en la teoría de grafos. Con este módulo resulta inmediato comprobar si la red se encuentra totalmente conexas o, por el contrario, presenta partes inconexas que supondrían un problema a la hora de simular. Como se ha comentado, existen una serie de herramientas de edición que permiten ir corrigiendo dichos errores.

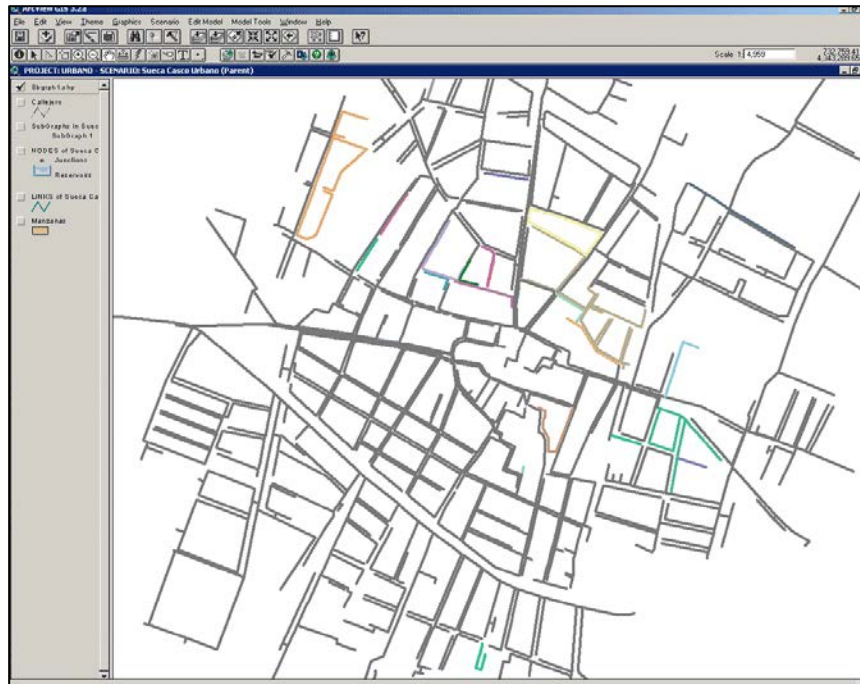


FIGURA 12. COMPROBACIÓN DE LA CONECTIVIDAD DE LA RED TRAS LA IMPORTACIÓN. EN COLOR LOS SEGMENTOS DE RED DESCONECTADOS.

5.2.7.4 Herramientas de simplificación de modelos

Véase el CAPÍTULO 9 dedicado a la esqueletización de redes con GISRed.

5.2.7.5 Interpolación de Cotas

La cota de un nudo de consumo es siempre una propiedad requerida cuando se trabaja con un simulador hidráulico. Es un dato fundamental en el proceso de calibración, y uno de los parámetros más significativos a la hora de obtener con fiabilidad las presiones en los nudos del modelo. La mayoría de paquetes SIG del mercado proporcionan diversos algoritmos capaces de generar superficies de interpolación a partir de una nube de puntos con un atributo de cota asociado. Los más sofisticados, incluso permiten la generación de modelos digitales del terreno a partir de los cuales se interpola la cota en los nudos de la red. En el caso de GISRed, la asignación de cotas a los nudos se puede realizar de manera manual (nudo a nudo o en bloque) utilizando para ello los diálogos de propiedades, o bien mediante un algoritmo de interpolación que se apoya en un tema de puntos para asignar la cota en los nudos de la red (actuando sobre la totalidad o sobre la selección de nudos); el método utilizado es el de distancias inversas ponderadas (IDW). También es posible utilizar una superficie de interpolación o GRID para llevar a cabo la interpolación. En este caso es necesario disponer de la extensión *Spatial Analyst* de ArcView GIS 3.2. Alternativamente, es posible emplear un modelo digital del terreno en formato TIN (*Triangulated Irregular Network*) con la extensión *3D Analyst* y emplearlo para la interpolación de cotas en los nudos.

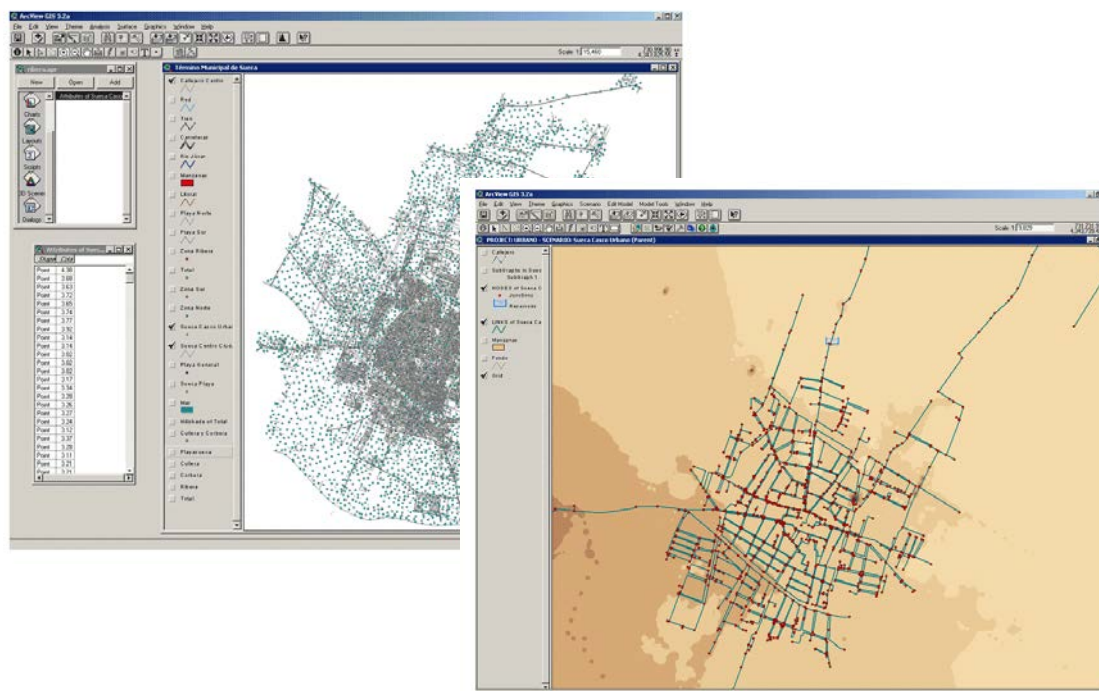


FIGURA 13. NUBE DE PUNTOS DE COTA Y SUPERFICIE DE INTERPOLACIÓN (GRID) PARA LA ASIGNACIÓN DE COTAS A LOS NUDOS DEL MODELO.

5.2.7.6 Asignación de Demandas

Esta es una de las etapas clave dentro del proceso de construcción del modelo matemático de una red de distribución de agua. La asignación de consumos a los nudos de la red resulta una labor harto difícil sin la ayuda de herramientas que faciliten la tarea de reparto del caudal consumido. Dada la componente espacial inherente en esta tarea, los SIG proporcionan un gran número de herramientas encaminadas a manejar toda la información que interviene en el proceso. Entre ellas cabe la posibilidad de conectar con bases de datos o ficheros externos conteniendo información acerca de los consumos recopilados por calles, por acometidas, por abonados, etc.

Resulta muy útil en estos casos disponer de un módulo capaz de realizar asignaciones automáticas a partir de estos ficheros o tablas externas, explotando la eficiencia de todas las herramientas disponibles en un SIG. GISRed implementa un gestor de hipótesis de carga y la opción de repartir los consumos (en función de un criterio como por ejemplo el diámetro de la tubería a la que pertenece el nudo) a partir de temas de puntos (grandes consumidores localizados, puntos de suministro...), temas de líneas (agrupación de consumos por calles, consumos en ruta, consumos agrupados por acometidas,...), o bien temas de polígonos (sectores de consumo, núcleos periféricos, nuevas zonas en expansión que marca el plan general de ordenación urbanística....), sobre ciertos nudos elegidos en función del diámetro de las tuberías a que pertenecen u otros criterios.

En el caso más habitual de disponer de los datos del consumo medio anual agrupados por calles, la aplicación GISRed es capaz de cargar el modelo automáticamente, aunque para ello resulta imprescindible la utilización del callejero de la ciudad (tema gráfico de ejes de calle). A partir de éste y el tema de nudos de la red, se obtiene un tema auxiliar que relaciona aquellos nudos pertenecientes a tuberías con diámetro menor o igual a uno especificado por el usuario, con el segmento de calle más próximo. Una vez identificados los nudos a cargar, se efectúa el reparto utilizando la herramienta de asignación de consumos de GISRed.

A continuación, si los grandes consumidores, tales como industrias, hospitales, polideportivos, etc se han identificado separadamente, se añade el consumo que corresponda como un consumo puntual en el nudo más próximo a dicha zona.

Además GISRed incluye una herramienta en forma de asistente que permite tener en cuenta el consumo no registrado (ej. consumos incontrolados como fugas, subcontajes en contadores, tomas clandestinas,...). Esta opción se utiliza para ajustar la demanda del modelo al volumen inyectado a la red. Por tanto, es posible introducir como parámetro de entrada el volumen total inyectado a la red o bien utilizar un tema de polígonos en el que se define el rendimiento de la red por zonas o sectores, o bien el caudal total inyectado a las mismas. En cualquier caso, el volumen no registrado se reparte automáticamente de manera proporcional a la demanda asignada a los nudos de cada zona.

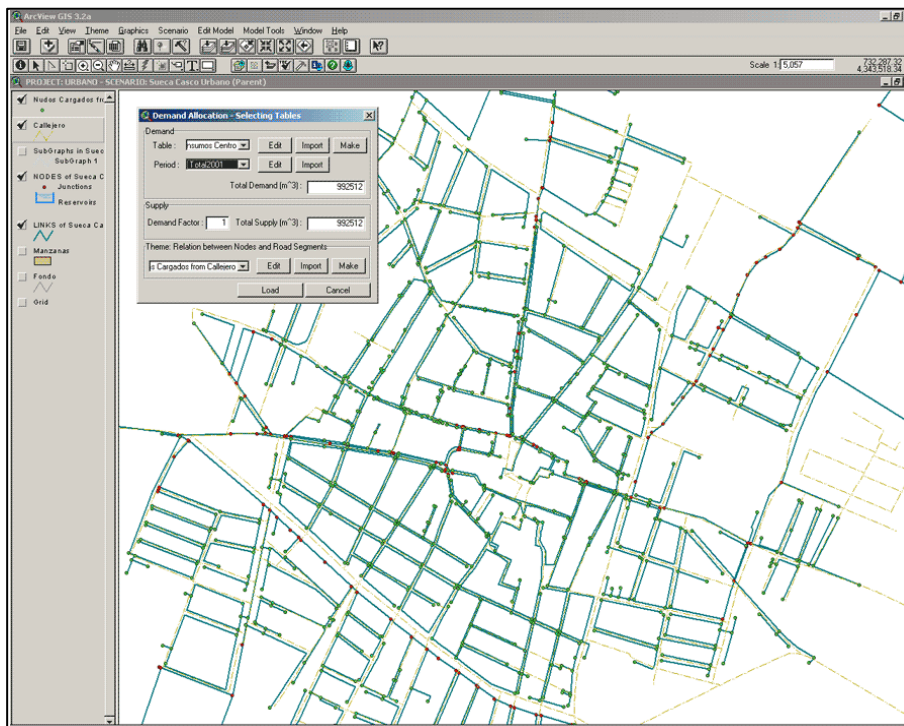


FIGURA 14. ASIGNACIÓN DE CONSUMOS (NUDOS CARGADOS EN VERDE).

En cuanto a la modulación de la demanda, es posible asociar una curva de modulación idéntica a todos los nudos de la red seleccionados en el momento de la carga, o bien asociar una curva diferente según el sector, calle o nudo concreto de la red. Todo ello utilizando el asistente que incorpora la aplicación.

Finalmente, a modo de resumen GISRed presenta un informe donde se puede comprobar que el caudal total repartido es igual a la suma de las demandas base de todos los nudos del modelo.

5.2.7.7 Calibración del modelo

Para calibrar el modelo en base a una serie de medidas de caudal y presión tomadas en diversos puntos de la red en determinados instantes de tiempo, se recomienda primeramente llevar a cabo una '*macrocalibración*' del modelo de forma manual, para obtener una mayor fiabilidad a la hora de interpretar y asumir resultados tras una simulación hidráulica. Los parámetros que se suelen ajustar a este fin son, fundamentalmente, rugosidades de tuberías y

consignas de las válvulas de regulación existentes, siempre y cuando aceptemos como válidos los datos de las cotas interpoladas y el reparto espacial de consumos. Con todo, el resultado final, será un modelo que nos permitirá efectuar un primer diagnóstico del estado de la red, así como llevar a cabo estudios posteriores sobre situaciones de emergencias y ampliaciones necesarias a corto, medio y largo plazo con ciertas garantías.

Si lo que se pretende es realizar una calibración más minuciosa, la extensión ofrece una de las funcionalidades más interesantes, que consiste en la calibración automática mediante técnicas de optimización por algoritmos genéticos (AG). El módulo de AG permite ajustar de manera automática las rugosidades de tuberías seleccionadas, aisladamente o por grupos. El modo de funcionamiento es sencillo, ya que se dispone de un asistente que guía en la introducción de todos los datos necesarios. Una vez introducidos, se ejecuta el proceso de optimización que trata de reducir las discrepancias entre las medidas de campo y los valores proporcionados por el modelo en cada una de las iteraciones. Al término, la aplicación recupera los datos generados por el módulo de calibración y los presenta al usuario a través de diálogos y gráficos.

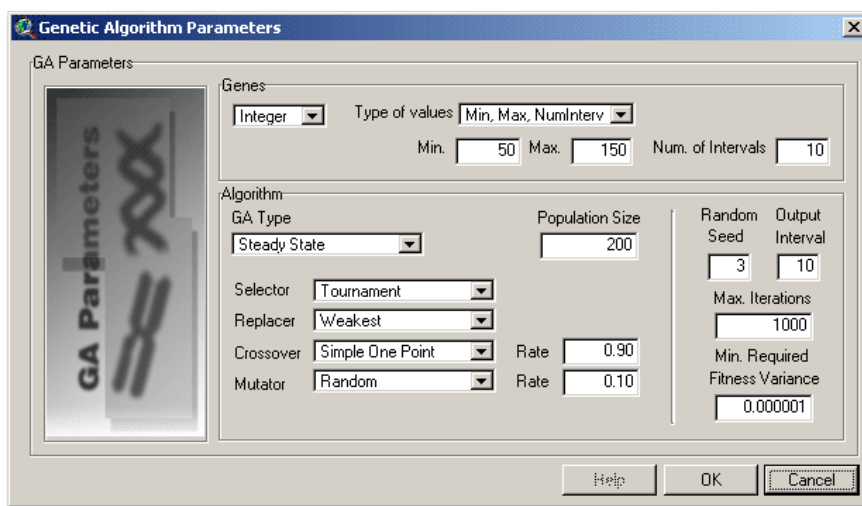


FIGURA 15. DIÁLOGO DE INTRODUCCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL ALGORITMO GENÉTICO.

5.2.7.8 Cálculo y análisis de resultados

Una vez construido el modelo matemático y definidas todas las opciones de análisis, éste puede exportarse a un formato interpretable por el simulador EPANET o bien lanzar una simulación desde el propio entorno SIG. De esta forma los resultados de la simulación pueden interpretarse desde EPANET o bien desde GISRed.

En el segundo caso GISRed permite ejecutar cuantas simulaciones sean necesarias para cada uno de los escenarios adoptados. Para ello se genera un fichero con los datos de entrada requeridos por el simulador y se llama al módulo de herramientas (Toolkit) de EPANET. El simulador proporciona un conjunto de resultados, que la aplicación se encarga de almacenar en su propia base de datos, para consulta posterior.

Para visualizar los resultados de la simulación, se dispone de un navegador en el que se elige la variable a representar y el instante de tiempo. Automáticamente se genera un tema clasificado por colores, con los resultados obtenidos. Las leyendas de los temas de resultados son editables con toda la gama de opciones que ofrece para ello ArcView.

La principal ventaja de analizar los resultados desde ArcView es la posibilidad de interactuar éstos con los fondos cartográficos existentes (parcelas, manzanas, ortofotos), y detectar, por ejemplo, todos los abonados afectados por presiones excesivamente bajas.

Por el contrario, si se opta por la exportación y simulación en EPANET, el procedimiento de análisis genera resultados como los que se muestran a la derecha de la figura siguiente:

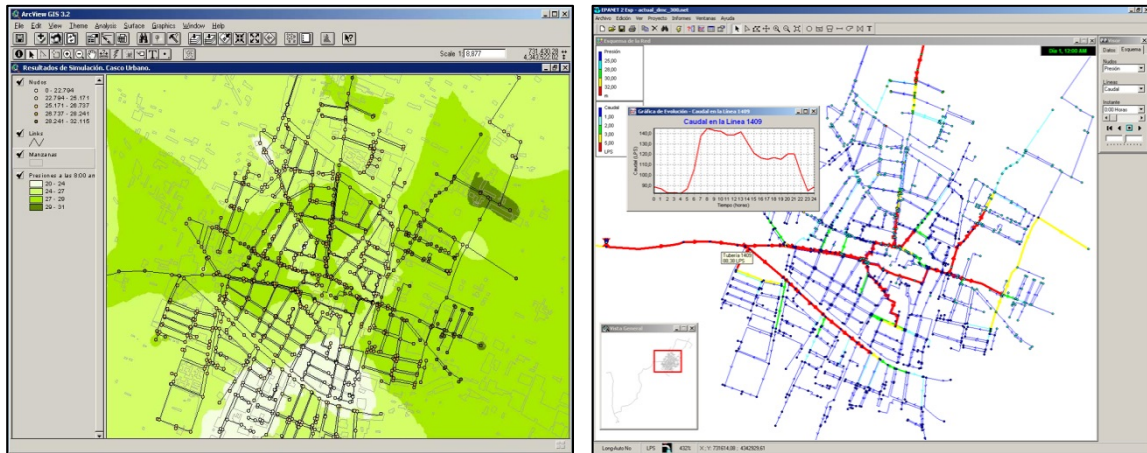


FIGURA 16. MAPA DE PRESIONES TRAS UNA SIMULACIÓN EN GISRED Y VISUALIZACIÓN ALTERNATIVA DE LOS RESULTADOS EN EPANET 2.

5.3 APLICACIONES

La extensión GISRed ha sido utilizada con éxito en la construcción de multitud de modelos de redes de distribución y la realización de un gran número de planes directores y estudios de sectorización.

El mayor logro fue su utilización para la confección de los **modelos de detalle y arterial de la red de suministro a la ciudad de Valencia y la red de detalle de la ciudad de Málaga**. En ambos casos, los datos de partida fueron un conjunto de ficheros CAD, cuyas entidades hidráulicas estaban enlazadas a una base de datos alfanumérica para el acceso a la información asociada, tales como diámetros, materiales, etc. GISRed permitió fundir los trazados representados en cada uno de los ficheros en una única red, eliminar todos los problemas de conectividad, y cargar los datos alfanuméricos a la base de datos del proyecto. En el caso de Valencia, la red obtenida, configurada por 42.000 nudos, se redujo a 26.000 nudos tras eliminar todas las válvulas manuales de forma automática. A continuación se capturaron todos los elementos de regulación internos de la red, y se declararon los elementos propios de las estaciones de bombeo utilizando las paletas de herramientas de la extensión. Seguidamente se interpolaron las cotas de los nudos de la red a partir de una nube de 50.000 puntos de referencia. El paso siguiente fue cargar los consumos a partir de la base de datos de abonados agrupados por acometidas. Finalmente se declararon todos los datos complementarios, como curvas de modulación, curvas de las bombas y las leyes de control aplicadas sobre las numerosas válvulas de regulación que dispone la red. El modelo de detalle se utilizó finalmente para llevar a cabo los estudios de sectorización de la red y de calidad del agua suministrada a la ciudad de Valencia y toda su área metropolitana.

A partir del modelo de detalle, y haciendo uso de nuevo de las herramientas de GISRed, se obtuvo un modelo de la red arterial, configurada por los diámetros mayores a 200 mm. Las

herramientas de conectividad fueron muy útiles en esta etapa. Se obtuvo finalmente un modelo de 5.000 nudos más operativo, con el que se llevaron a cabo todos los estudios de planificación de la red a futuro.

Además GISRed se ha utilizado con éxito para modelar otras muchas redes y prestar asistencia en la elaboración de los correspondientes planes directores. Entre ellas destacan:

Red de l'Horta Nord del SBM de VALENCIA; Red de Riego de Baja Presión de la ciudad de Valencia; Red de distribución de agua potable de la ciudad de Málaga; redes de suministro de Alzira, Sueca, Silla, Sagunto, Gandía, Teruel, Aranda de Duero, Tortosa, Guadalajara, Managua (Nicaragua), etc

En la mayoría de estudios, GISRed ha demostrado ser una herramienta eficiente en la captura de información desde CAD, georreferenciación de todos los elementos en coordenadas UTM, creación de topología y verificación de la conectividad de la red, incorporación de todos los elementos de regulación del sistema, calibración de los modelos en base a las medidas de campo disponibles, incorporación de nuevas demandas a partir de los respectivos planes del PGOU, análisis de las situaciones de emergencia, verificación de las condiciones de incendio y estudio de los tiempos de permanencia del agua en la red.

5.4 CONCLUSIONES

El propósito de un SIG puede y debe ir más allá de la mera recopilación de datos para tareas de inventario y la confección automática de planos. La integración de los SIG con modelos, y por ende con programas de simulación hidráulica, les confiere una nueva dimensión de análisis. El desarrollo de módulos específicos orientados a la creación y simulación de modelos de redes de distribución de agua supone un avance muy importante, ya que permiten completar la información puramente cartográfica con otros datos propios del modo de funcionamiento de la red, de gran importancia en la toma de decisiones.

El desarrollo de GISRed, ha permitido generar, simular y calibrar los modelos de las redes desde el mismo entorno SIG, lo que constituye una gran ayuda para efectuar diagnósticos de la red y elaborar planes directores con vistas a su mejora. Además esta herramienta integra otras prestaciones enfocadas a tareas más específicas propias de la gestión técnica de las redes, tales como la gestión de averías, la gestión de la demanda, el control de fugas mediante la sectorización o el análisis de la modulación diaria así como el consumo mínimo nocturno, la realización de balances hídricos, y la obtención de modelos para una fecha determinada basada en datos históricos. En los próximos capítulos se describirán las técnicas desarrolladas e implementadas que han permitido aumentar de forma considerable la capacidad analítica de la aplicación y por ende, la capacidad en la asistencia en la toma de decisiones con la ayuda del modelo matemático.

2ª PARTE

APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS A LA MODELACIÓN Y TOMA DE DECISIONES EN LOS
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

CAPÍTULO 6

CONCEPTOS DE LA TEORÍA DE GRAFOS

CAPÍTULO 6. CONCEPTOS DE LA TEORÍA DE GRAFOS

6.1 INTRODUCCIÓN

La teoría de grafos tiene su origen en el problema de los siete puentes de Königsberg resuelto por Leonhard Euler en 1736.

Un grafo no es más que una entidad matemática que permite representar de una forma gráfica la relación entre los elementos que lo forman, esto es, vértices y aristas.

La importancia de un grafo radica, más que en su representación o en su número de vértices y aristas, en la forma en que estas aristas conectan con dichos vértices, esto es, en la **topología** del grafo. El estudio de grafos está, por tanto, muy ligado al estudio de su topología.

Este capítulo, basado en la topología como rama clásica de las matemáticas, introduce los conceptos básicos en los que se fundamenta la teoría de grafos, así como los algoritmos empleados tradicionalmente en la búsqueda y tratamiento de grafos y sus propiedades, haciendo hincapié en sus aplicaciones más importantes.

En primer lugar, resulta esencial establecer la nomenclatura y definir los términos que van a ser utilizados en los siguientes capítulos. A continuación, se presentan los algoritmos fundamentales de búsqueda y aplicación de algunas de las propiedades más importantes de un grafo, que serán utilizadas ampliamente en apartados posteriores para introducir nuevas herramientas orientadas a la gestión y modelado de las redes de distribución de agua.

6.2 DEFINICIONES

Se denomina grafo a un conjunto de nudos, llamados generalmente 'vértices', conectados entre ellos a través de líneas o arcos, también llamadas 'aristas'. En un grafo, la naturaleza geométrica de sus aristas es irrelevante, adquiriendo importancia únicamente la manera en la que los vértices están conectados.

Un grafo se suele representar por $G = (V, A)$, donde $V = V(G)$ es el conjunto de vértices del grafo y $A = A(G)$ es el conjunto de pares de vértices distintos conectados llamados aristas. Si la arista $a = \{u, v\}$ relaciona los vértices u y v , se dice que u y v son vértices adyacentes y también que el vértice u (ó v) y la arista a son incidentes.

Dado un grafo $G = (V, A)$:

- a) Se llama **bucle o lazo** a toda arista de la forma $\{u, u\}$, es decir, a toda arista que une un vértice consigo mismo.
- b) Se llaman **aristas múltiples** a las aristas que aparecen repetidas en A (unen el mismo par de vértices).
- c) Se dice que dos **vértices** son **adyacentes** si están unidos por una arista.
- d) Se dice que dos **aristas** son **adyacentes** si tienen un vértice en común.
- e) Se dice que una **arista** y un **vértice** son **incidentes** si el vértice es extremo de la arista.
- f) Se dice que un **vértice** está **aislado** si no es adyacente a ningún otro vértice.

- g) Se dice que un **grafo** es **simple** si no tiene bucles (lazos) ni aristas múltiples.
 h) Un grafo que contiene bucles y/o aristas múltiples se llama **multigrafo**.

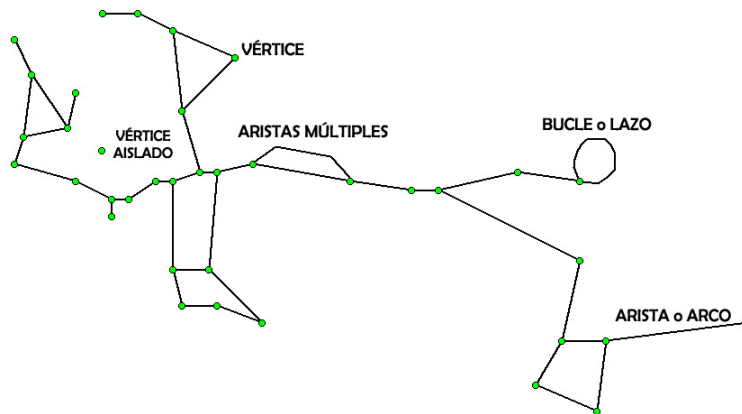


FIGURA 17. EJEMPLO DE GRAFO. EN ESTE CASO SE TRATA DE UN MULTIGRAFO.

Según el número de aristas que contiene, un grafo se dice que es **completo**, si cuenta con todas las aristas posibles (es decir, todos los nodos están conectados con todos), **disperso** si tiene relativamente pocas aristas y **denso** si le faltan pocas para ser completo.

Dado un grafo $G = (V, A)$, se denomina subgrafo a un subconjunto de aristas del mismo y sus correspondientes vértices. Así, $G' = (V', A')$ es un subgrafo de $G = (V, A)$ si $V' \subset V$ y $A' \subset A$. En ese caso, $G' \subset G$. Si G' contiene todas las aristas de G que unen los vértices en V' , entonces G' se dice que es el **subgrafo de expansión** en V' y se designa por $G[V']$. El **orden** de G es el número de vértices del mismo y se representa por $|V(G)|$. El **tamaño** de G , es decir, el número de aristas que contiene, se representa por $|A(G)|$.

En un grafo, se denomina **ruta** o **trayecto** a una secuencia de vértices conectados, en la que cada vértice consecutivo de dicho trayecto (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.

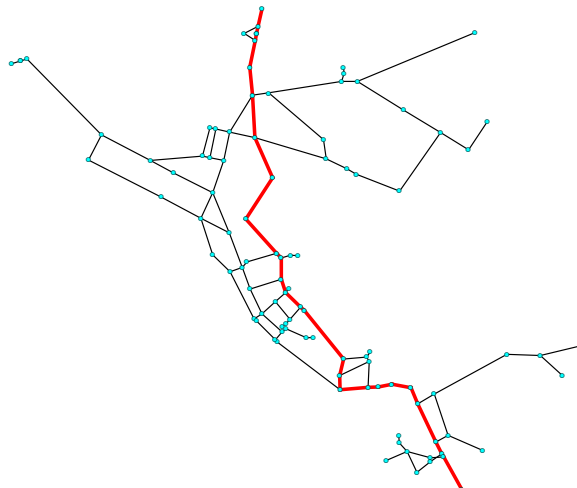


FIGURA 18. IDENTIFICACIÓN DE UN TRAYECTO SOBRE UN GRAFO.

Un **grafo** se dice que es **conexo** si dos vértices cualesquiera del mismo, pueden unirse mediante un trayecto, en caso contrario, se dice que el **grafo** es **inconexo**.

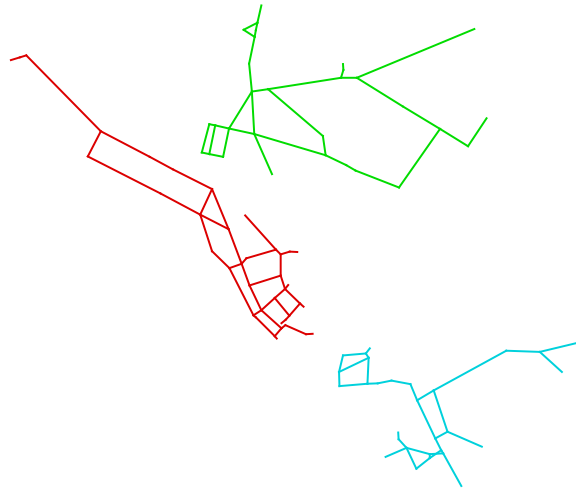


FIGURA 19. EJEMPLO DE UN GRAFO INCONEXO.

Una **mall** o **ciclo** es un conjunto de aristas conectadas de tal forma que cuando se recorren una tras otra, ningún vértice se repite hasta que se alcanza el vértice inicial. Dicho de otra forma, una mall es un trayecto simple en el que los vértices inicial y final coinciden (**trayecto cerrado simple**).

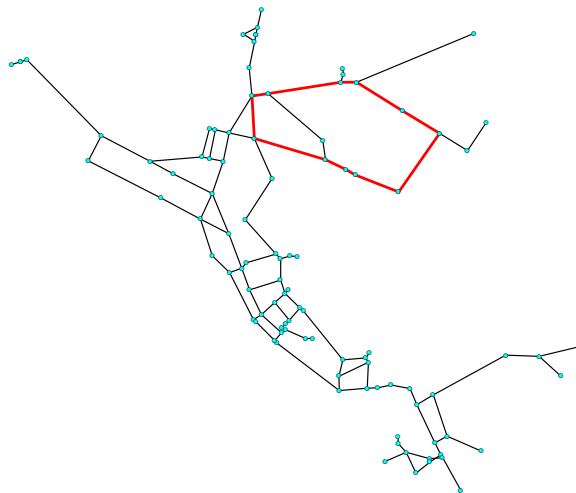


FIGURA 20. EJEMPLO DE UNA MALLA O CICLO.

Un **árbol** es un grafo conexo que no posee ninguna mall (**grafo acíclico**). Se llama **rama** a cualquiera de las aristas pertenecientes al árbol y **cuerda** a aquellas aristas no pertenecientes al árbol pero que unen dos vértices del mismo. Se llama **bosque** al conjunto de árboles que pueden trazarse sobre un grafo.

Se denomina **árbol de expansión o generador**, al árbol que contiene todos los vértices del grafo. Todo grafo conexo contiene al menos un árbol de expansión o generador.

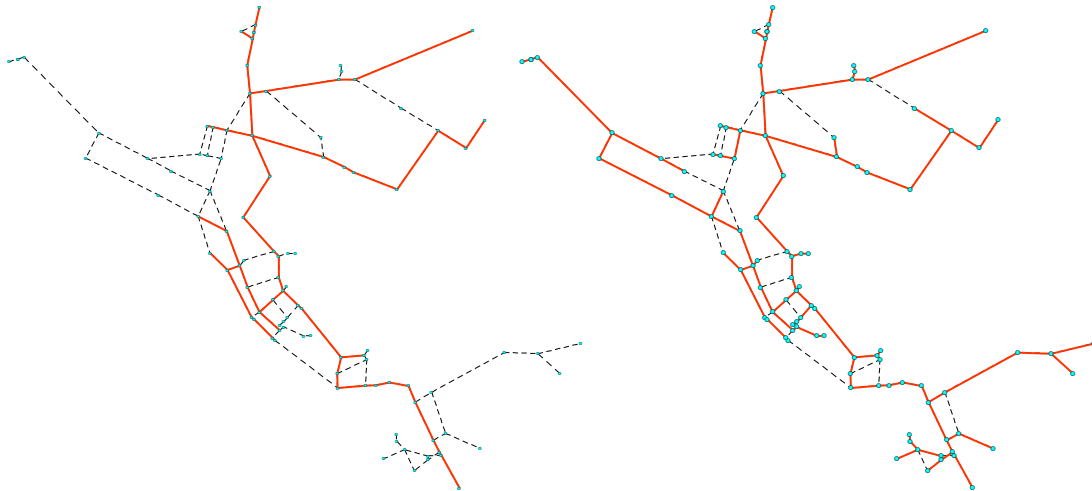


FIGURA 21. EJEMPLO DE ÁRBOL (IZQUIERDA) Y ÁRBOL DE EXPANSIÓN O GENERADOR (DERECHA).

Un **grafo ponderado**, $G = (V,A,w)$, es un grafo en el que cada arista tiene un peso o coste (w) asignado.

Finalmente, se dice que un **grafo** es **orientado o dirigido (dígrafo)** cuando a cada una de sus aristas se le atribuye un sentido. Este sentido marca la manera de recorrer la arista.

6.3 REPRESENTACIÓN DE GRAFOS

6.3.1 Matriz de adyacencias

Una de las formas de representar algebraicamente un grafo es mediante el uso de la denominada **matriz de adyacencias**. Dado un grafo $G = (V,A)$, se denomina matriz de adyacencias a la matriz de dimensión $V \times V$ formada por valores booleanos, de tal manera que un elemento situado en la fila u y columna v adquiere el valor 1 siempre que haya una arista que conecte el vértice u y el v en el grafo G ; de lo contrario el elemento recibe el valor 0. La siguiente figura ilustra la representación de un grafo mediante una matriz de adyacencias. Como se puede observar, se ha adoptado la convención de que cada vértice está conectado consigo mismo, por lo tanto la diagonal principal de la matriz contiene sólo valores unitarios.

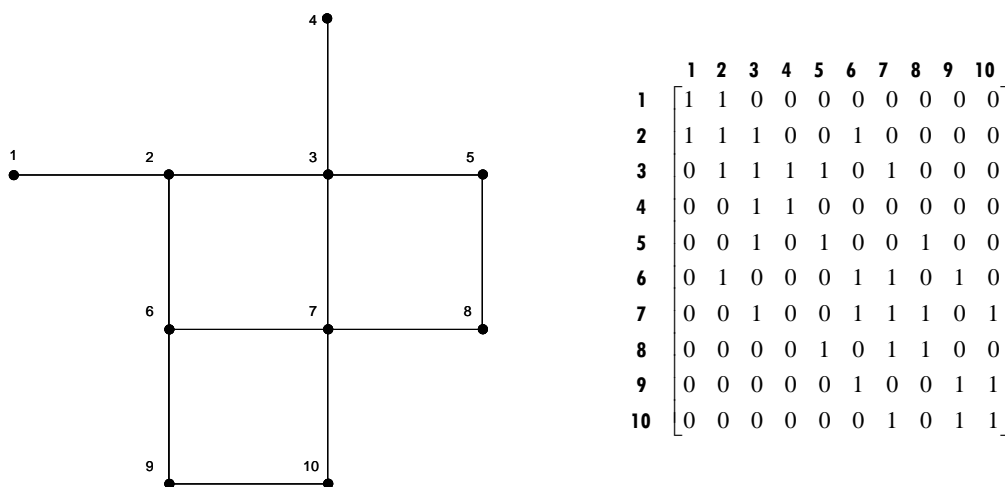


FIGURA 22. EJEMPLO DE UN GRAFO Y SU MATRIZ DE ADYACENCIAS.

6.3.2 Listas de adyacencias

La forma más extendida de representar un grafo $G = (V, A)$, es mediante un vector compuesto por una serie de listas de vértices indexadas, que se conoce como vector de listas de adyacencias. Este vector asocia a cada uno de los vértices del grafo una lista con todos los vértices adyacentes con los que conecta. La siguiente figura ilustra la representación del mismo grafo anterior, esta vez utilizando listas de adyacencias. Un caso particular de listas de adyacencias lo forma el vector que contiene las listas de las líneas que conectan con cada uno de los vértices.

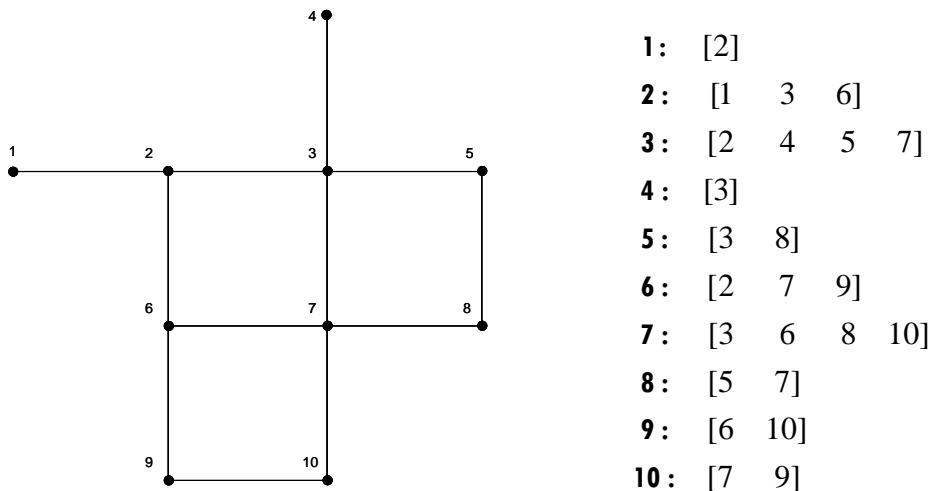


FIGURA 23. LISTA DE ADYACENCIAS DEL MISMO GRAFO ANTERIOR.

6.3.3 Grado de conectividad

Se denomina grado de conectividad (g_c) de un nudo o vértice al número de aristas que convergen en él. El grado de conectividad resulta un parámetro muy útil, ya que permite identificar los nudos terminales ($g_c = 1$), los nudos de paso ($g_c = 2$), así como los nudos de grado superior. Si se dispone de la matriz de adyacencias, el grado de conectividad de un nudo será la suma de elementos no nulos de la fila/columna correspondiente al nudo, menos 1 (debido al elemento no nulo de la diagonal). Si en lugar de la matriz de adyacencias, se dispone de las listas de adyacencias, el grado de conectividad del nudo será el número de elementos (nudos o líneas) que componen la lista que tiene asociada.

El método más eficiente para construir tanto la matriz de adyacencias, las listas de adyacencias como el grado de conectividad, consiste en recorrer una a una todas las aristas del grafo y:

- contabilizar la arista $a = \{u,v\}$ para cada uno de sus extremos u y v (grado de conectividad).
- Almacenar la arista a en las listas de adyacencias asociadas a cada uno de los nudos extremos u y v .

Ubicar la arista en las posiciones (i,j) y (j,i) de la matriz de adyacencias definida por los nudos extremos u y v .

6.4 ALGORITMOS DE BÚSQUEDA EN GRAFOS

En general, un algoritmo de búsqueda (o recorrido) sobre un grafo, es un algoritmo que se utiliza para recorrer de manera sistemática todos los vértices pertenecientes a un grafo, al objeto de encontrar uno caracterizado por una propiedad particular. El algoritmo de búsqueda de grafos más conocido es el denominado **algoritmo de búsqueda en profundidad** (*Depth-First Search*), que puede ser implementado de forma recursiva, haciendo uso de un contador y un vector para el marcado de los nudos revisados o bien de forma iterativa mediante una pila de tipo LIFO (*Last-in-first-out*, el último elemento en entrar es el primero en salir).

Si en vez de utilizar una pila LIFO como método de recorrido del grafo, se utiliza una cola de tipo FIFO (*First-in-first-out*, el primer elemento en entrar es el primero en salir), se obtiene una variante de este algoritmo, conocido como **búsqueda en amplitud** (*Breadth-First Search*). A continuación se presenta con más detalle cada uno de estos métodos, ya que constituyen la base de los algoritmos y aplicaciones que se verán en apartados posteriores.

6.4.1 Búsqueda en profundidad (Depth-First Search, DFS)

Dado un grafo $G = (V, A)$ y un vértice $v \in V$, el algoritmo de búsqueda en profundidad¹ (DFS), 'explora' de modo sistemático las aristas de G de tal forma que primero se visitan los vértices adyacentes a los visitados más recientemente. De esta manera, se va profundizando en el grafo, alejándose del vértice tomado como origen. Cuando el algoritmo alcanza el vértice buscado o bien un vértice final (no conectado a ningún otro), el algoritmo retrocede hasta el nodo 'no explorado' más reciente y continúa recorriendo los vértices adyacentes. El procedimiento finaliza cuando se han explorado todos los vértices/aristas de un grafo.

La manera más eficiente de implementar este algoritmo es mediante un procedimiento no recursivo basado en las listas de aristas adyacentes a cada vértice y una pila de tipo LIFO, que proporciona en cada momento el último vértice introducido en la pila (*frente de avance*) al tiempo que acumula los vértices adyacentes todavía no explorados.

ALGORITMO:

1. Inicializar:
 - 1.1. Listas de líneas/vértices adyacentes a cada vértice.
 - 1.2. Pila de tipo LIFO.
 - 1.3. Vector de vértices/aristas explorados (*sin marcar inicialmente*).
 - 1.4. Vértice inicial u origen (*source*).
2. Añadir el vértice inicial a la pila y marcarlo.
3. Hasta que la pila quede vacía, aplicar el procedimiento siguiente:
 - 3.1. Extraer el vértice más reciente de la pila (*vértice saliente o frente de avance*).
 - 3.2. Obtener sus aristas/vértices adyacentes a partir de las listas de adyacencia.
 - 3.3. Añadir a la pila los vértices anteriores, excluyendo aquellos que estén marcados como 'explorados'.
 - 3.4. Marcar como 'explorados' los vértices añadidos.
4. Finalizar el proceso.

¹ Tarjan, R. E. (1971) "Depth-first search and linear graph algorithms" SIAM Journal on Computing 1 (1972), pp. 146-160; also Conf. Record Twelfth Annual Symp. on Switching and Automata Theory (1971), pp. 114-121.

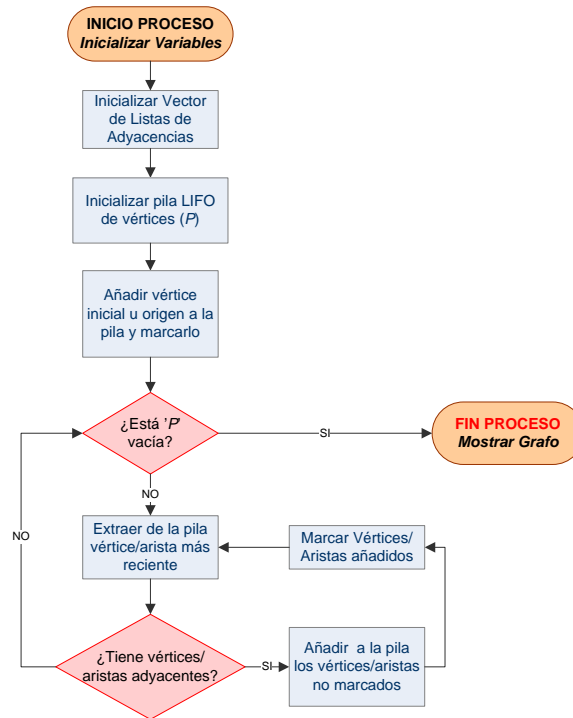


FIGURA 24. DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE BÚSQUEDA EN PROFUNDIDAD.

6.4.2 Búsqueda en amplitud (Breadth-First Search, BFS)

Dado un grafo $G = (V,A)$ y un vértice $v \in V$, la estrategia de recorrido en amplitud, 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 y repitiendo el proceso hasta que se han explorado todos los vértices del grafo.

La manera más eficiente de implementar este algoritmo es mediante un procedimiento no recursivo basado en listas de aristas adyacentes a cada vértice y una cola de tipo FIFO, que permita visitar de manera consecutiva todos los vértices contiguos al vértice actual (frente de avance) y acumular los adyacentes no explorados todavía.

ALGORITMO:

1. Inicializar:
 - 1.1. Listas de líneas/vértices adyacentes a cada vértice.
 - 1.2. Cola de tipo FIFO (*vector*).
 - 1.3. Vector de vértices explorados (*sin marcar inicialmente*).
 - 1.4. Vértice inicial u origen (*source*).
2. Añadir el vértice inicial a la cola y marcarlo.
3. Hasta que la cola quede vacía, aplicar el procedimiento siguiente:
 - 3.1. Extraer el primer elemento de la cola (*vértice saliente o frente de avance*).
 - 3.2. Obtener sus aristas/vértices adyacentes a partir de las listas de adyacencia.
 - 3.3. Añadir a la cola los vértices anteriores, excluyendo aquellos que estén marcados como 'explorados'.
 - 3.4. Marcar como 'explorados' los vértices añadidos.
4. Finalizar el proceso.

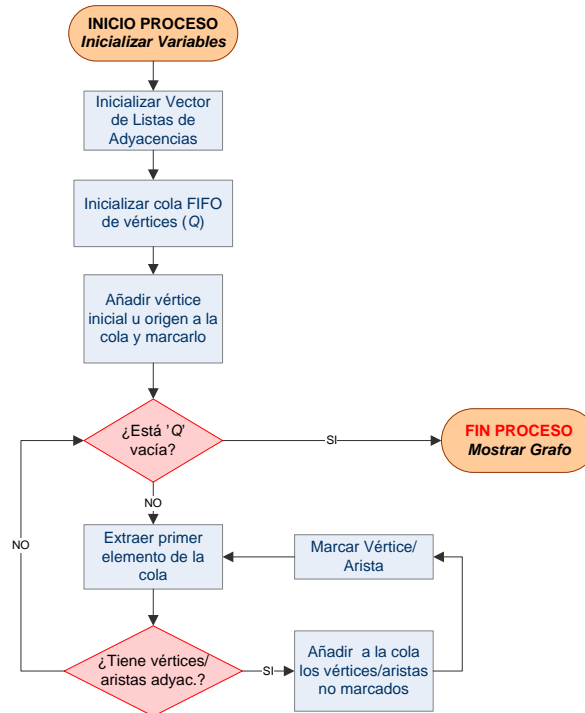


FIGURA 25. DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE BÚSQUEDA EN AMPLITUD.

Como se desprende de los procedimientos anteriores, la metodología a seguir en ambos casos es muy similar, diferenciándose únicamente en la manera de seleccionar el consiguiente vértice candidato que actuará como frente de avance. Tanto el algoritmo de búsqueda en profundidad como en amplitud, recorren todos los vértices y aristas de un grafo, pero la manera en que llevan a cabo este recorrido, es muy diferente. Mientras la búsqueda en amplitud se caracteriza por movilizar nuevos frentes de avance que se expandirán de manera sucesiva, la búsqueda en profundidad, no activa ningún otro frente de avance hasta que el actual haya topado con un nodo objetivo o con un final de tramo.

6.5 ÁRBOLES GENERADORES O DE EXPANSIÓN Y ÁRBOLES DE EXPANSIÓN DE MÍNIMO COSTE (MINIMUM SPANNING TREE)

Tal y como se indicaba anteriormente, un árbol de un grafo $G = (V, A)$ es un subgrafo conexo que no posee ningún ciclo o malla (*subgrafo acíclico*). Se representa por $T(V', A')$, donde $V' \subset V$ es un subconjunto de vértices de G y $A' \subset A$ es un subconjunto de aristas de G que conectan los vértices V' . En un árbol, se cumple que el orden del mismo coincide con su tamaño aumentado en una unidad, $|V(T)| = |A(T)| + 1$

Un **árbol de expansión o generador** (*spanning tree*) es un grafo conexo acíclico que además **contiene todos los vértices del grafo**. Una de las propiedades más significativas de este tipo de árboles es que entre dos vértices cualesquiera pertenecientes al árbol generador, existe sólo un trayecto que los conecta. Cada grafo conexo contiene al menos un árbol de expansión o generador que une todos sus vértices, no obstante el número de árboles que puede contener un grafo puede ser muy elevado.

Cada grafo conexo contiene al menos un árbol de expansión o generador que une todos sus vértices. No obstante el número de árboles que puede contener un grafo puede ser muy elevado.

Los algoritmos *BFS* y *DFS* se pueden generalizar a fin de obtener procedimientos para la búsqueda de árboles de expansión en general y el árbol de expansión de mínimo coste en particular. La siguiente figura ilustra gráficamente el procedimiento de búsqueda de un árbol de expansión utilizando cada uno de los métodos descritos con anterioridad. Los números que aparecen junto a los vértices marcados en rojo, indican la posición bien dentro de la pila (método *DFS*) o bien dentro de la cola (método *BFS*) y por tanto el orden de extracción de dichos vértices. Es inmediato apreciar cómo ambos métodos proporcionan árboles de expansión diferentes existentes en el mismo grafo.

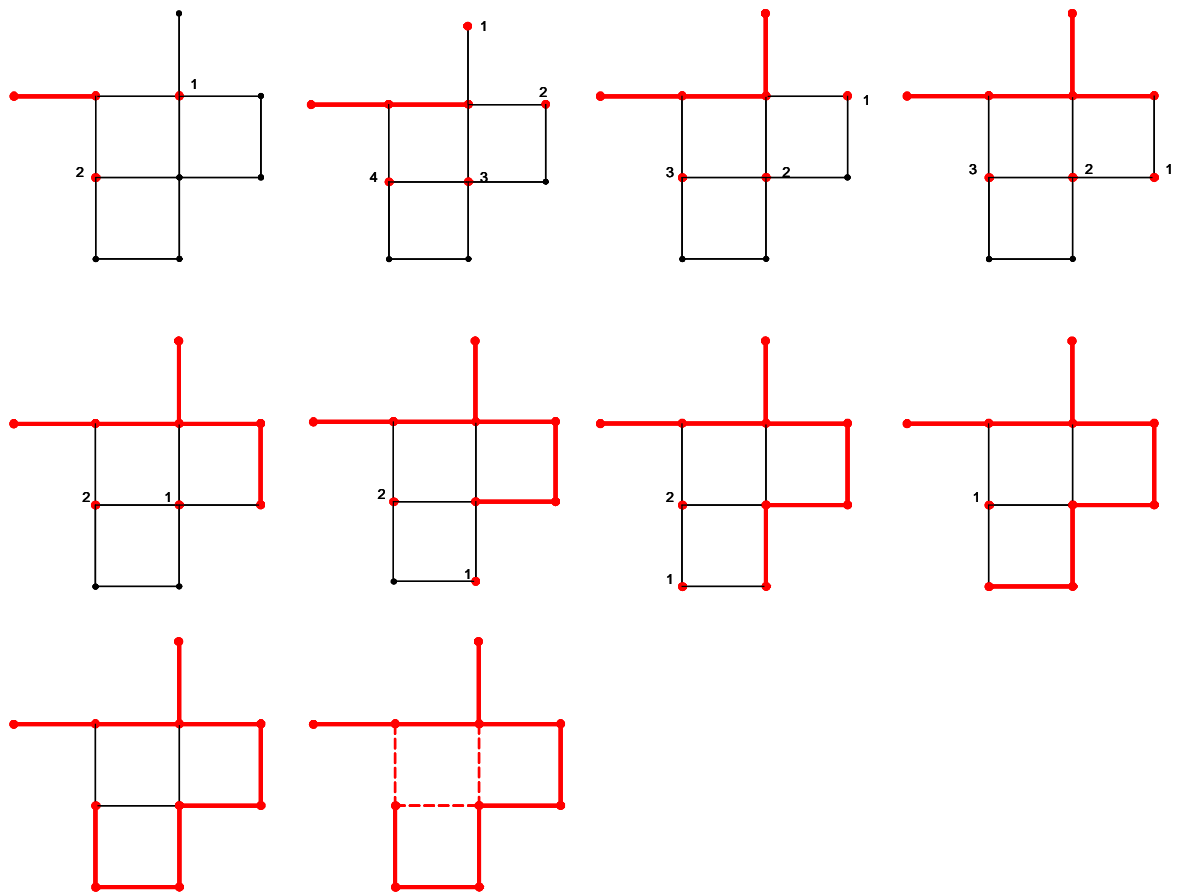


FIGURA 26. BÚSQUEDA DEL ÁRBOL DE EXPANSIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE BÚSQUEDA EN PROFUNDIDAD (DFS).

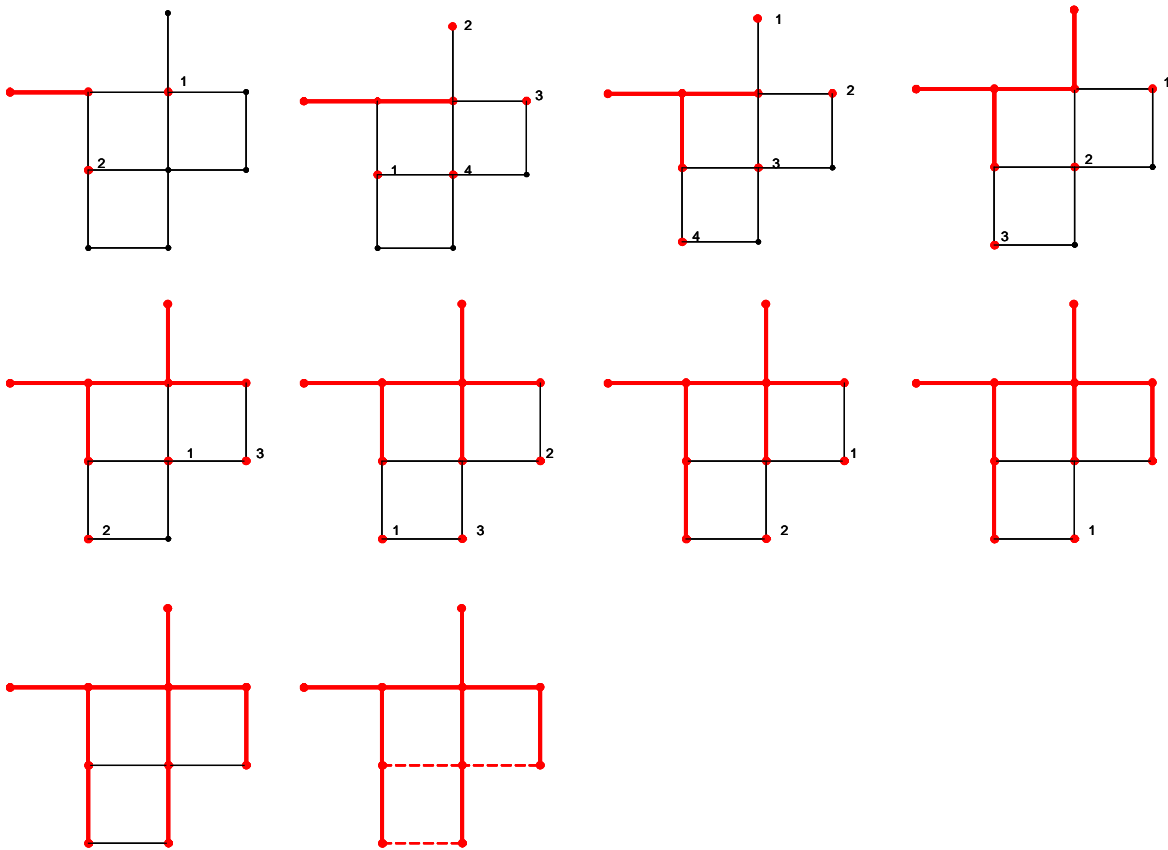


FIGURA 27. BÚSQUEDA DEL ÁRBOL DE EXPANSIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE BÚSQUEDA EN AMPLITUD (BFS).

En ocasiones se asocia un peso o coste a cada una de las aristas de un grafo, dando lugar a lo que se llama **grafo ponderado**. Si en un grafo ponderado conexo se escoge aquel árbol de expansión cuyo coste (suma de los pesos de sus aristas) es menor que el coste de cualquier otro árbol de expansión perteneciente al mismo grafo, se obtiene el **árbol de expansión de mínimo coste** o *minimum spanning tree (MST)*.

Para representar algebraicamente este tipo particular de grafos ponderados se emplean **matrices de adyacencias**, solo que en vez de emplear valores booleanos para determinar la conexión entre sus vértices, se emplean los pesos de las aristas que los unen. Análogamente, se puede recurrir también a las **listas de adyacencias** sin más que asociar a cada par de vértices, el peso de la arista que los une.

Si $G(V,A,w)$ es un grafo ponderado, donde w es el peso (coste) de cada una de las aristas del conjunto A , el árbol de mínimo coste $T(V,A',w)$ será aquel que:

$$\text{coste}(T) = W_T = \sum_{i \in A'} w_i = \text{Min}$$

Si todas las aristas del grafo poseen el mismo peso, cualquier árbol de expansión resulta ser de mínimo coste. Sin ser tan restrictivos, si varias aristas de un grafo ponderado tienen el mismo coste asociado, el árbol de expansión de mínimo coste puede no ser único, lo que indica que un grafo puede contener diversos árboles de expansión de mínimo coste.

En general, un grafo no dirigido (no necesariamente conexo), contiene un bosque de árboles de expansión de mínimo coste. Ahora bien, si el grafo es conexo y los pesos de todas las aristas son únicos, entonces el árbol de expansión de mínimo coste será único.

En un árbol ponderado con pesos únicos se cumplen dos propiedades muy importantes. La primera es que si el peso de una arista de cualquiera de los ciclos o mallas del grafo es mayor que los pesos del resto de aristas que forman el ciclo, dicha arista no pertenecerá al árbol de expansión de mínimo coste (*Cycle property of a MST*).

Por otra parte, si dividimos los vértices de un grafo en dos conjuntos disjuntos, la arista de menor peso de entre todas las aristas que unen los vértices de ambos conjuntos, pertenece a cualquiera de los árboles de expansión de mínimo coste del grafo (*Cut property of a MST*).

Los algoritmos clásicos empleados para la búsqueda de los árboles de expansión de mínimo coste se basan en las dos propiedades citadas anteriormente. De ellos describiremos los tres más referenciados: el **algoritmo de Boruvka**² (1926), el **algoritmo de Kruskal**³ (1956) y el **algoritmo de Prim**⁴ (1957). Mientras que con el algoritmo de Prim el árbol de expansión de mínimo coste se va ampliando con una nueva arista cada vez, con los algoritmos de *Boruvka* y *Kruskal* el árbol de expansión de mínimo coste se va generando mediante la unión de árboles de expansión de mínimo coste que van formándose en el bosque de árboles del grafo principal.

El principal inconveniente de estos algoritmos y sus variantes, es que resultan no lineales con el tamaño del grafo en cuanto a su coste computacional. A continuación se describe cada uno de ellos.

6.5.1 Algoritmo de Boruvka

Este algoritmo de búsqueda del *MST* es el más antiguo. Comienza generando un bosque de subárboles de expansión que van evolucionando gradualmente hasta generar un único *MST* si la red es conexa, o varios si fuera inconexa. En un principio, la incorporación de aristas no se realiza de una en una, sino en bloque, añadiendo aristas a los subárboles en cada paso.

El algoritmo comienza con la unión de cada uno de los vértices del grafo con su vértice contiguo más próximo mediante la arista de mínimo coste. La elección de dichas aristas suele generar un bosque de subárboles no conexos. Si todas las aristas tienen pesos diferentes, cada vértice tendrá un único vértice contiguo más cercano.

En los siguientes pasos, se añaden al *MST* las aristas de menor peso que conectan subárboles contiguos, es decir, se incorporan las aristas de menor coste que conectan alguno de los vértices de un subárbol con alguno de los vértices de un subárbol contiguo. El proceso es iterativo hasta que se forma un solo árbol (caso de red conexa), o bien se han recorrido todas las aristas y se forma un bosque de subárboles de expansión mínima.

² Boruvka, O. (1926). *O jistém problému minimálním (On a certain minimal problem)*. Prace Mor. Proved. Spol. v Brne (Acta Societ. Scienc. Natur. Moravicae), III(3), p. 37-58.

³ Kruskal, J. B. Jr. (1956). *On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem*. Proceedings American Mathematical Society, 7, p.48.

⁴ Prim, R. C. (1957). *Shortest connection networks and some generalizations*. Bell System Technical Journal, 36, p. 1389.

Para comprobar si una arista forma un ciclo o por el contrario une dos subárboles, se debe analizar en cada paso a qué subárbol pertenecen los vértices extremos de la misma. Si ambos pertenecen a subárboles distintos, los subárboles involucrados deberán ser fusionados, de lo contrario se debe descartar la arista como perteneciente al subárbol. Por tanto, el algoritmo está sujeto a múltiples operaciones de unión de subárboles, con lo que resulta ineficiente en el caso de grafos densos de tamaño considerable.

6.5.2 Algoritmo de Kruskal

El algoritmo de *Kruskal* genera el *MST* incorporando aristas de una en una. La selección de las mismas se realiza a partir de un vector de aristas pertenecientes a un grafo conexo ordenadas por su peso (orden creciente para el árbol de expansión de mínimo coste y decreciente para el árbol de expansión de máximo coste). Durante el proceso, se van seleccionando por orden las aristas del vector, generando un bosque inconexo de subárboles en expansión. Estos subárboles van siendo unidos por aristas que no formen ciclos o mallas, evolucionando gradualmente hasta generar un único *MST*. Si tras explorar todas las aristas del vector se han añadido $V-1$ aristas al árbol, el grafo es conexo y se obtiene el árbol de expansión mínimo o máximo; por el contrario, si no se han encontrado $V-1$ ramas del árbol, significa que el grafo no es conexo y existe más de un árbol de expansión. Los nuevos árboles quedarán configurados en el mismo proceso. En cualquier caso, el algoritmo finaliza una vez analizadas todas las aristas.

En general el algoritmo de *Kruskal* permite hallar el *MST* de un grafo en un tiempo proporcional a $E \cdot \log E$, es decir el número de aristas multiplicado por el logaritmo del número de aristas. Por tanto se trata de un algoritmo lineal a efectos prácticos. (*Sedgewich, R., Graph Algorithms in C, 2001*).

El algoritmo se resume en los siguientes pasos:

1. Generar un vector indexado de aristas
2. Ordenar dicho vector por el coste asociado a las aristas
3. Recorrer cada una de las aristas del vector siguiendo el orden preestablecido y comprobar lo siguiente:
 - a. Si la arista forma un ciclo, entonces descartarla y saltar a la siguiente arista del vector
 - b. Si la arista une dos subárboles, entonces fundir dichos subárboles
4. Una vez recorridas todas las aristas, devolver el ó los *MST* resultante(s)

La manera de comprobar si una arista forma un ciclo o no, es mediante un vector de vértices indexados en el que se va indicando a qué árbol pertenece el vértice. Si los vértices extremos de una arista están marcados como pertenecientes a subárboles diferentes, significa que la arista conecta dos subárboles y por tanto éstos han de ser fundidos (operación de unión). Si los vértices están marcados como pertenecientes al mismo subárbol, significa que la arista forma un ciclo y por tanto habrá de ser descartada.

Como se puede intuir, conceptualmente este algoritmo es el más simple de implementar, pero el número de operaciones a realizar para llevar a cabo la unión de subárboles puede ser excesivo para grafos densos de tamaño considerable, razón por la cual, resulta inviable en la mayoría de ocasiones.

6.5.3 Algoritmo de Prim

El de Prim es otro algoritmo sencillo de implementar y que resulta ser el más eficiente para grafos densos, es decir, aquellos que presentan la mayor parte de interconexiones posibles entre sus vértices. Al igual que el algoritmo de *Kruskal*, el de *Prim* también se basa en la exploración individual de todas las aristas del grafo, pero se diferencia en la forma de seleccionar dichas aristas. El algoritmo parte de un vértice cualquiera del grafo. De manera sucesiva, el árbol actual se amplía incorporando nuevas aristas de una en una hasta completar un total de $V-1$. En cada paso, la arista que se añade debe unir un vértice perteneciente al *MST* actual con un vértice no perteneciente al mismo y además tener un coste mínimo. Por tanto, la arista candidata a formar parte del *MST* en cada momento es la que presenta un menor coste de entre todas las aristas adyacentes.

La manera más eficiente de implementar el algoritmo de *Prim* es mediante la generalización de los algoritmos de búsqueda en profundidad (*DFS*) y en amplitud (*BFS*) vistos anteriormente, pero modificados convenientemente para tener en cuenta los costes de las aristas y obtener así el árbol de expansión de mínimo o máximo coste. De este modo, introduciendo un elemento auxiliar como es una cola indexada de aristas de máxima prioridad, es decir, una lista de aristas ordenadas por su coste algunas de las cuales entrarán a formar parte del *MST* en cada iteración, obtenemos el denominado **algoritmo de búsqueda prioritaria** o *priority-first search (PFS)*.

En general el algoritmo de Prim permite hallar el *MST* de un grafo denso en un tiempo proporcional al cuadrado del número de vértices (V^2). No obstante, si se aplica el algoritmo de búsqueda prioritaria el tiempo de búsqueda puede verse reducido a $E \cdot \log V$, es decir el número de aristas multiplicado por el logaritmo del número de vértices. Por tanto se trata de un algoritmo lineal a efectos prácticos. (*Sedgewich, R., Graph Algorithms in C, 2001*).

El algoritmo se resume en los siguientes pasos:

1. Dado un grafo $G = G(V, A)$, seleccionar un vértice $v \in V(G)$ (*nudo de partida*).
2. Inicializar el árbol $T = T(V, A')$ formado únicamente por v .
3. Inicializar el vector que contendrá el frente de aristas Q (*su tamaño será como máximo el orden del grafo*).
4. Añadir a Q el subconjunto de aristas A^* adyacentes a v (*pivot*).
5. Seleccionar la arista de máxima prioridad a^* (menor peso) del vector Q y añadirla a T junto a su otro vértice extremo v^* .
6. Tomar como nuevo pivot, el vértice $v^* \in V(G)$ recién incorporado a T .
7. Añadir a Q las aristas adyacentes a v^* que conectan con vértices no pertenecientes a T .
8. En el caso de que dos aristas del frente Q apunten al mismo vértice, la arista de mayor peso será reemplazada por la arista de menor peso.
9. Extraer la arista a^* del vector Q .
10. Actualizar y reordenar Q (por pesos) si fuera necesario.
11. Si Q todavía contiene aristas, volver al paso 5.
12. Si Q se ha vaciado (no contiene ninguna arista), devolver el *MST* generado.

Para agilizar el algoritmo, se hace uso de listas de adyacencias y de vectores auxiliares indexados que controlan qué vértices y aristas han sido explorados y a qué subárbol pertenecen.

NOTA: En el caso de grafos no conexos, se puede generalizar el proceso y repetir el procedimiento anterior hasta encontrar los subárboles de expansión de mínimo coste asociados a cada uno de los subgrafos.

6.5.4 Árbol de trayectos mínimos. El algoritmo de Dijkstra

Teniendo en cuenta que la distancia entre dos vértices de un grafo ponderado conexo es la longitud del trayecto de menor coste entre ambos, se plantea el problema de encontrar dicho trayecto de la manera más rápida y eficiente. El algoritmo que resuelve este problema es el de *Dijkstra*⁵ (1959), y es una adaptación del algoritmo de *Prim* visto anteriormente.

Dado un dígrafo ponderado $G = G(V,A,w)$, cuyos pesos w representan las longitudes de las aristas, la distancia mínima entre dos vértices $u,v \in V$, $u \neq v$ será la correspondiente al trayecto de mínimo coste entre ambos. El algoritmo de *Dijkstra* permite obtener el trayecto de recorrido mínimo desde un vértice cualquiera del grafo a cada uno de los vértices del mismo, siempre y cuando los pesos asociados a las aristas sean no negativos.

Partiendo de un vértice origen o fuente, el objetivo del algoritmo es hacer crecer un árbol mediante la adición, en cada iteración, de una nueva arista cuyo vértice no perteneciente al árbol, se encuentre a menor coste del vértice origen. Es importante insistir en que los vértices (y por ende las aristas) van entrando a formar parte del árbol en relación al coste del trayecto hasta el vértice de partida elegido inicialmente y no sólo en relación al coste de la arista que le conecta.

Por tanto, el algoritmo de *Dijkstra* difiere del de *Prim* únicamente en esta manera de priorizar la incorporación de aristas al árbol. Además, la naturaleza de los árboles obtenidos por ambos métodos es muy diferente. Mientras que los árboles obtenidos por el método de *Prim* corresponden a árboles de expansión de mínimo coste global (MST) en general no dirigidos, los obtenidos por el método de *Dijkstra* suelen corresponder a árboles dirigidos que parten de un vértice dado que actúa como raíz. Este árbol, conocido como el árbol de trayectos mínimos o SPT (*Shortest Path Tree*) depende por tanto, del vértice tomado como origen en cada caso.

La secuencia del algoritmo es muy similar a la descrita para el algoritmo de *Prim*, salvo que el vector auxiliar tomado para priorizar la entrada al árbol, hace referencia a vértices y está ordenado según el coste del trayecto desde cada vértice al vértice tomado como origen:

1. Dado un grafo ponderado $G = G(V,A,w)$, seleccionar el vértice origen $o \in V(G)$.
2. Inicializar el vector que contendrá el frente de vértices Q .
3. Inicializar el árbol $T = T(V,A')$ formado primeramente por el vértice o .
4. Añadir al vector Q todos los vértices de las aristas que parten de o y asociarles el peso de las mismas.
5. Seleccionar el vértice de máxima prioridad v^* (menor peso hasta o) del vector Q y añadirlo a T junto a su arista asociada a^* .
6. Añadir a Q los vértices adyacentes a v^* que conectan con vértices no pertenecientes a T y asociarles como peso el coste del trayecto hasta o . Dicho coste se obtiene sumando al coste asociado al vértice v^* el de la nueva arista añadida.
7. Si se ha accedido a un vértice desde dos o más caminos diferentes, asociarle únicamente el coste correspondiente al camino de menor coste.
8. Extraer v^* de Q .
9. Actualizar y reordenar Q si fuese necesario.
10. Si Q todavía contiene vértices, volver al paso 5.
11. Si Q se ha vaciado (no contiene ningún vértice), devolver el SPT generado.

⁵ Dijkstra, E. W. (1959). *A note on two problems in connection with graphs*. *Numerische Mathematik*, 1, p. 269.

6.5.5 Topología de árbol

Desde el punto de vista topológico, para definir un árbol no basta con seleccionar las aristas que lo configuran, sino que resulta necesario indicar también cómo se llega a cada nudo. Este dato se obtiene directamente en el paso 5 de los algoritmos de *Prim* y *Dijkstra*. En el momento de añadir al árbol la arista ó vértice de máxima prioridad (menor peso en el caso de *Prim* y trayecto de menor coste en el caso de *Dijkstra*), es posible asociar al nuevo nudo entrante, la nueva arista como línea de acceso. En el caso de los algoritmos de *Kruskal* y *Boruvka*, habrá que determinarlo a posteriori con un coste computacional significativo.

Como parámetro adicional de la topología de árbol se define el grado de conectividad asociado al mismo. La manera de proceder para definir este parámetro es análoga a la descrita para obtener el grado de conectividad propio de un grafo. En este caso, cada vez que una arista (rama) entra a formar parte del árbol, aumenta en una unidad el grado de conectividad referido al nudo que ha actuado como pivote.

Si se parte de un grafo no dirigido, la topología de árbol confiere al grafo una orientación virtual, convirtiéndolo en un grafo *pseudodirigido*.

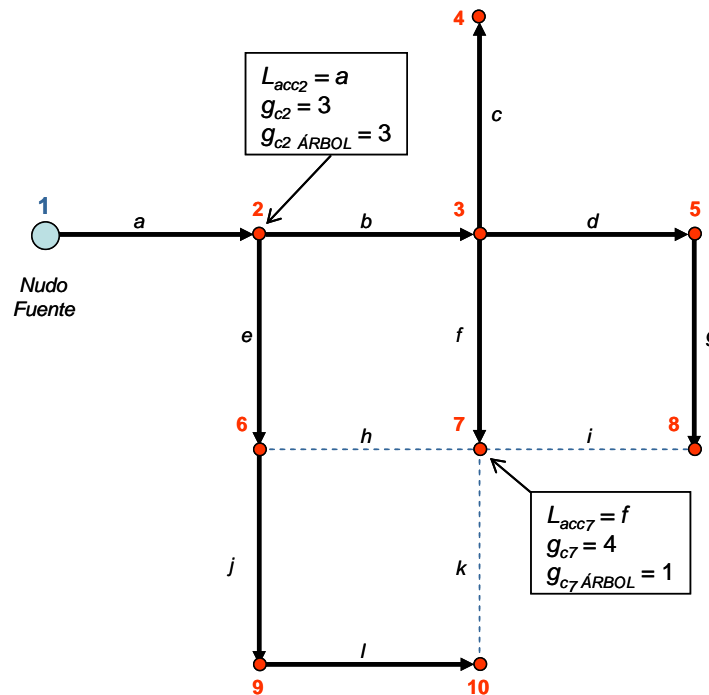


FIGURA 28. EJEMPLO DE ÁRBOL DE EXPANSIÓN DE UN GRAFO Y SU TOPOLOGÍA. LÍNEAS DE ACCESO A CADA NUDO Y GRADO DE CONECTIVIDAD DEL ÁRBOL.

En la figura anterior se muestra un árbol de expansión cuyo nudo raíz o fuente es el nudo 1. Obsérvese como el nudo 2 tiene un grado de conectividad topológico igual a 3 que coincide con el grado de conectividad del nudo como perteneciente al árbol. Sin embargo el nudo 7 tiene un grado de conectividad topológico igual a 4 como perteneciente al grafo e igual a 1 como perteneciente al árbol. Según la orientación virtual asignada tras la declaración del árbol de expansión, la arista o línea de acceso al nudo 2 es la arista a, mientras que la línea de acceso al nudo 7 es la f. Las aristas que aparecen en color azul a trazos representan las cuerdas del grafo.

6.5.6 Ordenación topológica

La ordenación topológica se aplica en principio a árboles dirigidos, y es una técnica que consiste en la reclasificación numérica de todos los vértices pertenecientes a un grafo conexo y acíclico $G = (V, A)$, de tal forma que a cada vértice se le asigna un índice que resulta inferior a los índices de todos los vértices a los que apunta. En caso de no ser un grafo dirigido, la aplicación de esta técnica se basa en la topología de árbol para ir recorriéndolo en el sentido aguas abajo como si de un grafo dirigido se tratase. Tras la ordenación topológica, si $(u, v) \in A$, entonces u aparece antes que v en dicha ordenación.

La ordenación topológica se realiza recorriendo el grafo mediante el método de búsqueda en profundidad (*DFS*). Es por este motivo, por lo que la solución no es única. Además, no es posible la ordenación topológica cuando existen ciclos en el grafo.

Por tanto, dado un grafo acíclico dirigido o *pseudodirigido* $G = (V, A)$, el recorrido en profundidad (*DFS*) puede usarse directamente para ordenar los vértices de V según un orden parcial tal que:

$$\forall u, v \in V, \text{ si } \vec{uv} \in A \rightarrow \text{índice}(u) < \text{índice}(v)$$

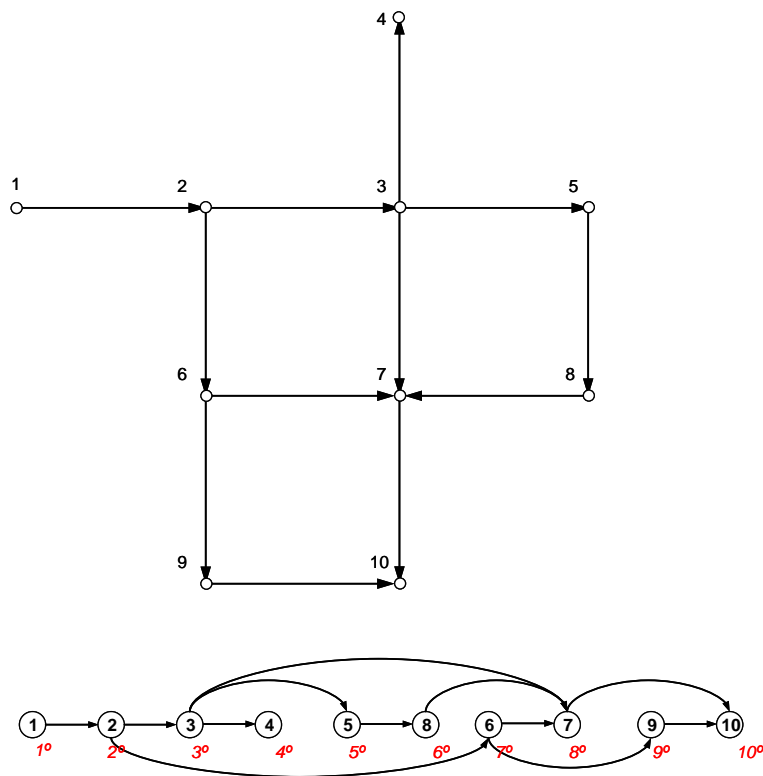


FIGURA 29. GRAFO DIRIGIDO Y SU HOMÓLOGO REORDENADO TRAS APLICAR UNA ORDENACIÓN TOPOLÓGICA.

La figura inferior muestra a través de un grafo dirigido, la ordenación topológica de los nudos. En rojo se ha destacado el orden topológico de cada uno de los vértices tras su ordenación. Observemos que siguiendo dicho orden, todos los nudos desde los cuales se accede a un nudo dado son anteriores a él. El orden topológico puede extenderse también a las aristas de acceso a cada vértice.

6.6 MALLAS BÁSICAS O INDEPENDIENTES DE UN GRAFO

En el apartado de definiciones generales, se ha introducido de manera genérica el concepto de malla como un trayecto simple en el que los vértices inicial y final son coincidentes. Sin embargo, es posible diferenciar entre distintos tipos de mallas según su naturaleza topológica.

En general, si en un grafo se define un árbol de expansión, cada una de las cuerdas del grafo formará una malla básica o independiente. Dicho de otra forma, una malla básica estará formada por una única cuerda y al menos una rama.

Por tanto, se desprende que en un grafo habrá tantas mallas independientes como cuerdas. Una malla en la que exista más de una cuerda será consecuencia de la combinación de más de una malla básica.

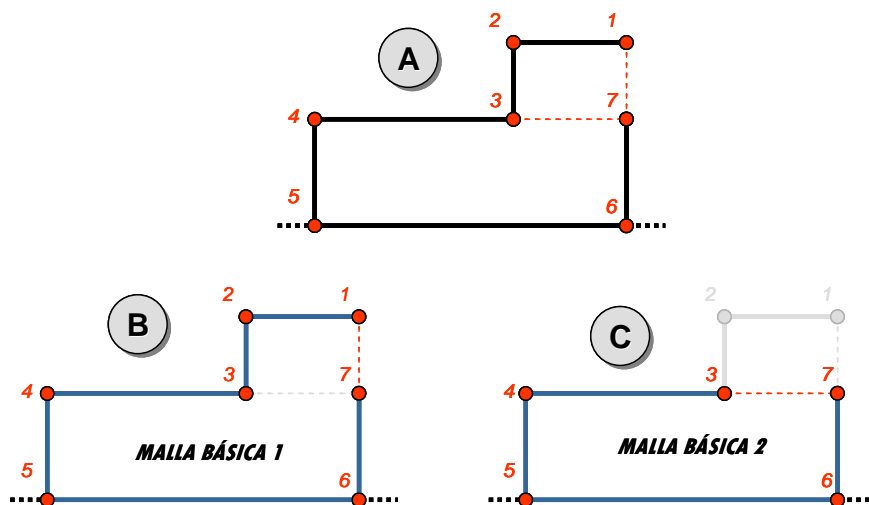


FIGURA 30. EJEMPLO DE MALLAS BÁSICAS O INDEPENDIENTES.

La figura anterior ilustra el concepto de malla básica o independiente. Aparentemente el subgrafo de la figura A está formado por dos únicas mallas, la malla 1-2-3-7-1 y la malla 3-4-5-6-7-3. Sin embargo el subgrafo contiene 3 mallas, dos básicas y una no básica combinación de ambas. Las dos mallas básicas son las que se muestran en las figuras B y C. La malla 1-2-3-7-1 forma una malla dependiente combinación de las mallas básicas anteriores.

El procedimiento para identificar una malla básica consiste en recorrer el árbol desde cada uno de los nudos extremos de la cuerda en cuestión en dirección al nudo raíz, esto es, aguas arriba, hasta encontrar con el nudo común que cierra la malla.

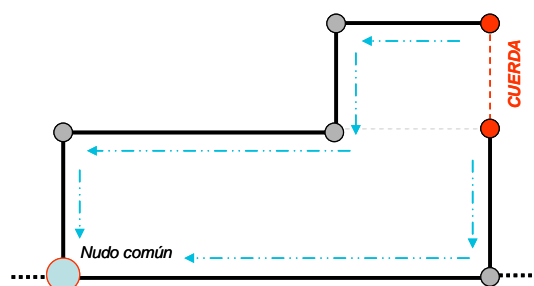


FIGURA 31. IDENTIFICACIÓN DE UNA MALLA BÁSICA.

6.7 CONJUNTO DE CORTE (CUT-SET)

Se conoce como conjunto de corte de un grafo conexo, a la serie de aristas tales que si fueran excluidas del grafo principal, dividirían a éste en dos subgrafos conexos, truncando cualquier trayecto posible entre un nudo del primer subgrafo generado y un nudo del segundo subgrafo.

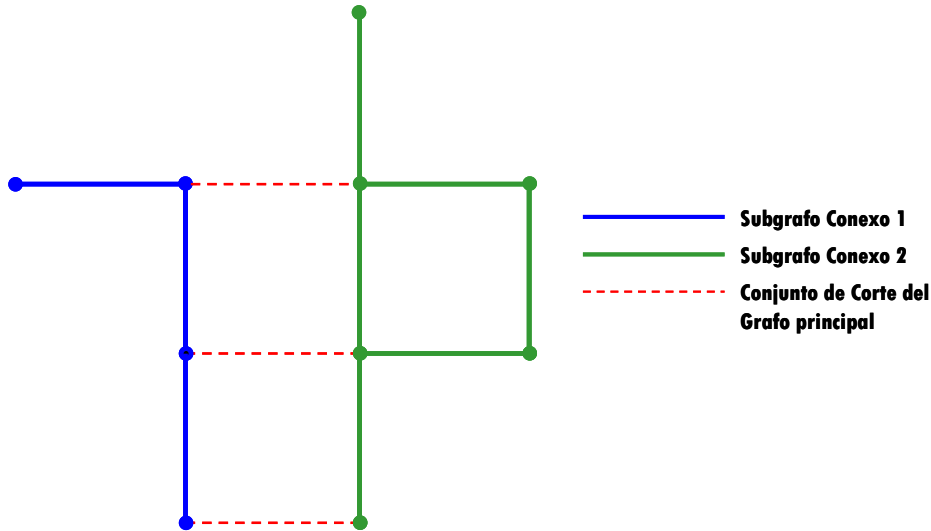


FIGURA 32. EJEMPLO DE CONJUNTO DE CORTE DE UN GRAFO.

Dado que el conjunto de corte no puede estar formado por más de una rama, pues de lo contrario existiría una malla (básica o no) formada únicamente por ramas, en contra de lo señalado en el apartado anterior, éste estará formado por una única rama y en la mayoría de ocasiones también por un conjunto de cuerdas.

El procedimiento para obtener todos los conjuntos de corte asociados a un grafo consiste en examinar cada una de las cuerdas existentes en el mismo, y recorrer el árbol en el sentido aguas arriba (hacia el nudo fuente) desde cada uno de los nodos extremos de la cuerda, hasta encontrar el nudo común que cierra la malla básica. Localizado dicho nudo, se debe asociar la cuerda examinada a cada una de las ramas que componen la malla básica. Una vez examinadas todas las cuerdas, se consigue establecer una relación entre cada una de las ramas del árbol y el conjunto de cuerdas que definen las mallas independientes de las que forma parte. Tanto la rama como el conjunto de cuerdas forman lo que se denomina conjunto de corte. Existe una clara analogía entre las listas de adyacencias y los conjuntos de corte. En una lista de adyacencias, cada nudo tiene asociada una lista que alberga las aristas con las que conecta. En el caso de los conjuntos de corte, cada rama tiene asociada una lista con las cuerdas que definen todos los posibles trayectos que unen los nodos extremos de dicha rama.

6.8 BOSQUES DE ÁRBOLES

Cuando se trabaja con grafos inconexos, la búsqueda de árboles de expansión, da lugar a la aparición de bosques de árboles asociados a cada uno de los subgrafos.

Los procedimientos vistos anteriormente pueden ser adaptados al objeto de detectar la existencia de múltiples árboles dentro de un grafo no conexo y asignar a cada uno de los nudos y aristas examinadas (tanto ramas como cuerdas) el subgrafo al que pertenecen.

Asimismo, el procedimiento escogido, puede extenderse para que al mismo tiempo sea posible establecer la topología de cada uno de los árboles que forman el bosque, su orden topológico, así como todos sus conjuntos de corte.

Las estructuras topológicas definidas pueden coexistir simultáneamente dentro del mismo grafo principal sin necesidad de referir explícitamente el árbol al que pertenecen.

6.9 GRAFOS DIRIGIDOS (DÍGRAFOS)

Como se ha comentado anteriormente, un grafo dirigido o dígrafo es aquel grafo en el que las aristas solo pueden ser recorridas en un solo sentido, por tanto el orden de los vértices de la arista es relevante (*véase el sentido que marcan las flechas en las aristas del grafo de la figura*). Así pues, en un dígrafo la arista $a = \{u, v\}$ sólo puede recorrerse en el sentido de u a v (*dícese también que u es adyacente hacia v , y que v es adyacente desde u*), mientras que la arista $a = \{v, u\}$ sólo podrá recorrerse en sentido contrario, esto es, de v a u (*dícese también que v es adyacente hacia u , y que u es adyacente desde v*).

El número máximo de aristas que pueden existir en un grafo NO dirigido de n vértices sin contar las aristas que unen un vértice consigo mismo $\{u, u\}$ es de $n(n-1) / 2$. Sin embargo, en el caso de los grafos dirigidos, el número máximo de aristas es de $n(n-1)$.

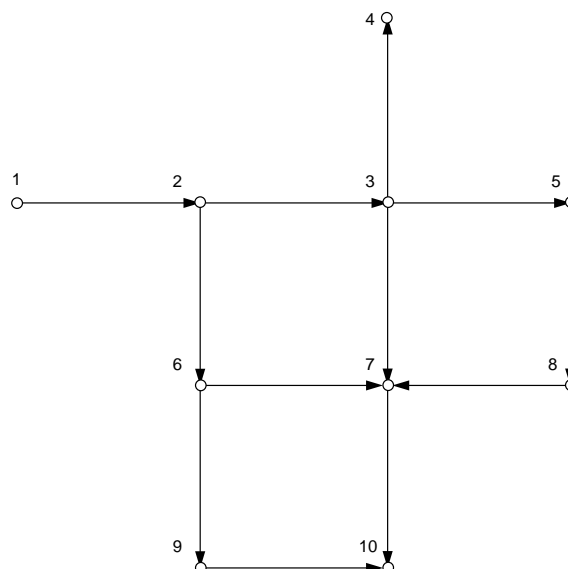


FIGURA 33. EJEMPLO DE UN GRAFO DIRIGIDO O DÍGRAFO.

En definitiva, los grafos dirigidos asumen que las aristas se pueden recorrer en un solo sentido. Si además se asigna un coste o peso a cada una de las aristas del dígrafo, se obtiene un grafo

dirigido ponderado $G = (V, A, \vec{w})$, en el que cada arista posee tanto un sentido como un peso asociado.

Un caso particular de grafo dirigido lo constituyen los **árboles dirigidos**, que son dígrafos cuyo grafo asociado es un árbol.

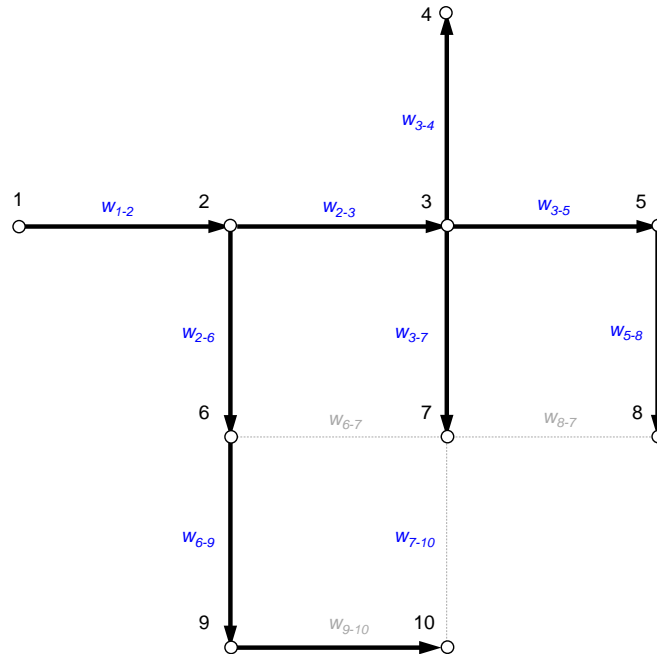


FIGURA 34. EJEMPLO DE UN ÁRBOL DIRIGIDO.

El hecho de asignar un peso y un sentido a cada una de las aristas del grafo, afecta tanto al trazado del árbol de expansión de mínimo coste como al árbol de trayectos mínimos, pudiendo dar lugar a un bosque de árboles dentro de un grafo conexo. La siguiente figura muestra un ejemplo que ilustra este caso, en el que el sentido de las aristas marca necesariamente el número mínimo de árboles dirigidos existentes en el grafo conexo.

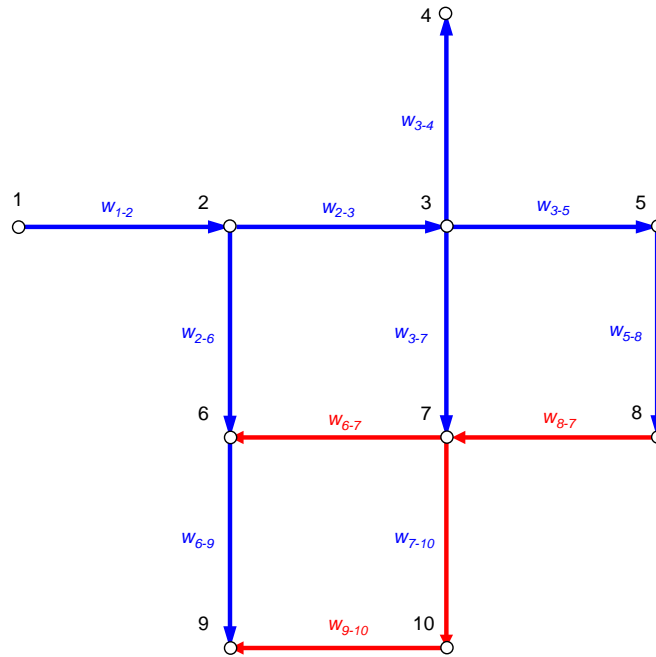


FIGURA 35. EJEMPLO DE UN BOSQUE DE ÁRBOLES DIRIGIDOS (COLORES ROJO Y AZUL).

Por tanto, cuando se trabaja con grafos dirigidos, debido a la orientación asignada a las aristas, el árbol de mínimo coste puede no ser de expansión, es decir, puede que el árbol de mínimo coste no alcance a todos los nodos del grafo. En tal caso se originarán bosques de árboles como se observa en la figura anterior.

Así como el algoritmo de *Dijkstra* está pensado fundamentalmente para grafos dirigidos, el algoritmo de *Prim* puede adaptarse fácilmente para contemplar el caso de dígrafos, si bien en este caso, el MST dependerá del nudo tomado como origen. Por el contrario, los algoritmos de *Kruskal* y *Boruvka* no permiten trabajar con grafos dirigidos.

CAPÍTULO 7

APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS A LA GESTIÓN DE LAS
REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

CAPÍTULO 7. APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS A LA GESTIÓN DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

7.1 INTRODUCCIÓN

La topología es una de las ramas clásicas de las matemáticas que estudia las propiedades y relaciones tanto geométricas como espaciales de los elementos que componen un grafo o red. Trasladado al campo de la modelación de redes de distribución de agua, la topología se centra en el estudio de la configuración y la relación existente entre las líneas y los nudos que conforman el esquema geométrico del modelo matemático de una red.

Por tanto, más allá de la concepción clásica de la topología, los principios básicos de la teoría de grafos pueden ser adaptados a fin de extender el mero análisis topológico al campo de los modelos matemáticos de las redes de distribución de agua. Para ello, es necesario caracterizar una red de distribución de agua como una entidad topológica fundamentada en un grafo conexo que puede ser recorrido y explorado.

Es posible utilizar las ideas y técnicas introducidas en el capítulo anterior para llevar a cabo estudios y análisis topológicos sobre un modelo de una red de tuberías. Además, teniendo en cuenta que cualquier elemento perteneciente a una red de distribución de agua posee una componente geográfica inherente, resulta apropiado el empleo de los sistemas de información geográfica (SIG) para implementar las herramientas necesarias con las que llevar a cabo este tipo de análisis y aprovechar los resultados obtenidos para la toma de decisiones que puedan afectar a la gestión diaria del sistema de abastecimiento.

Con este objetivo, en el presente capítulo se describen las técnicas y los desarrollos implementados sobre la aplicación GISRed para poder llevar a cabo análisis topológicos avanzados aplicados a los modelos matemáticos de las redes de distribución de agua a presión.

7.2 APLICACIONES A LA GESTION DE REDES DE DISTRIBUCIÓN

La teoría de grafos no sólo es aplicable en el campo de las matemáticas, sino que se usa también en el ámbito de la ingeniería para analizar circuitos eléctricos, para realizar cálculos teóricos relativos a partículas elementales o conexiones químicas entre átomos de una molécula, etc. Igualmente adquiere cierta importancia en materia económica por sus numerosas aplicaciones en investigación operativa. Por ejemplo, para determinar el trayecto óptimo (trayecto de menor coste o el más rápido) en gestión y logística de flotas (rutas óptimas de reparto, recogida, etc.). En el terreno de las telecomunicaciones es bastante habitual utilizar este tipo de teorías para establecer la relación de interferencia entre antenas en un sistema de comunicación inalámbrica, enlaces entre servidores en Internet, etc. En redes de carreteras o de transporte urbano (viarios), éstas pueden representarse como aristas que unen diversos puntos neurálgicos como ciudades o puntos concretos de la ciudad; a cada arista se le asocian varios números (longitud del camino correspondiente, tiempo de recorrido, coste del peaje,...). Usando cálculos y algoritmos a veces complejos, se determinan una o varias soluciones, y se trata entonces de encontrar la mejor de ellas.

En el caso que nos ocupa, **la aplicación directa de la teoría de grafos se aplica al análisis de las redes de distribución de agua** y en general a cualquier tipo de red de transporte de fluidos a presión.

En el campo de las redes de agua un grafo es una abstracción del entramado de tuberías de la red de abastecimiento caracterizado por una serie de relaciones implícitas entre sus tuberías (aristas) y sus nudos (vértices).

La aplicación de la teoría de grafos en el campo de las redes de distribución de agua no se encuentra demasiado extendida en el campo de la hidráulica de modelos de redes a presión, y las posibilidades que ofrece la implementación de algoritmos de grafos basados en la topología del modelo para el análisis y la toma de decisiones en el sistema físico real, son numerosos. Algunos ejemplos de aplicación de estas técnicas son:

► **La evaluación, diseño y fiabilidad de las redes en base a:**

- la valoración del trazado y diámetros de la red en servicio desde el punto de vista económico
- la valoración de la capacidad de transporte de la red, esto es, la detección de puntos críticos dentro del entramado de tuberías y nudos, la detección de 'cuellos de botella' en determinadas zonas del sistema, etc.
- el análisis de cerradas en caso de rotura o emergencia (lo que comúnmente se conoce como polígonos de corte), con la particularidad de llegar a analizar la disposición óptima de las válvulas de corte a instalar en el caso de, por ejemplo, nuevas zonas de expansión. Todo ello conectado con el modelo hidráulico permite llevar a cabo una evaluación de los abonados afectados directamente por el corte de suministro y el análisis de las presiones residuales existentes en la zona perjudicada. Otra posible aplicación, es poder comprobar el efecto de la apertura de válvulas en redes sectorizadas.
- En cuanto al análisis de fiabilidad, determinados algoritmos pueden asistir en la caracterización y determinación de la importancia de cada tubería dentro del sistema, de tal manera que permitan identificar trayectos o caminos alternativos con mayor capacidad de transporte o simplemente tramos sometidos a menor fatiga debido a cambios bruscos de presión. En este sentido, es útil prever posibles situaciones de emergencia en dichos puntos críticos, pudiendo valorar los riesgos y daños que conllevaría la falta de cualquier medida preventiva.

► **Gestión de la demanda**

- Asistentes para la sectorización teniendo en cuenta criterios de población máxima por sector, demanda máxima por sector, número de tuberías máximo, estratos de presión
- Valoración del rendimiento de la red mediante la ubicación estratégica de los contadores.
- Obtención de las curvas de modulación y seguimiento de los consumos nocturnos
- Realización de auditorías en base a la normativa aplicable

► **Simplificación y esqueletización automática de redes**

- Eliminación de las tuberías menos relevantes
- Agrupación de tuberías en serie y paralelo
- Sustitución de grupos de tuberías por otras equivalentes en comportamiento

- Macromodelización por sectores, etc.

► La **aplicación a la localización de medidores** es quizás la parte que más se ha estudiado y donde los resultados han sido más satisfactorios.

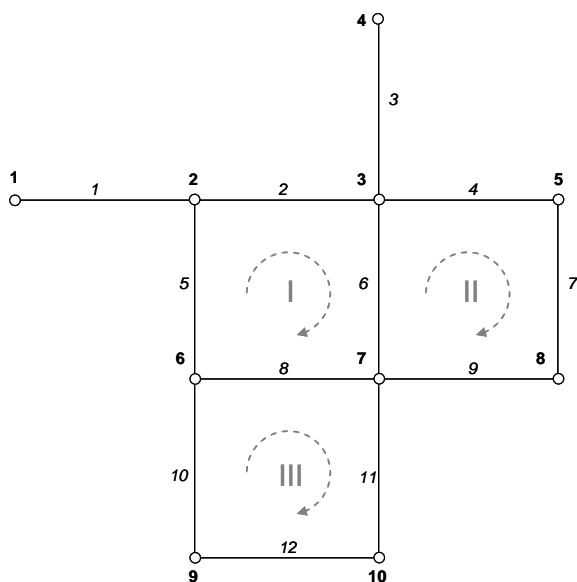
Algunos de estos puntos serán ampliados a lo largo de esta tesis, donde se pondrá de manifiesto la utilidad y las principales ventajas de la utilización de algoritmos basados en la topología de redes para el análisis de determinadas características de la red que ayuden en el proceso de toma de decisiones en la gestión diaria de un abastecimiento.

7.3 PROPIEDADES TOPOLÓGICAS DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Una red de distribución de agua puede ser asimilada a un grafo conexo formado por una serie de líneas representando tuberías, válvulas y bombas, y una serie de nudos representando nudos de caudal y nudos de almacenamiento como son depósitos y embalses. Una red, al igual que un grafo, se dice que está dirigida u orientada, si todas sus líneas tienen asignado un sentido de circulación, por ejemplo el que define el flujo, y además será conexa si contiene, al menos, una secuencia de líneas que permita la circulación y suministro de caudal desde un nudo de almacenamiento a cualquiera de los restantes nudos de la red. Los depósitos, embalses y nudos de inyección, se denominan nudos de cabecera, nudos raíz o simplemente fuentes y representan los nudos desde los que parten todos los trayectos posibles existentes en la red.

En el caso de una red conexa compuesta por L líneas y N nudos, la relación topológica introducida por Euler establece que:

$L = N + M - 1$, donde M es el número de ciclos o mallas *independientes* existentes en la red.



$$L = N + M - 1 = 10 + 3 - 1 = 12$$

FIGURA 36. RELACIÓN TOPOLÓGICA INTRODUCIDA POR EULER.

Partiendo de un nudo fuente que imponga el sentido de flujo (grafo dirigido), es posible obtener una subred (*subgrafo*) que alcance a todos los nudos de la red principal. Dicha subred constituye un árbol de expansión o *spanning tree*. En un árbol de expansión o generador, cada

nudo es necesariamente alimentado a través de una única línea (salvo el nudo fuente), mientras que desde cualquier nudo se puede o no alimentar a varias líneas. Resulta fundamental recalcar esto último, ya que, topológicamente, en una red dirigida, un nudo sólo puede tener una línea de acceso, ya que en caso de tener más de una línea de acceso asociada, significaría que el nudo es común a varios árboles dirigidos diferentes, caracterizados por un nudo fuente distinto. Todas las líneas que definen el árbol de expansión se denominan ramas, mientras que el resto de líneas se denominan cuerdas. Dichas cuerdas dan lugar a mallas independientes de la red.

Por tanto, siguiendo los conceptos de la teoría de grafos vistos hasta ahora, toda red de distribución de agua conexa posee al menos un árbol de expansión que une todos sus nudos.

7.4 ALGORITMO DE VERIFICACIÓN DE LA CONECTIVIDAD DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Como se señaló anteriormente, una red se dice que es conexa si dos nudos cualesquiera pertenecientes a la misma, pueden ser unidos mediante un camino. En caso contrario, la red se dice que es inconexa.

El algoritmo más simple que permite comprobar la conectividad de la red se denomina **quick-find** o algoritmo de búsqueda rápida. Este algoritmo se apoya en un vector de nudos indexados. En este vector los nudos p y q están conectados si y sólo si las entradas p -ésima y q -ésima son iguales, lo que significa que ambos nudos pertenecen a la misma subred. La entrada i -ésima del vector de nudos se inicializa a i , con $0 \leq i \leq N$, donde N es el número de nudos de la red. En el momento de implementar la operación de fusión de dos subredes identificadas por p y q , es necesario recorrer el vector y cambiar todas aquellas entradas pertenecientes a la subred p como pertenecientes a la nueva subred q . Siguiendo este proceso, en el momento en que se hayan recorrido todas las líneas y sus nudos extremos, los diferentes valores que muestre el vector de nudos indexados indicarán el número de subredes desconectadas. **Este algoritmo resulta muy ineficiente al tener que llevar a cabo multitud de operaciones de fusión mientras se está analizando la red. En concreto, $N \cdot F$ operaciones, donde N es el número de nudos y F el número de operaciones de fusión.**

Otra alternativa más eficiente consiste en utilizar los algoritmos de búsqueda en grafos que ya han sido analizados en el capítulo anterior, el de búsqueda en profundidad (*DFS*) y el de búsqueda en amplitud (*BFS*).

La aplicación GISRed incluye una opción de verificación de la conectividad de una red, que se **basa en el algoritmo de búsqueda en amplitud**. Este algoritmo de búsqueda, examina sistemáticamente las líneas pertenecientes a la red de manera que primero se exploran los nudos contiguos más cercanos al nudo considerado como nudo pivote. Para verificar la conectividad de la red, el primer nudo que actúa como pivote en el algoritmo es, en principio, un nudo cualquiera de la misma. El proceso se repite hasta que se han explorado todas las líneas de la red. La manera más eficiente de implementar el algoritmo es mediante un procedimiento no recursivo basado en una **lista de adyacencias indexada por nudos**, que almacena listas de todas las líneas que conectan con cada uno de los nudos de la red, **y una cola de tipo FIFO** (*First-in-first-out*) a la que denominamos Q , que permite almacenar las líneas adyacentes a cada nudo que todavía no han sido examinadas. Esta cola proporciona en cada paso del algoritmo la línea y el nudo que actúan como pivote o frente de avance.

A continuación se presenta de forma esquemática el procedimiento que sigue GISRed para examinar si la red analizada es conexas. En caso de no serlo, GISRed proporciona gráficamente el número de subgrafos o subredes no conectadas existentes.

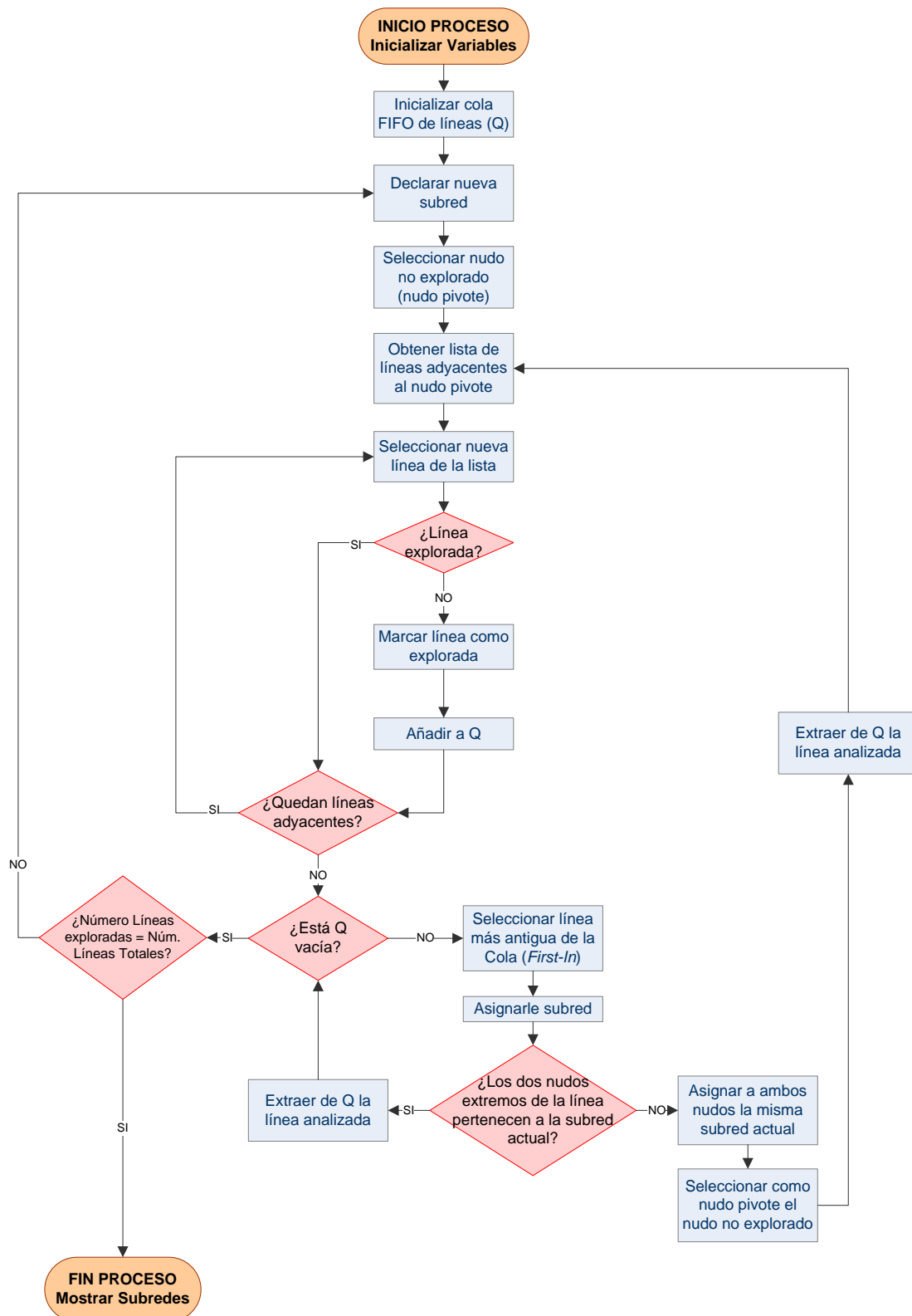


FIGURA 37. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE VERIFICACIÓN DE LA CONECTIVIDAD.

7.5 ANÁLISIS DE LAS SUBREDES Y SUBSISTEMAS HIDRÁULICOS EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Es posible introducir una pequeña comprobación adicional al algoritmo de verificación de la conectividad descrito en el apartado anterior, para tener en cuenta el estado de las líneas de la red (líneas abiertas o cerradas) en el proceso de análisis y que por tanto, el algoritmo de búsqueda implementado compruebe si la línea a explorar está abierta o cerrada. Si dicha línea está cerrada, el algoritmo no puede seguir avanzando y debe saltar a otra no explorada para continuar con su recorrido de avance.

Asimismo, el algoritmo se ha ampliado para llevar a cabo una fase de postproceso que permita analizar cada una de las subredes detectadas. El objetivo es clasificar todas las subredes detectadas en función de las siguientes características:

- **SUBRED TIPO A:** Subred en la cual existe al menos una fuente de suministro, esto es, un depósito, un embalse o bien un punto de inyección, y además al menos uno de sus nudos es un nudo de caudal y por consiguiente, con una demanda base asignada. Obviamente, esta subred se trataría realmente de un **subsistema hidráulicamente compatible**, en la que todos sus nudos podrían ser alimentados con garantías.
- **SUBRED TIPO B:** Subred en la cual existe al menos una fuente de suministro, esto es, un depósito, un embalse o bien un punto de inyección, pero en la que ninguno de sus nudos de caudal posee demanda base asignada. Esta subred se trataría realmente de un **subsistema hidráulicamente compatible**, en la que no existiría flujo de caudal al no existir puntos de demanda (situación de grifos cerrados).
- **SUBRED TIPO C:** Subred en la cual no existen fuentes de suministro, pero sin embargo sus nudos de caudal tienen asignada una demanda base. Esta subred conformaría una **subred aislada, hidráulicamente incompatible**, en la que sus nudos no podrían ser abastecidos al carecer de toda fuente de suministro.
- **SUBRED TIPO D:** Subred en la cual no existen fuentes de suministro, y además ninguno de los nudos de caudal posee demanda base asignada. Esta subred conformaría una **subred aislada, pero hidráulicamente compatible**, pues sus nudos no necesitan ser abastecidos, y por tanto no se requieren fuentes de suministro.

Esta clasificación resulta muy útil para detectar partes de la red hidráulicamente compatibles que permitirían el suministro normal de los puntos de demanda, y partes de la red que quedarían aisladas tras por ejemplo una maniobra de cierre de válvulas.

El algoritmo implementado en GISRed se basa en el de verificación de la conectividad de la red, con las comprobaciones adicionales comentadas arriba. Se fundamenta **en el algoritmo de búsqueda en amplitud (BFS)**. Este algoritmo de búsqueda examina sistemáticamente las líneas pertenecientes a la red de manera que primero se exploran aquellas líneas contiguas más cercanas al nudo que en cada momento actúa como nudo pivote. Sin embargo, se comprueba si la línea explorada se encuentra abierta o cerrada. Si la línea está cerrada, el algoritmo no puede continuar explorando las líneas conectadas a ella, por lo que debe pasar a otro nudo no explorado y seguir analizando la red a través de otras líneas. Al final del proceso y cuando se han detectado todas las subredes existentes, se lleva a cabo un postproceso para clasificar dichas subredes de acuerdo a la clasificación anterior.

El diagrama de flujo del proceso se muestra a continuación:

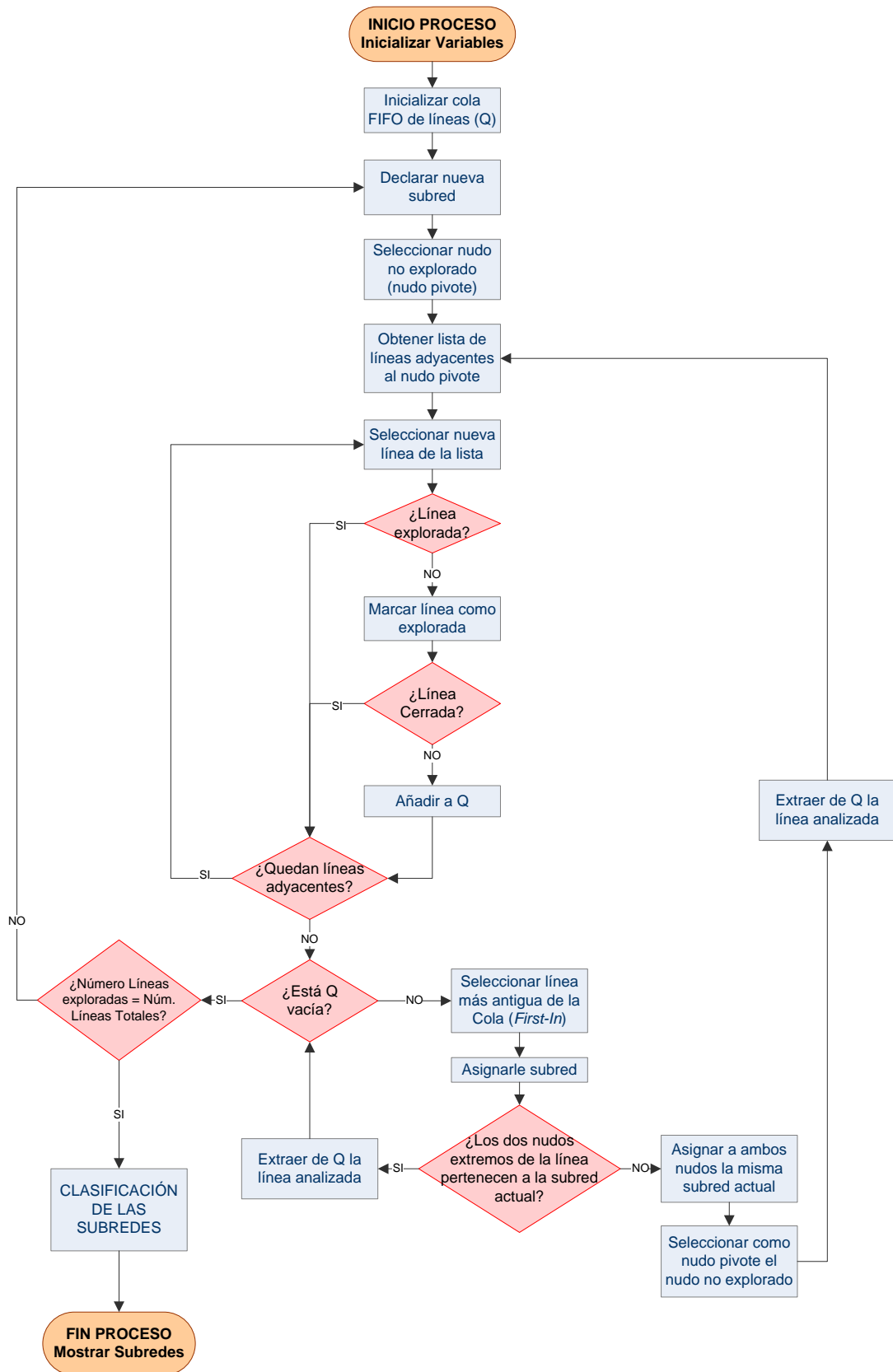


FIGURA 38. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE ANÁLISIS DE LAS SUBREDES Y SUBSISTEMAS.

7.6 ÁRBOL DE EXPANSIÓN DE MÍNIMO COSTE (MINIMUM SPANNING TREE)

El árbol de expansión de mínimo coste posee importantes aplicaciones en el análisis y diagnóstico de las redes de distribución de agua, y será el punto de partida de muchas de las aplicaciones que se verán en posteriores capítulos. Por ello nos detendremos en este capítulo en estudiar más a fondo los algoritmos de búsqueda del MST descritos en el capítulo anterior, y las peculiaridades de los mismos cuando se aplican al caso de las redes hidráulicas.

Antes nos detendremos en analizar los posibles criterios a utilizar para fijar el coste o peso asociado a cada una de las aristas del grafo.

7.6.1 Criterios de ponderación de las líneas de una red

En el caso de una red de distribución de agua, para definir el árbol de expansión de mínimo coste, es necesario asociar un peso o coste a cada una de las líneas del esquema de la red. Normalmente, este coste suele ser función de los parámetros físicos de la red ya que en la mayoría de ocasiones, a priori, no se dispone de datos medidos o de simulación. Si por el contrario dichos datos existen, también pueden ser utilizados para definir el coste de una línea.

A la hora de construir el árbol de expansión, puede maximizarse o minimizarse su coste global, obteniendo de este modo un árbol generador máximo o mínimo en función del criterio de selección de líneas implementado en el algoritmo. Esta es la razón por la que en muchas ocasiones los costes asignados a las líneas del sistema se invierten alterando el orden de prioridad en la selección de las mismas al objeto de obtener un coste global máximo o mínimo. Así por ejemplo, si se asigna como peso el diámetro de las tuberías y se quiere obtener el árbol de expansión de mínimo coste que contenga las principales arterias de la red, se deberá asignar a cada línea un coste igual al valor inverso de su diámetro, de tal forma que las líneas con mayor diámetro serán las de mayor prioridad puesto que la búsqueda se basa en las de menor peso.

En una red de distribución, es usual encontrar válvulas cerradas y bombas no operativas durante ciertos periodos de tiempo. Estos elementos pueden originar desconexiones en el grafo de la red y consecuentemente alterar la topología del árbol de expansión considerado. Por tanto, deben tenerse en cuenta a la hora de generar el MST asignándoles un coste virtual (normalmente cero o infinito) en función de que se desee incluir o no estas líneas en el árbol.

Los principales parámetros físicos que suelen emplearse para definir los costes son:

LONGITUD

La utilización de la longitud como coste en el proceso de obtención del árbol de expansión mínimo, produce como resultado un árbol cuyos trayectos desde el nudo fuente considerado hasta cualquiera de los nudos de la red aguas abajo, son los más cortos.

Uno de los campos en los que se aplica este árbol de expansión consecuencia de la utilización de este criterio de ponderación, es el de la planificación y diseño de redes. Por ejemplo cuando se pretende abordar una ampliación de una red de riego en

servicio. El coste total de la ampliación, será proporcional a la longitud de las nuevas tuberías a instalar que deben llegar a todos los puntos de suministro. De ese modo, una vez fijada la localización de los nuevos puntos de consumo, si se analizan todos los posibles recorridos alternativos de suministro hasta dichos puntos, es decir, todas las tuberías candidatas a ser instaladas, la obtención del **árbol de expansión de mínimo coste (mínima longitud o de distancias mínimas¹)** proporcionará la distribución de tuberías con menor recorrido hasta llegar a cada nudo de consumo y por tanto la opción más económica en términos de coste por metro de tubería (a igualdad de diámetros). La complejidad en la instalación de determinados tramos puede tenerse en cuenta ponderando el coste de los mismos.

DIÁMETRO

Este es el parámetro más comúnmente empleado como coste de las líneas cuando no se dispone de más información acerca de la red. Con este criterio, los diámetros más grandes son los que marcan las principales ramas del árbol de expansión, configurando la espina dorsal de la red. El coste asociado a cada tubería debe ser el valor inverso de su diámetro. En el caso de bombas y válvulas activas (modeladas como líneas), se les asigna un diámetro ficticio muy alto para incluir dichas líneas en el árbol. Normalmente los caudales circulan por aquellas tuberías con mayor diámetro, con lo que el **árbol de expansión de mínimo coste** resultante proporciona, en primera instancia, una idea de la distribución espacial del caudal en la red.

COEFICIENTE DE FRICCIÓN

Otro de los parámetros que suele emplearse para fijar el coste de las líneas del modelo de red, es la expresión que aparece en el último paréntesis de la fórmula de *Darcy-Weisbach*:

$$h_f = \left(f \cdot \frac{L}{D} \right) \cdot \frac{v^2}{2g} = \left(f \cdot \frac{L}{2 \cdot g \cdot D} \right) \cdot v^2$$

En ella, el término de fricción puede estimarse si no se dispone de más datos.

En el caso de tuberías en paralelo con la misma pérdida de carga, el caudal circulará a mayor velocidad por aquella tubería que posea un menor valor del término citado. Siguiendo este razonamiento, es posible utilizar el término anterior para hallar el **árbol de mínimo tiempo de viaje**, lo que resulta muy útil para el análisis de la calidad de una red. El árbol así obtenido, estará formado por aquellas tuberías con las velocidades de circulación más altas, y consecuentemente, dichas tuberías presentarán muy probablemente las pérdidas de carga más altas del sistema de distribución, estando además expuestas a un mayor deterioro.

RESISTENCIA HIDRÁULICA

Es el criterio más adecuado cuando el propósito es estimar la distribución espacial de caudales más probable en la red. En este caso el parámetro utilizado como coste es la resistencia hidráulica r , que corresponde a:

¹ Para la obtención del árbol de trayectos mínimos, se utilizaría el algoritmo de *Dijkstra*.

$$h_f = \left(\frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \right) \cdot Q^2 = r \cdot Q^2$$

Este criterio puede ser utilizado para identificar las tuberías más relevantes de la red en términos de capacidad de transporte, es decir, aquellas que presentan una menor resistencia al paso del caudal. El árbol obtenido de esta manera se denomina **árbol de mínima resistencia hidráulica**.

CAUDAL o VELOCIDAD

Las **funciones de coste** anteriores están basadas en **propiedades físicas de la red**. Sin embargo, cuando se dispone de un **modelo de simulación**, el **coste puede estar basado en los resultados que proporciona el modelo**, como por ejemplo los **caudales circulantes** o las **velocidades de circulación**. En este caso, el árbol de expansión máximo proporciona los caminos o trayectos de la red por los que circula mayor caudal o bien lo hace a velocidades más altas. **Esto sería válido para un instante**, ya que los caudales y las velocidades cambian con el instante de simulación, con lo cual, también lo hace el árbol de expansión máximo/mínimo. Para evitar tener que construir un árbol en cada uno de los instantes de simulación, es posible tomar caudales o velocidades medios para todo el período de simulación.

7.6.2 Identificación de las ramas y cuerdas de un árbol de expansión

La propiedad fundamental que caracteriza a un árbol generador o de expansión es que debe conectar todos los nudos de la red (no necesariamente todas las líneas) sin formar ninguna malla. Aprovechando el procedimiento de verificación de la conectividad descrito con anterioridad, es posible clasificar al mismo tiempo todas las líneas del grafo como ramas o cuerdas, definiendo de esta manera uno de los posibles árboles de expansión de la red. La diferencia con respecto al procedimiento de verificación de la conectividad es que, en el momento en que el algoritmo se topa con una línea que se encuentra cerrada, ésta se clasifica como '*cerrada*' y no permite la expansión del árbol a su través. Por otra parte, cada vez que se incorpora una línea al árbol de expansión, se clasifica como '*rama*', puesto que une un nudo explorado con otro sin explorar (por tanto todavía no clasificado como perteneciente a la misma subred). Sin embargo, si se pretende incorporar una línea que no ha sido explorada todavía y cuyos nudos extremos han sido explorados y pertenecen a la misma subred, ésta se clasifica como '*cuerda*' y no entra a formar parte del árbol de expansión.

El procedimiento que permite la clasificación de los elementos del árbol de expansión está basado en el de verificación de la conectividad. El diagrama de flujo se muestra a continuación:

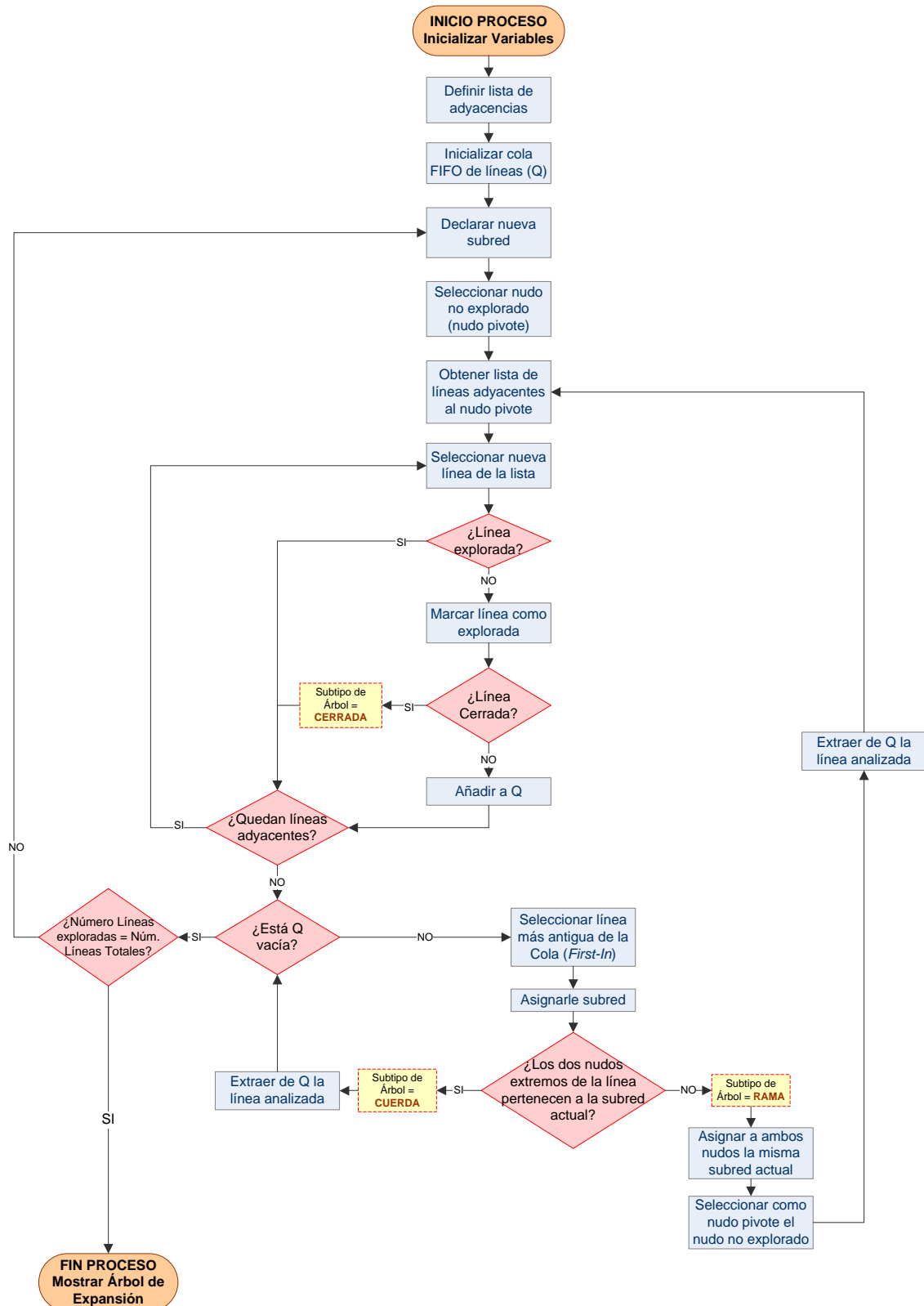


FIGURA 39. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL ÁRBOL DE EXPANSIÓN.

7.6.3 Identificación del árbol de mínima resistencia. Creación de la topología de árbol

Los algoritmos implementados en GISRed para obtener el árbol de expansión de mínimo coste y su topología están basados en los algoritmos de *Kruskal* y de *Prim*, cuya implementación se describe a continuación. En el caso del algoritmo de Prim, al propio tiempo que se identifican las ramas y cuerdas del árbol de mínimo coste, se crea también la topología de árbol que permitirá después recorrer éste en el sentido aguas arriba.

7.6.3.1 MST mediante el algoritmo de Kruskal

El algoritmo de Kruskal es el más sencillo de implementar, pero resulta ser ineficiente para redes de tamaño considerable (más de 3.000 tuberías). **Requiere de un vector de costes que contenga todas las líneas de la red ordenadas por su peso.** Además es necesario un **vector indexado por nudos que durante el proceso vaya almacenando a qué subred pertenece cada nudo** conforme se van analizando líneas, así como un **vector indexado por líneas que controle el tipo de línea** como perteneciente al árbol (rama, cuerda o línea cerrada) y la **subred a la que pertenece cada línea**. El **vector de costes de línea se ordena una sola vez** y se va recorriendo por orden, analizando una línea en cada iteración.

El **cuello de botella** del algoritmo se encuentra en la **operación de unión** necesaria para fusionar dos subredes adyacentes cuando se analiza una línea cuyos nudos extremos pertenecen a subredes diferentes. Este primer procedimiento implementado en GISRed, no permite seleccionar un nudo de la red como punto de partida del algoritmo, y el algoritmo arranca desde un nudo cualquiera del sistema. A continuación se presenta de manera esquemática el proceso de obtención del árbol de expansión de mínimo coste y la topología de árbol mediante el algoritmo concebido por Kruskal:

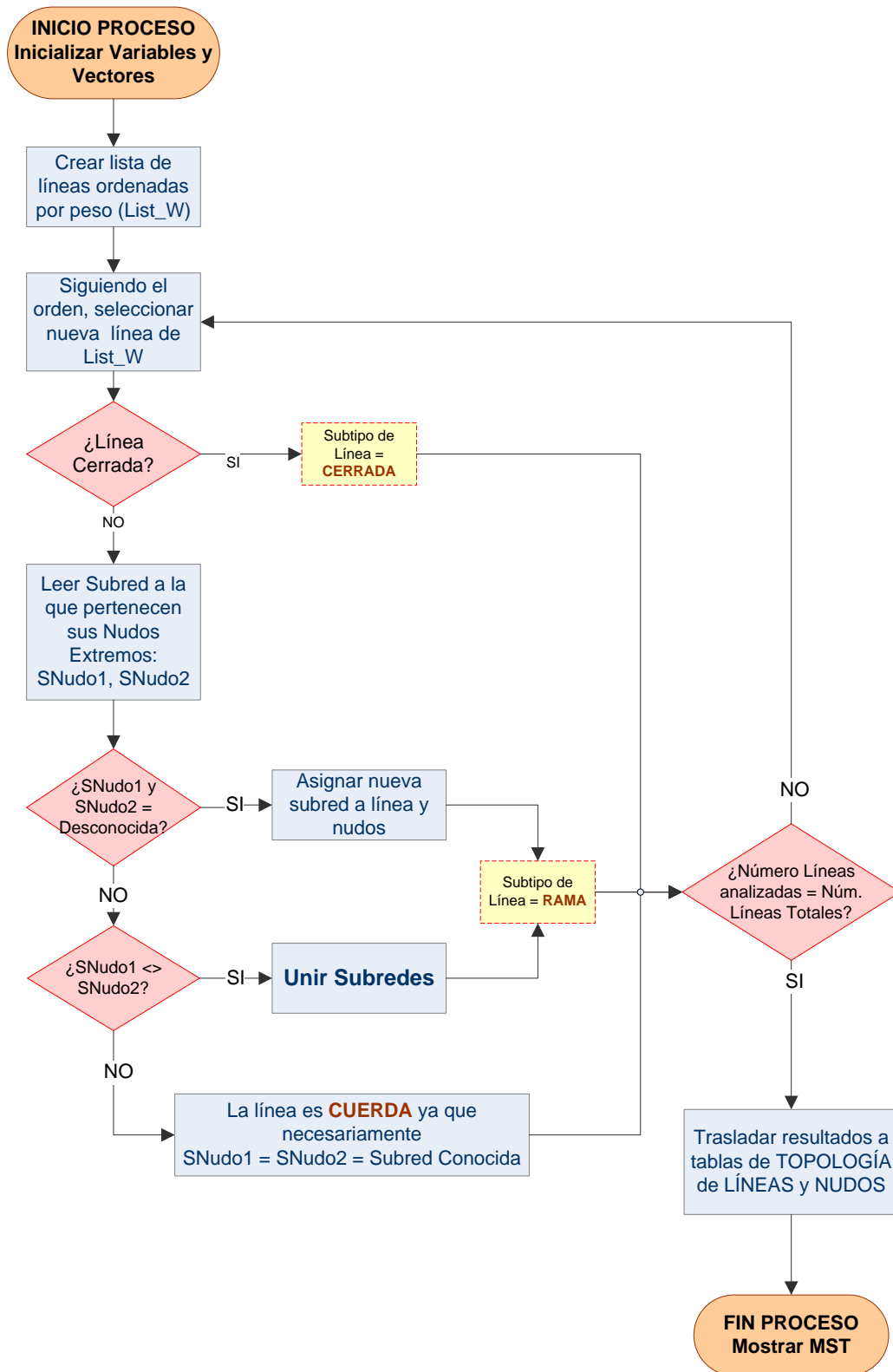


FIGURA 40. IDENTIFICACIÓN DE LAS RAMAS Y CUERDAS DEL ÁRBOL DE EXPANSIÓN DE MÍNIMO COSTE MEDIANTE EL ALGORITMO DE KRUSKAL.

7.6.3.2 MST mediante el algoritmo de Prim

Para evitar las operaciones de unión de subredes, se ha implementado también el algoritmo de Prim, cuya metodología difiere considerablemente de la anterior y **resulta más eficiente para redes grandes**. Este algoritmo **comienza desde un nudo definido como nudo raíz o fuente** y está basado en el algoritmo de Prim descrito en el capítulo anterior.

El **cuello de botella** de este procedimiento se encuentra **en la ordenación por pesos del vector de líneas Q cada vez que se añade una nueva línea adyacente al mismo**, ya que para redes grandes el tamaño del vector puede ser considerable con lo que la ordenación por pesos puede llegar a ser lenta en cada iteración.

Además, cada vez que se declara una nueva subred durante el proceso, el algoritmo debe partir de un nudo declarado previamente como nudo fuente. Si este no existe, y todavía hay partes de la red sin explorar, se selecciona un nudo al azar de los existentes y se continúa con el proceso de cálculo.

El esquema siguiente ilustra el procedimiento programado en GISRed para hallar el árbol de expansión de mínimo coste y su topología:

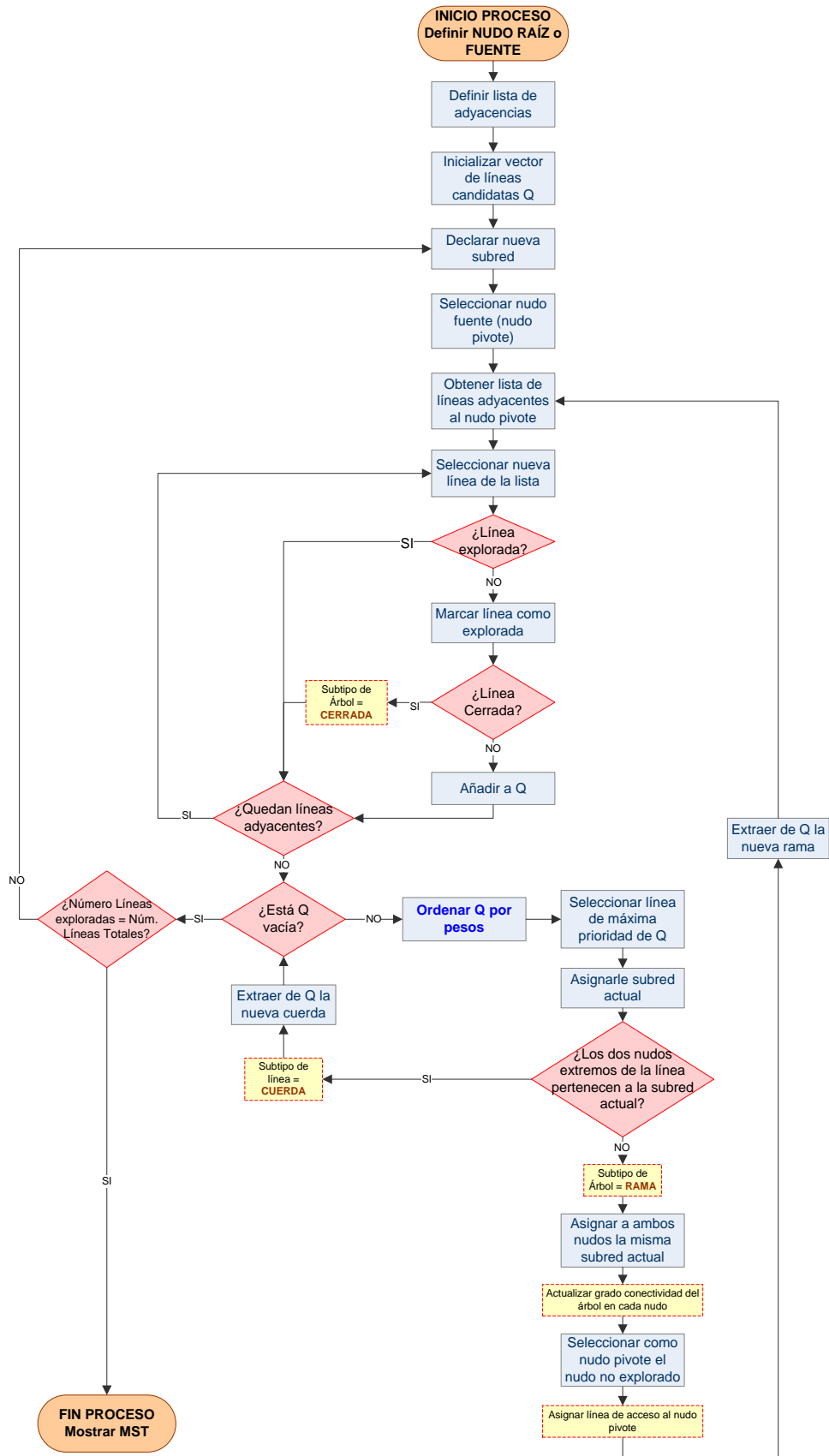


FIGURA 41. IDENTIFICACIÓN DEL ÁRBOL DE EXPANSIÓN DE MÍNIMO COSTE MEDIANTE EL ALGORITMO DE PRIM Y CREACIÓN DE LA TOPOLOGÍA DE ÁRBOL.

7.6.3.3 MST mediante el algoritmo de Prim apoyado en una caché de memoria

Por los motivos expuestos anteriormente y con el objetivo de encontrar un procedimiento más eficiente para redes grandes, se ha creado una **variante del algoritmo anterior** que introduce un vector de un tamaño predefinido y limitado y que está inspirado en el comportamiento de una **caché de memoria**. La finalidad es disponer de un instrumento de almacenamiento y acceso rápido que permita la ordenación de sus elementos con mayor celeridad. El objetivo por tanto, es disminuir el tiempo de ordenación del vector de pesos original, con lo cual el procedimiento se acelera enormemente.

La esencia del procedimiento implementado es manejar en todo momento **un vector de pesos (caché) de un tamaño más reducido cuyas operaciones de ordenación sean mucho más rápidas**. Para ello, la parte más innovadora que se ha introducido en el algoritmo además de la del vector caché, es la de jugar adicionalmente con otro vector **paralelo auxiliar de pesos de líneas**, al que van a parar todas aquellas líneas que van siendo exploradas cuyo peso sea superior al peso de las líneas del vector caché. Cada vez que se selecciona una nueva línea en el proceso de expansión del árbol de mínimo coste, se analiza si su peso es mayor o menor que el peso de la línea menos prioritaria dentro del vector caché, esto es, la de mayor peso. Si el vector caché no está lleno, la línea se almacena directamente en él para ser analizada. Si el vector caché está lleno, es necesario comparar el peso de la nueva línea candidata con el peso de la línea menos prioritaria o de mayor peso de la caché. Si el peso de la nueva línea es menor que el peso de la línea de mayor peso de la caché, la nueva línea pasa a formar parte de la caché y la línea menos prioritaria de la caché pasa al vector auxiliar. En caso contrario, la nueva línea pasa directamente al vector auxiliar. En el momento en el que la caché queda vacía, se produce un trasvase de líneas desde el vector auxiliar a la caché. Lo que se consigue con este procedimiento, es tener en todo momento las líneas con menor peso dentro de un vector de tamaño limitado (caché) cuya ordenación resulta mucho más rápida.

El diagrama de flujo con la variante implementada es:

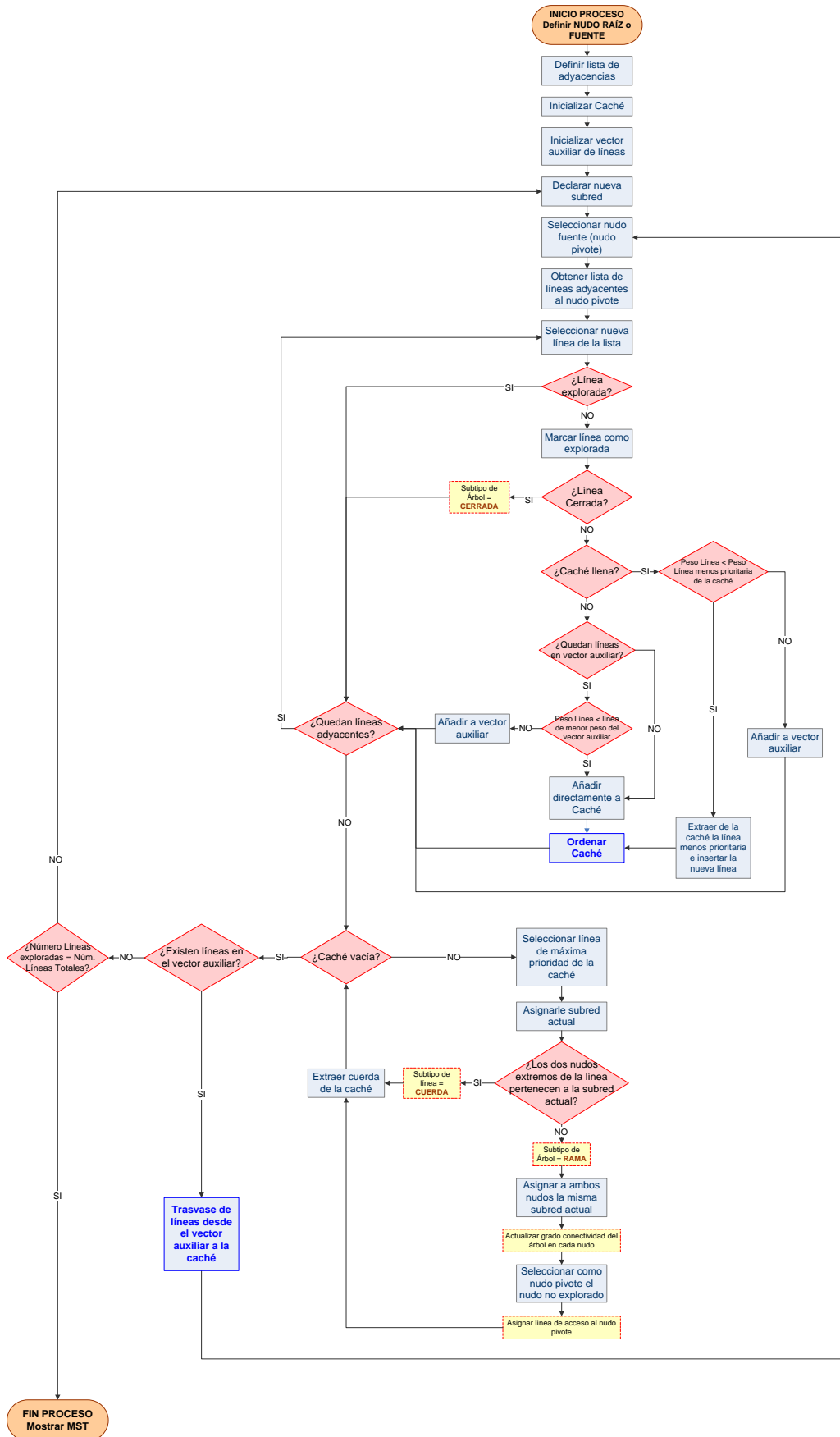


FIGURA 42. OBTENCIÓN DE LA TOPOLOGÍA DEL ÁRBOL DE EXPANSIÓN DE MÍNIMO COSTE MEDIANTE EL ALGORITMO DE PRIM APOYADO EN UNA CACHÉ DE MEMORIA.

7.6.4 Conjuntos de corte y mallas básicas

En el caso de una red conexa de suministro de agua en la que se ha definido un árbol de expansión dirigido en sentido aguas abajo desde un nudo de cabecera, **el conjunto de corte asociado a una rama cualquiera del árbol, está formado por todas aquellas cuerdas que permiten aislar el subárbol situado aguas abajo de dicha rama**. Esta propiedad tiene su origen en el mencionado *cut property* de los MST. Eliminando de la red la rama y su conjunto de corte, se obtendrían dos subredes independientes.

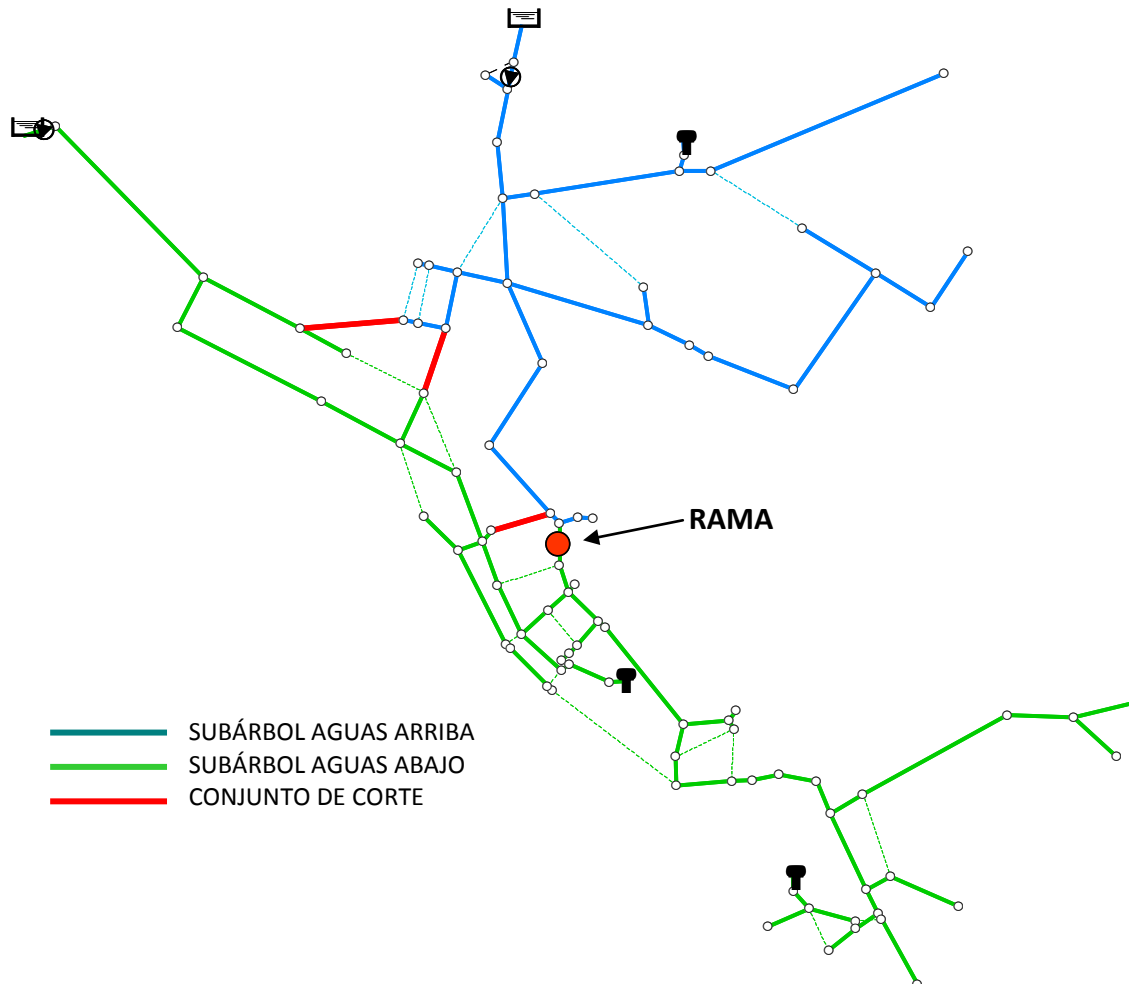


FIGURA 43. CONJUNTO DE CORTE ASOCIADO A UNA RAMA DE UNA RED.

En la figura anterior, se muestra en color rojo el conjunto de corte de la rama marcada por un punto también rojo y las subredes aguas arriba y aguas abajo de dicha rama, diferenciando entre ramas y cuerdas (líneas finas a trazos).

Si de entre todos los árboles pertenecientes a la red, se elige el de expansión de mínimo coste, las cuerdas que constituyen el conjunto de corte, representan las vías secundarias alternativas de suministro de caudal en el sentido aguas abajo del sistema. Según el teorema de 'máximo caudal - mínimo corte' (**max-flow/min-cut**²), en una red cuyo árbol de expansión de mínimo coste esté basado en los flujos de circulación (caudales), la máxima capacidad de transporte entre dos nudos cualesquiera de la red, corresponde a la suma de los caudales asociados al

² Demostrado por P. Elías, A. Feinstein, y C.E. Shannon in 1956. También de forma independiente por L.R. Ford, Jr. y D.R. Fulkerson en el mismo año.

mínimo conjunto de corte (aquel compuesto por el menor número de líneas) que separa dichos nudos.

El esquema siguiente ilustra el procedimiento que lleva a cabo GISRed para hallar todos los conjuntos de corte de la red. Esto es, el conjunto de corte asociado a cada una de las ramas del árbol definido en la red objeto de estudio.

Para una rama en concreto, se puede obtener su conjunto de corte, identificando con un 1 los nudos del subárbol aguas arriba y con un 2 los nudos del subárbol aguas abajo. Se revisan ahora todas las cuerdas, y aquellas cuyos nudos extremos tengan un identificador distinto serán las cuerdas del conjunto de corte asociado a la rama.

Sin embargo, es también posible ‘almacenar’ el conjunto de corte asociado a cada rama, mediante el siguiente procedimiento.

El algoritmo examina cada una de las cuerdas definidas en la red, recorriendo de manera alternante en sentido aguas arriba (hacia el nudo fuente), ambos lados de la malla independiente que genera cada una de esas cuerdas. Al encontrar una rama común, el algoritmo para e identifica todas las ramas que componen la malla, asociándolas a la cuerda examinada. Al final del proceso, se obtiene el conjunto de cuerdas asociadas a cada una de las ramas de la red, que corresponden a las vías alternativas de circulación de flujo aguas abajo de la rama en cuestión. Esta información se guarda en disco en un fichero binario para evitar tener que repetir el proceso de cálculo cada vez que se requiera un análisis topológico de la red. El acceso a este fichero binario es mucho más rápido que ejecutar de nuevo el algoritmo. El único inconveniente es que la información que guarda el fichero queda obsoleta en el mismo momento que varía la topología de la red analizada.

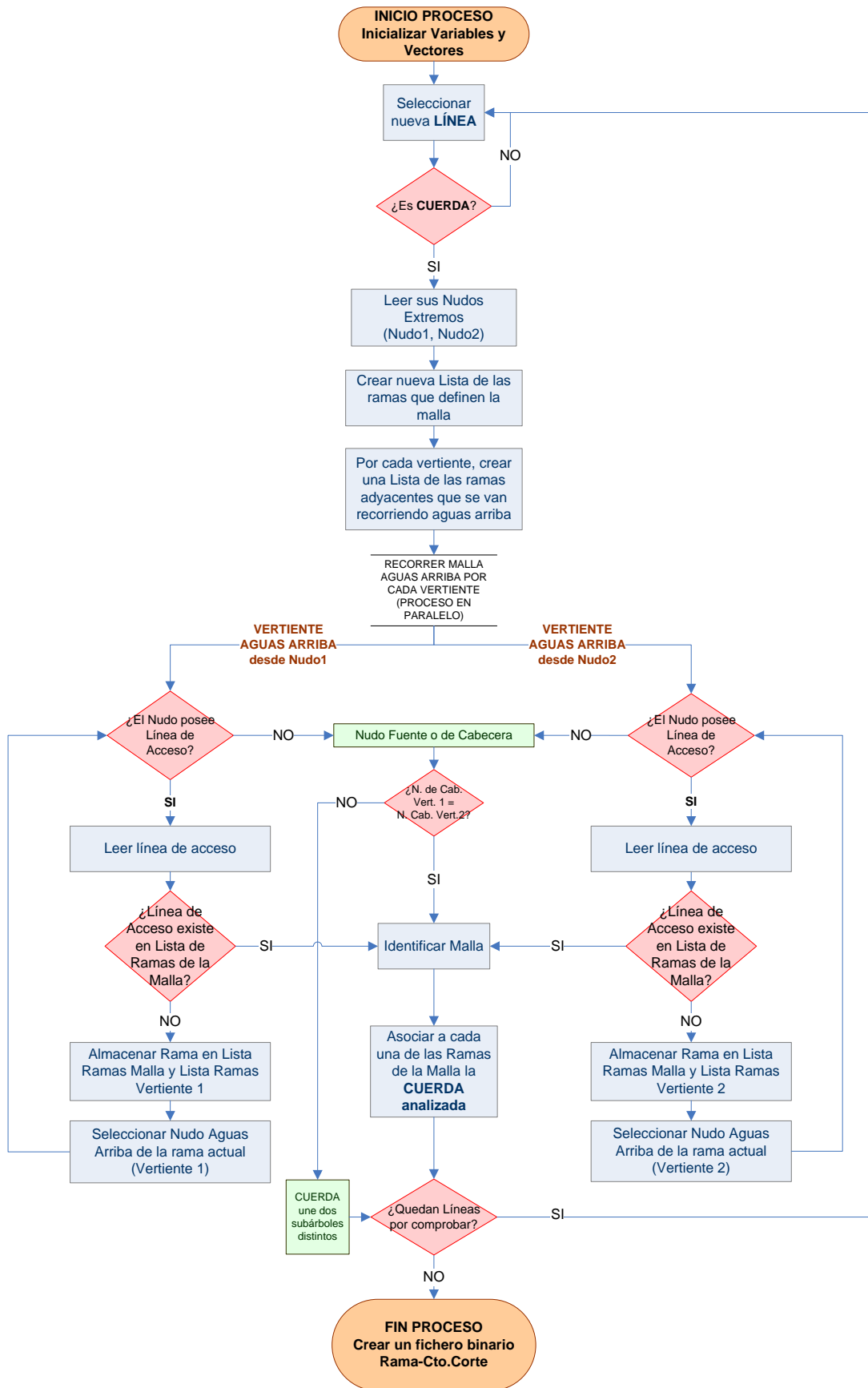


FIGURA 44. OBTENCIÓN DEL CONJUNTO DE CORTE ASOCIADO A CADA UNA DE LAS RAMAS DE UN ÁRBOL DE EXPANSIÓN EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN.

7.6.5 Generalización a redes con varias fuentes de suministro

Normalmente las redes de distribución de agua se alimentan desde varios puntos, llamados puntos de producción. Es posible extender los procedimientos anteriores para llevar a cabo un análisis topológico de la red desde cada uno de los puntos de producción. De este modo, se evalúa la influencia de cada fuente de suministro y su contribución global dentro del sistema de distribución. Esto resulta muy útil desde el punto de vista del análisis de calidad de una red de distribución de agua, ya que, generalizando los métodos de análisis topológico vistos hasta ahora, se consigue obtener el árbol de expansión de mínimo/máximo coste desde cada una de las fuentes. Utilizando los caudales instantáneos circulantes y su sentido de circulación como pesos de las líneas de la red, se obtiene un bosque de árboles de expansión mínimos/máximos dirigidos, cuyos nudos y líneas quedan asociados a una fuente de suministro. Como es lógico, este bosque de MST varía con el instante de tiempo para el cual se han obtenido los caudales, con lo que dependiendo del instante de simulación, la influencia de cada uno de los puntos de producción puede ser diferente. En ocasiones resulta interesante recurrir a valores medios de caudal dentro de un periodo de simulación, con lo que el conjunto de árboles obtenidos de esta forma es único para dicho periodo de cálculo. Además, si a cada uno de los árboles obtenidos se le aplica una ordenación topológica, es inmediato obtener las trazas o caminos desde cada uno de los nudos de la red hasta el nudo fuente del que depende. Todos los métodos y procedimientos presentados en este capítulo, se han generalizado e implementado en GISRed para tener en cuenta múltiples fuentes de suministro en una red y de este modo poder llevar a cabo análisis topológicos basados en un comportamiento de la red más fiel a la realidad. El procedimiento parte de uno de los nudos de producción de la red y va calculando el árbol de expansión de mínimo coste, en este caso se trata más bien del árbol de expansión de máximo caudal incluyendo el sentido del flujo. Cuando el árbol no se puede expandir más debido a las restricciones que marcan los pesos de las líneas (por ejemplo un caudal cuyo sentido de circulación es contrario al sentido de recorrido del árbol actual), entonces se pasa a otro nudo de cabecera y se repite el proceso de generación de su consiguiente árbol de expansión. El proceso sigue hasta que se hayan recorrido todos los nudos de cabecera y todas las líneas de la red.

El resultado por este método depende del orden de selección de los nudos de cabecera. La alternativa a este método sería establecer un sistema de espera hasta completar las flujos incidentes en cada nudo, establecer los porcentajes de procedencia de cada fuente, y asignar la línea a un árbol u otro, según los porcentajes de procedencia.

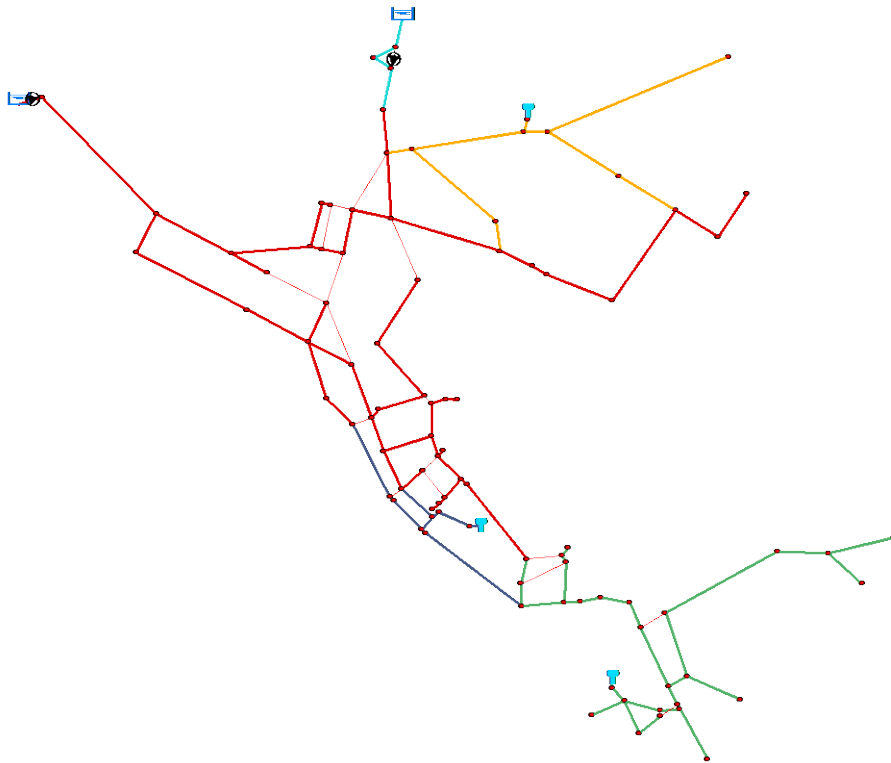


FIGURA 45. OBTENCIÓN DE LOS DIFERENTES ÁRBOLES DE EXPANSIÓN MÍNIMOS DESDE CADA UNA DE LAS FUENTES DE SUMINISTRO DE LA RED.

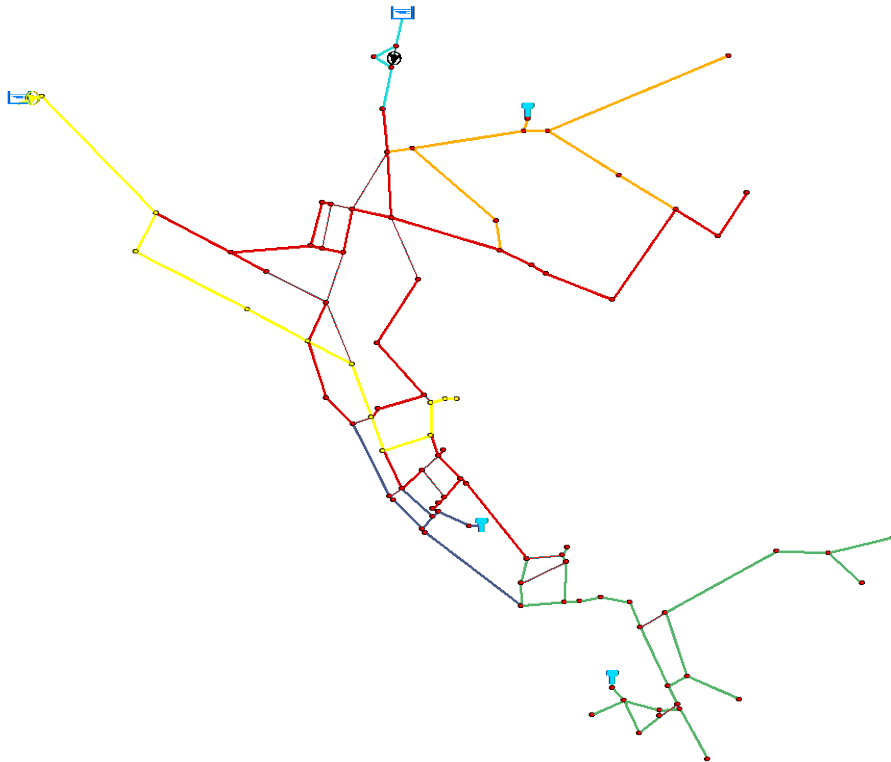


FIGURA 46. RECORRIDO (COLOR AMARILLO) DESDE UN NUDO DE LA RED HASTA EL NUDO DE CABECERA DEL QUE DEPENDE SEGÚN EL ANÁLISIS TOPOLÓGICO.

7.6.6 Orden topológico de doble índice. Identificación por consulta de trayectos, subárboles, subredes y conjuntos de corte

Tomando como base la técnica de ordenación topológica descrita en el capítulo de conceptos de la teoría de grafos, es posible asignar **un par de índices** a cada una de las líneas y nudos de la red de tal forma que partiendo de los nudos fuente o nudos de suministro, la red pueda ser recorrida en sentido aguas abajo siguiendo en orden creciente el primer índice numérico asignado a las líneas y a los nudos, mientras que el segundo índice se utiliza para indentificar las distintas estructuras topológicas. La asignación de ambos índices se lleva a cabo siguiendo un procedimiento de búsqueda DFS, teniendo en cuenta el posible bosque de árboles de expansión que pudieran dimanar del análisis previo de la red principal. Obviamente, y por definición, el orden topológico se establece partiendo de cada una de las fuentes de suministro detectadas en el grafo del modelo de red, esto es, depósitos, embalses y puntos de inyección de caudal. La declaración de un doble índice topológico constituye una de las aportaciones originales de la presente tesis.

Para establecer el par de índices topológicos asociados a cada rama del árbol se dispone de un contador, que avanza a medida que se van visitando las diferentes ramas del árbol. **El primer índice topológico hace referencia al orden o valor actual del contador al explorar la rama de acceso a cada nudo durante el recorrido del árbol, siguiendo un algoritmo de búsqueda en profundidad (DFS). El segundo índice hace referencia al valor actual del contador cuando todas las ramas que cuelgan de la rama actual han sido visitadas. Paralelamente a cada pareja de elementos Nudo-Línea Acceso, se les asigna el mismo par de índices topológicos.**

Una vez definidos los índices del orden topológico para las ramas y sus nudos, resulta inmediato consultar el trayecto de menor coste (dependiente del árbol de expansión de mínimo coste calculado), desde un nudo de cabecera hasta cualquier nudo seleccionado, a través de las ramas del MST.

Obsérvese también que para cada rama dichos índices señalan el intervalo en que se encontrará comprendido el primer índice de todas las ramas que cuelgan de él, siendo la diferencia de ambos índices el número de éstas.

El algoritmo implementado en GISRed para establecer el orden topológico de los elementos de una red se centra en los resultados del análisis de las ramas del árbol de expansión que se ha debido calcular previamente. Por tanto, se basa en las ramas del árbol y en las líneas de acceso a cada uno de los nudos de la red. El diagrama de flujo es el siguiente:

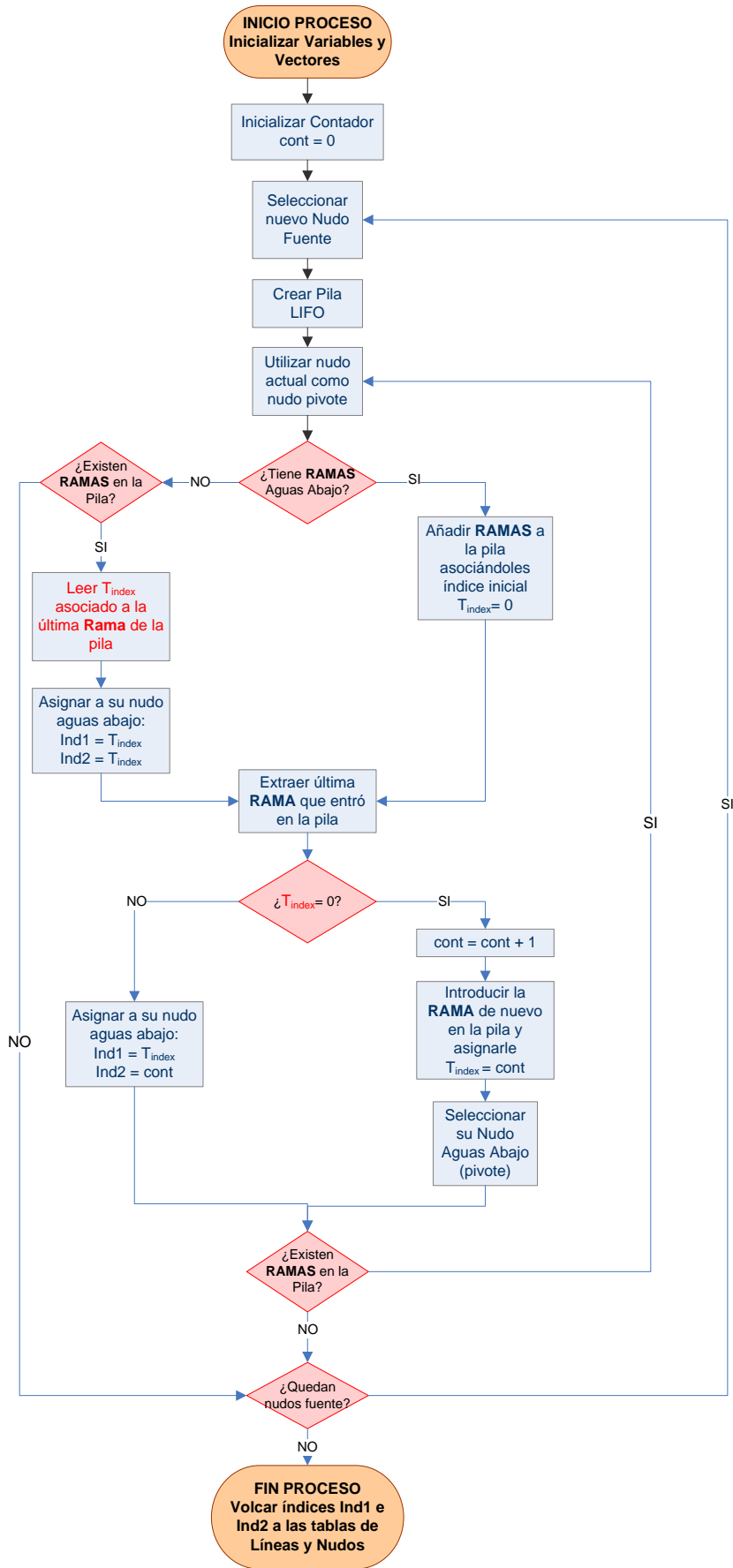


FIGURA 47. ORDENACIÓN TOPOLOGICA DE LAS RAMAS DEL ÁRBOL DE EXPANSIÓN.

Una vez declarada el par de índices asociado a cada nudo-línea de acceso, procede asignar los índices correspondientes a todas las **cuerdas**. Para ello se toma como **primer índice de la cuerda el menor de los primeros índices asociados a sus nudos extremos**, y como **segundo índice el primer índice del otro extremo de la cuerda**..

De esta forma es posible identificar de manera rápida el trayecto desde cualquier nudo de la red hasta el nudo de cabecera, las subredes aguas arriba y aguas abajo de cualquier rama, o el conjunto de corte asociado a cada rama, sin más que hacer una consulta sobre los índices topológicos asociados a todas las líneas y nudos de la red principal, como se indica a continuación.

► **CONSULTA 1: OBTENCIÓN DEL TRAYECTO DESDE UN NUDO CUALQUIERA DE LA RED HASTA SU NUDO DE CABECERA**

La forma natural de obtener un trayecto, partiendo de la topología de árbol, es recorrer éste aguas arriba de forma secuencial, desde el nudo final del trayecto, utilizando las ramas de acceso a cada nudo, hasta llegar al nudo de cabecera, identificado por no tener ninguna rama de acceso.

Alternativamente, la obtención del trayecto desde un nudo cualquiera de la red hasta el nudo fuente del que depende, se basa en una consulta sobre los campos de índices topológicos *OrdTopInd1* y *OrdTopInd2* vinculados a los nudos de la red y a sus líneas de acceso. La consulta sólo se aplica a las ramas del árbol definido previamente. Los nudos se seleccionarán mediante un enlace topológico posterior.

Supongamos que los índices *OrdTopInd1* y *OrdTopInd2* del nudo seleccionado son X_1 y X_2 respectivamente. La consulta que sería necesario lanzar sobre los índices topológicos es la siguiente (únicamente para líneas de tipo 'rama'):

$$([\text{TipoLinea}] = "T") \text{ AND } [\text{OrdTopInd1}] \leq X_1 \text{ AND } ([\text{OrdTopInd2}] \geq X_2)$$

► **CONSULTA 2: OBTENCIÓN DEL SUBÁRBOL AGUAS ABAJO QUE CUELGA DESDE UNA RAMA CUALQUIERA SELECCIONADA**

La forma natural de obtener el subárbol aguas abajo de una rama cualquiera, es recorriendo el árbol mediante una búsqueda en profundidad, a partir de la rama elegida. Si se quiere consultar el subárbol aguas abajo en repetidas ocasiones, este procedimiento puede resultar tedioso y lento. Mediante el orden topológico, es posible 'almacenar' de forma condensada el subárbol asociado a cada rama, y obtener éste con toda rapidez, cada vez que se necesite.

La obtención del **subárbol que cuelga de una rama** cualquiera de la red, se basa en una consulta sobre los campos *OrdTopInd1* y *OrdTopInd2* vinculados a las líneas. El resultado de la consulta será el conjunto de ramas que penden de la línea seleccionada (obviamente la línea ha de ser una rama). La consulta sólo se aplica a las ramas del árbol definido previamente.

Supongamos que los índices *OrdTopInd1* y *OrdTopInd2* de la rama seleccionada son X_1 y X_2 respectivamente.

La consulta que sería necesario lanzar sobre los índices topológicos es la siguiente (únicamente para líneas de tipo 'rama'):

$$([\text{TipoLinea}] = "T") \text{ AND } ([\text{OrdTopInd1}] \geq X_1) \text{ AND } ([\text{OrdTopInd2}] \leq X_2)$$

► **CONSULTA 3: OBTENCIÓN DE LA SUBRED AGUAS ABAJO QUE CUELGA DESDE UNA RAMA CUALQUIERA SELECCIONADA**

La obtención de la **subred que cuelga de una rama** cualquiera seleccionada, se basa en una consulta sobre los campos *OrdTopInd1* y *OrdTopInd2* de la tabla de líneas. El resultado de la consulta será el conjunto de ramas y cuerdas que penden de la línea seleccionada (obviamente la línea ha de ser una rama). La consulta es similar a la anterior pero en este caso se incluyen también las cuerdas del árbol definido previamente.

Supongamos que los índices *OrdTopInd1* y *OrdTopInd2* de la rama seleccionada son X_1 y X_2 respectivamente.

La consulta que sería necesario lanzar sobre los índices topológicos es la siguiente (únicamente para líneas de tipo 'rama'):

$$([\text{OrdTopInd1}] \geq X_1) \text{ AND } ([\text{OrdTopInd2}] \leq X_2)$$

► **CONSULTA 4: OBTENCIÓN DEL SUBÁRBOL/ SUBRED AGUAS ARRIBA DE UNA RAMA CUALQUIERA SELECCIONADA**

La obtención del **subárbol que precede a una rama** cualquiera del árbol se puede obtener simplemente por inversión de la consulta anterior, ya que todas las ramas que no forman parte del subárbol aguas abajo, pertenecen al subárbol aguas arriba.

Supongamos que los índices *OrdTopInd1* y *OrdTopInd2* de la rama seleccionada son X_1 y X_2 respectivamente. La consulta que sería necesario lanzar sobre los índices topológicos es la siguiente (únicamente para líneas de tipo 'rama'):

$$([\text{TipoLinea}] = "T") \text{ AND } ([\text{OrdTopInd1}] < X_1 \text{ OR } [\text{OrdTopInd2}] > X_2)$$

Si lo que queremos obtener son todos los elementos que pertenecen a la **subred aguas arriba**, bastará con eliminar de la consulta anterior la condición de rama. Ahora bien, entre los elementos seleccionados se encontrarán tanto las cuerdas propias de la subred aguas arriba, como también las cuerdas que unen el árbol aguas arriba con el árbol aguas abajo.

$$([\text{OrdTopInd1}] < X_1) \text{ OR } ([\text{OrdTopInd2}] > X_2)$$

► **CONSULTA 5: OBTENCIÓN DEL SUBÁRBOL/ SUBRED AGUAS ARRIBA DE UNA RAMA CUALQUIERA SELECCIONADA**

En la última consulta se incluían tanto las cuerdas de la subred aguas arriba como las que unen lo subárboles aguas arriba y aguas abajo, las cuales constituyen precisamente el conjunto de corte. Si lo que queremos es determinar únicamente el conjunto de corte, la condición a

establecer es que uno de los índices de la línea pertenezca a la subred aguas arriba y el otro a la subred aguas abajo, lo que se concreta en la siguiente consulta:

$$\begin{aligned}
 & ([\text{OrdTopInd1}] < X_1) \text{ AND } (X_1 \leq [\text{OrdTopInd2}] \leq X_2) \\
 \text{OR } & (X_1 \leq [\text{OrdTopInd1}] \leq X_2) \text{ AND } ([\text{OrdTopInd2}] > X_2)
 \end{aligned}$$

La condición de cuerda no es necesario especificarla, pues ninguna rama puede cumplir la condición anterior.

Como alternativa a la consulta anterior se puede identificar primero la subred aguas arriba de la rama mediante la consulta 4, y del resultado extraer las cuerdas que configuran el conjunto de corte, mediante la siguiente consulta adicional:

$$(X_1 \leq [\text{OrdTopInd1}] \leq X_2) \text{ OR } (X_1 \leq [\text{OrdTopInd2}] \leq X_2)$$

► OTRAS CONSULTAS

Una vez establecidos este par de índices, el método de selección de nudos y líneas ideado, permite además de identificar el subárbol o subred aguas arriba/abajo de cualquier línea o nudo:

- **determinar la traza o camino** desde cualquier nudo hasta el nudo fuente situado aguas arriba al que está directamente vinculado.
- **Acumular y agregar costes vinculados a líneas o nudos** (demandas, acometidas, tiempo de permanencia, etc.) aguas arriba hacia los nudos fuente.

Si analizamos el tipo de consulta realizada sobre la tabla de atributos de los temas de líneas y nudos, se advierte que el proceso de identificación de las **ramas que cuelgan de una rama determinada**, se basa en identificar dicha rama en la tabla de líneas, leer los índices inicial y final asociados, y seleccionar aquellos registros de las tablas de líneas y nudos que, siendo ramas, su índice inicial se encuentra comprendido entre el índice Inicial (+1 si se quiere excluir la propia rama) y el índice Final.

El tiempo empleado en la identificación del subárbol resulta así independiente del tamaño de éste, ya que se reduce en cualquier caso a efectuar una consulta y una selección sobre las tablas de líneas y nudos. No obstante, hay que tener en cuenta que el tiempo de selección crecerá linealmente con el tamaño de la red, pues los tiempos de búsqueda son proporcionales al tamaño de la tabla que contiene la información espacial.

7.6.7 Mantenimiento actualizado del MST. Cambios en tiempo real

Como se ha apuntado en apartados anteriores, el árbol de expansión mínimo/máximo de una red varía con el tiempo siempre que varíen los pesos asociados a las líneas. Esta variación puede ser ocasionada por la alteración de un parámetro físico de la red (un diámetro, una longitud, etc.) o bien una variable de cálculo como puede ser el caudal o la velocidad de circulación. Cualquier cambio en el peso asociado a una línea puede dar origen a un árbol de expansión distinto, con lo que habrá que recalcular el árbol o el conjunto de árboles de nuevo. Aunque no se ha desarrollado de forma expresa, en este apartado se pretende dejar de manifiesto que no es necesario rehacer desde cero el árbol, sino que es posible aprovechar gran parte de la información disponible y recalcular el árbol de expansión en aquellas zonas de la red afectadas por un cambio topológico o relacionado con alguna propiedad de algún elemento de la red que a su vez altere el peso asociado a alguna de sus líneas. De esta forma resulta viable recalcular en tiempo real el MST asociado a una red, de manera que el tiempo invertido en plasmar los cambios en el nuevo árbol resulte mínimo.

Como se indicaba anteriormente, los cambios en los pesos asociados a las líneas de una red pueden ser debidos a cambios en la topología o bien a cambios en las propiedades asociadas a las mismas. De cualquier forma, los únicos casos que pueden darse y la manera de actuar localmente para recalcular el árbol, serían los siguientes:

1. **Cierre de una Línea:** Si la línea es una CUERDA, el árbol de expansión no se ve afectado. Si por el contrario la línea es una RAMA, entonces dependerá de si esa rama dispone o no de conjunto de corte. Si tiene conjunto de corte asociado, únicamente será necesario sustituir la rama por la cuerda de menor coste de la malla independiente a la que pertenezca. Si no posee conjunto de corte, significa que el cierre de dicha línea originará una nueva subred, con lo cual será necesario comprobar si dicha subred queda o no aislada.
2. **Apertura de una Línea.** En este caso la casuística es mayor:
 - a. Si los nudos extremos de la línea (N1 y N2) no pertenecen a ninguna subred, entonces será necesario crear la nueva subred pertinente.
 - b. Si los dos nudos extremos pertenecen a la misma subred, entonces significa que la línea cerraba una malla independiente y por tanto será necesario averiguar si la línea que se abre pasa a ser una cuerda o una rama dentro de la malla a la que pertenece.
 - c. Si cada nudo pertenece a una subred distinta, será necesario fundir las dos subredes. En caso de que ambas subredes tengan puntos de producción asociados (red con múltiples fuentes de suministro), la línea se añadirá a una de las dos subredes dependiendo del nuevo peso y sentido asociado a la línea con respecto a los de las líneas adyacentes.
 - d. Si uno de los nudos pertenece a una subred y el otro a ninguna, la nueva línea da origen a una nueva rama dentro de la subred.
 - e. También habrá que tener en cuenta el caso especial de que al abrir la línea, ésta genere una nueva subred.
3. **Variación del Peso asociado a una Línea.** En este caso, si la línea es cuerda y su coste asociado es mayor que su coste anterior, la topología de árbol no cambia. Si por el contrario su coste disminuye, será necesario identificar la malla independiente a la que pertenece y comparar con la rama de mayor coste para ver si pasa a ser rama o sigue siendo cuerda.

Si la línea cuyo peso varía es una rama y su nuevo coste asociado es menor que su coste anterior, la línea sigue siendo rama y la topología de árbol no varía. Si por el contrario su coste aumenta, es necesario comparar su nuevo coste con el coste de cada una de las cuerdas pertenecientes a su conjunto de corte. Si el nuevo coste es mayor al de la cuerda de menor coste dentro del conjunto de corte, la rama se sustituye por dicha cuerda.

Tras todas las comprobaciones anteriores, será necesario revisar también:

- el número total de subredes en la red principal así como qué nudos y líneas están asociados a las nuevas subredes
- el grado de conectividad de árbol de la red
- la línea de acceso asociada a cada uno de los nudos de la red.

7.7 PROCEDIMIENTOS PARA ACUMULAR UNA PROPIEDAD ASIGNADA A LOS NUDOS O TUBERÍAS DE LA RED SITUADOS AGUAS ABAJO DE UNA RAMA

Una de las aplicaciones más útiles que puede derivarse de la definición del árbol de expansión (no necesariamente el de coste mínimo o máximo) asociado a una red, es la **posibilidad de evaluar determinadas características de una rama en función de los elementos que quedan aguas abajo de la misma**. Estas características pueden ser el resultado de determinadas propiedades o consultas realizadas bien sobre los nudos o bien sobre las líneas que cuelgan de la rama en cuestión. En cualquier caso, habrá que aplicar un procedimiento distinto en el caso de evaluar propiedades asociadas a nudos o líneas situadas aguas abajo de una rama del sistema.

Las propiedades a analizar pueden ser diversas, por ejemplo la demanda de agua a satisfacer aguas abajo, la cota media de los nudos situados aguas abajo, el número de acometidas situadas aguas abajo, el número de habitantes cuyo suministro depende de dicha rama y su conjunto de corte, etc. Mientras que los dos primeros casos son ejemplos de propiedades asociadas a los nudos, los dos últimos serían ejemplos de propiedades asociadas a las líneas.

Cuando se trata de acumular las propiedades asociadas a los nudos, podemos basarnos exclusivamente en las ramas del árbol de expansión, puesto que mediante éstas se accede a todos los nudos de la red. Sin embargo, si las propiedades se asocian a las líneas, habrá que tener también en cuenta las cuerdas, haciendo que el procedimiento sea algo más complejo. Por ello, en primer lugar se van a revisar los algoritmos utilizados para acumular las propiedades asociadas a los nudos, extendiéndolos después al objeto de incluir las propiedades asociadas a las líneas.

En el apartado dedicado al establecimiento del orden topológico de líneas y nudos de una red, se ha visto una forma eficiente de identificar el subárbol que cuelga de una rama cualquiera de un árbol de expansión. Asumiendo la existencia de un único nudo fuente o de cabecera, el valor acumulado de cualquier propiedad asociada a los nudos del subárbol, deberá ser soportado por la rama de acceso al nudo en cuestión (y su conjunto de corte). Para computar el valor acumulado de, por ejemplo, la demanda asignada en los nudos del subárbol, se puede modificar la consulta llevada a cabo sobre los índices topológicos asociados a nudos y líneas generados tras realizar una ordenación topológica, para, en vez de hallar el recorrido desde la rama en cuestión hasta el nudo de cabecera, sea posible seleccionar los nudos aguas abajo de

todas las líneas que configuran el correspondiente subárbol, y realizar a continuación la suma de todas las demandas asociadas a nudos. Sin embargo, si lo que se pretende es determinar el valor acumulado de la propiedad para todas las ramas del árbol, este procedimiento resulta muy ineficiente, pues aun admitiendo que en la determinación por consulta del subárbol y el cómputo del valor acumulado se emplearan escasos segundos, el tiempo requerido para evaluar los valores acumulados en todas las ramas de una red de cierta envergadura, sería demasiado elevado. Otra forma igual de ineficiente de llevar a cabo el procedimiento sería definir todos los trayectos aguas arriba desde cada nudo hasta el nudo de cabecera, acumulando la propiedad del nudo sobre todas las ramas que configuran el trayecto, el valor finalmente acumulado en cada rama sería el correspondiente a todos los nudos situados aguas abajo. Este procedimiento es igualmente no lineal, puesto que cada rama será recorrida tantas veces como nudos tenga aguas abajo, haciendo crecer los tiempos de cálculo potencialmente con el tamaño de la red. Es por ello por lo que se han definido nuevos algoritmos para la acumulación de propiedades asociadas tanto a nudos como a líneas, de manera lineal y eficiente.

7.7.1 Acumulación de propiedades asociadas a nudos situados aguas abajo de una rama

En vista de la poca eficiencia de los procedimientos anteriores, se propone un nuevo algoritmo lineal para acumular las propiedades asociadas a los nudos situados aguas abajo de cada una de las ramas de un árbol. El algoritmo programado efectúa el recorrido del árbol en el sentido aguas arriba, desde aquellos nudos/líneas extremos hacia el nudo de cabecera. El procedimiento es extensible al caso de redes con varios puntos de alimentación, esto es, varios nudos de cabecera.

El algoritmo requiere la existencia de:

- El árbol de expansión (no necesariamente mínimo o máximo).
- La topología del árbol de expansión, ya que es imprescindible conocer la línea de acceso a cada uno de los nudos.
- Listas de adyacencia formadas únicamente por las ramas que conforman el árbol de expansión.
- El orden topológico de nudos y ramas, es decir, los índices *OrdTopInd1* y *OrdTopInd2* de la base de datos.
- Una lista indexada por el identificador de línea, que almacenará el valor acumulado de la propiedad, (ej. demandas en nudos) en cada una de las ramas situadas aguas abajo.

El procedimiento consiste en recorrer los nudos de la red, previamente ordenados en sentido decreciente por el índice *OrdTopInd1* (que indica su orden topológico). Recorriendo de esta forma los nudos, la agregación de la propiedad en cuestión, se efectúa desde los nudos extremos de la red (los más alejados de los puntos de suministro), hasta los nudos de cabecera. Conforme se van recorriendo los nudos, se van comprobando sus ramas adyacentes y se va acumulando la propiedad global vinculada al conjunto de esas ramas a la rama de acceso ligada al nudo. El diagrama ilustra el proceso comentado particularizado para el caso de acumulación de demandas:

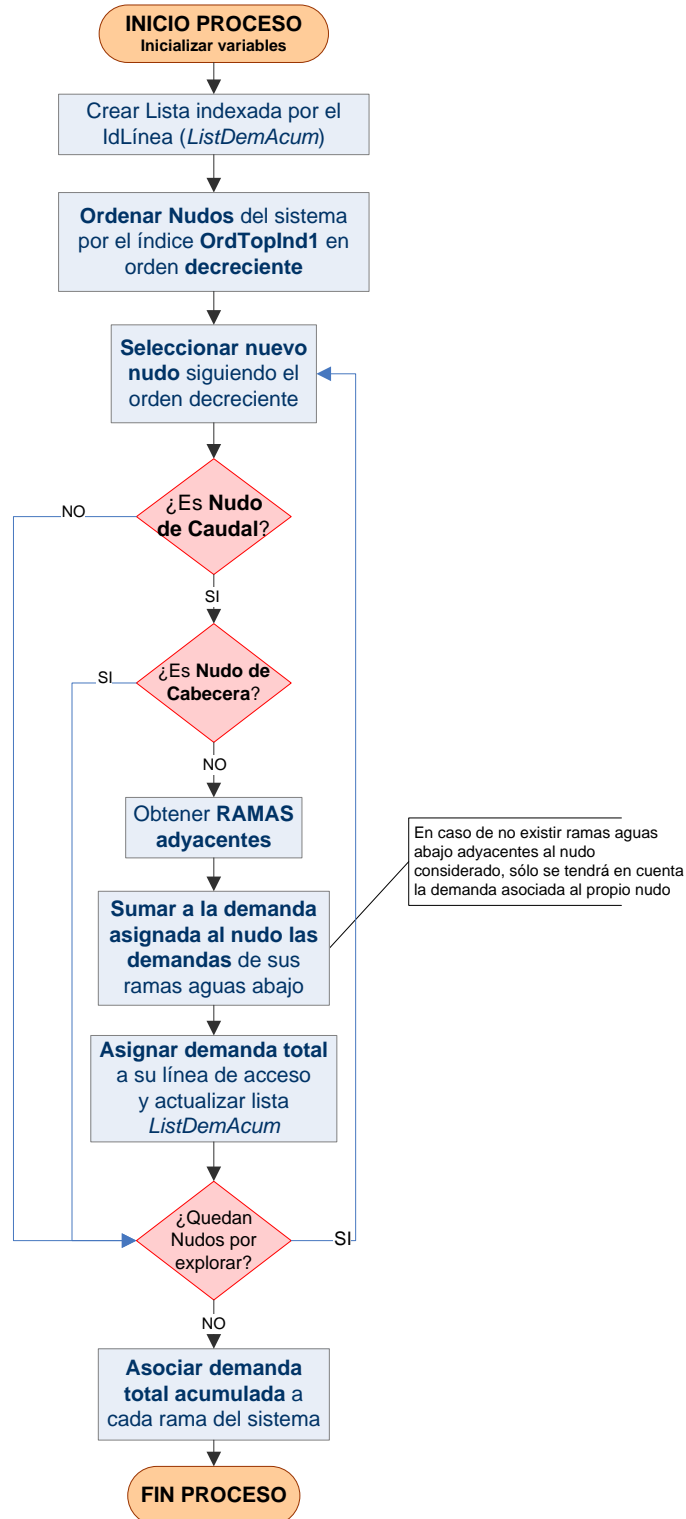


FIGURA 48. ACUMULACIÓN DE DEMANDAS SOBRE LOS NUDOS DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN.

Así pues, se evalúa el valor acumulado de la demanda para todas las ramas del árbol recorriendo los nudos de la red una sola vez, por lo que el proceso se considera lineal.

7.7.2 Acumulación de propiedades asociadas a tuberías situadas aguas abajo de una rama

Si la propiedad a considerar está asociada a una línea, no bastará con tener en cuenta los valores asociados a las ramas, habrá que considerar también los valores asociados a las cuerdas.

El procedimiento general a seguir en este caso, es muy similar al descrito en el apartado anterior, con la salvedad de trasladar las propiedades de las líneas a los nudos extremos de éstas, y proceder como antes.

Del mismo modo que en el algoritmo anterior, el recorrido del árbol se efectúa en el sentido aguas arriba, desde aquellos nudos extremos, hacia el nudo de cabecera. El procedimiento también es extensible al caso de redes con varios puntos de alimentación, esto es, varios nudos de cabecera.

El algoritmo requiere la existencia de:

- El árbol de expansión (no necesariamente mínimo o máximo).
- La topología del árbol de expansión, ya que es imprescindible conocer la línea de acceso a cada uno de los nudos.
- Listas de adyacencia formadas únicamente por las ramas que conforman el árbol de expansión.
- El orden topológico de nudos y ramas, es decir, los índices *OrdTopInd1* y *OrdTopInd2* de la base de datos.
- Una lista indexada por el identificador de línea, que almacenará el valor acumulado de la propiedad, en este caso las acometidas, de cada una de las ramas situadas aguas abajo.

Para el caso de las ramas, las propiedades deberán trasladarse a los nudos aguas abajo, mientras que para el caso de las cuerdas se plantean tres alternativas:

1. trasladar su valor al nudo aguas abajo,
2. trasladar su valor al nudo aguas arriba,
3. repartirla entre ambos nudos.

En el procedimiento implementado en GISRed se ha optado por esta última alternativa.

En el caso de optar por cualquiera de las otras dos alternativas, hay que tener en cuenta que para identificar qué nudo de la cuerda corresponde al subárbol aguas arriba y cuál al subárbol aguas abajo se debe recurrir a los índices determinados en una ordenación topológica previa. Una vez realizada dicha ordenación, basta con averiguar los índices asociados a cada nudo, de modo que el menor corresponderá al nudo situado en el subárbol aguas arriba y el mayor al nudo situado en el subárbol aguas abajo. En cualquier caso, una vez trasladado el valor a los nudos del sistema, se sigue el mismo procedimiento. El esquema siguiente ilustra el procedimiento descrito:

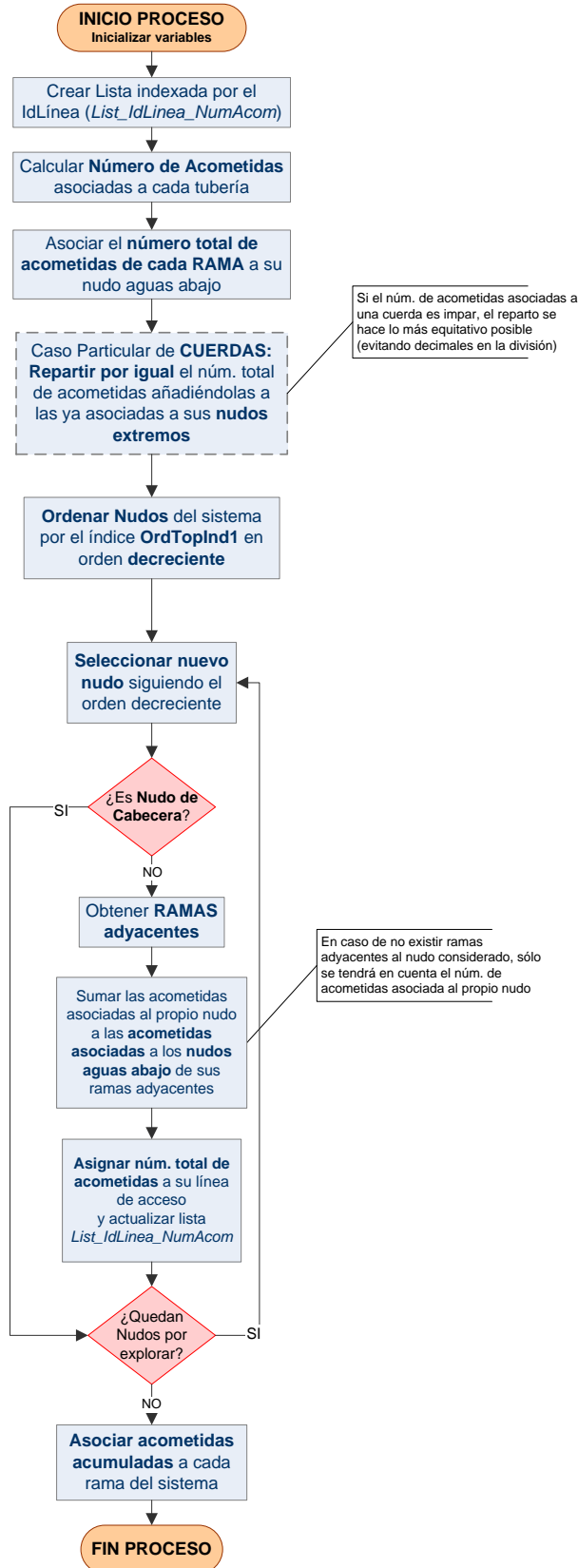


FIGURA 49. ACUMULACIÓN DE ACOMETIDAS EN LAS RAMAS DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN.

En este caso, el procedimiento realiza la acumulación de acometidas para todas las ramas del árbol recorriendo todos los nudos de la red una sola vez, por lo que el proceso se considera lineal.

7.8 ESTRUCTURA DE DATOS PARA ALBERGAR LAS PROPIEDADES TOPOLÓGICAS DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN

Como ya se indicó en apartados anteriores, la topología define la configuración y la relación existente entre el conjunto de líneas y nudos que conforman el grafo de una red. La utilización con fines analíticos de técnicas de búsqueda y generación de árboles propias de la teoría de grafos, plantea la necesidad de integrar propiedades topológicas adicionales en el modelo de datos convencional de la aplicación GISRed, basado hasta ahora meramente en la relación de cada línea con sus dos nudos extremos. La ampliación del modelo de datos se materializa en la inclusión en la base de datos de la aplicación de un conjunto de tablas adicionales orientadas a albergar la información topológica de la red. Los campos de dichas tablas permitirán obtener por simples consultas todas las estructuras topológicas descritas en los apartados anteriores.

Las nuevas tablas agregadas a la base de datos de GISRed y sus relaciones con las tablas geográficas de Líneas y Nudos, se muestran en la siguiente figura.

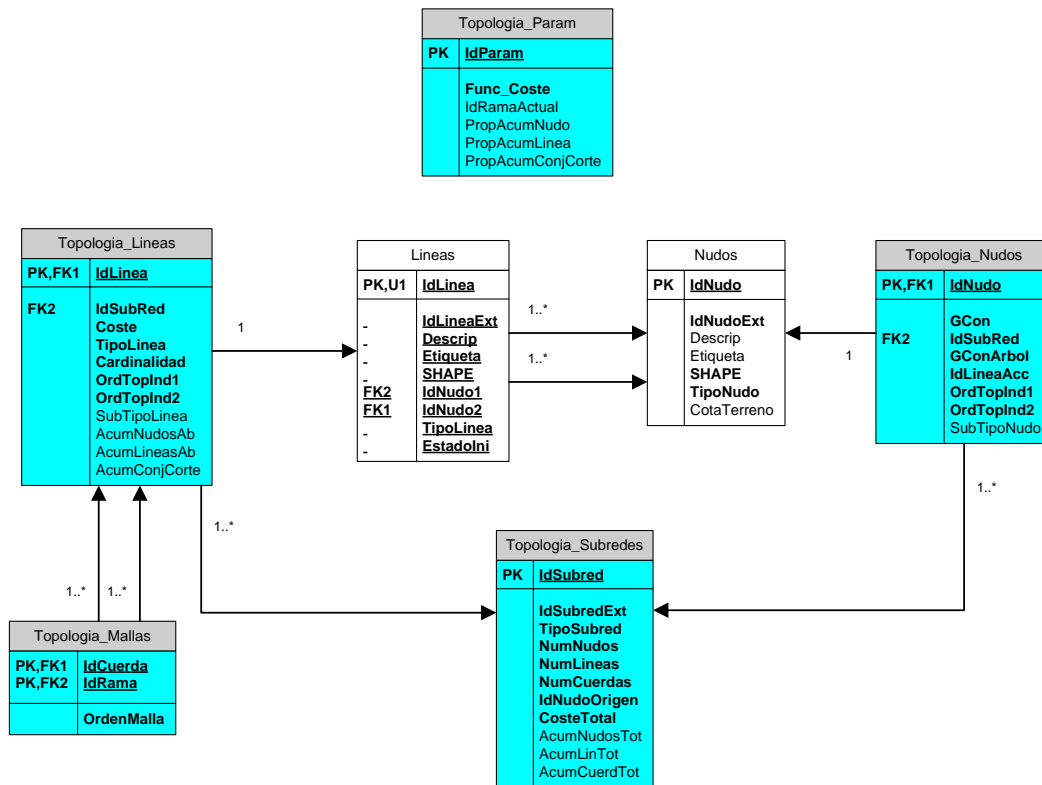


FIGURA 50. ESTRUCTURA DE TABLAS PARA ALBERGAR LA INFORMACIÓN TOPOLÓGICA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN.

A continuación se describe el significado de cada uno de los campos y la relación entre las diferentes tablas.

TABLA DE PARÁMETROS DE TOPOLOGÍA

Esta tabla aloja el conjunto de parámetros topológicos que se han empleado en el análisis de la red.

Los campos que contiene son:

IdParam: Identificador interno del conjunto de parámetros actual (registro único).

Func_Coste: Función de coste elegida para construir el árbol de expansión (codificar).
IdRamaActual: Identificador interno de la rama actual que subdivide el árbol en dos subárboles (aguas arriba y aguas abajo).
PropAcumNudo: Propiedad de nudo acumulada sobre las ramas del árbol para el subárbol aguas abajo (campo codificado).
PropAcumLinea: Propiedad de línea acumulada sobre las ramas del árbol para el subárbol aguas abajo (campo codificado).
PropAcumConjCorte: Propiedad de líneas acumulada sobre las ramas del árbol para el conjunto de corte (campo codificado).

TABLA DE TOPOLOGÍA DE NUDOS

Esta tabla contiene las características topológicas de todos los nudos de la red que se calculan tras lanzar un análisis topológico sobre la red de distribución..

Los campos que contiene son:

IdNudo: Identificador interno del Nudo.
GCon: Grado de conectividad física del nudo.
IdSubRed: Identificador interno de la subred a la que pertenece el nudo.
GConArbol: Grado de conectividad del nudo, considerando solo las ramas del árbol.
IdLineaAcc: Identificador interno de la línea de acceso al nudo desde el nudo origen, siguiendo la topología de árbol. Un nudo sólo puede tener una única línea de acceso, ya que de tener más de una, significaría que el nudo pertenece a dos o más árboles diferentes.
OrdTopInd1: Índice 1 de la ordenación topológica en profundidad.
OrdTopInd2: Índice 2 de la ordenación topológica en profundidad..
SubTipoNudo: Código que indica si el nudo pertenece al árbol aguas arriba o aguas abajo de una rama dada. Campo temporal.

TABLA DE TOPOLOGÍA DE LÍNEAS

Esta tabla contiene las características topológicas de todas las líneas de la red que se calculan tras lanzar un análisis topológico sobre la red de distribución.

Los campos que contiene son:

IdLinea: Identificador interno de Línea.
IdSubRed: Identificador interno de la Subred a la que pertenece la Línea.
Coste: Peso asociado a la línea y empleado para obtener el árbol de mínima resistencia (MST).
TipoLinea: Indica el tipo de línea como parte del MST. Puede ser rama (**T**), cuerda (**C**) o cerrada (**S**).
Cardinalidad: Si se trata de una rama, se refiere al número de cuerdas con que puede cerrar malla (conjunto de corte). Si se trata de una cuerda, se refiere al número de ramas con las que cierra una malla.
OrdTopInd1: Índice 1 de la ordenación topológica en profundidad.
OrdTopInd2: Índice 2 de la ordenación topológica en profundidad.
SubTipoLinea: Código que indica si la línea pertenece al subárbol aguas arriba o aguas abajo de una rama dada, o bien a su conjunto de corte. Campo temporal.

AcumNudosAb: Valor acumulado de una propiedad de Nudo, para todos los nudos aguas abajo de cada rama.

AcumLineasAb: Valor acumulado de una propiedad de Línea, para todas las líneas aguas abajo de cada rama.

AcumConjCorte: Valor acumulado de una propiedad de Línea, para el conjunto de corte de cada Rama.

TABLA DE TOPOLOGÍA DE MALLAS

Esta tabla contiene las características topológicas de todas las mallas primarias de la red. La tabla se rellena tras lanzar un análisis topológico sobre la red de distribución. Según la relación existente entre esta tabla y la de Topología de Líneas, una línea puede pertenecer a una o muchas mallas bien como rama, bien como cuerda.

Los campos que contiene son:

IdCuerda: Identificador interno de la cuerda que define una malla primaria.

IdRama: Identificador interno de cada rama que configura la malla primaria asociada a la Cuerda.

OrdenMalla: Orden de la Rama al configurar la malla, comenzando por uno de los extremos de la Cuerda.

TABLA DE TOPOLOGÍA DE SUBREDES

Esta tabla contiene las características topológicas de todas las subredes encontradas en la red. La tabla se rellena tras lanzar un análisis topológico sobre la red de distribución. Según la relación existente entre esta tabla y las tablas de Topología de Líneas y de Nudos, una subred puede estar formada por al menos un nudo. Lo normal es que esté formada por muchas líneas y muchos nudos.

Los campos que contiene son:

IdSubred: Identificador interno de la subred.

IdSubredExt: Identificador externo de usuario de la subred.

TipoSubred: Clasificación de la subred según las demandas y fuentes de suministro disponibles (campo codificado).

NumNudos: Número de nudos que contiene la Subred.

NumLineas: Número de líneas que contiene la Subred.

NumCuerdas: Número de cuerdas (o mallas primarias) que contiene la subred.

IdNudoOrigen: Identificador interno del nudo origen del MST construido sobre la Subred

CosteTotal: Coste total de la subred (de acuerdo con la función de coste elegida).

AcumNudosTot: Valor acumulado para toda la subred de la propiedad de nudos elegida.

AcumLinTot: Valor acumulado para toda la subred de la propiedad de líneas elegida.

AcumCuerdTot: Valor acumulado para toda la subred de la propiedad de líneas elegida para el conjunto de corte.

CAPÍTULO 8

APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS AL ANÁLISIS DE FLUJOS
Y LA SECTORIZACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

CAPÍTULO 8. APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS AL ANÁLISIS DE FLUJOS Y LA SECTORIZACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

8.1 EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE LA RED. DETECCIÓN DE CUELLOS DE BOTELLA Y ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE SUMINISTRO

Otra aplicación de la teoría de grafos en el ámbito de las redes de distribución de agua permite utilizar el análisis topológico de la red para analizar su capacidad de transporte.

El objetivo es detectar a priori, de forma totalmente teórica, aquellas tuberías donde se producirán las mayores pérdidas de carga teniendo en cuenta la topología de árbol y la distribución de la demanda en los nudos de la red. Se trata pues de un método teórico de estimación de la capacidad de transporte de cada una de las tuberías de la red, simplemente conociendo el diámetro de la conducción y el caudal estimado que debe atravesar la tubería para dar suministro a la red aguas abajo. Es por tanto una primera aproximación a la detección de cuellos de botella en el entramado de tuberías sin necesidad de conocer mediante una simulación del modelo el caudal exacto que atraviesa cada tubería en cada instante.

En este sentido, se ha desarrollado un algoritmo que permite detectar rápidamente aquellas tuberías cuya capacidad de transporte sea inferior al caudal que debe ser suministrado a la red situada aguas abajo.

El algoritmo detecta las tuberías más críticas de la red a partir de la información topológica obtenida tras un análisis previo. La información topológica requerida para lanzar el algoritmo de '*Evaluación de la capacidad de transporte de la red*', es:

1. El **árbol de expansión de mínimo coste** basado en la resistencia hidráulica de cada una de las tuberías, es decir, el árbol de mínima resistencia hidráulica.
2. La **topología del árbol de mínima resistencia hidráulica**
3. **Listado de todos los conjuntos de corte del sistema** calculados para cada una de las ramas del árbol de mínima resistencia hidráulica.
4. Además, el método requiere de una **acumulación o agregación previa de las demandas base asociadas a cada uno de los nudos del modelo de la red**, sobre cada una de las tuberías clasificadas como **ramas del árbol**. Por tanto, es necesario partir de un modelo de red y éste debe estar cargado con las demandas base de los nudos.

El procedimiento es sencillo una vez se ha obtenido toda la información anterior. Consiste en analizar cada una de las ramas del árbol de mínima resistencia junto a su conjunto de corte (si es que existe) y estimar la capacidad teórica máxima de transporte de dicha rama, comparándola con la demanda real que debe ser suministrada aguas abajo de la misma.

Como se puede intuir, el método no deja de ser una aproximación, ya que está fundamentado en parámetros y estimaciones teóricas, como el diámetro teórico de las tuberías o bien la distribución de la demanda en los nudos, pero resulta una herramienta muy efectiva a la hora de detectar posibles puntos conflictivos dentro de una red de distribución de la que se posee

muy poca información. La detección de dichas tuberías críticas, es lo que se conoce como '**detección de cuellos de botella**' en la red. Estos cuellos de botella serán tanto más verosímiles cuanto más aproximada sea la sección de la tubería a su sección efectiva y cuanto mejor sea el reparto y distribución de la demanda en la red, es decir, el método es muy dependiente del reparto y asignación de cargas que se lleve a cabo en el modelo.

La capacidad teórica máxima de transporte del conjunto de corte ($Q_{TCutSet}$) asociado a cada una de las ramas del árbol es estimada utilizando una velocidad de diseño del flujo (v_i) que es función de: el diámetro (ϕ) de cada tubería, y la sección total (S_i) de cada una de las tuberías que conforman el conjunto de corte. La capacidad de transporte se calcula de la siguiente manera:

$$Q_{TCUTSET} = \sum_{i \in CutSet} (v_i \cdot S_i)$$

Donde la velocidad de diseño se estima a partir de la siguiente expresión empírica (Martínez, F.; 2005)¹:

$$v_i(\phi) = 1,18 \cdot \phi_i^{1/3}$$

Esta expresión podría ajustarse también para considerar el material de la tubería, pero se ha descartado esta posibilidad ya que no siempre se dispone de dicha información para todas las tuberías de la red.

El procedimiento se ilustra en el siguiente diagrama de flujo:

¹ Martínez, F.; Fernández, J. Pérdidas de carga en tuberías. Coeficientes de Rugosidad. Jornada sobre tuberías de Hormigón armado y postensado. CEDEX, Madrid, 15 Marzo 2005.

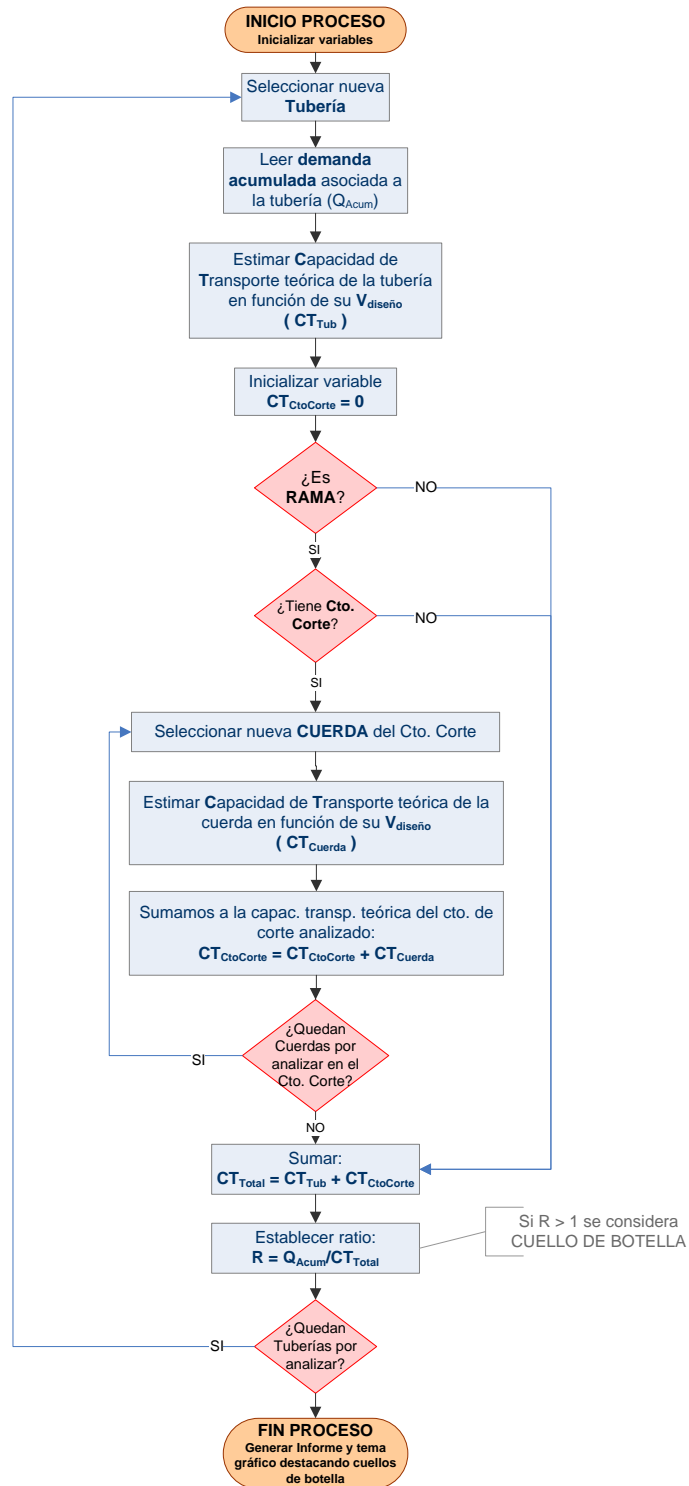


FIGURA 51. PROCEDIMIENTO DE DETECCIÓN DE LOS CUELLOS DE BOTELLA DE LA RED.

Como puede observarse, el procedimiento comienza calculando, para cada una de las tuberías del sistema, su capacidad de transporte teórica máxima en función de su velocidad de diseño.

Si la tubería resulta ser una rama del árbol de mínima resistencia, el algoritmo comprueba si tiene conjunto de corte asociado. En caso de existir conjunto de corte, se calcula la capacidad de transporte total de dicho conjunto de corte, esto es, la suma de las capacidades de transporte

teóricas de cada una de las cuerdas que lo integran, y se suma a la capacidad de transporte propia de la rama. Finalmente se establece el ratio (R) utilizado como indicador cuantitativo de la relación entre la demanda efectiva que debe ser suministrada aguas abajo de la rama y la capacidad teórica de transporte total de esa rama para poder satisfacer la demanda requerida.

Por tanto, **satisfacer la demanda aguas abajo será tanto más difícil cuanto mayor a 1 sea el ratio (R) asociado a la rama**. Un ratio mayor que 1 indica que el caudal requerido aguas abajo es mayor que el que teóricamente puede suministrar el conjunto de tuberías (rama + conjunto de corte), sin que aumente de manera excesiva la velocidad del flujo en las mismas (provocando por tanto elevadas pérdidas de carga).

La mayor utilidad de esta herramienta es la de poder predecir qué tuberías son las más críticas de nuestra red a partir de información básica exclusivamente de índole topológica y de un parámetro físico fundamental como es el diámetro nominal de cada una de las tuberías que conforman la red de distribución. **Todas aquellas tuberías cuyo ratio final sea mayor que uno, serán candidatas junto a su conjunto de corte a ser revisadas y reemplazadas por otras de mayor diámetro.**

El algoritmo anterior ha sido implementado en la aplicación GISRed y como resultado, proporciona un nuevo tema *shape* de líneas clasificado en orden decreciente por el ratio R, que indica si existe o no un cuello de botella en la correspondiente línea. Las tuberías que 'teóricamente' van a soportar mayores pérdidas de carga son las que aparecen con valores de R mayores a uno, y quedan destacadas en trazo grueso y en color rojo.

El shapefile que genera GISRed tiene asociada una tabla de atributos con los siguientes campos:

- **IdLink:** hace referencia al identificador interno de la línea.
- **Diameter:** diámetro nominal de la tubería.
- **T:** campo donde se indica el tipo de línea con respecto al árbol de mínima resistencia calculado, es decir, si la línea es **C (CUERDA)** o **R (RAMA)**.
- **QAccum:** Aplica sólo en el caso de ramas (T). Contiene la demanda acumulada en la rama, calculada como suma de las demandas base de los nudos que cuelgan de dicha rama. Este campo es obviamente nulo para todas aquellas líneas clasificadas como cuerdas (C).
- **ConvCapLnk:** (*Link Conveyance Capacity*) indica la capacidad de transporte propia de la línea (tubería), calculada en base a la expresión vista anteriormente ($Q_{TCUTSET}$).
- **NumLCutSet:** (*Number of Links of the Cut-Set*) Número de líneas que componen el conjunto de corte. Este dato sólo se aplica a las ramas del sistema.
- **TotalArea:** Sección total del conjunto de corte calculada como suma de las secciones transversales de cada una de las líneas que componen el conjunto de corte más la sección transversal de la rama en cuestión. Este dato se emplea posteriormente para estimar la velocidad media de circulación del flujo en la rama y su conjunto de corte.

- **ConvCutSet:** (*Conveyance of the Cut Set*) capacidad de transporte del conjunto de corte de una rama. Se calcula como suma total de la capacidad de transporte de cada una de las líneas pertenecientes al conjunto de corte de una rama.
- **TotCnvCap:** (*Total Conveyance Capacity*) capacidad de transporte total, esto es, la suma de los campos *ConvCapLnk* + *ConvCutSet*.
- **AvgVeloc:** (*Average velocity*) es la relación entre la demanda acumulada en la línea y la sección total calculada anteriormente.
- **OrdTopInd1:** primer índice resultado de la ordenación topológica del grafo.
- **OrdTopInd2:** segundo índice resultado de la ordenación topológica del grafo.
- **Ratio:** relación entre *QAccum* y *TotCnvCap*, indicador de la existencia o no de cuello de botella en la tubería.

8.1.1 Ejemplo. Análisis de los cuellos de botella en una red de transporte

A continuación se presenta un ejemplo de análisis de la capacidad de transporte en una red de tuberías de abastecimiento, con el objetivo de detectar, en una primera aproximación, los cuellos de botella del sistema.

La red posee una única fuente de suministro y tres depósitos de almacenamiento. El primer paso para el análisis, consiste en calcular el árbol de expansión de mínimo coste basado en la resistencia hidráulica de cada una de las tuberías, es decir, el **árbol de mínima resistencia hidráulica y su topología**. Además es necesario obtener **todos los conjuntos de corte** del sistema calculados para cada una de las ramas del árbol de mínima resistencia hidráulica.

Por último y en función de la carga de los nudos del modelo (demandas base asignadas a los nudos del modelo), el método requiere de la acumulación o agregación previa de dichas demandas base, sobre cada una de las tuberías clasificadas como ramas del árbol.

La siguiente figura muestra el árbol de mínima resistencia calculado para la red de ejemplo. En color verde en trazo continuo aparecen las ramas del árbol y en color rojo en trazo discontinuo aparecen las cuerdas.

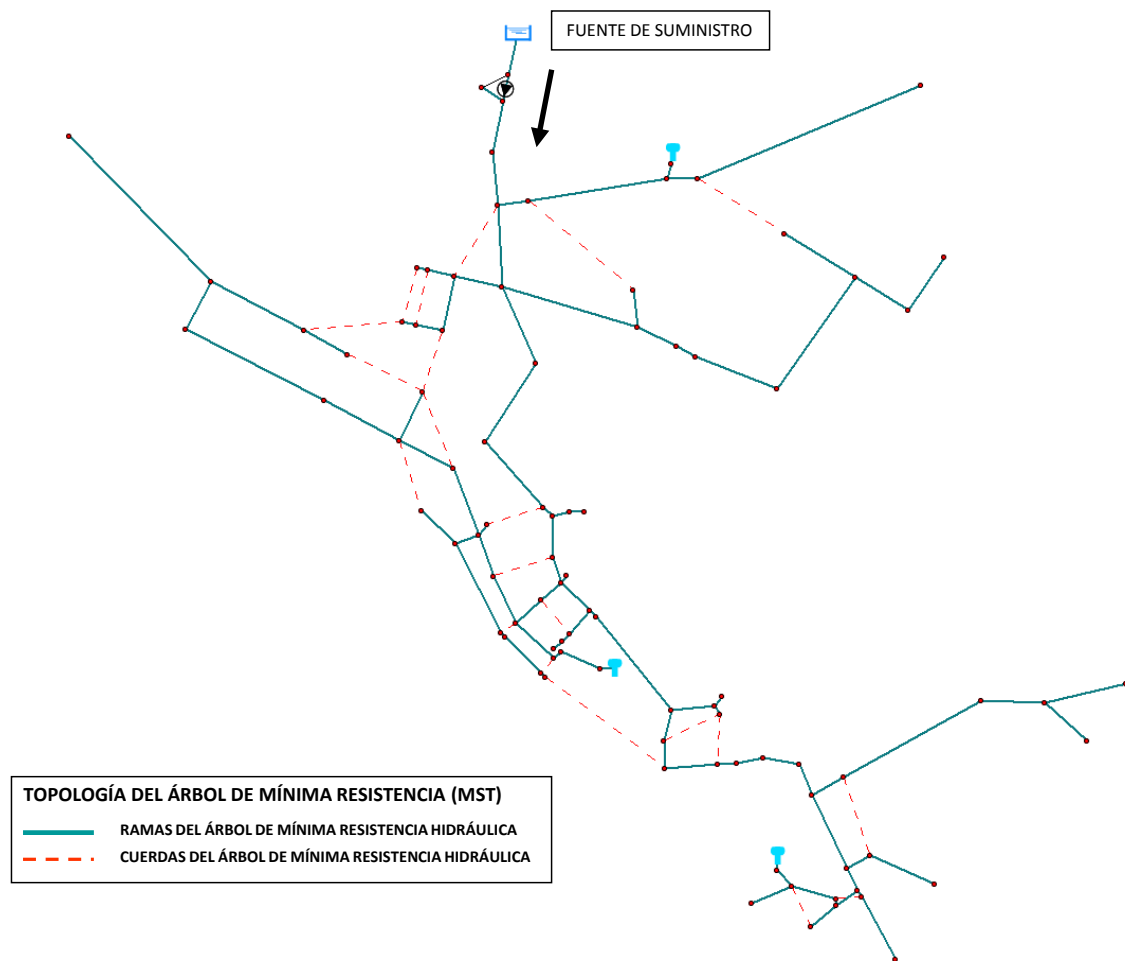


FIGURA 52. EJEMPLO DE ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE. ÁRBOL DE MÍNIMA RESISTENCIA DE LA RED.

Desde la extensión GISRed y utilizando el algoritmo programado, se lanza el análisis de la capacidad de transporte de la red, obteniendo el siguiente resultado gráfico en forma de shapefile. Como se puede observar, el algoritmo detecta una tubería cuyas características dentro del sistema hacen pensar que puede ser un cuello de botella.

Analizando la capacidad de transporte de la tubería en cuestión y la de su conjunto de corte, es posible corroborar que se trata de un cuello de botella.

A partir de la topología de árbol, y en base a la distribución de demandas base en los nodos del modelo, se observa que de los aproximadamente 189 l/s de caudal que aporta la única fuente de suministro del sistema, 136 l/s van a parar a la subred situada aguas abajo del cuello de botella.

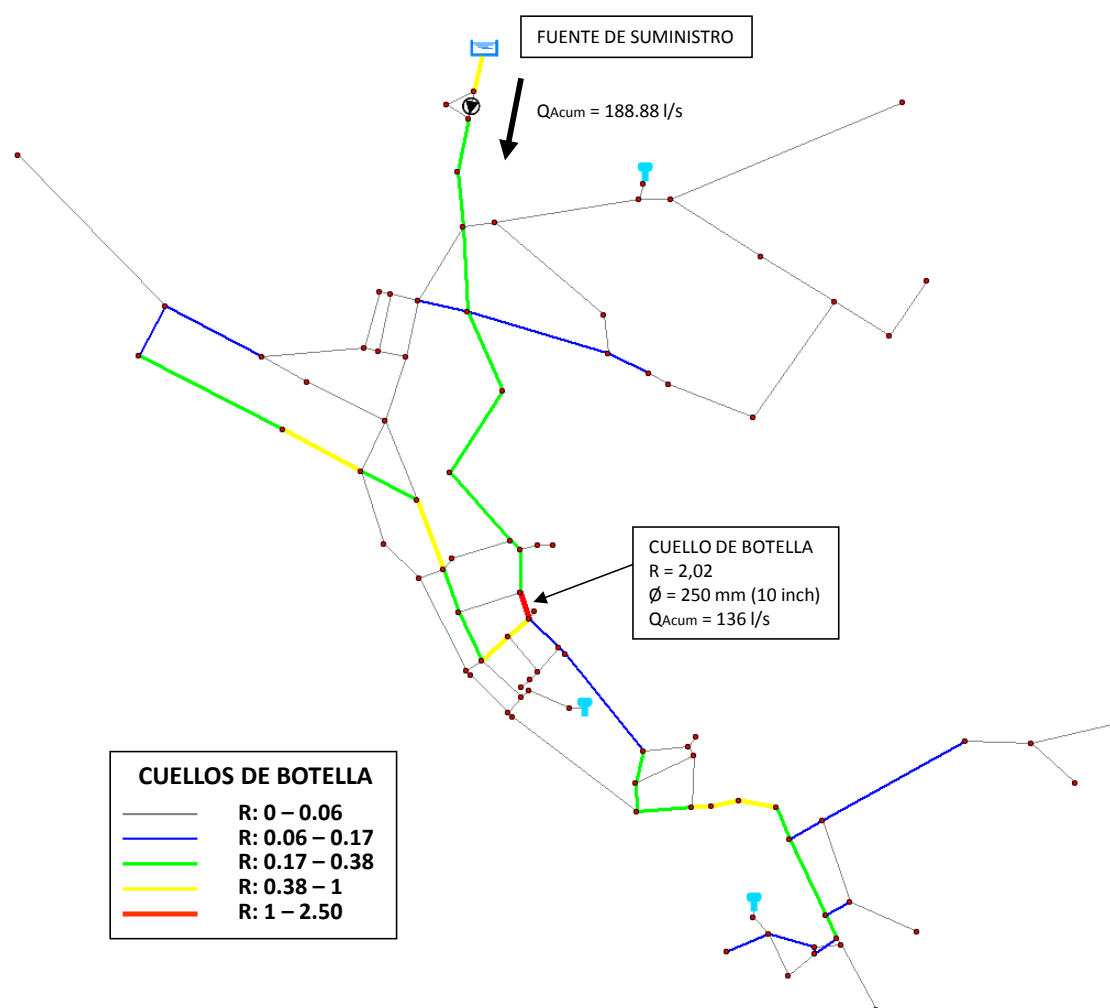


FIGURA 53. EJEMPLO DE ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE. DETECCIÓN DE LOS CUELLOS DE BOTELLA.

Comparando la capacidad de transporte teórica de la tubería más el de su conjunto de corte, con el caudal teórico que debe ser suministrado aguas abajo, se observa que el ratio obtenido (R) es de **2,02**, lo que indica claramente que el caudal teórico que debe atravesar las tuberías del cuello de botella y su conjunto de corte en condiciones normales de funcionamiento, es dos veces superior a su capacidad teórica de transporte.

Los datos que se presentan en las tablas siguientes, demuestran lo señalado por la aplicación GISRed.

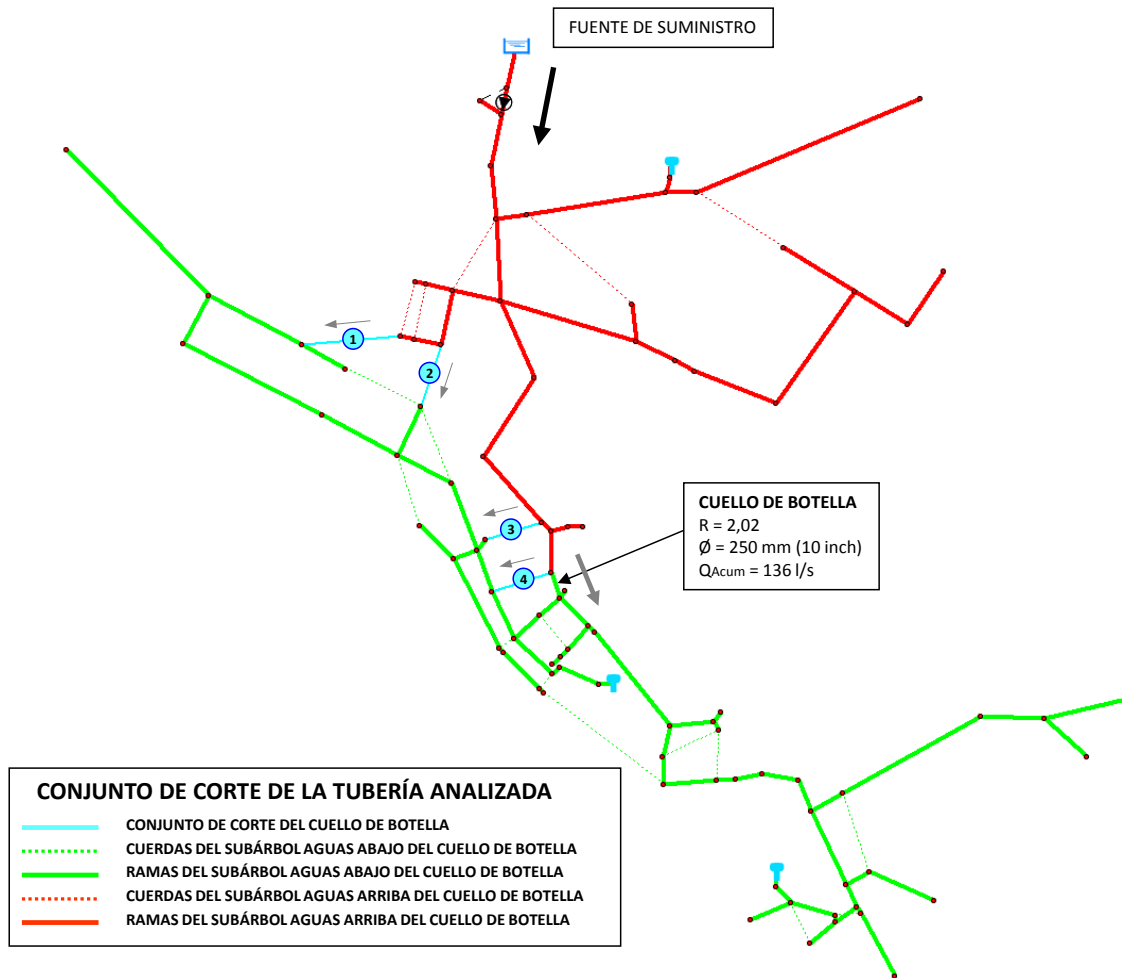


FIGURA 54. EJEMPLO DE ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE. ANÁLISIS DEL CONJUNTO DE CORTE DEL CUELLO DE BOTELLA DETECTADO.

TUBERÍA	DIÁMETRO NOMINAL (mm)	$V_{Diseño}$ (m/s)	Q_{Acum} (l/s)	CAPACIDAD DE TRANSPORTE TEÓRICA [$Q_{teórico}$ (l/s)]
CUERDA 1	150	0,63	0	11,08
CUERDA 2	150	0,63	0	11,08
CUERDA 3	100	0,55	0	4,30
CUERDA 4	100	0,55	0	4,30
CUELLO DE BOTELLA	250	0,74	136	36,49

TABLA 4. CAPACIDAD DE TRANSPORTE TEÓRICA DEL CUELLO DE BOTELLA Y DE LAS TUBERÍAS QUE CONFORMAN SU CONJUNTO DE CORTE.

ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE:	$Q_{teórico}$ (l/s)
CUELLO DE BOTELLA	36,49
CONJUNTO CORTE	30,76
CAPAC. TRANSP. TOTAL (RAMA + CTO. CORTE)	67,26

TABLA 5. CAPACIDAD TEÓRICA DE TRANSPORTE DE LA RAMA Y SU CONJUNTO DE CORTE.

CAUDAL TEÓRICO ACUMULADO A ABASTECER	136
CAPAC. TRANSP. TOTAL (RAMA + CTO. CORTE)	67,26
RATIO	2,02

TABLA 6. RELACIÓN ENTRE EL CAUDAL TEÓRICO A ABASTECER Y LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE TOTAL DE LA RAMA Y SU CONJUNTO DE CORTE.

8.2 ANÁLISIS DE CERRADAS EN UNA RED (POLÍGONOS DE CORTE)

8.2.1 Exploración e identificación de cerradas

Se entiende por línea, la porción de red que se encuentra entre dos nudos del modelo, mientras que un segmento o cerrada es la serie de líneas o tramos de línea del sistema que quedan aislados tras el cierre de las válvulas de corte o seccionamiento oportunas. En las redes reales, un segmento rara vez se corresponde con una única línea, estando normalmente formado por muchas líneas y nudos adyacentes, dependiendo de la ubicación de las válvulas.

En 1993, T. Walski señaló la importancia de la localización de las válvulas de corte a la hora de evaluar la fiabilidad de las redes de distribución de agua. Según Walski, una buena descripción del conjunto de válvulas del sistema, proporciona una mejor concepción de la fiabilidad del mismo que el tradicional enfoque línea-nudo normalmente utilizado. Walski fue quien introdujo el concepto de segmento o cerrada para describir la porción de red de distribución de agua que quedaba aislada tras el cierre de las válvulas de corte².

Como aplicación de la teoría de grafos y de las técnicas de búsqueda de grafos desarrolladas en capítulos anteriores, se han programado dos métodos de búsqueda e identificación de aquellas válvulas de corte que han de cerrarse para aislar adecuadamente una tubería en la que se ha producido una incidencia. El primer método únicamente rastrea la red en busca de las válvulas que se han de cerrar, devolviendo los tramos que quedan aislados como consecuencia directa del cierre de válvulas. Dicho rastreo se basa en los parámetros básicos de la topología de la red, es decir, en la relación entre los nudos y las líneas y en la posición de las válvulas de seccionamiento en la red de tuberías. El segundo método parte del anterior e identifica aquellos segmentos adicionales que quedan aislados como consecuencia indirecta del cierre de las válvulas anteriores, utilizando para ello las técnicas avanzadas de análisis topológico vistas en el capítulo anterior.

Estos métodos se han implementado en GISRed a través de un formulario de interacción con el usuario en el que además se puede especificar aquellas válvulas que son inaccesibles o están averiadas y que por tanto no pueden ser maniobradas, con lo cual no entrarán dentro del conjunto de válvulas candidatas a ser cerradas para aislar la incidencia producida. Además, en el caso de que la aplicación detecte un tema de acometidas y/o parcelas, GISRed señalará aquellas acometidas y parcelas que van a quedar sin servicio debido a la maniobra de aislamiento. Tras la ejecución de los algoritmos programados, la aplicación ofrece un breve informe en el que se indica:

² Walski, T.M., Water distribution valve topology for reliability analysis (1993). Reliability Engineering & System Safety. Volume 42, Issue 1, 1993, Pages 21-27.

1. Número de **tramos de tubería afectados** directa e indirectamente por la maniobra de cierre de válvulas.
2. **Número de válvulas que es necesario cerrar** para aislar el tramo seleccionado.
3. **Número de acometidas afectadas** por la cerrada que quedarán temporalmente sin servicio.
4. **Parcelas afectadas por el cierre** que quedarán temporalmente sin servicio.
5. **Longitud de red afectada** por la cerrada.
6. **Volumen teórico de agua confinado** dentro de los tramos aislados.

El poder disponer de un valor aproximado del volumen que queda atrapado en el interior de las tuberías aisladas por la cerrada, permite estimar el tiempo necesario para vaciar las mismas, reparar la avería y volver a poner en funcionamiento los tramos afectados.

El algoritmo diseñado e implementado en GISRed, se basa en uno cualquiera de los árboles de expansión de la red, y se encarga de recorrer las tuberías adyacentes a la tubería afectada por la avería en busca de válvulas de corte que puedan ser maniobradas. Una vez identificadas y cerradas dichas válvulas, comprueba qué tramos de la red se ven afectados por el cierre y los aísla del resto. En un paso posterior (a elección del usuario) se realiza una nueva búsqueda de aquellos tramos (ramales finales fundamentalmente) que podrían quedar aislados como consecuencia indirecta del cierre de válvulas anterior. En esta etapa de comprobación, se hace uso de la información topológica adicional que ha debido computarse previamente. En definitiva, el algoritmo requiere como información inicial:

1. **Válvulas de corte** junto a las tuberías sobre las que están instaladas dichas válvulas.
2. En general todas aquellas **válvulas incluidas en el modelo** que pueden ser maniobradas (automáticas, manuales, motorizadas, etc.).
3. **Diámetros de tuberías**.
4. **Árbol de expansión** (no necesariamente el de mínimo o máximo coste).
5. **Orden topológico** de nudos y ramas (*OrdTopInd1* y *OrdTopInd2*)
6. Todos los **conjuntos de corte** del árbol de expansión.
7. **Listas de adyacencia** (nudo-líneas).
8. Opcionalmente un tema de **acometidas**.
9. Opcionalmente un tema de **parcelas** o **manzanas** (polígonos).

El algoritmo requiere también de una serie de listas (vectores) internas donde almacenará la información de salida que se ofrecerá al usuario como resultado:

1. Lista que almacene los **tramos de tubería que van quedando aislados**.
2. Lista que almacene los **nudos afectados por la cerrada**.
3. Lista que almacene las **válvulas que han de cerrarse**.
4. Lista que almacene las **acometidas que van a quedar fuera de servicio**.

El siguiente diagrama ilustra el procedimiento que sigue GISRed para detectar aquellas válvulas que deben cerrarse para aislar el tramo en el que se ha producido la incidencia. Este primer algoritmo calcula únicamente la cerrada propiamente dicha.

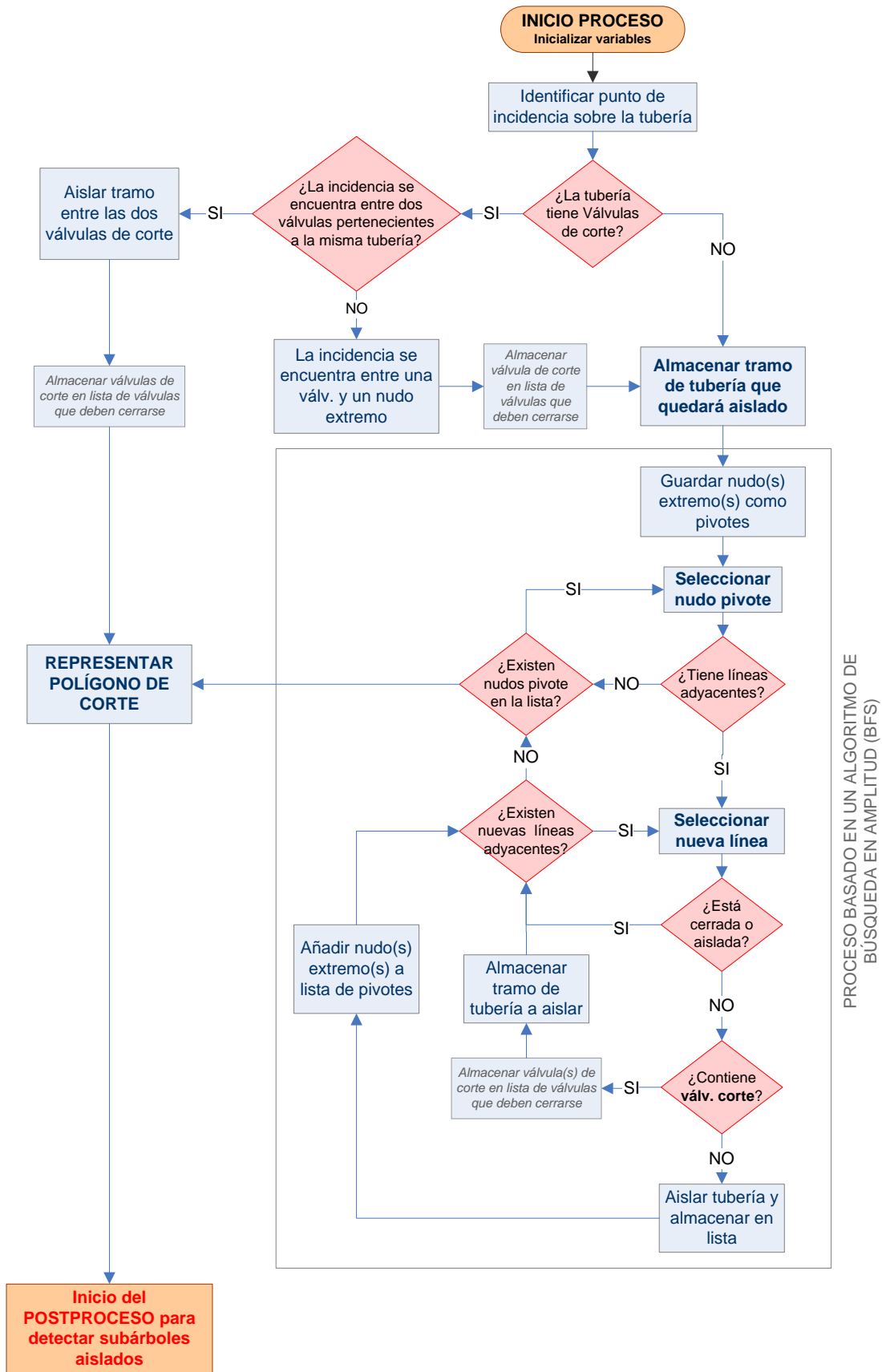


TABLA 7. PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA CERRADA. PRIMER PASO.

Como se puede observar, el proceso está basado en el método de búsqueda de grafos en amplitud (BFS). Por tanto, es fundamental que el modelo de red refleje con exactitud la conectividad real del sistema. Para ello, podemos hacer uso de la herramienta de verificación de la conectividad descrita en el capítulo anterior. El algoritmo comienza generando un subgrafo partiendo del punto donde ha ocurrido la incidencia y finaliza cuando todos los tramos que componen el grafo, se ven interrumpidos por una válvula que puede ser cerrada, o bien cuando se alcanzan ramales finales. **Si por el contrario se alcanza una fuente de suministro de agua, la cerrada no es posible y el proceso finaliza.** En consecuencia, esta manera de proceder, proporciona el **mínimo número de válvulas que deben ser cerradas** (en caso de que no lo estén ya) y todos los tramos que quedarán fuera de servicio debido a la incidencia en un punto de la red. En consecuencia, **las válvulas se convierten en los límites topológicos de la cerrada**, que queda representada por el subgrafo generado.

La siguiente figura muestra un ejemplo en el que se analiza la cerrada en caso de una incidencia en el punto marcado en color negro. En trazo discontinuo y color rojo se destacan los tramos de tubería que quedarían aislados tras el cierre de las válvulas de seccionamiento que se indican. También en color rojo pero en trazo continuo aparecen las acometidas que quedarían afectadas por la cerrada (fuera de servicio temporalmente). Los puntos de color verde son las válvulas de seccionamiento que sería necesario cerrar para aislar el tramo afectado por la incidencia o avería. Las parcelas afectadas por el cierre se muestran en color amarillo.

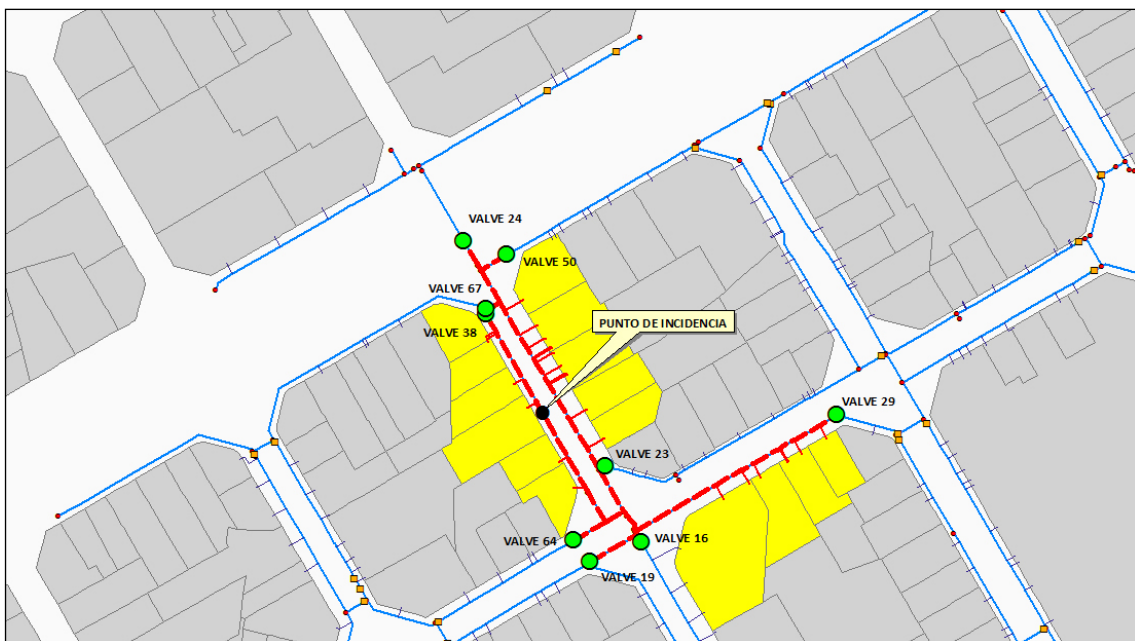


FIGURA 55. IDENTIFICACIÓN DE LA CERRADA PARA AISLAR EL TRAMO DE TUBERÍA EN EL QUE SE HA PRODUCIDO UNA INCIDENCIA.

Tras el análisis la aplicación GISRed muestra los siguientes resultados:

- **Longitud** total de la cerrada: **360,75 m**.
- **Volumen** total confinado en la cerrada: **3,01 m³**.
- Número de **válvulas** a cerrar: **9**
- Número de **acometidas** afectadas: **24**

También es posible especificar de antemano las válvulas que no son maniobrables y que por tanto no deben ser consideradas en el cálculo de la cerrada. En el ejemplo anterior imaginemos que las válvulas 67 y 38 no pudiesen ser cerradas por ser inaccesibles o bien estar en mal estado.

La aplicación programada es capaz de tener en cuenta esta particularidad y recalcular la cerrada en busca de las válvulas contiguas que es posible maniobrar. La nueva cerrada quedaría como sigue:

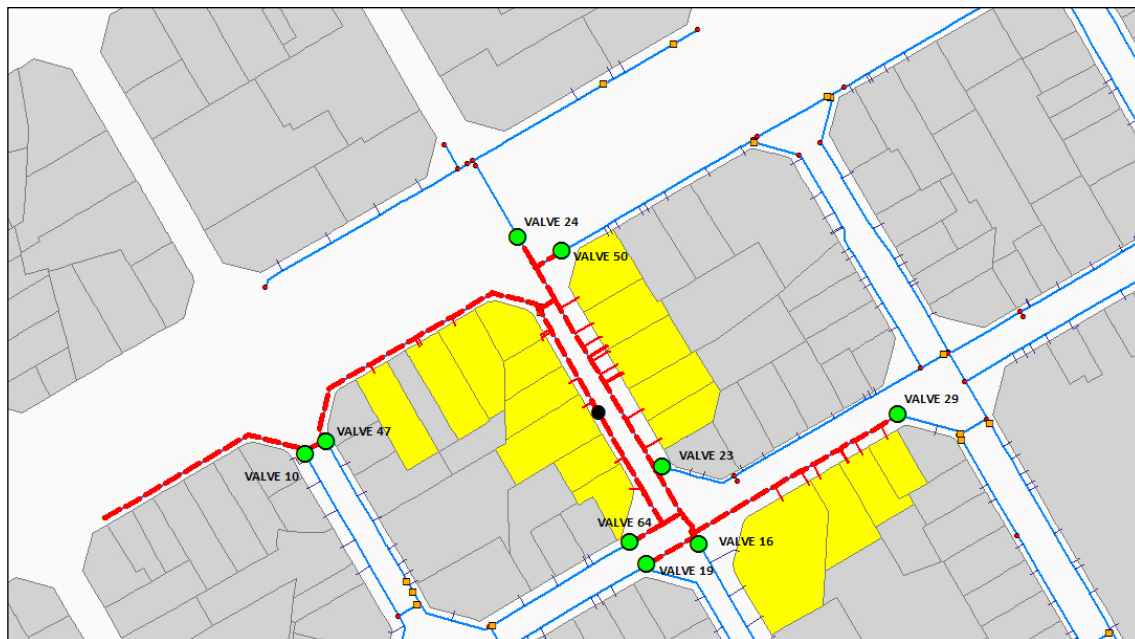


FIGURA 56. IDENTIFICACIÓN DE LA NUEVA CERRADA EN EL CASO DE DESCARTAR DOS VÁLVULAS DE SECCIONAMIENTO POR IMPOSIBILIDAD DE MANIOBRA.

En este último caso, los resultados tras la cerrada indican que:

- **Longitud** total de la cerrada: **558,89 m.**
- **Volumen** total confinado en la cerrada: **4,65 m³.**
- Número de **válvulas** a cerrar: **9**
- Número de **acometidas** afectadas: **28**

Como se puede observar, al no poder cerrar las válvulas 67 y 38, la aplicación busca las válvulas más cercanas que sí es posible maniobrar, en este caso las válvulas 10 y 47.

8.2.2 Detección de zonas aisladas tras la identificación de la cerrada

Durante el proceso de generación de la cerrada, se deben guardar todos los tramos adyacentes a los tramos que van quedando aislados (así como sus nudos), para posteriormente y a petición del usuario, llevar a cabo un procesado ulterior en busca de nuevos tramos que pudieran quedar aislados como consecuencia de la cerrada generada.

El post-proceso se ilustra en el esquema siguiente:

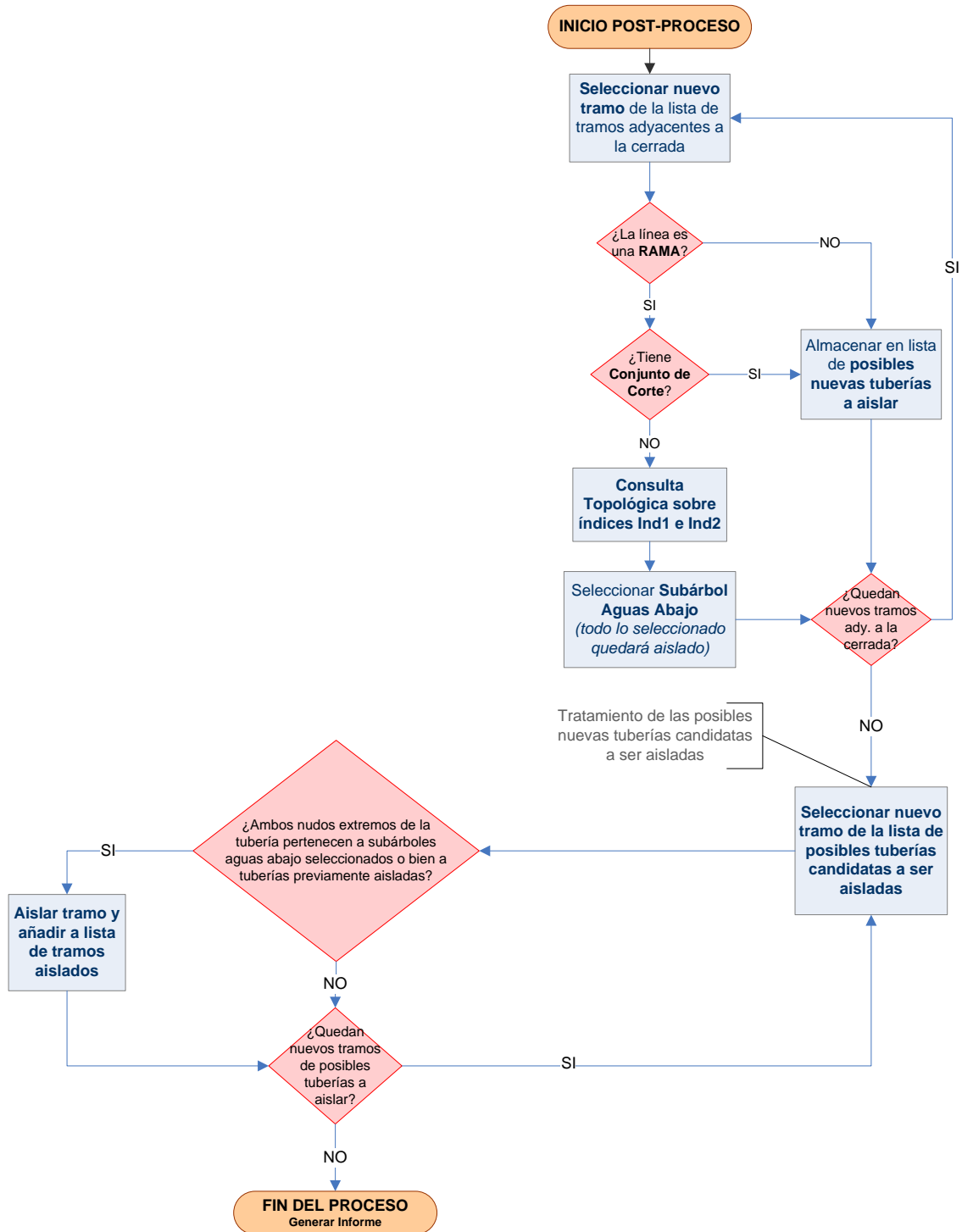


FIGURA 57. POSTPROCESO EN BUSCA DE NUEVOS TRAMOS AISLADOS A CONSECUENCIA DE LA CERRADA GENERADA.

Es aquí donde se utiliza realmente toda la información topológica adicional que se ha debido calcular en el modelo de red mediante el análisis topológico correspondiente, esto es, el árbol de expansión no necesariamente el de mínimo o máximo coste, los conjuntos de corte asociados a las ramas del árbol y los índices generados tras la ordenación topológica y asociados a nudos y líneas. Gracias a esta información, se analiza cada una de las tuberías extremas de la cerrada, en busca de nuevos segmentos adyacentes que queden aislados tras el cierre de válvulas. Para ello se analiza cada uno de estos tramos adyacentes y se comprueba si pertenecen al árbol de expansión. Esto se lleva a cabo a través de una simple consulta sobre

la base de datos. Si el tramo en cuestión no pertenece al árbol de expansión, éste se descarta para el post-procesado. En caso contrario, se comprueba mediante una nueva consulta a la base de datos si dicho tramo (rama del árbol) posee conjunto de corte. Si la rama posee conjunto de corte, significa que existirán caminos alternativos para alimentar la red aguas abajo y por ende dicho tramo, con lo cual éste no quedará sin servicio. Si la rama no tiene asociado conjunto de corte, significa que la parte de red ubicada aguas abajo no puede ser suministrada a menos que exista una fuente, cosa que se comprobará realizando una consulta sobre los índices *OrdTopInd1* y *OrdTopInd2*, **comprobando posteriormente que ninguno de los nudos situados aguas abajo es una fuente de suministro o un punto de inyección de caudal.**

Finalmente, la aplicación ofrece un informe donde se proporcionan los detalles de la cerrada como la longitud total afectada por la cerrada, el mínimo número de válvulas a cerrar, el volumen atrapado por la cerrada y las acometidas afectadas que quedarán sin servicio. Cabe destacar que el usuario puede simular varias incidencias al mismo tiempo seleccionando los puntos en los cuales desea simular incidencias simultáneas. La aplicación tiene en cuenta la superposición de estados de las válvulas y tuberías en todas las cerradas que se generan.

En un paso posterior, siempre es posible **vincular las acometidas a la base de datos de abonados y establecer un listado de abonados que quedarán sin suministro de agua durante el período de tiempo que duren los trabajos de reparación (gestión de averías)**, período de tiempo que como se indicaba anteriormente puede ser estimado teniendo en cuenta los tiempos de vaciado, reparación y llenado de los tubos afectados.

Siguiendo el ejemplo anterior, se puede observar que existe una zona de la red que también quedaría aislada (sin servicio) al cerrar todas las válvulas que indicaban las cerradas de las figuras anteriores. Es la zona que se muestra en color azul en la siguiente figura.

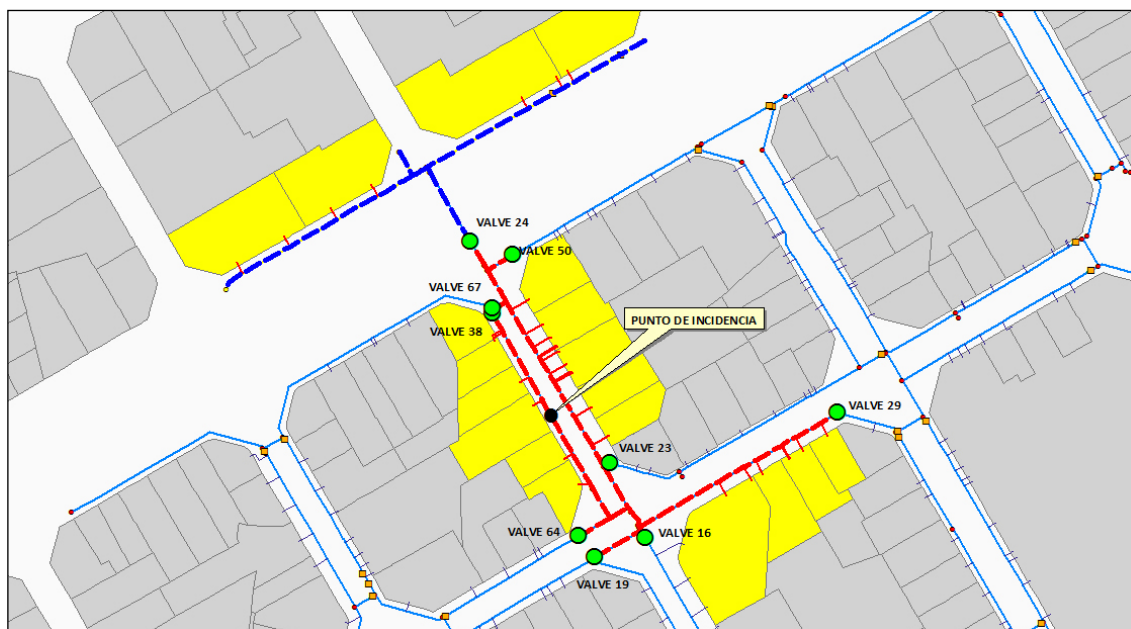


FIGURA 58. DETECCIÓN DE TODAS LAS TUBERÍAS AISLADAS TRAS LA IDENTIFICACIÓN DE LA CERRADA.

Las propiedades de la cerrada que se genera tras el cierre de todas las válvulas de seccionamiento que se indican, son las siguientes:

- **Longitud** total de la cerrada: **583,75 m**
 - **Longitud** tramos en color rojo: **360,75 m**

- **Longitud** tramos en color azul: **223 m**
- **Volumen** total confinado en la cerrada: **6,98 m³**
 - **Volumen** tramos en color rojo: **3,10 m³**
 - **Volumen** tramos en color azul: **3,88 m³**
- Número de **válvulas** a cerrar: **9**
- Número de **acometidas** afectadas: **31**

Como se observa, a consecuencia del cierre de las 9 válvulas de corte, se produce el aislamiento adicional de **223 metros de tuberías** (*línea a trazos en color azul*) que hay que incluir en la cerrada y que habrá que tener en cuenta a la hora de gestionar la avería.

8.2.3 Análisis de criticidad en la red

En relación con el análisis de cerradas, se ha implementado una herramienta en GISRed que lleva a cabo un análisis de todas las cerradas que pueden darse en una red. Para ello, la aplicación simula una avería en todos los tramos de tubería donde existe riesgo potencial de incidencia. Los puntos elegidos para analizar la cerrada quedan entre dos válvulas de corte o bien entre una válvula de corte y un nudo de la red. Suponiendo una rotura en cada uno de estos puntos, GISRed examina el número mínimo de válvulas que habría que cerrar para aislar el tramo afectado utilizando los dos algoritmos vistos en el apartado anterior y vuelca en un fichero de texto información básica al respecto como:

- **Identificador de la tubería** donde se ha simulado la incidencia.
- **Coordenadas XY del punto** donde se supone que se da la **incidencia**.
- **Longitud total de tramos** que quedan **fuera de servicio** debido al cierre de válvulas.
- **Volumen total de agua** que queda **confinado** debido a la cerrada.
- **Número mínimo de válvulas** que deben cerrarse para aislar el tramo de tubería afectado.
- **Número de acometidas** afectadas por la cerrada.

Finalmente se lleva a cabo una clasificación, destacando aquellos puntos más críticos en términos de análisis de cerradas. El parámetro que más pesa dentro de esta clasificación es la longitud total de tuberías que quedan aisladas y el número de acometidas afectadas por el cierre. Si se dispone de la relación entre las acometidas y los abonados, es posible estimar el número de abonados que quedaría sin servicio para cada incidencia.

Este análisis pone de manifiesto la importancia de las válvulas de corte dentro de un sistema de distribución de agua en términos de fiabilidad y garantía del servicio. Es de vital importancia que la ubicación de las válvulas de corte del sistema sea la adecuada, ya que es la única manera de minimizar los efectos de una rotura o la introducción de un contaminante en la red.

Además, el detectar aquellos puntos críticos de la red, permite llevar a cabo una estrategia de prevención e identificación de los lugares más vulnerables del sistema. Obviamente, resulta imprescindible seguir una política de mantenimiento preventivo que incluya las válvulas manuales instaladas y que tenga en cuenta el estado de las mismas, ya que ante un análisis de cerradas, es necesario conocer si la válvula en cuestión se encuentra parcial o totalmente abierta/cerrada.

Siguiendo el mismo ejemplo anterior, se ha lanzado un análisis de criticidad sobre la red de ejemplo, en el que se analizan todos los segmentos de tubería en los que se podría producir una avería. Tras el análisis realizado, GISRed indica que las 3 cerradas más críticas en términos de acometidas fuera de servicio y longitud de red aislada, son las siguientes:

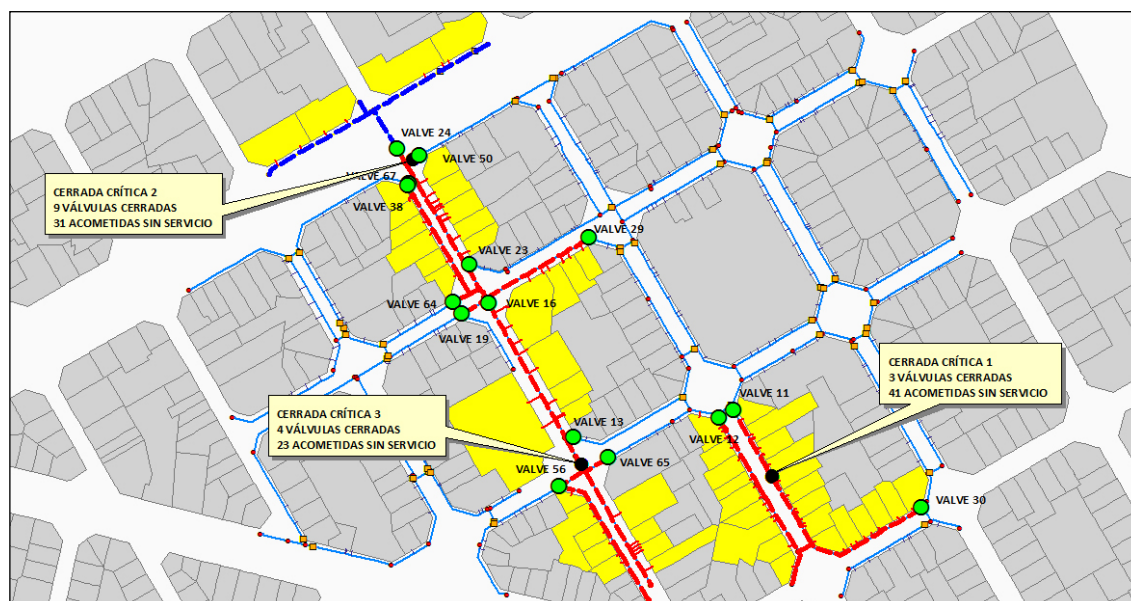


FIGURA 59. ANÁLISIS DE CRITICIDAD EN LA RED.

CERRADA 1

- **Longitud** total de la cerrada: **343,88 m**
- **Volumen** total confinado en la cerrada: **3,61 m³**
- Número de **válvulas** a cerrar: **3**
- Número de **acometidas** afectadas: **41**

CERRADA 2

- **Longitud** total de la cerrada: **583,75 m**
 - **Longitud** tramos en color rojo: **360,75 m**
 - **Longitud** tramos en color azul: **223 m**
- **Volumen** total confinado en la cerrada: **6,98 m³**
 - **Volumen** tramos en color rojo: **3,10 m³**
 - **Volumen** tramos en color azul: **3,88 m³**
- Número de **válvulas** a cerrar: **9**
- Número de **acometidas** afectadas: **31**

CERRADA 3

- **Longitud** total de la cerrada: **383,02 m**
- **Volumen** total confinado en la cerrada: **4,93 m³**
- Número de **válvulas** a cerrar: **4**
- Número de **acometidas** afectadas: **23**

8.3 APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS A LA SECTORIZACIÓN

8.3.1 Introducción

El concepto de sector o distrito hidrométrico (DMA, *District Metered Area* en inglés) fue introducido por primera vez en el campo del agua potable en el Reino Unido a principios de los años 80 (*Report 26 Leakage Control Policy & Practice, UK Water Authorities Association*³). Un distrito o sector hidrométrico es el área alimentada por una parte del sistema de distribución, delimitada por un conjunto de válvulas cerradas, en la que el caudal entrante y saliente está perfectamente identificado y medido. La división de la red en sectores controlados hidráulicamente es lo que se conoce como 'sectorización'. Básicamente, la sectorización de las redes de distribución de agua, permite una mejor gestión del nivel de presiones en la red, evitando valores de presión excesivos en horas valle o de bajo consumo, lo que a su vez redundaría en una disminución de las fugas. Los sectores hidrométricos se han utilizado principalmente como instrumentos para el control de fugas.

Siguiendo con las aplicaciones de la teoría de grafos en las redes de distribución de agua, se han desarrollado e implementado una serie de algoritmos, que permiten identificar de manera automática los sectores hidrométricos de una red en servicio, en base a la topología del modelo de red y a los elementos que definen y delimitan cada uno de los sectores, esto es, válvulas de corte y medidores de caudal. Para ello, ha sido necesario adaptar las técnicas de búsqueda de grafos y las herramientas de análisis topológico descritas en capítulos anteriores.

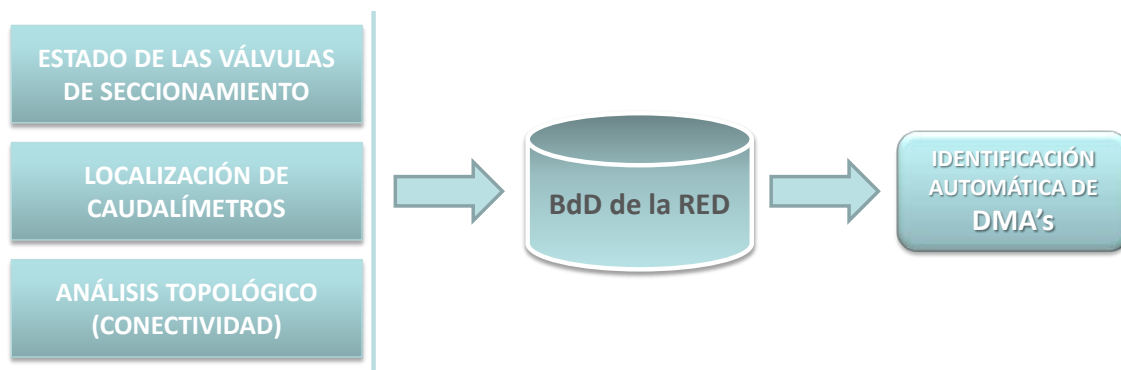


FIGURA 60. PROCESO DE IDENTIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE DISTRITOS HIDROMÉTRICOS.

8.3.2 Identificación de sectores hidrométricos básicos

Los **sectores hidrométricos básicos (DMAs básicas)** quedan definidos por aquellas válvulas de seccionamiento que se encuentran cerradas y por los medidores de caudal instalados en la red.

El algoritmo implementado de identificación automática de sectores hidrométricos básicos está fundamentado en el algoritmo de verificación de la conectividad de la red. Este algoritmo se ha modificado ligeramente con el objetivo de implementar una serie de comprobaciones adicionales.

El procedimiento está basado en un método de exploración de grafos en amplitud (BFS). Para ello, partiendo de un nudo cualquiera del sistema, el algoritmo va examinando

³ Report 26 Leakage Control Policy & Practice (1980), UK Water Authorities Association.

sistemáticamente las líneas pertenecientes a la red, de manera que primero se exploran los nudos contiguos más cercanos al nudo considerado como pivote. El proceso se repite hasta que se exploran o recorren todas las líneas de la red. La manera más eficiente de implementar el algoritmo es mediante un procedimiento no recursivo, es decir, mediante un procedimiento que no tenga que comprobar todas las líneas o nudos en cada iteración. Para ello se hace uso de una lista de adyacencias indexada por nudos, que almacena listas de todas las líneas que conectan con cada nudo, y una cola de tipo FIFO (*First-in-first-out*), que permite almacenar las líneas adyacentes a cada nudo que todavía no han sido examinadas. Esta cola proporciona la línea y el nudo que actúan como pivotes en cada paso del procedimiento.

La diferencia con respecto al algoritmo de verificación de la conectividad, es que en este caso, para cada una de las líneas seleccionadas, además de comprobar el estado de la línea (abierta o cerrada), consecuencia del cierre de alguna válvula instalada en la misma, es necesario comprobar si la línea contiene algún caudalímetro o contador y qué válvulas manuales están actuando como válvulas frontera entre los sectores básicos detectados. Si la línea contiene algún medidor de caudal o válvula frontera, sus nudos extremos se marcan para un análisis posterior (post-proceso), en el que se analizará lo siguiente:

- si existen **DMA's formadas por un solo nudo** (nudo aguas abajo de un medidor)
- se debe **asociar cada acometida a la DMA** simple en la que se encuentra
- se fija el **sentido de medición de cada medidor** (caudalímetro o contador) en base al sentido de digitalización de la tubería sobre la que está instalado (se realiza esto como primera aproximación al verdadero sentido topológico del equipo)
- a cada **válvula frontera** se le asignan las dos DMA's que define.

El siguiente esquema ilustra el proceso que sigue el algoritmo:

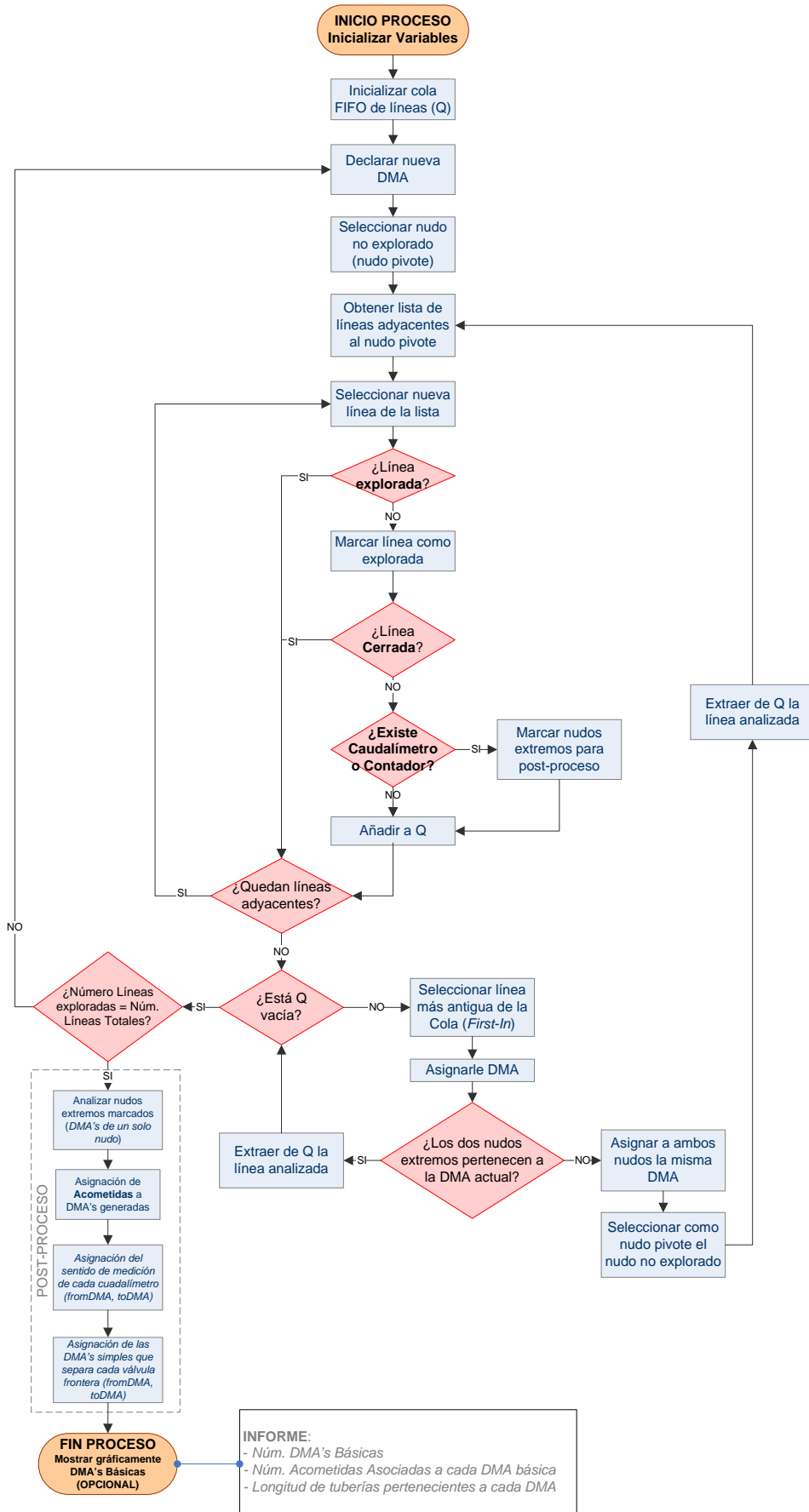


FIGURA 61. PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE LAS DMA'S BÁSICAS.

Al acabar el proceso, se ofrece un informe en el que se especifica el **número de DMA's básicas** encontradas, el **número de acometidas asociadas** a cada una de las DMA's básicas y la **longitud de red** perteneciente a cada uno de los sectores hidrométricos. Como resultado final, se ofrece la posibilidad de crear un nuevo temático SIG de líneas clasificado por el identificador de las DMA's básicas, donde resulta inmediato identificar visualmente los sectores que han sido encontrados de acuerdo a la configuración de la red en el instante analizado.

Hay que resaltar, que el algoritmo no crea o plantea nuevos sectores hidrométricos, sino que identifica los ya existentes en el modelo de red, en función de las válvulas de corte que se encuentren cerradas y la ubicación de los medidores de caudal instalados (caudalímetros y/o contadores). Por tanto, la utilidad de esta herramienta radica no tanto en su capacidad para sugerir o proponer nuevos sectores hidrométricos, como en la de **reconocer y destacar los ya existentes o subyacentes**. Además, resulta muy útil para comprobar si la **disposición e instalación de medidores es la correcta**, ya que el algoritmo es capaz de reconocer aquellos medidores redundantes dentro de cada sector, es decir, aquellos que no delimitan hidricamente ningún área, sino que quedan en el interior de un sector. Esto resulta básico a la hora de realizar balances hídricos en el sistema, calcular rendimientos volumétricos en cada uno de los sectores o bien llevar a cabo una carga automatizada de los nudos del modelo.

8.3.3 Agrupación de sectores hidrométricos básicos. Sectores hidrométricos de modulación

Además del algoritmo de identificación de sectores hidrométricos básicos, se ha desarrollado una rutina que se encarga de agrupar de forma automática las DMA's básicas del sistema en función del tipo de medidores de caudal instalados en la red, es decir, en función de que el medidor sea un caudalímetro o un contador. La diferencia fundamental entre estos medidores reside en la frecuencia de registro del volumen que atraviesa una determinada tubería. Mientras que los contadores van acumulando el volumen que atraviesa la tubería (integradores), por lo que el caudal se calcula a partir del intervalo de tiempo entre dos lecturas consecutivas, los caudalímetros registran valores de caudal a intervalos regulares con una frecuencia sincrónica (normalmente más baja).

Al final del proceso, la rutina programada devuelve una serie de **sectores delimitados** únicamente por **válvulas de corte cerradas y caudalímetros no redundantes para los cuales existen medidas de caudal a una frecuencia regular (hora, minutos,..)**. Es lo que se conoce como **sectores hidrométricos de modulación**.

El procedimiento resumido de agrupación de DMA's básicas, es el siguiente:

1. 1.- Tomar un medidor de caudal
2. 2.- Analizar el carácter del medidor.
 - Si se trata de un caudalímetro, saltar al siguiente medidor
 - Si se trata de un contador:
 - a. Determinar las DMA's básicas adyacentes con las que conecta el medidor.
 - b. Determinar el identificador actual de dichas DMA's, ya que dichas DMA's pueden haber sufrido una agrupación con anterioridad.
 - c. Si los nuevos identificadores de las dos DMA's básicas adyacentes son diferentes, se crea una nueva DMA agrupada, de lo contrario se pasa al siguiente medidor.
 - d. En caso de crear una nueva DMA agrupada: fundir las dos DMA's y sustituir todos los identificadores antiguos a los que se referían las dos DMA's

adyacentes por el nuevo identificador que hace referencia a la DMA agrupada.

3. El proceso termina cuando se han recorrido todos los medidores de caudal del sistema.
4. En ese momento, se clasifican y reenumeran todas las nuevas DMA's agrupadas y se vinculan a las DMA's básicas existentes.

La figura muestra el diagrama de flujo del procedimiento implementado en GISRed:

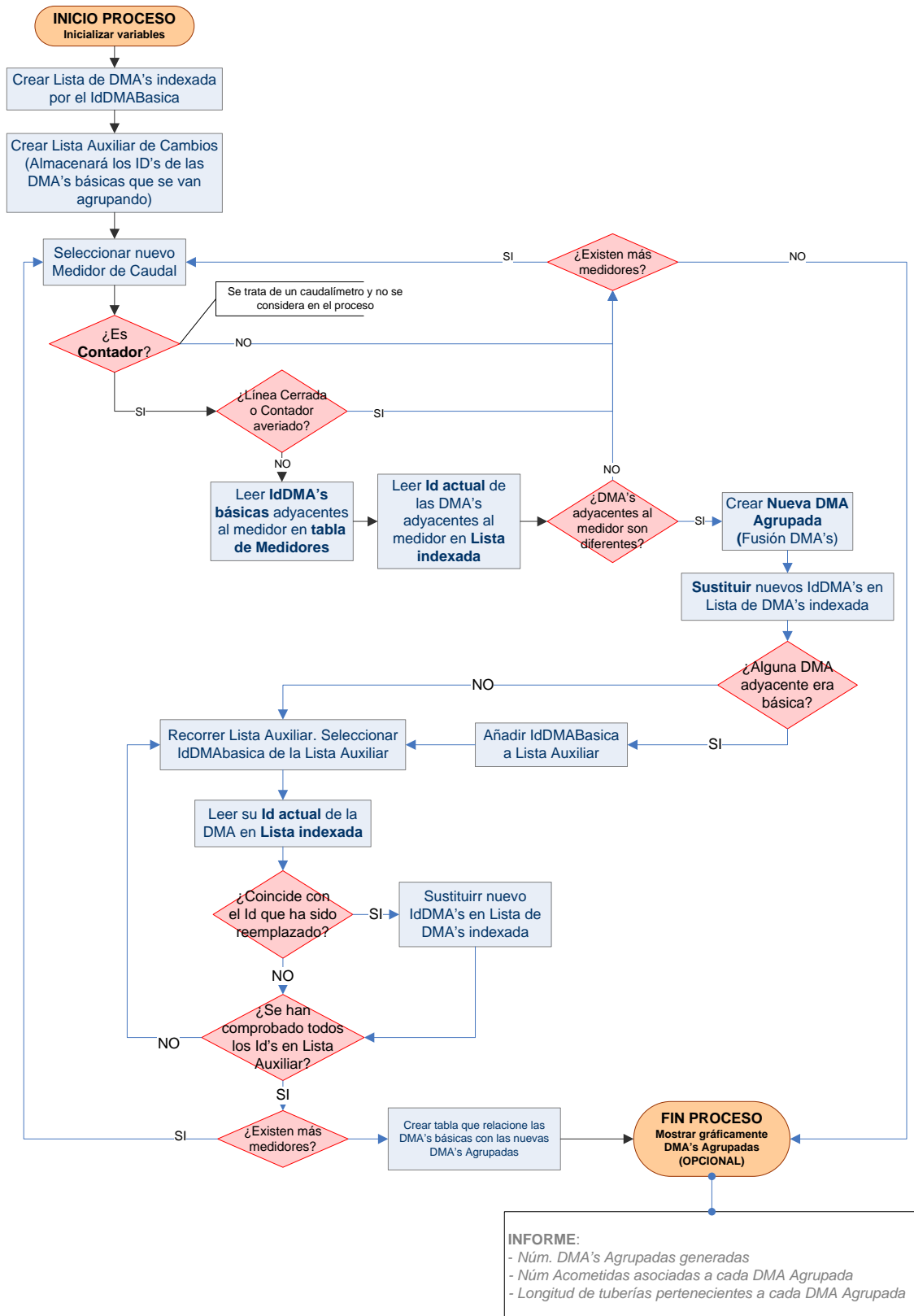


FIGURA 62. PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE LAS DMA'S AGRUPADAS.

Una vez finalizado el proceso, se ofrece un informe en el que se especifica el **número de DMA's agrupadas que se han generado**, el **número de acometidas asociadas a cada una de las DMA's** y **la longitud de red** perteneciente a cada una de ellas. El resultado es un nuevo tema SIG de líneas clasificado por el identificador de las DMA's agrupadas. En él, se aprecian rápidamente

los **sectores de modulación de la demanda existentes en la red**, es decir, aquellos sectores en los que se dispone de información de caudal entrante/saliente con una frecuencia determinada (en general hora a hora), y por ende, de un **patrón de consumo** que es posible aplicar a las demandas base de los nudos de su interior.

8.3.4 Ejemplo de identificación de sectores básicos y sectores de modulación

Como ejemplo de aplicación de los dos procedimientos anteriores, se presenta el modelo matemático de una fracción de una red existente de distribución de agua a presión que contiene una serie de medidores de caudal instalados en puntos concretos del sistema, así como un conjunto de válvulas de seccionamiento que se encuentran cerradas.

Conociendo la topología del modelo de la red y la ubicación tanto de los medidores de caudal como de las válvulas de seccionamiento, se trata de identificar los sectores existentes en la red de distribución, utilizando para ello los algoritmos programados.

El modelo de la red esquematiza más 240 km de tuberías de una red real de diámetros comprendidos entre los 20 y los 1.400 mm. El modelo está formado además por:

- Nudos de caudal: 4.352
- Tuberías: 5.080
- Depósitos: 18
- Partidores y/o aljibes: 2
- Válvulas automáticas de regulación: 19
- Bombas: 16
- Acometidas domiciliarias: 8.241
- Válvulas de seccionamiento cerradas: 48
- Caudalímetros: 11
- Contadores zonales: 7

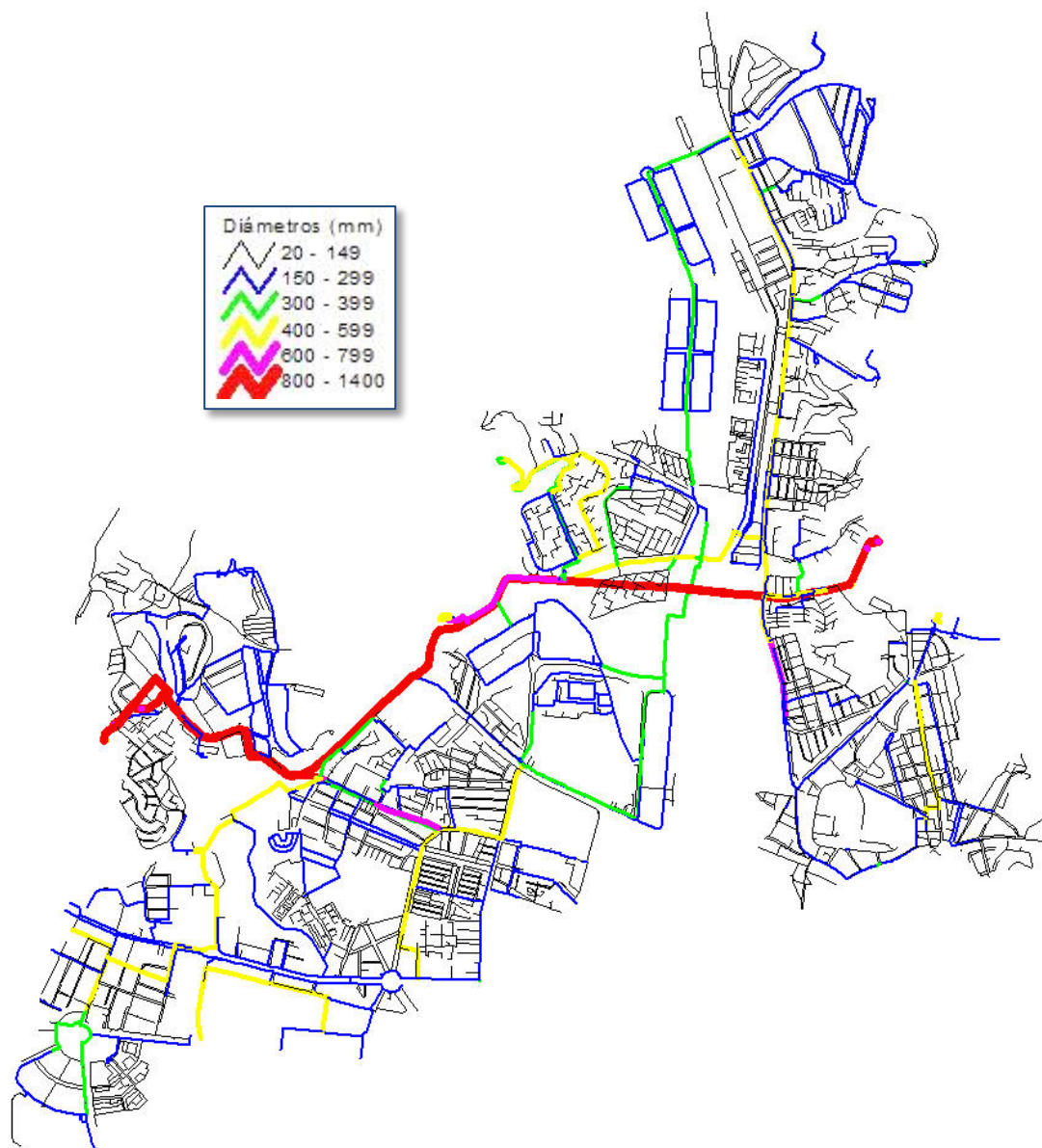


FIGURA 63. RED DE EJEMPLO CLASIFICADA POR DIÁMETROS.

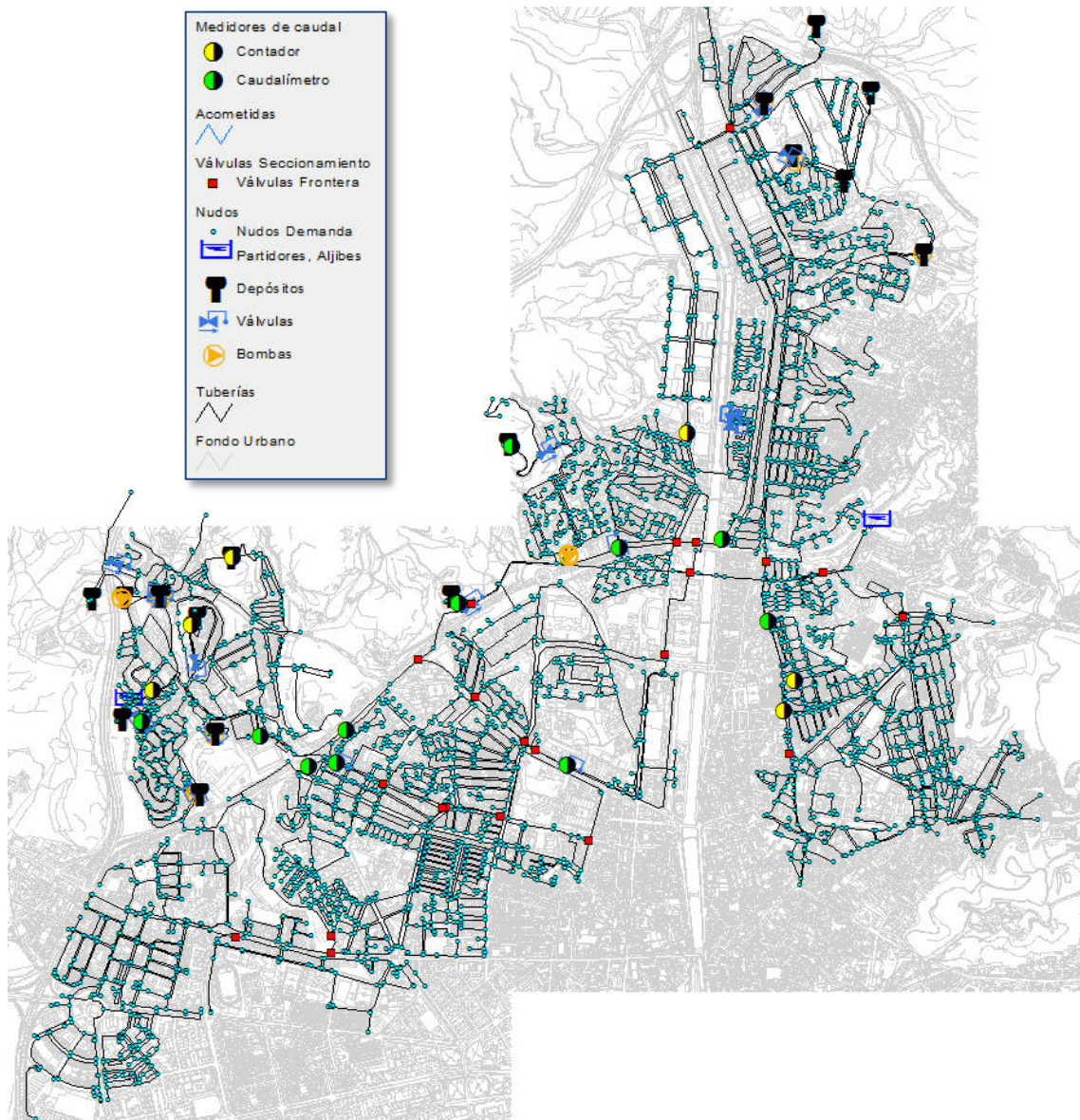


FIGURA 64. MODELO MATEMÁTICO DE LA RED REAL DE EJEMPLO. UBICACIÓN DE MEDIDORES DE CAUDAL Y VÁLVULAS DE SECCIONAMIENTO CERRADAS.

En primer lugar se ejecuta el algoritmo de identificación de sectores hidrométricos básicos. El resultado que se obtiene tras el rastreo y exploración de todo el grafo de la red es el siguiente:

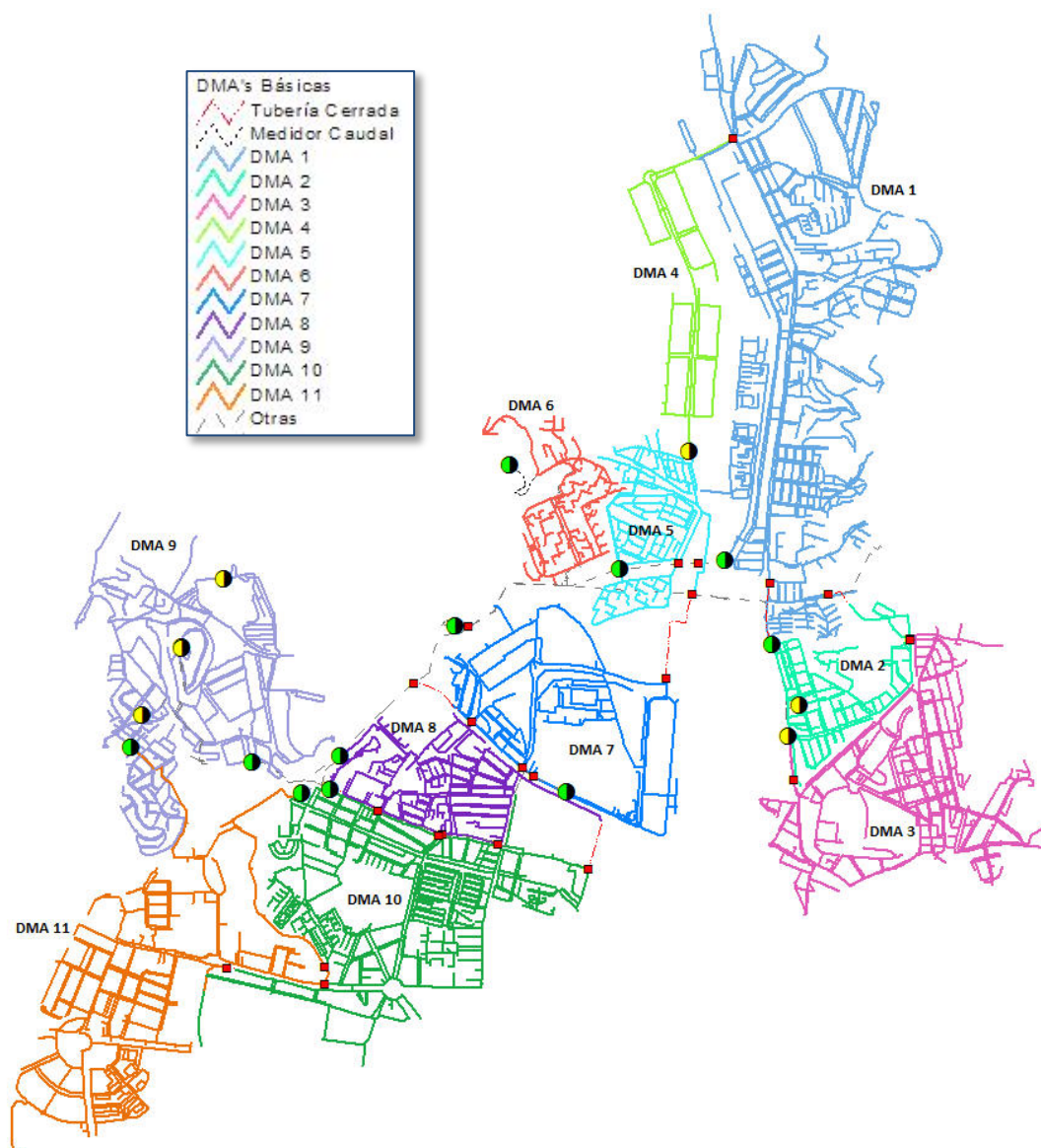


FIGURA 65. DMAS BÁSICAS IDENTIFICADAS POR EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA.

El algoritmo de **búsqueda de DMAs** identifica 11 sectores hidrométricos básicos delimitados por los medidores de caudal y las válvulas de seccionamiento cerradas (válvulas frontera). Cada vez que el algoritmo identifica un sector hidrométrico, identifica también todas aquellas acometidas que pertenecen al sector. Asimismo, a cada uno de los medidores de caudal se le asigna una DMA de entrada y una DMA de salida (el sentido entrada-salida se fija en función del sentido de digitalización de la línea sobre la que está instalado el medidor de caudal). Por último, el algoritmo es capaz de identificar todas aquellas acometidas que quedan aguas arriba o aguas abajo de un medidor de caudal o bien una válvula de seccionamiento cerrada y por tanto, estas acometidas son asignadas al sector hidrométrico correspondiente. En el caso de la red de ejemplo, las características de los sectores identificados son las siguientes:

ID	SECTOR	LONGITUD (km)	Nº ACOMETIDAS
1	DMA 1	53,4	1.558
2	DMA 2	9,7	827
3	DMA 3	26,7	630
4	DMA 4	6,5	7

ID	SECTOR	LONGITUD (km)	Nº ACOMETIDAS
5	DMA 5	10,7	608
6	DMA 6	6,9	140
7	DMA 7	14,7	424
8	DMA 8	12,6	621
9	DMA 9	27	940
10	DMA 10	34,3	1.693
11	DMA 11	25,2	708
12	OTROS (Tuberías de traída y tubos cerrados)	13	85
TOTAL		240,7	8.241

TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DE LOS SECTORES HIDROMÉTRICOS BÁSICOS IDENTIFICADOS CON EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA.

Para finalizar, conocida la tipología de los medidores de caudal (caudalímetro o contador), se ejecuta el algoritmo de **agrupación de DMA's básicas para la identificación de los sectores hidrométricos de modulación**. El objetivo es descubrir el número de sectores controlados únicamente por caudalímetros de entrada y/o salida y poder así conocer en qué sectores va a ser posible, a priori, calcular la modulación de la demanda en función de los datos disponibles de caudal registrado por los caudalímetros. Las características de los distritos hidrométricos de modulación se muestran en la siguiente tabla:

ID	SECTOR DE MODULACIÓN	SECTORES BÁSICOS QUE CONTIENE	LONGITUD (km)	Nº ACOMETIDAS
1	DMA DE MODULACIÓN 1	DMA 1	53,4	1.558
2	DMA DE MODULACIÓN 2	DMA 2 DMA 3	36,4	1.457
3	DMA DE MODULACIÓN 3	DMA 4 DMA 5	17,2	615
4	DMA DE MODULACIÓN 6	DMA 6	6,9	140
5	DMA DE MODULACIÓN 7	DMA 7	14,7	424
6	DMA DE MODULACIÓN 8	DMA 8	12,6	621
7	DMA DE MODULACIÓN 9	DMA 9	27	940
8	DMA DE MODULACIÓN 10	DMA 10	34,3	1.693
9	DMA DE MODULACIÓN 11	DMA 11	25,2	708
TOTAL			240,7	8.241

TABLA 9. CARACTERÍSTICAS DE LOS SECTORES HIDROMÉTRICOS DE MODULACIÓN IDENTIFICADOS CON EL ALGORITMO DE AGRUPACIÓN DE DMAS BÁSICAS.

El resultado gráfico que ofrece el algoritmo es el siguiente:

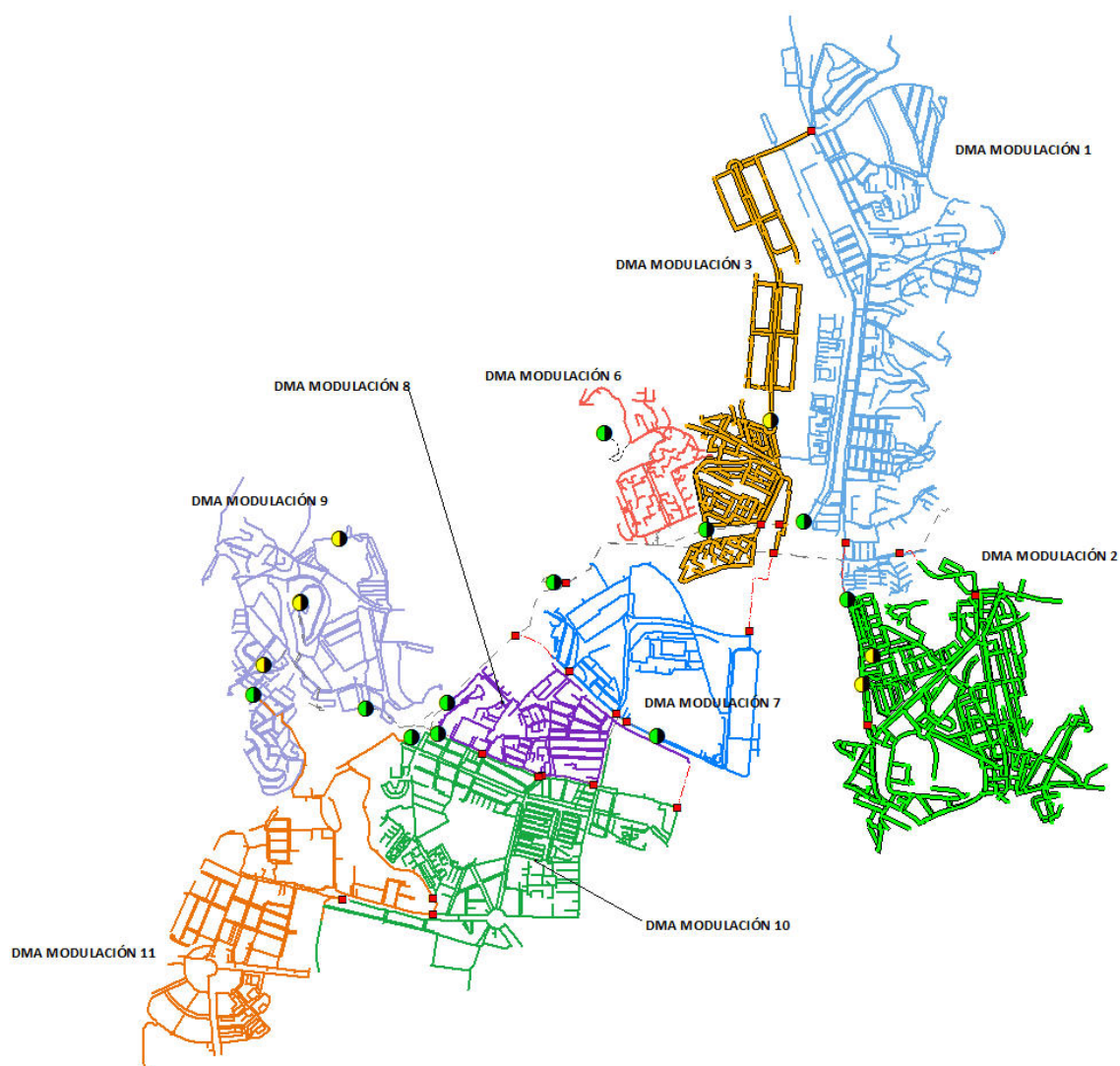


FIGURA 66. IDENTIFICACIÓN DE LOS DISTRITOS HIDROMÉTRICOS DE MODULACIÓN.

Se observa perfectamente cómo los medidores de caudal de tipo 'contador' no delimitan ningún sector de modulación y pasan a ser medidores de caudal redundantes dentro de los mismos. Se aprecia también cómo las DMA's básicas 2 y 3 y las DMA's básicas 4 y 5, quedan respectivamente fusionadas en las DMA's de modulación 2 (color verde) y 3 (color anaranjado).



FIGURA 67. AGRUPACIÓN DE LAS DMA'S BÁSICAS 2, 3, 4 Y 5 EN DOS NUEVAS DMAS DE MODULACIÓN.

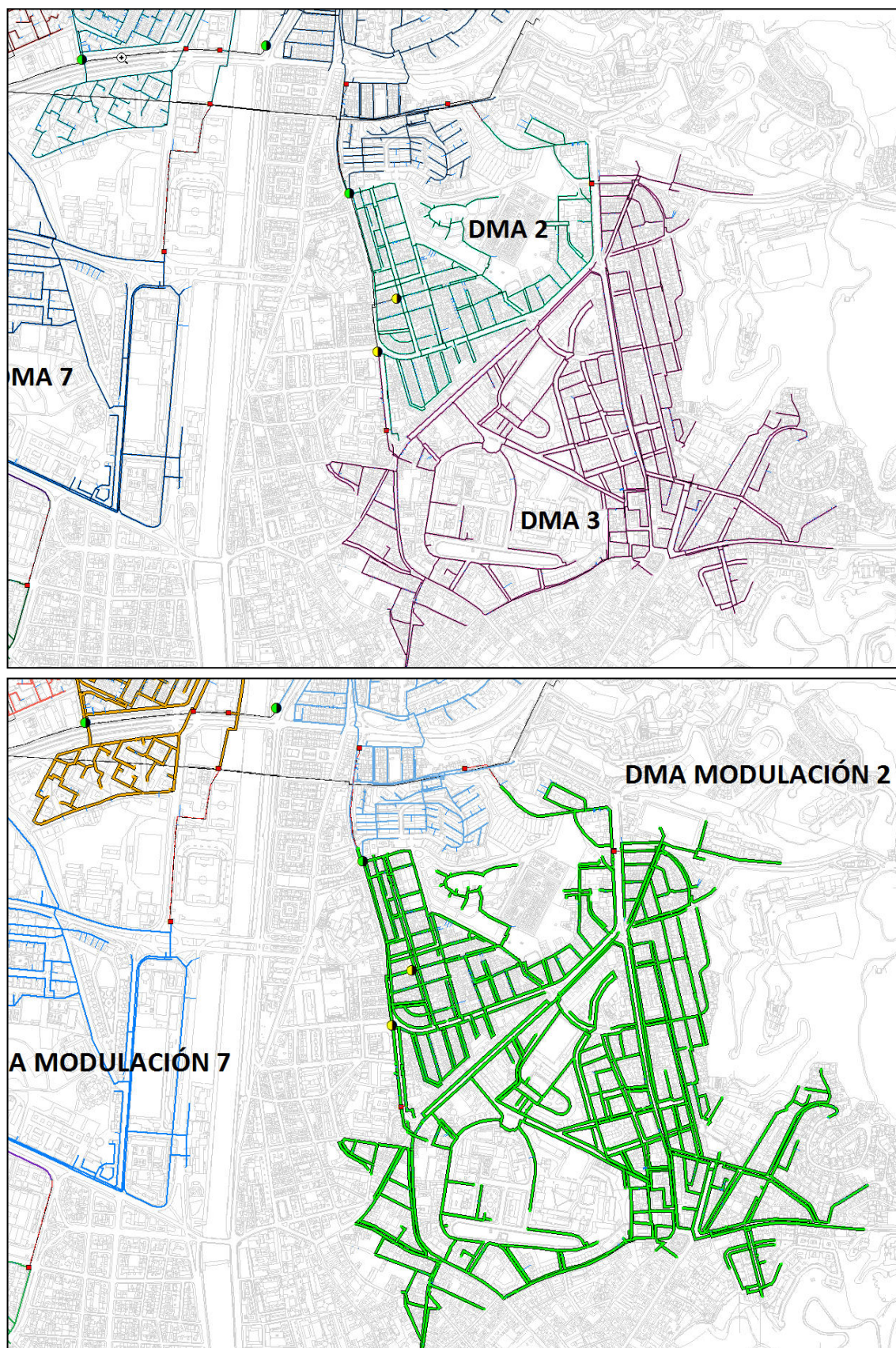


FIGURA 68. DETALLE DE LA AGRUPACIÓN DE DMA'S BÁSICAS EN UNA DMA DE MODULACIÓN.

En definitiva, lo que se desea transmitir con el ejemplo presentado, es la facilidad con la que es posible identificar sectores básicos y de modulación en un modelo de una red de distribución, tan solo con definir la topología del esquema de la red y la posición de los medidores de caudal y de las válvulas de seccionamiento que se encuentran cerradas en un determinado instante. Estas dos herramientas resultan realmente útiles cuando lo que se pretende es **validar una determinada configuración de sectores en la red, o simplemente a la hora de abordar un proyecto de sectorización de una red real.**

8.3.5 Ayudas a la sectorización

La sectorización de una red de distribución de agua a presión es una técnica habitual empleada en el control de fugas mediante la acción directa sobre la presión de cada 'subsistema' de tuberías. Lo que se pretende conseguir con esta técnica es la división de la red en diversas partes o sectores propiamente dichos, en los que el balance hídrico quede perfectamente definido mediante la instalación de una serie de caudalímetros en todos aquellos puntos de entrada y salida a cada sector (denominado por esta razón distrito hidrométrico) y la medición del consumo en su interior mediante los contadores de abonados instalados al efecto, así como la estimación en la medida de lo posible de los consumos autorizados no registrados. Para definir y delimitar los distintos sectores predefinidos, es necesario el cierre de aquellas tuberías que conecten sectores adyacentes, mediante el correspondiente cierre de las válvulas de seccionamiento instaladas en la misma.

Una vez dividida la red en sectores hidrométricos, resulta más fácil evaluar los caudales circulantes y por ende analizar el nivel de pérdidas reales y/o aparentes, sobre todo en periodos nocturnos. Por tanto, el estudio de sectorización supone la medida más efectiva para la detección de pérdidas de agua y priorización de las tareas de reparación de pérdidas reales en los sectores creados de la red.

Tras la sectorización, el control de la presión en cada uno de los sectores hidrométricos debe ser la primera acción a abordar para disminuir el nivel de fugas y reducir la probabilidad de roturas en tuberías, todo ello sin afectar a las presiones de suministro garantizadas por la empresa que gestiona el servicio.

Sin embargo, acometer un estudio de sectorización que resulte eficaz en la gestión y explotación posterior del sistema de abastecimiento, requiere necesariamente de un modelo matemático que permita analizar y evaluar diversas hipótesis de funcionamiento de la red en servicio, sin afectar a la actividad diaria de la misma. Dicho modelo debe ser además fiable a efectos de análisis y diagnóstico del estado y funcionamiento del sistema real.

El uso de herramientas específicas de modelación y análisis de redes constituye un soporte fundamental a la hora de tomar decisiones y obtener conclusiones definitivas. Si a todo ello le añadimos la capacidad de análisis espacial y alfanumérico que proporciona un sistema de información geográfica (SIG), dispondremos entonces de todas las herramientas necesarias para abordar de manera eficaz el estudio en cuestión.

Utilizando de nuevo la teoría de grafos y las técnicas y algoritmos desarrollados, se ha ideado un método automático de sectorización que se basa en la topología del árbol de expansión de mínimo coste (MST) de la red, para generar y proponer sectores hidrométricos que cumplan con un criterio de sectorización. A diferencia del algoritmo de búsqueda de distritos hidrométricos básicos, que únicamente permite identificar sectores existentes en la red en función de la disposición de los medidores de caudal y de las válvulas cerradas, **el nuevo algoritmo desarrollado proporciona una primera aproximación a la sectorización de una red real,**

ofreciendo **de forma automática una configuración de sectores** en base a una serie de criterios que se presentan más adelante. El resultado que proporciona el algoritmo programado en un entorno SIG, es un temático gráfico donde se clasifican por colores, por una parte los distintos sectores propuestos que cumplen aproximadamente con el criterio de sectorización, y por otra, las tuberías que deben cerrarse y la localización de los caudalímetros que deben ser instalados para controlar las entradas y salidas de cada sector. El resultado no deja de ser una primera aproximación al problema de sectorización, que puede refinarse manualmente con la experiencia del personal conocedor de la red.

La utilidad de la herramienta es manifiesta, ya que acometer la sectorización de una red de forma manual puede ser un trabajo arduo y laborioso. Este método, pensado para agilizar dicho proceso, permite llegar a una solución teórica que puede tomarse como base para ajustar con posterioridad los sectores que propone el procedimiento.

A pesar de que los criterios para definir los sectores son múltiples, **el criterio de sectorización implementado se basa en el número de acometidas que contendrá aproximadamente cada sector**. Por tanto, antes de ejecutar el algoritmo, el usuario debe especificar el número de acometidas que tendrá aproximadamente cada sector. Durante el proceso de sectorización automático, el algoritmo trata de generar sectores que contengan el número de acometidas especificado recorriendo el árbol de mínimo coste. El procedimiento posee **una restricción, que consiste en establecer exclusivamente un único punto de entrada al sector**, es decir, el sector queda delimitado por aquellas tuberías en las que el algoritmo estima necesario instalar y cerrar una válvula de seccionamiento y además por un único caudalímetro que controle el caudal entrante al sector. Esta restricción no condiciona excesivamente el diseño de los sectores, ya que siempre es posible añadir algún punto adicional de medición en los límites comunes entre dos sectores.

El procedimiento de sectorización requiere de un tratamiento topológico previo de la red. En concreto, requiere de:

- La definición del **árbol de expansión de mínimo coste** de la red (MST).
- La **ordenación topológica** de la red (ramas y cuerdas del árbol).
- La **agregación de acometidas en las tuberías** del sistema (proceso de acumulación de acometidas en las líneas del modelo).
- Los **conjuntos de corte asociados a cada una de las ramas** del árbol.

El proceso que sigue la aplicación se describe de forma esquemática en la siguiente figura:

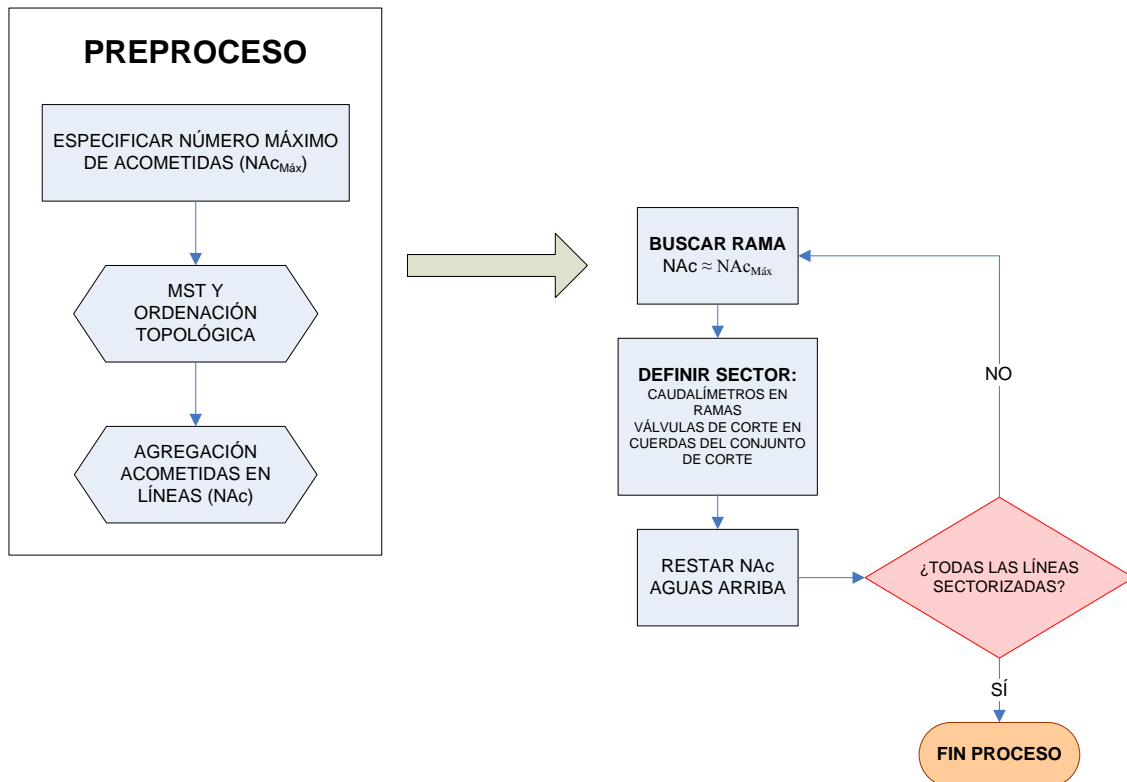


FIGURA 69. PROCESO DE SECTORIZACIÓN AUTOMÁTICA.

Básicamente el proceso requiere de unos pasos previos en los que se debe definir el árbol de expansión de mínimo coste de la red (MST) desde cada una de las fuentes de suministro de la red. Lo ideal es que el peso de las líneas que se vaya a utilizar para obtener los árboles de mínimo coste desde cada fuente de suministro, sean los valores de caudal medio asociados a cada línea (si se dispone de datos suficientes), con lo cual estaremos hablando de un bosque de árboles de expansión de mínimo coste dirigidos. Si no se dispone de información acerca de valores de caudal propios de una simulación hidráulica del modelo de red, se puede optar por obtener el MST en base a la resistencia hidráulica o a los diámetros asociados a cada línea. A continuación se debe realizar una ordenación topológica sobre el grafo de la red asignando el par de índices *OrdTopInd1* e *OrdTopInd2* a cada nudo y línea del sistema. El último paso previo es la agregación de acometidas sobre las ramas del MST definido. De esta forma, cada rama del MST tendrá asociada el número total de acometidas que cuelgan de dicha rama (número total de acometidas aguas abajo).

El algoritmo comienza por **aquellas ramas cuyo valor agregado de acometidas sea aproximadamente igual al número de acometidas máximo fijado como criterio de diseño** ($N_{AC} \approx N_{ACmáx}$). Para estas ramas, se analiza su conjunto de corte asociado y el algoritmo decide si se define un nuevo sector delimitándolo por una serie de **válvulas de corte instaladas en las cuerdas que componen el conjunto de corte y un caudalímetro que deberá instalarse en la rama analizada**. El siguiente paso que realiza el algoritmo consiste en substraer el número de acometidas que quedan dentro del sector definido, de aquellas ramas que pertenecen al árbol aguas arriba. El algoritmo continúa con otra rama adyacente repitiendo el proceso hasta que todas las ramas han sido examinadas e incluidas en algún sector. Este método pretende ser una primera aproximación a sectorizaciones más complejas o bien el **punto de partida para métodos heurísticos que tengan el objetivo de refinar la sectorización**.

Otros criterios de sectorización que se podrían combinar (siguiendo un procedimiento similar al descrito) con el aquí desarrollado, al objeto de obtener sectores más fiables, son:

- **Criterio de población.** En este caso se fija como parámetro estimativo el número máximo de abonados en cada sector. El procedimiento sería análogo al desarrollado, puesto que los abonados (y por ende el número de habitantes) y las acometidas están relacionados directamente.
- **Criterio de demanda máxima.** El parámetro que se fijaría como criterio sería el de la demanda máxima en cada sector.
- **Criterio de longitud de red.** En este caso se especificaría la longitud total de red (km de tubería) en cada sector.
- **Criterio de estratos de presión.** En este caso los sectores generados responderían a los estratos de presión propios de la red objeto de estudio. En este caso concreto, se debería realizar un preproceso en el que se asigna a cada una de las ramas del árbol, la diferencia de cotas entre el nudo más alto y el nudo más bajo de entre todos los nudos pertenecientes al subárbol que cuelga aguas abajo de la rama en cuestión.
- **Criterio combinado.** Consistiría en aplicar varios de los criterios anteriores al mismo tiempo. Para ello, habría que definir unos umbrales máximos y mínimos para cada uno de los parámetros requeridos en cada uno de los criterios anteriores (población, demanda máxima, longitud máxima de red en cada sector), diferencia máxima de cotas dentro de un mismo sector, etc.

Todos estos criterios se basan en métodos deterministas de análisis, y no siempre van a ser capaces de proporcionar una buena aproximación a la sectorización, por lo que podrían ser combinados con métodos heurísticos de apoyo.

8.3.5.1 Ejemplo de sectorización automática de una red

Siguiendo el ejemplo presentado en el apartado anterior, se va a emplear el algoritmo implementado para la **sectorización automática** de una red, basado exclusivamente en el criterio del **número de acometidas** en cada sector, para obtener una primera configuración de sectores en el sistema.

Antes de lanzar el procedimiento automático de sectorización, se lleva a cabo un análisis topológico consistente en:

- La definición del **árbol de expansión de mínimo coste** de la red (MST). Al no disponer de datos de caudal simulado, se opta por emplear la resistencia hidráulica como peso de las líneas del modelo.
- La **ordenación topológica** de la red.
- La **acumulación de acometidas** en las tuberías del modelo.
- Obtención de **todos los conjuntos de corte** asociados a cada una de las ramas del MST.

Tras el análisis, el árbol de la red obtenido se muestra en la siguiente figura:



FIGURA 70. ÁRBOL DE EXPANSIÓN DE MÍNIMO COSTE (MST) ORDENADO TOPOLÓGICAMENTE, LISTO PARA SER SECTORIZADO.

Imaginemos que se quiere abordar un primer estudio de sectorización sin tener más información que las características físicas del modelo de la red y que se desea obtener, en primera aproximación, la ubicación de los caudalímetros y válvulas frontera que definan una configuración de sectores que contenga aproximadamente un número determinado de acometidas. El proceso a seguir consiste en ejecutar el algoritmo de cálculo varias veces para diversos valores del número de acometidas hasta dar con la mejor configuración. A continuación se muestra la configuración de sectores y los resultados obtenidos para un criterio de 500, 620 y 1.000 acometidas por sector.

► **Nº ACOMETIDAS POR SECTOR: 500**

Tiempo de cálculo: 17 segundos

Número total de líneas del modelo⁴ analizadas: 5.115

Número de **SECTORES: 18**

Número de **tuberías** sectorizadas: **4.994**

Número de **acometidas** sectorizadas = **8.205**

Número de **válvulas de seccionamiento** a cerrar = **70**

Número de **caudalímetros** a instalar = **18**

RESUMEN DE LA SECTORIZACIÓN PARA 500 ACOMETIDAS		
SECTOR	Nº Tuberías	Nº Acometidas
Sector 1	164	491
Sector 2	253	508
Sector 3	547	510
Sector 4	399	489
Sector 5	158	523
Sector 6	301	523
Sector 7	184	458
Sector 8	79	448
Sector 9	176	446
Sector 10	432	463
Sector 11	698	461
Sector 12	91	435
Sector 13	247	426
Sector 14	234	617
Sector 15	225	361
Sector 16	260	528
Sector 17	528	514
Sector 18	16	4
<i>Tuberías con válvula secc.⁵</i>	70	--
<i>Tuberías con medidor</i>	18	--
TOTAL	5.080	8.205⁶

TABLA 10. CARACTERÍSTICAS DE LA SECTORIZACIÓN AUTOMÁTICA PARA UN CRITERIO DE 500 ACOMETIDAS.

⁴ Incluyendo tuberías, bombas y válvulas de regulación modelizadas.

⁵ Tuberías en las que se debería instalar y cerrar una válvula de seccionamiento.

⁶ Existen 36 acometidas no asignadas a priori a ningún sector, debido a que están conectadas a tuberías con medidor o válvula frontera.

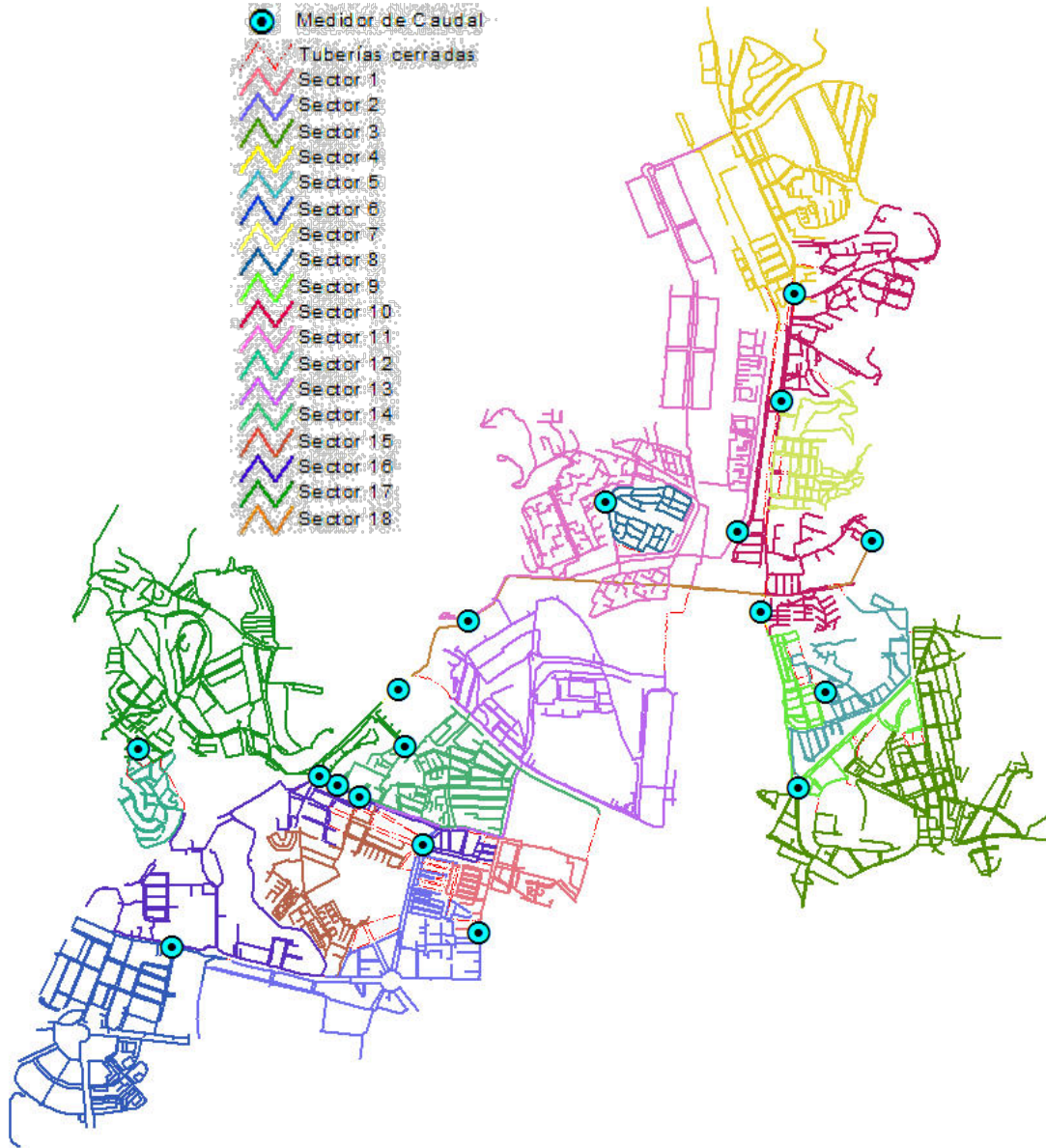


FIGURA 71. RED SECTORIZADA AUTOMÁTICAMENTE SIGUIENDO UN CRITERIO DE 500 ACOMETIDAS POR SECTOR.

► **Nº ACOMETIDAS POR SECTOR: 620**

Tiempo de cálculo: 16 segundos

Número total de líneas del modelo⁷ analizadas: 5.115

Número de **SECTORES: 14**

Número de **tuberías** sectorizadas: **5.011**

Número de **acometidas** sectorizadas = **8.205**

Número de **válvulas de seccionamiento** a cerrar = **57**

Número de **caudalímetros** a instalar = **14**

RESUMEN DE LA SECTORIZACIÓN PARA 620 ACOMETIDAS		
SECTOR	Nº Tuberías	Nº Acometidas
Sector 1	248	620
Sector 2	353	622
Sector 3	379	616
Sector 4	605	624
Sector 5	583	610
Sector 6	325	705
Sector 7	159	529
Sector 8	153	737
Sector 9	143	493
Sector 10	300	501
Sector 11	600	691
Sector 12	266	460
Sector 13	286	661
Sector 14	609	336
<i>Tuberías con válvula secc.⁸</i>	57	--
<i>Tuberías con medidor</i>	14	--
TOTAL	5.080	8.205⁹

TABLA 11. CARACTERÍSTICAS DE LA SECTORIZACIÓN AUTOMÁTICA PARA UN CRITERIO DE 620 ACOMETIDAS.

⁷ Incluyendo tuberías, bombas y válvulas de regulación modelizadas.

⁸ Tuberías en las que se debería instalar y cerrar una válvula de seccionamiento.

⁹ Existen 36 acometidas no asignadas a priori a ningún sector, debido a que están conectadas a tuberías con medidor o válvula frontera.

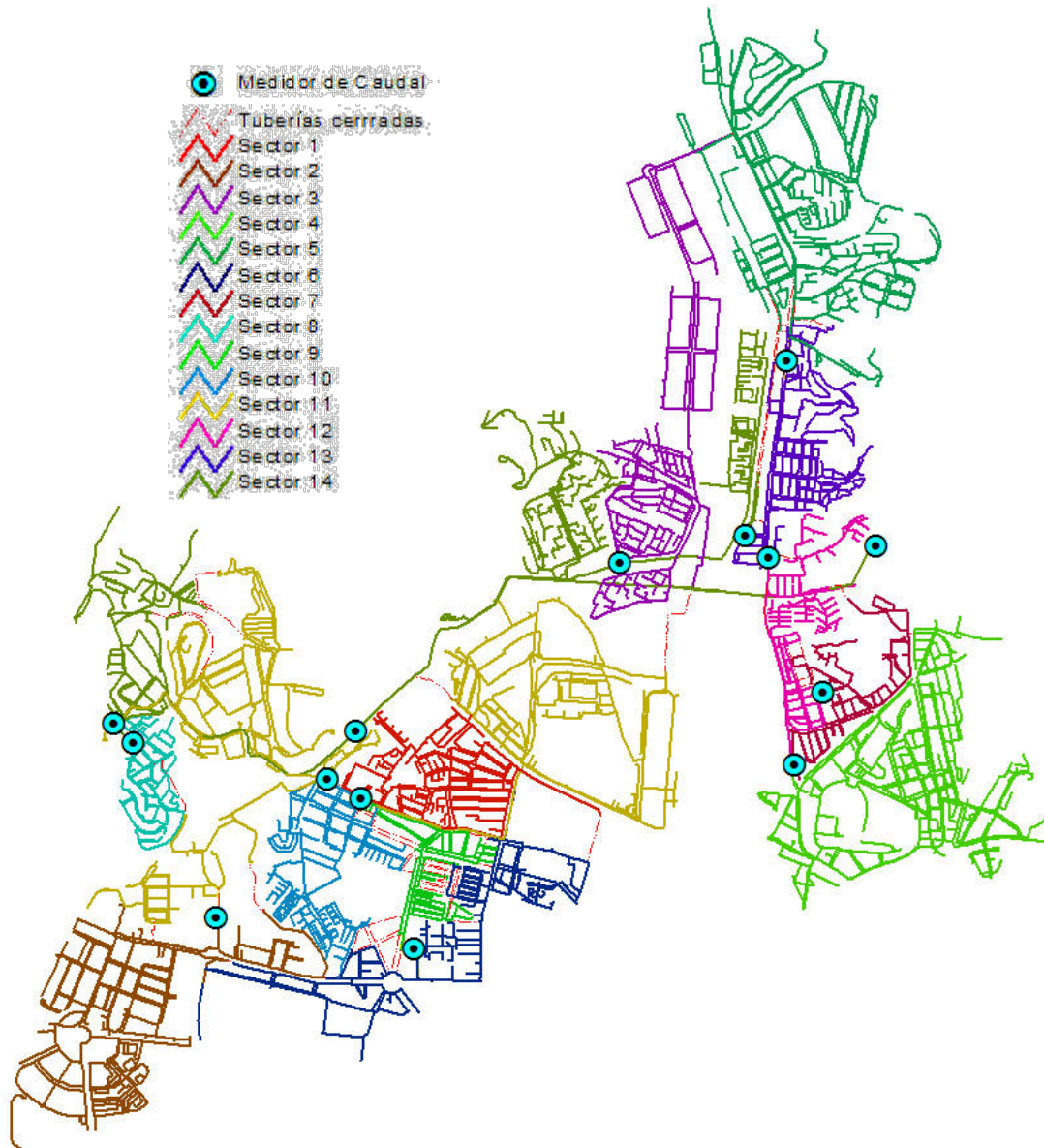


FIGURA 72. RED SECTORIZADA AUTOMÁTICAMENTE SIGUIENDO UN CRITERIO DE 620 ACOMETIDAS POR SECTOR.

► **Nº ACOMETIDAS POR SECTOR: 1.000**

Tiempo de cálculo: 12 segundos

Número total de líneas del modelo¹⁰ analizadas: 5.115

Número de **SECTORES: 9**

Número de **tuberías** sectorizadas: **5.050**

Número de **acometidas** sectorizadas = **8.205**

Número de **válvulas de seccionamiento** a cerrar = **23**

Número de **caudalímetros** a instalar = **9**

RESUMEN DE LA SECTORIZACIÓN PARA 1.000 ACOMETIDAS		
SECTOR	Nº Tuberías	Nº Acometidas
Sector 1	429	999
Sector 2	605	1126
Sector 3	277	846
Sector 4	327	771
Sector 5	762	767
Sector 6	878	1271
Sector 7	789	914
Sector 8	438	712
Sector 9	543	799
<i>Tuberías con válvula secc.¹¹</i>	23	--
<i>Tuberías con medidor</i>	9	--
TOTAL	5.080	8.205¹²

TABLA 12. CARACTERÍSTICAS DE LA SECTORIZACIÓN AUTOMÁTICA PARA UN CRITERIO DE 1.000 ACOMETIDAS.

¹⁰ Incluyendo tuberías, bombas y válvulas de regulación modelizadas.

¹¹ Tuberías en las que se debería instalar y cerrar una válvula de seccionamiento.

¹² Existen 36 acometidas no asignadas a priori a ningún sector, debido a que están conectadas a tuberías con medidor o válvula frontera.



TABLA 13. RED SECTORIZADA AUTOMÁTICAMENTE SIGUIENDO UN CRITERIO DE 1.000 ACOMETIDAS POR SECTOR.

Tras los resultados obtenidos, queda de manifiesto que para el criterio de 1.000 acometidas por sector, la configuración de sectores y la ubicación de caudalímetros es la más similar a la configuración de sectores existentes en la red y que se mostraron en el ejemplo del apartado 8.3.4 de este capítulo.

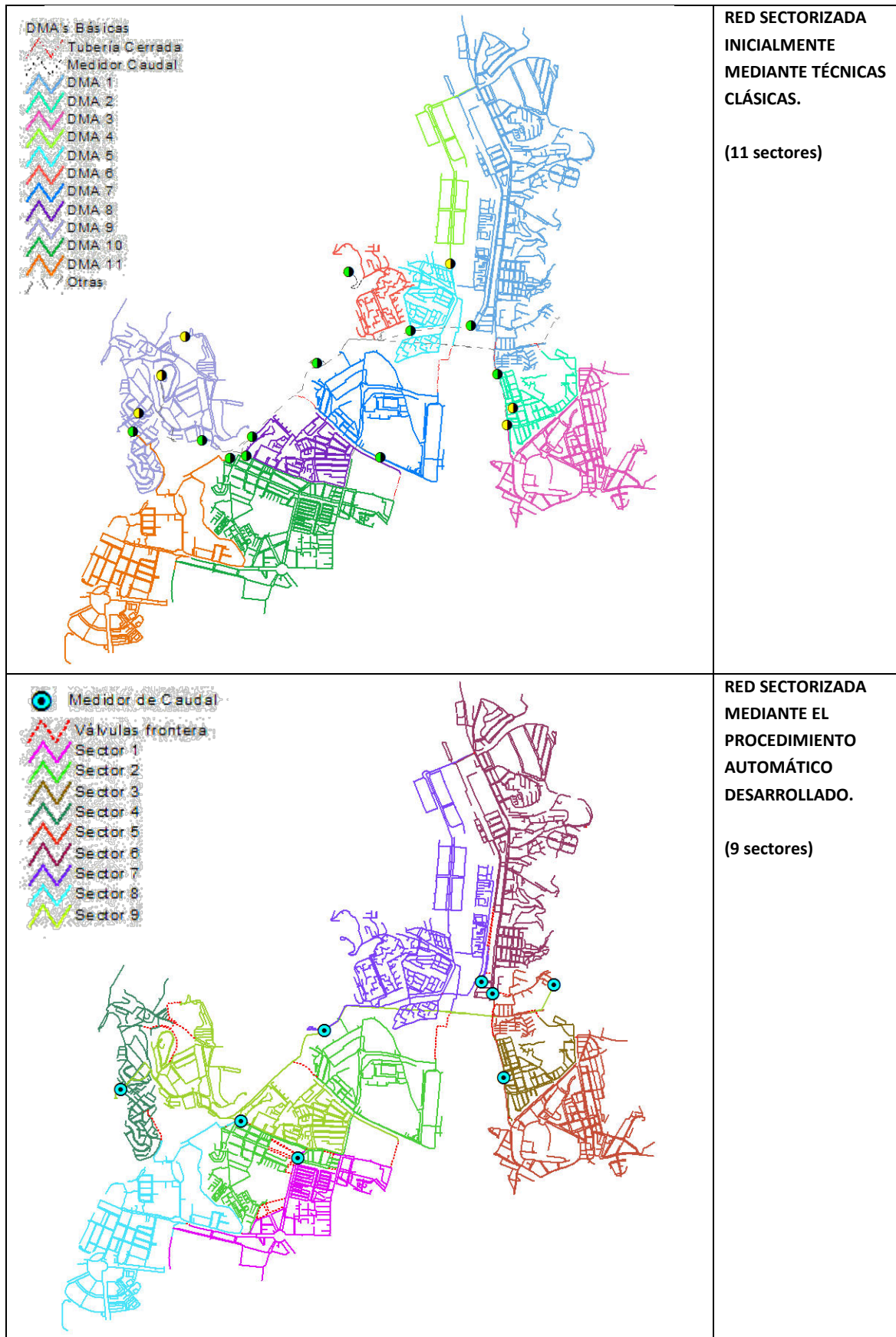


FIGURA 73. COMPARACIÓN DE LA SECTORIZACIÓN CLÁSICA Y LA SECTORIZACIÓN AUTOMÁTICA PARA UN CRITERIO DE 1.000 ACOMETIDAS POR SECTOR.

CAPÍTULO 9

APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS A LA
ESQUELETIZACIÓN DE MODELOS DE REDES

CAPÍTULO 9. APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE GRAFOS A LA ESQUELETIZACIÓN DE MODELOS DE REDES

9.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo aborda el tema de la simplificación de modelos de redes complejas de distribución de agua a presión utilizando un novedoso procedimiento basado en los conceptos y algoritmos de la teoría de grafos propuestos con todo detalle en los capítulos anteriores.

Las clásicas asociaciones en serie y paralelo tienen en la práctica muchas limitaciones, pues para asociar dos tuberías en serie no debería haber ningún consumo en el nudo de unión, mientras que la asociación en paralelo exige que las tuberías a asociar sean únicas, de diámetros uniformes y sin derivaciones, situaciones que en la realidad se dan con poca frecuencia. En la práctica, para aproximarnos a dichas situaciones tenemos que efectuar algunas simplificaciones previas. Aún así, existen con frecuencia estructuras topológicas que no se ajustan a los casos anteriores, como mallas triangulares, cuadrangulares o formadas por numerosas líneas; mallas anidadas, etc, las cuales no pueden simplificarse en base a las anteriores asociaciones.

El método más simple de simplificación de una red consiste en la eliminación selectiva de todas aquellas tuberías cuyo diámetro sea inferior a un diámetro escogido como umbral. Según la fórmula de pérdidas de carga propuesta por Darcy-Weisbach, la capacidad de transporte de una tubería disminuye drásticamente con el diámetro de ésta, en concreto con la raíz cuadrada de la 5ª potencia del diámetro para una misma pérdida de carga unitaria, de modo que la eliminación de tuberías por debajo de un cierto diámetro puede aceptarse. Sin embargo este criterio debería aplicarse solamente para tuberías que forman parte de ramificaciones, y además siguiendo un cierto orden para evitar que la red quede desconectada. En muchas ocasiones ocurre que la red está fuertemente mallada para los diámetros por debajo del umbral establecido, con lo que la total eliminación de estos diámetros puede conducir a una sensible disminución de su capacidad de transporte con respecto a la de la red original.

Un criterio alternativo se fundamenta en la especificación de una longitud mínima a conservar, aunque lo más correcto sería especificar un coeficiente de conductancia mínimo (ó de resistencia máxima), si bien en este caso el coeficiente debería relativizarse de alguna forma respecto a los valores medios, máximo y mínimo del mismo para las diferentes tuberías que configuran la red, ya que especificar un valor absoluto de dicho coeficiente resulta difícil a priori, al desconocer su orden de magnitud para el conjunto de tuberías estudiado.

Asimismo, cabe destacar que la eliminación de tuberías o su asociación conlleva muchas veces la eliminación de nudos del modelo, y con ello el traslado de los consumos aplicados en dichos nudos a otros nudos adyacentes, al objeto de conservar la carga total del modelo. Así pues, en el proceso de simplificación, al igual que se impone un límite en cuanto a los diámetros máximos o longitudes máximas a eliminar, resulta conveniente imponer también un límite en cuanto a la demanda máxima permitida en un nudo para que éste pueda ser eliminado y su demanda trasladada a los nudos contiguos. El requisito fundamental para poder reubicar la demanda del nudo es que todos aquellos nudos adyacentes que se vayan a sobrecargar, **posean la misma curva de modulación** que el nudo que se pretenda eliminar.

Finalmente hay que mencionar que las redes no están compuestas únicamente de tuberías. Existen otros elementos como bombas, válvulas, depósitos, emisores, puntos de inyección de caudal, etc, que determinan el comportamiento hidráulico de las mismas, y cuya eliminación puede provocar notables discrepancias entre el modelo original y el simplificado. Por este motivo, el criterio que se sigue mayoritariamente en estos casos es mantener todos estos elementos tal cual en el modelo simplificado, de modo que los criterios anteriormente descritos se aplican en la práctica solamente a tuberías y nudos de demanda.

En síntesis, el proceso de simplificación de una red debe tener en cuenta muchos factores, como diámetros o longitudes mínimas a mantener, caudales mínimos de nudo a preservar, y sobre todo el mantenimiento de la conectividad de la red y su capacidad de transporte. En cualquier caso, **a medida que avanza el proceso de simplificación, el comportamiento de la red simplificada se irá siempre alejando del comportamiento de la red original, y éste debe detenerse cuando las desviaciones superen una determinada tolerancia.**

En los apartados que siguen, se propone una metodología basada en la topología del árbol de expansión de mínima resistencia hidráulica asociado al modelo de red, que sistematiza el proceso de simplificación siguiendo unas reglas básicas y robustas, que garantizan en todo momento tanto la conectividad del sistema como su capacidad de transporte, al tiempo que permiten automatizar las diversas etapas de simplificación.

9.2 METODOLOGÍA DE ESQUELETIZACIÓN DE UN MODELO

La bibliografía clásica cita como principales métodos de simplificación de redes la eliminación de **ramas terminales**, la **asociación de tuberías en serie** y la **asociación de tuberías en paralelo**. La metodología de simplificación que se propone, emplea todas estas técnicas en forma de reglas básicas que aplicadas de forma secuencial y repetitiva, permiten obtener un modelo simplificado, cuyo comportamiento hidráulico es análogo al modelo original.

Tras analizar la problemática planteada y los objetivos buscados, las reglas básicas que tiene en cuenta el procedimiento implementado son:

- Regla 1. *Eliminación de ramas terminales.*
- Regla 2. *Eliminación de nudos intermedios.*
- Regla 3. *Reducción de mallas simples.*
- Regla 4. *Reducción de mallas complejas.*

Las dos primeras reglas están orientadas a nudos de demanda, y su objetivo básico es **reducir las ramificaciones y los tramos largos segmentados**. Las dos últimas están orientadas a tuberías y su objetivo es reducir el nivel de mallado de la red. Por otra parte, el **orden de aplicación de las mismas es muy importante** para poder garantizar la coherencia de los resultados, ya que determinadas reglas dependen de la ejecución previa de las reglas anteriores para proseguir correctamente con el proceso de simplificación.

El procedimiento de simplificación implementado requiere de un análisis topológico avanzado previo, mediante el cual se obtiene toda la información base que permite llevar a cabo la esqueletización del modelo. La información topológica necesaria para poder simplificar el modelo de la red se fundamenta en el árbol de expansión de mínimo coste (por ejemplo el de mínima resistencia hidráulica) y consiste en:

1. La **topología de árbol**. Se trata de caracterizar cada una de las líneas del modelo como ramas o cuerdas, identificar cuál es la rama de acceso a cada nudo y calcular el grado de conectividad de cada uno de los nudos del árbol.
2. **Orden topológico**. Consiste en identificar los dos índices topológicos que permiten la navegación e identificación de partes del árbol mediante simples consultas.
3. **Acumulación de caudales en las líneas del modelo**. Este paso consiste en la acumulación de las demandas base asignadas a los nudos del modelo, en las líneas caracterizadas como ramas del árbol, siguiendo el sentido aguas arriba hacia las fuentes de producción.

Por tanto, antes de comenzar con el proceso de simplificación, resulta necesario ejecutar algunos de los algoritmos fundamentados en la teoría de grafos y descritos en capítulos anteriores, para poder determinar de forma automática toda la información topológica requerida.

9.3 ELIMINACIÓN DE RAMAS TERMINALES

Esta regla se basa en la identificación de los nudos extremos de la red, esto es, aquellos que son alimentados a través de una única tubería. En términos topológicos, estos nudos son fácilmente identificables, ya que su grado de conectividad, tanto física como topológica, es 1. En esta primera etapa, el objetivo es detectar todos estos nudos e intentar eliminar tanto el nudo como su línea de acceso, trasladando su demanda base al nudo aguas arriba, tal como se indica en la figura siguiente.

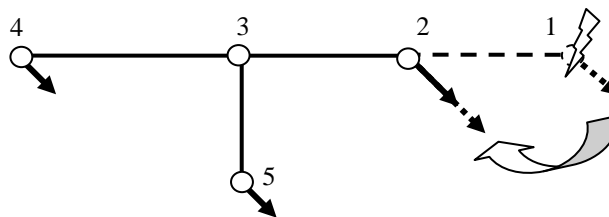


FIGURA 74. REGLA 1. ELIMINACIÓN DE RAMAS TERMINALES.

Para que la eliminación del ramal sea factible han de cumplirse los siguientes criterios:

- Que tanto el propio nudo como el nudo aguas arriba sean **nudos de demanda simple** con demanda base **positiva**. Se descartan por tanto depósitos, embalses, nudos de demanda múltiple, nudos con emisor de caudal y puntos de inyección de caudal (demanda base negativa).
- Que la **demanda** en el nudo sea **menor que el umbral** especificado.
- Que la **curva de modulación** del nudo a eliminar sea la **misma** que la del nudo aguas arriba
- Que el nudo **no** sea un punto de **inyección de calidad**, ni figure referenciado en ninguna **ley de control**.
- Que la línea de acceso sea una **tubería simple abierta**, descartando todas las tuberías cerradas o con válvula de retención, así como válvulas y bombas.

- Que el **diámetro** de la tubería de acceso, su **longitud** o su **conductancia** hidráulica sea **menor que el umbral** especificado.
- Que **ni el nudo a eliminar ni la tubería aguas arriba** se hayan declarado como **elementos a preservar**.

Si se cumplen todos estos requisitos, la **secuencia** que se sigue **para eliminar la rama terminal** es la siguiente:

1. *Traslado de la demanda base del nudo al nudo aguas arriba.*
2. *Eliminación del nudo terminal.*
3. *Eliminación de la línea de acceso.*
4. *Reducción en uno del grado de conectividad del nudo aguas arriba.*

9.3.1 Procedimiento implementado en ordenador

1. Identificación de todos los nudos de grado de conectividad 1 de la red y acumulación en una pila LIFO (*Last-In-First-Out*).
2. Extracción de la pila del primer nudo accesible (último almacenado).
3. Identificación de la línea de acceso al nudo a través de la estructura de árbol de la red.
4. Verificación de la factibilidad de la operación conforme a los criterios anteriores aplicados al nudo y la línea de acceso. Si se cumplen todos los requisitos, la operación es factible y el proceso continúa, de lo contrario el proceso vuelve al paso 2 en busca del siguiente nudo terminal.
5. Ejecución de la operación de simplificación en el orden siguiente:
 - 5.1. Traslado de la demanda base del nudo al nudo aguas arriba.
 - 5.2. Eliminación del nudo terminal.
 - 5.3. Eliminación de la línea de acceso.
 - 5.4. Reducción en uno del grado de conectividad del nudo aguas arriba.
6. Si el grado de conectividad del nudo aguas arriba pasa a ser uno (esto es, si originalmente era dos), incorporar el nuevo nudo a la pila LIFO.
7. Volver al paso 2 mientras queden nudos en la pila
8. El proceso termina cuando se vacía la pila.

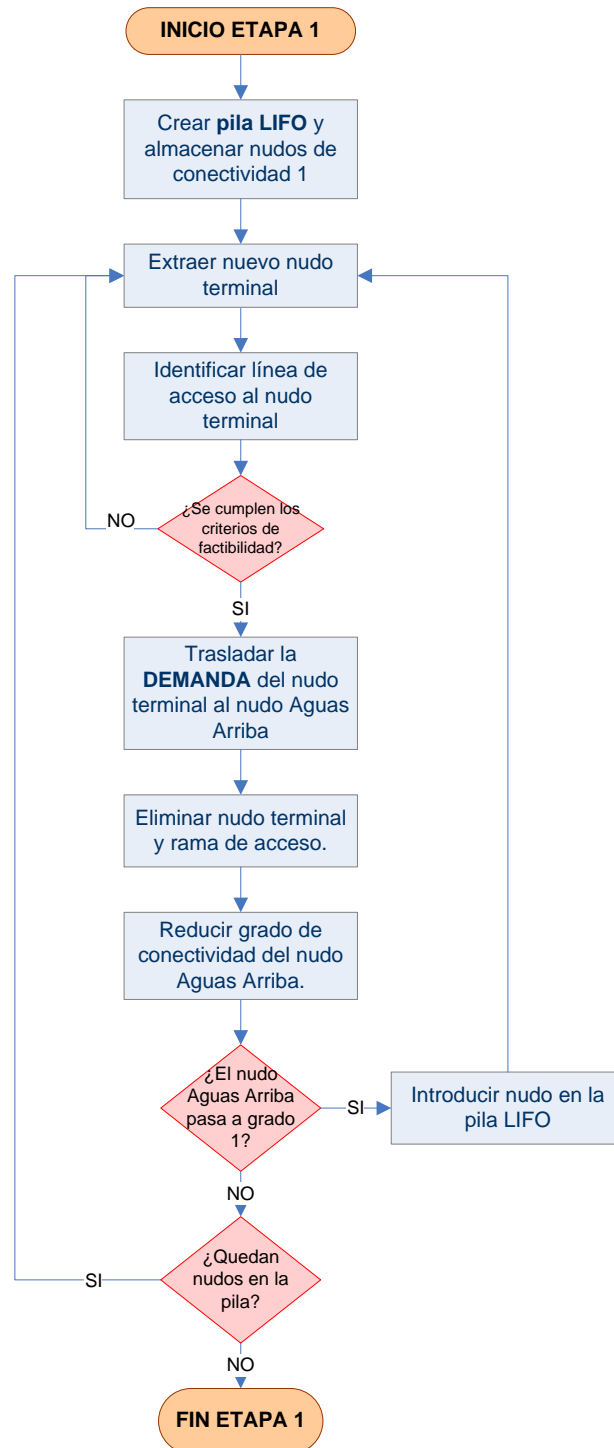


FIGURA 75. PROCEDIMIENTO DE ELIMINACIÓN DE RAMAS TERMINALES (ETAPA 1).

9.3.1.1 Observaciones

- En el caso de ramales únicos segmentados, la eliminación del último tramo de tubería provocará la reducción del grado de conectividad del nudo aguas arriba (de dos pasará a uno), y con ello su incorporación a la pila utilizada. El paso siguiente será, en consecuencia, la eliminación del segmento aguas arriba. Este procedimiento se repite hasta eliminar totalmente la rama siempre que se cumplan todos los criterios de factibilidad establecidos.

- El proceso de eliminación de un ramal termina temporalmente cuando se encuentra un nudo de grado de conectividad tres o mayor (siempre y cuando se den todos los criterios de factibilidad).
- Es posible que un nudo de grado de conectividad 3 pase a convertirse en otro de grado 2 tras eliminar un ramal aguas abajo, y a continuación de conectividad 1 tras eliminar el segundo ramal, con lo que el proceso de eliminación de tuberías podría continuar en el sentido aguas arriba. De este modo se puede llegar a eliminar totalmente una red arborescente. Por ejemplo, en el caso de la siguiente figura se puede comenzar eliminando el nudo 1. Su eliminación conlleva seguidamente la eliminación del nudo 2, y el proceso se detendría al llegar al nudo 3, por tener aún grado de conectividad 2. Se elige ahora otro nudo de grado de conectividad 1, tal como el 5, cuya eliminación convierte el grado de conectividad del nudo 3 en 1, haciendo ya factible eliminar este nudo y continuar aguas arriba.

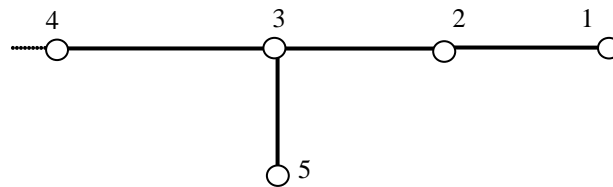


FIGURA 76. ELIMINACIÓN DE UN NUDO DE CONECTIVIDAD 3 SIGUIENDO LA REGLA 1.

- Es posible que durante la eliminación de un ramal, el algoritmo anterior se detenga en un determinado punto por encontrar un diámetro superior al umbral fijado. Aunque aguas arriba el diámetro volviera a disminuir, ese tramo ya no se eliminaría al haberse detenido el proceso con anterioridad en ese ramal. De este modo, pueden quedar tuberías de menor diámetro atrapadas en la red simplificada, pero ello es coherente, pues su eliminación sin más, basada únicamente en el valor del diámetro, hubiera dejado tramos de tubería desconectados. No obstante, es posible aún eliminar de forma coherente estos tramos 'atrapados' de pequeño diámetro aplicando las reglas subsiguientes.
- La topología de árbol previamente definida sobre la red original no se destruye por el hecho de eliminar ramas terminales, ya que el proceso solo afecta a las ramas, y las líneas de acceso a los nudos que permanecen no se modifican. Todos los parámetros topológicos, incluido el carácter de rama o cuerda, la línea de acceso y el orden topológico se mantienen para los nudos y líneas que no se han eliminado.

La aplicación de esta regla no modifica para nada el comportamiento hidráulico de la red, ya que tan solo se eliminan ramificaciones terminales. Así pues, **si se aplicase únicamente esta regla, las presiones en los nudos del modelo simplificado deberían ser exactamente las mismas que en los nudos correspondientes del modelo original.**

9.4 ELIMINACIÓN DE NUDOS INTERMEDIOS

La segunda regla trata de eliminar los nudos con grado de conectividad 2, denominados nudos intermedios o de paso por no derivar caudal hacia otras tuberías (aunque se admiten caudales de demanda en dichos nudos), ni confluir en ellos el caudal procedente de otras tuberías. La eliminación de este tipo de nudos equivale en cierto modo a realizar una asociación de tuberías en serie, pero teniendo en cuenta que el nudo intermedio puede ser un punto de suministro de demanda.

El procedimiento de eliminación de estos nudos consiste en trasladar primeramente la demanda del nudo intermedio a los nudos extremos de las dos líneas que convergen en él, y a

continuación calcular la tubería hidráulicamente equivalente a ambas, con el fin de sustituir las dos tuberías por una única, tal como se ilustra en la figura siguiente.

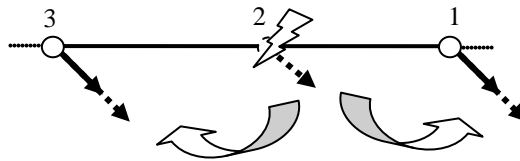


FIGURA 77. REGLA 2. ELIMINACIÓN DE NUDOS INTERMEDIOS.

Para que esta operación sea factible ha de cumplirse una serie de requisitos:

- Que el nudo intermedio sea de **conectividad 2** y sus **nudos opuestos no coincidan** para evitar la creación de bucles o lazos, es decir, tuberías que empiezan y acaban en el mismo nudo.
- Que tanto el **nudo a eliminar como los nudos opuestos sean nudos de demanda simple** con demanda base positiva. Se descartan por tanto los depósitos, embalses, nudos de demanda múltiple, nudos con emisor de caudal y puntos de inyección de caudal, es decir, nudos con demanda base negativa.
- Que la **demanda** en el nudo sea **menor que el umbral** especificado.
- Que la **curva de modulación** sea la **misma** que la de **los nudos opuestos** de las líneas que confluyen en él.
- Que el nudo **no** sea un **punto de inyección de calidad**, ni figure **referenciado** en las **leyes de control**.
- Que **las dos líneas que confluyen en él** sean **tuberías simples abiertas**. Se descartan las válvulas, las bombas y todas aquellas tuberías cerradas o con válvula de retención.
- Que **ni el nudo a eliminar ni las líneas** que confluyen en él se hayan declarado como **elementos a preservar**.

Si se cumplen todos estos requisitos, la **secuencia** que se sigue **para eliminar el nudo intermedio** es la siguiente:

1. *Trasladar la demanda base del nudo intermedio a sus dos nudos adyacentes.*
2. *Eliminar el nudo intermedio.*
3. *Eliminar las dos tuberías que confluyen en dicho nudo.*
4. *Crear una nueva tubería equivalente que conecte los nudos extremos de las dos tuberías eliminadas.*

9.4.1 Criterios para llevar a cabo la simplificación

Cuando entre dos tuberías conectadas en serie no hay demanda en el nudo intermedio, ambas pueden asociarse en una tubería equivalente a todos los efectos, con un comportamiento hidráulico idéntico al del conjunto original, sean cuales sean las condiciones del flujo ya que las fórmulas de conversión son universales. Sin embargo, cuando existe una demanda en el nudo

intermedio, ésta debe trasladarse previamente a los nudos extremos que permanecen, y las fórmulas a aplicar para trasladar correctamente la demanda, a fin de obtener un comportamiento hidráulico equivalente, dejan ya de ser universales, pasando a depender en la práctica del caudal de paso, de su sentido, de la demanda propiamente dicha, así como de las características físicas de ambas conducciones.

Para trasladar la demanda en este segundo caso, se plantean diversas alternativas. Por ejemplo, asignar el 50 % a cada nudo extremo, o bien repartir la demanda entre ambos nudos en proporción inversa a las longitudes de cada tramo, o bien de sus raíces cuadradas. Otras veces se prefiere dejar al usuario que fije el porcentaje de reparto. Son todos ellos criterios aproximados que pueden ser válidos cuando la demanda a trasladar es pequeña en relación al caudal circulante y las tuberías a eliminar son de corta longitud. Sin embargo, para demandas importantes y tramos de gran longitud, el reparto de la demanda debe efectuarse bajo otros criterios, de lo contrario las desviaciones pueden ser importantes. A continuación se propone un método original, simple y robusto, que mejora los precedentes, **basado en la teoría de grafos** y la aplicación de criterios hidráulicos. Su único requisito es conocer de antemano la distribución de demandas base acumuladas en cada una de las ramas del árbol de expansión de mínimo coste, para un estado medio de consumos. Una vez trasladada la demanda en el nudo intermedio a los nudos extremos, se deben aplicar las fórmulas universales de la asociación de tuberías en serie para transformar el conjunto en una tubería única.

9.4.1.1 Traslado de la demanda en el nudo intermedio (si existe)

Supóngase que se parte de la situación de la figura de la izquierda y se desea pasar a la situación de la figura de la derecha, con un comportamiento hidráulico equivalente. Las características físicas de las dos conducciones son conocidas, y por tanto también sus coeficientes de resistencia hidráulica r tales que $h_f = r Q^2$. Admitase también que se ha hecho una simulación previa del comportamiento de la red para el estado de funcionamiento más habitual, y como consecuencia de ello se conoce igualmente el caudal de entrada Q_1 y su sentido.

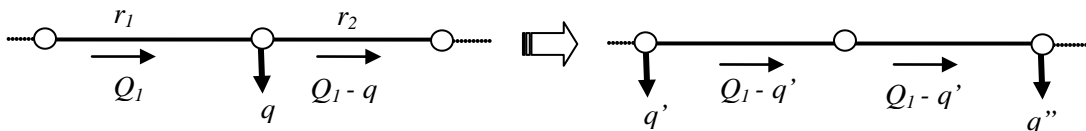


FIGURA 78. TRASLADO DE LA DEMANDA EN EL NUDO INTERMEDIO A LOS NUDOS EXTREMOS.

Si dividimos la demanda q en el nudo intermedio en dos sumandos q' y q'' , tales que $q = q' + q''$, la equivalencia de las pérdidas conduce a:

$$h_{f1} + h_{f2} = r_1 Q_1^2 + r_2 (Q_1 - q)^2 = (r_1 + r_2) (Q_1 - q')^2$$

de donde resulta:

$$q' = Q_1 - \sqrt{\frac{h_{f1} + h_{f2}}{r_1 + r_2}} \quad , \quad q'' = q - q' = q + \sqrt{\frac{h_{f1} + h_{f2}}{r_1 + r_2}} - Q_1$$

Es importante conocer el sentido del flujo en la asociación, a fin de identificar el caudal Q_1 como el caudal entrante, el caudal q' como el caudal a aplicar en el nudo aguas arriba y q'' en el nudo aguas abajo.

La fórmula es igualmente válida si por uno de los tramos no circulara caudal, en cuyo caso tendríamos $Q_1 = q$, $h_{f1} = r_1 q^2$, $h_{f2} = 0$, con lo que fácilmente se llega a:

$$q' = q \left(1 - \sqrt{\frac{r_1}{r_1 + r_2}} \right) \quad , \quad q'' = q - q' = q \sqrt{\frac{r_1}{r_1 + r_2}}$$

Esta expresión nos lleva en cierto modo al criterio del reparto en función inversa a la raíz cuadrada de las longitudes, a igualdad de los restantes parámetros (D y f), lo que nos indica hasta qué punto esta aproximación es gratuita, pues tal circunstancia raramente se dará en la práctica.

Otro caso importante a considerar es cuando por las dos tuberías circulan caudales contrarios, contribuyendo ambos a satisfacer la demanda q . Admitiendo la misma disposición de la figura en cuanto al caudal Q_1 y las demandas equivalentes q' y q'' (tan solo cambiaría el sentido del flujo el tramo de la derecha), las expresiones anteriores pueden generalizarse a:

$$q' = \left| Q_1 - \sqrt{\frac{h_{f1} \cdot sg(Q_1) + h_{f2} \cdot sg(Q_2)}{r_1 + r_2}} \right| \quad , \quad q'' = Q_1 - q' = \sqrt{\frac{h_{f1} \cdot sg(Q_1) + h_{f2} \cdot sg(Q_2)}{r_1 + r_2}}$$

Todas las expresiones vistas resultan igualmente aplicables si los nudos aguas arriba y aguas abajo del conjunto poseyeran sus propias demandas. En tal caso q' y q'' simplemente se añadirían a éstas.

En la aplicación práctica del método, puede evitarse la etapa de simulación, si a cambio se efectúa una hipótesis realista de los caudales circulantes por cada tramo, a partir del árbol de mínima resistencia. Si admitimos $Q = 0$ para todas las cuerdas, los caudales y sentidos de circulación en cada tramo pueden obtenerse simplemente por acumulación de las demandas en el sentido aguas arriba, esto es, aplicando la ecuación de continuidad. Conocidos los caudales, podemos ya evaluar las pérdidas y aplicar las ecuaciones anteriores. Si procedemos de este modo, cuando el nudo de paso a eliminar se sitúe entre una rama y una cuerda se dará el supuesto de caudal cero en uno de los tramos, el cual ha sido ya analizado. Sin embargo, el supuesto de alimentación por los dos sentidos no se dará bajo ninguna circunstancia.

9.4.1.2 Obtención de las características físicas de la tubería equivalente

Una vez trasladada la demanda en el nudo intermedio (si existe) a los nudos extremos, tendremos que resolver un problema clásico de asociación de dos tuberías en serie, circulando el mismo caudal por ambas, tal como se muestra en la figura siguiente.

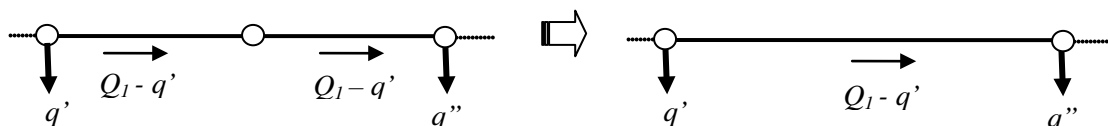


FIGURA 79. SUSTITUCIÓN DE DOS TUBERÍAS EN SERIE CON EL MISMO CAUDAL POR UNA EQUIVALENTE.

El equilibrio de pérdidas entre las dos tuberías originales y su equivalente conduce ahora a la siguiente ecuación:

$$r_1 Q^2 + r_2 Q^2 = r_{eq} Q^2 \rightarrow r_{eq} = r_1 + r_2$$

Si admitimos ahora para r la expresión de Darcy-Weisbach, la condición anterior se convierte en:

$$\frac{f_{eq} L_{eq}}{D_{eq}^5} = \frac{f_1 L_1}{D_1^5} + \frac{f_2 L_2}{D_2^5} \rightarrow D_{eq} = \sqrt[5]{\frac{f_{eq} L_{eq}}{(f_1 L_1) / D_1^5 + (f_2 L_2) / D_2^5}}$$

que es la fórmula a aplicar para determinar el diámetro equivalente de la nueva conducción sustitutiva. Su cálculo exige determinar primero los valores de L_{eq} y f_{eq} . Para la longitud equivalente se propone hacer:

$$L_{eq} = L_1 + L_2$$

mientras que para determinar el factor de fricción equivalente, puesto que el parámetro que mide la rugosidad de las tuberías es k (ó ε) y no f , haremos:

$$k_{eq} = \frac{k_1 L_1 + k_2 L_2}{L_1 + L_2}$$

Debido a que k_{eq} es un parámetro implícito en la ecuación de pérdidas y f_{eq} depende de D_{eq} , la obtención del diámetro equivalente mediante la fórmula anterior probablemente requiera efectuar algunas iteraciones, conforme el clásico problema de obtener el diámetro de una conducción conocido el caudal de paso y las pérdidas.

9.4.2 Procedimiento implementado en ordenador

Establecidas todas las premisas anteriores, el procedimiento general a aplicar en esta segunda etapa, es el siguiente:

1. Identificar todos los nudos de grado de conectividad 2 del modelo de la red y acumularlos en una cola FIFO (*First-In-First-Out*), siguiendo el sentido de recorrido aguas arriba a lo largo de todos los ramales del árbol.
2. Extraer de la cola el primer nudo que se almacenó.
3. Identificar las líneas adyacentes a dicho nudo a través de las estructuras topológicas (lista de adyacencias), y sus nudos opuestos.
4. Verificar que la operación es factible, conforme a los criterios de factibilidad relativos al nudo intermedio y sus dos líneas adyacentes expuestos anteriormente. Si es factible, continuar; de lo contrario, volver al paso 2.
5. Ejecutar la operación de simplificación, consistente en trasladar la demanda a los nudos opuestos y calcular la tubería equivalente.
6. Volver al paso 2 mientras queden nudos en la cola.
7. El proceso termina cuando se vacía la cola.

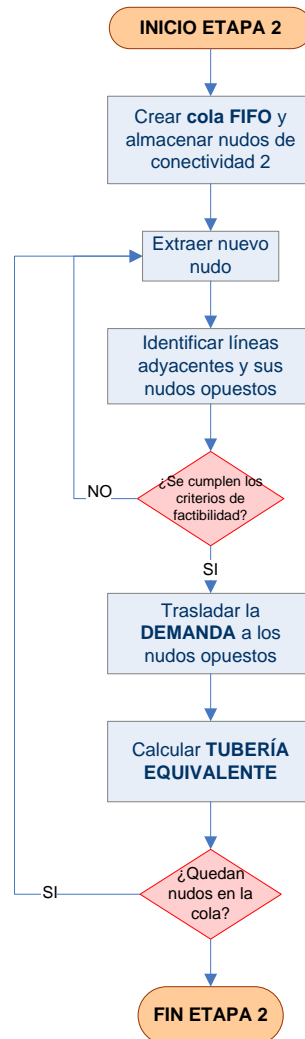


FIGURA 80. PROCEDIMIENTO DE ELIMINACIÓN DE NUDOS INTERMEDIOS (ETAPA 2).

9.4.2.1 Observaciones

- El trazado gráfico de la nueva tubería será el resultado de fundir el trazado de las dos tuberías eliminadas.
- Desde el punto de vista topológico, la eliminación de nodos intermedios no afecta al grado de conectividad de los nodos extremos de las líneas involucradas. Tampoco genera nuevos ramales, ni crea ni destruye mallas. En consecuencia, la topología básica de la red se mantiene tras esta etapa
- A fin de mantener actualizada la topología de árbol, GISRed tiene en cuenta que:
 - si las dos tuberías eliminadas son ramas, la nueva tubería creada pasará a ser la línea de acceso del nudo extremo situado aguas abajo.
 - Sin embargo, si una tubería es cuerda y la otra rama (no pueden ser las dos cuerdas), la nueva línea pasará ahora a ser cuerda, sustituyendo a la anterior para mantener así la configuración de la malla. Las líneas de acceso a los nodos extremos que permanecen en el modelo no se verán alteradas en este caso.

- Para actualizar el parámetro del orden topológico, basta con asignar a la nueva tubería el número de orden de cualquiera de las eliminadas.
- En principio, el orden en que se lleve a cabo la eliminación de los nudos es aparentemente irrelevante. Sin embargo, si tenemos en cuenta las condiciones de factibilidad, por ejemplo, la debida al caudal mínimo, el orden puede ser relevante. Por ejemplo, en un ramal con n segmentos en serie, si se comienza a eliminar los nudos de paso por un extremo, es posible que el proceso de eliminación se detenga en un cierto nudo por exceso de caudal acumulado. Dicho nudo podría ser otro si se comienza por el otro extremo. Por ello, **el procedimiento implementado almacena en una cola FIFO los nudos de paso a eliminar, siguiendo el sentido de recorrido aguas arriba a lo largo de todos los ramales del árbol**. De este modo, se parte de un extremo (siguiendo el orden topológico) y se avanza a contracorriente hasta el nudo considerado como raíz o fuente. A continuación se parte del 'siguiente' nudo extremo (en orden topológico) y se avanza hasta encontrar la raíz o una rama ya recorrida, y así sucesivamente. Los nudos de conectividad 2 que se vayan encontrando se almacenan en la cola FIFO siguiendo dicha secuencia. De esta forma, la eliminación posterior de los nudos se producirá en el mismo orden referido.
- Aunque la eliminación de un nudo intermedio no puede crear nuevos nudos terminales, es posible que los criterios de factibilidad conviertan en 'eliminable' un ramal terminal que antes no lo era. Por ejemplo: *se decide eliminar las tuberías inferiores a 100 mm y tras la etapa 1, persiste un ramal configurado por una tubería de 75 mm y a continuación un tramo corto terminal de 125 mm; por ser su diámetro superior a 100 mm no fue eliminado en la etapa 1. Sin embargo, al eliminar el nudo intermedio que los conecta, se obtiene una tubería equivalente terminal de 90 mm, que ahora ya sería eliminable. Esta es la razón por la cual se hace necesario volver de nuevo a la etapa 1 tras concluir la etapa.*
- Análogamente, un nudo que tras la etapa 1 tenía grado de conectividad 3 y por ello no fue considerado en principio como candidato a ser eliminado en la etapa 2, puede ser eliminado tras sucesivas aplicaciones de las etapas 1 y 2. Por ello, **tras volver a la etapa 1, hay que ir de nuevo a la etapa 2, hasta que ésta no genere ninguna nueva rama terminal que pueda ser eliminada.**

Las operaciones de la etapa 2 van a modificar el comportamiento hidráulico de la red, por lo que es el usuario el que debe decidir si las discrepancias que aparecen son aceptables o no, tras ejecutar el modelo simplificado obtenido y compararlo con el original.

9.5 REDUCCIÓN DE MALLAS SIMPLES

Concluidas por completo las etapas 1 y 2, la red simplificada hasta ese momento no debe presentar ramas sueltas, derivaciones arborescentes, o nudos intermedios, aparte de aquellos casos en los que no haya sido posible eliminar dichos elementos debido a las restricciones inicialmente impuestas de caudal mínimo y de diámetro, longitud o rugosidad mínima. Todos aquellos ramales, arborescencias o nudos intermedios que permanezcan en la red simplificada deben, por tanto, obedecer a alguna de las restricciones establecidas. A excepción de los nudos restringidos, los restantes deben ser de conectividad 3 o superior.

Sin embargo, la red puede aún simplificarse más, en el sentido de reducir la cantidad de mallas, cuyo número y configuración básica original no debe haber sido modificada por los procesos de simplificación de las dos etapas anteriores. Ahora bien, mientras que la etapa 1 no afecta en absoluto a las mallas originales y nudos que las configuran (solo afecta a las arborescencias), la etapa 2 sí puede haber reducido de forma importante el número de nudos que configuraban una determinada malla (siempre sin destruirla), hasta dejarla en una malla configurada por sólo dos nudos y dos tuberías, tal como se muestra en la figura siguiente.

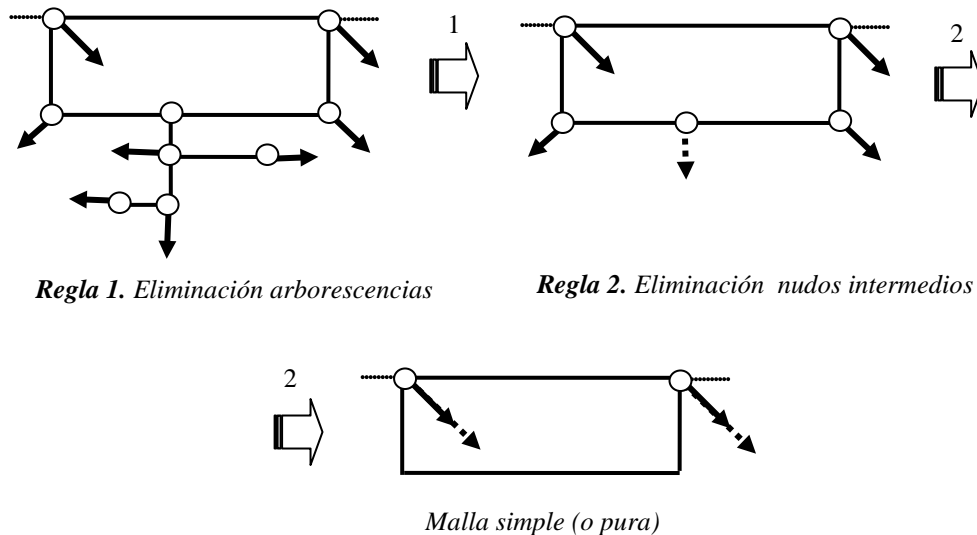


FIGURA 81. MALLA SIMPLE CONFIGURADA POR SÓLO DOS NUDOS.

La malla mostrada en la última figura la llamaremos malla simple ó pura, y está configurada por dos tuberías únicas y uniformes que unen los mismos nudos.

Esta situación se da en pocas ocasiones en la realidad, aunque no es extraordinaria. Por ejemplo, una tubería de transporte puede tener conectada en paralelo una tubería de servicio cuyos nudos intermedios no se modelan; otras veces una tubería ha sido doblada en paralelo para incrementar su capacidad de transporte formando una malla simple; otro caso usual es instalar dos tuberías en paralelo discurriendo por ambos lados de una calle (aunque a veces suele diferenciarse el punto de partida y llegada de las mismas al modelar también el tramo que cruza la calle).

En cualquier caso, aunque dicha situación no sea tan frecuente en la práctica, se puede llegar a ella con facilidad tras aplicar las etapas de simplificación 1 y 2. Generalizando dicho proceso, **es posible afirmar que cuando todos los nudos intermedios de una malla son eliminados y ésta no posee mallas adyacentes, es decir, si no comparte tuberías con otra malla** (o análogamente, si posee como máximo dos nudos de conectividad 3 y el resto de conectividad 2), entonces la aplicación sucesiva de la regla 2, mientras siempre resulte factible, conducirá finalmente a una malla de configuración simple como la indicada.

La tercera etapa del proceso de simplificación consiste pues en reducir las mallas simples eliminando la tubería de menor diámetro, longitud o conductancia, y sustituyendo la tubería que permanece por otra de mayor diámetro (en general, de menor resistencia), con la misma capacidad de transporte que el conjunto original, tal como indica la figura siguiente.

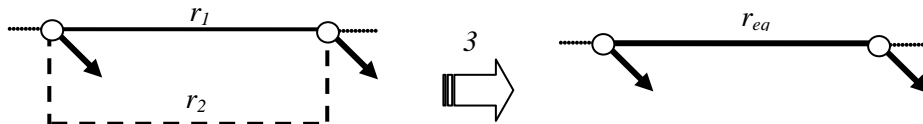


FIGURA 82. REGLA 3. REDUCCIÓN DE MALLAS SIMPLES.

Para que esta operación sea factible han de cumplirse los siguientes requisitos:

- Que la **línea a eliminar** sea una **tubería simple abierta**. Se descartan las válvulas, las bombas y todas aquellas tuberías cerradas o con válvula de retención.
- Que el **diámetro** de la tubería a eliminar, su **longitud** o **conductancia** hidráulica sea **menor que el umbral** especificado en cada caso.
- Que la **tubería** a eliminar **no** haya sido declarada explícitamente como **elemento a preservar**.
- No se impone, en cambio, ninguna condición a los nudos extremos, ya que éstos no se verán alterados, ni se les transmite demanda alguna.

Si se cumplen todos estos requisitos, la **secuencia** que se sigue **para eliminar la malla simple** es la siguiente:

1. *Identificar la tubería de menor diámetro, longitud o conductividad que cierra una malla simple y verificar que su eliminación es factible.*
2. *Identificar la tubería de mayor diámetro, longitud o conductividad que une los mismos nudos (si solo son dos, será la tubería alternativa).*
3. *Eliminar ambas tuberías.*
4. *Crear una nueva tubería conectando los mismos nudos, con una capacidad hidráulica de transporte equivalente.*

9.5.1 Criterios prácticos para la identificación y eliminación de mallas simples

La primera cuestión que se plantea a la hora de abordar esta etapa es la identificación de las mallas simples existentes en la red, y en particular de las tuberías de mayor y menor resistencia (en caso de haber más de dos) que unen los mismos nudos extremos, a fin de eliminar la primera y sustituir la segunda por otra equivalente de menor resistencia.

Una vez identificadas ambas tuberías, es necesario determinar las características físicas de la nueva tubería equivalente, cuya capacidad hidráulica de transporte ha de ser idéntica a la de las dos eliminadas. Para ello se utiliza la fórmula clásica de la asociación de dos tuberías simples en paralelo, fórmula que es universal y exacta (si el factor de fricción f es constante) sea cual sea el caudal circulante por ambas tuberías, los cuales tendrán siempre por definición el mismo sentido.

9.5.1.1 Identificación de las mallas simples y sus líneas de mayor y menor resistencia

Las mallas simples están constituidas solamente por dos tuberías en paralelo. Si se dispone de la topología del árbol de mínima resistencia, la tubería más resistente tendrá carácter de cuerda y la menos resistente de rama.

En el caso particular de que haya más de dos tuberías conectando los mismos nudos, la menos resistente deberá corresponderse con la rama, mientras que todas las demás serán cuerdas. En consecuencia, cada cuerda, junto con la rama común, definirá una malla simple distinta.

Por consiguiente, en cualquier caso podemos afirmar que una de las dos líneas que configuran una malla simple va a ser siempre una cuerda, con lo que comenzaremos el proceso identificando éstas. Para saber si la malla se cierra con una sola rama adicional, analizaremos las líneas de acceso a los nudos extremos de la cuerda, dado que las líneas de acceso siempre se corresponden con ramas del árbol. En particular, **si el nudo opuesto de la línea de acceso a uno de los nudos de la cuerda es igual al nudo opuesto de la misma**, podremos afirmar que dicha línea, junto con la cuerda configuran una malla simple, tal como se justifica en la figura siguiente. En otro caso, la malla se cierra con más de una rama, y por consiguiente no es una malla simple.

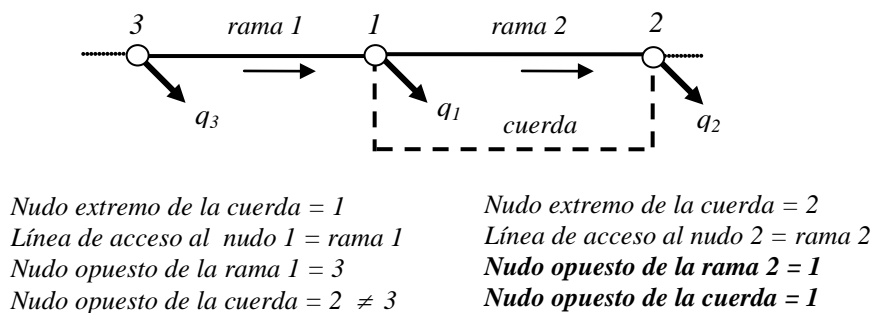


FIGURA 83. CONDICIÓN DE IDENTIFICACIÓN DE UNA MALLA SIMPLE.

Así pues, para identificar todas las mallas simples de la red, analizaremos el cumplimiento de la condición anterior para cada una de las cuerdas del árbol de mínima resistencia. Una vez identificada una malla simple, la tubería más resistente será la cuerda, y la menos resistente la rama que cierra la malla.

9.5.1.2 Obtención de las características físicas de la tubería equivalente

Una vez identificadas las líneas de mayor y menor resistencia de una malla simple, así como los dos nudos extremos comunes, y verificado que es factible la eliminación de la tubería más resistente, habrá que aplicar las fórmulas clásicas de la asociación de tuberías en paralelo para determinar las características físicas de la nueva tubería equivalente, tal como se indica en la figura siguiente.

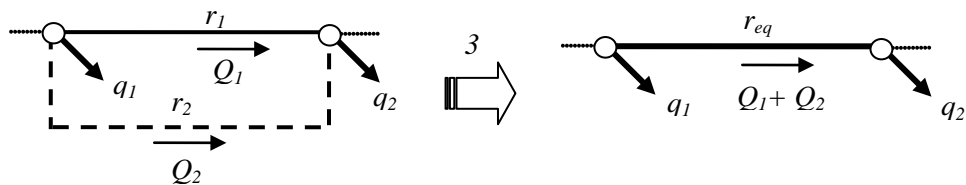


FIGURA 84. SUSTITUCIÓN DE DOS TUBERÍAS SIMPLES EN PARALELO POR UNA EQUIVALENTE.

De acuerdo con la figura se tendrá que cumplir:

$$h_f = r_1 Q_1^2 = r_2 Q_2^2 = r_{eq} Q_{eq}^2$$

y por la ecuación de continuidad:

$$Q_{eq} = Q_1 + Q_2 = Q_{eq} \left(\sqrt{\frac{r_{eq}}{r_1}} + \sqrt{\frac{r_{eq}}{r_2}} \right) \rightarrow \frac{1}{r_{eq}} = \left(\frac{1}{\sqrt{r_1}} + \frac{1}{\sqrt{r_2}} \right)^2$$

Si admitimos ahora para r la expresión de Darcy-Weisbach, la condición anterior se convierte en:

$$\frac{D_{eq}^5}{f_{eq} L_{eq}} = \left(\sqrt{\frac{D_1^5}{f_1 L_1}} + \sqrt{\frac{D_2^5}{f_2 L_2}} \right)^2 \rightarrow D_{eq} = \sqrt[5]{f_{eq} L_{eq} \left(\sqrt{\frac{D_1^5}{f_1 L_1}} + \sqrt{\frac{D_2^5}{f_2 L_2}} \right)^2}$$

que es la fórmula a aplicar para determinar el diámetro equivalente de la nueva conducción sustitutiva. Su cálculo exige determinar primero los valores de L_{eq} y f_{eq} . Para la longitud equivalente se propone hacer:

$$L_{eq} = L_1$$

siendo L_1 la longitud de la tubería de menor resistencia, que es en cierto modo la que permanece, aunque con su resistencia algo disminuida (o lo que es lo mismo, su conductancia aumentada). En cuanto a la rugosidad de la tubería equivalente, es conveniente hacer intervenir en su cálculo la rugosidad de ambas, dándole más peso a la rugosidad de la tubería de mayor diámetro, que es básicamente la que va a permanecer. Se propone calcular la nueva rugosidad en proporción directa a las secciones de paso de cada tubería, con lo que:

$$k_{eq} = \frac{k_1 D_1^2 + k_2 D_2^2}{D_1^2 + D_2^2}$$

Al igual que en el caso de la asociación en serie, debido a que k_{eq} es un parámetro implícito en la ecuación de pérdidas y f_{eq} depende de D_{eq} , la obtención del diámetro equivalente mediante la fórmula citada es probable que requiera algunas iteraciones, conforme al clásico problema hidráulico de obtener el diámetro de una conducción conocido el caudal de paso y las pérdidas de carga.

Establecidas ya todas las premisas previas, pasamos a describir el procedimiento general a aplicar para llevar a cabo la tercera etapa del proceso de simplificación.

9.5.2 Procedimiento implementado en ordenador

Establecidas todas las premisas anteriores, el procedimiento general implementado para llevar a cabo esta tercera etapa, es el siguiente:

1. Haciendo un **barrido por todas las cuerdas** del modelo, **identificar** si la malla a la que pertenece la cuerda candidata, es una **malla simple e introducir dicha cuerda en una cola FIFO**. Para ello se comprueba si la malla se cierra con una sola rama adicional, analizando las líneas de acceso a los nudos extremos de la cuerda tal y como se ha descrito anteriormente. En caso contrario, la cuerda se almacena en una lista auxiliar para su postprocesado.
2. **Extraer de la cola FIFO una cuerda (tubería más resistente de la malla en turno)** siguiendo el orden de almacenamiento.
3. **Verificar** si la eliminación de la cuerda es **factible**, conforme a los criterios anteriormente establecidos. En caso afirmativo continuar con el siguiente paso, y si no, desechar la

operación de simplificación, almacenar la cuerda en la lista auxiliar para su postprocesado y pasar a analizar la siguiente cuerda (volver al paso 2).

4. **Ejecutar la operación de simplificación**, conforme a lo indicado en los apartados anteriores.
5. **Reducir en 1 el grado de conectividad** de los nudos extremos de la cuerda, y **asignar las propiedades topológicas de la rama** eliminada a la nueva tubería creada.
6. Volver al paso 2 mientras queden cuerdas por analizar.
7. El proceso termina cuando se han comprobado todas las cuerdas del modelo.

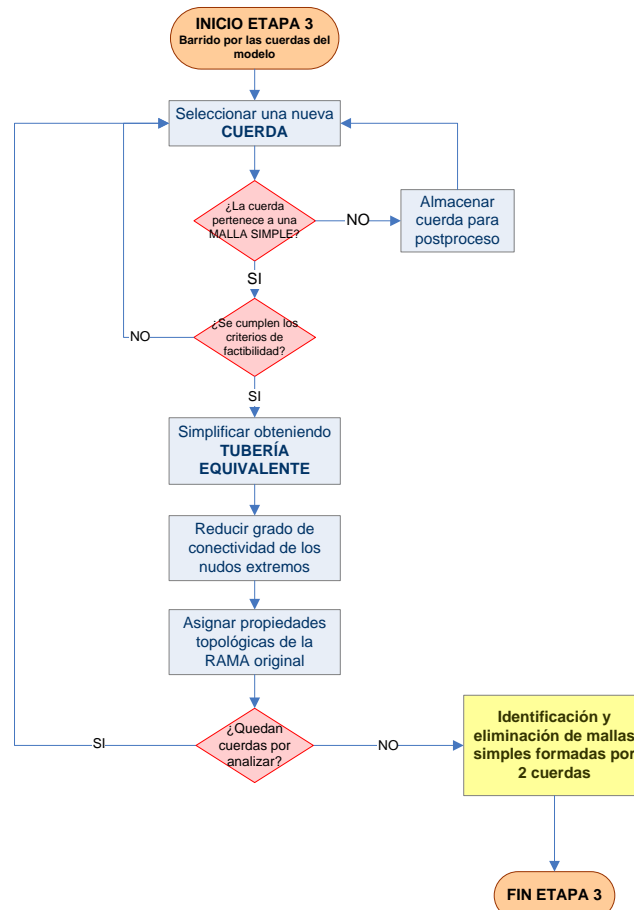


FIGURA 85. PROCEDIMIENTO DE ELIMINACIÓN DE MALLAS SIMPLES (ETAPA 3).

9.5.2.1 Observaciones

- El trazado de la nueva tubería creada será el mismo que el de la tubería menos resistente de las dos eliminadas, es decir, la rama.
- El orden de simplificación de las mallas simples resulta en principio irrelevante.
- La tubería menos resistente eliminada (rama), se verá sustituida por otra tubería equivalente (también rama) que configurará la nueva línea de acceso al nudo aguas abajo.
- Desde un punto de vista topológico, la sustitución de dos tuberías en paralelo por otra equivalente únicamente reduce en uno el número de mallas de la red. La eliminación de una malla tan solo supone la eliminación de la cuerda que cerraba la malla. Los nudos de la red seguirán siendo los mismos, así como las demandas aplicadas en los mismos. Sin embargo, el efecto adicional que tiene la eliminación de una cuerda, desde

el punto de vista topológico, es la reducción en uno del grado de conectividad de los nudos enlazados. En consecuencia, nudos de grado de conectividad 3 se convertirán en nudos de conectividad 2 o nudos intermedios, y los nudos de conectividad 2 se convertirán en nudos terminales de conectividad 1. Por su parte, los nudos de conectividad mayor de 3, al rebajar ésta en una unidad, seguirán definiendo nuevas mallas simples, que podrán aún reducirse más en sucesivas pasadas de esta misma etapa.

- El orden topológico establecido inicialmente sobre la red original de detalle se conserva, ya que la eliminación de una cuerda no afecta al orden de índices topológicos establecidos. Por otra parte, el número de orden de la rama menos resistente eliminada deberá ser transferido a la nueva tubería creada.
- Puesto que esta etapa puede dar lugar a la aparición de nuevos nudos de conectividad 1 ó 2, antes de seguir adelante con la cuarta etapa, conviene realizar una nueva pasada y procesar de nuevo las etapas 1 y 2 por si se hubieran creado nuevas ramas terminales o nudos intermedios.
- **La eliminación de dos tuberías que cierran una malla simple y su sustitución por otra equivalente no modifica para nada la respuesta hidráulica de la red**, por lo que las presiones en cualquier nudo, así como los caudales en cualquier línea de la misma (salvo las sustituidas) deben ser idénticos antes y después de llevar a cabo esta etapa de simplificación. Además, el caudal que circule por la nueva línea creada debe ser exactamente la suma de los caudales circulantes por las dos líneas eliminadas.
- No todas las mallas simples serán eliminadas en esta etapa, ya que puede ocurrir que alguna de ellas no cumpla las condiciones de factibilidad. Por consiguiente, tras finalizar esta etapa pueden quedar aún mallas simples en la red simplificada.
- Obsérvese también que si una malla está configurada por una tubería muy resistente, que une dos nudos a su vez conectados por dos ramas en serie de poca resistencia, con un nudo intermedio no eliminado en la etapa 2, tal como muestra la figura siguiente, la simplificación de la tubería resistente que cierra la malla no podrá llevarse a cabo en esta etapa, por no formar estrictamente una malla pura. En todo caso, si la tubería resistente que cierra malla fuera 'eliminable', deberá ser eliminada en la etapa 4 del proceso de simplificación.

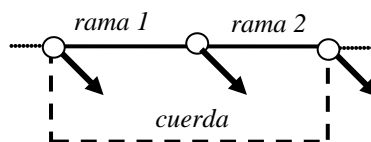


FIGURA 86. CUERDA NO ELIMINABLE EN LA ETAPA 3 POR NO CERRAR UNA MALLA SIMPLE.

9.5.2.2 Caso particular de mallas aparentemente simples formadas dos cuerdas

Hasta ahora, se ha supuesto que una malla simple está formada por dos líneas que unen los mismos nudos, de modo que una de ellas, la más resistente, tiene carácter de 'cuerda', y la menos resistente carácter de 'rama'.

No obstante, se puede dar la circunstancia de que dos cuerdas cierren una misma malla compleja (formada por más de dos líneas), de modo que entre ellas formen aparentemente una malla simple secundaria (no básica), constituida exclusivamente por dos cuerdas, tal como muestra la figura.

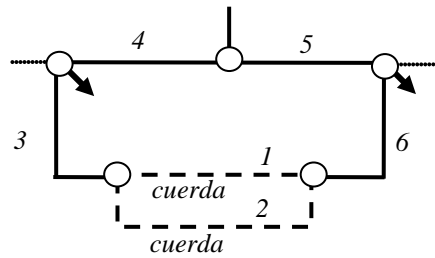


FIGURA 87. CONFIGURACIÓN DE UNA MALLA APARENTEMENTE SIMPLE A PARTIR DE DOS MALLAS.

Como es sabido, **cada cuerda de un árbol cierra una única malla básica, de modo que existe una asociación biunívoca entre malla básica y cuerda**. En el caso de la figura, la cuerda 1 cierra la malla básica 1-3-4-5-6 mientras que la cuerda 2 cierra la malla básica 2-3-4-5-6, siendo ambas mallas complejas. Sin embargo, ocurre en este caso que al ser comunes las ramas 3-4-5-6 para ambas mallas, las cuerdas 1 y 2 cierran 'aparentemente' una malla simple no básica, constituida por dos cuerdas.

La simplificación de este caso podría llevarse a cabo en la siguiente etapa (etapa 4), en la cual algunas cuerdas pueden eliminarse a costa de reforzar los diámetros para el trayecto alternativo. Sin embargo la etapa 4 puede introducir discrepancias en los resultados entre el modelo original y el simplificado, mientras que la asociación en paralelo de las cuerdas 1 y 2 siguiendo los procedimientos de la etapa 3 conduce a un conjunto hidráulicamente equivalente, que produce exactamente los mismos resultados. Las dos mallas básicas se reducirían así a una sola, quedando la apertura de malla resultante a criterio de la etapa 4.

El procedimiento a seguir desde el punto de vista operativo e hidráulico para sustituir las cuerdas 1 y 2 por otra equivalente, sería exactamente el descrito en los párrafos anteriores para las mallas simples básicas. La única dificultad estriba en la identificación, desde el punto de vista topológico, de estas mallas especiales. Para ello el procedimiento es el siguiente:

1. Tras finalizar la etapa 3 para las mallas simples básicas formadas por rama y cuerda, se comprueba si existen cuerdas que no han podido ser eliminadas mediante el procedimiento anterior y que han sido almacenadas en una lista auxiliar para su postprocesado. En el caso de las mallas simples no básicas formadas por dos cuerdas, sus nodos extremos tendrán asociadas ramas de acceso que no van a formar parte de dicha malla, con lo que el método de identificación de las mallas simples básicas no es válido. Es entonces, cuando se hace uso de la lista auxiliar comentada con anterioridad.
2. Haciendo un barrido por la lista auxiliar de cuerdas, se toma una cuerda y se analizan sus nudos extremos para comprobar si existen más cuerdas que unan los mismos nudos. Para ello es posible apoyarse en las listas de adyacencias asociadas a los nudos del modelo.
3. Si se detectan más cuerdas conectadas a los mismos nudos, se procede a eliminar la malla no básica aplicando el procedimiento general de simplificación de tuberías en paralelo obteniendo la tubería equivalente y a marcar las cuerdas que han entrado en el proceso a fin de que no vuelvan a ser analizadas.

NOTA: En el caso general de que hubiera varias cuerdas conectadas a los mismos nudos (caso poco habitual), se toman dos de ellas (la de menor y mayor resistencia por ejemplo) y se aplica el procedimiento de simplificación de tuberías en paralelo. Siguiendo este procedimiento sucesivamente, todas las cuerdas que confluyan en esos mismos nudos quedarán reducidas en pasos posteriores a una sola línea equivalente, la cual debe conservar su carácter de 'cuerda' para la etapa siguiente.

4. El proceso termina cuando se han comprobado todas las cuerdas de la lista auxiliar.

9.6 REDUCCIÓN DE MALLAS COMPLEJAS

Tras las tres primeras etapas, el modelo simplificado puede presentar todavía mallas cerradas por tuberías de gran resistencia y poca capacidad de transporte, cuya apertura apenas afectaría al comportamiento del modelo, pudiendo en cambio reducir de forma significativa la complejidad del mismo, al provocar la ramificación de la malla y, en consecuencia, la posible eliminación de ésta en su casi totalidad.

En la práctica, las mallas complejas se dan cuando la eliminación de los nudos intermedios no ha sido posible por la importancia del caudal derivado a través de ellos, debido a alguna de las restricciones mencionadas, o bien cuando la malla comparte líneas con otras mallas adyacentes (en rigor, cuando contiene más de dos nudos cuyo grado de conectividad es mayor o igual a 3), lo que impide formar mallas simples con tuberías únicas uniendo sus nudos de entrada y salida. En la figura siguiente se muestran varios ejemplos de mallas complejas.

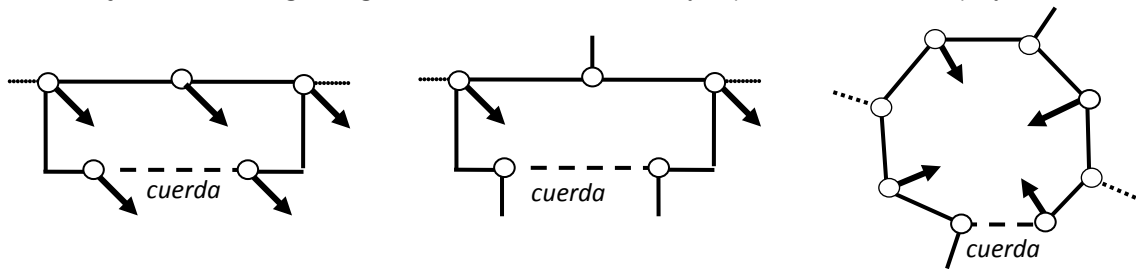


FIGURA 88. DIVERSAS CONFIGURACIONES DE MALLAS COMPLEJAS.

En definitiva, **una malla es compleja cuando contiene más de dos nudos y en consecuencia, más de dos líneas.**

Todas las mallas, por complejas que sean, están cerradas por una cuerda, que se identifica por ser la línea de mayor resistencia de la malla (*líneas a trazos en los ejemplos de la figura anterior*). Si las mallas se configuran como mallas básicas, por definición, el resto de las líneas que configuran cada malla siguiendo el trazado del árbol de expansión de mínima resistencia, van a ser ramas.

Siguiendo el trazado del árbol de mínima resistencia, cada malla puede dividirse en dos rutas o trayectos, formados íntegramente por ramas y obtenidos al recorrer el árbol en el sentido aguas arriba partiendo de cada uno de los nudos extremos de la cuerda hasta encontrar un nudo común. Si asumimos que el caudal circulante por la cuerda que cierra una malla es 0, el sentido de circulación del flujo por cada una de las rutas, desde el nudo común hasta el extremo correspondiente de la cuerda será único, y dirigido hacia dicho extremo. Además, **si el caudal por la cuerda es 0, desde un punto de vista hidráulico las alturas en sus nudos extremos deberán ser iguales, y por consiguiente, también las pérdidas totales en cada una de las rutas,** configurando en cierto modo lo que sería una generalización de una malla simple: *las líneas únicas serían ahora las rutas; el nudo de partida, el nudo común; y el nudo de llegada uno cualquiera de los extremos de la cuerda.*

En muchos casos reales, la línea que cierra malla será en efecto una línea de cierta resistencia en el contexto de la malla. Por ejemplo, cuando de la red arterial se deriva una malla secundaria con doble alimentación. Otras veces, sin embargo, las mallas están reforzadas para configurar caminos alternativos a efectos de garantizar el suministro si fallara uno de los puntos de alimentación. Mientras que en el primer caso la hipótesis de caudal nulo en la cuerda resulta bastante realista, en el segundo caso puede que no sea así. **Desde el punto de vista de la**

simplificación de la red, sería lícito abrir la malla eliminando la cuerda, sólo en el primero de los casos.

A fin de discernir cuándo es permisible abrir o no una malla, el criterio más simple sería atender únicamente al diámetro mínimo, de modo que si el diámetro de la cuerda (la línea más resistente de la malla) fuera inferior al diámetro mínimo establecido, podría ser eliminada. En caso contrario, la malla debería mantenerse. Cuando no se dispone de más información sobre el comportamiento de la red, en principio éste sería el único criterio aplicable, a riesgo de aceptar o no el resultado final. Sin embargo, cuando se dispone de información adicional basada en un primer cálculo hidráulico, es posible utilizar un criterio diferente al objeto de decidir si una malla puede abrirse o no eliminando la cuerda que la cierra. Este nuevo criterio consiste en realizar una simulación del modelo configurado hasta ese momento, tras finalizar la etapa 3 de simplificación y determinar los caudales circulantes y las presiones en los nudos. De esta manera se obtendrán para las condiciones de simulación establecidas, los caudales reales que circulan por cada una de las cuerdas que cierran las mallas complejas, así como los caudales circulantes por cada una de las ramas de los dos trayectos que configuran cada malla (probablemente no tengan sentido único en toda la rama). A continuación, se debe comparar el caudal que circula por la cuerda (se supone debe ser el menor), con el mayor caudal que circula por las ramas de los dos trayectos (independientemente de su sentido). Si el caudal de la cuerda, es por ejemplo menor que 1/10 (u otra fracción) del mayor caudal circulante, la malla podría abrirse. En otro caso, conviene mantenerla cerrada.

El procedimiento implementado con motivo de esta tesis adopta, sin embargo, **otra hipótesis fundamentada en la topología avanzada del modelo de la red** para dilucidar si se abre o se conserva la malla en cuestión. De esta forma, se evita el tener que simular hidráulicamente el modelo obtenido hasta este punto. Esta hipótesis consiste en **determinar los caudales en las ramas de la malla por acumulación en el sentido aguas arriba, siguiendo el árbol de mínima resistencia**. El **caudal circulante por las cuerdas será 0 por definición**, con lo que el criterio anterior no puede aplicarse. En su defecto, estimados los caudales circulantes por las ramas, se calculan las pérdidas de carga en las mismas y sabiendo que la suma de las pérdidas de carga de todas las líneas que componen una malla es igual a cero (*para ello es necesario que la pérdida de carga tome el mismo signo que el caudal de la línea*), necesariamente las alturas piezométricas en los nudos extremos de la cuerda, deberían coincidir. Si esto no ocurre, se calcula cuál debería ser la pérdida de carga en la cuerda para anular la pérdida de carga total en la malla. A partir de la pérdida de carga en la cuerda y mediante cálculo inverso es posible determinar el supuesto caudal circulante por la misma y su sentido (*para ello es necesario conservar el signo de la pérdida de carga*). Esta manera de proceder es análoga al clásico procedimiento iterativo utilizado para calcular manualmente redes malladas. Aunque dicho caudal no es el definitivo, se utiliza como aproximación para decidir si abre o no la malla.

Si el caudal estimado en la cuerda es menor que 1/10 del mayor caudal circulante por la malla, la cuerda es eliminada (reduciendo en 1 el grado de conectividad de sus nudos extremos) y la malla queda abierta; de lo contrario, la malla se mantiene.

La siguiente operación que realiza el método implementado es incrementar el diámetro de las ramas del trayecto más crítico para compensar la capacidad de transporte que ofrecía la cuerda que se ha eliminado.

Para ello se procede de la siguiente manera: conocido el caudal Q_0 circulante por la cuerda y su sentido, si se desea restablecer éste a cero, se corrigen los caudales de todas las ramas que

configuran la malla sumando (o restando) un caudal de la misma magnitud y de sentido contrario, tal como se muestra en la figura.

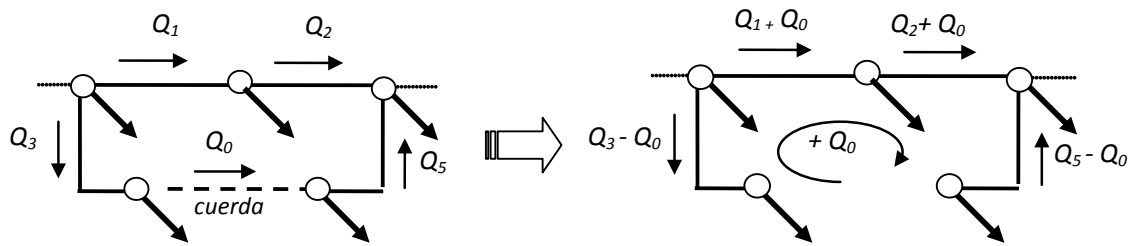


FIGURA 89. REGLA 4. CANCELACIÓN DEL CAUDAL CIRCULANTE POR UNA CUERDA PARA PERMITIR SU ELIMINACIÓN.

A continuación, incrementa el diámetro de aquellas ramas que transportan el caudal en el mismo sentido que el caudal circulante por la cuerda, a fin de permitir el transporte del nuevo caudal $Q_i + Q_0$ con la misma pérdida de carga, de modo que la capacidad de transporte de la red quede restablecida. Las ramas a las que se les incrementa su diámetro, pertenecen al trayecto que partiendo del nudo común termina en el nudo aguas abajo de la cuerda. Sin embargo, es cierto que, para agilizar el proceso, de entre todas las ramas que configuran dicho trayecto bastaría con incrementar el diámetro de aquellas comprendidas entre el nudo común situado aguas arriba y el último nudo de conectividad mayor que 2 siguiendo el recorrido del flujo (y en el supuesto de que todas tengan el mismo sentido que el caudal circulante por la cuerda), ya que los tramos en adelante tan solo satisfacen los consumos locales y no contribuyen al transporte de caudal fuera de la malla.

En definitiva, para que la etapa 4 sea factible han de cumplirse los siguientes requisitos:

1. Que la **cuerda** a eliminar sea una **tubería simple abierta** (se descartan tuberías cerradas o con válvula de retención, válvulas y bombas).
2. Que el **diámetro** de la tubería (*cuerda*) a eliminar, su **longitud o conductancia** hidráulica **sea menor** que el **umbral** especificado en cada caso.
3. Que la **tubería** a eliminar **no** haya sido declarada explícitamente como un **elemento a preservar**.
4. Que el **caudal** circulante por la cuerda, **calculado o estimado**, **sea menor** que $1/10$ (esta ha sido la fracción adoptada en el código fuente implementado como parte de esta tesis doctoral, si bien podría haber sido otra) **del caudal máximo circulante por las ramas de la malla** que cierra la cuerda.
5. **No se impone ninguna condición a los nudos extremos de la cuerda**, ya que éstos no se verán alterados, ni se les transmite demanda alguna.

Si se cumplen todos estos requisitos, la **secuencia** que se sigue **para eliminar la malla compleja** es la siguiente:

1. *Para cada una de las cuerdas que aún cierran malla tras la etapa 3 de simplificación, comprobar si es factible su eliminación.*
2. *Si es así, identificar los trayectos que cierran la malla, calcular o estimar los caudales circulantes, y verificar que $Q_0 < 1/10 Q_{m\acute{a}x}$.*
3. *En caso afirmativo, identificar el subtrayecto que verá aumentado su caudal de paso con la eliminación de la cuerda, a fin de incrementar los diámetros de sus ramas (verificar el sentido del caudal respecto al de la rama y la conectividad de los nudos).*
4. *Eliminar la cuerda correspondiente.*

Incrementar los diámetros de las ramas del subtrayecto antes identificado, a fin de mantener la capacidad de transporte de la red.

9.6.1 Criterios prácticos para llevar a cabo la simplificación

Una primera cuestión que se plantea a la hora de llevar a cabo esta cuarta etapa es la identificación de las mallas básicas existentes en la red, y en particular sus cuerdas y los trayectos configurados por las ramas que las definen.

Una vez identificadas las mallas, y comprobado que algunas de ellas pueden abrirse eliminando la cuerda que las cierra, habrá que identificar el subtrayecto que transporta el caudal principal de paso, y llevar a cabo el incremento de diámetro de las ramas que lo configuran para mantener la capacidad de transporte de la red.

9.6.1.1 Identificación de las mallas básicas candidatas a ser abiertas

Las mallas básicas, en contraste con las mallas simples, están constituidas por múltiples líneas y nudos. Si sobre la red original se identificó el árbol de mínima resistencia al comienzo del proceso de simplificación, su estructura topológica deberá estar actualizada al llegar a este punto, siempre que se hayan seguido todos los pasos indicados en las etapas anteriores. En otro caso, habrá que construirlo de nuevo, partiendo de los resultados de la etapa 3.

Identificado el árbol de mínima resistencia, se conocerán perfectamente el carácter de cuerda o rama de cada línea del grafo, así como la línea de acceso a cada nudo de la red siguiendo la topología de árbol. Cada cuerda, es sabido que define una malla básica, luego habrán tantas mallas candidatas a abrirse, como cuerdas.

Supóngase el caso en el que una determinada cuerda sea una tubería de un diámetro (u otro parámetro) inferior al umbral, y por consiguiente candidata a ser eliminada. La identificación completa de la malla pasa por identificar los trayectos que cierran la malla asociada.

Para ello basta identificar primero uno de los dos trayectos que remonta el árbol en sentido aguas arriba, partiendo de uno de los extremos de la cuerda hasta el nudo raíz, lo que resulta inmediato haciendo uso de la línea de acceso a cada nudo. Durante el proceso de construcción se marcan los nudos visitados.

El paso siguiente es trazar el segundo trayecto partiendo del nudo opuesto de la cuerda, hasta llegar a un nudo marcado. Dicho nudo constituirá el nudo común de ambos trayectos.

Finalmente se elimina toda referencia a los nudos y ramas del primer trayecto, desde el nudo común hasta el nudo raíz. Con ello tendremos identificados por cada malla los dos trayectos que la definen, la cuerda que los cierra, y el nudo común de confluencia.

Puesto que el cuarto criterio es comprobar que no hay bombas ni válvulas automáticas entre las líneas que cierran malla, ahora es el momento de verificarlo.

9.6.1.2 Identificación del subtrayecto de la malla a reforzar

El quinto criterio para determinar si una malla puede abrirse es comprobar que el caudal circulante por la cuerda es una fracción pequeña del caudal máximo transportado por la malla a través de alguna de sus ramas. Para ello hay que resolver antes el régimen permanente para el instante de cálculo, o bien efectuar una aproximación suponiendo $Q_0 = 0$ por las cuerdas, acumulando los consumos aguas arriba a lo largo del árbol, recalculando las alturas en los

extremos de cada cuerda y a continuación el caudal circulante por las mismas acorde con dichas alturas, tal como se detalló anteriormente.

Si el caudal circulante por la cuerda es suficientemente pequeño, se puede proceder definitivamente a su eliminación, pero para una mejor aproximación del modelo es deseable reforzar un camino alternativo o subtrayecto, por el que pueda ser transportado dicho caudal, acumulado con el caudal principal de paso a lo largo del mismo.

Para ello, conocido el sentido de circulación del caudal por la cuerda, obsérvese que dicho subtrayecto deberá ser parte del trayecto que va del nudo común de la malla al nudo aguas abajo de la cuerda (el trayecto que muere en el nudo aguas arriba queda descartado).

Finalmente, para identificar las tuberías de dicho trayecto que configuran el subtrayecto a reforzar, bastará recorrer el mismo partiendo del nudo común y avanzando en el sentido aguas abajo (topológicamente hablando), hasta que el caudal cambie de sentido. De acuerdo con lo indicado anteriormente, para cancelar el caudal circulante por la cuerda, los caudales de las ramas que forman dicho subtrayecto deberán incrementarse con el referido caudal, y su diámetro ser aumentado para mantener la pérdida de carga, conforme se indica a continuación.

Normalmente, el último nudo del subtrayecto considerado será un nudo de conectividad 3 o mayor, aunque no es necesario, pues podría haber una demanda importante aplicada en el mismo satisfecha desde las dos tuberías concluyentes en él.

Obsérvese que las pérdidas en los tramos de la malla no pertenecientes al subtrayecto a reforzar, se verán alteradas al eliminar el caudal que circulaba por la cuerda, pero ello no afecta de manera importante a la precisión del modelo simplificado, pues estos tramos pasarán a ser ramas y probablemente se eliminen en las etapas 1 y 2 si se continúa simplificando el modelo. No obstante, se podría también reducir el diámetro de los tramos del subtrayecto complementario, para obtener la mayor coincidencia en todos los resultados.

9.6.1.3 Refuerzo de las tuberías del subtrayecto

Se trata ahora de resolver un problema simple de hidráulica. Se conoce el caudal Q_i que circulaba por cada rama del subtrayecto antes de abrir la malla, y se pretende determinar su nuevo diámetro a fin de transportar el caudal $Q_i + Q_0$ con la misma pérdida de carga, siendo Q_0 el caudal circulante para la cuerda a eliminar. De acuerdo con la figura, se tendrá, para cada rama del trayecto:

$$h_{f,i} = r_i Q_i^2 = r_{i,eq} (Q_i + Q_0)^2 \rightarrow r_{i,eq} = r_i \left(\frac{Q_i}{Q_i + Q_0} \right)^2$$

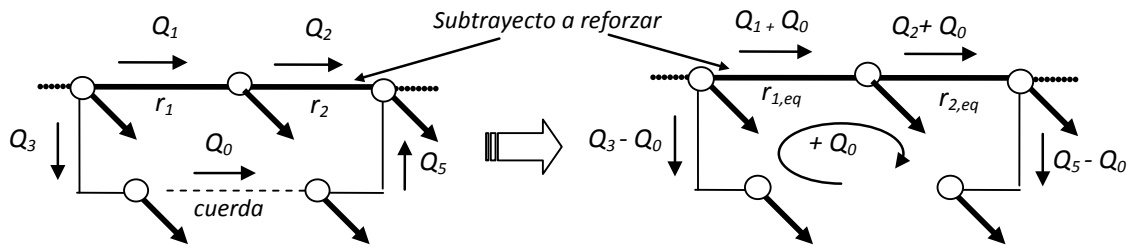


FIGURA 90. CÁLCULO DE LOS DIÁMETROS EQUIVALENTES DEL SUBTRAYECTO A REFORZAR.

Si admitimos ahora para r la expresión de Darcy-Weisbach, la condición anterior se convierte en:

$$D_{i,eq} = D_i \sqrt[5]{\left(\frac{Q_i + Q_0}{Q_i}\right)^2 \frac{f_{i,eq} L_{i,eq}}{f_i L_i}}$$

y si asumimos, como parece razonable:

$$L_{i,eq} = L_i \quad k_{i,eq} = k_i$$

se tendrá aproximadamente:

$$D_{i,eq} = D_i \sqrt[5]{\left(\frac{Q_i + Q_0}{Q_i}\right)^2}$$

En realidad, si se quisiera realizar un cálculo más exacto del diámetro equivalente, habría que resolver la ecuación primera por aproximaciones sucesivas, dada la influencia que Q y D tienen en el cálculo del factor de fricción. No obstante, dadas las aproximaciones efectuadas desde el comienzo, tal refinamiento carece de sentido práctico en esta etapa del proceso.

9.6.1.4 Estrangulamiento de las tuberías del subtrayecto complementario

La mayoría de los procesos de simplificación, tienden a aumentar los diámetros de las tuberías que permanecen en el modelo. En el caso del subtrayecto complementario, es probable que éste acabe en dos ramas sueltas que se eliminarían al revisar de nuevo las etapas 1 y 2. Sin embargo, puede haber también nudos de conectividad 3 en el subtrayecto complementario, por lo que en tal caso conviene ajustar los diámetros de este subtrayecto, por su influencia sobre otros nudos.

El procedimiento a seguir sería exactamente igual al descrito anteriormente, solo que el caudal Q_0 será negativo en este caso.

Establecidas ya todas las premisas previas, se pasa a describir el procedimiento general implementado mediante programación, en el que se adoptan algunas simplificaciones con respecto a todos los criterios descritos.

9.6.2 Procedimiento implementado en ordenador

Establecidas todas las premisas anteriores, el procedimiento general implementado en esta cuarta etapa consiste en:

1. Apoyándose en el árbol de mínima resistencia que debe haber sido identificado con anterioridad, realizar un barrido por todas las cuerdas presentes en el modelo.
2. Para cada cuerda, identificar la malla básica que define, estimar los caudales circulantes por las ramas (por acumulación en sentido aguas arriba) y deducir el caudal 'teórico' de la cuerda a partir de las pérdidas de carga en la malla, todo ello apoyándose de nuevo en la teoría de grafos y topología del árbol de mínima resistencia.
3. Si la cuerda no cumple los criterios de factibilidad correspondientes al tipo de línea, diámetro mínimo o es un elemento a preservar, renunciar a la eliminación de la cuerda y volver al paso 2. De lo contrario, continuar con el paso siguiente.
4. Identificar los dos trayectos en la malla que define la cuerda extraída y comprobar si se verifica que el caudal circulante por la cuerda es inferior al 10% del caudal máximo circulante por la malla ($Q_{CUERDA} < 1/10 \cdot Q_{Máx_Malla}$). En caso negativo, renunciar a la eliminación de la cuerda y volver al paso 2. En otro caso, continuar.
5. Eliminar la cuerda del modelo simplificado y reducir en 1 el grado de conectividad de sus nudos extremos.
6. Identificar el subtrayecto a reforzar, de los dos trayectos identificados en el paso 4.
7. Calcular los diámetros equivalentes de cada una de las ramas del subtrayecto y sustituir las ramas anteriores por otras con los nuevos diámetros. Éstas heredarán todos los parámetros de la rama eliminada, incluidos los topológicos.
8. Volver al paso 2 mientras queden cuerdas por analizar.
9. El proceso termina cuando se han comprobado todas las cuerdas.

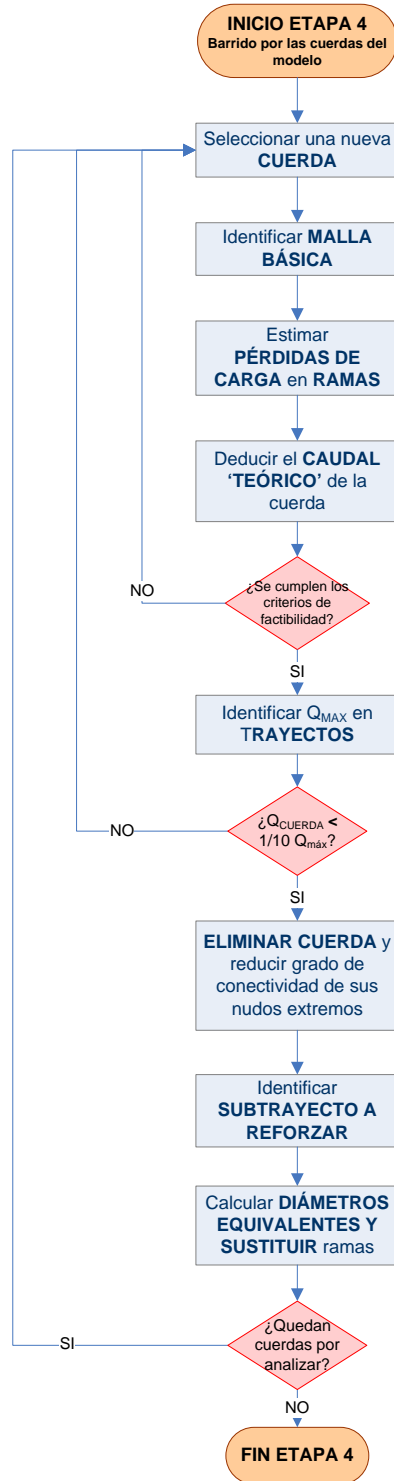


FIGURA 91. PROCEDIMIENTO DE ELIMINACIÓN DE MALLAS COMPLEJAS (ETAPA 4).

9.6.2.1 Observaciones

- Las cuerdas que cierran mallas simples que no han sido simplificadas mediante su asociación en paralelo durante la etapa 3, por no cumplir con alguno de los requisitos, volverán a salir en esta etapa como cuerdas candidatas a ser eliminadas. Su eliminación será probablemente desechada de nuevo al no cumplir los mismos requisitos. En cualquier caso, el procedimiento propuesto en la etapa 4 para reforzar el subtrayecto alternativo conducirá al mismo resultado que el procedimiento de simplificación propuesto en la etapa 3, como puede comprobarse.

- El trazado gráfico de las ramas reforzadas pertenecientes al subtrayecto es el mismo que el de las ramas originales.
- El orden de eliminación de las cuerdas puede afectar ligeramente a las características de las ramas reforzadas, en el caso de que el subtrayecto a reforzar sea parcial o totalmente compartido por otras mallas. En cambio, si las ramas del subtrayecto no se reforzaran, el orden de eliminación de las cuerdas sería totalmente irrelevante, dado que las mallas básicas están perfectamente definidas desde el comienzo de la etapa, y la eliminación de una cuerda no genera nuevas cuerdas (o mallas).
- Desde un punto de vista topológico, la eliminación de una cuerda tan solo supone la reducción en uno del número de mallas de la red. Los nudos de la red seguirán siendo los mismos, así como las demandas aplicadas en los mismos, ya que no se traslada ninguna demanda. Sin embargo, el efecto adicional que tiene la eliminación de una cuerda, desde el punto de vista topológico, es la reducción en uno del grado de conectividad de los nudos que conectaba, al igual que sucedía en la etapa 3. Por tanto, nudos de grado de conectividad 3 se convertirán en nudos de grado de conectividad 2 o nudos intermedios, y los nudos de conectividad 2 se convertirán en nudos terminales de conectividad 1. Por su parte, los nudos de conectividad mayor de 3, rebajarán éste en una unidad, sin más consecuencias en principio.
- Si se decide reforzar los diámetros del subtrayecto alternativo, las nuevas ramas creadas pasarán a convertirse en las líneas de acceso a los nudos situados aguas abajo, en sustitución de las ramas anteriores.
- En cuanto al orden topológico establecido inicialmente sobre la red original de detalle, seguirá conservándose, ya que la eliminación de la cuerda, si poseía algún orden asociado, tan solo creará un hueco en la numeración, lo que no afecta a la hora de establecer un 'orden' para el proceso de simplificación. Por su parte, el orden topológico de las ramas del subtrayecto reforzado deberá trasladarse a las nuevas ramas sustitutivas.
- Puesto que esta última etapa puede dar lugar a la aparición de nuevos nudos de conectividad 1 ó 2, antes de finalizar el proceso de simplificación habrá que realizar una nueva pasada y procesar de nuevo las etapas 1 y 2 por si se hubieran creado nuevas ramas terminales o nudos intermedios eliminables. En ningún caso pueden aparecer nuevas mallas simples tras la etapa 4.
- **La apertura de algunas mallas al eliminar la cuerda que las cerraba, va a producir cambios en el comportamiento hidráulico de la red, modificándose los valores de las presiones y caudales circulantes.** El umbral de caudal fijado para eliminar una cuerda con respecto al caudal principal de paso, afectará indudablemente a la precisión del modelo simplificado. Sin embargo, el reforzamiento de los diámetros para los subtrayectos alternativos puede atenuar bastante dichas discrepancias, permitiendo así incrementar dicho umbral y reducir en consecuencia el número de mallas a preservar.

Como se deduce de lo anterior, no todas las mallas de la red serán eliminadas tras la etapa cuatro, cosa que por otro lado, tampoco se pretende. Sin embargo, puede afirmarse, tras concluir esta etapa, que las mallas que aún permanecen tienen un papel significativo en el comportamiento hidráulico de la red, constituyendo verdaderas rutas alternativas para la circulación de caudales para el instante de simulación adoptado.

9.7 PROCEDIMIENTO GENERAL IMPLEMENTADO DE SIMPLIFICACIÓN DE UNA RED COMPLEJA

La etapa 1 en la que se eliminan los ramales terminales, puede dar lugar a la aparición de nuevos nudos intermedios de grado de conectividad 2. Por otra parte, la etapa 2 de eliminación de nudos intermedios, puede dar lugar a la aparición de nuevos ramales terminales candidatos a ser eliminados, lo que sugiere volver a la etapa 1.

A su vez, transcurridas las etapas 1 y 2 es posible que aparezcan nuevas mallas simples que no existían en el modelo original y que serán simplificadas en la etapa 3. Tras la etapa 3 pueden aparecer también nuevas ramas terminales y nudos intermedios que se podrían aún reducir volviendo a aplicar las etapas 1 y 2.

Finalmente, las mallas complejas, no tratadas en la etapa 3, pueden abrirse en la etapa 4 generando nuevos ramales y nudos intermedios, que serán eliminados si se aplican de nuevo las etapas 1 y 2. Por otra parte, antes de entrar en la etapa 4 hay que intentar reducir todas las mallas simples, ya que este proceso no modifica el comportamiento hidráulico de la red.

Por todo ello, las etapas 1, 2, 3 y 4 deben aplicarse necesariamente en ese orden, pero antes de pasar de una etapa a la siguiente, debe volverse cada vez a la etapa 1, de modo que el paso de una a otra se produzca únicamente cuando en la última pasada de las etapas anteriores no se haya producido ningún cambio.

Consecuentemente, el procedimiento programado con ordenador con motivo de esta tesis, generaliza en 7 pasos el proceso de simplificación del modelo de la red, a fin de mantener la coherencia y consistencia del mismo. Los pasos a aplicar son los siguientes:

1. **Etapa de simplificación 1.** Eliminar todos los ramales posibles y registrar mediante una variable de estado si se produce algún cambio en esta etapa.
2. **Etapa de simplificación 2.** Eliminar todos los nudos intermedios posibles y registrar mediante una variable de estado si se produce algún cambio en esta etapa.
3. Procesar de nuevo las **etapas 1 y 2** repetidamente y en ese orden, hasta que no se produzca ningún cambio en ninguna de estas etapas.
4. **Etapa de simplificación 3.** Reducir las posibles mallas simples y registrar mediante una variable de estado si se produce algún cambio en esta etapa.
5. Realizar los **pasos 1 a 4** hasta que no se produzca ningún cambio en las etapas 1, 2 y 3.
6. **Etapa de simplificación 4.** Eliminar las posibles cuerdas que cierran mallas complejas y registrar mediante una variable de estado si se produce algún cambio en esta etapa.
7. Realizar los **pasos 1 a 6** hasta que no se produzca ningún cambio en las etapas 1, 2, 3 y 4.

Tras finalizar el proceso de simplificación, es posible simular el modelo simplificado y determinar la magnitud media de las desviaciones respecto al modelo original.

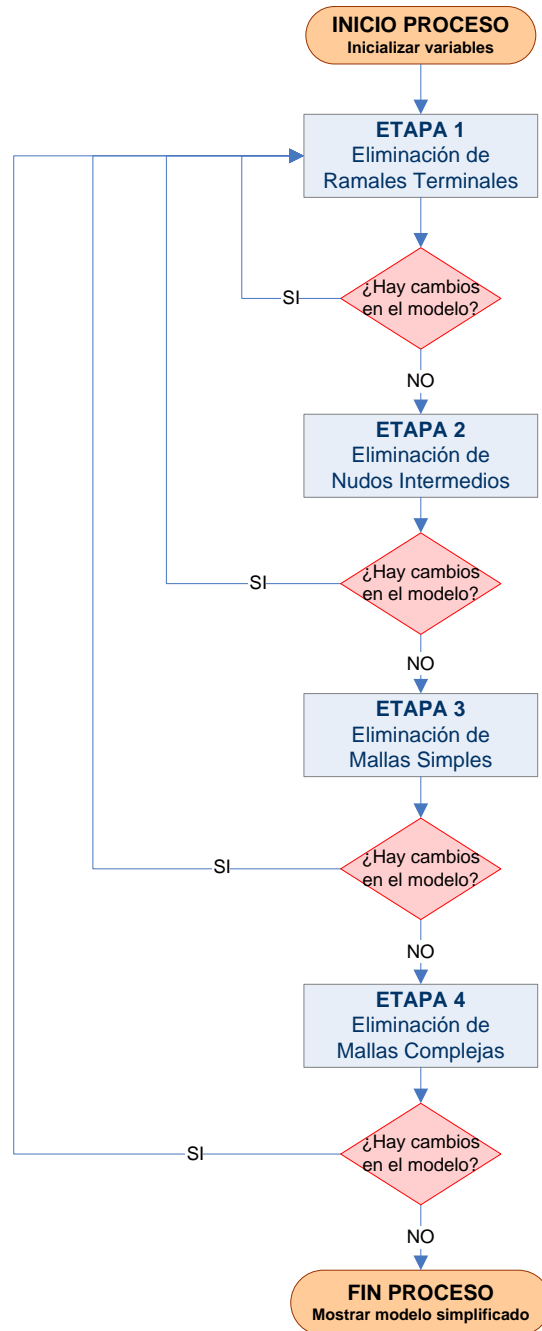


FIGURA 92. PROCEDIMIENTO GENERAL IMPLEMENTADO MEDIANTE CÓDIGO PARA LA SIMPLIFICACIÓN DE UN MODELO DE RED.

9.8 PARÁMETROS LÍMITES Y PRECISIÓN DEL MODELO SIMPLIFICADO

- Conforme al proceso de simulación descrito, los parámetros fundamentales que determinan el grado de simplificación de la red son dos: *el diámetro mínimo eliminable* y *el caudal mínimo eliminable*. El primero afecta a las 4 etapas, mientras que el segundo afecta tan solo a las etapas 1 y 2. A estos dos habría añadir el caudal máximo de circulación permitido por una cuerda para abrir malla.
- El grado de simplificación posible de la red se ve también afectado por la existencia de elementos especiales como depósitos, emisores, nudos de demanda múltiple, nudos de

inyección de caudal o de contaminante, válvulas, bombas, tuberías cerradas o provistas de válvula de retención, leyes de control y finalmente, la declaración explícita de algunos nudos o líneas como no eliminables.

- Si no se pusieran límites al diámetro y caudal mínimo demandado, ni tampoco al caudal mínimo circulante por una cuerda, y no se diera ninguna de las circunstancias anteriores (por ejemplo, en una red simple alimentada por gravedad desde un único depósito), el proceso de simplificación descrito conduciría a una red compuesta por un único nudo (el depósito de alimentación)
- En la práctica, van a ser fundamentalmente el diámetro mínimo y caudal mínimo impuestos, los factores limitantes que determinarán la mayor o menor complejidad del modelo simplificado.
- El grado de precisión del modelo simplificado respecto al original dependerá también de dichos parámetros fundamentalmente. Así, las posibles desviaciones pueden determinarse una vez finalizado el proceso.
- Para determinar el grado de precisión del modelo simplificado se debe analizar la desviación media de las presiones en todos los nudos respecto a las del modelo original, bien en términos absolutos, en términos relativos o clasificados por zonas o rangos de presiones. Además deberá observarse la desviación de los caudales salientes/entrantes a los depósitos respecto a sus valores originales, ya que los caudales en las líneas pueden verse considerablemente modificados por el hecho de eliminar e introducir nuevas tuberías.
- En la práctica, lo que importa fundamentalmente a la hora de dar por bueno un modelo simplificado es el análisis de las desviaciones observadas respecto al modelo original. Puesto que éstas dependen fundamentalmente del diámetro y caudal mínimo de demanda adoptados, así como del caudal máximo permitido en las cuerdas, podríamos proceder por tanteos a la hora de establecer dichos umbrales. Por ejemplo, se proponen valores límites para cada uno, se simplifica la red, se ejecuta el modelo, se computan las desviaciones, y se modifican en consecuencia dichos umbrales.
- El proceso anterior puede resultar tedioso, aun disponiendo de un método automático de simplificación. Puesto que en la práctica el usuario no tiene orden de magnitud a priori para dichos umbrales, pero sí en cuanto a las desviaciones permitidas con el modelo simplificado, la mejor manera de introducir las restricciones del proceso de simplificación, sería solicitando al usuario que determinase las desviaciones permitidas y que fuese el propio método de simplificación el que determinase los umbrales pertinentes, que por otro lado podrían no ser uniformes para toda la red. Esta sería una posible mejora a introducir en el procedimiento implementado y descrito en esta tesis, que daría lugar a una metodología alternativa a la propuesta para determinar el grado de simplificación alcanzable del modelo en función de la precisión deseada, en lugar de imponer unos diámetros y caudales mínimos. Esta alternativa se dejará para futuros desarrollos.
- En la propuesta implementada se ha considerado que **si una tubería estaba cerrada, no debería simplificarse**. En realidad **tal criterio debiera revisarse** en futuros desarrollos, pues es posible que interese eliminar en la red simplificada todas aquellas tuberías o válvulas simples (de regulación) que están permanentemente cerradas (no se tratan aquí las bombas o válvulas automáticas, las cuales deberán siempre mantenerse en el modelo simplificado). **Las líneas que se cierran solo temporalmente a lo largo de una simulación deberían siempre mantenerse en el modelo simplificado.**

En los procedimientos descritos a lo largo de este capítulo, se ha supuesto en todo momento que las pérdidas de carga se producían en elementos tipo tubería, y que éstas se evaluaban

mediante la ecuación de Darcy, de modo que $h = r q^2$, con $r = 8fL/\pi^2 gD^5$. Sobre el factor de fricción no se ha indicado cómo calcularlo, pero se entiende que tras realizar una estimación de los caudales circulantes, f ya puede determinarse utilizando la ecuación de Swamee-Jain. En otro caso, se podría adoptar como caudal circulante por cada tubería el equivalente a una velocidad de paso de 0,5 ó 1 m/s.

9.9 EJEMPLO DE ESQUELETIZACIÓN DEL MODELO DE UNA RED

Para ilustrar el procedimiento de simplificación de redes descrito en este capítulo, el proceso de esqueletización se va a aplicar paso a paso al siguiente modelo matemático de una red de transporte real:

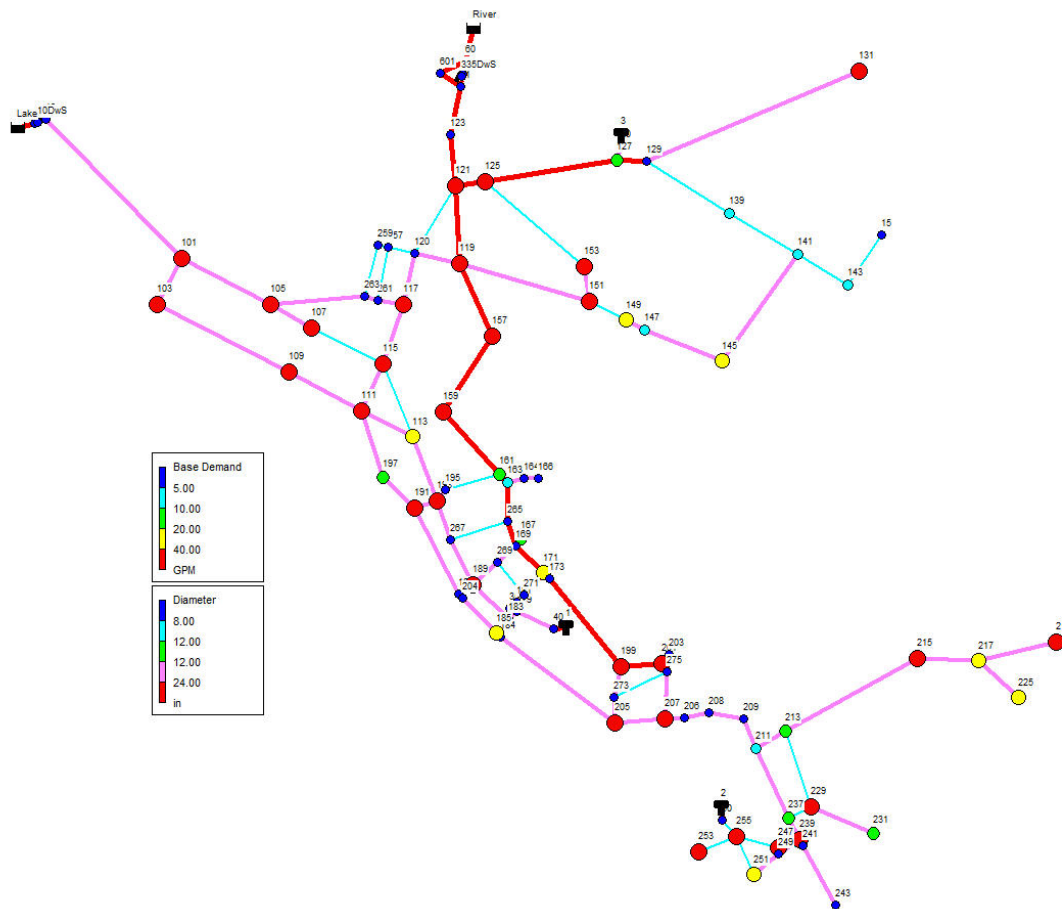


FIGURA 93. RED DE EJEMPLO A SIMPLIFICAR.

Obsérvese como junto a los nodos del modelo aparecen sus identificadores. Estos identificadores serán empleados para comparar resultados de presión en los nodos más característicos de los modelos simplificados. El modelo está compuesto por:

- Número de nodos de caudal: **95**
- Número de embalses: 2
- Número de depósitos: 3
- Número de tuberías: **119**
- Número de bombas: 2
- Número de válvulas de regulación: 0
- Curvas de modulación de la demanda de nodos: 1

- Unidades de caudal [US]: GPM (galones por minuto)
- Fórmula de pérdida de carga: Hazen-Williams

La demanda base de los nudos oscila entre 0,87 y 232 GPM, y los diámetros de las tuberías de transporte van de 8 a 30 pulgadas.

A la hora de simplificar el modelo, el procedimiento preserva los elementos singulares de la red, como embalses, depósitos, bombas y válvulas de regulación. Además, los criterios seguidos a la hora de simplificar el modelo son los detallados en cada una de las etapas presentadas a lo largo del capítulo. En definitiva, durante el proceso de esqueletización se van a eliminar únicamente nudos de caudal y tuberías, obteniendo en su lugar tuberías equivalentes que presenten la misma capacidad de transporte que aquellas eliminadas y nudos de caudal equivalentes cuya carga sea la suma de las demandas base de los nudos de caudal que van siendo eliminados.

Antes de comenzar con el procedimiento de simplificación, se debe obtener el **árbol de expansión de mínimo coste (MST)**, la **topología del árbol MST**, los índices **del orden topológico**, y la **agregación de demandas base** en cada una de las ramas del árbol, siguiendo el sentido aguas arriba hacia las fuentes de producción.

Los umbrales establecidos en el proceso de simplificación de los nudos de caudal y las tuberías es el siguiente:

- Demanda base umbral por encima de la cual no es posible eliminar el nudo: **300 GPM**
- Diámetro umbral por encima del cual no es posible eliminar una tubería: **25 pulgadas**

Siguiendo las etapas del proceso de esqueletización descrito, los resultados obtenidos son los siguientes:

ETAPA 0: MODELO ORIGINAL SIN SIMPLIFICAR

- Número de nudos de caudal: **95**
- Número de embalses: 2
- Número de depósitos: 3
- Número de tuberías: **119**
- Número de bombas: 2
- Número de válvulas de regulación: 0

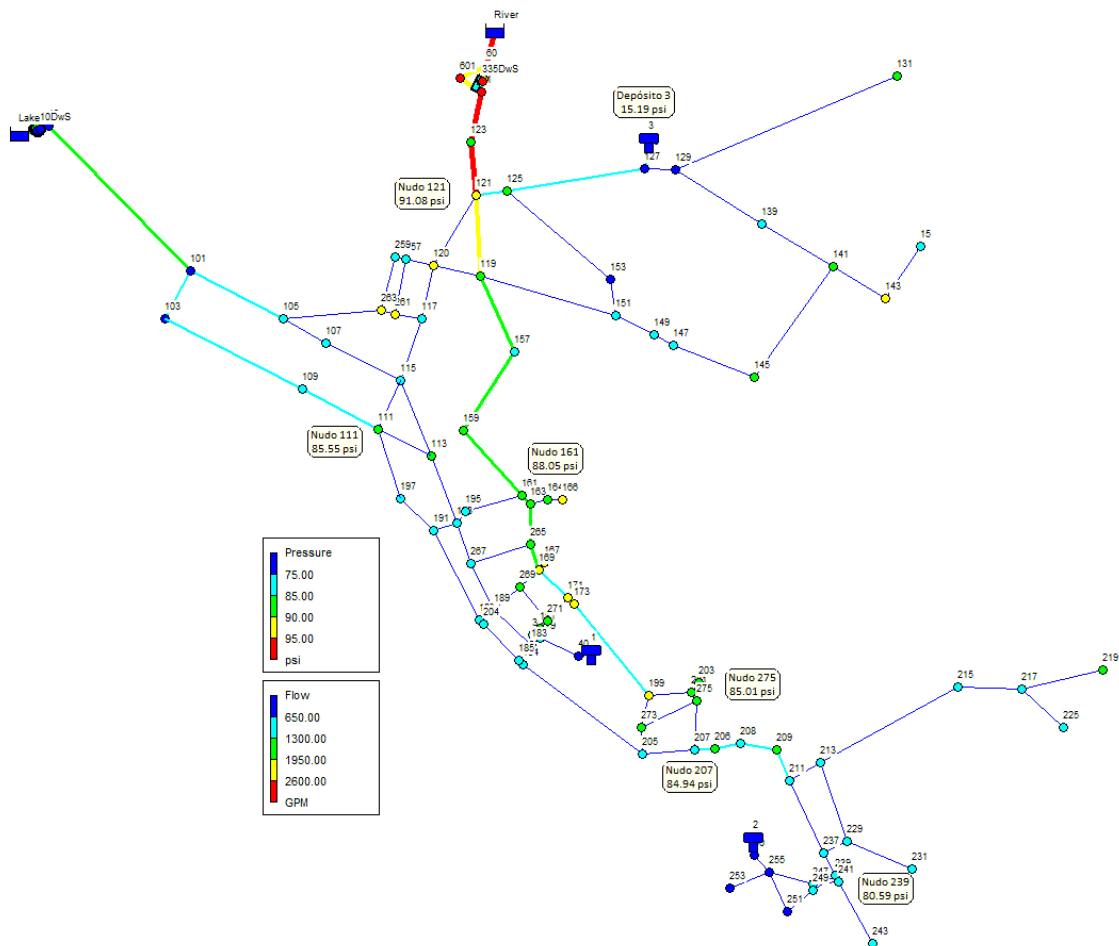


FIGURA 94. CAUDALES Y PRESIONES MEDIAS DIARIAS EN EL MODELO ORIGINAL NO SIMPLIFICADO.

ETAPA 1: ELIMINACIÓN DE RAMAS TERMINALES

- Número de nudos de caudal: **79**
- Número de embalses: 2
- Número de depósitos: 3
- Número de tuberías: **103**
- Número de bombas: 2
- Número de válvulas de regulación: 0

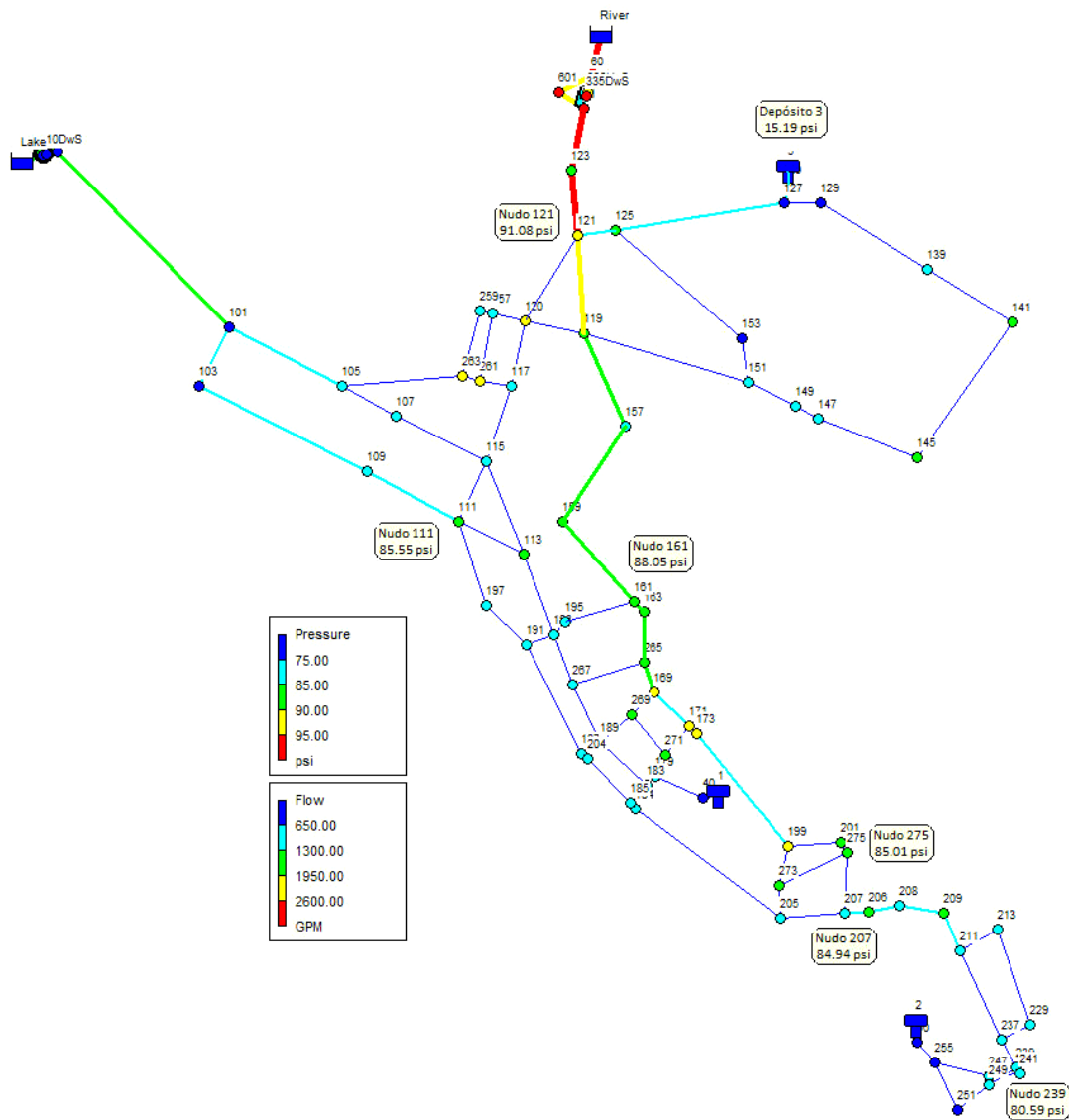


FIGURA 95. CAUDALES Y PRESIONES MEDIAS DIARIAS EN EL MODELO SIN RAMALES TERMINALES.

ETAPA 2: ELIMINACIÓN DE NUDOS INTERMEDIOS

- Número de nudos de caudal: 45
- Número de embalses: 2
- Número de depósitos: 3
- Número de tuberías: 69
- Número de bombas: 2
- Número de válvulas de regulación: 0

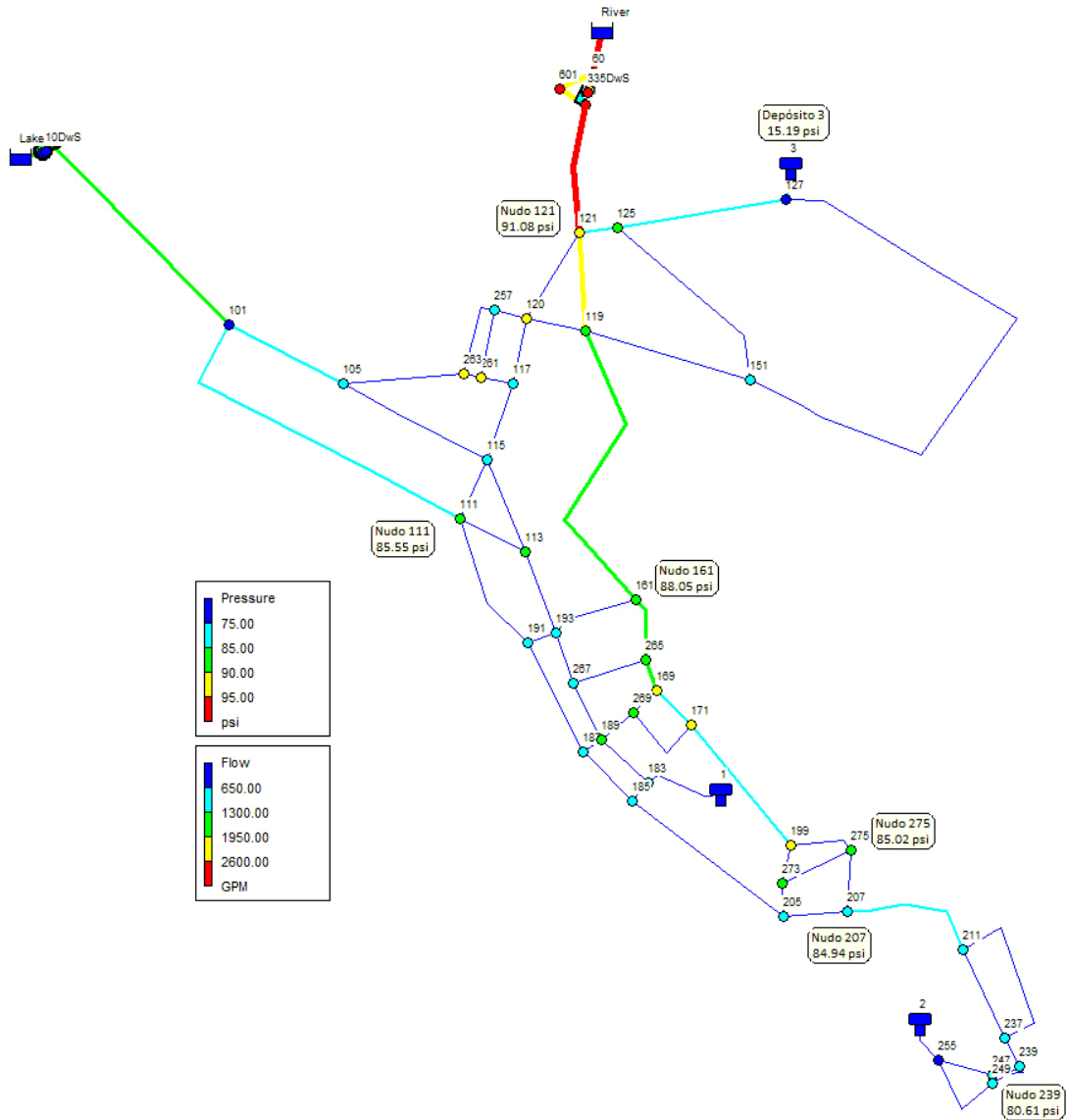


FIGURA 96. CAUDALES Y PRESIONES MEDIAS DIARIAS EN EL MODELO SIN NUDOS INTERMEDIOS.

ETAPA 3: REDUCCIÓN DE MALLAS SIMPLES

- Número de nudos de caudal: **43**
- Número de embalses: 2
- Número de depósitos: 3
- Número de tuberías: **66**
- Número de bombas: 2
- Número de válvulas de regulación: 0

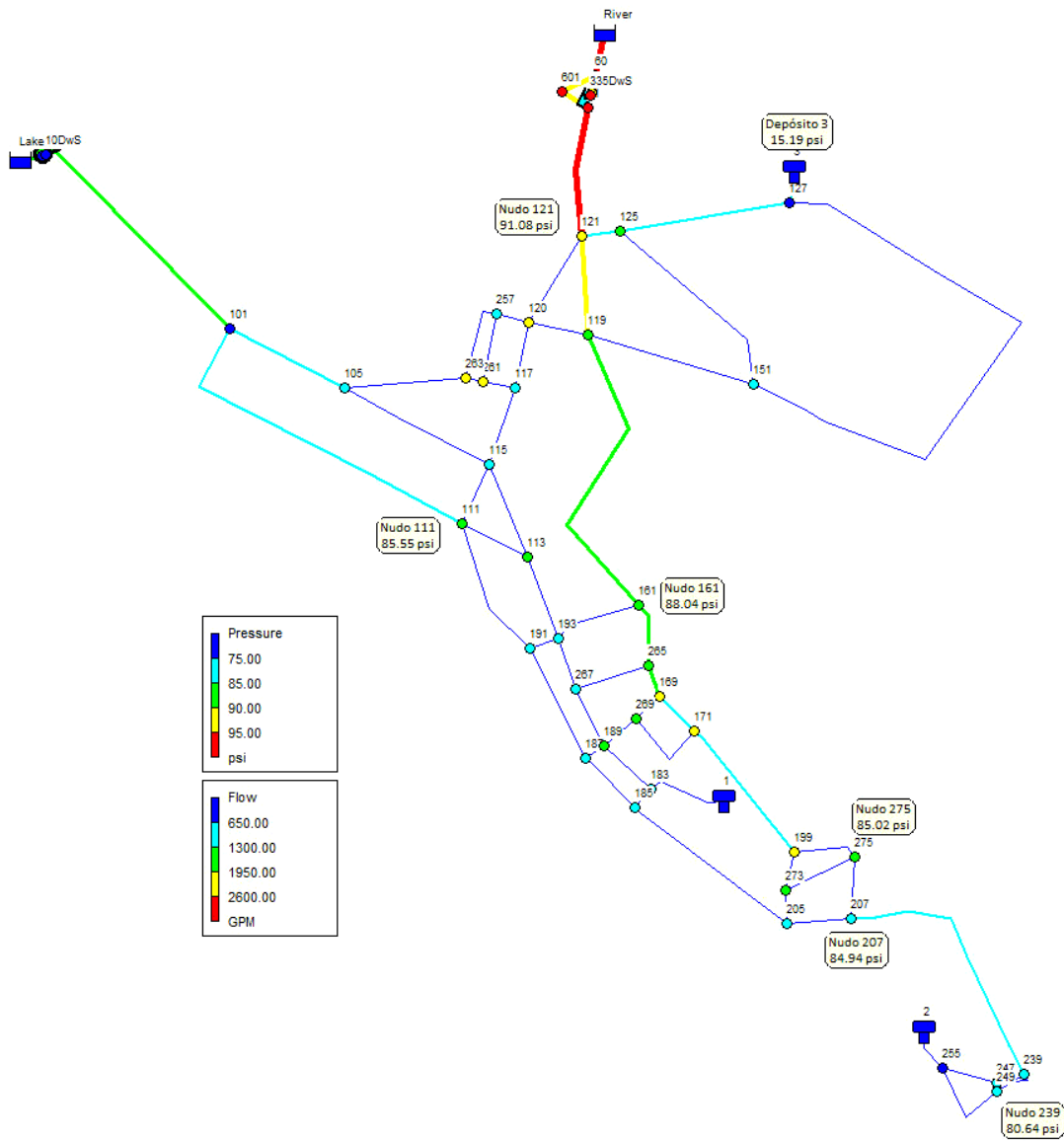


FIGURA 97. CAUDALES Y PRESIONES MEDIAS DIARIAS EN EL MODELO SIN MALLAS SIMPLES.

ETAPA 4: REDUCCIÓN DE MALLAS COMPLEJAS

En esta etapa el criterio de eliminación de mallas complejas es el siguiente:

Caudal circulante por la cuerda debe ser inferior al 10% del caudal máximo circulante por la malla ($Q_{\text{CUERDA}} < 0,1 \cdot Q_{\text{Máx_Malla}}$)

- Número de nudos de caudal: **40**
- Número de embalses: 2
- Número de depósitos: 3
- Número de tuberías: **60**
- Número de bombas: 2
- Número de válvulas de regulación: 0

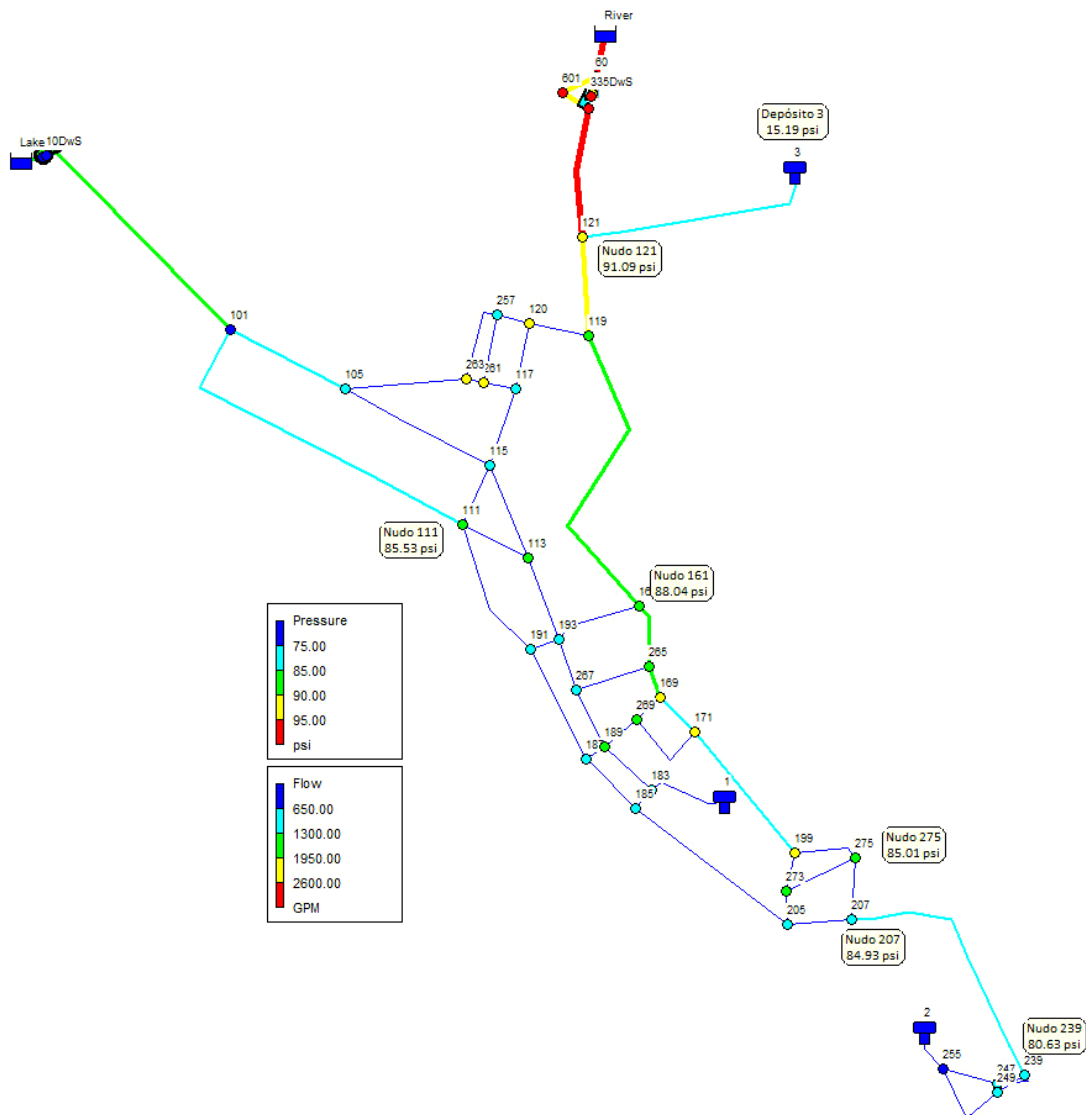


FIGURA 98. CAUDALES Y PRESIONES MEDIAS DIARIAS EN EL MODELO SIN MALLAS COMPLEJAS.

ETAPA 5: REDUCCIÓN DE MALLAS COMPLEJAS (modificando el criterio de eliminación de mallas complejas).

Para poder seguir simplificando la red, se ha modificado ligeramente el criterio de eliminación de las mallas complejas y en este caso el criterio para la eliminación de la malla ha sido:

Caudal circulante por la cuerda debe ser inferior al 30% del caudal máximo circulante por la malla ($Q_{CUERDA} < 0,3 \cdot Q_{Máx_Malla}$)

Con esta restricción más laxa, los resultados obtenidos son los siguientes:

- Número de nudos de caudal: **18**
- Número de embalses: 2
- Número de depósitos: 3
- Número de tuberías: **24**
- Número de bombas: 2
- Número de válvulas de regulación: 0

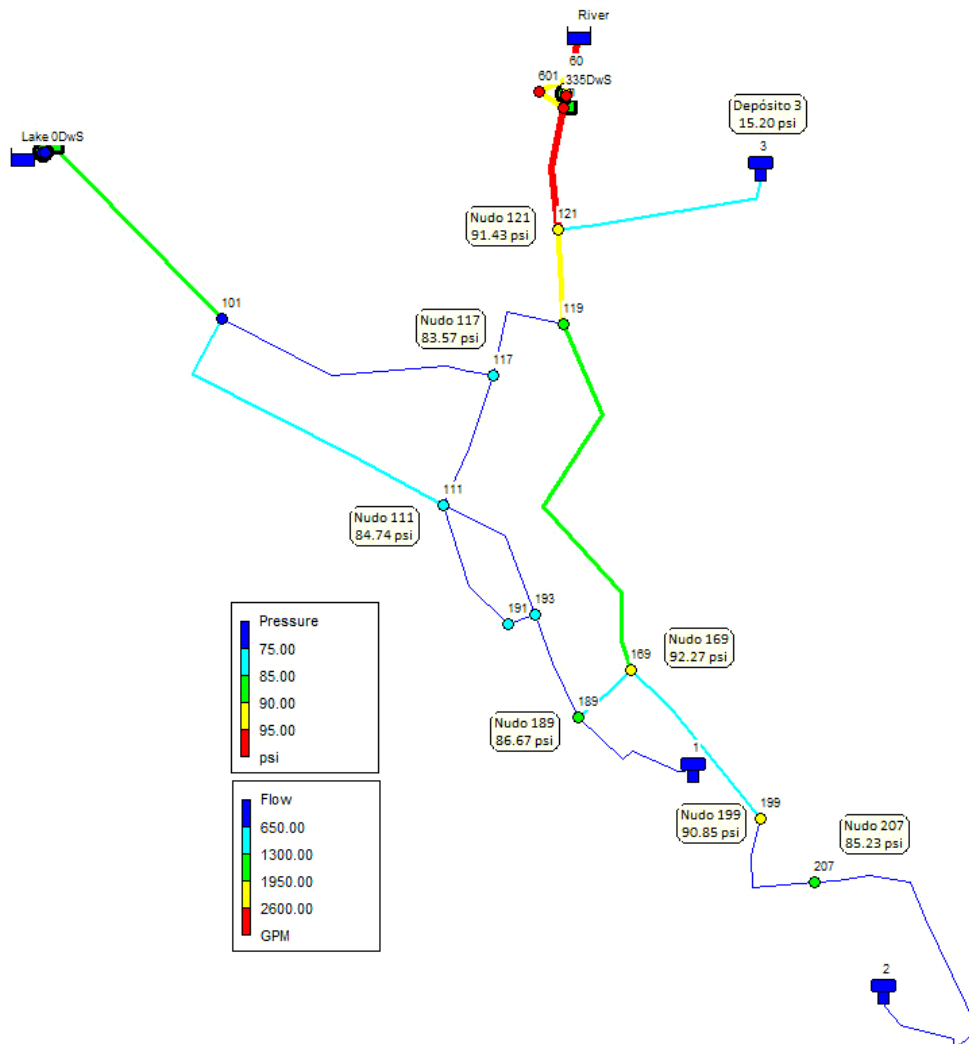


FIGURA 99. CAUDALES Y PRESIONES MEDIAS DIARIAS EN EL MODELO SIN MALLAS COMPLEJAS (CRITERIO DE ELIMINACIÓN DE MALLAS COMPLEJAS MENOS RESTRICTIVO).

En definitiva, la evolución de la red a lo largo de las etapas de simplificación se resume en la siguiente tabla.

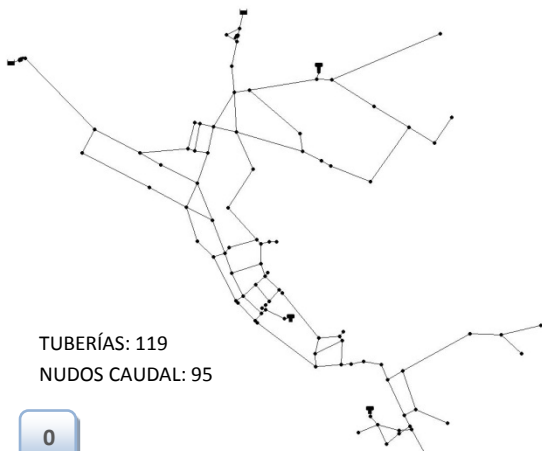
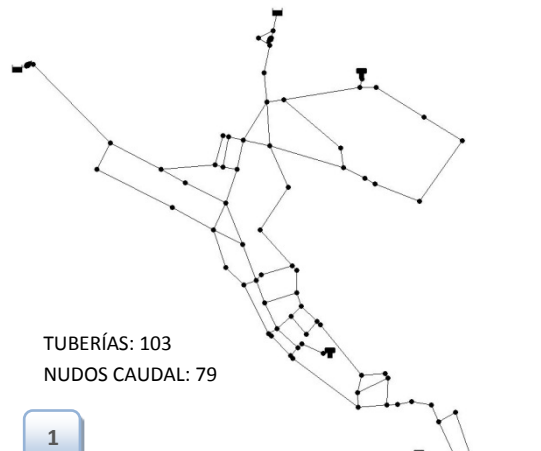
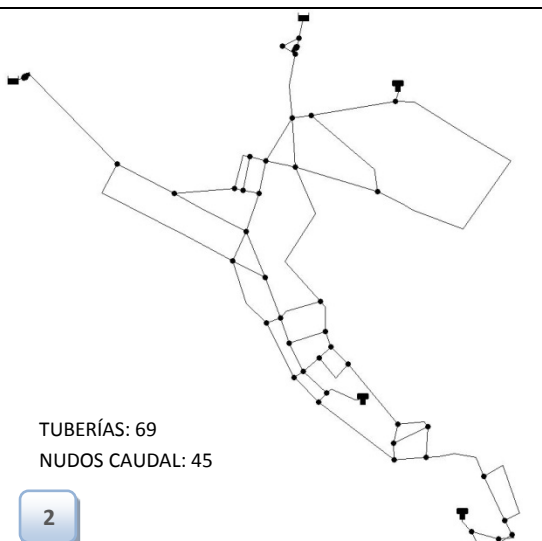
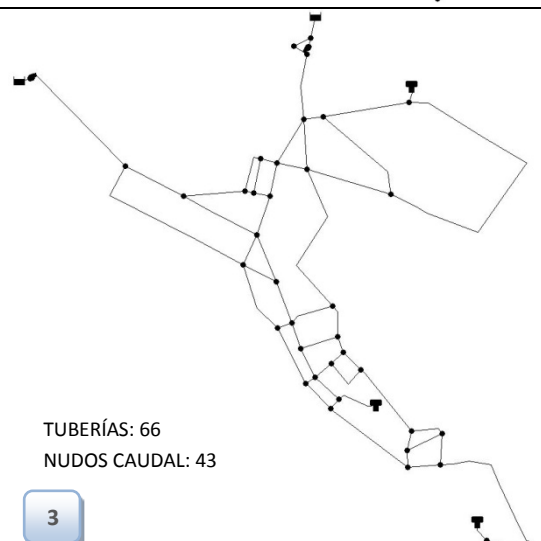
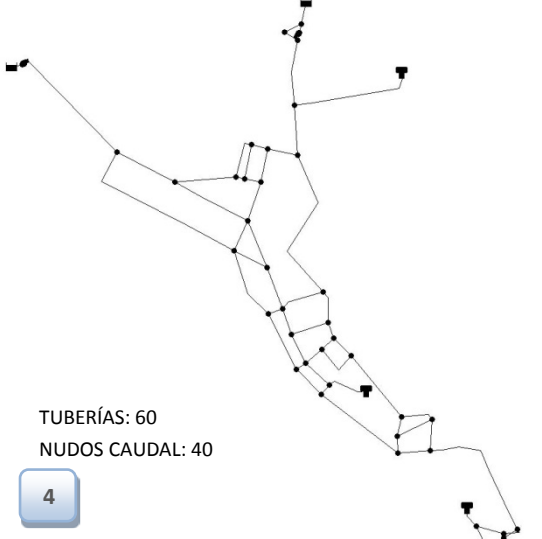
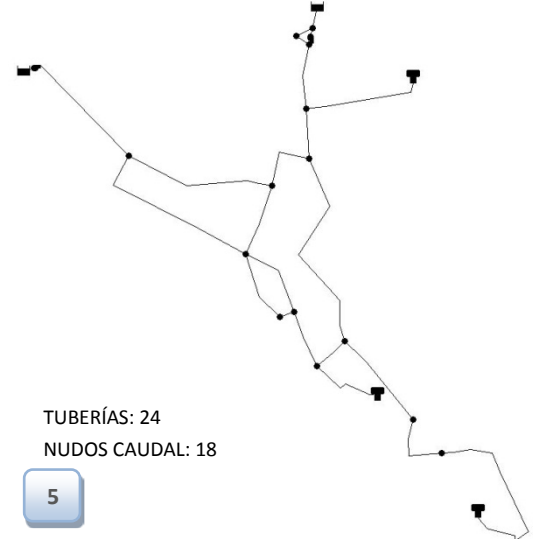
CUADRO RESUMEN DE LAS ETAPAS DE SIMPLIFICACIÓN	
 <p>TUBERÍAS: 119 NUDOS CAUDAL: 95</p> <p>0</p>	 <p>TUBERÍAS: 103 NUDOS CAUDAL: 79</p> <p>1</p>
 <p>TUBERÍAS: 69 NUDOS CAUDAL: 45</p> <p>2</p>	 <p>TUBERÍAS: 66 NUDOS CAUDAL: 43</p> <p>3</p>
 <p>TUBERÍAS: 60 NUDOS CAUDAL: 40</p> <p>4</p>	 <p>TUBERÍAS: 24 NUDOS CAUDAL: 18</p> <p>5</p>

TABLA 14. CUADRO RESUMEN DE LAS ETAPAS DE SIMPLIFICACIÓN DEL MODELO DE RED.

La coincidencia de las presiones medias diarias computadas en los nudos tras la simulación hidráulica de los modelos obtenidos en cada una de las etapas de simplificación, indica que los modelos son hidráulicamente equivalentes, que es el objetivo perseguido al aplicar el método de esqueletización. Los resultados numéricos de presión media en cada modelo se presentan en la tabla siguiente:

PRESIONES EN LOS NUDOS DEL MODELO												
ID Nudo	MODELO 0		MODELO 1		MODELO 2		MODELO 3		MODELO 4		MODELO 5	
	Demanda (GPM)	Presión (psi)	Demanda (GPM)	Presión (psi)	Demanda (GPM)	Presión (psi)	Demanda (GPM)	Presión (psi)	Demanda (GPM)	Presión (psi)	Demanda (GPM)	Presión (psi)
Nudo 10	0,00	37,97	0,00	37,97	Nudo Simplificado							
Nudo 15	1,08	75,78	Nudo Simplificado									
Nudo 20	0,00	33,46	0,00	33,46	Nudo Simplificado							
Nudo 35	1,08	84,25	Nudo Simplificado									
Nudo 40	0,00	29,01	0,00	29,01	Nudo Simplificado							
Nudo 50	0,00	34,93	0,00	34,93	Nudo Simplificado							
Nudo 60	0,00	94,71	0,00	94,71	0,00	94,71	0,00	94,71	0,00	94,71	0,00	94,61
Nudo 601	0,00	98,15	0,00	98,15	0,00	98,15	0,00	98,15	0,00	98,16	0,00	99,78
Nudo 61	0,00	98,15	0,00	98,15	0,03	98,15	0,03	98,15	0,03	98,16	0,00	99,78
Nudo 101	205,22	73,81	205,22	73,81	499,10	73,80	499,10	73,80	499,10	73,78	537,62	72,77
Nudo 103	143,91	73,01	143,91	73,01	Nudo Simplificado							
Nudo 105	146,25	78,15	146,25	78,15	205,29	78,13	205,29	78,13	205,29	78,10	Nudo Simplificado	
Nudo 107	59,03	80,87	59,03	80,87	Nudo Simplificado							
Nudo 109	250,00	82,02	250,00	82,02	Nudo Simplificado							
Nudo 111	153,35	85,55	153,35	85,55	253,39	85,55	253,39	85,55	253,39	85,53	401,74	84,74
Nudo 113	21,62	88,86	21,62	88,86	21,62	88,86	21,62	88,86	21,62	88,84	Nudo Simplificado	
Nudo 115	56,29	83,84	56,29	83,84	56,29	83,85	56,29	83,85	56,29	83,83	Nudo Simplificado	
Nudo 117	127,17	84,09	127,17	84,09	127,17	84,10	127,17	84,10	127,17	84,07	333,16	83,57
Nudo 119	190,29	89,22	190,29	89,22	242,10	89,22	242,10	89,22	539,04	89,22	498,51	89,56
Nudo 120	0,00	90,07	0,00	90,07	0,00	90,07	0,00	90,07	0,00	90,04	Nudo Simplificado	
Nudo 121	44,98	91,08	44,98	91,08	46,02	91,08	46,02	91,08	160,56	91,09	117,83	91,43
Nudo 123	1,08	85,70	1,08	85,70	Nudo Simplificado							
Nudo 125	49,27	85,31	49,27	85,31	49,27	85,32	49,27	85,31	Nudo Simplificado			
Nudo 127	19,08	65,36	19,08	65,36	65,27	65,37	65,27	65,37	Nudo Simplificado			
Nudo 129	0,00	67,53	46,19	67,53	Nudo Simplificado							
Nudo 131	46,19	87,02	Nudo Simplificado									
Nudo 139	6,36	76,20	6,36	76,20	Nudo Simplificado							
Nudo 141	10,64	87,92	18,42	87,92	Nudo Simplificado							
Nudo 143	6,70	91,60	Nudo Simplificado									
Nudo 145	29,85	89,24	29,85	89,24	Nudo Simplificado							
Nudo 147	9,24	81,68	9,24	81,68	Nudo Simplificado							
Nudo 149	29,25	82,77	29,25	82,77	Nudo Simplificado							
Nudo 151	156,10	75,32	156,10	75,32	296,94	75,29	296,94	75,29	Nudo Simplificado			
Nudo 153	47,72	61,15	47,72	61,15	Nudo Simplificado							
Nudo 157	55,95	84,32	55,95	84,32	Nudo Simplificado							
Nudo 159	44,64	87,26	44,64	87,26	Nudo Simplificado							
Nudo 161	17,07	88,05	17,07	88,05	75,41	88,05	75,41	88,04	75,41	88,04	Nudo Simplificado	
Nudo 163	10,18	87,60	12,99	87,60	Nudo Simplificado							
Nudo 164	0,00	87,60	Nudo Simplificado									
Nudo 166	2,81	90,63	Nudo Simplificado									
Nudo 167	15,73	91,86	Nudo Simplificado									
Nudo 169	0,00	91,86	15,73	91,86	15,73	91,86	15,73	91,86	15,73	91,86	0,00	92,27
Nudo 171	42,50	91,40	42,50	91,40	43,58	91,41	43,58	91,40	43,58	91,40	Nudo Simplificado	
Nudo 173	0,00	91,40	0,00	91,40	Nudo Simplificado							
Nudo 179	0,00	84,49	0,00	84,49	Nudo Simplificado							
Nudo 181	0,00	86,20	Nudo Simplificado									

PRESIONES EN LOS NUDOS DEL MODELO												
	MODELO 0		MODELO 1		MODELO 2		MODELO 3		MODELO 4		MODELO 5	
	Red Sin Simplificar		Red Sin Ramales Terminales		Red Sin Nudos Intermedios		Red Sin Mallas Simples		Red Sin Mallas Complejas		Red Sin Mallas Complejas (umbrales más altos)	
ID Nudo	Demanda (GPM)	Presión (psi)	Demanda (GPM)	Presión (psi)	Demanda (GPM)	Presión (psi)	Demanda (GPM)	Presión (psi)	Demanda (GPM)	Presión (psi)	Demanda (GPM)	Presión (psi)
Nudo 183	0,00	83,51	0,00	83,51	0,00	83,51	0,00	83,51	0,00	83,50	Nudo Simplificado	
Nudo 184	0,00	82,07	0,00	82,07	Nudo Simplificado							
Nudo 185	27,71	82,06	27,71	82,06	27,71	82,06	27,71	82,05	27,71	82,04	Nudo Simplificado	
Nudo 187	0,00	83,80	0,00	83,80	0,00	83,81	0,00	83,81	0,00	83,80	Nudo Simplificado	
Nudo 189	116,60	87,51	116,60	87,51	116,60	87,51	116,60	87,51	116,60	87,50	305,45	86,67
Nudo 191	88,48	78,65	88,48	78,65	106,89	78,65	106,89	78,65	106,89	78,63	304,40	77,54
Nudo 193	77,04	81,69	77,04	81,69	77,04	81,69	77,04	81,69	77,04	81,68	201,83	80,58
Nudo 195	0,00	82,78	0,00	82,78	Nudo Simplificado							
Nudo 197	18,41	79,62	18,41	79,62	Nudo Simplificado							
Nudo 199	128,91	90,35	128,91	90,35	167,58	90,35	167,58	90,34	167,58	90,34	337,71	90,85
Nudo 201	48,20	89,43	49,28	89,43	Nudo Simplificado							
Nudo 203	1,08	88,60	Nudo Simplificado									
Nudo 204	0,00	80,04	0,00	80,04	Nudo Simplificado							
Nudo 205	70,61	79,97	70,61	79,97	70,61	79,97	70,61	79,97	70,61	79,96	Nudo Simplificado	
Nudo 206	0,00	88,03	0,00	88,03	Nudo Simplificado							
Nudo 207	74,97	84,94	74,97	84,94	75,10	84,94	174,87	84,94	174,87	84,93	196,40	85,23
Nudo 208	0,00	81,11	0,00	81,11	Nudo Simplificado							
Nudo 209	0,94	88,17	0,94	88,17	Nudo Simplificado							
Nudo 211	9,37	84,02	9,37	84,02	220,28	84,09	Nudo Simplificado					
Nudo 213	15,06	83,98	210,11	83,98	Nudo Simplificado							
Nudo 215	99,60	83,93	Nudo Simplificado									
Nudo 217	26,17	84,35	Nudo Simplificado									
Nudo 219	44,64	85,22	Nudo Simplificado									
Nudo 225	24,63	83,48	Nudo Simplificado									
Nudo 229	69,34	81,94	87,15	81,94	Nudo Simplificado							
Nudo 231	17,80	84,32	Nudo Simplificado									
Nudo 237	16,87	80,35	16,87	80,35	104,01	80,37	Nudo Simplificado					
Nudo 239	48,20	80,59	48,20	80,59	52,89	80,61	277,41	80,64	277,41	80,63	Nudo Simplificado	
Nudo 241	0,00	80,59	4,69	80,59	Nudo Simplificado							
Nudo 243	4,69	80,16	Nudo Simplificado									
Nudo 247	76,04	78,37	76,04	78,37	76,04	78,38	76,04	78,41	76,04	78,40	Nudo Simplificado	
Nudo 249	0,00	78,37	0,00	78,37	26,10	78,38	26,10	78,41	26,10	78,40	Nudo Simplificado	
Nudo 251	26,10	73,10	26,10	73,10	Nudo Simplificado							
Nudo 253	58,90	70,20	Nudo Simplificado									
Nudo 255	43,64	74,11	102,54	74,11	102,54	74,12	102,54	74,15	102,54	74,14	Nudo Simplificado	
Nudo 257	0,00	82,70	0,00	82,70	0,00	82,70	0,00	82,70	0,00	82,67	Nudo Simplificado	
Nudo 259	0,00	79,24	0,00	79,24	Nudo Simplificado							
Nudo 261	0,00	90,05	0,00	90,05	0,00	90,05	0,00	90,05	0,00	90,02	Nudo Simplificado	
Nudo 263	0,00	90,09	0,00	90,09	0,00	90,09	0,00	90,09	0,00	90,06	Nudo Simplificado	
Nudo 265	0,00	89,72	0,00	89,72	3,43	89,72	3,43	89,72	3,43	89,71	Nudo Simplificado	
Nudo 267	0,00	80,33	0,00	80,33	0,00	80,33	0,00	80,33	0,00	80,32	Nudo Simplificado	
Nudo 269	0,00	89,51	0,00	89,51	0,00	89,52	0,00	89,51	0,00	89,50	Nudo Simplificado	
Nudo 271	0,00	87,07	1,08	87,07	Nudo Simplificado							
Nudo 273	0,00	85,82	0,00	85,82	0,00	85,82	0,00	85,81	0,00	85,80	Nudo Simplificado	
Nudo 275	0,00	85,01	0,00	85,01	10,61	85,02	10,61	85,02	10,61	85,01	Nudo Simplificado	
Nudo 335UpS	0,00	94,71	0,00	94,71	0,00	94,71	0,00	94,71	0,00	94,71	0,00	94,61
Nudo 35Dws	0,00	98,15	0,00	98,15	0,00	98,15	0,00	98,15	0,00	98,16	0,00	99,78
Nudo 10UpS	0,00	8,67	0,00	8,67	0,00	8,67	0,00	8,67	0,00	8,67	0,00	8,67
Nudo 10Dws	0,00	37,97	0,00	37,97	0,00	37,97	0,00	37,97	0,00	37,94	0,00	37,07
Emb. River	-3277,70	0,00	-3277,70	0,00	-3276,75	0,00	-3277,19	0,00	-3276,71	0,00	-3479,90	0,00
Emb. Lake	-1487,06	0,00	-1487,06	0,00	-1487,68	0,00	-1487,78	0,00	-1487,23	0,00	-1499,89	0,00
Depósito 1	608,10	12,79	608,10	12,79	607,75	12,79	607,47	12,79	608,00	12,79	620,70	12,69

PRESIONES EN LOS NUDOS DEL MODELO												
	MODELO 0		MODELO 1		MODELO 2		MODELO 3		MODELO 4		MODELO 5	
	Red Sin Simplificar		Red Sin Ramales Terminales		Red Sin Nudos Intermedios		Red Sin Mallas Simples		Red Sin Mallas Complejas		Red Sin Mallas Complejas (umbrales más altos)	
ID Nudo	Demanda (GPM)	Presión (psi)	Demanda (GPM)	Presión (psi)	Demanda (GPM)	Presión (psi)	Demanda (GPM)	Presión (psi)	Demanda (GPM)	Presión (psi)	Demanda (GPM)	Presión (psi)
Depósito 2	173,22	16,54	173,22	16,54	172,64	16,53	173,86	16,54	174,12	16,54	167,78	16,75
Depósito 3	748,79	15,19	748,79	15,19	749,38	15,19	748,99	15,19	747,17	15,19	956,66	15,20

TABLA 15. RESULTADOS DE PRESIÓN EN LOS MODELOS SIMPLIFICADOS OBTENIDOS.

Los errores de las presiones medias en los nudos de cada uno de los modelos simplificados con respecto a los nudos del modelo original, se muestran en la siguiente tabla:

	Nº Nudos	Error absoluto medio (psi)	Error cuadrático medio [RMS Error] (psi)	Error absoluto medio (mca)	Error cuadrático medio [RMS Error] (mca)
Modelo 1	84,00	0,000	0,000	0,000	0,000
Modelo 2	50,00	0,006	0,013	0,004	0,009
Modelo 3	48,00	0,007	0,014	0,005	0,010
Modelo 4	45,00	0,014	0,019	0,010	0,013
Modelo 5	23,00	0,593	0,801	0,421	0,569

TABLA 16. ERRORES EN LAS PRESIONES MEDIAS EN LOS NUDOS DE CADA UNO DE LOS MODELOS CON RESPECTO A LOS NUDOS DEL MODELO ORIGINAL.

3ª PARTE

OBTENCIÓN DE MODELOS HIDRÁULICOS MEJOR AJUSTADOS A LA REALIDAD

CAPÍTULO 10

PROBLEMÁTICA DE LOS MODELOS REALES

CAPÍTULO 10. PROBLEMÁTICA DE LOS MODELOS REALES

10.1 INTRODUCCIÓN

Tras desarrollar toda una serie de herramientas orientadas a la confección de modelos de redes de distribución de agua a presión y programar funcionalidades adicionales en un entorno SIG, destinadas al soporte en el proceso de toma de decisiones en la gestión diaria de un abastecimiento, surge la necesidad de disponer de potentes herramientas informáticas creadas ad hoc para el manejo de grandes volúmenes de información, como por ejemplo los datos de abonados, las lecturas de los contadores domiciliarios o bien la gestión de datos históricos de señales controladas por un sistema SCADA.

Lo ideal es que estas herramientas se desarrollen sin interferir en los sistemas de información de la empresa, permitiendo conectar con los mismos para la consulta y extracción de toda la información relevante.

Este es el motivo principal por el cual se han desarrollado nuevos módulos de gestión de información orientados a la **obtención de modelos hidráulicos ajustados a la realidad**. Esto lleva asociado una serie de inconvenientes debido a la naturaleza cambiante de las redes en servicio. Entre los episodios más comunes que suelen darse en las redes de agua, destacan por ejemplo las **operaciones de mantenimiento y maniobras** que se suelen llevar a cabo sobre los diversos elementos de la red, **ampliación de la red** en las nuevas zonas de expansión, **refuerzo** de ciertos **tramos** para garantizar el servicio, puesta en marcha de **nuevas fuentes de suministro**, **sectorización** de toda o parte de la red, etc. Todo ello hace que la complejidad a la hora de confeccionar un modelo aumente enormemente, puesto que dependiendo del período o instante para el que se desee ensamblar el modelo, éste estará sometido a unas u otras condiciones de contorno o bien tendrá mayor o menor número de elementos que entrarán en juego.

Además de todos estos inconvenientes, aparecen dificultades adicionales que surgen en el proceso de modelación. Por ejemplo, **una vez realizada la sectorización de la red de agua potable** con la ayuda de las herramientas descritas anteriormente e instalados los caudalímetros y transductores de presión requeridos, se hace necesaria la supervisión en tiempo real de las señales monitorizadas, la gestión de las bases de datos de los históricos de agua inyectada y su comparación con el agua registrada por el parque de contadores.

Si además se tiene en cuenta que la telelectura es ya una realidad que en pocos años alcanzará a la totalidad del parque de contadores de muchos abastecimientos en España, esta situación hace que sea posible efectuar balances en cortos periodos de tiempo para facilitar el diagnóstico de las redes. Pero para ello es necesario abordar antes el desarrollo de un complejo sistema informático, ya que tanto en la medida del agua inyectada a la red como en el registro de las lecturas de los contadores, existe mucha casuística y una gran problemática que hay que resolver para la elaboración de balances hídricos fiables. Por todo ello, se hace necesario el desarrollo de herramientas específicas que analicen y resuelvan dichos inconvenientes.

Además, un problema particular que surge en las redes sectorizadas, es que la **delimitación de los sectores no se mantiene inalterable en el tiempo**, debido a las continuas operaciones de mantenimiento realizadas en la red. Así la reparación de una avería puede obligar a abrir

determinadas válvulas que aislaban un sector, cosa que debe tenerse en cuenta a la hora de realizar los balances de volúmenes, así como al analizar los caudales mínimos nocturnos, ya que unos y otros pueden verse afectados claramente por las maniobras efectuadas. La no consideración de estas maniobras podría conducir a falsas interpretaciones o conclusiones.

Es por ello que, tomando como punto de referencia la extensión GISRed, se han desarrollado nuevas funcionalidades para el análisis de los consumos en los puntos de suministro domiciliarios, considerando la casuística existente entre acometidas, puntos de suministro, contadores y lecturas de éstos. Para ello se hace necesario acceder a los datos de campo elaborados por una aplicación SCADA, en concreto la aplicación SCARed, capaz de trabajar en paralelo con sistemas SCADA corporativos y encargado entre otras cosas de filtrar y depurar datos en tiempo real y diferido procedentes de los puntos de control de la red. El objetivo es la realización de balances hídricos por sectores que permitan estimar el rendimiento en los mismos para un período de tiempo determinado, a partir de la ingente información capturada de los equipos de medida. Todo ello, al objeto de detectar anomalías e incoherencias en la información y prestar asistencia en el diagnóstico de la red.

Una vez delimitados los sectores hidrométricos operativos en cada momento, la aplicación GISRed permite analizar los datos históricos registrados por los caudalímetros y asistir en la detección de las causas que puedan justificar el consumo no controlado, haciendo uso de toda la información de detalle disponible y accesible desde el SIG, con el fin de redirigir los esfuerzos en el sentido adecuado para ir reduciendo paulatinamente los volúmenes de fugas reales y aparentes en la red y así mejorar poco a poco su rendimiento.

De esta forma, es posible obtener modelos de la red hidráulica perfectamente ajustados a la realidad y contruidos con toda la información real recopilada, abriendo un nuevo horizonte de aplicaciones que facilitarán la localización de fugas, la gestión del parque de contadores, la detección de fraudes, el mantenimiento preventivo de la red, la mejora energética en la explotación y el seguimiento de indicadores de gestión entre otros.

10.2 ALMACENAMIENTO DE LA INFORMACIÓN PARA LA CONFECCIÓN DE ARCHIVOS HISTÓRICOS

Al hilo de lo anterior, resulta imprescindible diseñar una estructura de almacenamiento de la información histórica asociada a la gestión de una red de distribución de agua, que permita la implementación de algoritmos eficientes que sean capaces de consultar y realizar el seguimiento de dicha información.

A tal fin conviene diferenciar los distintos **tipos de sucesos y actuaciones** que pueden darse en la práctica:

► **EVENTOS en general (sucesos)**

Se trata de identificar y registrar en la base de datos de históricos los eventos o sucesos que tienen lugar en un instante determinado, afectando a determinados elementos residentes en la base de datos. Lo fundamental en este caso es registrar los elementos afectados por el evento y la fecha en que ocurre el mismo. La estructura de la tabla propuesta para ello sería:

Campo_clave, Fecha, Otros_campos

Los *Campos_clave* agrupan los ID de los elementos afectados por el suceso (uno o más), *Fecha* es la fecha en que ocurre el suceso y en *Otros_campos* se almacena otra información complementaria asociada al suceso y dependiente exclusivamente de los campos que identifican al mismo. Cada registro de la tabla o suceso quedará identificado unívocamente por los *Campos_clave* y por la *Fecha*, de modo que muchos eventos diferentes pueden afectar a unos mismos elementos, siempre que la fecha sea distinta.

Un ejemplo típico de este tipo de eventos serían las lecturas de un contador, los registros de un caudalímetro o la lectura de una señal cualquiera en tiempo real. En *Otros_campos* se almacenaría en este caso el valor de la magnitud leída (se entiende que en este caso el campo *fecha* incluye también la hora, minutos y segundos).

► **ACTUACIONES en general (con principio y fin)**

A veces se quiere registrar en la base de datos de históricos actuaciones sobre la red que transcurren durante un tiempo determinado, es decir, que **no son sucesos instantáneos como los eventos, sino que tienen una duración**. Puesto que transcurren durante un tiempo, tendrán un principio y un fin, que conviene reflejar en la base de datos.

Independientemente de la duración de la actuación, un esquema general para el almacenamiento de este tipo de información en una base de datos históricos sería el siguiente:

Campos_clave, Fecha, Acción, Otros_campos

Se supone que la acción afecta a determinados elementos residentes en la base de datos, los cuales quedan identificados a través de los *Campos_clave*. Por otra parte habrá que **diferenciar entre la fecha de principio y la fecha de fin de la actuación**, con lo que habría que **almacenar dos registros por actuación**. En el primero de ellos el campo *Fecha* hace referencia a la **fecha de inicio**, mientras que el campo *Acción* tomaría el valor INICIO u otro valor que lo diferencie. En el segundo registro, el campo *Fecha* hará referencia la **fecha de finalización** de la actuación, mientras que el campo *Acción* puede tomar el valor FIN u otro similar. Además, al almacenarse separadamente el principio y fin de la actuación, podría incluso alojarse una información distinta en *Otros_campos* para los dos registros que identifican la actuación. Por ejemplo en el registro de inicio puede indicarse quién está a cargo de la actuación, y en el registro de fin pueden hacerse constar las incidencias habidas (los campos serían comunes pero se dejarían en blanco los que no proceda rellenar en cada caso).

Observemos que **cada registro quedaría identificado unívocamente en este caso por los Campos_clave, la Fecha y la Acción**, de modo que dados los *Campos_clave* y la *Fecha* sólo pueden haber dos registros que compartan esta información, diferenciados por el campo *Acción*. Por otra parte, los mismos elementos identificados por los *Campos_clave* pueden ser objeto de múltiples actuaciones, siempre que cambie el valor del campo *Fecha*. La ventaja de este tipo de almacenamiento es que el principio y fin de la actuación están claramente diferenciados, pudiendo almacenarse de forma separada e independiente.

Ejemplos de actuaciones son la **reparación de una avería**, el **cierre de una válvula**, el **cambio de una ley de control**, la **conexión de un contador**, la **incorporación de una nueva tubería**, etc. Todos ellos deben considerarse actuaciones y no eventos, puesto que de entrada todos son susceptibles de tener una fecha de inicio y otra de finalización.

► ACTUACIONES de CORTA duración (con repetición)

A veces se quiere registrar en la base de datos de históricos actuaciones sobre la red que ocurren en un momento determinado y tienen una duración breve, la cual es relevante para el posterior tratamiento de la información. Se trata de un caso particular de las actuaciones en que bastaría con utilizar un solo registro por actuación, asociado a la fecha de inicio. Se supone que estas actuaciones se asocian con determinados elementos de la base de datos, y ocurren (se inician) en un momento determinado, teniendo una duración que es conocida en el momento de almacenar la información. La estructura de la tabla propuesta para su almacenamiento en este caso sería:

Campos_clave, Fecha_Inicio, Duración, Otros_campos

La diferencia fundamental con los esquemas anteriores es que ahora se sustituye el campo Fecha por *Fecha_Inicio*, y además se añade el campo Duración para reflejar precisamente este dato (con lo que indirectamente se podría determinar la fecha de finalización).

Un registro queda identificado unívocamente en este caso por los *Campos_clave* y la *Fecha_Inicio*, como si se tratase de un evento. Así pues, unos mismos elementos de la base de datos podrían ser objeto de múltiples actuaciones, siempre que cambie el campo *Fecha_Inicio*.

Un **ejemplo** típico de este tipo de información sería la **asociada con la reparación de una pequeña avería, una fuga, o la realización de una operación de mantenimiento** rutinaria.

► ACTUACIONES de LARGA duración (con repetición)

La estructura de datos antes propuesta para almacenar las actuaciones en general, con dos registros máximo por actuación (uno para el principio de la misma y otro para su finalización), no es muy adecuada para el tratamiento masivo de los datos históricos. Cuando la actuación es de corta duración, el esquema anterior permite sustituir los dos registros por uno, siendo así la información mucho más fácil de manejar. Sin embargo, cuando no se tiene constancia directa de la fecha de finalización, resulta costoso averiguar sobre la base de datos si en un momento dado una actuación está vigente o no. Un esquema alternativo, más apropiado para almacenar las actuaciones de larga duración, que permite agilizar el tiempo de respuesta a la pregunta anterior y otras muchas que cabe formularse, consiste en almacenar la información asociada a la actuación en un registro único con la siguiente estructura:

Campos_clave, Fecha_Inicio, Fecha_Fin, Otros_campos

Puesto que se trata de actuaciones de larga duración, es posible que en el momento de registrar esta información solo se tenga constancia de la fecha de inicio, y no se sepa aún cuándo va a finalizar. En tal caso se almacena únicamente la *Fecha_Inicio*, dejando el campo *Fecha_fin* en blanco. Posteriormente, cuando se conozca la fecha de finalización, habrá que efectuar un cambio en el registro para añadir el valor de dicha fecha. Esto puede crear dificultades a la hora de gestionar la tabla, pero indudablemente tiene muchas más ventajas a la hora de consultar la información, comparado con el esquema general de almacenamiento antes propuesto.

Obsérvese que en este esquema, a cada actuación le corresponde un único registro, el cual queda identificado por los *Campos_clave* y el campo *Fecha_Inicio*. Por otra parte, unos mismos

elementos de la base de datos podrían ser sometidos a muchas actuaciones distintas, cada una de ellas diferenciada por el campo *Fecha_Inicio*.

Ejemplos típicos de actuaciones a largo plazo pueden ser el **accionamiento de una válvula para aislar un sector** por un tiempo sin definir, la **instalación de un data logger para registrar lecturas durante un periodo**, el desarrollo de una **campana de localización de fugas sobre un sector de la red**, etc.

► **ACTUACIONES de MUY LARGA duración (únicas)**

En el registro de la información histórica sobre la evolución de los elementos que configuran una red, se da con frecuencia la situación de que un elemento pasa a formar parte de la red en una fecha determinada y deja de pertenecer a ella en otro momento determinado. El hecho de incorporar y dar de baja un elemento en la red puede considerarse también como una actuación, en este caso normalmente de muy larga duración, con la peculiaridad de que sobre un elemento dado solo puede producirse una única actuación de este tipo, ya que se supone que es nuevo cuando se incorpora y obsoleto cuando se retira.

El caso de que el mismo elemento físico pudiera pasar a formar parte de la misma red en otro lugar (un contador por ejemplo), puede resolverse identificándolo de forma distinta en su nueva ubicación. Así pues la estructura de datos propuesta para almacenar este tipo de información sería similar a la anterior, es decir:

Campos_clave, Fecha_Inicio, Fecha_Fin, Otros_campos

con la salvedad principal de que al ser este **tipo de actuación única**, **cada registro queda identificado unívocamente solo por los Campos_clave**, con lo que los campos *Fecha_inicio* y *Fecha_fin* pasarían a ser atributos propiamente dichos de cada elemento identificado, al igual que lo pueden ser sus propiedades físicas.

Ejemplos de actuaciones de muy larga duración serían la **instalación de una nueva tubería**, la **incorporación de un nuevo suministro**, un **nuevo contador** o un **nuevo abonado**.

Esta última estructura de datos es la que se propone básicamente para almacenar la información histórica de todos los elementos que forman parte de una red de distribución de agua (cartografía), y que constituye uno de los pilares fundamentales en que se basa la aplicación GISRed.

De acuerdo con dicha premisa, la **baja de un elemento de la cartografía de la red no será considerada como un evento, sino como un cambio en los atributos** asociados a dicho elemento.

Sólo en los casos particulares en que dicha estructura no sea viable recurriremos a alguna de las estructuras propuestas anterior, como será el caso del almacenamiento de las lecturas de un instrumento (eventos) o para el registro de las operaciones de mantenimiento (actuaciones de corta o larga duración). En el caso de las operaciones de mantenimiento de larga duración, la incorporación de la fecha de finalización se considera también como un cambio y no como un suceso que dé lugar a la adición de un nuevo registro a la tabla de datos.

10.3 NUEVAS FUNCIONALIDADES PARA LA GESTIÓN INTEGRADA DE LA INFORMACIÓN DE LA RED

Como se ha podido constatar en los primeros capítulos de la tesis doctoral, la aplicación GISRed se desarrolló inicialmente para facilitar la construcción de modelos hidráulicos de redes urbanas de agua a presión, a partir de la información cartográfica almacenada en un SIG. Sin embargo, la aplicación ha evolucionado en su filosofía para permitir poder construir el modelo de una red a partir de los datos almacenados continuamente en su BdD.

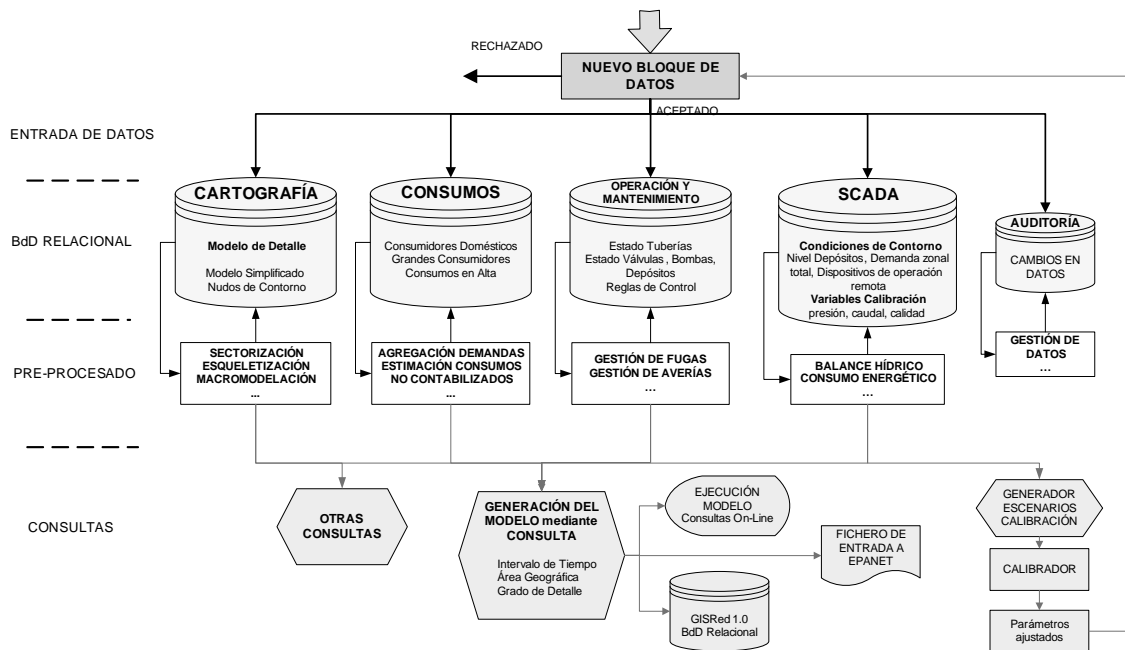


FIGURA 100. ESTRUCTURA DE DATOS SOPORTADA POR LA ÚLTIMA VERSIÓN DE GISRED.

Como muestra la figura anterior, dicha base de datos está configurada principalmente por 4 estructuras de información, destinadas a almacenar respectivamente: la información cartográfica, los consumos autorizados, los datos de campo, y finalmente las maniobras y operaciones realizadas sobre la red. Una última estructura se reserva para mantener la auditoría de cualquier cambio.

Toda la información almacenada por GISRed puede consultarse para diversos fines, mostrándose los resultados en forma de tablas numéricas, o bien en forma gráfica aprovechando el entorno SIG en que se ha implementado. Así por ejemplo, a través de una consulta es posible obtener la cartografía completa de la red en un momento o periodo determinado o analizar su evolución. Igualmente, a través de otra consulta se pueden obtener las demandas en las acometidas, y sus valores agrupados por sectores básicos o de modulación. Una nueva consulta permite obtener los volúmenes inyectados a cada sector en el mismo periodo y calcular así los rendimientos hídricos con todo rigor. Para el cálculo del volumen inyectado se pueden usar los datos de campo filtrados, o bien los datos brutos procedentes del sistema SCADA, en cuyo caso deben descontarse los periodos con lecturas de campo no fiables para los sectores afectados. Asimismo, a la hora de calcular los rendimientos hídricos en los distintos distritos hidrométricos, GISRed tiene en cuenta los **periodos de apertura de válvulas frontera y los volúmenes acumulados en depósitos interiores** para los sectores afectados. También pueden consultarse gráficamente las maniobras efectuadas sobre la red en un periodo dado.

Por último, a partir de una consulta más sofisticada la aplicación permite la construcción de un modelo hidráulico fiel a la realidad, directamente ejecutable desde EPANET, que reproduce hora a hora el comportamiento de la red en un periodo determinado, o bien su comportamiento medio durante ese mismo periodo. Alternativamente dicho modelo puede exportarse a una nueva base de datos geográfica (geodatabase) para configurar escenarios distintos a los reales, a fin de realizar estudios de consultoría e ingeniería.

10.4 NUEVAS FUNCIONALIDADES PARA LA GESTIÓN DE LA DEMANDA AUTORIZADA

10.4.1 Introducción

Uno de los mayores problemas con que nos encontramos a la hora de evaluar correctamente los consumos registrados en una zona de demanda es la falta de claridad en la definición de los diferentes elementos que intervienen en su cálculo. A menudo se confunden los términos **contador**, **abonado**, **póliza** y **acometida**, de modo que las propiedades asociadas a los mismos se asignan indistintamente a uno u otro, en particular los consumos registrados. Sin embargo, como se ha indicado, cada uno de estos elementos tiene su propia identidad y atributos.

Así por ejemplo, a la relación entre **contador** y **acometida** no siempre se le ha dado la importancia que merece, y sin embargo es básica para la correcta realización de un balance hídrico. Ello obedece a que tradicionalmente las empresas encargadas de gestionar el servicio han manejado por separado la gestión técnica y la gestión comercial. Mientras que la gestión técnica de la red termina en la acometida (y no siempre), la gestión comercial comienza por las lecturas de contadores, no siendo necesario mantener una relación estricta entre contadores y acometidas para llevar adelante una y otra gestión.

La dicotomía entre gestión técnica y gestión comercial se ve sin embargo afectada cuando se pretende realizar un balance hídrico del sistema. Así por ejemplo, una acometida puede tener uno o más contadores asociados, o bien ninguno. Por otra parte, los contadores asociados a una misma acometida pueden no ser independientes entre sí, actuando algunos de ellos como totalizadores a nivel de comunidad de propietarios; estos contadores integran el consumo de uno o más contadores individuales ubicados aguas abajo cuya suma normalmente no coincidirá con el volumen registrado por el contador totalizador, debiendo tomar una decisión al efectuar un balance.

Por otra parte, los términos **contador**, **póliza** y **abonado** son muchas veces confundidos, sobre todo cuando se habla en términos generales sobre el número de contadores, de contratos o de abonados de una red. Sin embargo, son conceptos claramente distintos. Mientras el contador hace referencia a un componente físico, el abonado hace referencia a la persona o entidad jurídica que asume el consumo registrado por el contador y su coste asociado; por su parte, el término póliza hace referencia a un contrato entre el abonado y la compañía, cuyo consumo es registrado en un momento dado por un determinado contador. En la práctica, unos y otros pueden darse de alta o de baja de forma simultánea o bien de forma independiente. Sin embargo, las estructuras de datos manejadas por las compañías no siempre diferencian claramente unos elementos de otros, aglutinando los tres conceptos en un mismo registro de sus bases de datos.

Incluso en ocasiones, el propio registro que aglutina estos tres conceptos, termina ampliándose para incorporar la acometida a través de la cual llega el agua hasta el contador, pretendiendo

así conectar la gestión comercial con la gestión técnica a efectos de realizar balances hídricos en la red, o para construir el modelo hidráulico del sistema.

La realización del **balance hídrico** de un sistema de distribución de agua consiste básicamente en contrastar el volumen total de agua inyectado al sistema en un periodo de tiempo dado, medido usualmente a través de un número reducido de caudalímetros, con el volumen registrado por todos los contadores instalados en el mismo periodo. La diferencia entre ambos constituyen las **pérdidas**, algunas de las cuales son reales como las fugas de agua, mientras que otras corresponden a pérdidas aparentes. Entre ellas se cuentan los consumos no registrados pero autorizados, los consumos ilegales no registrados, los errores de registro de los contadores y finalmente los **errores de contabilización**, debidos a una incorrecta gestión de las lecturas tomadas.

Estos últimos errores, muchas veces relegados o ignorados, pueden representar una parte importante de las pérdidas aparentes. El objetivo de este apartado es describir la **estructura de datos, implementada en GISRed, enfocada al suministro de los abonados de una red urbana de distribución**, que tiene como principal objetivo evitar cualquier error cometido en la contabilización del agua registrada por el parque de contadores y realizar una correcta asignación de éstos a las diferentes acometidas de la red, como se analizará en el siguiente capítulo. Al propio tiempo, la estructura de datos propuesta está preparada para evaluar con mucha más precisión el error debido al subcontaje de los contadores, evitar redundancias en la asignación de los consumos estimados, y finalmente ayudar en la detección de los consumos ilegales, permitiendo de este modo hacer una evaluación mucho más precisa de las **pérdidas aparentes** del sistema.

10.4.2 Cálculo de la demanda por acometidas

El modelo de datos de la aplicación GISRed ha sido extendido consecuentemente para tener en cuenta toda la problemática asociada con el cómputo de los volúmenes registrados y estimados (volumen autorizado) asociados a los diferentes abonados. Para ello ha habido que introducir una **nueva entidad denominada punto de suministro que representa un punto de la instalación que conduce el agua desde la acometida hasta el abonado**, en el cual se ha previsto controlar el volumen de paso. **Los puntos de suministro pueden ser terminales o totalizadores y se conectan entre sí siguiendo una estructura jerárquica**. También se contempla que un punto de suministro pueda tener contador o no (en cuyo caso, el volumen debe ser estimado). En caso de existir contador, éste puede ser sustituido por otro por renovación.

En la información asociada a los puntos de suministro se contempla también el uso o destino del agua (doméstico, industrial, comercial, piscinas, jardines, fuentes, etc). El algoritmo implementado para el cálculo de la demanda autorizada, permite determinar el volumen registrado y estimado en las acometidas y evaluar los consumos diferenciando los distintos usos del agua. Además, se ha desarrollado un potente algoritmo que tiene en cuenta también toda la casuística asociada al parque de contadores, incluyendo posibles discrepancias entre los volúmenes registrados por los totalizadores y los acumulados por los contadores parciales que dependen de él.

10.4.3 Agrupación de las demandas por sectores hidrométricos de consumo (DMAs)

No hay que confundir los sectores de demanda empleados en el lenguaje usual con los sectores hidráulicamente delimitados por medidores de caudal, a los que denominaremos sectores/districtos hidrométricos o DMA's (del inglés *District Metering Areas*).

Como se ha puesto de manifiesto en capítulos anteriores, GISRed puede hacer uso de algoritmos topológicos para identificar los sectores hidrométricos básicos (y sus acometidas asociadas), conocida la ubicación de los caudalímetros y válvulas frontera. **Dado que la sectorización puede ser cambiante en la medida que se retiren o instalen nuevos caudalímetros o bien válvulas frontera, este algoritmo puede resultar sumamente útil.** Además, la aplicación es capaz de detectar los sectores de modulación mediante la agrupación de sectores básicos. Tanto los sectores básicos como los de modulación se caracterizan por tener asociado un periodo de existencia (vida útil del sector).

Por otra parte, **los sectores delimitados por válvulas frontera podrían quedar comunicados casualmente por la apertura temporal de éstas en operaciones de mantenimiento. En tal caso, los balances hídricos que incluyeran el periodo de apertura de la válvula frontera quedarían invalidados para los sectores básicos, pero no así para los agrupados.**

En definitiva, dada una configuración de sectores básicos y agrupados, se han desarrollado algoritmos de cálculo para acumular en las diferentes acometidas, las demandas registradas y estimadas en cada uno de los distritos hidrométricos, para un periodo de consulta dado. En dicho proceso se tiene en cuenta el periodo de existencia de cada sector, así como los periodos en que alguna válvula frontera pudiera haber estado abierta. La acumulación de la demanda registrada y/o estimada por sectores a partir de las demandas en las acometidas puede también realizarse diferenciando los diferentes usos del agua.

10.4.4 Modelo conceptual del sistema de suministro a una red urbana de distribución de agua orientado a la Gestión de la Demanda

La implementación de todos los procedimientos de cálculo referentes a los balances hídricos y al manejo de la información relativa tanto a la base de datos de abonados como al parque de contadores, tienen su origen en un modelo conceptual de datos que permite la jerarquización y relación de todos los elementos físicos y no físicos intervinientes en los procesos y rutinas de cálculo hídrico. El modelo conceptual se describe con detalle a continuación.

10.4.4.1 Entidades

El modelo de datos propuesto para representar correctamente la estructura del sistema de suministro de la red en un momento dado, así como su evolución en el tiempo, parte de cuatro entidades básicas claramente diferenciadas:

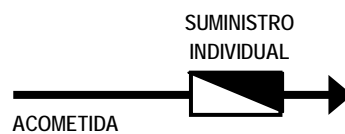
- La **acometida**, como elemento físico de conexión entre un determinado número de abonados y las tuberías de la red que actúan como tuberías de servicio
- El **punto de suministro**, como punto físico, normalmente ubicado en la entrada de un inmueble o vivienda, en el cual se efectúa la toma de agua para un uso específico. En la práctica puede asociarse con una arqueta, una hornacina, una batería de contadores, o la entrada de una vivienda de un edificio. El hecho de identificar los puntos de suministro como entidades independientes, constituye una novedad importante, que resulta clave para representar correctamente la estructura de sistema de suministro entre la acometida y el abonado. El punto de suministro será el punto donde se alojará posteriormente el contador, caso de existir, o donde se evaluará el caudal saliente, caso de no disponer de contador y tener que estimar la demanda.

- El **uso** del agua tomada en el punto de suministro. Esta entidad podría corresponderse en la práctica con el abonado propiamente dicho. Sin embargo, sus datos particulares no son relevantes a la hora de efectuar un balance hídrico, a cuyo fin tan solo nos importa el uso o destino del agua tomada en el punto de suministro. En efecto, de ello va a depender la modulación de la demanda, la cual será un factor importante a tener en cuenta a la hora de desglosar el consumo no registrado.
- El **contador** propiamente dicho, como aparato físico de medida. Hay que tener en cuenta además que un contador puede estar durante un tiempo alojado en un punto de suministro, ser retirado para su reparación, y alojarse posteriormente en otro punto de suministro, de modo que la lectura de un contador no es una propiedad del mismo, sino de su asociación con un determinado punto de suministro.

10.4.4.2 Puntos de suministro (individual, parcial y totalizador)

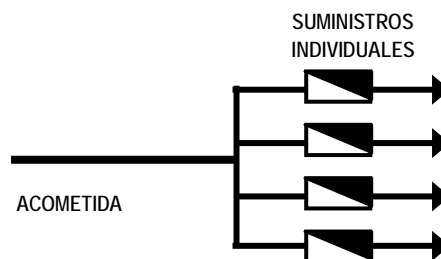
La declaración del punto de suministro en la estructura de datos puede resultar en la práctica más compleja de lo que aparenta, sobre todo cuando se tiene en cuenta la presencia de contadores totalizadores, los cuales deben modelarse más bien como **suministros totalizadores**, capaces de alojar uno o varios contadores totalizadores con el tiempo. A continuación se muestran algunas de las disposiciones posibles de los puntos de suministro que se observan en la práctica en redes reales, representados mediante un recuadro semiopaco.

El caso más simple corresponde a los **puntos de suministro únicos**, conectados directamente a una acometida. Es el caso usual de las acometidas destinadas a suministros en alta, usos específicos como industrias, jardines, centros comerciales, etc, y también el caso de muchas viviendas unifamiliares:



(a)

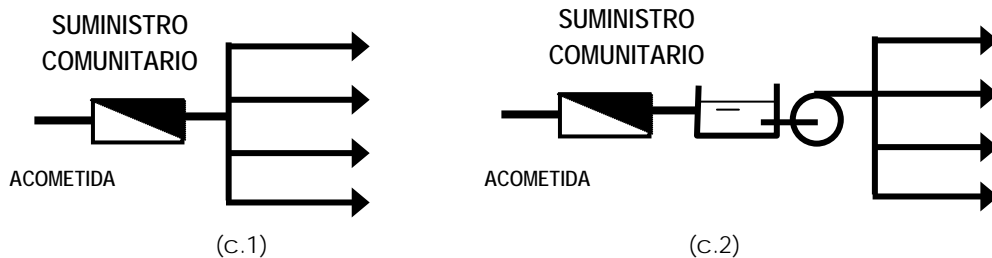
Otro caso bastante común en la práctica es la utilización de una acometida única para abastecer a varias viviendas adosadas o bien a todo un edificio de viviendas, donde tras la llegada de la acometida al cuadro de contadores, ésta se divide en múltiples ramales o **puntos de suministro individuales**, para llevar el agua individualmente hasta cada uno de los abonados. El esquema general sería el mostrado en la figura, donde en cada punto de suministro diferenciado cabe alojar un contador individual o divisionario.



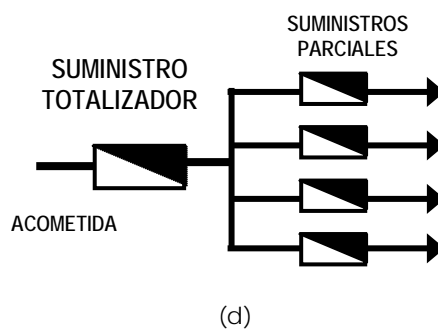
(b)

Otro esquema frecuente en la geografía nacional es disponer de una acometida única para abastecer a una comunidad de vecinos, y equiparla con un contador (o más propiamente dicho un punto de suministro) único para toda la comunidad de propietarios. La salida del **punto de suministro comunitario** puede ahora dividirse en varios ramales para llevar el agua hasta

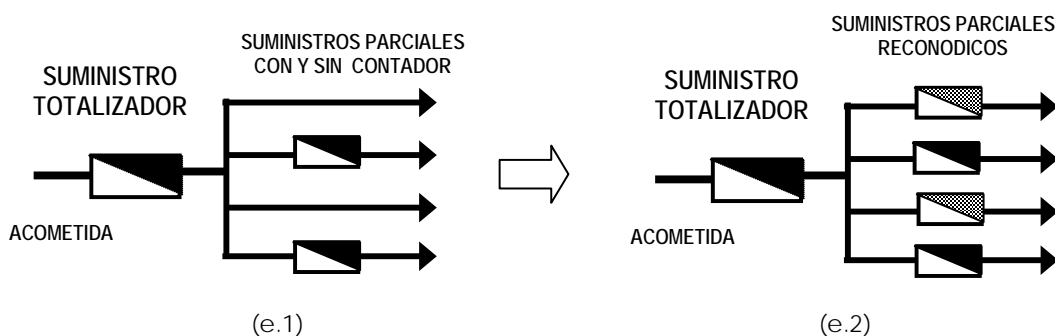
cada uno de los usuario, o bien descargarse a un aljibe, desde donde el agua es rebombada y distribuida hasta la vivienda de cada usuario. En este caso es frecuente que el consumo de agua no se mida a nivel de usuario, ni tampoco se estime, abonando la factura del agua por prorrateo. Por consiguiente, a efectos de balances hidricos, este caso puede considerarse equivalente al primero de los mostrados, e ignorarse la instalación existente aguas abajo del punto de suministro a toda la comunidad.



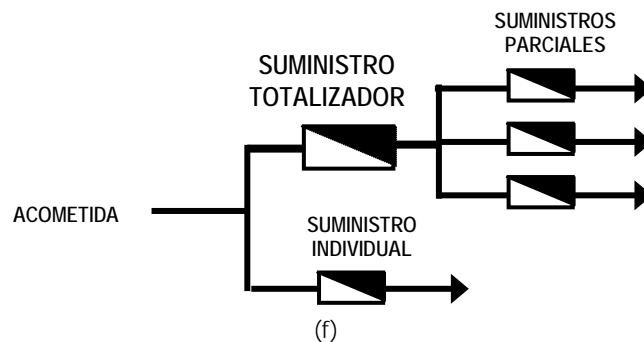
En muchas ocasiones sucede que existiendo un contador comunitario, se instalan también contadores individuales a cada usuario abastecido desde la acometida a la comunidad. Otras veces, existiendo contadores individuales, se instalan contadores generales a efectos de control. En este caso, puede ocurrir que la suma del volumen registrado por los contadores individuales no se corresponda con el registrado por el contador general, lo que habrá que tener en cuenta a la hora de efectuar balances. A efectos del modelo de datos, esta estructura debe quedar contemplada, declarando un **punto de suministro totalizador** como agrupación de un determinado número de puntos de suministro, a los que denominaremos en adelante **puntos de suministro parciales**.



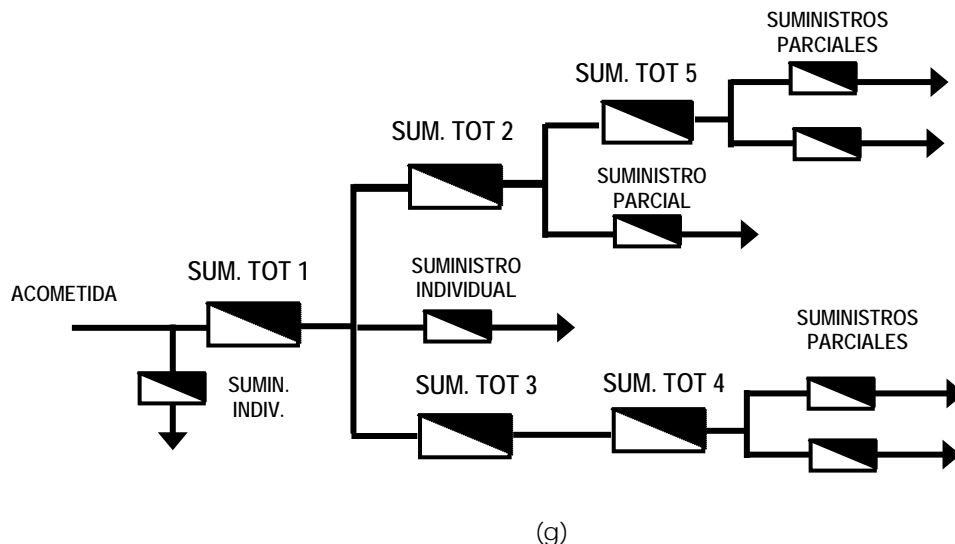
La presencia de puntos de suministro totalizadores puede dar lugar a diversas casuísticas. Por ejemplo, que no todos los usuarios abastecidos desde un punto de suministro común equipen sus viviendas con contador, sino solamente algunos de ellos. En este caso, deberá declararse un punto de suministro parcial por cada usuario reconocido, independientemente de que se instale contador o no, puesto que como se ha dicho anteriormente, el consumo en un punto de suministro dado puede medirse, o bien estimarse en caso de no tener contador.



Otra posibilidad es que de una misma acometida se abastezcan directamente algunos puntos de suministro individuales, y además algún punto de suministro totalizador, del que dependen varios puntos de suministro parciales, tal como se muestra en la figura siguiente.



Podría darse el caso incluso de que se dispusiera de varios suministros totalizadores, parciales o individuales, dependientes unos de otros en forma jerárquica, a efectos de control, por ejemplo, tal como se muestra en la figura siguiente, en la cual se identifican solamente 7 usuarios finales.



Estos casos, aunque menos frecuentes, son contemplados en el modelo de datos, para llegar a configurar un modelo general y adaptable a cualquier circunstancia.

A la vista de los esquemas anteriores, indicaremos como conclusión que la declaración de los puntos de suministro resulta ser algo convencional en la práctica, **actuando éstos únicamente como puntos de control del paso del agua**. En ellos se supone que estará alojado un contador, o bien se podrá evaluar el consumo de agua por algún otro método. Así por ejemplo, las diferencias de los casos (b) y (c) con el caso (d) radica fundamentalmente en la no consideración de un punto de suministro totalizador en el primer caso, o en la no consideración de puntos de suministro parciales en el segundo. La declaración de todos ellos, como en el caso (d), conlleva necesariamente la evaluación del consumo en cada punto y el contraste de los volúmenes obtenidos por una y otra vía, con la consiguiente toma de decisiones.

10.4.4.3 Relaciones

Las cuatro entidades básicas que configuran el modelo de datos del sistema de suministro, deben relacionarse adecuadamente entre sí para completar dicho modelo. Además, en el

caso de los puntos de suministro, deberá especificarse también claramente la relación existente entre los suministros individuales, parciales y totalizadores.

Las relaciones básicas que conectan los elementos pertenecientes a las diferentes entidades de una base de datos a través de sus campos clave, son básicamente del tipo uno a uno, uno a muchos o muchos a muchos. Dentro de esta clasificación cabe además distinguir si todo elemento de una entidad debe estar necesariamente o no relacionado con otro elemento de otra entidad. Mientras que las relaciones uno a uno, o uno a muchos, pueden declararse implícitamente en la estructura de cada entidad mediante el uso de claves principales y secundarias, **las relaciones de muchos a muchos obligan necesariamente a declarar una entidad 'puente' del tipo relación** (no de tipo físico), entre las entidades relacionadas.

En principio, la mayoría de las relaciones existentes en un momento dado entre los elementos pertenecientes a las cuatro entidades básicas que configuran el sistema de suministro son relaciones del tipo uno a uno, o de uno a muchos. Ello permite teóricamente configurar el modelo de datos utilizando las correspondientes claves primarias y secundarias, como parte de los atributos de cada entidad. Dichas relaciones son fundamentalmente las siguientes:

- *una acometida puede alimentar a ninguno, uno o varios puntos de suministro, mientras que todo punto de suministro solo puede estar ligado a una acometida*
- *un punto de suministro totalizador puede aglutinar a uno o varios suministros parciales, mientras que todo suministro parcial debe depender de un solo suministro totalizador.*
- *a su vez un suministro totalizador puede depender de otro totalizador anterior, el cual puede agrupar, además de éste, a otros suministros totalizadores o parciales*
- *un suministro individual, en cambio, no depende de ningún totalizador.*
- *todo punto de suministro debe tener en un momento dado un único uso, particularmente si se trata de un suministro individual o parcial, esto es, un suministro terminal, no siendo ello obligado para los suministros totalizadores. Por otra parte, un uso determinado puede ser común a muchos puntos de suministro.*
- *finalmente, todo punto de suministro, sea individual, parcial o totalizador, puede alojar en un momento dado un único contador o bien ninguno.*

Sin embargo, **el modelo de datos propuesto tiene al mismo tiempo un carácter histórico**, es decir, permite almacenar el histórico de las diferentes asociaciones habidas o existentes entre los distintos elementos que forman parte de cada entidad. Así por ejemplo:

- *un punto de suministro puede alojar diversos contadores a lo largo del tiempo, mientras que el propio contador también puede haber estado alojado en diversos puntos de suministro a lo largo del tiempo, tras las correspondientes reparaciones.*
- *un punto de suministro que depende hoy de una acometida, podría depender mañana de otra acometida distinta, por renovación o reemplazo de ésta.*
- *un suministro hoy de tipo individual, podría convertirse más adelante en un suministro de tipo parcial, al instalar un suministro totalizador aguas arriba a efectos de control, agrupándolo junto con otros.*
- *al contrario, un suministro comunitario, hoy de tipo individual, podría convertirse más adelante en un suministro totalizador al equipar con contadores individuales los diferentes usuarios de la comunidad que penden de él.*
- *finalmente, un punto de suministro destinado a cierto uso, podría ser destinado a otro uso distinto en el futuro.*
- *finalmente, un punto de suministro hoy sin contador, podría equiparse mañana con un contador, o viceversa, quedar desprovisto de él por avería.*

Todo ello conduce a la **necesidad de establecer relaciones del tipo muchos a muchos** entre los elementos de las cuatro entidades básicas que configuran el sistema de suministro, y por consiguiente a la creación de nuevas entidades 'puente' con el fin de relacionar adecuadamente todos los elementos almacenados. Dichas entidades de relaciones van a ser las siguientes:

- la entidad **AcomSum** para relacionar acometidas con suministros. Una acometida aglutina a muchos puntos de suministro, y aunque en un momento dado un punto de suministro solo puede pertenecer a una acometida, podría vincularse con varias acometidas a lo largo del tiempo
- la entidad **SumSumTot** para relacionar los puntos de suministro parciales con sus correspondientes totalizadores, o bien éstos últimos con otros totalizadores previos. Un suministro totalizador agrupa a uno o varios puntos de suministro parciales o totalizadores a su vez, y aunque en un momento dado un punto de suministro parcial solo puede depender de un totalizador, podría vincularse a otro distinto con el paso del tiempo
- la entidad **SumUso** para relacionar cada punto de suministro con el uso a que se destina. En un momento dado un punto de suministro solo puede tener un único uso, pero podría tener usos distintos a lo largo del tiempo. Por su parte, un mismo uso será compartido por muchos puntos suministro, los cuales pueden aumentar o disminuir a lo largo del tiempo. Además, la declaración de un uso debe ser obligada para los suministro de carácter terminal.
- la entidad **SumCont** para relacionar los puntos de suministro con los contadores alojados. En un momento dado un punto de suministro solo puede alojar un contador o bien ninguno, pero podría alojar distintos contadores a lo largo del tiempo. Por su parte, un mismo contador puede ubicarse en diversos puntos de suministro a lo largo del tiempo.

Todo ello queda reflejado en el modelo lógico adoptado para configurar la base de datos geográfica de GISRed, la cual se describe de manera pormenorizada en el ANEXO 1.

CAPÍTULO 11

BALANCES HÍDRICOS EN LOS SECTORES HIDROMÉTRICOS DE
UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

CAPÍTULO 11. BALANCES HÍDRICOS EN LOS SECTORES HIDROMÉTRICOS DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

11.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los métodos más difundidos para controlar el destino del volumen de agua inyectada a una red hidráulica a lo largo de un periodo de tiempo determinado, es la realización periódica de balances hídricos. Su objetivo último es evaluar el volumen de pérdidas en el periodo estudiado.

La realización del **balance hídrico** de un sistema de distribución de agua **consiste básicamente en contrastar el volumen total de agua inyectado al sistema en un periodo de tiempo dado, medido usualmente a través de un número reducido de caudalímetros, con el volumen registrado por todos los contadores de abonados instalados, en el mismo periodo. La diferencia entre ambos constituye las pérdidas**, algunas de las cuales son **reales** como las fugas de agua, mientras que otras corresponden a pérdidas **aparentes**.

Entre las fugas aparentes se cuentan:

- los consumos no registrados pero autorizados
- los consumos ilegales no registrados
- los errores de registro de los contadores
- los errores de contabilización debidos a una incorrecta gestión de las lecturas tomadas.

Estos últimos errores, muchas veces relegados o ignorados, pueden representar una parte importante de las pérdidas aparentes.

Por otra parte, las fugas reales pueden localizarse en distintos puntos de la red, como son:

- la red de transporte
- los depósitos de almacenamiento
- la red de distribución
- las acometidas a los abonados

siendo en este último punto donde se concentran la mayor parte de ellas.

La siguiente tabla muestra el formato y la terminología estándar recomendados para el cálculo del balance hídrico que propone la IWA (*International Water Association*), para un sistema de suministro de agua.

Volumen de Entrada al sistema (m ³ /año)	Consumo autorizado (m ³ /año)	Consumo autorizado facturado (m ³ /año)	Consumo facturado medido (incluyendo agua exportada) (m ³ /año)	Agua facturada (m ³ /año)
			Consumo facturado no medido (m ³ /año)	
		Consumo autorizado no facturado (m ³ /año)	Consumo no facturado medido (m ³ /año)	Agua no facturada (m ³ /año)
			Consumo no facturado no medido (m ³ /año)	
	Pérdidas de agua (m ³ /año)	Pérdidas aparentes (m ³ /año)	Consumo no autorizado (m ³ /año)	
			Imprecisiones de medida (m ³ /año)	
		Pérdidas reales (m ³ /año)	Pérdidas reales en conducciones de agua bruta y en tareas de tratamiento (si procede) (m ³ /año)	
			Fugas en transporte y/o conducciones de distribución (m ³ /año)	
Fugas y desbordamientos en transporte y/o depósitos de almacenamiento (m ³ /año)				
		Fugas en acometidas hasta el punto de medida (m ³ /año)		

TABLA 17. BALANCE HÍDRICO-ECONÓMICO. INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION (IWA), [ALEGRE ET AL, 2000].

El balance anterior se aplica normalmente a todo un sistema de distribución, tomando como punto de partida los depósitos principales de abastecimiento. Sin embargo, actualmente se está aplicando también a los distintos **subsistemas hidráulicos** o **sectores hidrométricos** de menor tamaño que resultan al sectorizar una red, siempre y cuando las entradas y salidas de caudal en dicho sector estén perfectamente controladas por uno o más caudalímetros zonales.

Como se puede apreciar en la tabla que propone la IWA, **todo el desglose de volumen está enfocado a rentabilizar desde el punto de vista económico el volumen de agua producido, es decir, controlar e incrementar el volumen de agua facturado.**

Si el objetivo no es tanto centrarse en el volumen facturado o no facturado, sino más bien determinar con cierta precisión la distribución del volumen inyectado a un sector desde un punto de vista puramente hidráulico, conviene modificar el cuadro de balances propuestos por la IWA por el siguiente, cuyo objetivo final es diferenciar el volumen consumido del no consumido, independientemente de que éste se facture o no:

Volumen Inyectado al sistema	Volumen registrado (medido en contadores) (facturado o no)		Volumen Autorizado	Volumen Consumido	
	Volumen NO registrado (facturado o no)	Volumen controlado (riegos, limpieza,..)			
		Volumen NO controlado (Pérdidas)	Tomas ilegales (pérd. aparentes)		
			Errores Medición y Contabilización (pérd. aparentes)		
			Fugas externas (Pérdidas reales)		Fugas Agua Bruta/Tratamiento
		Fugas por Transporte			
		Fugas en Depósitos			
		Fugas en la Red Distribución			
		Fugas en Acometidas			

TABLA 18. DISTRIBUCIÓN DEL VOLUMEN INYECTADO A UN SECTOR DESDE UN PUNTO DE VISTA PURAMENTE HIDRÁULICO.

Este balance ha sido propuesto como documento de trabajo en el proyecto europeo Aqua-Control, financiado por el programa *Interreg III B - SUDOE* [Martínez et al, 2007, Proyecto *Aquacontrol*].

A continuación se definen con más precisión los diferentes volúmenes que figuran en el cuadro anterior:

- **Volumen Inyectado:** Corresponde al volumen total de agua aportado o inyectado al sistema o sector a controlar, para su consumo real o aparente. Habría que diferenciarlo del Volumen de Entrada al sistema, puesto que es posible la existencia de un volumen saliente transferido a otro sistema o sector contiguo. Por otra parte, no se incluye en el volumen anterior el volumen almacenado o detruido de los depósitos de almacenamiento que pudieran haber en el interior del sector, de modo que:

$$\text{Volumen Inyectado} = \text{Volumen Entrada} - \text{Volumen Salida} - \text{Volumen Almac. en Depósitos}$$

siendo éste último negativo en caso de haber un aporte desde los depósitos.

- **Volumen registrado:** es el volumen de agua medido por los contadores de los abonados del sistema. Se incluyen entre éstos tanto los contadores domiciliarios como los contadores industriales, siempre que éstos no sean tratados como caudalímetros de salida que delimiten un sector demanda. Fundamentalmente la decisión depende de si el volumen registrado por éstos es leído periódicamente o bien se lee en continuo formando parte de los datos de campo.
- **Volumen no registrado:** es el volumen de agua consumido pero no registrado por ningún contador, debido a la ausencia de éste en el punto de suministro o al deterioro del existente por un tiempo prolongado. Existen diversas técnicas para su estimación, por

ejemplo, en base al uso del agua (riego jardines, baldeo, etc) o por el contraste con datos históricos. Este volumen no registrado puede ser facturado o no, lo que no importa a efectos del balance.

- **Volumen controlado:** Es la parte del volumen no registrado que puede ser estimada en base a los usos del agua en las tomas sin contador (riegos, baldeo de calles, etc), en base a medidas realizadas en instalaciones similares (usos municipales), o en base a datos históricos (deterioro del contador).
- **Volumen no controlado:** es la fracción del volumen no registrado, del que se desconoce su destino. Resulta de descontar al Volumen inyectado, el Volumen registrado más el Volumen no registrado pero controlado. Éste a su vez aún puede descomponerse en otras fracciones, como veremos.
- **Volumen autorizado:** Es la suma del volumen registrado más el controlado, y constituye el volumen total de agua medido y/o no medido utilizado tanto por los abonados como por todos aquellos autorizados a hacerlo, con propósito residencial, comercial o industrial. Incluye el agua exportada.
- **Tomas ilegales:** es el volumen de agua no contabilizada que puede achacarse a consumos ilegales o fraudulentos (tomas no registradas, *by-pass* del contador, manipulación del propio contador, etc). Es el más difícil de detectar, y se estimará como último recurso. Su **diferencia fundamental con otras fracciones del volumen no registrado es que teóricamente debería modular en el tiempo igual que la demanda total registrada**. Forma parte de las pérdidas aparentes.
- **Errores de medición:** es el volumen de agua no contabilizada debido a imprecisiones en la medición. Se puede estimar mediante una correcta caracterización del parque de contadores. Se trata igualmente de pérdidas aparentes.
- **Errores de contabilización:** debidos a una incorrecta manipulación de los datos de lectura (por ejemplo, reinicio del acumulador de lecturas del contador, incorrecta asignación de la lectura a la acometida, errores de cómputo, etc). Son también pérdidas aparentes.
- **Fugas externas:** Cantidad total de pérdidas físicas de agua en el sistema a presión, desde el punto de localización de los caudalímetros que delimitan el sector hasta los puntos de suministro donde se localizan los contadores. En rigor habría que añadir a éstas las fugas interiores de los inmuebles abastecidos, las cuales no son detectadas por los contadores al ser el caudal de fuga inferior al caudal de arranque de éstos, y por consiguiente figuran incluidas en los errores de medición.
- **Volumen consumido:** es la suma del volumen autorizado de agua consumido por los usuarios (agua registrada y no registrada controlada), más las pérdidas aparentes. Es decir, el volumen realmente utilizado. Su diferencia con el volumen inyectado serán, por consiguiente, las fugas externas.

El objetivo de este capítulo es describir todos los procedimientos implementados para la contabilización del agua tanto **inyectada** como **autorizada** para un período de tiempo dado, y obtener así valores fiables del rendimiento hidrico en dicho período. Dada la enorme casuística

que puede darse, y que de hecho se da en la práctica, a la hora de evaluar los volúmenes anteriores, se deja para futuros desarrollos el análisis de la descomposición del volumen no autorizado, conforme al cuadro anterior.

Entre la problemática existente a la hora de evaluar el **volumen inyectado** podemos citar: la **declaración dinámica de los sectores y de los caudalímetros** que los delimitan, los **errores de medida de los caudalímetros**, la **apertura de válvulas frontera entre sectores contiguos**, etc. Por su parte, la determinación del **volumen autorizado** está afectada a su vez por numerosas circunstancias como son: la instalación de **nuevos contadores y acometidas**, el **cambio periódico de contador por avería o reposición** una vez cumplido el tiempo de vida, la **presencia de contadores totalizadores** agrupando a otros individuales para el contraste de lecturas, la diferente forma de computar el volumen registrado (por vivienda, por comunidades de vecinos, por zonas residenciales, por origen del agua, etc), la correcta imputación de consumos a acometidas, etc. Para abordar toda esta casuística se hará uso de la estructura de datos y asociaciones entre entidades expuesta en el capítulo anterior.

Los siguientes apartados van a **centrarse en la evaluación de los volúmenes inyectado y autorizado a un sector hidrométrico, para poder estimar finalmente su rendimiento hídrico global**. El análisis detallado de los mismos permitirá evaluar en el futuro con mayor exactitud las restantes componentes del volumen no controlado, en particular los consumos ilegales y las fugas al exterior.

Dentro de este capítulo se justificará primeramente el método de cálculo propuesto. A continuación se describirán con detalle los procedimientos implementados para evaluar el caudal inyectado a un sector hidrométrico, y seguidamente los procedimientos considerados para evaluar el volumen autorizado en los suministros terminales, y a partir de éstos computar el volumen autorizado en los diferentes sectores. Finalmente, se combinarán ambos procedimientos para realizar una evaluación lo más precisa posible del rendimiento hídrico de cada sector.

11.2 JUSTIFICACIÓN DEL MÉTODO ADOPTADO

La experiencia demuestra que es particularmente complejo tratar de calcular el balance hídrico y obtener el rendimiento de la red con cierta precisión, cuando el consumo de una parte significativa de los abonados se registra con baja frecuencia, o bien no se registra [Lambert (2003)]. Lo habitual es que la lectura de los contadores existentes en la red de abastecimiento se realice con una periodicidad mensual, bimestral o trimestral. En ese caso, el consumo autorizado debe deducirse a partir de una serie de abonados de diferente naturaleza cuyas lecturas de contador (si existen) se han realizado en intervalos temporales diferentes. Es por ello, por lo que la IWA, la AWWA y otros organismos oficiales recomiendan llevar a cabo los balances hídricos y el cálculo de rendimientos a lo largo de un periodo de un año.

Estrictamente hablando, para obtener datos mínimamente relevantes y significativos, el periodo mínimo de tiempo para realizar un balance debería coincidir con la frecuencia de lectura de los contadores, ya que no tendría sentido llevar a cabo balances hídricos para intervalos de tiempo menores, debido a la incertidumbre que conlleva estimar el consumo registrado en dichos intervalos. Ahora bien, aun ajustando el periodo del balance al de la lectura de los contadores, es sabido que éstos no se leen en su totalidad el mismo día de forma simultánea. En la práctica hay un desfase entre las lecturas de los diferentes contadores, que obliga a efectuar en cualquier caso interpolaciones (y a veces extrapolaciones) en los extremos del periodo de análisis considerado, sea cual sea éste. La interpolación y extrapolación de los volúmenes

registrados introduce una incertidumbre, que será tanto menor cuanto menos peso tenga el intervalo interpolado frente a los intervalos intermedios con lectura real.

Sin embargo, cuando se trata de **reducir fugas**, un tiempo de un año resulta excesivo para valorar la repercusión de la inversión realizada en la búsqueda y localización de éstas. La sectorización de una red pretende conseguir una mayor eficiencia en la gestión del volumen no controlado, y para ello **se necesitan tiempos de respuesta menores**, es decir, la posibilidad de **realizar balances en periodos de tiempo más cortos**.

Por otra parte, si la eficiencia en la detección de fugas se basa en el control activo de las fugas mediante el seguimiento de los caudales mínimos nocturnos, éstos deberán ser relativamente bajos para poder así detectar cualquier variación provocada por una fuga. Ello conduce a la necesidad de configurar sectores hidrométricos relativamente pequeños (10 a 15 l/s de caudal medio). En una red de cierta envergadura, ello tiene como contrapartida, además del coste de implantación, la apertura continua de válvulas frontera entre sectores contiguos para poder mantener el servicio en las operaciones de mantenimiento y reparación de las propias fugas detectadas. Es decir, **cuanto menor es el tamaño de los sectores propuestos, mayor es el número de maniobras que se realizan en las válvulas que actúan como frontera entre sectores y por tanto, mayor la incertidumbre que se introduce en los cálculos de los balances hídricos** a lo largo de un periodo de tiempo determinado, ya que los intervalos en que las válvulas frontera permanecen abiertas no deben ser contabilizados. Ello nos lleva de nuevo al problema de la incertidumbre a la hora de efectuar los balances hídricos, al tener que fraccionar el periodo de análisis por las continuas maniobras.

Parece pues que las dos técnicas más empleadas hoy en día para la detección de fugas, el control activo de los caudales mínimos nocturnos, y la realización de balances hídricos periódicamente, son incompatibles entre sí. El primero requiere configurar sectores pequeños y analizar variaciones de caudal en periodos muy cortos de tiempo. El segundo requiere en cambio configurar sectores grandes para evitar que las maniobras internas anulen los sectores, y realizar análisis en periodos extensos para reducir las incertidumbres.

Afortunadamente los avances tecnológicos parecen ir a favor de conjuntar ambas técnicas. Por una parte se está introduciendo rápidamente en los abastecimientos españoles la telelectura con contadores electrónicos capaces de almacenar los volúmenes registrados diariamente, así como su agrupación por bloques de consumo. Ello resolverá en pocos años el problema de la incertidumbre en el cómputo del volumen registrado para periodos cortos de tiempo. Dado que el caudal entrante se registra usualmente con una frecuencia horaria, se podrán realizar incluso balances diarios. Para ello habrá que resolver antes el problema de la captura, almacenamiento y tratamiento del inmenso volumen de información generado por la telelectura. Piénsese por ejemplo en el abastecimiento de una ciudad media, con 100.000 contadores y 365 lecturas al año por cada uno.

Por otra parte, habrá que desarrollar algoritmos potentes para el tratamiento conjunto por una parte de los datos relativos al caudal inyectado, los cuales son capturados y almacenados por el sistema SCADA o bien leídos directamente desde los data-loggers alojados en las estaciones remotas instalados al efecto, y por otra de los datos relativos al volumen registrado por los contadores con telelectura, los cuales se están alojando actualmente en grandes almacenes de datos conocidos como '*datawarehouse*'. Por otra parte, mientras que la toma de los primeros datos suele estar a cargo del departamento de explotación de las empresas gestoras, los segundos dependen del departamento comercial, lo que puede suponer una dificultad adicional para su conjunción. Además, para un análisis riguroso habrá que consensuar dicha

información con la relativa a las maniobras realizadas en la red, particularmente aquellas que afectan a las válvulas frontera, cuyo manejo pueden depender de un tercer departamento de la empresa, el de operaciones/maniobras y mantenimiento.

El objetivo de este capítulo es desarrollar, como un avance a las necesidades que se plantearán en un futuro inmediato, una metodología que permita realizar balances hídricos fiables en periodos de tiempo relativamente cortos, teniendo en cuenta toda la casuística anteriormente mencionada. Para ello será fundamental contar en el futuro con el aporte de las telelecturas diarias. Las ventajas de esta nueva herramienta quedan fuera de toda duda, al permitir conjuntar la técnica del seguimiento de los caudales mínimos nocturnos con la realización simultánea de balances hídricos, para una detección más eficaz de las fugas reales. Ello conllevará al mismo tiempo una mayor rentabilización de las inversiones realizadas en la sectorización de las redes y la búsqueda de fugas, al poder dirigir los medios técnicos y humanos disponibles allí donde realmente sean más necesarios.

11.3 CÁLCULO DEL VOLUMEN INYECTADO A CADA DISTRITO HIDROMÉTRICO

11.3.1 Introducción

El modelo de datos descrito en el ANEXO 1 está concebido para poder calcular con toda exactitud los volúmenes inyectados a cada distrito hidrométrico o DMA entre dos fechas dadas, teniendo en cuenta todas las situaciones que a continuación se describen:

- Las DMAs básicas deben definir una partición completa de la red, de modo que todo elemento de la red pertenezca a alguna DMA básica.
- Pueden también existir DMAs agrupadas, las cuales se declaran directamente como una asociación de DMAs básicas o de otras DMAs previamente agrupadas.
- La creación o anulación de una DMA, sea básica o agrupada, es un proceso dinámico en general, de modo que cualquiera de ellas puede resultar creada o anulada dentro del periodo de consulta.
- Una DMA, sea básica o agrupada, queda declarada fundamentalmente por los caudalímetros que la delimitan, y por el sentido del caudal en los mismos (entrante o saliente).
- Dichos caudalímetros pueden también declararse o cancelarse de forma dinámica, modificando la configuración de la DMA correspondiente. Por ejemplo, la instalación de un nuevo caudalímetro en la red puede afectar a la configuración de una o más DMAs, o dar lugar a dos nuevas DMAs básicas, pasando a ser agrupadas las DMAs actuales. En general, la creación, destrucción o reconfiguración de una DMA básica o agrupada afectará a las DMAs agrupadas que la incluyen.
- Un caudalímetro puede ser sustituido por otro a partir de determinada fecha, siendo sus parámetros de calibración distintos. Por ello, los elementos que delimitan las DMAs en el modelo de datos no deben ser caudalímetros, sino **puntos de medida**. Sobre ellos se instalarán los contadores o caudalímetros, que pueden cambiar con el tiempo.

- La señal procedente de un caudalímetro puede no ser registrada durante un tiempo, por ejemplo por un fallo de comunicación, impidiendo el cálculo del volumen inyectado durante ese tiempo para las DMAs afectadas.
- Las válvulas de comunicación entre sectores, que se cerraron probablemente durante la fase de sectorización, pueden ser abiertas en algunos momentos para satisfacer necesidades del servicio o por razones de mantenimiento. Por ello, el modelo datos debe incorporar también a las **válvulas frontera** como delimitadoras de las DMAs. Su apertura destruirá temporalmente la configuración de las DMAs afectadas.
- El fallo de un caudalímetro o la apertura de una válvula frontera puede afectar a ciertas DMAs, y no afectar a las DMAs agrupadas que alojan en su interior a dicho caudalímetro o válvula, sin delimitarla.
- A la hora de valorar los fallos en los caudalímetros hay que diferenciar si la lectura es por caudal o por volumen acumulado. En el primer caso, un fallo de lectura en un instante, invalidaría el cómputo del caudal inyectado en dicho instante para las DMAs que delimita. En cambio, si la lectura es por volumen acumulado, los fallos de lectura no serán relevantes, siempre y cuando el periodo de fallo quede dentro del periodo o subperiodo de consulta y se conozcan las lecturas acumuladas en el primer y último instante del mismo, ya que el volumen inyectado será simplemente la diferencia de ambas.
- Puesto que todo elemento de la red debe pertenecer a alguna DMA básica, en ocasiones nos encontraremos con DMAs configuradas solo por caudalímetros de entrada y salida, sin consumos en su interior. Estas DMAs las denominaremos de **reparto**, y el caudal inyectado a las mismas deberá ser permanentemente nulo, siempre que no haya errores de medida ni fugas.
- El procedimiento de cálculo del caudal inyectado a cada sector, deberá tener en cuenta la **presencia de depósitos de almacenamiento internos en las DMAs**, cuyo tiempo de vida puede ser también limitado. Los depósitos interiores se considerarán o no en el cómputo del volumen inyectado en función de la capacidad de éstos y de la extensión del periodo de consulta. Caso de ser relevantes, se deberá tener en cuenta la evolución del nivel en los mismos.
- La incorporación de las variaciones de nivel en los depósitos exige el conocimiento del valor de éste en los instantes extremos del periodo de consulta o en los instantes extremos de cualquier subperiodo considerado. Obsérvese que los fallos de lectura de nivel en instantes intermedios es irrelevante, pues solo se requiere conocer los niveles en los instantes extremos de cada periodo o subperiodo.
- La incorporación de un caudalímetro a la entrada o salida de un depósito, no cancela a éste, sino que más bien delimita una nueva DMA básica de reparto, que en caso extremo quedaría definida por el caudalímetro entrante, el caudalímetro saliente, y el propio depósito.
- El algoritmo de **cálculo de rendimientos**, deberá tener en cuenta los periodos de vigencia de las diferentes DMAs, así como de los caudalímetros que las delimitan, los **periodos de validez de las lecturas de dichos caudalímetros, el estado de las válvulas frontera que delimitan a cada DMA durante el periodo de consulta, así como la**

evolución de los niveles en los depósitos internos que sean relevantes, a fin de llevar a cabo un cálculo exacto del caudal inyectado a cada DMA, diferenciando los periodos en que es posible llevar a cabo dicho cómputo de aquellos en que no sea posible realizar el cálculo del volumen inyectado por cualquiera de las causas aludidas.

Como ya se ha podido ver en la segunda parte de la tesis, la aplicación GISRed puede hacer uso de algoritmos topológicos para la delimitación de los sectores básicos una vez declarados los caudalímetros y válvulas frontera, así como para identificar automáticamente las acometidas en cada uno de ellos. Dado que la sectorización puede ser cambiante en la medida que se retiren o instalen nuevos caudalímetros en la red, este algoritmo puede resultar sumamente útil. Además de los sectores básicos, se ha visto que se pueden declarar sectores agrupados asociando los anteriores. En GISRed tanto los sectores básicos como los agrupados son configurables, de modo que cada uno de ellos tiene un periodo de existencia asociado.

Por otra parte, los **sectores delimitados por válvulas frontera podrían quedar comunicados eventualmente** por la apertura temporal de éstas en operaciones de mantenimiento. En tal caso, **los balances hídricos que incluyeran el periodo de apertura de la válvula frontera quedarían invalidados para los sectores básicos, pero no así para los agrupados.**

Pues bien, dada una configuración de sectores básicos y agrupados, GISRed dispone de un algoritmo capaz de acumular el volumen inyectado en cada uno de los sectores declarados. En dicho proceso se tiene en cuenta el periodo de existencia de cada sector, así como los periodos en que alguna válvula frontera pudiera haber estado abierta y el posible almacenamiento o aporte de volumen por parte de los depósitos interiores a los sectores existentes.

11.3.2 Tratamiento de los datos en tiempo real

La realización de balances hídricos en los distritos hidrométricos propuestos en una red de distribución de agua, queda supeditada a la posibilidad de alimentar con datos de campo en tiempo real o cuasi real la base de datos de la aplicación GISRed, que permita el mantenimiento actualizado del modelo matemático de la red.

Para ello, se ha desarrollado en el seno del grupo REDHISP de la UPV, una aplicación llamada SCARed, que permite trabajar en paralelo con un sistema SCADA corporativo de operación de un abastecimiento de agua encargado de capturar los datos emitidos por los diferentes medidores (por ejemplo caudalímetros, o medidores de nivel) ya instalados en la red. El objetivo principal de la aplicación SCARed es la confección de una base de datos históricos coherentes y filtrados, así como la rectificación de los datos en tiempo real procedentes de los puntos de control de la red que adquieren datos en bruto capturados por el SCADA de operación de la empresa.

En SCARed, las señales capturadas a intervalos de tiempo fijo, son almacenadas en una base de datos históricos de **5 minutos**, y **agregadas** a intervalos de **15 minutos** y **1 hora**. Asimismo, los **datos cada 15 minutos son filtrados para restituir los valores considerados anómalos**, ya que a efectos de balances, y también para alimentar un modelo hidráulico, conviene que los datos de campo sean completos y fiables.

SCARed también ofrece la opción de capturar datos en diferido procedentes de estaciones remotas, los cuales son en este caso sincronizados por la aplicación, dado que los instantes y pautas de lectura de cada estación podrían no coincidir. Así, datos de campo tomados en

diferido y otros leídos en tiempo real pueden coexistir en los ficheros históricos. Caso de duplicidad en la lectura de una magnitud, prevalece el dato diferido sobre el de tiempo real.

Por tanto, SCARed es la aplicación que se encarga de identificar las variables sobre las que llevará a cabo un seguimiento en tiempo real de su evolución, así como de las variables complementarias derivadas de éstas y alimentar la base de datos de la aplicación GISRed con medidas reales horarias brutas y filtradas, que serán la base de los procedimientos que se describen a continuación.

11.3.3 Datos de partida

De acuerdo con el modelo de datos de GISRed, las tablas y campos básicos de los que partimos para llevar a cabo el cálculo del volumen inyectado en cada una de las DMAs declaradas entre dos instantes T1 y T2, requieren como mínimo de la siguiente información:

► **Declaración de las DMAs básicas y agrupadas.**

Las DMAs básicas no tienen por qué cubrir la totalidad del espacio, aunque podrían hacerlo si se declara una DMA que correspondiera al espacio no cubierto por las restantes DMAs; DMA que llamamos 'Exterior'. En tal caso habría que declarar también los caudalímetros que la delimitan en la tabla de asociaciones entre DMAs y caudalímetros. Las DMAs agrupadas pueden agrupar cualesquiera DMAs básicas o agrupadas. No hay ninguna restricción sobre su declaración.

► **Declaración de los caudalímetros que delimitan cada DMA, sea básica o agrupada.**

Es necesaria la declaración de los puntos de medida que delimitan a las DMAs. Cada punto de medida deberá estar asociado como máximo a dos DMAs básicas. La declaración de los puntos de medida que delimitan a cada DMA agrupada, forma parte también de esta tabla de relaciones, y debe estar en consonancia con los puntos de medida que delimitan a las DMAs a las que agrupa. Este proceso resulta automático si se incorporan a la base de datos DMAs agrupadas que dependen de otras DMAs anteriormente declaradas.

En cuanto a los campos de fechas de alta y baja de las relaciones entre DMAs y puntos de medida, serán propios de cada DMA agrupada, aunque es posible proponer valores por defecto, como la mayor fecha de alta y la menor fecha de baja de todas las DMAs que se agrupan.

Se supone que todos los puntos de medida de caudal que delimitan a una DMA básica o agrupada, están ligados a una señal que recoge hora a hora los valores medidos brutos y/o filtrados del caudal que pasa por dicho punto (estos podrían ser positivos o negativos, al margen del sentido de medición de flujo declarado para el caudalímetro en cuestión asociado a una DMA), los cuales se alojan en la tabla de medidas brutas o bien en la tabla de medidas filtradas.

Las medidas que utiliza GISRed pueden importarse de una base de datos externa o bien extraerse de las tablas de medidas de un sistema SCADA que permite alimentar a la aplicación.

► **Declaración de los depósitos de almacenamiento internos de las DMAs básicas o agrupadas.**

Se contempla la **posibilidad de que las DMAs simples o agrupadas encierren uno o varios depósitos de almacenamiento en su interior**, cuyas variaciones de volumen pueden tenerse en cuenta en los balances, en función de su capacidad de almacenamiento y del periodo de consulta.

En general, **para grandes periodos de consulta y volúmenes de almacenamiento pequeños, no es necesario contemplar el volumen almacenado en los depósitos al realizar los balances.**

Cuando el volumen almacenado deba tenerse en cuenta, el punto de medida asociado al depósito nos indicará la señal que recoge los valores de los niveles de agua almacenados en las tablas de medidas, siempre y cuando exista tanto la señal como los valores registrados. El cómputo de la corrección correspondiente al volumen almacenado o suministrado es muy simple, pues no es necesario realizar el seguimiento de las variaciones de nivel hora a hora. Basta con restar al nivel final el nivel inicial, y multiplicar la diferencia por el valor de la sección útil del depósito.

El resultado final será un volumen positivo o negativo, y se acumulará al volumen neto inyectado registrado por los caudalímetros.

► **Declaración de las válvulas frontera que delimitan a cada DMA básica o agrupada.**

Para la declaración de las válvulas de seccionamiento cerradas o válvulas frontera que delimitan a cada DMA se aplican las mismas consideraciones que para la declaración de los puntos de medida que las delimitan. La única diferencia es que en el caso de las válvulas frontera, no existe ningún sentido de flujo que asignar a la relación.

En esta tabla residen las válvulas frontera tanto de las DMAs básicas como de las agrupadas, existiendo procedimientos para la declaración automática de las válvulas que delimitan a las DMAs agrupadas al momento de incorporar estas últimas.

Toda válvula frontera debe separar exactamente dos y sólo dos DMAs básicas. Al agrupar dos DMAs contiguas, las válvulas frontera que las delimiten deben desaparecer como tales.

► **Medidas de los caudalímetros y niveles en depósitos.**

En la base de datos existen tablas que alojan las medidas brutas y filtradas correspondientes a los caudalímetros que delimitan las DMAs y a los niveles de los depósitos de almacenamiento que quedan en su interior.

Caso de no haber medidas almacenadas en las tablas anteriores para algunas señales, por ejemplo, debido a que los registros comienzan fuera o a mitad del periodo de consulta, ello invalida el cálculo de los volúmenes inyectados para los periodos de inactividad detectados, a la vista de los valores almacenados.

► **Operaciones sobre las Válvulas Frontera.**

La tabla de maniobras sobre válvulas de seccionamiento incluye todas las maniobras efectuadas sobre dichas válvulas, entre las que se encuentran las válvulas frontera. Los identificadores de las mismas se deducen fácilmente de la declaración de las válvulas frontera que delimitan a las DMAs involucradas. La maniobra puede ser de cierre total, cierre parcial o apertura total. A efectos de cálculo de balances, se consideran únicamente dos situaciones: válvula abierta (que incluye la apertura total o parcial) y válvula cerrada.

Cada operación sobre una válvula va asociada a la fecha de maniobra, la cual debe incorporar fecha y hora (los minutos no se tienen en cuenta). Para determinar el periodo de

tiempo que una válvula frontera permanece abierta o cerrada, se debe detectar dos maniobras consecutivas y proceder a comparar sus fechas de maniobra correspondientes.

► **Fiabilidad de los datos medidos en caudalímetros y depósitos.**

Las medidas de caudal y nivel en depósitos procedentes de SCARed son corregidas y filtradas (medidas filtradas) si durante el proceso de creación de la base de datos históricos el sistema SCADA detecta valores espurios o anómalos.

Un dato es considerado anómalo si:

- Está fuera del rango de posibles valores para esa variable hidráulica.
- Su valor no ha variado durante un número considerable de muestras consecutivas.
- Queda fuera del rango dado por $m \pm 2 \cdot std$, donde m es el valor medio de la señal (sin considerar valores anómalos) y std es la desviación estándar.

Estos valores anómalos son detectados y marcados por SCARed para ser corregidos. También son marcados los huecos (datos en blanco) que pudieran existir en la base de datos.

Los datos marcados son sustituidos por nuevos valores siguiendo la siguiente estrategia:

- Si la secuencia de datos no válidos es menor a una hora, se emplea una interpolación lineal para corregir la serie de datos.
- Si la secuencia de datos no válidos es mayor, cada valor marcado es reemplazado por la media anual de los valores registrados en el mismo instante de tiempo.

Por último, SCARed es capaz de aplicar un filtro con el objetivo de suavizar la señal y de ese modo eliminar el ruido que registran los sensores.

Los datos que han sido corregidos pasan a formar parte de las medidas filtradas existentes en la base de datos de SCARed y que serán importadas por la aplicación GISRed. SCARed asocia a cada una de esas medidas filtradas un valor de fiabilidad que indica el grado de confianza de la medida estimada. Este valor de fiabilidad se emplea a la hora de realizar un balance hídrico, admitiendo o no el resultado del balance en una DMA dependiendo de la mayor o menor precisión de todas las medidas empleadas en el cálculo.

11.3.4 Procedimiento básico para el cálculo del volumen inyectado a cada DMA

El procedimiento básico de cálculo del volumen inyectado a cada DMA que se describe en este apartado no tiene en cuenta en principio las maniobras de válvulas frontera que se puedan haber dado durante el periodo de consulta y además supone que no hay depósitos de almacenamiento en el interior de las DMAs. Más adelante se describe el mismo procedimiento teniendo en cuenta tanto las maniobras como los depósitos interiores a las DMAs.

El procedimiento propuesto inicialmente va a permitir obtener en un número limitado de pasos, el caudal inyectado tanto a las DMAs básicas como agrupadas, entre dos instantes T1 y T2 (periodo de consulta), que siempre harán referencia a días completos (la hora asociada a las fechas T1 y T2 se supone siempre que son las 00:00 horas del día que corresponda). El cálculo del volumen inyectado se realiza desde las 00:00 horas de T1 hasta las 00:00 horas de T2, por tanto, la fecha T2 no se incluye en el balance.

Dicho procedimiento tendrá en cuenta el tiempo de vida de cada DMA, así como los de los caudalímetros que las delimitan, a fin de evitar el cómputo de volúmenes fuera de sus respectivos periodos de existencia. Así por ejemplo, una DMA puede estar delimitada por 1 caudalímetro durante una fracción del periodo de consulta o por 2 caudalímetros durante otra fracción. La misma DMA podría también haber comenzado a existir o haber dejado de existir a mitad del periodo de consulta, por lo que se presupone total coherencia en la declaración de las fechas de alta y baja de las asociaciones entre caudalímetros y DMAs.

Una sencilla propuesta para el cálculo de volumen inyectado a cada DMA teniendo en cuenta las consideraciones anteriores sería:

1. Revisar cada una de las DMAs y para cada una de ellas los caudalímetros que la rodean.
2. Identificar el tiempo de vida de la asociación caudalímetro-DMA entre T1 y T2
3. Localizar la señal correspondiente en la tabla de medidas
4. Acumular el volumen registrado por cada caudalímetro a lo largo de dicho periodo
5. Finalmente obtener el volumen neto (volumen entrante – volumen saliente) para cada DMA en el tiempo de vida que les corresponda.

Según este procedimiento, el mismo caudalímetro podría ser visitado varias veces, caso de que delimitara a dos DMAs. Ello sería correcto, puesto que en función de la DMA a la que estuviera asociado, le podría corresponder un tiempo de vida diferente, y por tanto computar un volumen distinto. Aunque el procedimiento descrito es válido, se demostró que podría resultar lento, y además no se adaptaba a futuras situaciones en que una DMA pudiese quedar inoperante por la apertura y cierre de las válvulas frontera.

Por ese motivo se implementó el procedimiento de cálculo que se expone a continuación y que resulta más eficiente, ya que el número de operaciones no depende del número de DMAs y de caudalímetros considerados, y además **está preparado para tener en cuenta las maniobras de las válvulas frontera e incluir el volumen proporcionado/almacenado en los depósitos.**

11.3.5 Procedimiento implementado para el cálculo del volumen inyectado a cada DMA

El procedimiento de cálculo finalmente implementado resulta más eficiente ya que el número de operaciones no depende del número de DMAs y de caudalímetros considerados, y además **está preparado para tener en cuenta las maniobras de las válvulas frontera e incluir el volumen proporcionado/almacenado en los depósitos interiores.**

Básicamente conlleva las siguientes etapas y operaciones:

1. Identificar los diferentes **subperiodos** de agrupación de caudales teniendo en cuenta las **maniobras en las válvulas frontera** y los **fallos en los caudalímetros**.
2. Calcular los **volúmenes acumulados por cada caudalímetro en cada subperíodo**.
3. Calcular los **volúmenes registrados por cada asociación DMA-caudalímetro en cada subperíodo**.

4. Calcular los volúmenes suministrados o almacenados en los depósitos de las DMAs en cada subperíodo.
5. Agrupar los volúmenes inyectados a cada DMA, a partir de los volúmenes registrados por los caudalímetros que la delimitan.

A continuación se describen con más detalle cada una de estas operaciones. Para ilustrar el procedimiento se va a hacer uso del siguiente esquema de red, consistente en dos DMAs unidas por sendas tuberías, una de ellas cerrada mediante una válvula manual (actuando como frontera) y la otra equipada con un caudalímetro (Q):

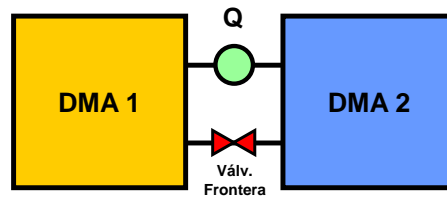


FIGURA 101. DMAS UNIDAS POR TUBERÍA CERRADA Y TUBERÍA CON CAUDALÍMETRO.

11.3.5.1 Identificación de los subperíodos de agrupación

A priori podría pensarse que el volumen en cada sector depende únicamente de los volúmenes acumulados por sus caudalímetros durante sus respectivos periodos de vigencia dentro del periodo de consulta. Sin embargo, debido a que dicho periodo depende de la DMA a que se asocia el caudalímetro, el volumen no está ligado a este, sino a la asociación DMA-Caudalímetro. Además, los tiempos de vigencia de cada asociación pueden solaparse entre sí, como se muestra en el gráfico adjunto.

En él, T_1 y T_2 representan los instantes inicial y final del periodo de la consulta. *Asoc.Q-DMA1* y *Asoc.Q-DMA2* representan los tiempos totales de vigencia de dos asociaciones DMA-Caudalímetro. Finalmente, T_i y T_f representan los instantes inicial y final de cada subperíodo de cálculo identificado, como consecuencia de la superposición de los diferentes periodos.

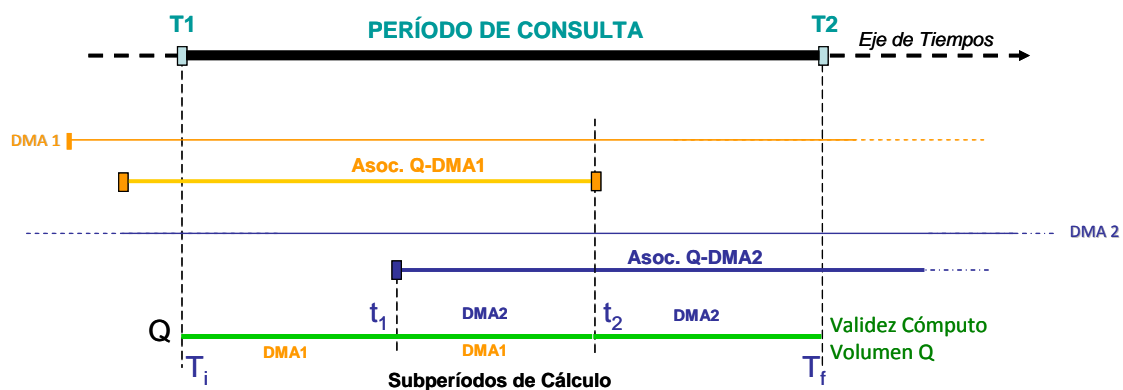


FIGURA 102. SUPERPOSICIÓN DEL PERÍODO DE CONSULTA CON LOS TIEMPOS DE ASOCIACIÓN DMA-CAUDALÍMETRO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS SUBPERÍODOS DE CÁLCULO.

El objetivo de este primer paso es identificar todos los subperíodos de cálculo, obtenidos como consecuencia de intersectar el periodo de consulta con los periodos de vigencia de cada una de las asociaciones DMA-Caudalímetro. Para ello es necesario comparar todas las fechas de

alta y baja de las relaciones DMA-Caudalímetro que intervengan, con las fechas del período de cálculo.

Se trata de obtener una tabla auxiliar en la que se especifiquen los períodos de vigencia de cada caudalímetro vinculado a su correspondiente DMA, durante el período de consulta seleccionado por el usuario. En esta tabla resulta importante conservar el sentido de medición en el que actúa el caudalímetro en la DMA, es decir, si el flujo que registra el caudalímetro entra o sale de la DMA.

Como siguiente paso es necesario crear una lista con los instantes en que se produce algún evento, como por ejemplo el fallo de algún caudalímetro o bien la apertura de alguna válvula frontera. Esta tabla recogerá todos los subperíodos generados tras la intersección de todas las fechas que intervienen en el período de cálculo.

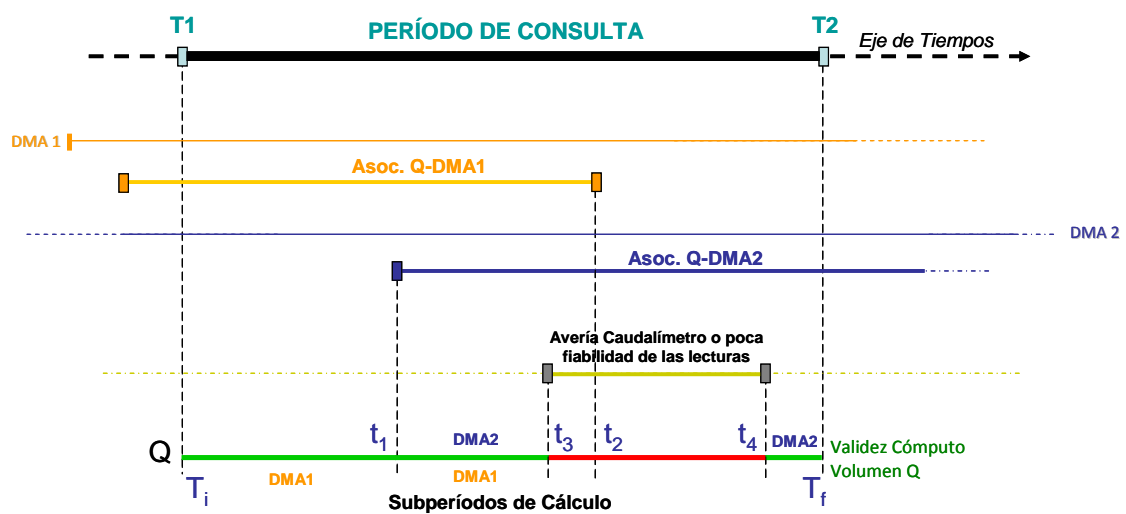


FIGURA 103. SUPERPOSICIÓN DEL PERÍODO DE CONSULTA CON LOS TIEMPOS DE ASOCIACIÓN DMA-CAUDALÍMETRO Y CON LOS INSTANTES EN LOS QUE SE PRODUCE UNA AVERÍA EN ALGÚN CAUDALÍMETRO O SE DETECTA POCA FIABILIDAD EN LAS LECTURAS DE LOS MISMOS.

Aunque el hecho de intersectar las fechas de todas las asociaciones DMA-Caudalímetro con las fechas en las que se produce algún tipo de evento, no sería estrictamente necesario, puesto que bastaría intersectar únicamente el instante en el que se produce algún evento con las fechas de asociación de DMA-Caudalímetro de las DMAs a las que afecta, se realiza para todas las asociaciones por motivos de sencillez y eficiencia en la computación de los resultados.

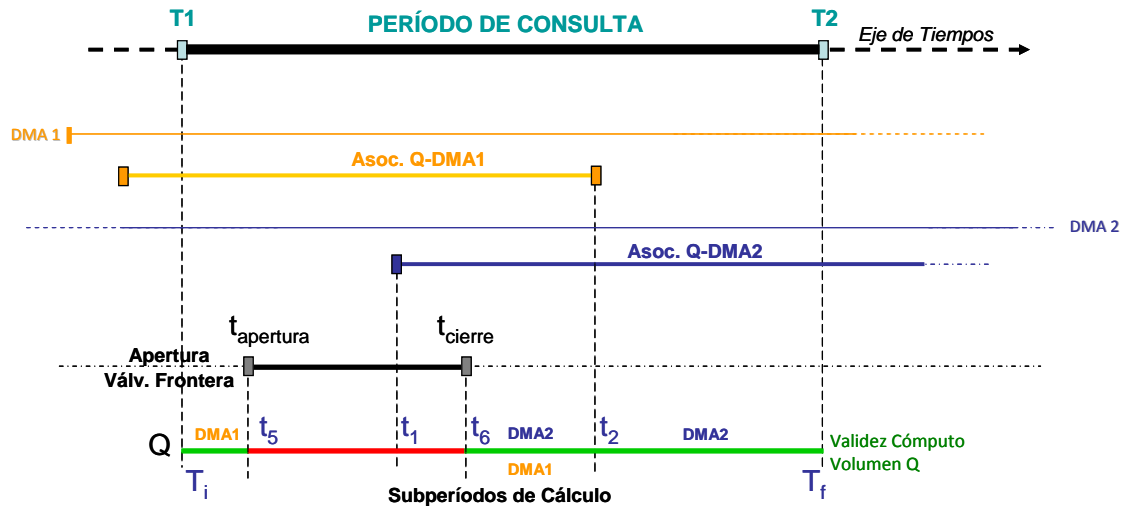


FIGURA 104. SUPERPOSICIÓN DEL PERÍODO DE CONSULTA CON LOS TIEMPOS DE ASOCIACIÓN DMA-CAUDALÍMETRO Y CON LOS INSTANTES EN LOS QUE SE PRODUCE LA APERTURA DE UNA VÁLVULA FRONTERA.

Por tanto, en el procedimiento general se incorporan aquellos instantes (fecha y hora) en que se efectúa una maniobra de apertura o cierre de alguna válvula frontera, sea cual sea ésta (incluidas las operaciones de cierre parcial), así como aquellos instantes en que se inicie el descarte o la restauración de las lecturas de algún caudalímetro, sea cual sea éste (solo si se trabaja con los datos brutos). Para no fraccionar tanto el intervalo de consulta, se consideran únicamente periodos de apertura de válvulas o de defectos de lectura que tengan **una duración superior a 1 día**.

Tras una serie de operaciones internas de filtrado y ordenación de fechas, se obtiene una tabla con los instantes inicial y final de cada subperiodo identificado, en el que se llevará a cabo el cálculo del balance.

11.3.5.2 Cálculo de los volúmenes acumulados por los caudalímetros en cada subperiodo

Esta etapa es la más sencilla de todo el proceso y consiste en extraer de la tabla de medidas de Caudal (brutas o filtradas) aquellos registros que quedan dentro del periodo de consulta y que están vinculados a los caudalímetros involucrados. A continuación se incluye cada lectura horaria dentro de uno de los subperiodos calculados con anterioridad, agrupando posteriormente dichos valores de caudal por subperiodos y sumando los valores almacenados de las señales asociadas a los caudalímetros.

De este modo se obtienen los **volúmenes registrados por cada caudalímetro en cada uno de los subperiodos** identificados.

11.3.5.3 Cálculo de los volúmenes acumulados por cada asociación DMA-Caudalímetro en cada subperiodo

El periodo total de vigencia de cada asociación DMA-Caudalímetro es probable que haya quedado dividido en varios subperiodos, de acuerdo con el proceso seguido hasta ahora. Lo que sí se puede afirmar, por el proceso seguido, es que en caso de dividirse el periodo de vigencia en varios subperiodos, éstos deben abarcar exactamente el periodo de vigencia, coincidiendo el inicio y final del periodo de vigencia de cada asociación con el periodo inicial y final de alguno de los subintervalos.

Se trata ahora de acumular el volumen total registrado por cada asociación DMA-Caudalímetro durante su periodo de vigencia. Para ello, el volumen total en ese periodo de vigencia se ha de dividir primeramente en los subperiodos calculados previamente, para posteriormente analizar en cuáles de esos subperiodos, la asociación DMA-Caudalímetro ha sido o no válida. El volumen acumulado en los subperiodos en que se divide el tiempo de vigencia de la asociación, **no se debe computar** siempre y cuando se haya producido alguna de estas circunstancias:

- se ha producido la **apertura de una válvula frontera** que hace que la definición de ciertas DMAs deje de ser válida.
- Cuando por otras razones, la **DMA no es válida en el subperiodo** considerado.
- **Fallos en los caudalímetros** que delimitan a la DMA considerada.

Tras la acumulación del volumen total registrado por cada asociación DMA-Caudalímetro en cada subperiodo y la identificación del tiempo total computable para cada asociación, es posible obtener el volumen total inyectado por los mismos, teniendo en cuenta las maniobras en las válvulas frontera y los fallos originados en los caudalímetros. Se descartarán aquellos subperiodos en que han quedado divididas las asociaciones, y por ende el volumen computado en los mismos, en los que las válvulas frontera han permanecido abiertas y/o haya habido algún fallo en las lecturas de los caudalímetros.

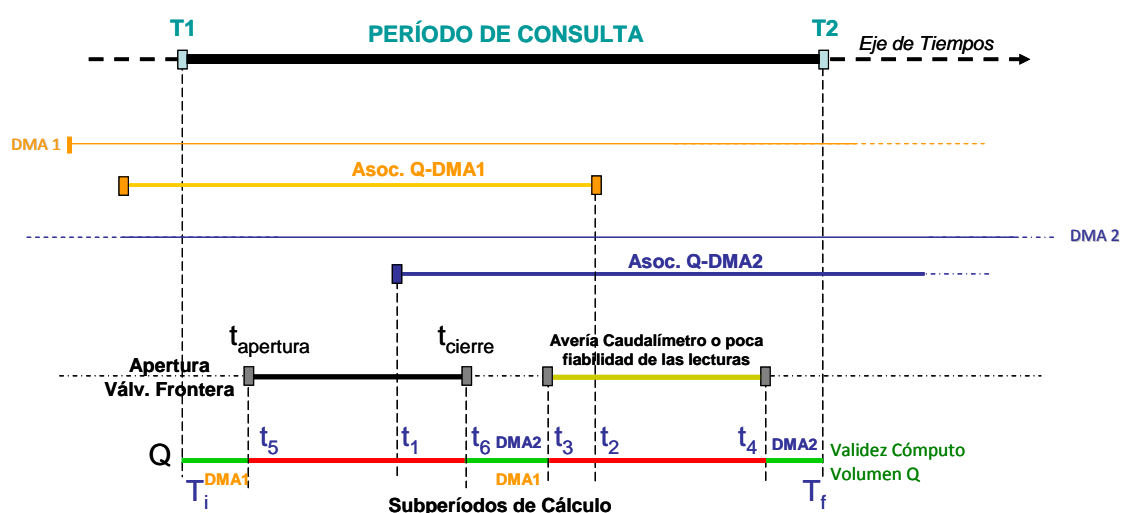


FIGURA 105. OBTENCIÓN DE LOS SUBPERÍODOS DE CÁLCULO.

11.3.5.4 Cálculo del volumen suministrado / almacenado en los depósitos en cada subperiodo

Por último, cabe la posibilidad de considerar el volumen almacenado en los depósitos de las DMAs, si estos existen. En esos casos el procedimiento de cálculo debe tener en cuenta lo siguiente:

- Primeramente, deberá tener en cuenta **si el depósito es relevante o no en la consulta**, dependiendo de su volumen y del tamaño de la DMA (esto es, del volumen inyectado a ésta), y del periodo de consulta.
- El volumen almacenado en un depósito para un periodo dado es simplemente la **diferencia de nivel entre los instantes inicial y final de dicho periodo**, multiplicado por su sección útil. Es necesario considerar los volúmenes almacenados por éstos en cada subperiodo válido en los que ha quedado dividido el periodo de consulta. Los niveles

alcanzados en los depósitos en los instantes comprendidos dentro o fuera de dichos subperiodos de validez, no importan.

- Para tener en cuenta los depósitos bastará **sumar o restar al caudal inyectado en cada DMA, la suma de los volúmenes aportados o almacenados** respectivamente por sus depósitos en cada uno de los periodos de validez.
- Un **depósito puede ser relevante en una DMA simple, pero no serlo en una DMA agrupada** debido al mayor volumen inyectado en ésta. Por ello los depósitos deben declararse como pertenecientes tanto a una DMA simple como a posibles DMAs agrupadas, para ello se utiliza el campo *PeriodDep* de la tabla de relaciones entre DMAs y depósitos, que refleja si éste debe o no considerarse en los balances en función del número máximo de días para los que el depósito resulta relevante en términos de volumen suministrado o almacenado.

Este procedimiento tiene por objeto la obtención de una tabla que recoja la diferencia de niveles de los depósitos intervinientes en el cálculo, en cada uno de los subperiodos obtenidos en los pasos anteriores. De este modo, tendremos la diferencia de niveles inicial y final para cada depósito en cada subperíodo. En consecuencia, si el depósito se ha llenado, la diferencia de nivel entre el nivel inicial y el final será negativa. Si el depósito se ha vaciado, la diferencia será positiva.

Una vez se conoce la diferencia de nivel en cada subperíodo, es posible obtener el volumen aportado o almacenado por el depósito en la DMA, sin más que multiplicar por su sección útil. La sección útil de los depósitos se puede definir bien en la tabla de relaciones entre DMAs y depósitos (que es el dato que prevalece) o bien en la tabla de propiedades de los depósitos del modelo de red.

Finalmente, la aplicación analiza si el volumen de los depósitos calculado en cada subperíodo se debe computar o no en el cálculo final del volumen inyectado. Las posibles causas que pueden originar que el volumen almacenado o aportado por el depósito no se tenga en cuenta son:

- la apertura de una válvula frontera que invalide la definición de la DMA a la que pertenece el depósito.
- El hecho de que la DMA en la que se encuentra el depósito no exista o no sea válida en ese subperíodo.
- Fallos en los caudalímetros que delimitan a la DMA considerada.

Siguiendo el ejemplo utilizado hasta ahora, supongamos que la DMA 2 contiene un depósito en su interior. En este caso, sería necesario tener en cuenta en qué períodos de tiempo se debe considerar además el volumen aportado o almacenado por el depósito en cuestión. Esto se realiza intersectando los períodos de validez del cómputo general con el período de vigencia del depósito.

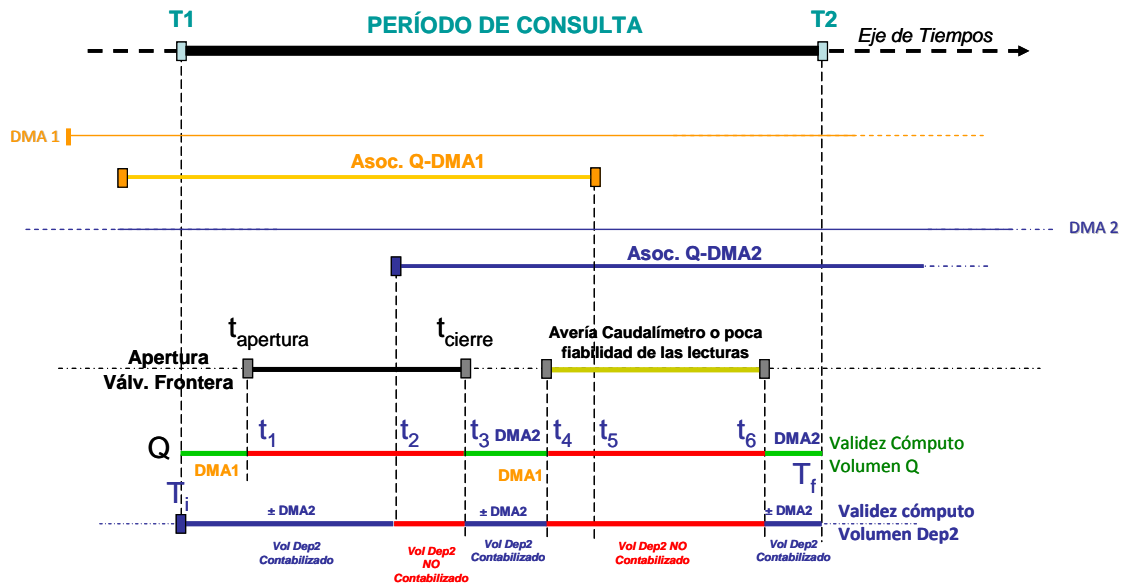


FIGURA 106. CONSIDERACIÓN DEL VOLUMEN SUMINISTRADO / ALMACENADO EN LOS DEPÓSITOS EN CADA SUBPERÍODO.

11.3.5.5 Cálculo de los volúmenes inyectados a cada DMA

Con todas las premisas anteriores, solo resta agrupar el volumen almacenado **por DMA sumando aquellos volúmenes válidos en los subperíodos considerados para cada asociación DMA-Caudalímetro**, teniendo en cuenta el sentido de medición (flujo entrante o saliente a la DMA) de cada asociación en que intervenga la DMA, estableciendo el número de días que cada DMA ha sido válida dentro del período de consulta.

Ante la existencia de depósitos, es necesario **considerar el volumen almacenado en los depósitos interiores existentes en las DMAs**, por lo que se debe considerar el volumen almacenado/proporcionado por los depósitos en cada subperíodo siempre y cuando el subperíodo referido coincida con un subperíodo válido para la DMA y además, no se haya producido la apertura de ninguna válvula frontera en el mismo ni un fallo de alguno de sus caudalímetros.

Para cada DMA pues, se obtiene finalmente el volumen inyectado debido exclusivamente a la validez de los caudalímetros de la DMA dentro del período de consulta, al volumen debido al aporte o almacenamiento de los depósitos, al volumen neto total que se inyecta a la DMA en cuestión y al tiempo válido (número de días) de la DMA dentro del período de consulta. Si los datos residentes en la base de datos son correctos, la vigencia de la DMA debe estar en consonancia con la vigencia de todas sus asociaciones.

Si alguna DMA no está vigente en el periodo de consulta, quedará descartada automáticamente en el procedimiento, al no haber ninguna asociación vigente que haga referencia a ella.

El proceso descrito es totalmente general, y permite obtener los volúmenes inyectados tanto para las DMAs básicas como para cualquier DMA agrupada.

11.3.6 Resumen de tablas de resultados generadas durante el proceso de cálculo del volumen inyectado a cada DMA

Las tablas de resultados que se crean en la geodatabase principal de GISRed 2 Pro durante el procedimiento general de cálculo del volumen inyectado a cada DMA son las siguientes:

► Superiodos

La tabla *Subperiodos* contiene todos los instantes dentro del período de consulta (desde *T1* a *T2*), en los que se produce algún evento debido a las maniobras de las válvulas o bien a los períodos de vigencia de las DMAs involucradas en la consulta. Incluye los instantes inicial (*T1*) y final (*T2*) del período de consulta seleccionado.

Los campos de la tabla *Subperiodos* son:

- *Subperiodo*: Orden cronológico de subperiodos. Sirve también como identificador numérico del subperiodo.
- *Ti*: Instante inicial del subperiodo.
- *Tf*: Instante final del subperiodo.

► PerDMA

Tras identificar los subperiodos de la consulta, la tabla *PerDMA* contiene los subperiodos válidos para cada DMA.

Los campos de la tabla *PerDMA* son:

- *IdDMA*: Identificador numérico interno de la DMA.
- *Subperiodo*: Orden cronológico de subperiodos.
- *Ti*: Instante inicial del subperiodo.
- *Tf*: Instante final del subperiodo.
- *Valido*: este campo puede adoptar los valores -1 (TRUE) ó 0 (FALSE), indicando en este último caso que el volumen correspondiente a dicho subperiodo no debe computarse en el balance de la DMA.
- *Causa*: contiene un código numérico para indicar: 1 = apertura válvula frontera; 2 = la DMA no existía en ese subperiodo; 3 = fallo caudalímetro.
- *IdElem*: si *Valido* = 0 (FALSE), contiene el Id de la válvula frontera o caudalímetro responsable.

► TpoDMA

Contiene el número de días válido de cada una de las DMAs declaradas en la GDB principal dentro del período de consulta seleccionado.

Los campos de la tabla *TpoDMA* son:

- *IdDMA*: Identificador numérico interno de la DMA.
- *Tpo*: Número de días dentro del período de consulta para los que la DMA ha sido válida. Se calcula como suma de tiempos parciales (en días) de cada subperiodo ($Tf - Ti$) para aquellos subperiodos de la tabla *PerDMA* en los que *Valido* = -1 (TRUE).

► VoidMADeposito_Subperiodo

Esta tabla contiene la diferencia de nivel que marcan los puntos de medida de la tabla *DMADepositos* para cada uno de los subperiodos en que se divide el período de consulta, es

decir, el nivel inicial menos el nivel final en cada uno de los subintervalos. Incluye también el identificador del depósito al que está vinculado el medidor de nivel (*IdDep*), la sección útil del depósito y el volumen neto suministrado/almacenado en cada subperíodo.

NOTA: Para el cálculo del volumen suministrado o almacenado por los depósitos, se requiere la sección útil del mismo. Si en la tabla *DMADepositos*, el campo *SeccUtil* (sección útil del depósito) está en blanco, se toma como sección útil del depósito la calculada a partir de las propiedades de los depósitos definidas en la tabla *Depositos*. Por tanto, si no se hubieran dado de alta los depósitos en el modelo de red, resulta necesario definir la sección útil de los depósitos en la tabla *DMADepositos*.

Los campos de la tabla *VoIDMADeposito_Subperiodo* son:

- *IdDMA*: Identificador numérico interno de la DMA.
- *IdPtoMed*: Identificador numérico del punto de medida (medidor de nivel).
- *Senal*: Nombre de la señal de medida asociada al punto de medida.
- *IdDep*: Identificador numérico del depósito al que está asociado el punto de medida de nivel.
- *SeccUtil*: Sección útil del depósito. Se toma de la tabla *DMADepositos* y en el caso de no existir en dicha tabla, se calcula a partir de las propiedades de los depósitos.
- *Subperiodo*: Orden cronológico de subperíodos en que se divide cada asociación DMA-Medidor de nivel.
- *DifNivel*: Diferencia de nivel en el subperíodo, es decir, nivel en el instante inicial del subperíodo menos nivel en el instante final del subperíodo.
- *VolAlmacen*: Volumen suministrado (si es positivo) o almacenado (si es negativo) en el depósito en cada subperíodo.
- *Ti*: Instante inicial del subperíodo.
- *Tf*: Instante final del subperíodo.
- *Valido*: este campo puede adoptar los valores -1 (TRUE) ó 0 (FALSE), indicando en este último caso que el volumen correspondiente a dicho subperíodo no debe computarse en el balance de la DMA.
- *Causa*: contiene un código numérico para indicar: 1 = apertura válvula frontera; 2 = la DMA no existía en ese subperíodo; 3 = fallo caudalímetro.
- *IdElem*: si *Valido* = 0 (FALSE), contiene el Id de la válvula frontera o caudalímetro responsable.

► **VoIDMAMedidorNivel**

La tabla *VoIDMAMedidorNivel* se obtiene agrupando la tabla *VoIDMADeposito_Subperiodo* por el campo *IdPtoMed* para obtener el volumen aportado o almacenado por cada depósito en cada una de las DMAs.

Los campos de la tabla *VoIDMAMedidorNivel* son:

- *IdDMA*: Identificador numérico interno de la DMA.
- *IdPtoMed*: Identificador numérico del punto de medida (medidor de nivel).
- *IdDep*: Identificador numérico del depósito al que está asociado el punto de medida de nivel.
- *VolAlmacen*: Volumen total suministrado (si es positivo) o almacenado (si es negativo) por los depósitos en cada DMA.

► VoIDMADeposito

La tabla *VoIDMADeposito* se obtiene agrupando la tabla *VoIDMAMedidorNivel* por el campo *IdDMA* para obtener el volumen total aportado o almacenado por los depósitos en cada una de las DMAs.

Los campos de la tabla *VoIDMADeposito* son:

- *IdDMA*: Identificador numérico interno de la DMA.
- *VolAlmacen*: Volumen total suministrado (si es positivo) o almacenado (si es negativo) por los depósitos en cada DMA.

► VolPeriodos

Esta tabla contiene el volumen total en m³ que registran los caudalímetros en cada uno de los subperiodos de cálculo en que se divide el periodo de cálculo seleccionado por el usuario.

Los campos de la tabla *VolPeriodos* son:

- *Subperiodo*: Orden cronológico de subperiodos en que se divide cada asociación DMA-Caudalímetro.
- *Ti*: Instante inicial del subperiodo.
- *Tf*: Instante final del subperiodo.
- El resto de columnas adoptan el nombre de la señal asociada a cada caudalímetro (según aparece en la tabla de *Medidas de Caudal/Nivel*) y contienen los volúmenes en m³ medidos por los caudalímetros en cada subperiodo.

► VoIDMACaudalim

Esta tabla contiene el volumen acumulado por cada caudalímetro en cada DMA y en cada subperiodo.

Los campos de la tabla *VoIDMACaudalim* son:

- *IdDMA*: Identificador numérico interno de la DMA
- *IdPtoMed*: Identificador numérico del punto de medida (caudalímetro)
- *Sentido*: Sentido por defecto del caudal en el punto de medida (+1 entrante a la DMA y -1 saliente de la DMA). Este valor se toma de la tabla *DMACaudalim*
- *Ti*: Instante inicial del subperiodo
- *Tf*: Instante final del subperiodo
- *TAsoc1* y *TAsoc2*: representan los tiempos totales de vigencia de la asociación DMA-Caudalímetro
- *VolAcumSubper*: Volumen en m³ acumulado en el subperiodo por la asociación DMA-Caudalímetro.
- *Valido*: este campo puede adoptar los valores -1 (TRUE) ó 0 (FALSE), indicando en este último caso que el volumen correspondiente a dicho subperiodo no debe computarse en el balance de la DMA.
- *Causa*: contiene un código numérico para indicar: 1 = apertura válvula frontera; 2 = la DMA no existía en ese subperiodo; 3 = fallo caudalímetro
- *IdElem*: si *Valido* = 0 (FALSE), contiene el Id de la válvula frontera o caudalímetro responsable

► VoIDMACaudalimetro

Esta tabla se obtiene agrupando la tabla *VoIDMACaudalim* por el campo *IdPtoMed* para obtener el volumen total acumulado por cada caudalímetro en cada DMA teniendo en cuenta sólo aquellos subperíodos válidos (Valido = -1 o TRUE).

Los campos de la tabla *VoIDMACaudalimetro* son:

- *IdDMA*: Identificador numérico interno de la DMA.
- *IdPtoMed*: Identificador numérico del punto de medida (caudalímetro).
- *Sentido*: Sentido por defecto del caudal en el punto de medida (+1 entrante a la DMA y -1 saliente de la DMA).
- *VolAcumAsoc*: Volumen total en m³ acumulado por el caudalímetro en cada DMA.

► VollnyT1T2_DMA

Contiene los volúmenes inyectados a cada una de las DMAs definidas en la GDB principal (simples y agrupadas) para el período de consulta, es decir, entre T1 y T2.

Los campos de la tabla *TpoDMA* son:

- *IdDMA*: Identificador numérico interno de la DMA.
- *NombreDMA*: Nombre de la DMA (identificador externo).
- *VolCaudalim*: Volumen inyectado a la DMA calculado en base únicamente a las medidas de caudal de los caudalímetros que definen la DMA.
- *VolAlmacen*: Volumen suministrado por o almacenado en los depósitos existentes en el interior de la DMA y que se han declarado en la tabla *DMADepositos* al poseer medidor de nivel asociado. Si el valor del volumen *VolAlmacen* es positivo, significa que el/los depósito(s) ha(n) aportado ese volumen adicional a la DMA durante el período de consulta y por tanto habrá que añadirlo al volumen inyectado que se ha calculado a partir de los caudalímetros. Si por el contrario el volumen *VolAlmacen* es negativo, significa que el/los depósito(s) ha(n) almacenado dicho volumen y por tanto habrá que descontarlo del volumen inyectado que se ha calculado a partir de los caudalímetros.
- *VolDMA*: volumen neto inyectado a la DMA y calculado como suma del Volumen registrado por los caudalímetros (*VolCaudalim*) y el volumen suministrado/almacenado de los depósitos (*VolAlmacen*). NOTA: Se tiene en cuenta el signo del campo *VolAlmacen*.
- *TpoValido*: Número de días dentro del período de consulta para los que la DMA ha sido válida.

11.4 CÁLCULO DEL VOLUMEN AUTORIZADO EN LOS PUNTOS DE SUMINISTRO

11.4.1 Introducción

Dada una configuración de sectores básicos y agrupados, se han diseñado algoritmos para acumular, en todos los sectores declarados, las demandas registradas y estimadas en sus diferentes acometidas, para un periodo de consulta dado. En dicho proceso se tiene en cuenta el periodo de existencia de cada sector, así como los periodos en que alguna válvula frontera ha estado abierta. La acumulación de la demanda registrada-estimada en cada sector hidrométrico a partir de los volúmenes acumulados en las acometidas, puede realizarse también en función de los diferentes usos del agua en el sistema.

Según se ha señalado en el CAPÍTULO 10, un punto de suministro se concibe como un punto de paso del agua en el cual se pretende llevar a cabo la medición o bien la estimación periódica del volumen trasegado a través del mismo. Todo punto de suministro, además de tener asociadas unas determinadas propiedades físicas que le caracterizan, como ubicación geográfica, diámetro, etc, se asume que tiene asociada una fecha de alta, o de instalación, y una fecha de baja, o de retirada, que identifica su periodo de vigencia.

El volumen que pasa por un punto de suministro en un periodo dado queda determinado a partir de las lecturas de los contadores ubicados en él (volumen registrado), o bien de las estimaciones realizadas (volumen estimado) si no hubiera contador.

Según el modelo de datos de GISRed, un punto de suministro puede estar dotado de contador o no, y en caso afirmativo el contador puede ser sustituido a lo largo del tiempo. En los puntos de suministro con contador, es posible determinar el volumen registrado durante el periodo de consulta, mientras que en los que no dispongan de contador, solo es posible determinar el volumen estimado a lo largo de dicho periodo.

El hecho de que un punto de suministro disponga o no de contador, no queda registrado como una propiedad del mismo en la tabla de declaración de los puntos de suministro como entidades, ya que es una circunstancia que puede variar a lo largo del periodo de vida del suministro. Así por ejemplo, puede darse el caso que en un punto de suministro sin contador, se instale uno a mitad del periodo de consulta, o que un contador pueda ser sustituido por otro dentro del periodo de consulta, o incluso que teniendo contador, el consumo pase a ser estimado por avería de éste, pudiendo volver el consumo a ser registrado un tiempo después, tras reparar el contador o sustituirlo.

Las relaciones entre suministros y contadores se declaran en la tabla *SumCont* (Suministro-Contador), junto con sus periodos de vigencia. Por otra parte, las lecturas de caudal de los contadores se almacenan en la tabla *QDiariosReg*, mientras que las estimaciones se almacenan en la tabla *QDiariosEstim*.

Como punto de partida del procedimiento de cálculo del volumen autorizado (registrado/estimado) en cada distrito hidrométrico que se pretende describir a continuación, **se asume (por sencillez a la hora de explicar el procedimiento) que en una consulta previa automática realizada por la aplicación GISRed, se han determinado previamente los volúmenes registrados o estimados en cada punto de suministro (sea terminal o totalizador), junto con el periodo de validez de dicho volumen**, el cual estará ligado al periodo de vida del suministro, al periodo de consulta, al hecho de tener o no contador, y a la fiabilidad de las lecturas cuando el

suministro posee contador. La tabla que recoge los resultados de dicha consulta se admite que tiene la siguiente estructura:

IdSum TipoCons VolReg_Est FecIniCons FecFinCons

pudiendo resultar varios registros para cada punto de suministro, en función de los condicionantes anteriores. El campo *TipoCons* identifica si el volumen almacenado en el campo siguiente es registrado o estimado. Dicha distinción va a ser relevante a la hora de efectuar las correcciones que proceda, por contraste con los volúmenes registrados o estimados en los suministros totalizadores.

Se admite, por otra parte, que pueden existir Suministros Terminales y Suministros Totalizadores, cuyo objetivo es controlar los consumos en los puntos de suministro que dependen de ellos. Admitiremos que los diferentes puntos de suministro que dependen de una acometida se encuentran conectados siguiendo una estructura en árbol, en la que pueden existir uno o más suministros totalizadores colgados de una misma acometida; éstos a su vez pueden alimentar a los puntos de suministro terminales o bien a otros totalizadores hijos, sin limitaciones en cuanto al número de niveles totalizadores, ni en cuanto a la estructura del árbol configurado por ellos. **La única restricción es que un determinado punto de suministro no puede estar controlado simultáneamente por más de un totalizador, o dicho de otro modo, un punto de suministro no puede tener más de un padre, en un instante dado.** No obstante, si tenemos en cuenta la temporalidad o tiempo de vida de los suministros totalizadores, es posible que a lo largo del tiempo un suministro pueda poseer varios padres, pero nunca simultáneamente.

En la figura se muestra una posible estructura de los puntos de suministro:

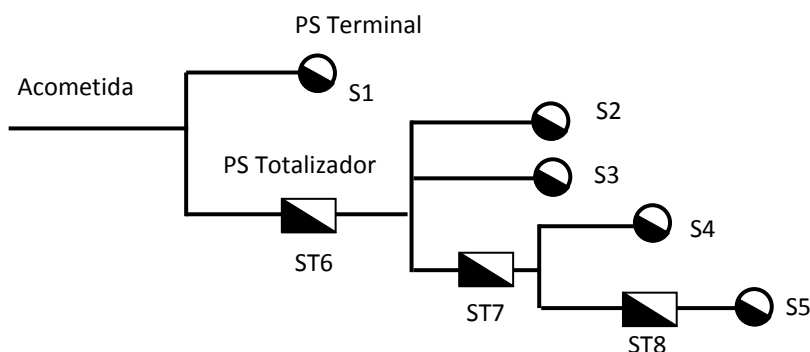


FIGURA 107. ESTRUCTURA ARBÓREA DE LOS PUNTOS DE SUMINISTRO.

Se observa que un punto de suministro terminal (S) puede depender directamente de la acometida o bien de un determinado suministro totalizador (ST). A su vez, un totalizador puede depender de otro previo. Colgando directamente de la acometida puede haber uno o más totalizadores, o ninguno, si todos los suministros terminales están conectados directamente de la acometida, caso bastante frecuente. También puede suceder que un totalizador controle un único punto de suministro terminal como ocurre entre ST8 y S5 en la figura. En definitiva, la complejidad de la estructura puede aumentar enormemente.

La estructura arbórea anterior puede codificarse simplemente indicando por cada Punto de Suministro, el identificativo del Punto de Suministro Totalizador que le precede, según la tabla de relaciones *SumTotSum* existente en la base de datos, donde las fechas de alta y baja de las relaciones están referidas únicamente a la relación entre un suministro y su totalizador, independientemente de las fechas de instalación y retirada de ambos, aunque obviamente debe existir una coherencia.

En la tabla anterior un mismo Suministro debería aparecer en principio una sola vez ocupando la primera columna, ya que hemos dicho que un punto de suministro no puede tener más de un padre en un instante dado. Sin embargo, si tenemos en cuenta los cambios en el tiempo, son posibles excepciones a la regla anterior, si bien en tal caso los periodos de vigencia de las diferentes relaciones de un mismo Suministro con sus diferentes padres no deben tener ningún solape. Por ejemplo, el suministro S5 podría depender de ST7 durante un periodo, al finalizar el cual pasaría a depender de un nuevo totalizador ST8, que a su vez pasaría a depender de ST7.

De acuerdo con ello, el propio *Suministro Totalizador* puede figurar en otro registro de la misma tabla desempeñando ahora el papel de un *Suministro*, para reflejar en este caso su dependencia de otro *Totalizador*, como sería el caso comentado entre ST7 y ST8.

Un *Suministro* que no figure en la tabla anterior se entiende que no depende de ningún totalizador, y por consiguiente cuelga directamente de la acometida. Por otra parte, un Suministro que no figure como *Totalizador* en dicha tabla se entiende que es un suministro terminal, pues al no ser padre de ningún otro suministro se entiende que no hay nada más aguas abajo. En caso de tener en cuenta los periodos de vigencia de las relaciones *Suministro - Totalizador*, las afirmaciones anteriores sobre si un suministro cuelga de la acometida, de un totalizador o es terminal quedarían restringidas al periodo de vida reflejado en la relación.

Por otra parte, todos los suministros, sean terminales o totalizadores, mantienen una relación directa con la acometida que les alimenta, la cual admitiremos que está declarada en la tabla de relaciones *AcomSum* (Acometidas – Suministros). Dicha relación puede tener a su vez un periodo de vigencia identificado por una fecha de alta y otra de baja, que debe ser coherente con el periodo de vida de la acometida y del suministro, y el periodo de dependencia entre ambos. Obligatoria mente todos los puntos de suministro existentes (sean terminales o totalizadores) deben figurar en dicha tabla.

De acuerdo con esta tabla, es posible que un **suministro dependiente durante un periodo de tiempo de una acometida, pase a depender más adelante de otra acometida**, debiendo existir en este caso una continuidad en el tiempo. Por ejemplo, es posible que una acometida antigua sea reemplazada por otra nueva, o que parte de los suministros dependientes de una acometida, pasen a depender de otra contigua para aligerar la carga de la primera.

El objetivo de este apartado es establecer los criterios y el modo de operación para llevar a cabo las correcciones a introducir sobre los consumos registrados o estimados en los diferentes puntos de suministro, teniendo en cuenta su contraste con los consumos registrados o estimados en los suministros totalizadores, para un periodo de consulta determinado.

Finalmente, una vez obtenidos los consumos corregidos en los suministros dependientes directamente de las acometidas, así como en los puntos de suministro terminales, éstos serán utilizados para determinar los consumos en las acometidas por una doble vía de agregación.

En dicha consulta deberá tenerse en cuenta el carácter registrado o estimado del volumen en cada caso, la dependencia temporal de cada suministro con sus totalizadores si los tiene, y los posibles cambios de acometida de todos o parte de los suministros si los hubiere.

Una vez obtenidos los consumos en las acometidas, éstos son utilizados por GISRed para obtener el volumen autorizado en cada una de las DMAs a que pertenecen, así como para realizar el reparto de las demandas entre los nudos del modelo hidráulico.

11.4.2 Procedimiento para llevar a cabo la corrección del consumo

Si admitimos por ahora que no hay ningún cambio de acometida y que el periodo de vigencia de todos los puntos de suministro, ya sean terminales o totalizadores, incluyen al periodo de consulta, podremos olvidar por ahora las fechas de alta y baja, tanto de los puntos de suministro como de sus relaciones, facilitando así la comprensión del método. Tener en cuenta los periodos de vigencia de estas relaciones, o el cambio de acometida de algunos suministros, tan solo supone introducir algunas modificaciones al procedimiento que aquí se describe. Esto se verá en un apartado posterior.

Admitiremos por otro lado, que los consumos en cada punto de suministro para el periodo de consulta son o bien registrados o bien estimados, y han sido obtenidos por un procedimiento previo, para TODOS los puntos de suministro, ya sean terminales o totalizadores, dando lugar a la siguiente tabla de partida:

$$IdSum \quad TipoCons \quad VolReg_Est$$

donde *TipoCons* indica si es el consumo es registrado (R) o estimado (E), y en *VolReg_Est* figura el volumen computado de un tipo u otro para el periodo de consulta.

El proceso de corrección de los volúmenes computados, conlleva 2 fases:

1. **FASE 1: Análisis de los volúmenes desde los puntos terminales hasta la acometida, siguiendo el sentido aguas arriba**, en el cual se contrastará el volumen acumulado por los suministros que cuelgan de cada totalizador, con el volumen registrado o estimado en éste, tomando las decisiones oportunas.
2. **FASE 2: Reparto del volumen finalmente computado para cada acometida sobre los puntos de suministro que cuelgan de ellas, ya sean totalizadores o terminales, siguiendo el sentido aguas abajo**, tomando igualmente las decisiones que se considere oportunas.

Veamos con más detalle cómo proceder en cada una de estas fases.

11.4.2.1 FASE 1: Determinación del volumen registrado en las acometidas

Puesto que la estructura arbórea de los puntos de suministro no responde a una estructura con varios niveles prefijados, donde en cada nivel un suministro totalizador agrupa a los suministros del nivel siguiente, hasta llegar a los suministros terminales, se debe determinar primeramente el número de 'hijos' que cuelgan de cada suministro totalizador, el cual se utiliza después como valor de referencia en el proceso de agrupación hacia arriba; dicho valor se guardará en un campo adicional *NumHijos* asociado a cada punto de suministro. Asimismo conviene saber más adelante en cuántos de los suministros hijos el volumen ha sido registrado, lo que almacenaremos en el campo *NumHijReg*. Ampliando la tabla anterior con dichos campos, tendremos:

$$IdSum \quad TipoCons \quad VolReg_Est \quad NumHijos \quad NumHijReg$$

A continuación se debe iniciar un proceso acumulativo del volumen registrado o estimado en cada punto de suministro hacia sus padres, si existen, comenzando por los puntos de suministro terminales. Conviene que en este paso se acumulen por separado, los consumos registrados de los estimados. Para ello ampliaremos la tabla anterior con dos campos nuevos *VolAcumReg* y *VolAcumEst*.

IdSum TipoCons VolReg_Est NumHijos NumHijReg VolAcumReg VolAcumEst

Aunque los valores acumulados aguas arriba solo tienen sentido para los suministros totalizadores, para los suministros terminales puede copiarse el valor del *VolReg_Est* en uno u otro campo, según corresponda.

El volumen acumulado en un punto de suministro totalizador no estará completo hasta que se haya obtenido la contribución de todos sus hijos. Como el procedimiento aguas arriba transcurre por etapas, tras cada etapa se debe almacenar el número de hijos computados en ese momento para cada punto de suministro sobre un campo adicional que llamaremos *NumHijosAcum*. Solo cuando los campos *NumHijos* y *NumHijosAcum* coincidan, se podrá tomar una decisión, y continuar transmitiendo el volumen adoptado a los padres que corresponda. Así pues, en cada etapa del proceso acumulativo intervendrán solo aquellos suministros en los que se dé dicha condición.

IdSum TipoCons VolReg_Est NumHijos NumHijReg VolAcumReg VolAcumEst NumHijosAcum

Cuando los campos *VolAcumReg* y *VolAcumEst* están completos, se toma una decisión para determinar el volumen adoptado a fin de continuar el proceso aguas arriba, el cual almacenaremos en un nuevo campo de nombre *VolAdop*.

IdSum TipoCons VolReg_Est NumHijos NumHijReg VolAcumReg VolAcumEst NumHijosAcum VolAdop

El criterio de decisión para determinar el *VolAdop* en cada suministro padre dependerá de que el volumen propio del suministro sea registrado o estimado, del valor de éste y de su comparación con el volumen acumulado de acuerdo con las siguientes situaciones de la tabla:

VOL. PROPIO	VOL. ACUM HIJOS	VOL. ADOPTADO
Registrado	Todos Registrados	El mayor entre <i>VolReg</i> y <i>VolAcumReg</i>
	Alguno o todos Estimados	El mayor entre <i>VolReg</i> y <i>VolAcumReg</i> (no se considera el <i>VolAcumEst</i>)
Estimado	Todos Registrados	Directamente el <i>VolAcumReg</i>
	Alguno o todos Estimados	El mayor entre <i>VolEst</i> y la suma <i>VolAcumReg</i> + <i>VolAcumEst</i>

TABLA 19. FASE 1: DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN REGISTRADO EN LAS ACOMETIDAS.

- La primera condición va a favor de incrementar el consumo. Sería el caso deseable y más habitual. Todos los usuarios disponen de contador, y además se instalan algunos contadores totalizadores a efectos de control. Obviamente en este caso, primará el mayor de ambos, asumiendo que los contadores nunca marcan de más y tienden a subestimar el contaje con el tiempo.
- La segunda condición asume que el volumen estimado por los hijos es incierto, con lo que debe primar el registrado por el totalizador. Sin embargo es posible, que considerando únicamente el volumen registrado por los hijos (descontando el estimado en los suministros hijos sin contador), sumen un volumen mayor, con lo que obviamente primaria éste último.
- La tercera condición es claramente a favor del volumen acumulado por los suministros hijos, todos ellos provistos de contador, siendo que el totalizador no

dispone de él. **No será éste un caso habitual, pues no tiene mucho sentido instalar un totalizador sin contador, pero podría darse dicha circunstancia temporalmente (por ejemplo, avería del contador totalizador).**

- d. La cuarta condición introduce una incertidumbre, tanto en el valor del totalizador (misma situación de antes), como en el total acumulado. En este caso, primaría el mayor entre el estimado en el totalizador y el volumen total (registrado + estimado) procedente de los hijos.

Obsérvese que el criterio anterior es igualmente aplicable en caso de que un punto de suministro no tenga contador, y tampoco se estime su consumo, lo que equivaldría a suponer en él un *VolEst* de 0.

Se observa también que, según los criterios establecidos, **siempre se cumplirá que $VolAdop \geq VolAcumReg$** , lo que después será una condición muy importante a tener en cuenta en la fase de reparto en el sentido aguas abajo.

Una vez adoptado un volumen *VolAdop* para un totalizador determinado, éste será el transmitido en la etapa siguiente aguas arriba, pasando a formar parte del *VolAcum* para el siguiente contador padre, si existe. El carácter de éste como *VolAcumReg* ó *VolAcumEst* vendrá determinado por el proceso de decisión, debiendo considerarse como registrado en los tres primeros supuestos (pues en todos ellos se adopta un volumen registrado), y sólo estimado en el último (como se ve, el propio carácter del totalizador no es determinante). Ello quedará reflejado en un nuevo campo que denominaremos *TipoConsAdop*, el cual inicialmente podría coincidir con *TipoCons* para los suministros terminales. La estructura de la tabla auxiliar por ahora será la siguiente:

*IdSum TipoCons VolReg_Est NumHijos NumHijReg VolAcumReg VolAcumEst NumHijosAcum
VolAdop TipoConsAdop*

Además, para diferenciar aquellos suministros completos que ya han trasladado su volumen al suministro padre, de los que tienen que trasladarse en la etapa actual, conviene añadir el campo lógico *EstaAcum*, cuyo valor 1 ó 0 indica si su volumen ya ha sido trasladado o no. La estructura de la tabla auxiliar será definitivamente:

*IdSum TipoCons VolReg_Est NumHijos NumHijReg VolAcumReg VolAcumEst NumHijosAcum
VolAdop TipoConsAdop ComplAdop*

El proceso terminará cuando no queden más suministros padres incompletos (y no haya suministros padres de los actuales). En tal caso habremos llegado a los puntos de suministro que cuelgan directamente de las acometidas.

Finalmente, el volumen total en la acometida será directamente la suma de los volúmenes adoptados en los puntos de suministro sin padre, ya sean registrados o estimados, y totalizadores o no.

En muchos casos se dará la circunstancia de que todos los puntos de suministro terminales cuelgan directamente de las acometidas, sin la existencia de ningún totalizador, que es lo más habitual, pudiendo ser los volúmenes en ellos o bien registrados o bien estimados. En este caso, el volumen de la acometida será la suma de todos sin más. El algoritmo se ha programado de forma general y funciona bien en cualquiera de los casos.

Llegado a este punto, la aplicación GISRed lleva a cabo una comprobación y hace un balance entre los volúmenes registrados y estimados inicialmente en los suministros terminales, y el volumen finalmente asignado a las acometidas. Este último en cualquier caso, deberá ser mayor o igual que el total registrado, si bien no se puede afirmar que sea mayor o igual que la suma del total registrado más el estimado (pues el estimado puede quedar ignorado ante un suministro padre con registro).

11.4.2.2 FASE 2: Distribución del volumen de las acometidas entre los puntos de suministro terminales

Una vez finalizada la fase en el sentido aguas arriba, en la fase en sentido aguas abajo se trata de **repartir el volumen total asignado a cada acometida entre los diferentes puntos de suministro**, sin desvirtuar demasiado los volúmenes inicialmente registrados o estimados en cada uno.

El **objetivo final** tras el reparto es llegar a **obtener los volúmenes asignados a los suministros terminales**, los cuales **constituirán los denominados volúmenes corregidos**, y serán los utilizados en etapas posteriores del proceso de cálculo de los rendimientos.

Durante el proceso de reparto no se va a generar o reducir volumen en ninguna etapa, garantizando así que la **suma de los volúmenes corregidos en los suministros terminales coincidirá con el volumen total asignado a la acometida tras la fase anterior**.

Para alojar los volúmenes repartidos sobre cada hijo, necesitamos crear un campo adicional, que denominaremos *VolCorr* (Volumen Corregido), quedando definitivamente la tabla de cálculo con la siguiente estructura:

```
IdSum TipoCons VolReg_Est NumHijos NumHijReg VolAcumReg VolAcumEst NumHijosComp  
VolAdop TipoConsAdop ComplAdop VolCorr
```

Puesto que ahora el volumen total a repartir en cada suministro *VolCorr* va a ser conocido tras cada etapa, no habrá que llevar un seguimiento de los hijos computados como en el caso anterior, facilitando así el proceso.

Se partirá de los volúmenes adoptados en los puntos de suministro que no tienen padre (los que cuelgan directamente de la acometida), los cuales deben haber quedado identificados tras la fase anterior. Queda así asegurada la coincidencia entre el volumen total de la acometida y el reparto en esta primera fase, así como el hecho de que los suministros que cuelgan de la acometida y sean terminales conserven su volumen de partida. Para ellos podemos trasladar inicialmente el valor del campo *VolAdop* al campo *VolCorr*.

Supongamos ahora que de un punto de suministro conocemos el volumen *VolCorr* a repartir entre sus hijos, sean terminales o totalizadores. De nuevo el hecho de que el volumen computado para los hijos en la fase anterior tenga el carácter de registrado o estimado va a influir en la decisión a tomar. Se propone seguir los criterios indicados en el cuadro siguiente:

VOL. ADOP HIJOS	CRITERIO REPARTO VOLUMEN
Todos Registrados	Repartir el <i>VolCorr</i> actual entre los hijos de forma proporcional al <i>VolAcumReg</i> de cada uno
Alguno o Todos Estimados	Mantener el <i>VolAdop</i> como <i>VolCorr</i> para los hijos cuyo <i>VolAdop</i> tiene el carácter de registrado. Repartir la diferencia entre el <i>VolCorr</i> actual y la suma de los <i>VolAcumReg</i> de los hijos cuyo <i>VolAdop</i> tiene el carácter de registrado, entre los hijos cuyo <i>VolAdop</i> tiene el carácter de estimado, de forma proporcional al <i>VolAdop</i> de éstos.

TABLA 20. FASE 2: DISTRIBUCIÓN DEL VOLUMEN DE LAS ACOMETIDAS ENTRE LOS PUNTOS DE SUMINISTRO TERMINALES.

En el primer caso, lógicamente habrá que incrementar los volúmenes registrados de los hijos, si el padre tiene que repartir un volumen superior a la suma de ellos. En algunos casos, coincidirá el volumen a repartir con dicha suma, quedándose como estaban.

En el segundo caso, se trata de mantener en la medida de lo posible los volúmenes registrados de los hijos, y asignar la diferencia en exceso a los hijos con los volúmenes estimados, al ser éstos los más inciertos de partida.

Como ya se justificó, el volumen a repartir será siempre superior a los volúmenes registrados por los hijos, de modo que éstos no se verán minorados en ningún caso. Si el volumen a repartir coincide con la suma de los volúmenes registrados de una parte de los hijos, y existen además hijos con volúmenes estimados, éstos pasarán a ser cero.

El proceso continuará hasta que los puntos de suministro que hayan recibido el volumen de reparto, no tengan hijos a su vez, es decir, sean todos terminales.

Como en la fase anterior, GISRed efectúa un balance entre el volumen de las acometidas y el asignado finalmente a los suministros terminales, debiendo ambos coincidir.

Al final del proceso, resulta inmediato llevar a cabo una consulta sobre las tablas de resultados para resaltar aquellos suministros que han visto aumentado o disminuido (solo en el caso de ser estimados) su volumen inicial de partida en mayor o menor medida.

11.4.3 Ejemplo gráfico de aplicación del procedimiento

Veamos un ejemplo en el que aplicaremos gráficamente la metodología descrita para dividir el período de validez de cada suministro (totalizador o terminal), para posteriormente pasar a la corrección del volumen en los puntos de suministro terminales.

Consideremos la siguiente disposición de suministros de una red hipotética. En ella, vamos a analizar únicamente el suministro terminal llamado *STe1*, en el que inicialmente (instante t_a) no disponía de contador, hasta el instante t_e en el que se instala un contador en el mismo, que se da de baja en el instante t_j . Por simplicidad, los suministros terminales *STe2*, *STe3*, *STe4* y *STe5*, no se van a tener en cuenta en el ejemplo gráfico.

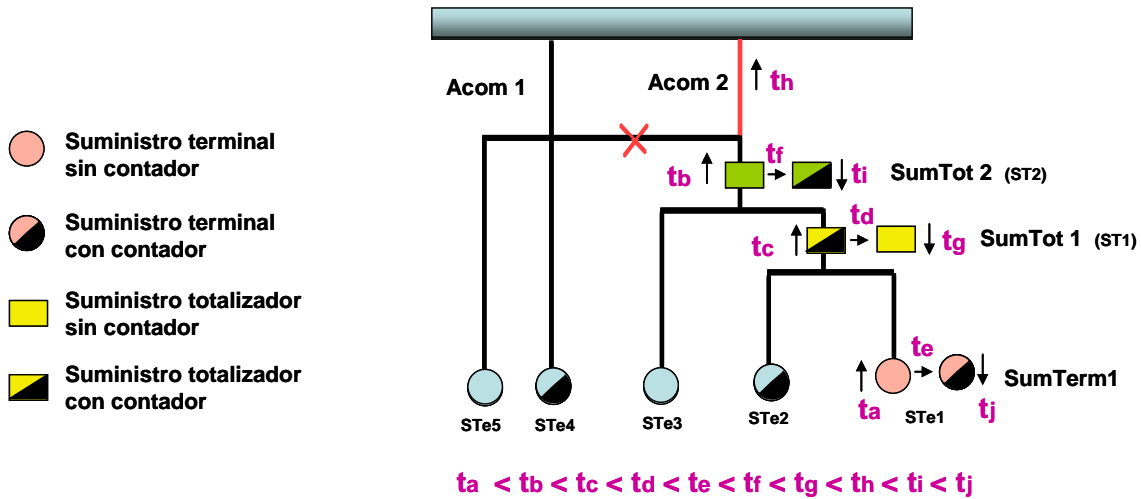


FIGURA 108. EJEMPLO GRÁFICO DE APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO.

Supongamos también que existen 2 suministros totalizadores SumTot1 y SumTot2. SumTot2 se da de alta sin contador en el instante t_b (por ejemplo por una avería del existente, por lo que se ha estimado su volumen), y en el instante t_i se le dota de un nuevo contador hasta que se da de baja en el instante t_i .

Por otra parte, el suministro SumTot1 se da de alta con contador en el instante t_c . En el instante t_d se da de baja dicho contador, por lo que pasa a ser un suministro totalizador sin contador hasta el instante t_g en el que se da de baja definitivamente como suministro totalizador.

Con esta configuración, el suministro terminal depende inicialmente del suministro SumTot2, hasta que en el instante t_c pasa a depender del suministro con contador SumTot1 (que a su vez cuelga del suministro SumTot2).

Además, inicialmente todos los suministros dependen de la acometida 1. Sin embargo, en el instante t_h , los suministros STe1, STe2, STe3 y SumTot2 pasan a depender de la acometida 2, debido a una renovación de las mismas.

Como se puede observar, la casuística que se ha querido reflejar en el ejemplo es compleja y no se va a dar con frecuencia en la realidad. Sin embargo, sirve para ilustrar convenientemente el método de cálculo implementado, que está preparado para soportar un número de niveles de jerarquía ilimitado, siendo posible cualquier conectividad de tipo ramificado entre acometidas y suministros.

La siguiente figura muestra gráficamente en forma de segmentos los periodos de vigencia de las 2 acometidas (Acom1 y Acom2), los 2 suministros totalizadores (SumTot1 y SumTot2) y el suministro terminal (SumTerm1).

F_A indica la fecha de alta
 F_B indica la fecha de baja

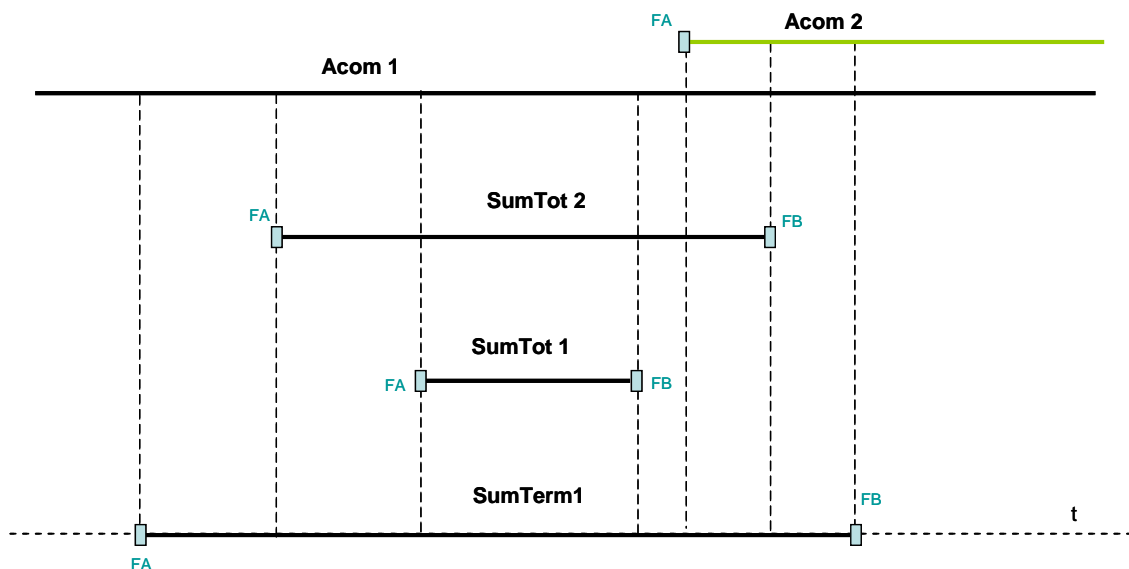


FIGURA 109. PERÍODOS DE VIGENCIA DE ACOMETIDAS, SUMINISTROS TOTALIZADORES Y SUMINISTRO TERMINAL.

Fijando un período de consulta entre el instante T1 y el instante T2, se trata en primer lugar de dividir el periodo de consulta para cada punto de suministro en los intervalos y subintervalos necesarios.

El volumen computado en un punto de suministro cualquiera puede verse subdividido en el tiempo por las siguientes causas:

- Por un cambio en el modo de evaluar la demanda, pasando de ser registrada a estimada o viceversa.
- Por un cambio de contador, a fin de tener en cuenta la diferente estimación de los errores.
- Por un cambio de uso (doméstico, industrial, etc) o de destino (código CNAE) del agua consumida.
- Por el cambio en la relación de dependencia del suministro con su totalizador (si existe), o del carácter registrado o estimado del consumo en éste.
- Por un cambio en la acometida que le suministra el agua.
- Por una alteración en la agrupación de las acometidas por DMAs, por reconfiguración de éstas o por la apertura de una válvula frontera.

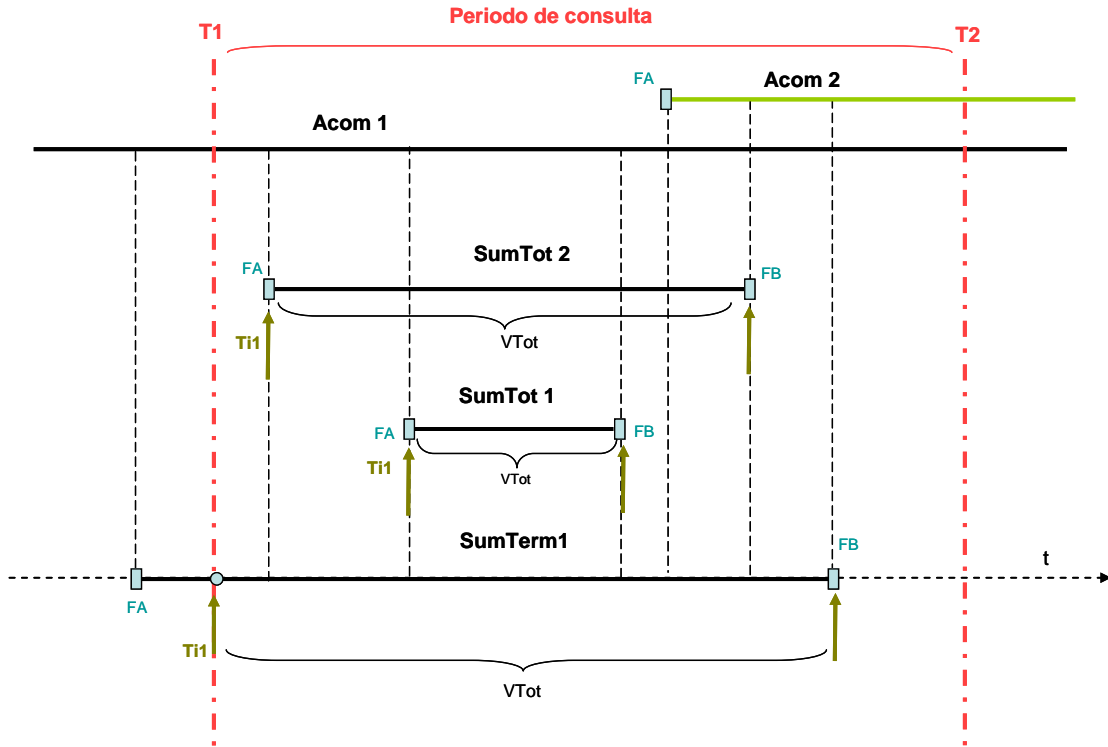


FIGURA 110. DIVISIÓN DE LOS INTERVALOS DE VALIDEZ DE LOS SUMINISTROS POR EL PERÍODO DE CONSULTA.

Si tenemos en cuenta el carácter de la demanda en cada suministro, dividiremos los intervalos de validez según el volumen haya sido registrado (segmentos de color negro) o estimado (segmentos de color rojo).

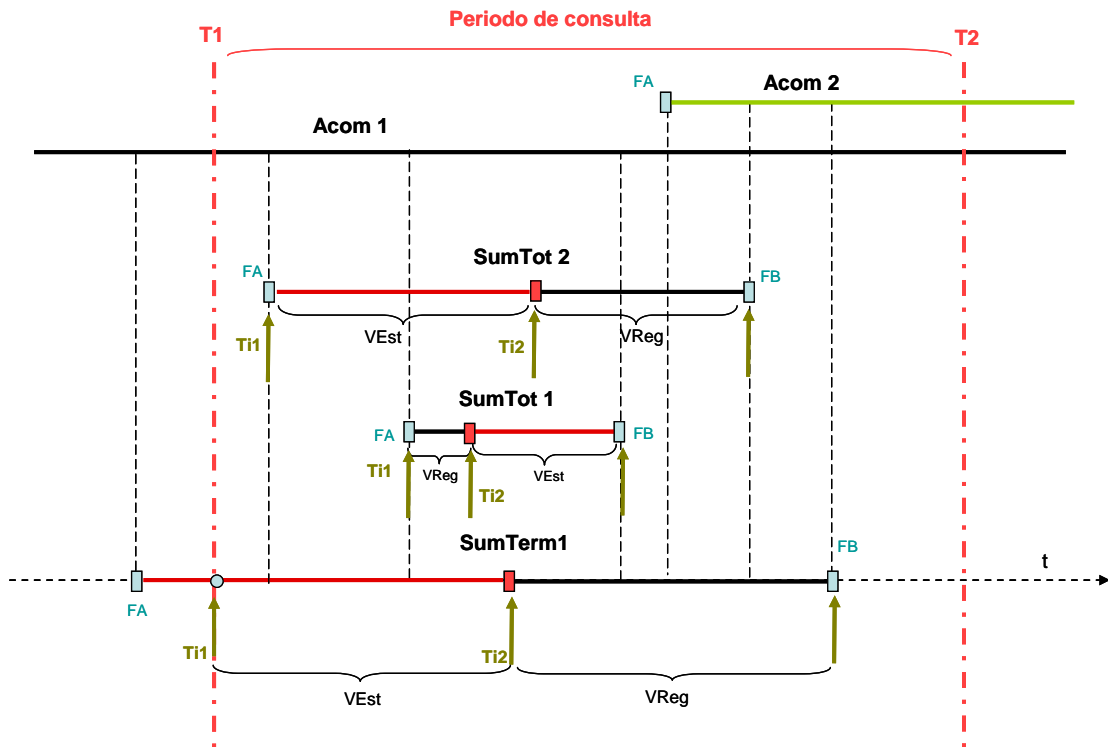


FIGURA 111. DIVISIÓN DE LOS INTERVALOS DE VALIDEZ DE LOS SUMINISTROS SEGÚN EL TIPO DE VOLUMEN DEL MISMO (REGISTRADO/ESTIMADO).

A continuación, se cruzan las fechas de validez de las acometidas con las fechas de validez de los suministros asociados a las mismas, conservando el carácter registrado o estimado de éstos. Con esta operación obtenemos la fracción del volumen registrado/estimado de los suministros asociados a cada una de las acometidas que intervienen.

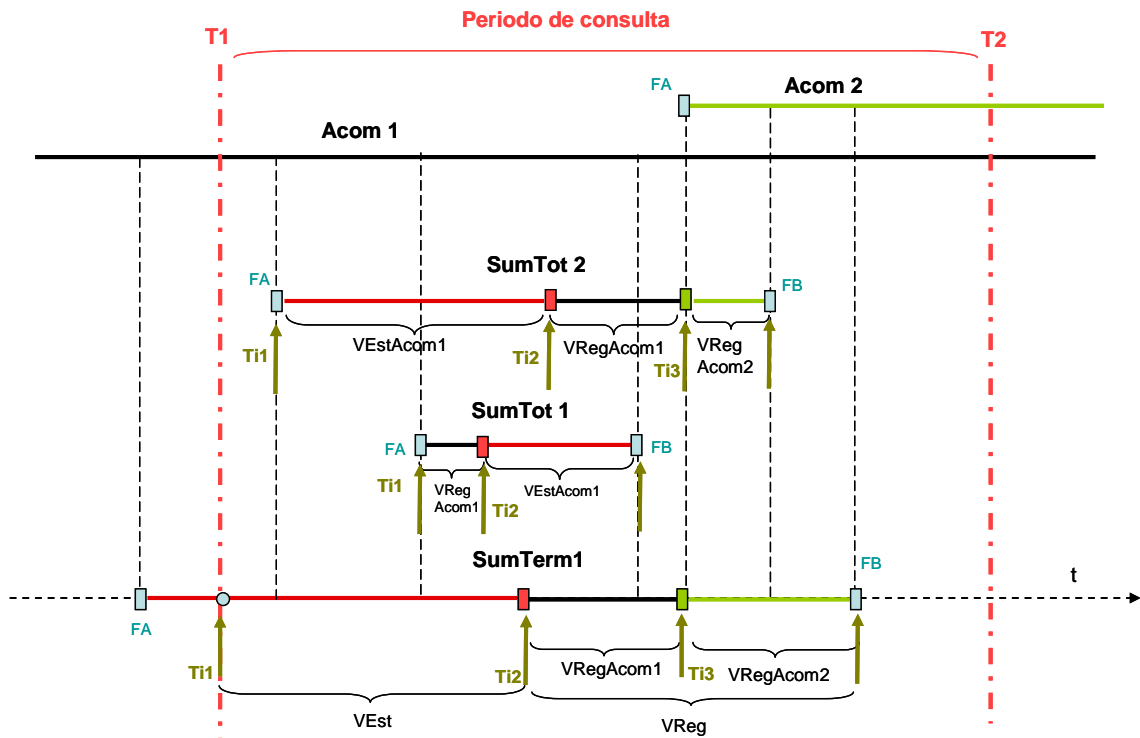


FIGURA 112. INTERSECCIÓN DE LAS FECHAS DE VALIDEZ DE LAS ACOMETIDAS CON LAS FECHAS DE VALIDEZ DE LOS SUMINISTROS ASOCIADOS A LAS MISMAS, CONSERVANDO EL CARÁCTER REGISTRADO O ESTIMADO DE ÉSTOS.

En este último paso, se obtienen todos los subperíodos en los que van a quedar divididos los suministros terminales, tras comparar y cruzar todas las fechas de vigencia de acometidas, totalizadores y suministros terminales.

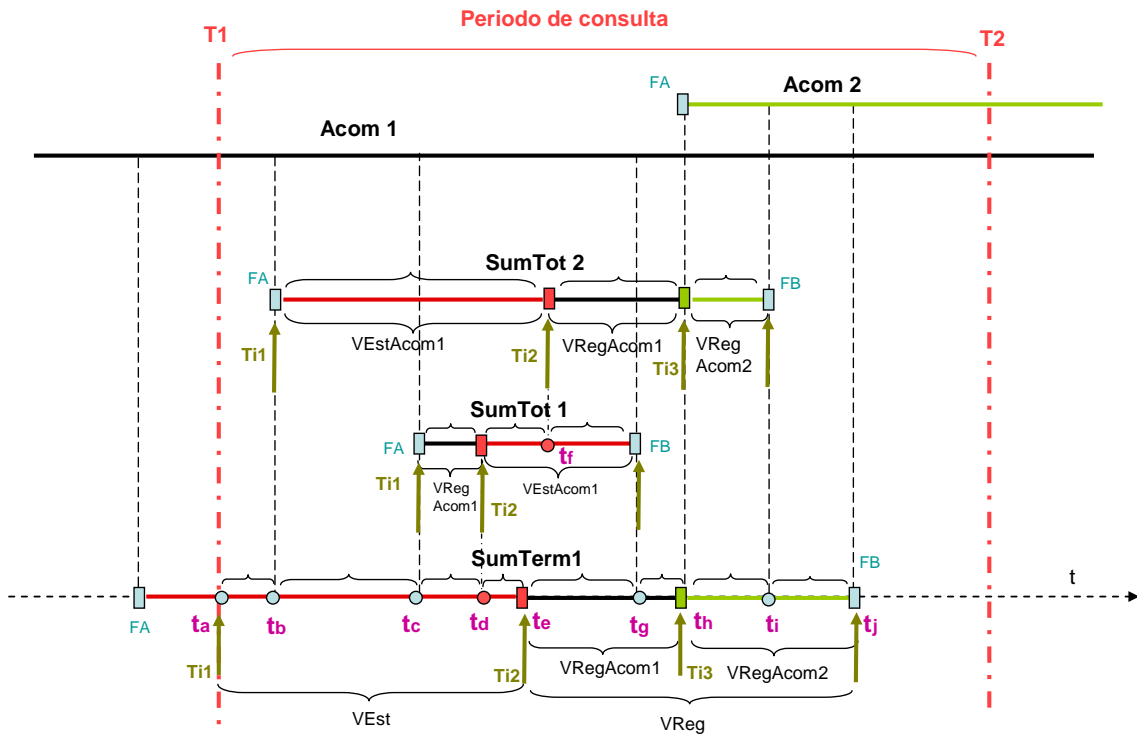


FIGURA 113. SUBPERÍODOS EN LOS QUE VAN A QUEDAR DIVIDIDOS LOS SUMINISTROS TERMINALES, TRAS COMPARAR Y CRUZAR TODAS LAS FECHAS DE VIGENCIA DE ACOMETIDAS, TOTALIZADORES Y SUMINISTROS TERMINALES.

Tras dividir el periodo de consulta en los subintervalos que provocan los periodos de validez de los puntos de suministro y acometidas, se sigue el procedimiento descrito en el apartado anterior, que permite asignar un volumen (corregido o no) a cada uno de los suministros terminales de la red de distribución.

Según se ha visto, el volumen registrado /estimado en cada punto de suministro es contrastado durante la primera fase con el registrado /estimado del suministro 'padre' y posteriormente en la segunda fase, con el de los suministros hijos.

El procedimiento es general por lo que el número de niveles jerárquicos puede ser ilimitado.

11.5 CÁLCULO DEL RENDIMIENTO HÍDRICO

11.5.1 Introducción

Evaluar las pérdidas de agua en el conjunto de un abastecimiento pasa inevitablemente por llevar a cabo un exhaustivo balance hídrico. La evaluación de las pérdidas de agua está basada en el análisis de los consumos autorizados, ya sean medidos o estimados, y debe contemplar todos los elementos de un abastecimiento típico desde la toma de agua bruta hasta el consumo por parte de los abonados.

Como se ha comentado en la introducción del capítulo, el balance hídrico más sencillo queda definido a partir del volumen inyectado y del volumen registrado en los contadores de los abonados, lo cual permite conocer el porcentaje de agua registrada. Si además se cuenta con datos adicionales como los volúmenes controlados utilizados en el riego de jardines o el baldeo de calles, o con una estimación de los volúmenes incontrolados debidos a tomas ilegales o a errores de medición, se puede llegar a definir un balance hídrico más completo y preciso.

Los pasos a seguir para llevar a cabo el balance hídrico de una red de distribución o de un sector hidrométrico de la misma son los siguientes:

1. Determinar el **Volumen Inyectado** al sector hidrométrico, es decir, analizar los caudalímetros de entrada y salida al sector.
2. Determinar el **Volumen Registrado** en el interior del sector hidrométrico, es decir, analizar los contadores vinculados a los puntos de suministro del sistema.
3. Estimar el **Volumen No Registrado** de agua.
4. Estimar el **Volumen Controlado** (riegos, baldeo de calles, etc)
5. Calcular el **Volumen Autorizado** como suma del volumen registrado y el volumen controlado.
6. Calcular el **Volumen No Controlado**.
7. Evaluar las **Pérdidas Aparentes**, es decir, las tomas ilegales y errores de medición.
8. Calcular el **Volumen Consumido** sumando el volumen autorizado, y las pérdidas aparentes
9. Evaluar las **Pérdidas Reales** a partir de los datos anteriores.

Llegados a este punto, habría que contrastar las pérdidas así obtenidas con las derivadas a partir de otras técnicas (análisis de caudales nocturnos, frecuencia-duración-caudal en roturas, modelación del sistema hidráulico, etc.), y revisar los cálculos anteriores hasta obtener resultados coherentes.

A partir del balance hídrico se pueden establecer los rendimientos porcentuales del sistema; como existen factores que condicionan el valor de los rendimientos (longitud de las redes, número de acometidas, consumo unitario), no se recomienda utilizarlos para comparar redes. Se deben utilizar más bien para analizar la evolución con el tiempo de una red en particular.

El rendimiento, por tanto, es el indicador más relevante relacionado con el balance hídrico de un abastecimiento. Los principales rendimientos que se manejan en un sistema de distribución de agua son los siguientes (proyecto *AQUA-CONTROL*, 2007):

► **Rendimiento global del sistema:** *Volumen Registrado / Volumen Capturado*

Se trata del rendimiento más global que cabe evaluar, y da cuenta del uso y control del volumen total capturado, antes de las operaciones de tratamiento, transporte y distribución. El periodo habitual de evaluación suele ser un año.

► **Rendimiento de producción:** *Volumen Producido / Volumen Capturado*

Este rendimiento tiene en cuenta las pérdidas de agua que se producen en todo el proceso de tratamiento. Cuando el origen del agua es subterráneo, puede considerarse prácticamente del 100 %.

► **Rendimiento del transporte y almacenamiento:** *Volumen Suministrado / Volumen Producido*

Tiene en cuenta, como su nombre indica, las pérdidas que se producen en el transporte y almacenamiento. Para una red bien atendida, este rendimiento puede ser también prácticamente del 100 %.

► **Rendimiento de la distribución:** *Volumen Registrado / Volumen Suministrado*

Representa la relación entre el caudal registrado por los contadores de los clientes y el caudal inyectado en el sistema. Expresa la eficacia global de la gestión del sistema de distribución.

► **Rendimiento de la red o rendimiento hídrico:** *Volumen consumido / Volumen Suministrado*

Representa la relación entre el caudal consumido por los usuarios (incluyendo volumen controlado y pérdidas aparentes) y el caudal inyectado en el sistema. Expresa el estado físico de la red y su modo de operación. Este rendimiento contempla el peso de las pérdidas externas (pérdidas reales) a lo largo de la red de distribución y las acometidas. En una red ideal (sin fugas), el rendimiento de la red sería del 100%. Es, en definitiva, una medida de las pérdidas de agua reales.

► **Rendimiento de la gestión técnico administrativa:** *Volumen Registrado / Volumen consumido*

Representa la relación entre el caudal registrado por los contadores de los clientes y el caudal consumido por los usuarios, al que antes nos hemos referido. Expresa hasta qué punto se registra el caudal suministrado a los abonados, midiendo por consiguiente la eficiencia de la gestión técnico-administrativo del abastecimiento.

► **Rendimiento de la medición:** *Volumen Registrado / (Volumen Registrado + Errores medición)*

Representa la relación entre el volumen realmente registrado, y el que debería haberse registrado si se subsanaran los errores de medición. Tiene en cuenta la eficiencia en la gestión y renovación del parque de contadores.

► **Rendimiento de la gestión:** *(Volumen Registrado + Errores medición) / Volumen consumido*

Representa la relación entre el volumen consumido medido y el consumido total, lo que constituye un indicador de la gestión efectiva de los abonados llevada a cabo por el gestor del abastecimiento

La extensión GISRed ofrece soporte a la hora de realizar el balance hídrico de todo el sistema de abastecimiento o en uno o varios sectores hidrométricos y permite el cálculo del rendimiento hídrico a partir de la relación entre el volumen autorizado y el volumen inyectado en el sistema. Para ello se apoya en los algoritmos de cálculo descritos en los dos apartados precedentes.

11.5.2 Procedimiento básico para el cálculo del rendimiento

El cálculo del rendimiento del sistema de distribución de agua a presión, se obtiene a partir del volumen autorizado (volumen medido y estimado) y el volumen inyectado al sistema.

Por tanto, los parámetros básicos que se necesitan para el cálculo del rendimiento son los que se han descrito en los dos apartados anteriores, es decir, el volumen inyectado y el volumen autorizado. Sin embargo, conviene hacer algunas matizaciones.

En el apartado dedicado al cálculo del volumen inyectado, el procedimiento de cálculo descrito se basaba en la obtención, dentro del período de consulta, de todos los subperíodos de tiempo que generaban las incidencias y errores de medida de los caudalímetros, las maniobras de las válvulas frontera, los tiempos de vigencia de dichos elementos y la existencia de depósitos en los sectores. Estos subperíodos eran cruzados con los tiempos de vigencia de los sectores hidrométricos (simples o agrupados), al objeto de discriminar finalmente los subintervalos de tiempo para los cuales las DMAs resultaban válidas o no.

En el apartado dedicado al cálculo del volumen autorizado, el procedimiento se centraba en los puntos de suministro, obteniendo finalmente el volumen autorizado (corregido o no) en cada uno de los suministros terminales del sistema. Una vez calculado dicho volumen, resultaba inmediato agrupar y obtener el volumen total por acometida teniendo en cuenta la vigencia de las mismas, ya que en la base de datos existe una relación directa entre acometidas y puntos de suministro (tabla de relaciones *AcomSum*). Tras obtener el volumen total por acometidas, el siguiente paso era sencillamente efectuar una agrupación por DMAs del volumen asociado a cada acometida para el período de consulta, eso sí, teniendo en cuenta el período de vigencia de las DMAs tanto simples como agrupadas. En esta ocasión la tabla a emplear era la de relaciones entre DMAs y acometidas (*DMAAcom*). De este modo, se obtenía un volumen autorizado para cada sector hidrométrico sin tener en cuenta la información adicional empleada en el apartado del cálculo del volumen inyectado, como los fallos de medición en los caudalímetros o las maniobras en las válvulas.

Cuando se trata de calcular el rendimiento, conviene emplear los mismos subintervalos de tiempo tanto en el cálculo del volumen autorizado como en el cálculo del volumen inyectado en cada uno de los sectores hidrométricos. Esto no tiene tanto sentido cuando las lecturas de los contadores disponibles se realizan cada cierto tiempo (mensual, bimensual o trimestralmente) y además de forma no simultánea, ya que la precisión obtenida en el cálculo del volumen autorizado no será mucho mayor que la obtenida a partir de un prorrateo del volumen para el período de vigencia de la DMA. Sin embargo, no se puede decir lo mismo cuando se dispone de telelectura en los contadores instalados en el abastecimiento y por tanto, de medidas efectuadas con una mayor frecuencia y además de forma simultánea o cuasi simultánea, por ejemplo cada hora.

En este último caso el procedimiento de cálculo más preciso para el volumen inyectado sería el siguiente:

1. CÁLCULO DEL VOLUMEN INYECTADO

- 1.1. Identificar los diferentes subperiodos de agrupación de caudales teniendo en cuenta las **asociaciones entre caudalímetros y sectores hidrométricos**, las **maniobras en las válvulas frontera y los fallos en los caudalímetros**.
- 1.2. Calcular los **volúmenes acumulados por cada caudalímetro** en cada subperíodo.
- 1.3. Calcular los **volúmenes registrados por cada asociación DMA-caudalímetro** en cada subperíodo.
- 1.4. Calcular los **volúmenes suministrados o almacenados en los depósitos** de las DMAs en cada subperíodo.
- 1.5. **Agrupar los volúmenes inyectados a cada DMA**, a partir de los volúmenes registrados por los caudalímetros que la delimitan.

2. CÁLCULO DEL VOLUMEN AUTORIZADO

- 2.1. Los subperiodos en los que van a quedar divididos los suministros terminales tras comparar y cruzar el periodo de consulta con todas las fechas de vigencia de acometidas, totalizadores y suministros terminales, deben intersectarse también con los subperiodos de validez de los sectores hidrométricos. De esta forma, se tienen en cuenta tanto los fallos en los caudalímetros, como las maniobras en las válvulas frontera, que pueden ocasionar la invalidación de una DMA. Los subperiodos de validez de los sectores hidrométricos deben trasladarse a las acometidas y en consecuencia intersectarse con las fechas de validez de los suministros asociados a las mismas. Finalizado este paso, el procedimiento continuaría tal y como quedó descrito en el apartado de cálculo del volumen autorizado.
- 2.2. Análisis de los volúmenes desde los puntos de suministro terminales hasta la acometida, siguiendo el sentido aguas arriba. En esta primera fase, se contrasta el volumen acumulado por los suministros que cuelgan de cada totalizador, con el volumen registrado o estimado en éste.
- 2.3. Reparto del volumen finalmente computado para cada acometida sobre los puntos de suministro que cuelgan de ellas, ya sean totalizadores o terminales, siguiendo el sentido aguas abajo.

3. CÁLCULO DEL RENDIMIENTO

Puesto que tanto el volumen inyectado como el volumen autorizado se han calculado para los mismos subperiodos de validez de los sectores hidrométricos, el rendimiento puede ser calculado en esos mismos subperiodos calculando la relación entre el volumen autorizado y el volumen inyectado. En aquellos intervalos en los que un sector hidrométrico haya quedado invalidado, no tiene sentido hablar de rendimiento.

11.5.3 Ejemplo gráfico de aplicación del procedimiento

Para ilustrar el procedimiento de cálculo del rendimiento, se va a utilizar de nuevo un procedimiento gráfico. El ejemplo que se va a analizar es muy simple y consiste en un sector hidrométrico (DMA) definido por un caudalímetro de entrada Q_1 , un caudalímetro de salida Q_2 y dos válvulas frontera VF_1 y VF_2 . El sector posee un depósito en su interior que suministra o almacena agua según la demanda. La DMA contiene una porción de la red de distribución compuesta por una serie de acometidas de suministro. El esquema del ejemplo se muestra en la siguiente figura:

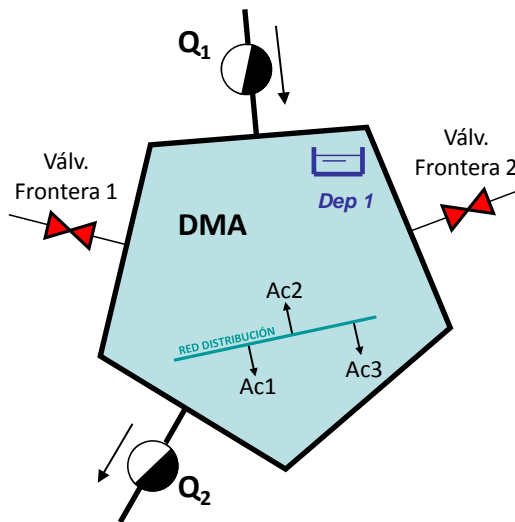


FIGURA 114. SECTOR HIDROMÉTRICO TOMADO COMO EJEMPLO PARA EL CÁLCULO DEL RENDIMIENTO.

Fijado el período de consulta $T_1 - T_2$, se va a suponer que las válvulas frontera se abren en dos subperíodos de tiempo sin que haya superposición entre los mismos y que el caudalímetro Q_1 presenta un fallo de medición durante un periodo de tiempo determinado. El Caudalímetro Q_2 , sin embargo, se instala y entra en servicio en un instante intermedio entre T_1 y T_2 . Todo ello queda representado por segmentos rectilíneos en el siguiente gráfico. Las flechas indican el sentido en el que se van produciendo y trasladando las intersecciones de fechas.

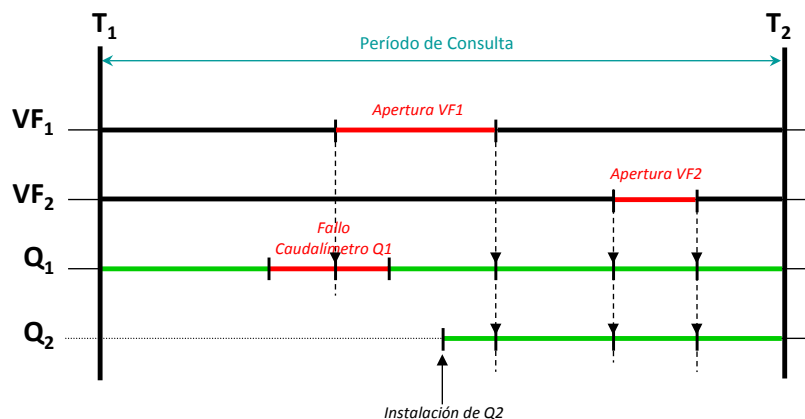


FIGURA 115. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ESTADO DEL SECTOR HIDROMÉTRICO DEL EJEMPLO ENTRE T_1 Y T_2 .

Si intersectamos el período de consulta con todos los períodos de validez de los elementos anteriores, es decir, de los caudalímetros de entrada y salida a la DMA (validez de las relaciones

DMA-Caudalímetro) y de las válvulas frontera, podemos obtener los subperíodos de tiempo para los cuales existe y se considera válida la DMA.

Volviendo al ejemplo, se han denominado subperíodos de validez de la 'DMA provisional' (DMA prov) y aparecen representados en color verde. Los segmentos de color rojo indican los subperíodos en los que las válvulas de seccionamiento permanecen abiertas y los caudalímetros presentan fallos de medida; la intersección de todos ellos da origen a los intervalos en los que la DMA no es válida.

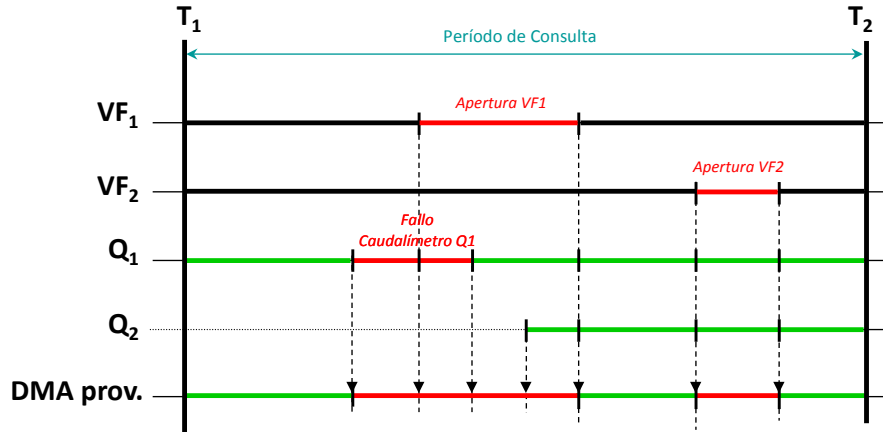


FIGURA 116. SUBPERÍODOS DE VALIDEZ PROVISIONALES DE LA DMA DEL EJEMPLO.

A continuación se deben intersectar los períodos de validez de la DMA en cuestión con el período de validez del depósito que se encuentra en su interior. El objetivo es conocer los subperíodos en los que habrá que tener en cuenta el volumen suministrado o almacenado por el depósito. La siguiente figura muestra este paso.

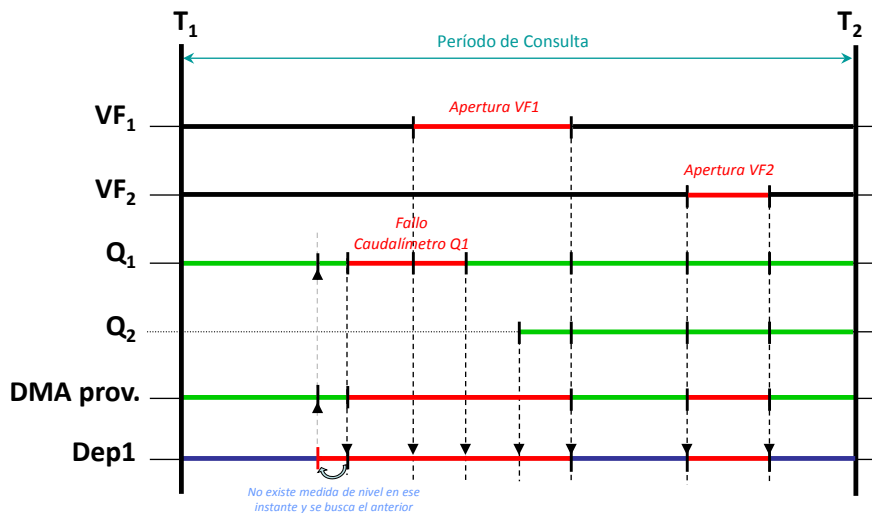


FIGURA 117. SUBPERÍODOS DE TIEMPO EN LOS QUE SE DEBE TENER EN CUENTA EL DEPÓSITO CONTENIDO EN LA DMA.

Nótese cómo en el primer instante en el que no se debe considerar el volumen del depósito debido a que la DMA está invalidada, se ha supuesto que no existe medida de nivel asociada al depósito y por tanto, se debe buscar la medida anterior más próxima al instante señalado. Una vez detectado el instante para el que sí existe medida de nivel, éste debe ser trasladado al resto

de subperíodos deducidos anteriormente (de ahí las flechas en sentido ascendente). Esto afecta a los subperíodos de validez del sector hidrométrico como ocurre en el ejemplo propuesto.

El hecho de que no exista medida de nivel para el depósito en el primer instante en el que la DMA no es válida, obliga a buscar la medida de nivel inmediata anterior y modificar consecuentemente el primer subperíodo de validez de la DMA provisional. El resultado se muestra en la línea inferior del siguiente gráfico, cuyos segmentos corresponden a los subperíodos de validez definitivos de la DMA. Éstos se deducen a partir de los intervalos de tiempo en los que las válvulas frontera han permanecido abiertas, los intervalos en los que ha habido fallos de medida de los caudalímetros y también a partir de las medidas de nivel del depósito en los instantes inicial y final de cada uno de dichos subintervalos.

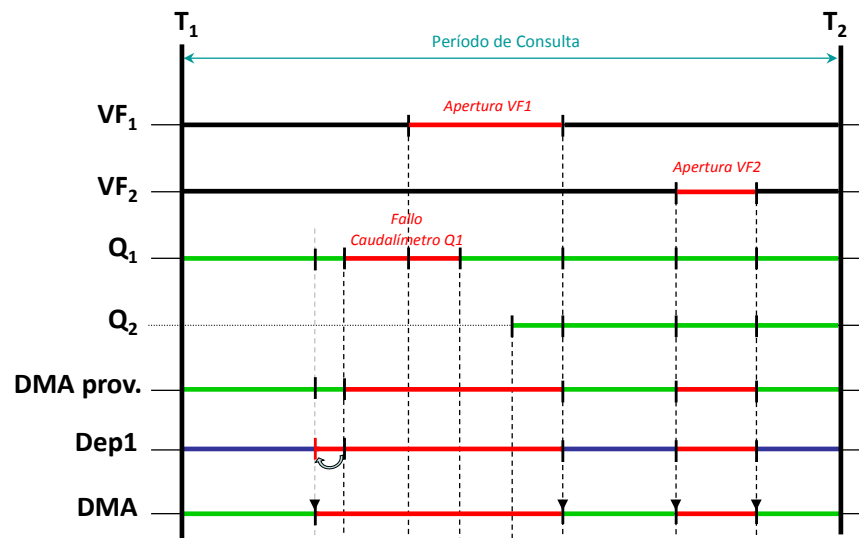


FIGURA 118. SUBPERÍODOS DE VALIDEZ DEFINITIVOS QUE SE DEBEN CONSIDERAR EN EL BALANCE HÍDRICO DE LA DMA DEL EJEMPLO.

En definitiva, el primer objetivo previo al cálculo del balance hídrico, debe ser la identificación de todos los subperíodos contenidos en el período de consulta T_1 - T_2 , en los que la DMA es válida. Estos subperíodos son los que se emplearán para llevar a cabo el balance hídrico, es decir, para determinar el volumen autorizado, el inyectado y el rendimiento asociado a cada uno de los sectores hidrométricos del sistema. En el ejemplo, estos subperíodos corresponden a los segmentos de color verde de la última línea temporal (línea inferior) vinculada a la DMA.

En este punto del proceso, sería posible calcular el volumen inyectado al sistema para cada uno de los subperíodos de validez de la DMA siguiendo el procedimiento descrito en el apartado dedicado al cálculo del volumen inyectado. Posteriormente, el siguiente paso para poder completar el balance hídrico es calcular el volumen autorizado en los mismos sectores hidrométricos y para sus mismos subperíodos de validez. Para ello, se deben trasladar los subperíodos de validez de las DMAs a sus acometidas vinculadas y realizar los cálculos que permitan posteriormente agrupar los volúmenes por acometida en dichos subperíodos.

Gráficamente, el resultado de esta intersección temporal sería el siguiente:

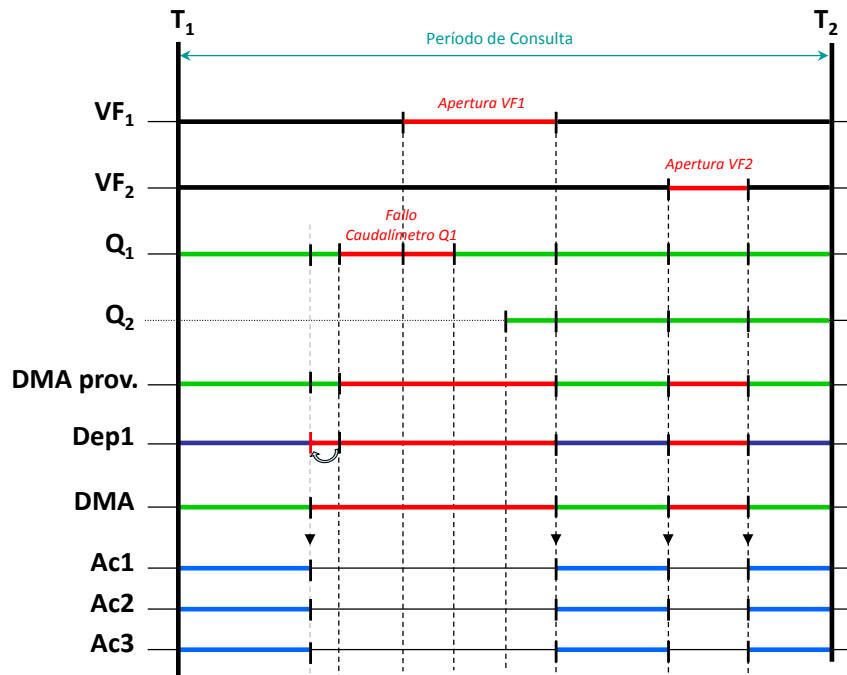


FIGURA 119. INTERSECCIÓN DE LOS SUBPERÍODOS DE VALIDEZ DE LA DMA CON LOS SUBPERÍODOS DE VALIDEZ DE LAS ACOMETIDAS.

En el caso más simple, que es el que se representa en el ejemplo, las acometidas han estado en servicio durante todo el período de consulta, por lo que la intersección con los subperíodos de validez de la DMA resulta inmediata. Los segmentos de color azul indican los subperíodos en los que habrá que calcular el volumen autorizado de cada una de las acometidas. Este volumen se debe calcular a partir de los datos asociados a los puntos de suministro del sistema, es decir, lecturas de contadores y estimaciones de consumo en aquellos puntos de suministro sin contador.

Si por el contrario alguna de las acometidas no ha estado en servicio durante todo el período de consulta, situación más cercana a la realidad, el proceso de cálculo es análogo. Para ilustrar este caso, se va a proseguir con el ejemplo anterior. La situación tras la identificación de los subperíodos de tiempo en los pasos precedentes, es la que se muestra a continuación:

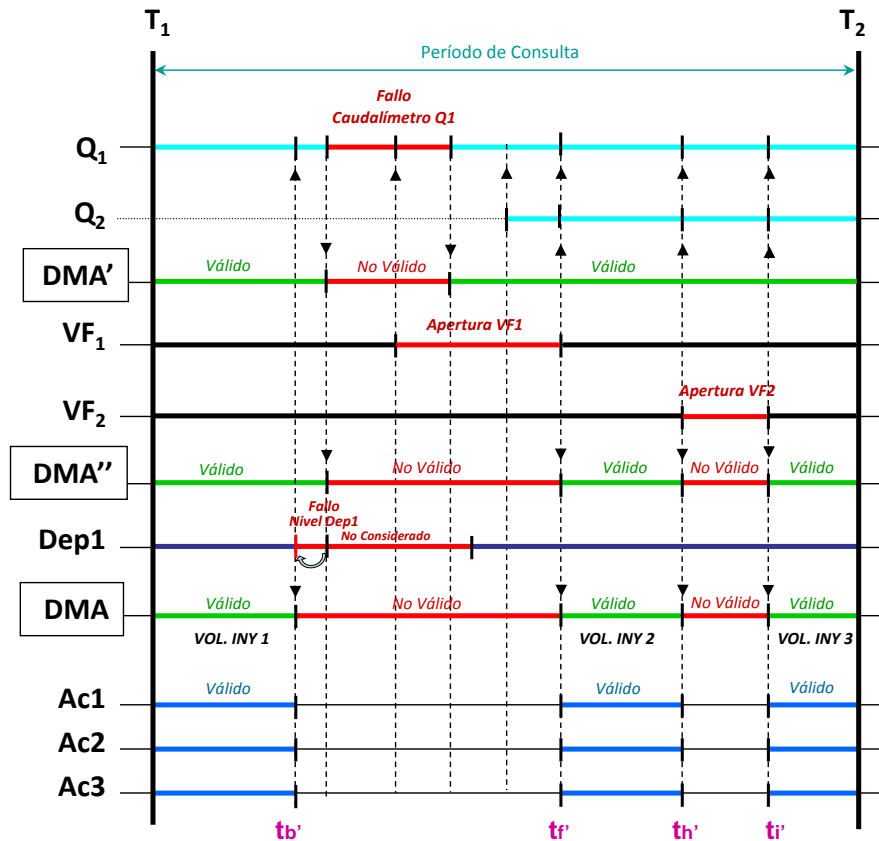


FIGURA 120. IDENTIFICACIÓN DE LOS SUBPERÍODOS DE VALIDEZ EN LA DMA Y TRASLADO A LAS ACOMETIDAS. CÁLCULO DEL VOLUMEN INYECTADO EN LOS PERÍODOS DE VALIDEZ.

donde:

tb' es el instante de tiempo corregido, debido a la no existencia de medida de nivel en el depósito

tf' es el instante de tiempo en el que se produce el cierre de la válvula de seccionamiento VF1

th' es el instante de tiempo en el que se produce la apertura de la válvula de seccionamiento VF2

ti' es el instante de tiempo en el que se produce el cierre de la válvula de seccionamiento VF2

Los colores verde y azul indican subperíodos de validez

El color rojo indica subperíodos no válidos

Para llevar a cabo el cálculo del volumen autorizado, se parte de los mismos subperíodos y el procedimiento se traslada hasta los puntos de suministro del sistema.

Tomando como base el ejemplo propuesto en el apartado destinado a la descripción del cálculo del volumen autorizado, se va a considerar el siguiente esquema simplificado como ejemplo. Para ilustrar gráficamente el procedimiento de obtención del volumen autorizado acumulado en los subperíodos de validez, se va a suponer que todos los suministros tienen contador y que se ha realizado ya la intersección entre los períodos de vigencia de los suministros totalizadores y los terminales. El ejemplo gráfico se centra en los suministros terminales ST1, ST2 y ST3 y considera que se ha realizado ya la corrección del volumen en los mismos (ver el apartado 11.4.2 *Procedimiento para llevar a cabo la corrección del consumo*).

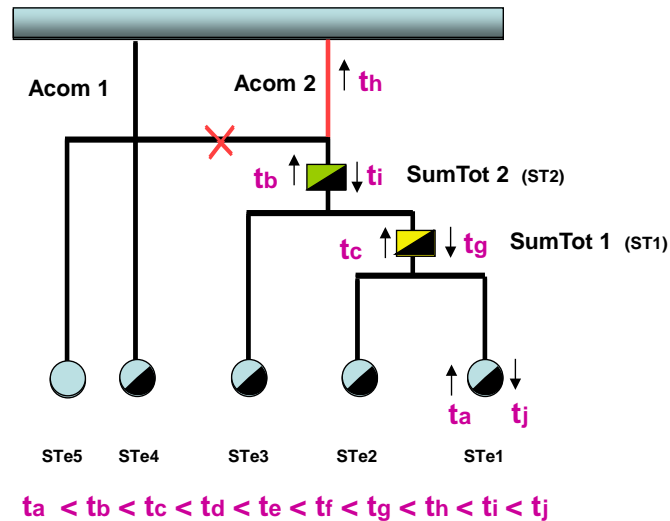


FIGURA 121. ESQUEMA SIMPLIFICADO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN CONSIDERADA EN EL EJEMPLO DE LA DMA.

Así pues, el sistema que se va a analizar consiste en un solo sector hidrométrico formado por una red de distribución que contiene un depósito y dos acometidas. En el instante t_h , la acometida 2 pasa a sustituir a la acometida 1 y por ende, algunos de los suministros asociados a la acometida 1 pasan a depender de la acometida 2 a partir de ese instante, entre ellos ST1, ST2 y ST3. Por tanto, la acometida 2 no está vigente durante todo el período de consulta sino que entra en servicio en un instante de tiempo entre T_1 y T_2 .

Como se ha comentado y a efectos de comprensión del procedimiento, únicamente se van a considerar los puntos de suministro terminal 1, 2 y 3. Además, por simplicidad, se va a suponer que los tres puntos de suministro terminal cuentan con contador, por lo que no es necesario discriminar entre volumen registrado y estimado.

En el ejemplo gráfico, una vez calculados los períodos de validez de la DMA, tal y como se ha descrito en los párrafos precedentes, el siguiente paso es trasladar esos subintervalos de forma jerárquica a los sucesivos elementos que dependen de la DMA, esto es, a las acometidas y los puntos de suministro.

La siguiente figura trata de ilustrar qué subperíodos se considerarían válidos para cada uno de los suministros terminales en el momento de agrupar los volúmenes autorizados por acometida y por sector hidrométrico. Nótese como el número de divisiones del período de vigencia de cada suministro terminal, depende de los subperíodos de validez del sector hidrométrico, de las relaciones entre los suministros terminales y los totalizadores y de las relaciones entre las acometidas y los suministros.

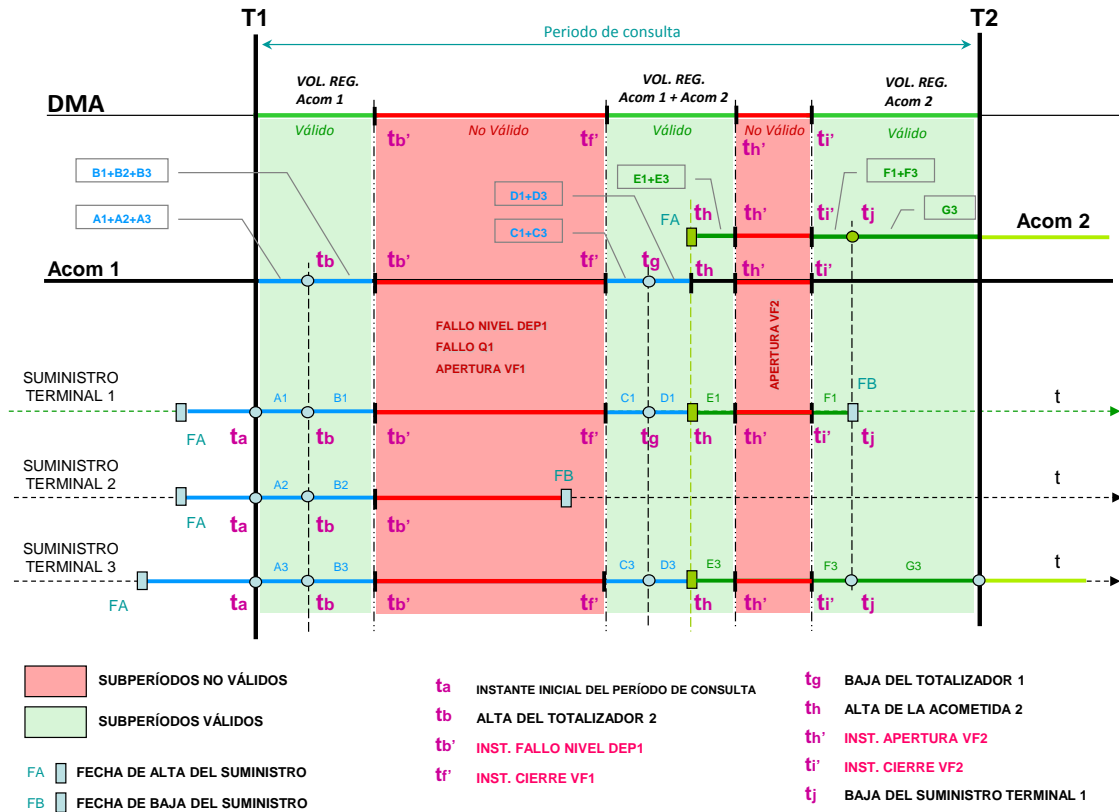


FIGURA 122. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN AUTORIZADO EN LOS PERIODOS DE VALIDEZ DE LA DMA.

Se puede apreciar en el gráfico qué volumen (asociado a cada uno de los subintervalos válidos en que quedan divididos los suministros terminales) habría que sumar para obtener el volumen autorizado en cada uno de los subperíodos de validez del sector hidrométrico.

El cálculo posterior del rendimiento en cada uno de los subintervalos de validez resulta inmediato, sin más que dividir el volumen autorizado y el volumen inyectado acumulados en cada subintervalo.

El valor del rendimiento proporciona una idea de las pérdidas de agua en la red de distribución.

11.6 CONCLUSIONES

Mediante los algoritmos topológicos descritos en la segunda parte de la tesis, GISRed es capaz de identificar automáticamente los sectores hidrométricos básicos a partir de: la topología de la red, la ubicación de los puntos de medida de caudal y el estado de todas las válvulas cerradas del sistema (válvulas automáticas o de seccionamiento).

Una vez definidos e identificados de forma automática los sectores de la red, el siguiente paso ha sido analizar todos los datos reales disponibles para llevar a cabo un balance hídrico en cada uno de ellos.

Algunos de los inconvenientes que surgen a la hora de realizar un balance hídrico fiable en los sectores de la red de distribución, son:

1. la declaración dinámica de los sectores y de los caudalímetros que los delimitan.
2. Los errores de medida de los caudalímetros.
3. La apertura de válvulas frontera entre sectores contiguos.
4. La instalación de nuevos contadores y acometidas en el sistema.
5. El cambio periódico de contador por avería o reposición una vez cumplido el tiempo de vida.
6. La presencia de contadores totalizadores agrupando a otros individuales para el contraste de lecturas.
7. La diferente forma de computar el volumen registrado (por vivienda, por comunidades de vecinos, por zonas residenciales, por origen del agua, etc).
8. La correcta imputación de consumos a acometidas, etc.

Por todo ello, resulta necesario **computar cuidadosamente el volumen inyectado a un sector** en un periodo de tiempo dado. En ese sentido, la aplicación debe tener en cuenta:

- Los **caudalímetros de entrada/salida** que delimitan cada DMA, sea básica o agrupada.
- La fiabilidad de las **medidas** de los caudalímetros y sus posibles fallos.
- La posible **apertura** de alguna **válvula frontera**, descartando los periodos en los que la DMA cambia de configuración debido a la maniobra.
- La consideración o no del **volumen almacenado en los depósitos interiores** a las DMAs, a partir de la medida de su nivel.

Por otra parte se debe determinar el **volumen autorizado (registrado /estimado) en cada uno de los sectores** en los mismos subperiodo de tiempo. Para ello, la aplicación tiene en cuenta:

- La **delimitación de las DMAs básicas o agrupadas y la identificación automática de las acometidas** que pertenecen a cada una.
- Los **volúmenes agrupados por acometidas** para los periodos en que la DMA ha estado en servicio.
- La **traslación del volumen registrado en las DMAs básicas a las DMAs agrupadas**, en función de su estructura jerárquica.

En el momento de computar el rendimiento hídrico de un sector hidrométrico en un periodo de tiempo dado, la aplicación tiene en cuenta tanto el volumen autorizado como el volumen inyectado en todos los subperiodos de **validez de cada DMA** dentro del periodo de consulta.

El hecho de sectorizar la red tiene como objetivo fundamental alcanzar una mayor eficiencia en la gestión del volumen no controlado, y para ello se recurre habitualmente a realizar balances hídricos en periodos cortos de tiempo que permitan analizar y llevar un seguimiento del rendimiento de cada sector.

Por otra parte, la implantación de un programa de control activo de las fugas mediante el seguimiento de los caudales mínimos nocturnos conduce a la necesidad de configurar sectores hidrométricos relativamente pequeños. En una red de cierta envergadura, surge el inconveniente de la apertura continua de válvulas frontera entre sectores contiguos para poder mantener el servicio en las operaciones de mantenimiento y reparación de las propias fugas detectadas. Cuanto menor es el tamaño de los sectores propuestos, mayor es el número de maniobras que se realizan en las válvulas que actúan como frontera entre sectores y por tanto, mayor la incertidumbre que se introduce en los cálculos de los balances hídricos a lo largo de un periodo de tiempo determinado. Esto obliga a fraccionar el periodo de análisis por las continuas maniobras.

Parece pues que las dos técnicas más empleadas hoy en día para la detección de fugas, el control activo de los caudales mínimos nocturnos, y la realización de balances hídricos periódicamente, son incompatibles entre sí. El primero requiere configurar sectores pequeños y analizar variaciones de caudal en periodos muy cortos de tiempo. El segundo requiere en cambio configurar sectores grandes para evitar que las maniobras internas anulen los sectores, y realizar análisis en periodos extensos para reducir las incertidumbres.

La telelectura resolverá en pocos años el problema de la incertidumbre en el cómputo del volumen registrado para periodos cortos de tiempo. Por ese motivo, el objetivo de este capítulo ha sido desarrollar una metodología general que permita realizar balances hídricos fiables en periodos de tiempo relativamente cortos, teniendo en cuenta toda la casuística anteriormente mencionada.

Los algoritmos implementados permiten conjuntar la técnica del seguimiento de los caudales mínimos nocturnos con la realización simultánea de balances hídricos, para una detección más eficaz de las fugas reales.

CAPÍTULO 12

CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

CAPÍTULO 12. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

12.1 CONCLUSIONES

Resulta incuestionable el cambio de paradigma que han suscitado las nuevas tecnologías en términos de almacenamiento y explotación de grandes volúmenes de información en soporte digital. Teniendo en cuenta que un alto porcentaje de la información que se maneja en las empresas que gestionan redes de abastecimiento posee alguna referencia geográfica, no sorprende que los sistemas de información geográfica se hayan convertido en destacadas herramientas de gestión eficiente de la información que manejan dichas empresas. Asimismo, son muchas las aplicaciones de gestión y modelación matemática de redes de abastecimiento que han surgido en los últimos años. La gran mayoría son aplicaciones que pueden trabajar de forma transparente desde el propio sistema de información geográfica, lo que les confiere toda la funcionalidad que ofrecen los SIG en términos de análisis espacial. Sin embargo, no son tantas las aplicaciones surgidas orientadas al diagnóstico de las redes y mucho menos enfocadas al seguimiento exhaustivo del recorrido del agua en el sistema de tuberías, esto es, desde los puntos de producción hasta los abonados, con el objetivo de determinar el volumen de agua que se produce, el volumen de agua que finalmente llega al usuario y qué ocurre con el volumen restante.

En la actualidad, la tecnología SIG ofrece muchas herramientas para el desarrollo y la personalización de aplicaciones. Por este motivo, se ha hecho uso de los entornos de desarrollo informático propios del SIG para crear herramientas personalizadas para el análisis y la gestión de la información geográfica de red, así como para la modelación y simulación hidráulica, dando lugar a la serie de algoritmos y módulos de cálculo implementados en forma de asistentes que se han descrito en la presente tesis doctoral tras varios años de desarrollo. La idea desde el comienzo de los desarrollos fue establecer una nueva línea innovadora de trabajo que produjera herramientas potentes de análisis y diagnóstico que pudiesen asistir de una manera eficaz en la toma de decisiones en la gestión diaria de los recursos e infraestructuras propias de un ente público o privado.

La presente tesis doctoral pone de manifiesto el gran potencial de los SIG vectoriales en materia de construcción y análisis de modelos matemáticos de redes de distribución de agua a presión. Más allá de la mera gestión de datos gráficos georreferenciados conectados a información alfanumérica almacenada en la base de datos del SIG o en una base de datos externa, el desarrollo e integración de herramientas de modelación matemática y simulación, confiere a los SIG una nueva dimensión enfocada al análisis hidráulico de las redes. Asimismo, el desarrollo de módulos específicos orientados no solo a la creación y simulación de modelos de redes de distribución, sino al diagnóstico y apoyo en la toma de decisiones, supone una aportación significativa y abre una infinidad de posibilidades en la gestión eficiente de los sistemas de abastecimiento urbanos.

En este sentido, se ha presentado el software GISRed, desarrollado en el marco de la tesis doctoral, cuya funcionalidad básica permite generar, simular y calibrar modelos de las redes desde el propio entorno SIG, prestando una gran ayuda a la hora de efectuar diagnósticos y elaborar planes directores de las mismas. Además, como se ha descrito a lo largo de los últimos capítulos de la tesis, esta herramienta de modelación proporciona otras prestaciones enfocadas

a asistir al usuario en tareas más específicas propias de la gestión técnica de las redes, tales como la gestión de averías, la gestión de la demanda, el control de fugas mediante la sectorización, el análisis de la modulación diaria, o el consumo mínimo nocturno. Asimismo, incluye módulos específicos para la realización de balances hídricos por sectores, y la obtención de modelos para un periodo de tiempo o una fecha determinada, basados en datos históricos.

Por tanto, otra de las aportaciones destacables de la tesis doctoral hace referencia al diseño e integración en la propia interfaz de la extensión SIG de modelación, de una serie de algoritmos que han permitido aumentar de forma considerable la capacidad analítica de la extensión y por ende, su potencial de asistencia en la toma de decisiones mediante la ayuda del modelo matemático.

En definitiva, las contribuciones tangibles más destacables de la tesis doctoral pueden dividirse en tres claros bloques:

1. INTEGRACIÓN DE UN SIMULADOR HIDRÁULICO Y DE CALIDAD EN UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA MODELIZACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA A PRESIÓN.

En este primer bloque la aportación fundamental ha consistido en personalizar mediante programación el entorno de trabajo del SIG ArcView, desarrollando una interfaz de modelación hidráulica, llamada GISRed, orientada a la construcción y calibración de modelos de redes de distribución de agua a presión, que integra gran parte de las funcionalidades del simulador hidráulico EPANET 2 en el propio entorno SIG, concentrando en una misma herramienta de trabajo tanto la funcionalidad del SIG como la del simulador hidráulico. Así, GISRed se ha empleado extensamente para la producción de planes directores de redes de abastecimiento de agua potable a presión.

Su mayor potencial consiste en aportar procedimientos automáticos o semiautomáticos de trabajo para facilitar la construcción del modelo de una red en un tiempo reducido, y además adaptado al nivel de detalle requerido en cada caso por el usuario.

2. DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE REDES BASADAS EN LA TEORÍA DE GRAFOS PARA ASISTIR EN LA TOMA DE DECISIONES EN LA GESTIÓN DIARIA DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO URBANOS.

En este segundo bloque las herramientas desarrolladas han sido múltiples y todas ellas se consideran de gran utilidad por su capacidad analítica. Las más destacables hacen referencia a la identificación de sectores y la sectorización automática de las redes, la simplificación de los modelos matemáticos, exploración de las redes para la verificación de la conectividad, la estimación de la capacidad de transporte de la red y la detección de cuellos de botella en la misma, o el análisis de cerradas (polígonos de corte) tanto en un punto concreto del sistema de tuberías como en todo el sistema (análisis de criticidad en la red), todo ello mediante potentes algoritmos de cálculo basados en la teoría de grafos. Todas estas herramientas han sido descritas de manera pormenorizada a lo largo de varios capítulos, incluyendo numerosos ejemplos que ilustran todos los métodos de cálculo implementados y los resultados que dichos métodos ofrecen.

3. OBTENCIÓN DE MODELOS HIDRÁULICOS MEJOR AJUSTADOS A LA REALIDAD.

En este último bloque se ha pretendido facilitar la actualización de los modelos, permitiendo al usuario obtener en cualquier momento un modelo de detalle o simplificado de la zona deseada y para el periodo de tiempo requerido, que reproduzca fielmente la realidad.

Esto se consigue mediante la integración de la información procedente de: un SIG corporativo, un sistema SCADA, la base de datos de abonados y la base de datos de las tareas de operación y mantenimiento.

En este sentido, una nueva aportación de la tesis doctoral ha sido la ampliación del modelo de datos de GISRed y el desarrollo de nuevos protocolos de importación y gestión de la información procedente de las diversas bases de datos de la empresa, para alimentar la base de datos geográfica propia, ofreciendo facilidades para la consulta avanzada de dicha información.

Sin embargo, la contribución más destacable de este último bloque de la tesis ha sido el desarrollo de una serie de herramientas enfocadas a facilitar el rendimiento hidráulico de las redes mediante la realización de balances hídricos de mayor precisión en cortos periodos de tiempo, teniendo en cuenta toda la casuística real que puede afectar al cálculo del volumen tanto inyectado como registrado, para todo el conjunto de subsistemas hidráulicos en los que pueda estar dividida una red de abastecimiento tras su sectorización.

Se han diseñado e implementado potentes algoritmos para la captura y tratamiento conjunto de grandes volúmenes de datos, por una parte relativos al caudal inyectado, y por otra relativos al volumen registrado por los contadores, en cuyo caso, los algoritmos han sido optimizados para gestionar datos procedentes de telelectura, ya que en muchos abastecimientos es ya una realidad que alcanza a todo el parque de contadores.

En conclusión, como resultado de la implementación bajo un mismo entorno SIG de trabajo de todas las funcionalidades desarrolladas, es posible gestionar de manera óptima grandes volúmenes de información capturada por los equipos de medida de las redes de agua potable, analizar su evolución, interpretar su patrón de comportamiento y detectar anomalías. En pocas palabras, prestar asistencia en la modelación y diagnóstico de las redes, como base para establecer estrategias para la detección y localización de fugas en un abastecimiento. Además, el hecho de trabajar bajo un mismo entorno, proporciona grandes ventajas como la posibilidad de realizar consultas espaciales para contrastar información. Además, tener acceso directo a la cartografía de red y al mismo tiempo a los datos históricos de campo, permite obtener modelos de la red hidráulica ajustados a la realidad y contruidos con toda la información recopilada. Así por ejemplo, a través de una consulta es posible obtener la cartografía completa de la red en un momento o período determinado o incluso analizar su evolución. Igualmente, se pueden obtener las demandas en las acometidas, y sus valores agrupados por sectores básicos o combinados. Una nueva consulta permite obtener los volúmenes inyectados a cada sector en el mismo período y calcular así los rendimientos hídricos con todo rigor. Todo ello abre un nuevo horizonte de aplicaciones que facilitarán la localización de fugas, la gestión del parque de contadores, la detección de fraudes, el mantenimiento preventivo de la red, la mejora energética en la explotación o el seguimiento de indicadores de gestión entre otros.

12.2 APORTACIONES ORIGINALES DE LA TESIS

La aportación más relevante de la tesis doctoral y la que mayor repercusión ha tenido en los foros internacionales de modelación hidráulica, ha sido el desarrollo del software GISRed, que funciona como una extensión del sistema de información geográfica ArcView, pensado inicialmente para facilitar la construcción y calibración de los modelos matemáticos de redes de distribución de agua a presión. Actualmente existen tres versiones de la aplicación GISRed las cuales presentan diferentes funcionalidades.

La versión básica de GISRed se distribuye de forma totalmente gratuita a través de internet (www.redhisp.upv.es), y está orientada básicamente a facilitar la construcción de modelos hidráulicos y de calidad de las redes de distribución de agua a presión desde un sistema de información geográfica, mediante la integración en el entorno de ArcView del conocido software de simulación hidráulica EPANET. Entre las aportaciones **originales** realizadas con motivo de este desarrollo cabe destacar:

- La construcción y mantenimiento de una **base de datos relacional** para alojar, de forma estructurada, toda la información ligada con la declaración de un escenario hidráulico. Dicha base permite alojar la totalidad de variables contempladas por EPANET y que, en su formato estándar, tienen cabida en un fichero .INP.
- La creación de un nuevo tipo de documento, denominado **escenario**, que además de compartir todas las propiedades de las Vista, posee dos temas básicos de líneas y nudos, en conexión con la estructura de datos, la cual **permite mantener la topología de la red**, esto es, las conexiones entre nudos y líneas, siempre actualizada, tras cada operación de edición.
- El desarrollo de herramientas de **importación de la información cartográfica** desde temas CAD o ficheros shape. Ello conlleva, además del reconocimiento de las tuberías y su trazado, la creación automática de nudos en los extremos y confluencias de las tuberías, y la construcción también automática de la topología de la red.

En resumen, la versión básica de GISRed emula gran parte de la funcionalidad de EPANET 2 en el entorno SIG y proporcionar una serie de herramientas que solucionaran los inconvenientes que presenta EPANET en materia de entrada y manipulación de los datos del modelo de la red, aportando diversas soluciones en la carga y edición de datos, así como en la explotación de los resultados de la simulación desde el propio entorno SIG.

La utilidad y aplicabilidad de la aplicación de modelación, viene avalada por los resultados obtenidos sobre múltiples casos reales, siendo el logro más importante la confección de diversos modelos de la red de suministro de agua a Valencia y su área metropolitana, así como la confección de diversos planes directores de poblaciones de tamaño medio de la geografía nacional e internacional. Algunas de las ciudades en las que se ha empleado con éxito la extensión para la modelación y diagnóstico de su red de abastecimiento, son: *Málaga, Gandia, Sueca, Villena, Guadalajara, Teruel, Aranda de Duero, Managua (Nicaragua) y Tortosa, entre otras.*

Sin embargo, tras la utilización de GISRed en diversos proyectos de modelización de redes en servicio, surgieron nuevas necesidades en relación al diagnóstico y análisis de los modelos, por lo que se decidió investigar y profundizar en las técnicas de exploración que ofrece la teoría de grafos, al objeto de desarrollar algoritmos que fuesen capaces de recorrer y examinar de

manera eficiente el trazado de la red de tuberías y al mismo tiempo, asistir en el diagnóstico de la red y proponer alguna solución ante un problema real o una posible incidencia surgida en la misma. Así pues, el segundo hito importante alcanzado hace referencia al conjunto de algoritmos de análisis, diagnóstico y apoyo a la toma de decisiones en tareas de diseño, planificación y gestión de un sistema de distribución de agua a presión. Estos algoritmos dieron origen a toda una serie de herramientas implementadas en la extensión GISRed basadas en la teoría de grafos, que han sido descritas con detalle en varios capítulos de la tesis y que se enumeran a continuación:

- **Verificación de la conectividad de la red.** Esta herramienta permite comprobar de manera rápida si la red es conexa o si por el contrario posee partes que quedan aisladas o desconectadas.
- **Detección de las subredes y subsistemas hidráulicos en una red.** Esta herramienta permite detectar partes de la red hidráulicamente compatibles que permitirían el suministro con garantías de los puntos de demanda, y partes de la red que quedarían aisladas tras por ejemplo una maniobra de cierre de válvulas.
- **Evaluación de la capacidad de transporte de la red y detección de cuellos de botella.** Permite estimar la capacidad de transporte de cada una de las tuberías de la red en base a los parámetros físicos de la misma y a la demanda base de los nudos del modelo. Supone una primera aproximación a la detección de cuellos de botella en el entramado de tuberías sin necesidad de conocer mediante una simulación del modelo matemático el caudal exacto que atraviesa cada tubería en cada instante.
- **Análisis de polígonos de corte en la red.** Esta herramienta permite identificar rápidamente las válvulas de seccionamiento a cerrar para aislar un determinado tramo de la red en el que se ha producido una incidencia, señalando adicionalmente todas aquellas partes de la red que quedan sin servicio como consecuencia del cierre de dichas válvulas.
- **Análisis de criticidad en la red.** Esta herramienta permite llevar a cabo un análisis de todas las cerradas que pueden darse en la red simulando una avería en todos los tramos de tubería donde existe riesgo potencial de incidencia y clasificando las mismas en función de lo crítica que sea la cerrada en términos de longitud de la red aislada, número de válvulas a cerrar o número de acometidas sin servicio que provoca la cerrada.
- **Identificación automática de sectores hidrométricos en la red.** Esta herramienta permite reconocer automáticamente los sectores hidrométricos existentes en una red, en función de la localización de las válvulas frontera y medidores de caudal instalados en la misma.
- **Sectorización automática de una red en servicio.** Esta herramienta permite establecer una primera configuración de sectores en la red en función del número máximo de acometidas admitidas en cada sector.
- **Simplificación del modelo matemático de una red real.** Esta herramienta ofrece opciones para simplificar el modelo de la red, pudiendo convertir un modelo de detalle en un modelo estratégico hidráulicamente compatible.

De todas las herramientas señaladas, las que sin duda han tenido más trascendencia en el ámbito de la modelación y por las que más técnicos se han interesado, son las que hacen referencia a la sectorización. La primera de ellas permite identificar de manera automática los sectores hidrométricos existentes en una red en servicio, en base a la topología del modelo de red y a los elementos que definen y delimitan cada uno de los sectores, esto es, válvulas de corte cerradas y medidores de caudal. El método implementado para identificar los diferentes sectores dada una distribución de válvulas y medidores, está inspirado en las técnicas clásicas de búsqueda de árboles de expansión de la red.

Dado que la sectorización puede ser cambiante en la medida que se retiren o instalen nuevos caudalímetros en la red, este algoritmo resulta sumamente útil para identificar con rapidez la nueva configuración de sectores. Además de los sectores básicos, se pueden declarar sectores agrupados si se asocian los anteriores. En GISRed tanto los sectores básicos como los agrupados son configurables, de modo que cada uno de ellos tiene un período de existencia asociado.

La segunda herramienta y sin lugar a dudas la más innovadora, se presenta como un instrumento de diseño capaz de proporcionar una primera distribución de sectores hidrométricos a partir del número máximo de acometidas que el usuario fija como criterio de diseño de los sectores. Partiendo de una red no sectorizada, el método ofrece una primera aproximación de configuración de sectores, que luego puede ser refinada manualmente. El método implementado para sectorizar el modelo de red, se basa en la topología del árbol de expansión de mínimo coste.

La aportación más reciente de la tesis doctoral, es una nueva versión de la extensión GISRed que trabaja bajo la nueva arquitectura SIG de ESRI, ArcGIS Desktop, que incorpora un modelo de datos personalizado orientado a objetos, enfocado a albergar la información necesaria para efectuar un seguimiento pormenorizado de los datos recopilados por los distintos caudalímetros instalados en la red de distribución de agua, así como de la información relativa al parque de contadores existente en la misma y sus lecturas periódicas, todo ello con el objetivo de llevar a cabo balances hídricos en los distintos sectores del sistema. El modelo de datos de la extensión fue ampliado con el propósito de gestionar y mantener actualizada tanto la información gráfica de la red como los datos históricos de mediciones, de modo que cualquier actuación sobre los datos almacenados queda auditada. Además, la nueva estructura de base de datos permite llevar un mejor seguimiento de las pérdidas de agua en la red, facilitar la labor de detección y localización de fugas en tiempo diferido e identificar los sectores más críticos de la red en términos de rendimiento volumétrico. Entre las nuevas funcionalidades de la aplicación, destaca el análisis de los consumos en los denominados puntos de suministro, que son entidades especiales que representan un punto de la instalación que conduce el agua desde la acometida hasta un abonado concreto, en el cual se ha previsto controlar el volumen de paso teniendo en consideración toda la casuística existente entre acometidas, puntos de suministro, contadores y lecturas de éstos. Asimismo, la aplicación permite acceder a los datos de campo generados por el SCADA para la realización de los balances hídricos por sectores y cálculo de sus rendimientos. El algoritmo implementado actualmente permite determinar el volumen registrado y estimado en las acometidas y evaluar los consumos diferenciando los distintos usos del agua. Se ha desarrollado para tener en cuenta también toda la casuística asociada al parque de contadores, incluidas posibles discrepancias entre los volúmenes registrados por los contadores totalizadores y los acumulados por los contadores parciales que dependen de él.

Los algoritmos de cálculo de los balances hídricos, tienen en cuenta que los sectores hidrométricos delimitados por válvulas frontera pueden quedar comunicados eventualmente por la apertura temporal de éstas en operaciones de mantenimiento. Por tanto, los balances

hidricos que incluyan el periodo de apertura de alguna válvula frontera son detectados e invalidados para los sectores hidrométricos básicos (y reportados al usuario), pero no así para una agrupación de sectores en los que la apertura de la válvula no influya en el balance hidrico.

La secuencia básica de trabajo que posibilita GISRed previa a la realización de cualquier balance hidrico, consiste en la creación de una base de datos geográfica, la importación de la información gráfica de la red (tuberías, acometidas, válvulas,...), la importación de datos del parque de contadores (puntos de suministro, contadores, lecturas), la conexión con el sistema SCADA y la importación de datos del mismo (medidas de caudal, presión o nivel en bruto o tratadas). Con toda esta información en la base de datos propia de la aplicación, es posible llevar a cabo operaciones complejas enfocadas a la obtención de balances hidricos en cada uno de los sectores hidrométricos del sistema, así como el cálculo automático de las curvas de modulación de la demanda en cada sector.

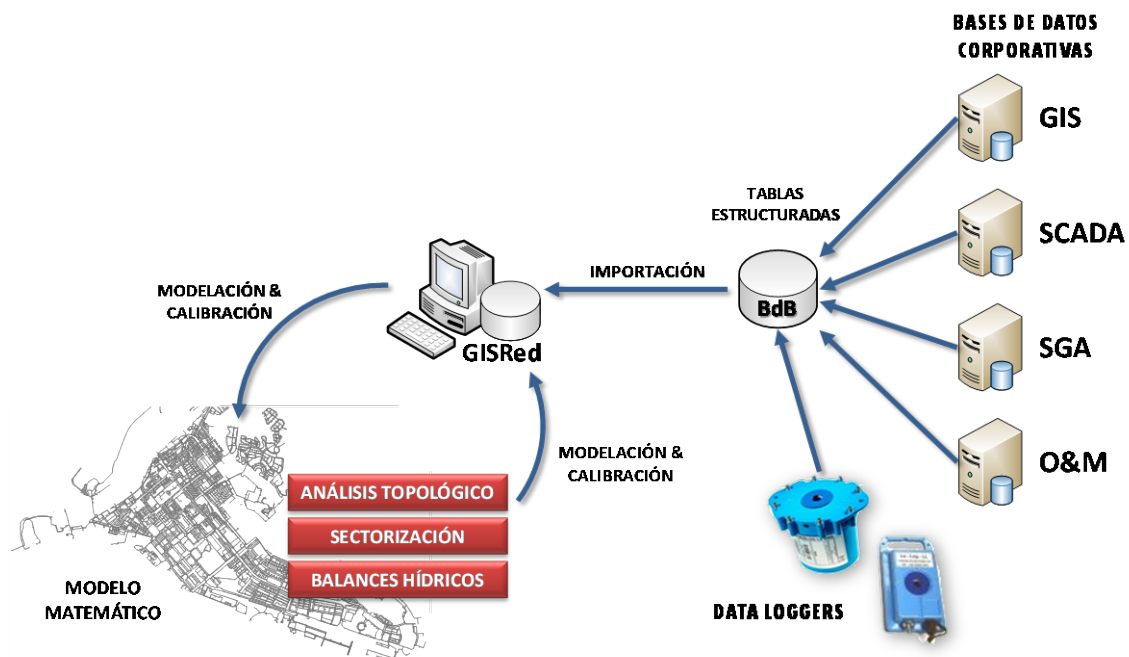


FIGURA 123. SECUENCIA DE TRABAJO EN GISRED.

Por ejemplo, dada una configuración de sectores básicos y agrupados, GISRed permite acumular en todos los sectores identificados, el volumen inyectado y las demandas registradas y estimadas en las diferentes acometidas asociadas a ellos, para un periodo de consulta dado. En dicho proceso se tiene en cuenta tanto el periodo de existencia de los caudalímetros instalados, como los periodos en que alguna válvula frontera pudiera haber estado abierta. La acumulación de la demanda registrada-estimada por sectores a partir de las demandas en las acometidas puede también realizarse mediante la diferenciación de los diferentes usos del agua.

La estructura es totalmente compatible con el programa de simulación hidráulica y de calidad EPANET 2, por lo que una vez calculados los volúmenes registrado e inyectado a cada sector, calculados los rendimientos volumétricos y generadas las curvas de modulación, es posible generar un modelo de red desde el SIG y simularlo en EPANET.

12.3 DESARROLLOS FUTUROS

Siguiendo la estructura de la Tesis, los desarrollos futuros van a estar orientados a mejorar las aportaciones realizadas en los tres grandes frentes abordados: en lo que concierne a la modelización de las redes y su integración en un entorno GIS, mejorando las prestaciones actualmente ofrecidas por la aplicación GISRed u otra similar; en lo que concierne al análisis topológico, desarrollando nuevos algoritmos como instrumento de diagnóstico, planificación y explotación de las redes; finalmente, en lo que concierne a la gestión óptima de los recursos, mejorando las herramientas dirigidas a la detección y localización de fugas en la red, y aportando nuevas soluciones en otros ámbitos dentro de la gestión técnica de las redes. A continuación se enumeran con más detalle las aportaciones más relevantes que se considera podrían desarrollar futuros investigadores en cada uno de estos frentes.

► EN MATERIA DE MODELACIÓN HIDRÁULICA Y SU INTEGRACIÓN EN GIS

La primera actuación a abordar en un futuro próximo es la **migración** de todas las funcionalidades de GISRed al nuevo entorno de trabajo de ArcGIS Desktop 10.x. Las primeras herramientas programadas e implementadas en la extensión GISRed, lo fueron sobre una plataforma actualmente obsoleta, ArcView GIS 3.x, mientras que las más recientes se han programado sobre ArcGIS Desktop 9.x, recientemente desfasada. Resulta pues imperioso traducir el código fuente de todos los algoritmos de cálculo, así como los asistentes y formularios desarrollados, al nuevo lenguaje de programación Visual Net soportado por ArcGIS Desktop 10.x, para aprovechar al máximo la nueva arquitectura desarrollada por la empresa estadounidense ESRI, y no perder así la compatibilidad con las nuevas herramientas recién incorporadas en ArcGIS.

Además de la lógica actualización del código que soporta el software generado, los desarrollos futuros han de orientarse a mejorar las capacidades de análisis de la herramienta de simulación. A continuación se describen algunas de las capacidades que potenciarían considerablemente la versión actual:

- ❖ El modelo actual de EPANET es un modelo conducido por demandas, es decir, éstas son prefijadas en los nudos de demanda y el modelo nos proporciona las presiones en los mismos, tras resolver las ecuaciones de equilibrio. Sin embargo, en la práctica, las demandas se ven afectadas por la propia presión, sobre todo cuando éstas son insuficientes. Un modelo realista debería tener en cuenta esta situación, y predecir la **demanda en función de la presión** disponible en las acometidas. Para ello hay que incorporar al modelo las redes interiores de los abonados hasta el punto de descarga a la atmósfera (las tomas) de una forma simplificada, lo que conlleva trabajar con modelos conducidos por presión. La determinación de los parámetros que caracterizan la dependencia de la demanda con la presión debería hacerse acometida por acometida, lo que exige la concurrencia de un GIS.
- ❖ En muchos abastecimientos son de uso común todavía hoy los **aljibes domiciliarios**, para almacenar el agua en las horas de menor consumo, y evitar los problemas de falta de presión en las de mayor consumo. Otras veces, en las ciudades modernas se recurre al uso de **grupos hidropresores** para alimentar los edificios en altura. La demanda exigida a la red depende del comportamiento de tales elementos, pero su modelación usuario por usuario complicaría el modelo de la red enormemente. Sería interesante, pues, el desarrollo de un modelo simplificado que permita tratar el uso de aljibes o grupos hidropresores a nivel de acometida o de nudo de demanda. Aun así, la identificación y

caracterización de tales elementos de regulación en una población de cierta envergadura, obliga a recurrir al manejo de los fondos urbanos a través de un GIS.

- ❖ Los elementos contemplados por EPANET para modelar el comportamiento de cualquier red hidráulica son solo 6: tuberías, válvulas de regulación, bombas, depósitos, embalses y nudos de demanda. Aunque estrictamente son los mínimos necesarios, a veces resulta complicado **modelar ciertos elementos de regulación** presentes hoy en día en la mayoría de las redes con solo estos 6 elementos. Por citar solo algunos mencionaremos los depósitos de rotura de carga, las válvulas de altitud, las válvulas reductoras dependientes del caudal, los hidrantes con caudal limitado, las estaciones de bombeo con varios grupos regulados por presión, por caudal o ambos, la rotación de turnos, las bombas de velocidad variable reguladas por presión o por caudal, los grupos combinados, las válvulas de descarga por bypass, las bombas sobrepresoras, los grupos hidropresores propiamente dichos, etc. Sería deseable implementar todos estos nuevos elementos en el modelo para facilitar en el futuro la construcción de modelos más ajustados al funcionamiento de las redes modernas.
- ❖ El **manejo de diversos escenarios de simulación** al mismo tiempo es una tarea habitual de los técnicos, cuando están analizando la mejor solución a un problema hidráulico en fase de proyecto: diseño, ampliaciones, rehabilitaciones, cambios en el modo de operación, baja o alta de nuevas fuentes de suministro, situaciones de emergencia, etc. Cada conjunto de valores definido por: los componentes de la red y su conectividad, sus parámetros físicos y leyes de comportamiento, su estado de funcionamiento, las demandas solicitadas, las leyes de regulación, los contaminantes inyectados, e incluso las opciones de cálculo, definen un escenario, y cada cambio introducido corresponderá a un nuevo escenario. El manejo de tanta información requiere desarrollar un gestor de escenarios, que permita saber al técnico el conjunto de datos realmente aplicado en cada caso. De nuevo los SIG proporcionan un marco excepcional para el manejo de varios escenarios y su comparación, aprovechando la estructura de capas y sus diferentes agrupaciones que utilizan los SIG para visualizar la información gráfica.
- ❖ Finalmente haremos una mención a la incorporación de nuevas **herramientas de optimización orientadas a la toma de decisiones**. EPANET es solo un simulador, pero la simulación es la base de todas las herramientas de optimización. Éstas proponen una solución, simulan los resultados, y en función de los objetivos buscados, corrigen automáticamente los datos de partida para proponer una solución mejor si se encuentra. EPANET no ofrece esta capacidad, ni tampoco GISRed en su estado actual, a excepción de la herramienta de calibración desarrollada en la presente Tesis. El algoritmo empleado para la calibración se basó en un algoritmo genético, pero pueden encontrarse técnicas más eficaces. Por otra parte cabe también reformular los objetivos de la calibración, más allá de ajustar las rugosidades de las tuberías exclusivamente. Las técnicas de optimización pueden emplearse igualmente para obtener el mejor diseño de los elementos que formarán parte de la red, desde el punto de vista económico o de la fiabilidad, las leyes de operación que minimizan los costes energéticos o de explotación, la estrategia a seguir para reducir los tiempos de permanencia del agua en la red, etc. Muchos de estos objetivos no son únicos, resultando a veces contrapuestos (por ejemplo: consumo energético, fiabilidad y calidad del agua), lo que nos llevaría a abordar optimizaciones multiobjetivo, de gran actualidad y poco aplicadas aún en la gestión de las redes hidráulicas. Aunque existen

ya muchos trabajos publicados en la bibliografía a este respecto, muy pocos programas comerciales ofrecen aún dichas opciones.

Con todas estas propuestas, se deja abierto un campo para futuros investigadores que busquen, además de mejorar el estado actual de conocimientos, poner también los mismos a disposición de los técnicos y gestores de las redes a través de un software adecuado.

► EN MATERIA DE ANÁLISIS TOPOLÓGICO COMO INSTRUMENTO DE DIAGNÓSTICO Y PLANIFICACIÓN DE LA RED

La sectorización de una red de abastecimiento resulta muy complicada en el caso de grandes redes de tuberías. Una sectorización mal diseñada puede causar problemas de abastecimiento y de calidad. Sin embargo, si se realiza de una manera correcta y tomando las consideraciones oportunas, incluso las redes más grandes y complejas pueden ser divididas con éxito. En este sentido una sectorización realizada a partir de un planteamiento de las necesidades presentes y futuras de la red, de sus características físicas y de unas condiciones de operación adecuadas, puede ser clave para garantizar en el futuro una gestión más eficiente del sistema.

De hecho, la sectorización es una de las soluciones más efectivas para la reducción de fugas en las redes de agua, por la cual están apostando muchos municipios de la geografía nacional. Por este motivo, los siguientes desarrollos deberían ir encaminados a ampliar el número de criterios que ofrece actualmente GISRed a propósito del diseño de los sectores hidrométricos, identificando con criterios más sólidos qué tuberías deben cerrarse (colocación de válvulas frontera) y señalando la localización más apropiada de los caudalímetros de medida.

- ❖ Para realizar el trazado de los árboles de expansión de mínimo coste los nuevos algoritmos podrían basarse en **funciones de coste alternativas** que combinasen los criterios actuales basados en la longitud, diámetro, pérdida de carga unitaria, resistencia hidráulica, velocidad o caudal. En el caso de tomar los caudales circulantes como función de coste, habría que trabajar con grafos dirigidos para tener en cuenta el sentido de éstos.
- ❖ Además a la hora de crear los árboles de mínimo coste de una red real conviene tener en cuenta las **diferentes fuentes de suministro** de la misma, prestando mayor importancia al peso asociado a cada línea en función de la fuente de procedencia del caudal. Ello obligará a extender los algoritmos tratados en la Tesis para trabajar con bosques de árboles de expansión dirigidos de mínimo coste en lugar de un solo árbol, y llevar a cabo los análisis de topología para cada uno de los árboles dirigidos detectados.
- ❖ Entre los **criterios adicionales** de sectorización a desarrollar, además del descrito en la presente Tesis relativo al número máximo de acometidas que puede admitir cada sector, sería conveniente incluir otros nuevos como: el número máximo de abonados por sector, la demanda máxima, la longitud de la red, los estratos de presión o bien criterios combinados. También el diámetro de las conducciones donde instalar los caudalímetros puede ser un criterio a tener en cuenta en la toma de decisiones. En ocasiones se descarta instalar caudalímetros de sectorización en la red arterial, previa identificación de la misma.
- ❖ Otros criterios adicionales a considerar, de gran importancia en la práctica, son el **coste de las infraestructuras** necesarias para llevar a cabo la sectorización propuesta en cada

caso, así como los criterios de **fiabilidad en el suministro**, o su repercusión posterior en las **tareas de mantenimiento**. Así, conforme a estos criterios puede convenir el concentrar geográficamente los puntos de medida y las válvulas frontera, a fin de reducir el número de estaciones remotas, y en consecuencia los costes de comunicación y de mantenimiento del sistema de captura de datos. Otras veces convendrá agrupar conexiones mediante tuberías de servicio para reducir el número de entradas a un sector, o bien realizar enganches a ciertos ramales para evitar sectores demasiado pequeños.

- ❖ Los criterios de sectorización pueden también verse afectados por el **objetivo buscado con la propia sectorización**. Por ejemplo, para efectuar balances de agua en periodos largos de tiempo conviene declarar grandes sectores e instalar caudalímetros sobre la red sectorial, permitiendo varios puntos de entrada y salida. Sin embargo, para realizar el seguimiento de los caudales mínimos nocturnos hay que concebir sectores pequeños y a ser posible con un solo punto de entrada y ninguno de salida. Otro criterio a tener en cuenta en la sectorización puede ser el control de la calidad del agua y su tiempo de permanencia en la red; los sectores pueden concebirse en tal caso con el fin de facilitar la purga y limpieza periódica de la red. Existen también sectorizaciones destinadas exclusivamente a controlar las presiones en la red, sobre todo en las zonas más bajas, o bien a suministrar el agua por turnos en redes con muy bajo rendimiento hídrico. La configuración de los sectores más adecuados en los casos mencionados u otros que pudieran plantearse, requerirá el desarrollo de nuevos algoritmos no contemplados en esta Tesis.
- ❖ Aparte de la sectorización, la **aplicación de las herramientas topológicas con otros fines**, como el análisis de la fiabilidad de las redes; la toma de decisiones en casos de emergencia; el seguimiento de la evolución de la calidad del agua teniendo en cuenta su recorrido por la red; la determinación de la localización óptima de los puntos de medida de presión y caudal, o de los sensores para controlar la calidad del agua; la propia calibración de las redes analizando los trayectos del agua entre puntos de medida; la localización de la intrusión de un contaminante; la reducción de los costes energéticos de explotación, y un largo etcétera, se encuentra aún en una fase incipiente, lo que abre un amplio campo a la investigación para aquellos que quieran seguir en esta vía iniciada con la presente Tesis.

► EN MATERIA DE GESTIÓN ÓPTIMA DE LOS RECURSOS Y DETECCIÓN DE FUGAS

Los desarrollos futuros en materia de gestión óptima de la red, pueden orientarse en una primera etapa, al análisis de los distintos factores que justifiquen el consumo no controlado, como errores de contador, suministros sin lectura, tomas ilegales, fugas detectadas en las campañas de localización, fugas latentes atribuibles al caudal mínimo nocturno y su distribución en la red, etc.

Aunque GISRed dispone actualmente de herramientas para efectuar balances hídricos teniendo en cuenta el estado de las válvulas de la red y diferenciando los balances de volúmenes entre sectores básicos y sectores agrupados, no está concebido para llevar a cabo un seguimiento de todos aquellos factores que afectan a las fugas y al rendimiento hídrico del sistema. Por ello, otra de las líneas de investigación y desarrollo futuro sería dotar a la aplicación actual de nuevas funcionalidades orientadas a descomponer las diferentes componentes del consumo no controlado, como son:

- ❖ Desarrollo de bases de datos complementarias en el entorno GIS destinadas a analizar los consumos mínimos nocturnos y los consumos punta observados a lo largo del tiempo en los distintos sectores hidrométricos, a fin de:
 - **relacionar los consumos mínimos** en cada sector con el tipo de abonados, contadores y acometidas propios del sector, así como otros datos característicos del mismo (longitud de red, materiales, densidad de válvulas/acometidas, etc).
 - Observar la **evolución de los consumos mínimos**, y sus variaciones diarias y estacionales, así como su tendencia, y extraer consecuencias de dicho análisis.
 - Observar la **evolución de los coeficientes punta de demanda en cada sector** y relacionarlos con otros parámetros, como movimientos poblacionales, actividades predominantes, tipos de suministro (directo o con aljibe), etc.
- ❖ Ampliar la casuística contemplada en la base de datos actual para la **determinación de los volúmenes de agua registrados**. Actualmente se contemplan tablas para almacenar las lecturas a nivel de contador y las fechas reales de lectura en todos los casos. Sin embargo cabría ampliar dichas tablas para contemplar:
 - la influencia que las **rutas de lectura** tienen en la determinación de los consumos registrados.
 - El efecto, a la hora de **validar los datos registrados**, de los consumos estimados (*no leídos*), los consumos mínimos aplicados, las ausencias, las tarifas por bloques, el tipo de contador, la forma de lectura, etc.
- ❖ Desarrollo de bases de datos complementarias y formularios asociados en el entorno SIG destinados a evaluar el **consumo no registrado**, tales como:
 - ubicar, identificar y clasificar los *contadores domiciliarios y/o comunitarios* existentes en la red, por tipo, precisión, antigüedad, etc, a fin de estimar en la medida de lo posible los errores de contaje que puedan afectar al rendimiento hídrico del sistema, tanto a nivel global como de sectores hidrométricos.
 - Relacionar los *consumos registrados* por los contadores domiciliarios y/o comunitarios con los *datos demográficos* disponibles de las parcelas catastrales, a fin de detectar y diagnosticar consumos excesivamente altos o bajos en relación con la población o industria abastecida.
 - Relacionar los *consumos registrados* por los contadores domiciliarios y/o comunitarios con las *acometidas* cartografiadas de la red, a fin de detectar consumos ilegales o suministros sin contaje, lo que puede significar una parte importante del consumo no contabilizado.
 - Estimar los *consumos municipales no registrados* destinados al riego de jardines y otros usos públicos (limpieza de calles, incendios, purgas, etc.) a fin de evaluar los consumos habidos con tal motivo durante el periodo de análisis.
- ❖ Desarrollo de una base de datos complementaria en el entorno GIS, y gestión de la misma, destinada a efectuar un **seguimiento de los resultados obtenidos en las campañas de localización de fugas realizadas**, identificando las características de las fugas localizadas, su ubicación, tiempo de fuga estimado, estimación de volumen descargado al exterior, etc. El objetivo de crear y mantener esta base es doble: por un

lado evaluar los consumos fugados a lo largo del periodo de consulta; por otro mantener series de datos históricos sobre el tipo de tubería, material, edad, punto de localización de la fuga (junta, grieta, conexión acometida, etc), con el fin de realizar estadísticas que ayuden a incrementar el número de aciertos en las campañas de búsqueda.

- ❖ Como consecuencia de la mayor información adquirida conforme a los puntos anteriores, identificar las **fugas latentes** de una red, y analizar su dependencia con la presión y otros factores (estado de tuberías, materiales, métodos de unión, diámetros, longitudes, etc) a fin de distribuir dichas fugas y facilitar su localización, o bien obtener el índice estructural de fugas por sectores, y en función del mismo planificar las inversiones en las renovaciones de la red.
- ❖ Otra línea de desarrollo futuro, la cual va a ganar un interés creciente en los próximos años, es la captura y utilización de los datos procedentes de la **telelectura de los contadores electrónicos**, los cuales se están implantando con gran celeridad en las ciudades más importantes de nuestra geografía. Dichos contadores permiten realizar una lectura diaria de los consumos, y a su vez clasificar éstos por bloques de demanda, esto es, clasificarlos por el valor medio del caudal, o bien por franjas horarias.

Además de contribuir de forma importante al análisis de los caudales mínimos nocturnos, a la estimación de los errores de contaje, a la detección de fugas permanentes en las instalaciones interiores de los abonados, a la notificación inmediata de posibles averías en el contador, y de otros beneficios como facilitar y abaratar los costes de lectura, la posibilidad de evaluar los consumos registrados diariamente ofrece también la opción de efectuar **balances hídricos por sectores diariamente**, incluso por franjas horarias, ya que los caudales entrantes y salientes de los sectores pueden medirse con frecuencias de hasta 5 minutos.

El gran reto del futuro será tratar con tan ingente cantidad de datos, lo que además de requerir una alta capacidad de almacenamiento y transmisión de datos, exigirá el desarrollo de nuevos algoritmos que analicen dicha información y la presenten condensada a través de una serie de indicadores orientados a la toma de decisiones.

Aunque los epígrafes anteriores se refieren a posibles desarrollos orientados a mejorar la gestión de los recursos hídricos y a la localización de fugas, la gestión óptima de las redes de abastecimiento conlleva prestar atención también a otros muchos recursos, como los energéticos, las sustancias contaminantes, los activos (componentes físicos), los recursos humanos, económicos, etc. Planteamientos similares a los desarrollados en esta Tesis para la gestión de los recursos hídricos, pueden también aplicarse para mejorar la gestión de cualquier otro tipo de recurso, como alguno de los indicados. Así, en particular, otras líneas de desarrollo futuro, en las que el modelo de la red y las bases de datos geográficas se utilicen conjuntamente para la toma de decisiones, podrían ser:

- ❖ La **gestión energética del sistema** y la optimización del consumo eléctrico en las fuentes de suministro. La minimización del consumo de energía en las estaciones de bombeo es un problema clásico. Sin embargo, la gestión energética puede ir más allá, pues además del propio consumo en los bombeos, existen otros parámetros adicionales a tener en cuenta, como es la gestión de agua impulsada a los depósitos en función de su cota y grado de llenado, la regulación de las válvulas de control de la presión, el

establecimiento de presiones de consigna, las pérdidas en las conducciones por rozamiento, las pérdidas de energía asociadas con las fugas, etc. Mediante una adecuada base de datos, y con la ayuda de un modelo hidráulico, es posible realizar un seguimiento continuo y detallado del destino de toda la energía comunicada al sistema, presentarla en un GIS, obtener indicadores de la gestión energética, y en base a ello adoptar estrategias que mejoren la eficiencia global de todo el sistema de suministro, y no solo de las propias estaciones de bombeo. La sectorización de la red puede ser un factor clave en la reducción de la energía consumida (al no tener que presurizar toda la red para abastecer una zona elevada), y también la reducción de fugas como es obvio.

- ❖ La **gestión de los contaminantes transportados por la red** y su repercusión en la calidad del agua suministrada a los abonados, puede igualmente abordarse siguiendo una estrategia similar. El modelo hidráulico es requerido en este caso para analizar el transporte de los contaminantes, entendiéndose por tal, tanto los contaminantes reales en origen como sales disueltas, partículas en suspensión, patógenos... como los productos añadidos en la fase de tratamiento como desinfectantes o los subproductos originados por la reacción de éstos con el medio y las paredes de las tuberías. Finalmente la calidad del agua que le llega al usuario depende no solo de la calidad del agua en el punto de inyección (manantiales, pozos o salidas de las ETAP), sino también de la estrategia de explotación, del aporte de cada fuente, del tiempo y volumen de agua almacenado en los depósitos, y del recorrido del agua por la red, el cual puede verse afectado por la sectorización. También las fugas pueden suponer un foco puntual de intrusión de contaminantes. Para gestionar toda esta información es necesario construir una base de datos adecuada, manejar un número de datos relevantes, incluyendo los resultados de los análisis periódicos a que están obligadas las compañías gestoras, concebir una serie de indicadores y finalmente utilizarlos para gestionar los recursos hídricos disponibles, establecer las concentraciones límite en los puntos de inyección, planificar estaciones de tratamiento intermedias, etc. De nuevo un SIG puede ser la plataforma más adecuada para observar y manejar toda esta información.
- ❖ La gestión de los **activos que configuran las infraestructuras** de producción y distribución del agua a través de la red. Muchas de las redes de suministro en nuestro país han cumplido ya los 100 años, más allá del periodo de vida de los componentes más longevos, como puede ser las tuberías de transporte. Siendo una infraestructura de primera necesidad, los elementos de la red deben ser renovados periódicamente. Los criterios de renovación pueden depender de los materiales empleados, de la calidad de fabricación, de la técnica de montaje, del mantenimiento practicado, y también en gran medida del uso a que han estado sometidos. En este punto entra en juego el modelo matemático, que nos informará sobre las presiones medias y sus fluctuaciones, velocidades excesivas o lentas, tiempo de uso, etc. Los datos recogidos sobre fugas en una fase anterior pueden también ser tenidos en cuenta en la toma de decisiones. La gestión de todos estos datos conlleva almacenar tanto información numérica como geográfica, siendo el SIG una herramienta indispensable para su tratamiento. Así, en la misma geodatabase es posible almacenar adicionalmente datos sobre fechas de instalación, costes de fabricación, costes de instalación, reparaciones, depreciación, costes financieros, tiempos de operación, etc para completar toda la información de partida. Finalmente, el modelo puede ser una herramienta fundamental para decidir las características más adecuadas de los elementos a renovar, y las estrategias de actuación a corto y medio plazo.

- ❖ La gestión de los **costes asociados con la gestión técnica del abastecimiento**. Existen numerosos aspectos en la gestión de los abastecimientos que pueden estar determinados por el coste de las actuaciones. Para la evaluación de dichos costes puede ser necesario recurrir conjuntamente tanto a las bases de datos geográficas como al uso de modelos matemáticos. Para empezar podemos citar el **coste de la reducción de fugas en la red**. Estas suponen una pérdida de recursos, tanto hídricos como energéticos que deben valorarse, así como un perjuicio para los usuarios cuyo coste puede valorarse según la población afectada (GIS) y los términos del contrato. Su localización y reparación exige por otra parte invertir en la realización de campañas de auscultación, en el despliegue de prelocalizadores y la captura e interpretación de datos, en la propia reparación de la fuga, etc. Consecuencia de ello existen unas fugas mínimas cuya localización y reparación no compensa. Todas estas tareas se facilitan con la ayuda de un GIS y con las herramientas topológicas apropiadas para determinar las rutas de auscultación o la ubicación de los prelocalizadores.

Otro aspecto relacionado con los costes de explotación es **la política de implantación y renovación de contadores**. Los contadores registran el agua a facturar, y de ello dependen los ingresos de la compañía. Los contadores pueden tener mayor o menor precisión de fábrica, según su coste. Por otra parte, con el tiempo todos se deterioran, perdiendo capacidad de registro, sobre todo para los caudales menores. Además, un calibre excesivo del contador puede conllevar un mayor coste, al tiempo que deja de registrar una mayor fracción del consumo al aumentar el caudal umbral; en cambio un calibre insuficiente puede cometer errores importantes en los grandes caudales, los más significativos. Un GIS con una estructura de datos como la mostrada en el ANEXO 1, y herramientas de gestión de la demanda por sectores como las desarrolladas en el CAPÍTULO 11 de la Tesis pueden ayudar de forma importante en la implantación de la política de renovación de contadores más rentable para la empresa.

Por otra parte la **producción del agua en condiciones adecuadas tiene también unos costes asociados**: unos ligados al tratamiento del agua y otros a la elevación y bombeo. Los primeros dependen de la calidad inicial y final del agua, los segundos del tipo de captación, de la eficiencia de las bombas y también de la tarifa eléctrica contratada, la cual depende usualmente de la hora de bombeo y también, de forma nada despreciable, de la potencia contratada. Una reducción de los costes de explotación conlleva una gestión eficiente en los puntos de producción, para determinar en cada instante el caudal a inyectar desde cada fuente y el volumen de agua a almacenar en cada depósito, a fin de bombear el máximo volumen durante las tarifas valle sin rebasar la potencia máxima contratada para no encarecer el término de potencia. El uso del modelo es aquí básico, pues además de proporcionarnos las potencias consumidas y el caudal entrante o saliente de los depósitos en cada momento, nos puede indicar también el coste final de cada metro cúbico suministrado en cada hora y en cada nudo. Ello podría utilizarse por ejemplo para incentivar el consumo de agua fuera de las horas punta en algunas industrias. El modelo hidráulico puede incorporar además un modelo de optimización para reducir los costes de producción teniendo en cuenta todos los factores citados.

Otra fracción de los **costes energéticos** está **asociada con el transporte y distribución de los caudales**, debido sobre todo a las pérdidas de rozamiento en las tuberías y al hecho de tener que suministrar el agua a puntos con diferente cota, con el compromiso de mantener las presiones en un determinado rango en todos los casos. Determinadas actuaciones en la red pueden contribuir a reducir las exigencias de presión en origen, y

con ello el consumo energético y los costes asociados. Sin embargo, dichas actuaciones tienen también un coste cuya amortización habrá que comparar con el ahorro conseguido. De nuevo el uso del modelo será básico a la hora de evaluar los ahorros energéticos, mientras que el GIS nos ayudará a valorar las zonas afectadas por la actuación.

Los **costes de mantenimiento** de las instalaciones forman también parte de los costes de explotación. En ellos pueden contemplarse igualmente los costes de lectura de equipos manuales, data-loggers o toma de muestras. Aquí el GIS puede ayudar a localizar los puntos a revisar o medir en cada momento, mientras que las herramientas de topología ayudarán a trazar rutas de lectura y a optimizar las actuaciones para reducir sus costes.

A la gestión de activos, esto es, de los componentes principales de la red, ya nos hemos referido anteriormente, lo que completaría el análisis de los diferentes costes asociados con la gestión técnica de los abastecimientos.

- ❖ En los epígrafes anteriores nos hemos referido a la gestión de objetivos concretos como fugas, energía, activos y costes en sus diferentes acepciones. La gestión técnica de un abastecimiento conlleva todo ello simultáneamente, además de otras tareas como la gestión de los recursos humanos, la gestión financiera, la gestión de abonados y relación con el cliente, la gestión de los laboratorios de análisis, la gestión comercial, etc. La única forma de abordar una gestión integral de un abastecimiento es a través de un conjunto de Indicadores de Gestión, entre los cuales destacan los recomendados por la IWA (*International Water Association*) en su manual "*Performance Indicators for Water Supply Services*", publicado en 2000 y revisado posteriormente en 2006. El mantenimiento de un Sistema de Indicadores como éste requiere el almacenamiento y actualización de un gran número de variables, muchas de las cuales pueden necesitar la asistencia del modelo de la red para su obtención. Otras muchas variables son de carácter geográfico, lo que nos lleva finalmente a recomendar la integración GIS – Modelo como la mejor plataforma para mantener un Sistema de Indicadores, y elaborar informes y mapas periódicos para su seguimiento.

Terminaremos este punto resaltando las diferencias entre lo que es desarrollar una determinada herramienta topológica o de análisis, como las descritas en la primera y segunda parte de la Tesis, y lo que supone ponerla en práctica formando parte de un software de gestión dirigido a una compañía de servicios. Así por ejemplo, un determinado algoritmo puede ayudarnos a **identificar la cerrada** que hay que realizar para aislar un tramo de tubería en el que se pretende llevar a cabo una actuación temporal. La **gestión de las cerradas**, sin embargo, conlleva un tratamiento de la información que va más allá, pues probablemente se quiera almacenar también la causa de la actuación, la fecha prevista para su realización, los abonados afectados para la generación de avisos, los cambios de actuación por circunstancias de última hora, etc y una vez realizada la operación, las válvulas que finalmente se cerraron, el tiempo real de interrupción del servicio, los operarios que trabajaron y el coste final de la operación, entre otros. Lo mismo ocurre por ejemplo con una sectorización.

Mientras que desarrollar el algoritmo de identificación de una cerrada o de un sector tiene su valor, qué duda cabe, su uso práctico conlleva una labor adicional muy importante, la cual tan solo se ha querido iniciar en la tercera parte de esta Tesis, y para cuya continuidad se han aportado un buen número de sugerencias, que pueden ser el origen de trabajos posteriores en esta línea por parte de otros investigadores o empresas consultoras.

ANEXOS

ANEXO **1**

MODELO LÓGICO DE LA
GEODATABASE DE LA EXTENSIÓN GISRed

ANEXO 1. MODELO LÓGICO DE LA GEODATABASE DE LA EXTENSIÓN GISRED

A1.1 MODELO LÓGICO DE LA GEODATABASE PRINCIPAL DE LA EXTENSIÓN GISRED

A1.1.1 Tablas de Declaraciones

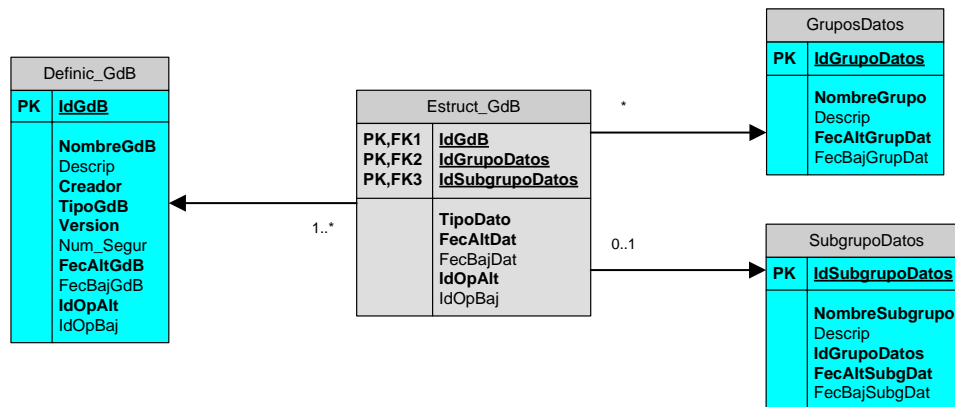


FIGURA 124. TABLAS DE DECLARACIONES.

DEFINICIÓN DE LA GEODATABASE - Tabla 'Definic_GDB'

La Tabla de Definición de la GdB contiene una serie de campos básicos que identifican al Creador de la Geodatabase, su fecha de creación FecAltGdB, y sobretodo su Tipo y Versión, actuando como tabla Maestra, a la hora de abrir una geodatabase desde GISRed2pro. Para que una determinada GdB puede abrirse desde GISRed2Pro, deberá existir esta tabla, en su campo TipoGdB debe poner GISRED2PRO, y el contenido del campo Version deber ser compatible con la versión actual de GISRed2Pro.

Además, por seguridad, el campo Num_Segur se reserva para saber que nadie ha accedido a la GdB desde fuera de GISRed2Pro. Para ello, dicho campo puede almacenar cierta información solo controlable desde GISRed2Pro, por ejemplo la fecha juliana de la última versión almacenada del fichero en el disco duro, la cual es almacenada por GISRed2Pro en dicho campo cada vez, antes de cerrar una sesión de edición. Si alguien manipula el mdb desde fuera de GISRed2Pro y lo almacena de nuevo, actualizando su fecha de almacenamiento en el disco, al abrirlo de nuevo GISRed2Pro puede darse cuenta que dicha fecha es posterior a la almacenada en Num_Segur, y avisar de que alguien ha manipulado el fichero, recomendando abrir la última copia de seguridad realizada.

Una GdB puede darse de baja y reflejarlo en el campo FecBajGdB, momento a partir del cual ya no podrá realizarse ningún cambio en la misma, quedando únicamente como base de datos de consulta.

Las operaciones de alta y baja de una GdB deben auditarse y serán obligatoriamente la primera y última entrada de la tabla de operaciones de auditoría. Para volver a abrir

una BdD cerrada, habría que realizar una operación de deshacer, siendo la única operación permitida.

GRUPOS DE DATOS - Tabla 'GruposDatos'

Tabla de declaración de los diferentes Grupos de Datos contemplados en la GdB. Cada Grupo de Datos posee un Identificador numérico interno, un Nombre que le caracteriza, y una Descripción para anotar más detalles sobre dicho grupo.

Los diferentes Grupos de Datos se corresponden básicamente con las diferentes pestañas utilizadas en la construcción de la GdB desde Visio. Actualmente los Grupos de Datos contemplados son:

Declaraciones, Usuarios, Cartografía de Red, Operaciones de Red, Mediciones, Sectores, Suministros, Consumos y Fugas. Pueden verse alterados en el futuro.

Los diferentes Grupos de Datos serán creados o anulados por el programador, y pueden estar asociados con la versión operativa de GISRed2Pro. En consecuencia, cualquier cambio en esta tabla no será auditado, ya que ni siquiera el administrador podrá editarla. Los campos FecAltGrupDat y FecBajGrupDat se reservan únicamente para información y seguimiento por parte del programador.

SUBGRUPOS DE DATOS - Tabla 'SubGrupoDatos'

Tabla de declaración de los diferentes Subgrupos de Datos que configuran un determinado Grupo de Datos de la GdB. Cada Subgrupo de Datos posee un Identificador numérico interno, un Nombre que le caracteriza, y una Descripción para anotar más detalles sobre dicho grupo. Además cada Subgrupo de Datos debe estar clasificado necesariamente dentro de un determinado Grupo de Datos, el cual se refleja en el campo IdGrupoDatos.

Los diferentes Subgrupos de Datos contemplados en cada Grupo de Datos son por ahora los siguientes:

- Usuarios: Usuarios, Perfiles
- Cartografía de Red: Red_hidráulica, Válvulas_Corte, Desagües, Hidrantes, Ventosas, Fuentes_Contaminantes
- Operaciones de Red: Leyes_Control, Maniobras_válvulas, Incidencias_Red, Inyecc_Contaminantes
- Mediciones: Puntos_Medida, Medidores, Datos_Brutos, Datos_Filtrados, Med_Caudales, Med_Niveles, Med_Presiones, Med_Estados, Med_Contaminantes
- Sectores: Simples, Agrupadas, Modulacion, Dep_Interiores, Valv_Frontera
- Suministros: Acometidas, Puntos_Suministro, Usos
- Consumos: Consumos_Estimados, Contadores, Errores_Contador. Consumos_Illegales
- Fugas: Visibles, Detectadas, Latentes

En general, un determinado Grupo de Datos puede subdividirse en muchos Subgrupos de Datos o no subdividirse en ninguno, como por ejemplo del Grupo de Datos de Declaraciones.

Los diferentes Subrupos de Datos serán creados o anulados por el programador, y pueden estar asociados con la versión operativa de GISRed2Pro. En consecuencia,

cualquier cambio en esta tabla no será auditado, ya que ni siquiera el administrador podrá editarla. Los campos FecAltSubgDat y FecBajSubgDat se reservan únicamente para información y seguimiento por parte del programador.

ESTRUCTURA DE LA GEODATABASE - Tabla 'Estruct_GDB'

La Tabla de Estructura de Datos de la GdB es una tabla fundamental que indica cómo está configurada la GdB en un momento determinado (ya que dicha estructura puede modificarse con el tiempo). Básicamente su objetivo es declarar los Grupos y Subgrupos de datos contemplados en la GdB. Así por ejemplo, en una GdB podría contemplarse únicamente la Cartografía de Red, y dentro de ella, además de las tuberías, bombas, válvulas, depósitos y nudos, contemplar las válvulas de corte sin formar parte del modelo. Asimismo es posible que una GdB sea únicamente alfanumérica, y se contemplen solo acometidas, puntos de suministro y volúmenes registrados. La declaración y manipulación de DMAs en la GdB puede ser también optativa.

Gracias a esta tabla, una GdB de GISRed2Pro puede configurarse de forma distinta para diferentes usuarios en función de sus necesidades. Además puede ampliarse en el tiempo para incorporar nuevos grupos de datos.

La declaración de Grupos y Subgrupos de datos es fundamental a la hora de considerar las condiciones de integridad de la GdB. Por ejemplo, si declaramos las DMAs básicas, toda tubería deberá estar asociada a alguna de las DMAs básica, siendo éste un campo requerido en la tabla estructurada. Sin embargo, si no se declaran las DMAs dicho campo puede dejarse en blanco u omitirse.

Evidentemente, la incorporación de nuevos Grupos o subgrupos de datos a la GdB debe estar sujeta a las condiciones de integridad de la misma. Por ejemplo, si se declara la cartografía tras haber declarado las DMAs de forma alfanumérica, las relaciones de los elementos cartográficos con las DMAs deberán cumplimentarse al tiempo que se introduce la cartografía. Asimismo, la declaración o no de ciertos Grupos y Subgrupos de Datos afectará a las opciones disponibles en los diferentes diálogos de la aplicación. Por ejemplo, no se podrán hacer altas de tuberías, si no se ha declarado antes que el Grupo de Datos de Cartografía de Red está contemplado en la BdD.

El campo TipoDato se reserva por ahora para indicar en cierto subgrupos de datos si van a tener carácter geográfico o solo alfanumérico. Por ejemplo las Acometidas, las DMAs, los Puntos de Medida, etc

La incorporación de nuevos Grupos o subgrupos de datos a la GdB debe tener una fecha de alta en FecAltDat, y debe ser auditada a través de los campos IdOpAlt e IdOpBaj. Asimismo es posible dar de baja un determinado Grupo o Subgrupo de datos en una determinada fecha FecBajDat, a partir de la cual dichos datos no serán tenidos en cuenta en las reglas de integridad, ni tampoco en las consultas.

Si un determinado Grupo de Datos no se divide en varios Subgrupos, entonces sólo puede aparecer una vez en esta tabla y el valor del campo IdSubgrupoDatos será 0.

La configuración de la GdB se declara a base de Subgrupos de Datos o de Grupos Completos (en tal caso IdSubgrupoDatos = 0).

Toda GdB debe estar configurada al menos por el Grupo de Datos correspondiente a las Declaraciones, al cual pertenece la tabla Estruct_GdB. Por consiguiente la relación será de 1 a 1 o muchos.

Un determinado Grupo de Datos puede o no figurar declarado en la GdB, lo que le da flexibilidad y adaptabilidad a la GdB. Por otra parte, si forma parte de la GdB y el Grupo esta dividido en varios Subgrupos, puede aparecer tantas veces en la tabla de relaciones como Subgrupos contenga. Por consiguiente la relación será de 1 a 0 ó muchos.

Un determinado Subgrupo de Datos puede o no figurar declarado en la GdB, lo que le da flexibilidad y adaptabilidad a la GdB. Ahora bien, si forma parte de la GdB, solo puede aparecer una vez en la tabla de relaciones, por consiguiente la relación será de 1 a 0 ó 1

A1.1.2 Tablas de Usuarios

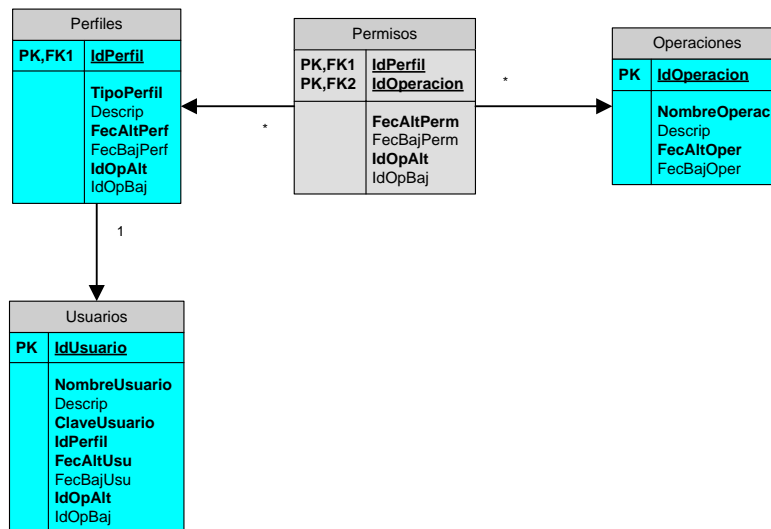


FIGURA 125. TABLAS DE USUARIOS.

PERFILES - Tabla 'Perfiles'

La Tabla de Perfiles aloja la declaración de los distintos tipos de perfiles de usuarios considerados, a la hora de actuar sobre la base de datos. El tipo de perfil se almacena en el campo TipoPerfil, y sus valores considerados en principio son:

0 = CONSULTOR. Es un usuario que puede realizar cualquier consulta a la GdB, para observar sus contenidos u obtener información derivada de la misma, como un modelo matemático o una lista de indicadores de gestión

1 = OPERADOR. Se trata de un usuario con las capacidades del Consultor, más la capacidad añadida de poder modificar cualquier dato de los alojados en la GdB, siempre que ellos se refieran a datos de la red en explotación

2 = ADMINISTRADOR. Se trata de un usuario con las capacidades del Consultor y Operador, más las capacidades de manipulación de las GdB, como son crearla, hacer copias, modificar su estructura, dar de alta o baja a usuarios, perfiles, etc. En resumen, tendrá las máximas capacidades permitidas por la aplicación.

Estos perfiles podrían desglosarse en el futuro en más perfiles, a fin de tener en cuenta algunos matices.

Los diferentes perfiles tendrán un identificador numérico interno y único en el campo IdPerfil, que actúa como campo clave, y un campo Descrip para describir con más detalle las capacidades de cada perfil

Una vez creada una GdB, se podrán crear nuevos perfiles en el tiempo, o destruir los declarados, si bien ello deberá estar en consonancia con las operaciones previstas en el código. Por ejemplo, si tenemos identificadas 100 operaciones de consulta/edición, el perfil 0 podría tener acceso a 10 operaciones, el perfil 1 a 30 operaciones, y el perfil 2 a todas. El administrador podría algún día, sin tener que modificar la GdB, crear un nuevo perfil 4, que tuviera acceso a 40 operaciones elegidas de entre las 100 disponibles, y asignar dicho perfil a ciertos usuarios. Las declaraciones de nuevos perfiles deben tener una fecha de alta, FecAltPerf, y una fecha de cancelación FecBajPer. Las operaciones de altas, bajas o cambios en los registros de esta tabla quedarán auditadas a través de los campos IdOpAlt e IdOpBaj.

USUARIOS - Tabla 'Usuarios'

La Tabla de Usuarios, almacena las particularidades de los Usuarios que van a tener permiso para acceder a la GdB elegida. Las características básicas de un usuario son el NombreUsuario y la ClaveUsuario, reservando el campo Descrip para alojar información adicional sobre el usuario, como por ejemplo, su nombre completo. Los valores de los campos NombreUsuario y ClaveUsuario serán los que habrá que introducir en el diálogo correspondiente para permitir el acceso a la GdB.

Para más seguridad, el campo ClaveUsuario puede almacenarse encriptado. Por ejemplo, cada carácter de la clave almacenada puede responder a un código ASCII que sea igual a $(\text{código ASCII del carácter } (L-i) + (L-i)*n) \bmod 256$, siendo L la longitud de la cadena de la clave introducida, i la posición del carácter actual, y p un número primo a elegir. Cualquiera que sea la regla, se aplicará directamente sobre el valor introducido en el diálogo de declaración de un nuevo usuario, mientras que en el campo ClaveUsuario se almacenará el resultado de aplicar dicha regla. Al introducir de nuevo la clave en el diálogo de acceso, se aplicará de nuevo la regla y se comparará con el valor almacenado. De este modo, aunque alguien pudiera acceder a esta tabla y observar las claves almacenadas, no podría nunca acceder a la GdB simplemente introduciendo el valor de la clave almacenada en el diálogo de acceso.

En cualquier momento es posible aplicar la regla inversa para descifrar la clave original, aunque por seguridad ello no suele hacerse nunca. Si se renuncia a aplicar la regla inversa para descifrar la clave original, en caso de olvido, se deberá anular al usuario introduciendo una fecha en FecBajUsu y obligar a declarar el alta de un nuevo usuario. Cuando se pida la ClaveUsuario por primera vez, deberá introducirse dos veces en el diálogo de alta para evitar errores de tipografía.

Las altas y bajas de usuarios pueden ser gestionadas por el Administrador, y tener un tiempo de vida determinado, reflejado por los campos FecAltUsu y FecBajUsu. Cualquier cambio en los registros de esta tabla deberá quedar auditado a través de los campos IdOpAlt e IdOpBaj.

A todo usuario, en su proceso de declaración, se le debe asignar un Perfil determinado, de ahí que la relación deba ser de 1 a 1. De acuerdo con esta relación, un Perfil determinado puede ser compartido por muchos usuarios, pero no se contempla la relación inversa, es decir que un usuario puede tener muchos Perfiles. Se entiende que si un Perfil de Administrado tiene acceso de todas las Operaciones, además de las que son exclusivas de él, ello debe quedar declarado en la Tabla de Permisos.

Otra opción hubiera sido declarar en la tabla de Permisos únicamente aquellas operaciones que son exclusivas del Administrador, y crear una tabla de Perfiles-Usuarios, en la que a un usuario administrador se le asignaran al mismo tiempo los perfiles de administrador, operador y consultor. La primera opción, la elegida, es más tediosa pues obliga a relacionar cada operación con cada perfil, pero resulta más versátil. La segunda opción obligaría a declarar grupos de permisos disjuntos, restando opciones al administrador a la hora de declarar nuevos perfiles propios.

OPERACIONES - Tabla 'Operaciones'

La Tabla de Operaciones hace referencia a las diferentes capacidades u operaciones disponibles en la versión actual de GISRed2Pro, en relación con la gestión de la GdB, la edición de los datos de la GdB o las consultas a los datos almacenados en ella.

Podrían declararse en principio únicamente tres Operaciones de carácter genérico: *Gestión GdD*, *Edición GdB*, y *Consulta GdB*. Sin embargo, estas tres Operaciones genéricas pueden desgajarse en otras muchas Operaciones más elementales como *Crear GdB*, *Copiar GdB*, *Editar Cartografía*, *Editar Medidores*, *Editar Usuarios*, *Consultar Contadores*, *Consultar Modelo*, cuyo nombre identificativo se almacenará en el campo NombreOperac, mientras que en el campo Descrip se puede ampliar la descripción de sus acciones. El número de Operaciones que queramos identificar deberá estar en consonancia con la flexibilidad y las peculiaridades de los perfiles que deseemos crear.

La edición de los contenidos de la tabla de Operaciones no estará permitida ni siquiera al Administrador de la GdB. Solo será editable por el programador, pues solo él sabe las operaciones que hay implementadas y verificadas en cada momento en el código. Así pues, esta tabla será generada y cumplimentada por código al crear la GdB, bajo control del programador. Los campos de FecAltOper y FecBajOper tienen sentido únicamente para el programador, a efectos de seguimiento de la evolución de las diferentes capacidades implementadas en la aplicación. Al no ser editable esta tabla por el Administrador, las operaciones de edición de sus registros no necesitan ser auditadas. Las fechas FecAltOper y FecBajOper estarán relacionadas probablemente con las fechas de las diferentes versiones de GISRed2pro.

Sin embargo, al actualizar las versiones de GISRed2Pro es posible que durante la instalación se modifique el contenido de esta tabla, para añadir por ejemplo nuevas operaciones. El administrador podrá entonces conceder permisos para hacer accesibles o no las nuevas operaciones a los distintos perfiles, aunque ciertos permisos por defecto también pueden asignarse durante la fase de instalación de las nuevas versiones.

PERMISOS - Tabla 'Permisos'

Esta Tabla es una tabla de asociaciones entre Perfiles y Operaciones, y recoge los Permisos de Operaciones contemplados en cada Perfil. Si una determinada Operación

no aparece en esta tabla para un cierto Perfil, significa que dicho Perfil no tiene permisos para ejecutar la Operación indicada.

En principio todo Perfil debería aparecer al menos una vez en esta tabla. De lo contrario significaría que un Perfil no tiene asignado ningún Permiso. Aunque ello no es lógico, se puede permitir a efectos de no violar las condiciones de integridad de la GdB.

Por otra parte, es claro que no todas las Operaciones tienen que figurar en esta tabla, excepto para el perfil del Administrador. Si alguna Operación no aparece nunca en esta tabla, significa que no es accesible desde ningún perfil y por consiguiente que no está operativa. Aunque ello nuevamente no es razonable, puede permitirse para no violar las condiciones de integridad de la GdB.

Todas las asociaciones entre Perfiles y Operaciones deberán tener una fecha de alta *FecAltPerm* y pueden tener otra fecha de baja *FecBajPerm*, las cuales deben estar comprendidas obviamente entre las fechas de alta y baja de los permisos y operaciones asociados. Además las operaciones de edición para todo tipo de asociaciones entre permisos y operaciones deben quedar auditadas a través de los campos *IdOpAlt* e *IdOpBaj*.

Un Perfil determinado vendrá caracterizado por uno o muchos permisos para realizar ciertas operaciones sobre la GdB. Sin embargo, durante la fase de declaración de un nuevo perfil, inicialmente puede no tener ningún permiso asignado, por lo que la relación será de 1 a 0 o muchos.

Una determinada operación sobre la GdB puede estar contemplada en uno o muchos perfiles. En general, el perfil de Administrador debe tener permiso para realizar todas las operaciones contempladas en la versión actual de la aplicación. Sin embargo, es posible que durante la fase de desarrollo, alguna Operación se declare en esta tabla y no esté accesible inicialmente para nadie, a la espera de que sea el Administrador quien declare qué Perfiles van a tener acceso a dicha Operación. En consecuencia, la relación será de 1 a 0 ó muchos

A1.1.3 Tablas de Cartografía de Red

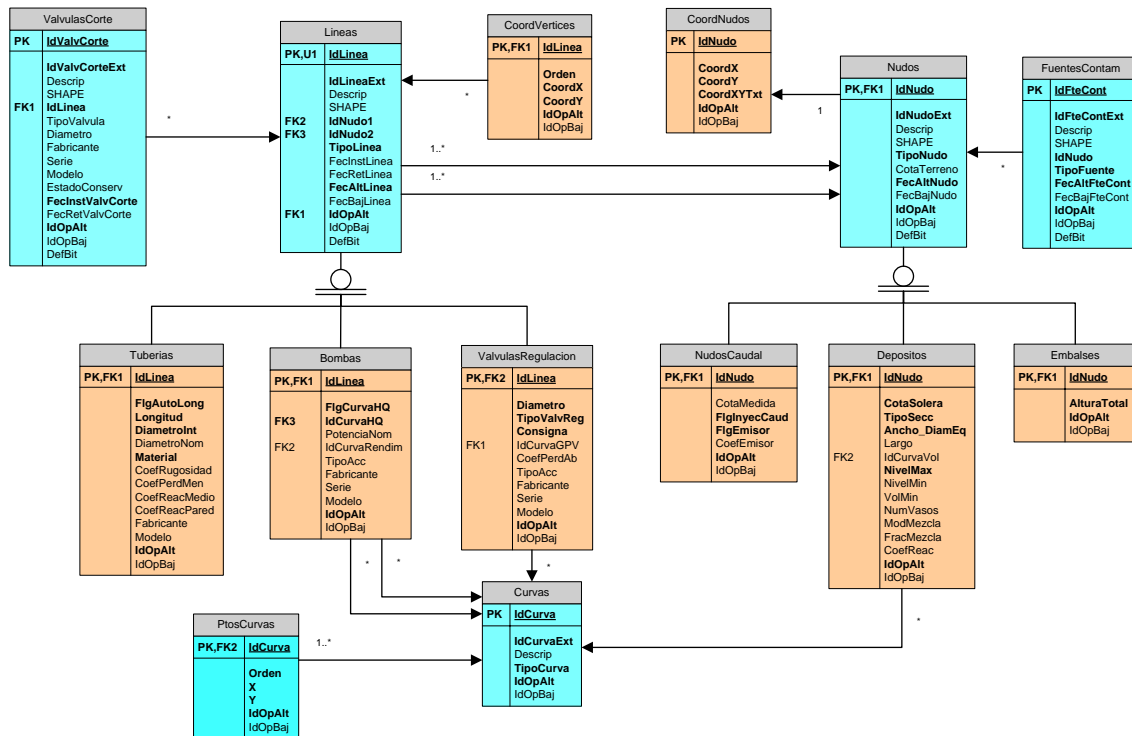


FIGURA 126. TABLAS DE CARTOGRAFÍA DE RED.

LÍNEAS - Tabla 'Lineas'

La Tabla de Líneas aloja la definición y propiedades comunes a todas las Líneas que configuran el modelo de la red.

Una Línea es un elemento que conecta entre sí dos nudos del modelo, permitiendo el transporte del agua de un nudo a otro. El sentido de flujo puede estar restringido o no (lo segundo será lo habitual). Dichos nudos, caracterizados por sus identificadores internos IdNudo1 e IdNudo2, deben declararse como propiedades de las Líneas, configurando así la topología de la red

Las propiedades físicas de una Línea deben ser únicas, si bien éstas dependen del tipo del tipo de línea declarado en el campo TipoLinea. Esta puede ser una Tubería, una Válvula, o una Bomba, siguiendo el modelo de datos de EPANET. Las propiedades físicas asociadas a cada uno de estos tipos se describen en otra tabla.

Las fechas de instalación FecInstLin y retirada FecRetLin se refieren a las fechas de su construcción y destrucción física de la línea. Por otra parte, las fechas de alta y baja de la línea FecAltLin y FecBajLin se refieren a las fechas en que la línea entra a formar parte del modelo o deja de formar parte de él, y deberán ser posteriores y anteriores (o iguales) a las fechas de instalación y retirada de la línea. A su vez estas dos últimas fechas deberán ser anterior y posterior a las fechas de cualquier asociación de la línea con cualquier acometida o DMA .

Toda Línea, cuando se añade a la base de datos, debe quedar asociada necesariamente a alguna DMA simple (si se contempla la declaración de DMAs). De

esta forma quedarán asociadas a la DMA automáticamente sus nudos extremos, a los cuales se cargará después el consumo de la DMA. En otro caso, podría no cumplirse el balance de demandas cuando ésta se acumula por nudos y por acometidas para una misma DMA.

La única excepción corresponde a las tuberías que contienen los caudalímetros de medida o las válvulas frontera, que estarán asociadas a las dos DMAs que conectan. Estas líneas tendrán un carácter especial, de modo que sus nudos extremos pueden pertenecer cada uno a una DMA básica distinta.

Una Línea debe corresponder con una Tubería, una Bomba o una Válvula. Así pues, necesariamente debe haber una asociación entre cualquier Línea y alguno de estos tres elementos. Sin embargo, desde el punto de vista del elemento (Tubería, Bomba o Válvula), su IdLínea debe corresponderse con el IdLínea de alguna Línea de la tabla y solo con esa, de modo que la relación de será de 1 a Exactamente 1

COORDENADAS DE LOS VÉRTICES DE LAS LÍNEAS - Tabla 'CoordVertices'

La Tabla de Coordenadas de Vértices aloja las coordenadas X e Y de los diferentes vértices que configuran la poligonal de una línea, declarados en el orden desde IdNudo1 hasta IdNudo2, y excluyendo los puntos extremos de la línea, cuyas coordenadas se reflejan en la tabla CoordNudos

El Orden es muy importante para representar el trazado de una línea correctamente, de modo que el primer vértice debe corresponderse con el vértice que sigue al nudo IdNudo1, el cual se asocia con el extremo inicial del trazado de la polilínea. De este modo, el orden de los vértices debe corresponderse con el orden del trazado de la polilínea.

Si una línea tiene un trazado rectilíneo no tendrá vértices intermedios, por lo que no tendría ningún registro en esta tabla.

Aunque bombas y válvulas serían susceptibles de tener también un trazado propio, como en EPANET, por ahora no se contempla esta opción en GISRed 2.0. Otra opción posible es que las coordenadas de los vértices almacenadas en esta tabla no se correspondan siempre con las reales del GIS, permitiendo así una distorsión aplicable a la hora de exportar los datos gráficos a EPANET, lo que puede resultar de interés para facilitar la interacción del usuario, evitando operaciones de zoom.

La presencia de esta tabla obedece a la necesidad de agilizar las operaciones de exportación de la cartografía de red a otros entornos, como EPANET. Por otra parte, permite exportar un trazado de las líneas ligeramente distinto a su trazado geográfico. La desventaja es que hay que actualizarla cada vez que haya un cambio en el elemento correspondiente de la tabla de Nudos

Finalmente, la edición de esta tabla debe realizarse en sincronismo con la tabla de líneas, manteniendo los mismos valores para los IdOpAlt e IdOpBaj de las operaciones de alta y de baja.

Una Línea puede tener ninguno o varios vértices intermedios que perfilen su trazado. Los nudos extremos de la línea no forman parte de la tabla CoordVertices.

PROPIEDADES DE LAS TUBERÍAS DE LA RED - Tabla 'Tuberías'

La Tabla de Tuberías contiene las propiedades características de las Tuberías, las cuales vienen a complementar las ya declaradas en la Tabla de Líneas, de la que constituye un subtipo.

Las tres propiedades básicas de una tubería son su Longitud, Diámetro y Coeficiente de Rugosidad. En el modelo de GISRed 2 Pro, la longitud de una tubería puede calcularse automáticamente a partir de su trazado en el GIS, o bien introducirse directamente, lo que se refleja en el campo FlgAutoLong. En cuanto al diámetro, se ha reservado el campo DiametroInt para introducir el diámetro a utilizar a efectos de cálculo (el diámetro interior real), y el campo DiametroNom de tipo texto para mostrar el diámetro nominal de la tubería a efectos de informes y documentos.

Por lo que respecta al Coeficiente de Rugosidad, puede introducirse directamente, o estimarse por algún procedimiento a partir del campo Material (aún por codificar) y la edad de la tubería, deducible a partir del campo FeclnstLinea. Se ha reservado también el campo CoefPerdMen para alojar el Coeficiente de Pérdidas Menores, si se quiere considerar.

En caso de trabajar con Modelos de Calidad, se ha previsto también alojamiento para los coeficientes de reacción en el medio y en la pared, a través de los campos CoefReacMedio y CoefReacPared, los cuales pueden considerarse como propiedad asociada a una tubería

Finalmente se han contemplado los campos Fabricante y Modelo (o tipo y clasificación de la tubería) a efectos de inventario.

Comparando con los datos adicionales de una tubería solicitados por EPANET, el Estado Inicial de una tubería vendrá determinado indirectamente por el estado de las válvulas de corte alojadas en ella. Dicho estado no es una propiedad de la tubería (puede cambiar con el tiempo), y por consiguiente no debe figurar aquí. En cuanto a la existencia o no de una válvula de retención, aunque podría ser una propiedad, se prefiere declararlo indirectamente en el momento de construir un modelo a partir del tema de Válvulas de Corte, donde está previsto que se alojen dichas válvulas.

Finalmente indicar que todas las Tuberías deben tener asociados un IdOpAlt y un IdOpBaj.

PROPIEDADES DE LAS BOMBAS - Tabla 'Bombas'

La Tabla de Bombas contiene las propiedades características de las Bombas, las cuales vendrán a complementar las ya declaradas en la Tabla de Líneas, de la que constituye un subtipo.

Las propiedades básicas de una bomba son su curva característica de comportamiento, identificada por IdCurvaHQ, y su curva de rendimiento, identificada por IdCurvaRendim (esta solo será necesaria si se pretende hacer un análisis de la energía consumida). De acuerdo con EPANET es posible suplir la Curva Características por la Potencia Nominal de la bomba, cuando aún no se conoce su curva (en este caso se estima una curva a partir del dato de la potencia), por lo que se ha reservando un

campo para ello. El campo FlgCurvaHQ indica si el comportamiento de la bomba se va a caracterizar a partir de su curva característica o de su potencia nominal.

Finalmente se han añadido los campos Fabricante, Serie y Modelo de la Bomba, a efectos de inventario.

Comparando con los datos adicionales de una Bomba solicitados por EPANET, la Velocidad Relativa y su posible Curva de Modulación, no constituyen una propiedad en sí misma de la bomba, de modo que se deducirán de los datos de operación del sistema, almacenados en otras tablas, a la hora de construir un modelo de la red. Lo mismo puede decirse del estado inicial de Marcha o Paro de la Bomba.

Finalmente el precio medio del Kwh asociado a la Bomba y la curva de modulación de precios, se alojarán igualmente en tablas aparte y se deducirán en caso necesario en el momento de construir el modelo, pues no constituyen tampoco una propiedad que sea característica de la Bomba y que por consiguiente deba estar en esta tabla.

Finalmente indicar que todas las Bombas deben tener asociados un IdOpAlt y un IdOpBaj.

Las Bombas pueden tener asociadas dos tipos de curvas: la CurvaHQ o de comportamiento, y la Curva de Rendimiento. Los identificativos internos de ambas serán autonuméricos, y sus propiedades se declaran en las tablas de Curvas y PtosCurvas. Un IdCurva declarado para una Bomba deberá estar también en la tabla Curvas, pero al revés, el IdCurva de una curva dada puede no estar en ninguna Bomba (por ser una curva de otro tipo), o bien repetirse en varias Bombas, por compartir todas ellas la misma curva. Así pues, la relación será de 1 a 0, 1 ó muchos.

Las asociaciones entre el IdCurvaHQ/Rendim de la tabla Bomba y el IdCurva de la tabla Curvas no tienen temporalidad, pues esta será la misma que la de la Bomba o Bombas a que pertenecen. Así pues, no se contemplan campos de fecha para estas asociaciones.

PROPIEDADES DE LAS VÁLVULAS DE REGULACIÓN - Tabla 'ValvulasRegulacion'

La Tabla de Válvulas de Regulación contiene las propiedades características de las Válvulas que pueden condicionar el valor de las variables hidráulicas del modelo, como presiones o caudales, y vienen a complementar las ya declaradas en la Tabla de Líneas, de la que constituye también un subtipo.

Las válvulas que aquí se contemplan son las únicas que van a aparecer después en el modelo, y son relevantes pues el comportamiento hidráulico de la red puede depender de su posición. Se modelan como líneas, con un punto de entrada y otro de salida, cuyas presiones pueden ser diferentes. Además su caudal de paso será el de la línea que las representa.

No hay que confundirlas con las Válvulas manuales o de retención, que no forman parte del modelo, y se declaran en la tabla de Válvulas de Corte, simplemente como puntos.

Las propiedades básicas de las Válvulas de Regulación son su Diámetro, su Tipología de acuerdo con la clasificación de EPANET (PRV, PSV, PBV, TCV, FCV y GPV), y la Consigna que controla su modo de funcionamiento (presión aguas abajo, presión aguas arriba,

caída de presión, caudal de paso, posición o curva de comportamiento). En el caso de las válvulas de propósito general (GPV) el identificativo de su curva de comportamiento IdCurvaGPV se aloja en un campo aparte por tener un dominio de definición diferente.

En realidad las consignas de una válvula tampoco constituyen una propiedad de las mismas, sino más bien de su modo de operación (excepto para las GPV), por lo que es posible que este campo no sea utilizado realmente, y se imponga su valor al construir el modelo a partir de los datos de operación de la red.

El coeficiente de pérdidas a válvula abierta CoefPerdAb sí que constituye en cambio una propiedad de cada válvula. Finalmente se han añadido los campos Fabricante, Serie y Modelo de la Válvula, a efectos de inventario.

Comparando con los datos adicionales de una Válvula solicitados por EPANET, tanto solo restaría por añadir el Estado a Forzado de la Válvula, pero claramente dicho estado depende de modo de operación del sistema en un momento dado, y se determinará a partir de la información de otras tablas en el momento de construir el modelo.

Finalmente indicar que todas las Válvulas de Regulación deben tener asociados un IdOpAlt y un IdOpBaj.

Solo las Válvulas de Propósito General pueden tener asociado un tipo de curva: la curva IdCurvGPV que representa la pérdida de carga en la válvula en función del caudal de paso. El identificativo interno de esta curva debe figurar en las tablas Curvas y PtosCurvas, entre las cuales se define completamente la curva. Ahora bien, el IdCurva de una curva de la tabla Curvas puede no corresponder a ninguna Válvula (por ser una curva de otro tipo), o bien repetirse en varias Válvulas, por compartir todas ellas la misma curva. Así pues, la relación será de 1 a 0, 1 ó muchos.

Las asociaciones entre el IdCurvaGPV de la tabla Válvulas y el IdCurva de la tabla Curvas no tienen temporalidad, pues esta será la misma que la de la Válvula o Válvulas a que pertenecen. Así pues, no se contemplan campos de fecha para estas asociaciones.

PROPIEDADES DE LAS VÁLVULAS DE CORTE - Tabla 'ValvulasCorte'

La Tabla de Válvulas de Corte contiene la definición y propiedades físicas de todas las Válvulas de Corte que forman parte de la red o la han formado en algún momento.

Las Válvulas de Corte son válvulas que permite el seccionamiento de la tubería en dicho punto, y como consecuencia el aislamiento de un extremo de la tubería del otro.

Aunque todas las válvulas permiten su cierre o apertura total, las Válvulas de Corte se caracterizan porque no admiten estado intermedios, y se accionan únicamente de vez en cuando por operaciones de mantenimiento o para aislar deliberadamente un punto de la red de las tuberías que le rodean (por ejemplo, válvulas frontera o válvulas de sectorización para racionar el consumo de agua).

La alternativa a las Válvulas de Corte son las Válvulas de Regulación, las cuales pueden accionarse manualmente, a través de un actuador o de forma automática, permitiendo posiciones intermedias al objeto de provocar una pérdida de carga en la tubería que las alojan.

Desde el punto de vista del modelo entre ambas hay una diferencia muy importante, pues mientras las primeras no forman parte del modelo como entidades diferenciadas (aunque pueden afectar al estado de una tubería), las segundas se exportan como elementos integrantes del modelo. También desde el punto de vista topológico tienen una diferencia clara, pues mientras las Válvulas de Corte se modelan en el SIG como puntos, las de Regulación se modelan en el SIG como Líneas, diferenciando explícitamente el nudo aguas arriba del nudo aguas abajo.

También existe una diferencia entre ellas en la declaración de sus propiedades, lo que aconseja modelarlas como entidades diferentes. Las que se reflejan en esta tabla son las Válvulas de Corte, y entre sus propiedades cabe citar el Tipo de Válvula (compuerta, mariposa, bola, etc), el Diámetro nominal, el Fabricante, el Modelo y su Estado de Conservación.

Las fechas de Instalación y Retirada se corresponden con las fechas en que se incorporan o retiran de la red, periodo durante el cual se las supone operativas. Dichas fechas deben estar encajadas dentro del tiempo de vida de la tubería asociada, entre *FecInstLinea* y *FecRetLinea*

En cuanto al campo SHAPE se corresponderá con un punto, que obligatoriamente debe estar situado sobre alguna Tubería (no Bomba ni Válvula de Regulación). Además el Id de dicha Tubería debe alojarse en el campo *IdLinea*, estableciendo así una relación única entre la válvula de corte y la tubería que secciona.

Una Línea de tipo Tubería, puede tener alojadas ninguna, una o varias válvulas de corte, cada una con sus tiempos de vida (*FecInstValvCorte* - *FecRetValvCorte*) propios. Los tres casos citados se dan en la práctica, siendo habitual que una tubería terciaria tenga asociadas 2 válvulas de corte, una al principio y otra al final de la tubería, siendo pues la relación de 1 a 0, 1 ó muchos.

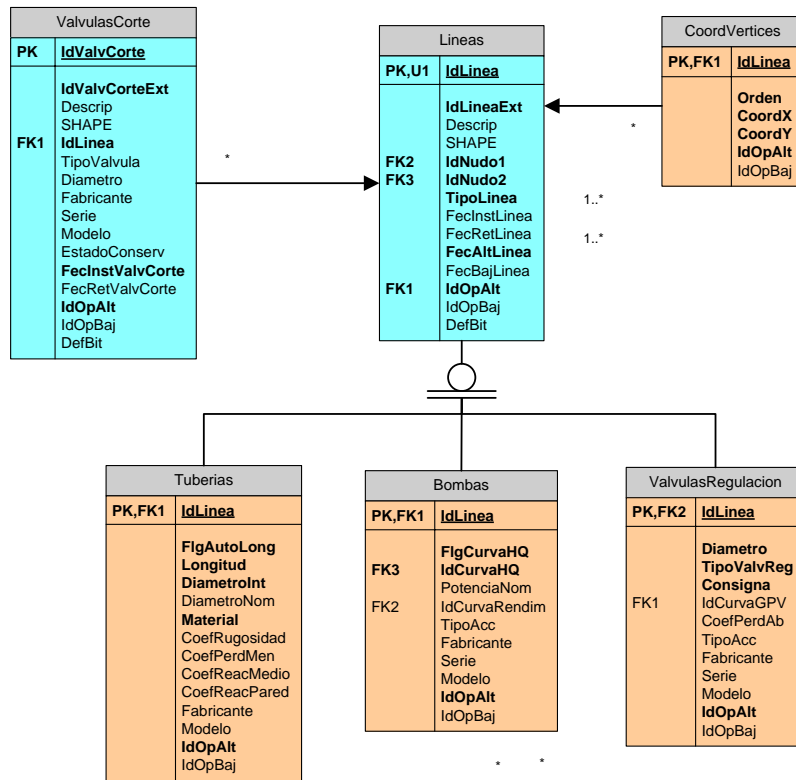


FIGURA 127. TABLAS DE LÍNEAS.

PROPIEDADES DE LOS NUDOS DE LA RED - Tabla 'Nudos'

La Tabla de Nudos aloja la definición y propiedades comunes a todos los Nudos que configuran el modelo de la red.

Un Nudo es un punto de conexión de dos o más líneas, o bien el extremo libre de una línea. Los nudos permiten el trasiego del agua de una línea a otra, y actúan como elementos de enlace entre las líneas para mantener el sistema conexo. El nudo en sí mismo es un elemento topológico, que se crea de forma automática al declarar las líneas del modelo y su conexión con otras líneas del mismo. En consecuencia, por cuestiones de integridad del modelo, los nudos no pueden declararse directamente, estando sus fechas de alta y baja FecAltNudo y FecBajNudo ligadas a las fechas de alta y baja de las líneas de las que dependen. En consecuencia, y a diferencia de las líneas, los nudos no tienen fecha de instalación y retirada, puesto que se crean y destruyen con el modelo.

Sin embargo, desde el punto de vista de su papel en el modelo, los nudos, una vez creados, puede asociarse a elementos físicos como depósitos, embalses, punto de demanda o de entrada del caudal, o simplemente puntos de enlace de tuberías como téns o derivaciones. Así pues, las propiedades físicas de un nudo son más bien las del elemento físico asociado, y dependen lógicamente de la tipología de éste. La única propiedad que podría ser común a todos los nudos es la cota del terreno en que se ubica físicamente el nudo, la cual puede obtenerse por triangulación, por levantamiento topográfico, por medida con GPS o por interpolación a partir de un MDE. No tengo claro por ahora si contemplar o no dicha propiedad en la tabla.

La asociación entre un nudo y el elemento físico a que representa puede hacerse uno a uno o a través de una tabla de relaciones, de modo que el mismo nudo podría tener asociados diferentes elementos con el paso del tiempo, o bien un mismo elemento podría asociarse a diferentes elementos a lo largo del tiempo. Por ahora, vamos a considerar, al igual que para las líneas, que la asociación es del tipo uno a uno, de modo que la creación o destrucción de un nudo está ligada a la creación o destrucción al mismo tiempo del elemento que representa. Aun así, puesto que las propiedades físicas difieren según el tipo de elemento, estas se declararán en tablas o entidades independientes.

Finalmente indicar que por ahora no se ha previsto asociar los nudos con acometidas (éstas deben siempre asociarse con tuberías). Sin embargo, todo Nudo debe estar asociado a una determinada DMA (si se contemplan las DMAs). También es posible asociar algunos nudos a Puntos de Medida, que necesariamente deberán ser en este caso puntos de medida de presión o de nivel.

Todo Nudo debe pertenecer al menos a una Línea. Ahora bien, puesto que las Líneas poseen dos campos que hacen referencia a los Nudos, el campo IdNudo1 y el campo IdNudo2, bastará con que aparezca al menos una vez en uno de los dos. Obviamente, un mismo Nudo puede también aparecer repetidas veces como nudo extremo de varias Líneas, figurando indistintamente como IdNudo1 o como IdNudo2. Sin embargo, hay otra restricción, y es que no puede aparecer como IdNudo1 e IdNudo2 simultáneamente en la misma Línea.

Teniendo en cuenta las restricciones anteriores, la relación entre el campo IdNudo de la tabla Nudos y los campos IdNudo1 e IdNudo2 de la tabla Líneas será una doble relación de 1 a 0, uno o muchos.

Un Nudo debe corresponderse con un Nudo de Caudal, un Depósito o un Embalse. Así pues, necesariamente debe haber una asociación entre cualquier Nudo y alguno de estos tres elementos. Sin embargo, desde el punto de vista del elemento (Nudo de Caudal, Depósito o Embalse), su IdNudo debe corresponderse con el IdNudo de algún Nudo de la tabla y solo con ese, de modo que la relación de será de 1 a Exactamente 1

Todo Nudo debe tener unas coordenadas asociadas, únicas.

COORDENADAS DE LOS NUDOS DE LA RED - Tabla 'CoordNudos'

La Tabla de Coordenadas de Nudos aloja las coordenadas X e Y de los diferentes Nudos creados como intersección de las líneas, o como extremos de éstas.

El campo CoordX&YTxt es un campo de texto obtenido concatenando como textos las coordenadas X e Y de cada nudo. Previamente las coordenadas deben redondearse a una precisión determinada D_x , de modo que:

$$X_{red} = \text{Int} (X_{real} \cdot 10^{Dec} / D_x + 0,5) \cdot D_x / 10^{Dec}$$

donde **Dec** es el número de decimales a tener en cuenta en la expresión de las coordenadas, y D_x la precisión exigida en las unidades del orden decimal declarado por **Dec**. Análogamente:

$$Y_{red} = \text{Int} (Y_{real} \cdot 10^{Dec} / D_x + 0,5) \cdot D_x / 10^{Dec}$$

Este campo se utilizará más adelante para detectar la coincidencia espacial de varios puntos, con mayor rapidez y exactitud que si se realizara mediante una consulta espacial.

Las coordenadas aquí declaradas pueden corresponder a un Nudo de Caudal, a un Depósito o a un Embalse.

La presencia de esta tabla obedece a la necesidad de agilizar las operaciones de exportación de la cartografía de red a otros entornos, como EPANET. Por otra parte, permite exportar una ubicación de los nudos ligeramente distinta a su ubicación geográfica. La desventaja es que hay que actualizarla cada vez que haya un cambio en el elemento correspondiente de la tabla de Nudos

La edición de esta tabla debe realizarse en sincronismo con la tabla de Nudos, manteniendo los mismos valores para los IdOpAlt e IdOpBaj de las operaciones de alta y de baja.

PROPIEDADES DE LOS NUDOS DE CAUDAL - Tabla 'NudosCaudal'

La Tabla de Nudos de Caudal contiene las propiedades características de estos nudos, las cuales vendrán a complementar las propiedades comunes ya declaradas en la Tabla de Nudos, de la que constituye un subtipo.

Aunque todos los nudos tienen una propiedad común que es la Cota del Terreno, la cual está prevista obtener por interpolación a partir de un Modelo Digital del Terreno, en algunos puntos de la red resulta conveniente medir la cota con exactitud (por ejemplo, por tener alojado un manómetro) por métodos como GPS, levantamiento, medida de la presión nocturna, etc. El campo CotaMedida se reserva para alojar dicha cota, que sustituirá a la del terreno a la hora de construir el modelo.

Los Nudos de Caudal son normalmente nudos de demanda, pero pueden actuar en un modelo también como nudos de Inyección, en cuyo caso se adopta el criterio de considerar el caudal negativo. El campo FlgInyecCaud simplemente pretende reflejar el tipo de nudo de que se trata, a efectos de construir posteriormente el modelo.

Finalmente EPANET contempla la posibilidad de considerar las demandas de un nudo dependientes de la presión, además o en sustitución de las demandas fijas. En este caso, el caudal de salida dependerá también de las características físicas del nudo a través del coeficiente del emisor CoefEmisor. El campo FlgEmisor indica si el Nudo en cuestión tiene o no asociado algún emisor, en cuyo caso habrá que declarar el coeficiente correspondiente (aunque también puede obtenerse como resultado de algunas teorías).

El dato más importante asociado a un Nudo de Caudal, el caudal base y su curva de modulación, no se consideran en GISRed 2 Pro como propiedades del nudo, ya que para ello se dispone de un modelo de datos que permite identificar las distintas DMAs y las demandas registradas. Ambos serán obtenidos pues a partir de esta información en el momento de construir el modelo. Lo mismo puede decirse sobre la consideración de una o más demandas en el nudo, con distintas curvas de modulación posibles.

En caso de trabajar con Modelos de Calidad, EPANET contempla además la declaración de la Calidad Inicial en el nudo y la caracterización de la Fuente Contaminante, caso de existir una Fuente en el mismo. La Calidad Inicial es simplemente un parámetro de cálculo que puede considerarse 0 o adoptarse de algunas mediciones, por lo que no es una propiedad del nudo a considerar. En cuanto a la Fuente Contaminante, caso de estar aplicada en el nudo actual, es preferible acoplarla en el momento de construir el modelo, a partir de la tabla de FuentesContam, donde se declaran sus propiedades. Por otra parte, la Intensidad y Curva de modulación del Contaminante deberán determinarse a partir de los datos de campo. En este sentido, las Fuentes Contaminantes van a tener un tratamiento similar a las Válvulas de Corte: se declaran en una tabla aparte, y se unen al modelo al momento de construir el mismo, en caso necesario.

Finalmente indicar que todos los Nudos de Caudal deben tener asociados un IdOpAlt y un IdOpBaj.

PROPIEDADES DE LOS DEPÓSITOS - Tabla 'Depositos'

La Tabla de Depósitos contiene las propiedades características de los mismos, las cuales vienen a complementar las propiedades comunes ya declaradas en la Tabla de Nudos, de la que constituye un subtipo.

Las propiedades básicas de un Depósito son su Cota de Solera (que sustituirá a la Cota del Terreno del nudo asociado), y su sección recta. EPANET solo contempla depósitos cilíndricos, cuando en España la mayoría son rectangulares (salvo los elevados). En GISRed 2 Pro se contempla a través del campo TipoSecc, la sección Rectangular, la Cilíndrica, cualquier Otra de valor constante, así como la sección variable con carácter general, en cuyo caso la geometría queda declarada por la curva de cubicación IdCurvaVol, cuyo identificativo se aloja en un campo aparte. El campo Ancho_DiamEq contiene el ancho de la sección en caso de ser Rectangular, el Diámetro en caso de ser Cilíndrico, o el Diámetro equivalente, en caso de ser Otra sección, pero de valor constante. Finalmente el campo Largo aloja la longitud de la sección, en caso de ser Rectangular.

Además son también característicos de los Depósitos su nivel máximo permitido (antes de rebosar), NivelMax, y su nivel mínimo permitido, NivelMin, a efectos de garantizar una reserva en el depósito (por defecto se toma 0 m).

En GISRed 2 Pro se contempla también la opción de declarar el número de vasos en que se compartimenta un depósito NumVasos (supuestos iguales), a fin de asignar un valor u otro a la sección del Depósito a la hora de construir el modelo, en función del modo de operación de éste.

En caso de trabajar con modelos de calidad, es importante conocer el volumen que queda aún almacenado en el Depósito por debajo del Nivel Mínimo, VolMin, con independencia de la sección del Depósito, a fin de calcular correctamente los parámetros de calidad de acuerdo con el modelo de mezcla elegido. En los Modelos de Calidad hay que declarar también como propiedades del Depósito su Modelo de Mezcla (completa, en 2 compartimentos, pistón FIFO o pistón LIFO), la Fracción de

Mezcla en el caso de elegir un modelo de 2 compartimentos, y el Coeficiente de Reacción del Contaminante, mientras permanece almacenado en el Depósito.

En cuanto a la Calidad Inicial y las características de la posible Fuente de Inyección de Contaminante ubicada en el mismo, cabe apuntar lo mismo ya dicho para el caso de los Nudos de Caudal, de modo que no se consideran como propiedades del Depósito.

Finalmente indicar que todos los Depósitos deben tener asociados un IdOpAlt y un IdOpBaj, que deberán ser idénticos a los del Nudo asociado que le corresponda.

Los Depósitos pueden tener asociado un solo tipo de curva: la curva IdCurvVol que indica el volumen de relleno en función de la cota (para depósitos de sección variable). El identificativo interno de esta curva debe figurar en las tablas Curvas y PtosCurvas, entre las cuales se define completamente la curva. Ahora bien, el IdCurva de una curva de la tabla Curvas puede no corresponder a ningún Depósito (por ser una curva de otro tipo), o bien repetirse en varios Depósitos, por compartir todos ellos la misma curva. Así pues, la relación será de 1 a 0, 1 ó muchos.

Las asociaciones entre el IdCurvaVol de la tabla Depósitos y el IdCurva de la tabla Curvas no tienen temporalidad, pues esta será la misma que la del Depósitos o Depósitos a que pertenecen. Así pues, no se contemplan campos de fecha para estas asociaciones.

PROPIEDADES DE LOS EMBALSES - Tabla 'Embalses'

La Tabla de Embalses contiene las propiedades características de éstos, las cuales vienen a complementar las propiedades comunes ya declaradas en la Tabla de Nudos, de la que constituye un subtipo.

La propiedad más importante de un Embalse es su Altura Total, o altura de la lámina libre del agua sobre el nivel de referencia. Dicha altura se supone invariable, y sustituirá al valor de la Cota del Terreno para este tipo de Nudos.

En el caso de los Embalses, EPANET contempla también la posible declaración de una curva de modulación de la altura, para simular de este modo puntos de presión variable, pero conocida. Nuevamente hay que indicar que ello no es una propiedad del Embalse, sino de su modo de operación, de modo que será impuesta en su caso en el momento de construir el modelo.

Finalmente, si se trabaja con Modelos de Calidad, el valor de la Calidad Inicial tiene un significado especial ahora, pues el embalse puede actuar como una fuente contaminante de calidad constante, dado que la calidad del agua de un embalse no cambia en virtud de su capacidad infinita. No obstante, EPANET contempla también la posibilidad de declarar una Fuente de Inyección de Contaminante en estos puntos, haciéndolos actuar como puntos de calidad variable pero forzada por el usuario, al igual que sucede al imponer una curva de modulación para la Altura Total. En cualquier caso, ni la Calidad Inicial ni la posible Fuente de Inyección de Contaminante se considerarán propiedades del Embalse, y en su caso serán impuestas en el momento de confeccionar el modelo a partir de la tabla de Fuentes Contaminantes y los datos de operación del sistema, al igual que se ha comentado para los otros tipos de Nudos.

Finalmente indicar que todos los Embalses deben tener asociados un IdOpAlt y un IdOpBaj, que deberán ser idénticos a los del Nudo asociado que le corresponda.

PROPIEDADES DE LAS FUENTES CONTAMINANTES - Tabla 'FuentesContam'

La Tabla de Fuentes Contaminantes contiene la definición y propiedades de todas las Fuentes Contaminantes aplicadas en la red o que lo han sido en algún momento.

Las Fuentes Contaminantes son en realidad Puntos de Inyección de alguna sustancia, reactiva o no, en la red, y por ello puede tener asociado un punto geográfico de coordenadas X,Y en formato SHAPE, que deberá coincidir con algún nudo del modelo, pues las inyecciones de contaminante deben realizarse sobre algún nudo del mismo.

EPANET contempla la posibilidad de que dicho nudo sea un Nudo de Caudal (en este caso tendrá que ser un nudo de inyección, con demanda negativa), un Depósito o un Embalse, lo que se indica en el campo IdNudo. La forma de tratar la incorporación del contaminante inyectado sobre el flujo de agua que pasa por dicho punto depende del tipo de Nudo, y también del Tipo de Fuente. EPANET contempla cuatro tipos de fuentes posibles: Concentración, Caudal Másico, Reinyección a Punto Fijo y Reinyección Incremental, lo que se declara en el campo TipoFuente.

Además del Tipo de Fuente, para completar el modelo de calidad deben declararse la intensidad de la fuente y su curva de modulación. En realidad estos son datos que dependen del modo de operación del sistema de inyección en cada caso, no siendo propiedades características de la Fuente Contaminante, por lo que no se declaran en esta tabla. Dicha información debe residir en las tablas de Operación de la red, y serán incorporadas al modelo en el momento de construir éste.

Finalmente, una Fuente Contaminante debe tener una Fecha de Alta, FecAltFteCont y puede tener también una Fecha de Baja, FecBajFteCont. En cualquier caso, las fechas de alta y de baja de la fuente deben ser posterior o igual, y anterior o igual, respectivamente, a las fechas de Alta y Baja del Nudo al que se asocian. De este modo, puede haber varias Fuentes Contaminantes asociadas al mismo nudo, siempre que no exista coincidencia en el tiempo. Por otra parte, no se requiere la yuxtaposición entre las fechas de baja de una Fuente y de alta de la siguiente.

Una Fuente de Contaminante solo puede estar aplicada a un único Nudo del modelo. A la inversa, un Nudo del modelo, sea Nudo de Caudal, Depósito o Embalse, puede tener aplicada ninguna o solo una Fuente de inyección de Contaminante en un momento dado, con lo que la relación sería de 1 a 0 ó 1. Sin embargo, a lo largo del tiempo puede tener varias Fuentes asociadas, siempre que no haya superposición, con lo que la relación final será de 1 a 0, 1 ó muchos.

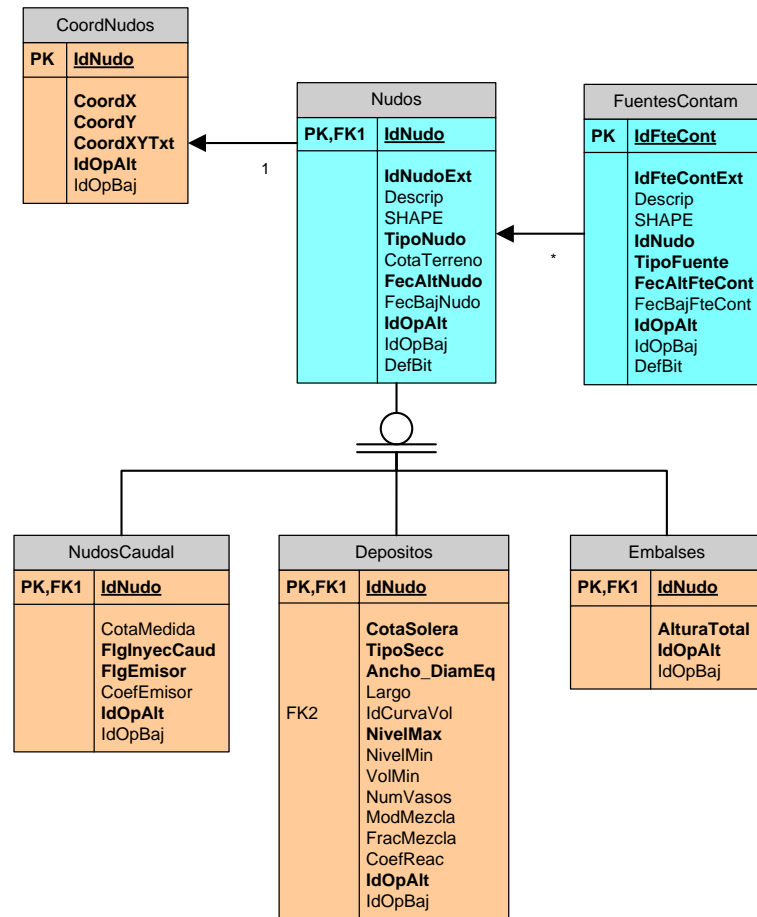


FIGURA 128. TABLAS DE NUDOS.

CURVAS DE COMPORTAMIENTO - Tabla 'Curvas'

La Tabla de Curvas de Comportamiento contiene la definición de todas las curvas consideradas en la declaración de las propiedades de los diferentes elementos que configuran la red. En particular se contemplan cuatro tipos de curvas:

- Las curvas características de las Bombas
- Las curvas de rendimiento de las Bombas
- Las curvas de comportamiento de las Válvulas de Propósito General
- Las curvas de cubicación de los Depósitos.

Todas las curvas tienen una forma de declararse similar, mediante series de pares de puntos ordenados, por lo que pueden compartir la misma tabla.

Las Tablas de Curvas solo contienen la declaración de éstas. El campo IdCurva es un identificativo interno utilizado por GISRed 2 Pro para distinguir cada una de ellas inequívocamente. Sin embargo, a efectos de construir los modelos se puede declarar un identificativo externo IdCurvaExt a elegir por el usuario. El campo Descrip es optativo y permite aclarar algunos detalles en torno a la curva. Finalmente el campo TipoCurva, aparentemente un campo clave, permite diferenciar los cuatro tipos de curvas antes indicados. En realidad no es un campo obligatorio, pues EPANET puede diferenciar claramente unas curvas de otras a partir de los campos de propiedades en que fueron declaradas.

Nota. Obsérvese que el IdCurva que figura como propiedad en las tablas que corresponda es un Id interno. Caso de proveerse el Id externo al hacer el alta, habrá que llevar a cabo la transformación correspondiente. Así pues, las curvas deben declararse antes que las propiedades.

Las curvas de comportamiento no tienen fecha de alta ni fecha de baja. Se asume que ésta es la misma que la del elemento a que pertenecen.

PUNTOS DE LAS CURVAS - Tabla 'PtosCurvas'

La Tabla PtosCurvas contiene las series de puntos ordenados que configuran cada una de las curvas. El campo IdCurva permite diferenciar los puntos pertenecientes a cada curva, y el campo Orden permite ordenar los puntos en el sentido creciente de la variable X.

El campo X contiene los valores de la primera coordenada de cada punto (su significado depende del tipo de curva), y el campo Y aloja el valor de la segunda coordenada del punto (siendo su significado también variable).

Al igual que las propias curvas, sus puntos no tienen fecha de alta ni fecha de baja. Se asume que éstas serían en todo caso las mismas que la de la curva a que pertenecen.

Toda Curva debe contener al menos un punto, por lo que su IdCurva interno debe aparecer al menos una vez en la tabla PtosCurvas.

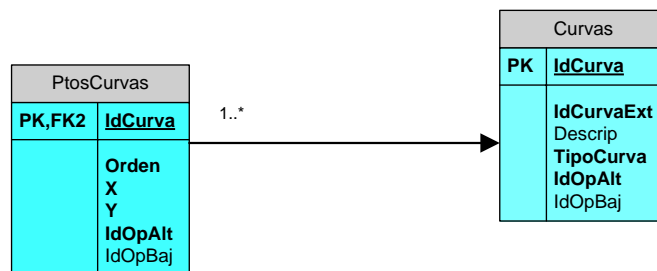


FIGURA 129. TABLAS DE CURVAS.

A1.1.4 Tablas de Operaciones

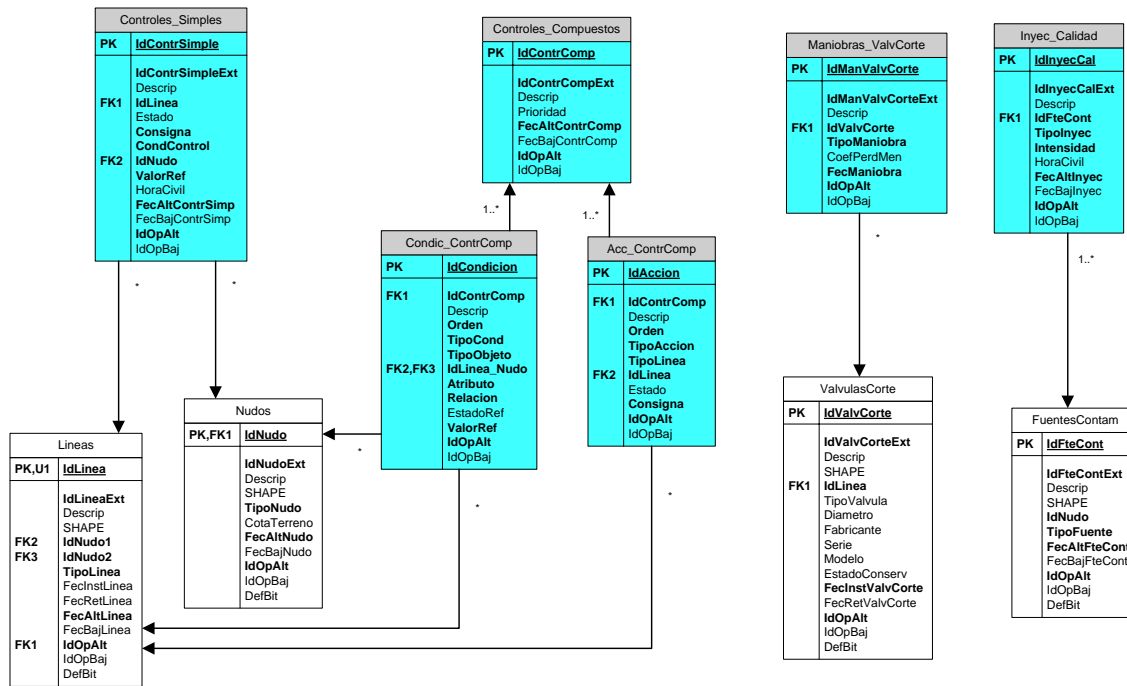


FIGURA 130. TABLAS DE OPERACIONES.

LEYES DE CONTROL SIMPLES - Tabla 'Controles_Simples'

La tabla de Leyes de Control Simples aloja las declaraciones de las Leyes de Control Simples, esto es, del tipo "Actuar sobre una línea si se cumple cierta condición de presión en un determinado". Las Leyes de Control Simples alojadas en la tabla pueden corresponder al momento actual o a cualquier momento del pasado.

Controles_Simples	
PK	IdContrSimple
	IdContrSimpleExt
	Descrip
FK1	IdLinea
	Estado
	Consigna
	CondControl
FK2	IdNudo
	ValorRef
	HoraCivil
	FecAltContrSimp
	FecBajContrSimp
	IdOpAlt
	IdOpBaj

FIGURA 131. TABLA DE CONTROLES SIMPLES.

Su sintaxis general es:

LINK *IdLinea* **Estado/Consigna** CondControl *IdNudo* (CondicControl) *ValorRef*

Por tanto, en la tabla los campos hacen referencia a:

IdLinea: hace referencia a la línea sobre la que se aplica la ley de control

Estado: puede tomar los valores CLOSED / OPEN / SETTING / SPEED.

Setting es sólo aplicable a válvulas de regulación (la consigna depende del tipo de válvula) y *Speed* a bombas (velocidad relativa de giro respecto a la velocidad nominal).

Consigna: Si el campo *Estado* toma el valor SETTING, el campo *Consigna* se debe referir al valor de la consigna de la válvula; si el campo *Estado* toma el valor SPEED, el campo *Consigna* se debe referir al valor de la velocidad relativa de giro de la bomba respecto a su velocidad nominal.

CondControl: hace referencia a la condición de control aplicable, que puede ser: IF NODE ABOVE, IF NODE BELOW, AT TIME, AT CLOCKTIME AM o AT CLOCKTIME PM. En los dos primeros casos la palabra clave ABOVE/BELOW se escribe sintácticamente tras el *IdNudo*, y en los dos últimos casos la palabra clave AM/PM se escribe tras *ValorRef*

IdNudo: es el identificador o nombre dado al nudo cuya presión ó nivel, almacenado en *ValorRef*, será observado a fin de aplicar o no la ley de control

HoraCivil: es la hora del día en que se aplicará la ley de control. Se supone que se va a aplicar todos los días a la misma hora.

Las leyes de control del tipo IF NODE o AT CLOCKTIME pueden tener un periodo de vigencia, declarado por las fechas de alta *FecAltContrSimp* y de baja *FecBajContrSimp*, fuera de las cuales la ley no tiene aplicación.

Sin embargo, las leyes de control del tipo AT TIME se aplican sobre el modelo en un determinado momento de la simulación, el cual no es almacenado directamente. A cambio, en el campo *FecAltContrSimp* se almacena la fecha y hora de aplicación de la ley, la cual permitirá calcular por diferencia el instante de la simulación correspondiente, una vez indicado el tiempo inicial de la simulación en la consulta (en este caso, la fecha *FecBajContrSimp* no tiene aplicación).

Una Línea (ya sea Tubería, Bomba o Válvula) puede tener aplicada sobre ella ninguna, una o muchas Leyes de Control Simples. La relación será pues de 1 a 0 o muchos.

La presión de un Nudo (ya sea Nudo de Demanda, Depósito o Embalse) puede utilizarse como Condición en ninguna, una o muchas Leyes de Control Simples. La relación será pues de 1 a 0 o muchos.

LEYES DE CONTROL BASADAS EN REGLAS - Tabla 'Controles_Compuestos'

La tabla de leyes de control compuestas aloja las declaraciones de las leyes de control compuestas, esto es, del tipo "Si se cumplen ciertas Condiciones realizar determinadas Acciones, y si no se cumple realizar otras Acciones". Las leyes de control compuestas alojadas en la tabla pueden corresponder al momento actual o en cualquier momento del pasado.

La sintaxis es la siguiente:

RULE IdContrComp

```

IF Condición_1 AND Condición_2 OR Condición_3 AND Condición_4 etc.
THEN Acción_1 AND Acción_2 etc.
ELSE Acción_3 AND Acción_4etc.
PRIORITY Prioridad

```

Por tanto, en la tabla los campos hacen referencia a:

IdContrComp es el identificativo único de cada regla. La parte condicional se aloja en la tabla *Cond_ContrComp* y la parte ejecutiva en la tabla *Acc_ContrComp*

El orden indicado en *Prioridad* se utiliza para determinar qué reglas son aplicables cuando dos o más acciones sobre una misma línea entran en conflicto. Una regla que no tenga una prioridad especificada siempre tendrá menor prioridad que otra que sí que la tenga. Para dos reglas con la misma prioridad, prima la que aparece en primer lugar dentro de la sección.

Sólo las cláusulas *RULE*, *IF* y *THEN* de una ley de control compuesta son estrictamente requeridas; las otras partes son opcionales.

Las leyes de control compuestas pueden tener un periodo de vigencia, declarado por las fechas de alta *FecAltContrComp* y de baja *FecBajContrComp*, fuera de las cuales la ley no tiene aplicación.

CONDICIONES DE LAS LEYES DE CONTROL BASADAS EN REGLAS - Tabla 'Condic_ContrComp'

La tabla de condiciones recoge las condiciones que forman parte de una determinada ley de control compuesta, identificada por el campo *IdContrComp*.

Las diferentes condiciones aplicables deben ir precedidas de un prefijo almacenado en *TipoCond*, que puede ser *IF*, *AND* u *OR*. De acuerdo con la sintaxis general, la primera condición irá precedida por prefijo *IF*, y las siguientes por el prefijo *AND* u *OR* indistintamente. Sin embargo, cuando se mezclan las cláusulas *AND* y *OR*, el operador *OR* tiene precedencia sobre el operador *AND*. Por ejemplo, *IF A or B and C* es equivalente a *IF (A or B) and C*. Si en realidad lo que se quería decir es *IF A or (B and C)* habrá que utilizar para ello las dos reglas siguientes: *IF A THEN ... IF B and C THEN ...* Por ello, el orden de escritura de las cláusulas de Condición es importante, lo que se refleja en el campo *Orden*.

Las cláusulas de condición deben observar algún atributo asociado a algún objeto de tipo línea o nudo identificado por *IdLinea_Nudo*. Los tipos de objetos contemplados deben ser alguno de los siguientes: *NODE*, *JUNCTION*, *RESERVOIR*, *TANK*, *LINK*, *PIPE*, *PUMP*, *VALVE* o *SYSTEM*. Cuando se utiliza el objeto *SYSTEM* no hay que proporcionar ningún identificativo de Línea o Nudo.

El campo *Atributo* recoge el atributo observado para establecer la condición: *DEMAND*, *HEAD*, *PRESSURE*, *LEVEL*, *FILLTIME*, *DRAINTIME*, *FLOW*, *STATUS* (*OPEN*, *CLOSED*, or *ACTIVE*) o *SETTING*.

- Los siguientes atributos pueden aplicarse a los objetos tipo Nudo: *DEMAND*, *HEAD* o *PRESSURE*.

- Los siguientes a los objetos tipo Depósito: *LEVEL*, *FILLTIME* (horas requeridas para llenar un depósito) o *DRAINTIME* (horas requeridas para vaciar un depósito).
- Los siguientes a los objetos tipo Línea: *FLOW*, *STATUS* (*OPEN*, *CLOSED*, or *ACTIVE*) o *SETTING* (velocidad de una bomba, o consigna de una válvula).
- Los siguientes atributos pueden aplicarse al objeto tipo *SYSTEM*: *DEMAND* (demanda total del sistema), *CLOCKTIME* (hora real del día, seguida del sufijo *AM* ó *PM*) o *TIME* (horas desde el comienzo de la simulación, expresada como hora decimal o con el formato horas: minutos).

El campo *Relacion* almacena el tipo de relación condicional considerada entre el valor actual del *Atributo* y su *Valor de Referencia*. Los operadores de *Relacion* deben ser alguno de los siguientes: = , < , > , <= , >= , <> , IS , NOT , BELOW , ABOVE.

El campo *ValorRef* indica el valor del *Atributo* que se tomará como referencia para llevar a cabo las acciones previstas en caso afirmativo o en caso negativo. Cuando el *Atributo* es *STATUS* el valor de referencia puede ser un texto, en cuyo caso se almacenará en el campo *EstadoRef*. Si el atributo es *TIME*, el tiempo transcurrido desde el inicio de la simulación será calculado por diferencia entre el instante inicial de la consulta y la *FecAltContrComp*, de modo que el valor del campo *ValorRef* será ignorado.

El tiempo de vigencia del conjunto de condiciones de una ley de control compuesta será el mismo que el de la propia ley de Control.

Una Ley de Control Compuesta puede analizar una o más Condiciones a la hora de ser aplicada o no. La relación será pues del tipo 1 a 1 o muchos.

El Atributo de una Línea (ya sea Tubería, Bomba o Válvula) puede utilizarse como Condición en ninguna, una o muchas Leyes de Control Compuestas. La relación será pues de 1 a 0 o muchos.

ACCIONES DE LAS LEYES DE CONTROL BASADAS EN REGLAS - Tabla 'Acc_ContrComp'

La tabla de Acciones recoge las Acciones que forman parte de una determinada ley de control compuesta, identificada por el campo *IdContrComp*.

Las diferentes Acciones a tomar deben ir precedidas por un prefijo almacenado en el campo *TipoAccion*, que puede ser: *THEN*, *AND* o *ELSE*. Las acciones que siguen a la cláusula *THEN* se aplicarán en caso de cumplirse todas las condiciones, y las que siguen a la cláusula *ELSE* en caso de no cumplirse. En uno y otro caso se puede desencadenar más de una acción, cada una de las cuales debe ir precedida por la cláusula *AND*. Por ello, el orden de las cláusulas de Acción es importante, lo que se refleja en el campo *Orden*.

Todas las cláusulas de acción se deben aplicar sobre alguna línea, cuyo tipo se almacena en *TipoLinea*, y su identificativo en el campo *IdLinea*.

Los tipos de línea pueden ser: *LINK* / *PIPE* / *PUMP* o *VALVE*.

Su estado final puede ser CLOSED u OPEN (en cuyo caso se almacena en el campo *Estado*) o bien la consigna de una válvula o la velocidad relativa de una bomba, en cuyo caso se almacena en el campo *Consigna*.

El tiempo de vigencia del conjunto de acciones de una ley de control compuesta será el mismo que el de la propia ley de control

Una Ley de Control Compuesta puede desencadenar una o más Acciones, en caso de que se cumplan o no las condiciones. La relación será pues del tipo 1 a 1 o muchos.

Una Línea (ya sea Tubería, Bomba o Válvula) puede tener aplicada sobre ella ninguna, una o muchas Leyes de Control Compuestas. La relación será pues de 1 a 0 o muchos.

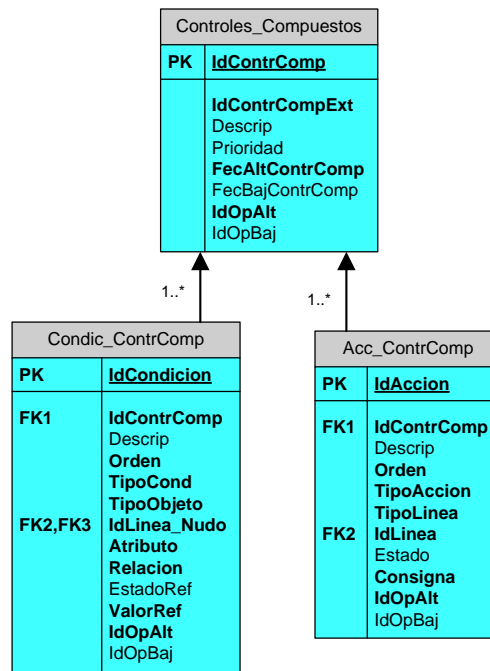


FIGURA 132. TABLAS DE CONTROLES COMPUESTOS.

MANIOBRAS DE LAS VÁLVULAS DE CORTE - Tabla 'Maniobras_ValvCorte'

La tabla de maniobras contiene las maniobras efectuadas sobre las válvulas de corte, desde que se lleva el seguimiento de las instalaciones. Entre ellas cabe destacar las maniobras efectuadas sobre las válvulas frontera que delimitan a los diferentes sectores hidrométricos, cuyo efecto puede ser notable a la hora de evaluar los rendimientos de cada sector.

Maniobras_ValvCorte	
PK	IdManValvCorte
FK1	IdManValvCorteExt Descrip IdValvCorte TipoManiobra CoefPerdMen FecManiobra IdOpAlt IdOpBaj

FIGURA 133. TABLA DE MANIOBRAS DE LAS VÁLVULAS DE CORTE.

Toda maniobra debe afectar a alguna de las válvulas de corte registradas e identificadas por el campo *IdValvCorte*. Se distinguen tres tipos de maniobra posibles que se almacenará en el campo *TipoManiobra*: Apertura (A), Cierre (C) o Media Carrera (M). Normalmente las maniobras suelen ser de Apertura o Cierre, pero se contempla la posibilidad de que se detecte una válvula mal cerrada (Media Carrera), lo que obligaría a introducir un coeficiente de pérdidas menores en la tubería sobre la que asienta, a fin de simular su efecto hidráulico. Si las maniobras son solo de *Cierre* o *Apertura*, estas deben alternarse en el tiempo. Si es de *Media Carrera*, puede ocurrir cualquier secuencia.

Aunque las válvulas de corte pueden permanecer un tiempo determinado como Cerradas o Abiertas, en la tabla sólo se reflejará en el campo *FecManiobra* la fecha y hora de la actuación, de modo que los tiempos en que ésta permanece cerrada o abierta pueden deducirse al contrastar los diferentes eventos que operan sobre la válvula. Este criterio difiere del mantenido hasta ahora para identificar el tiempo de vida útil de los diferentes elementos a través de la fecha de alta *FecAlt* y la fecha de baja *FecBaj*, puesto que sobre una válvula de corte pueden producirse muchas maniobras a lo largo del tiempo.

Una Válvula de Corte puede ser Maniobrada ninguna, una o muchas veces a lo largo de su vida útil (con independencia de si la maniobra es de cierre o de apertura). La relación será pues de 1 a 0, 1 ó muchos.

PUNTOS DE INYECCIÓN DE CALIDAD - Tabla 'Inyec_Calidad'

La tabla de inyecciones de calidad afecta a las fuentes contaminantes, las cuales quedan identificadas por el campo *IdFteCont*.

Inyec_Calidad	
PK	IdInyecCal
FK1	IdInyecCalExt Descrip IdFteCont TipoInyec Intensidad HoraCivil FecAltInyec FecBajInyec IdOpAlt IdOpBaj

FIGURA 134. TABLA DE INYECCIONES DE CALIDAD.

Recoge los valores asignados a la intensidad de la inyección, medida como concentración del caudal inyectado, como caudal másico inyectado, como concentración a la salida del punto de inyección, o como incremento de la concentración entre los puntos anterior y posterior al punto de inyección, dependiendo del tipo de fuente contaminante sobre el que se aplique.

En general, la variación de la intensidad de la inyección es declarada en los modelos a través de una curva de modulación en el tiempo, pero es raro el caso en que el valor de dicha intensidad difiera de hora en hora, más aún ésta es regulada normalmente por algún automatismo. Lo usual es mantener el valor de la intensidad constante o modificarlo a intervalos de tiempo prolongados. También puede suceder que se programen diversos valores a lo largo de un día, incluyendo la parada, de forma que el esquema de inyección se repita día a día. La estructura de la tabla *Inyec_Calidad* pretende responder de forma efectiva a esta casuística.

Se distinguen por ello dos formas de tratar los valores de la Intensidad recogidos en la tabla: como valores Puntuales (P) o como valores Repetitivos (R). En el primer caso se supondrá que el valor de la Intensidad indicado se aplica a partir de la fecha y hora almacenados en *FecAltInyec* en adelante. Este valor solo será modificado por otro nuevo valor introducido en una fecha posterior. El campo *FecBajInyec* no se aplica en este caso.

Si la intensidad de la inyección se modifica de forma repetitiva todos los días, en el campo *HoraCivil* se almacenará la hora del día en que se aplica cada nuevo valor de la intensidad. Esta secuencia se repetirá todos los días desde la fecha de alta de la secuencia, recogida en el campo *FecAltInyec*, hasta la fecha de baja de la misma, recogida en el campo *FecBajInyec*.

A partir de esta información, puede configurarse una curva de modulación completa para modelar la variación de la intensidad de la fuente contaminante en uno u otro caso.

Si lo que se desea es imponer el valor de la intensidad medida en el punto de inyección hora a hora por algún instrumento, los valores de la intensidad deberían leerse en este caso de las tablas de mediciones que se comentan más adelante, y ser tratados al igual que se haría para imponer la consigna de una válvula o una bomba a partir de las lecturas de los valores de campo, configurando la curva de modulación a partir de éstos, y adaptada al periodo de la consulta.

En una Fuente Contaminante debe especificarse la Intensidad de su Inyección al menos una vez, pero también puede especificarse múltiples valores de ésta a lo largo del tiempo. La relación será pues de 1 a 1 ó muchos.

A1.1.5 Tablas de Mediciones

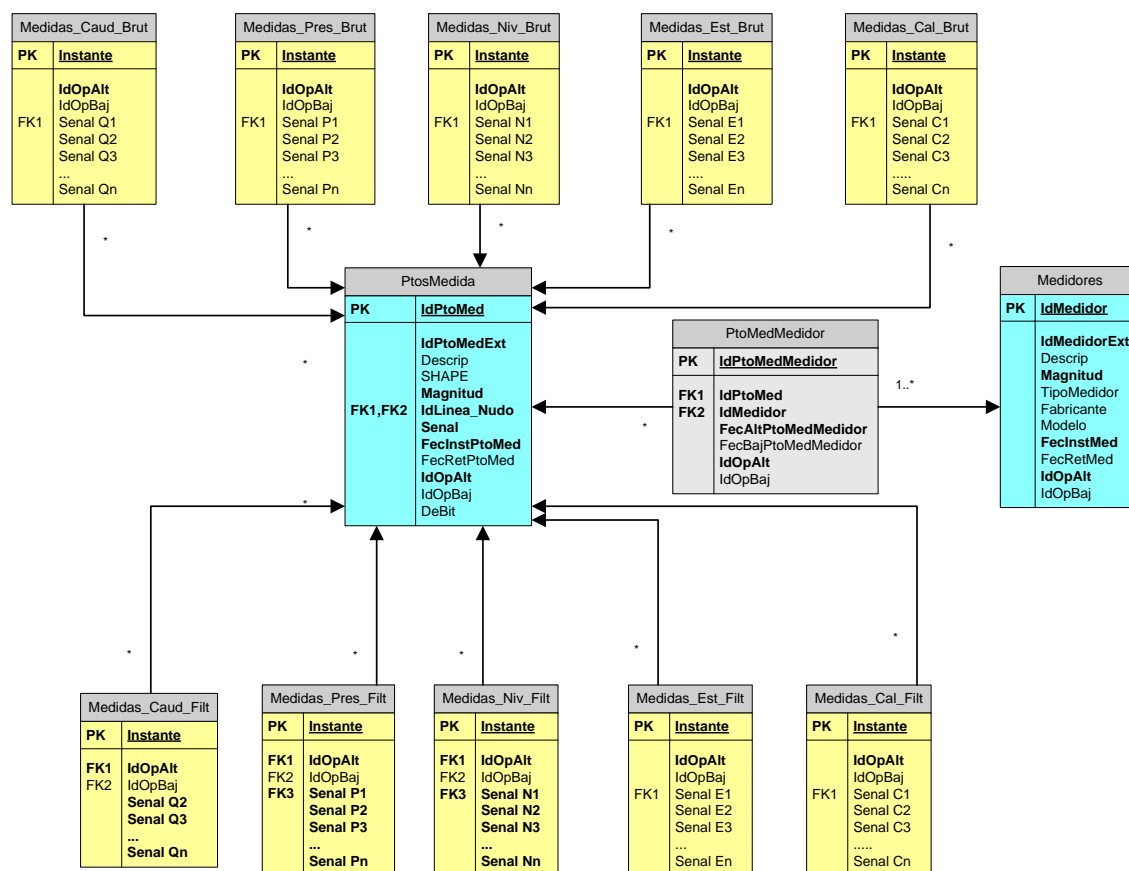


FIGURA 135. TABLAS DE MEDICIONES.

MEDIDORES - Tabla 'Medidores'

La Tabla de Medidores contiene la definición y propiedades físicas de todos los Medidores instalados actualmente o que han estado activos en algún momento en la red.

Un Medidor es un instrumento físico capaz de detectar el valor de una variable física propia del Punto de Medida en que está alojado y mostrarlo, almacenarlo o transmitirlo. En la misma tabla se almacenan conjuntamente todos los medidores existentes, diferenciándose entre ellos básicamente por la Magnitud medida y por el Tipo de Medidor, que variará en cada caso (mecánico, electromagnético o ultrasónico para caudales; manómetro o transductor para presiones; sonda capacitiva, flotador o ultrasonidos para niveles, etc). Además para cada Medidor se contempla especificar el Fabricante y el Modelo, lo que puede ser relevante a la hora de valorar el error de las medidas.

Los Medidores están asociados a un Punto de Medida, y no a la tubería o nudo en que se mide la variable física. De este modo un Punto de Medida puede alojar varios Medidores a lo largo de su vida (por reposición de éstos), mientras que un mismo Medidor puede instalarse en diversos Puntos de Medida, tras su retirada provisional y reparación. Por otra parte, el *IdSenal* de la señal medida se asocia más bien al Punto

de Medida y no al Medidor, por facilitar posteriormente el cálculo de los volúmenes transitados.

Un Medidor debe estar obligatoriamente asociado a algún Punto de Medida mientras tenga lecturas. De lo contrario podría haber pérdida de información.

Un Medidor posee unas fechas de instalación y retirada `FecInstMed` y `FecRetMed`, que se asocian con el tiempo de vida del Medidor, y no con el periodo en que está instalado en un determinado Punto de Medida, lo que queda reflejado en la tabla `PtoMedMedidor`. De este modo, a partir de `FecInstMed` se puede calcular la edad del medidor, lo que puede también tenerse en cuenta a la hora de evaluar el error de medida.

Un medidor debe estar necesariamente asociado a un punto de medida. Además, la asociación del medidor al punto de medida puede tener un tiempo de vida limitado, ya que el medidor podría retirarse del sistema o bien ser instalado en cualquier otro punto de medida.

PUNTOS DE MEDIDA - Tabla 'PtosMedida'

La Tabla de Puntos de Medida aloja la definición y propiedades de los Puntos de Medida.

Los Puntos de Medida son puntos de la red, con una ubicación física determinada, y preparados para alojar algún tipo de medidor que registre los valores de la variable hidráulica medida de forma continua. En la práctica los valores de la variable medida pueden ser registrados por un data-logger o bien teledados desde un puesto central y almacenados por el sistema SCADA.

En la misma tabla se integran todos los puntos de medida, independientemente de la variable o magnitud medida. Se contemplan por ahora tres tipos de medidores en lo que respecta a la magnitud medida: caudales, presiones o niveles, lo que se refleja en el campo `Magnitud`.

Además los Puntos de Medida deben estar asociados bien a una Línea del modelo (medida de caudales o estado de bombas) o a un Nudo del modelo (medida de presiones, niveles o calidad). Su identificador se registra en el campo `IdLinea_Nudo`.

Por otra parte, los valores medidos se almacenan en otra tabla, estructurada por columnas. Cada columna o campo se reserva para alojar los valores de la variable leídos por un medidor determinado alojado en dicho punto de medida. El nombre del campo en la tabla de medidas que alojará los valores medidos se especifica en `Senal`.

No se ha contemplado por ahora ninguna propiedad física característica del Punto de Medida, pero podría añadirse en el futuro, como profundidad, tipo arqueta, accesibilidad, existencia acometida eléctrica, estación remota o data-logger, etc

Finalmente, todo Punto de Medida debe tener una fecha de instalación `FecInsPtoMed` que corresponde a la fecha en que se deja preparada la toma para instalar el medidor y una fecha de retirada `FecRetPtoMed` que sería la fecha en que dicho punto deja de ser operativo para seguir alojando un medidor.

Un punto de medida puede tener asociado o no un medidor aunque lo habitual será que tenga asociado algún medidor. Además, la asociación del punto de medida con el medidor puede tener un tiempo de vida limitado, siempre encajado dentro del tiempo de vida del punto de medida y del tiempo de pertenencia del medidor al modelo.

En principio, un Nudo solo podría tener asociado en un momento determinado un único Punto de Medida (de presión o nivel) o bien ninguno, con lo que la relación debería ser de 1 a cero o uno. Sin embargo, la relación de 1 a cero o muchos, abre la posibilidad de que varios Puntos de Medida estén asociados al mismo Nudo simultáneamente, lo que exigiría que midieran magnitudes diferentes (p.ej. presión, nivel o calidad) o al menos que dieran lugar a señales diferentes (con distintos medidores). También cabe la posibilidad de que midiendo la misma magnitud, no tengan coexistencia en el tiempo, por ejemplo, si se declara la fecha de instalación del segundo punto de medida (de la misma magnitud y asociado al mismo Nudo) con posterioridad a la fecha de retirada del primer punto de medida (en tal caso deberían tener también el campo *Senal* diferente).

En cualquier caso, la *FecInstPtoMed* deberá ser siempre igual o posterior a la *FecAltNudo* del Nudo asociada y la *FecRetPtoMed* anterior o igual a la *FecBajNudo* del Nudo asociado.

En principio, una Línea solo podría tener asociado en un momento determinado un único Punto de Medida (de caudal) o bien ninguno, con lo que la relación debería ser de 1 a cero o uno. Sin embargo, la relación de 1 a cero o muchos, abre la posibilidad de que varios Puntos de Medida estén asociados a la misma Línea simultáneamente, lo que exigiría que midieran magnitudes diferentes (p.ej. caudal, velocidad, pérdida unitaria, calidad) al menos que dieran lugar a señales diferentes (con distintos medidores, por ejemplo, una doble medición del caudal por garantía). También cabe la posibilidad de que midiendo la misma magnitud, no tengan coexistencia en el tiempo, por ejemplo, si se declara la fecha de instalación del segundo punto de medida (de la misma magnitud y asociado a la misma Línea) con posterioridad a la fecha de retirada del primer punto de medida (en tal caso deberían tener también el campo *Senal* diferente).

En cualquier caso, la *FecInstPtoMed* deberá ser siempre igual o posterior a la *FecAltLinea* de la Línea asociada y la *FecRetPtoMed* anterior o igual a la *FecBajLinea* de la Línea asociada.

ASOCIACIONES ENTRE PUNTOS DE MEDIDA Y MEDIDORES - Tabla 'PtoMedMedidor'

Tabla de asociaciones entre Puntos de Medida y Medidores.

Un Punto de Medida puede tener alojado o no un Medidor, pudiendo estar a la espera de tener alguno, o estar desprovisto de él por reparación. También puede suceder que a lo largo de la vida del Punto de Medida aloje a varios Medidores distintos, en cuyo caso los periodos de vida de las diferentes asociaciones no pueden superponerse.

También puede suceder que un mismo Medidor se aloje en distintos Puntos de Medida a lo largo de su existencia. Ahora bien, todo Medidor debe estar asociado a un Punto de Medida desde el momento en que genera lecturas. Por otra parte, cuando se asocia

un Medidor a un Punto de Media los campos Magnitud de ambas entidades deben coincidir.

Finalmente cabe indicar que las fechas de alta y baja de la asociación Punto de Medida y Medidor, FecAltPtoMedMedidor y FecBajPtoMedMedidor, deben estar siempre encajadas entre los tiempos de vida del Punto de Medida y del Medidor.

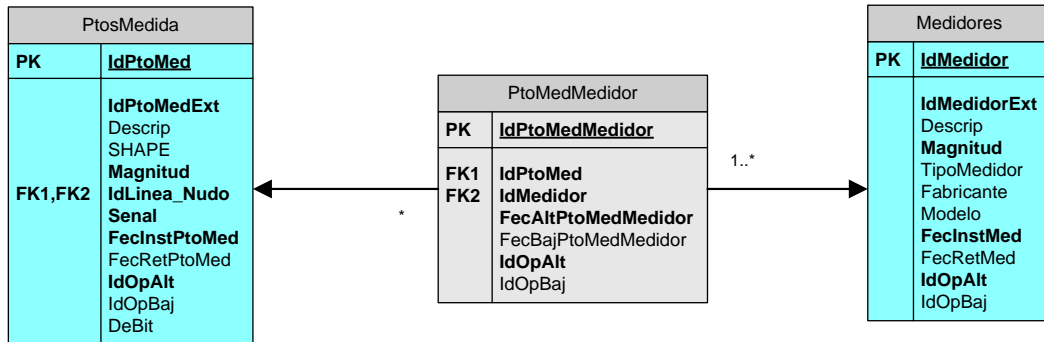


FIGURA 136. TABLAS DE PUNTOS DE MEDIDA Y MEDIDORES.

TABLAS DE MEDIDAS MEDIDAS

Existen tablas que almacenan el conjunto de medidas de campo en bruto tanto para Caudal como Presión, Nivel, Estado de Bombas y Calidad. Son las siguientes:

Medida_Caud_Brut: Tabla de los DATOS DE CAUDAL registrados por los diferentes caudalímetros, procedentes del SCADA o de un data-logger. Los datos almacenados son los BRUTOS. Las diferentes señales de caudal se almacenan en columnas. Cada fila corresponde a un instante de lectura, que se supone el mismo para todas las señales. La frecuencia de lectura de la tabla es HORARIA.

Cada Punto de Medida de Caudal tiene asignado un identificador IdSenal, el cual debe coincidir con alguno de los campos de la tabla Medidas_Caud_Brut.

Puesto que la tabla Medidas_Caud_Brut no guarda las leyes de normalización, no se puede establecer una cardinalidad propiamente dicha. Caso de normalizarse la estructura de la tabla, su cardinalidad sería de 1 a 0, 1 o muchos, puesto que un Punto de Medida puede no generar ningún dato, uno o muchos (lo más habitual)

Medidas_Pres_Brut: Tabla de los DATOS DE PRESION registrados por los diferentes manómetros, procedentes del SCADA o de un data-logger. Los datos almacenados son los BRUTOS. Las diferentes señales de presión se almacenan en columnas. Cada fila corresponde a un instante de lectura, que se supone el mismo para todas las señales. La frecuencia de lectura de la tabla es HORARIA.

Cada Punto de Medida de Presión tiene asignado un identificador IdSenal, el cual debe coincidir con alguno de los campos de la tabla Medidas_Pres_Brut.

Puesto que la tabla Medidas_Pres_Brut no guarda las leyes de normalización, no se puede establecer una cardinalidad propiamente dicha. Caso de normalizarse la estructura de la tabla, su cardinalidad sería de 1 a 0, 1 o muchos, puesto que un Punto de Medida puede no generar ningún dato, uno o muchos (lo más habitual).

Medidas_Niv_Brut: Tabla de los DATOS DE NIVEL registrados por las diferentes sondas de nivel, procedentes del SCADA o de un data-logger. Los datos almacenados son los BRUTOS. Las diferentes señales de nivel se almacenan en columnas. Cada fila corresponde a un instante de lectura, que se supone el mismo para todas las señales. La frecuencia de lectura de la tabla es HORARIA.

Cada Punto de Medida de Nivel tiene asignado un identificador IdSenal, el cual debe coincidir con alguno de los campos de la tabla Medidas_Niv_Brut.

Puesto que la tabla Medidas_Niv_Brut no guarda las leyes de normalización, no se puede establecer una cardinalidad propiamente dicha. Caso de normalizarse la estructura de la tabla, su cardinalidad sería de 1 a 0, 1 o muchos, puesto que un Punto de Medida puede no generar ningún dato, uno o muchos (lo más habitual).

Medidas_Est_Brut: Tabla de los DATOS DE ESTADOS registrados para elementos como Bombas y Válvulas, susceptibles de tener un estado o posición definido, procedentes del SCADA o de un data-logger. Los datos almacenados en esta tabla son los BRUTOS. Las diferentes señales de Estado se almacenan en columnas. Cada fila corresponde a un instante de lectura, que se supone el mismo para todas las señales. La frecuencia de lectura de la tabla es HORARIA.

Cada Punto de Medida de Nivel tiene asignado un identificador IdSenal, el cual debe coincidir con alguno de los campos de la tabla Medidas_Est_Brut.

Puesto que la tabla Medidas_Est_Brut no guarda las leyes de normalización, no se puede establecer una cardinalidad propiamente dicha. Caso de normalizarse la estructura de la tabla, su cardinalidad sería de 1 a 0, 1 o muchos, puesto que un Punto de Medida puede no generar ningún dato, uno o muchos (lo más habitual).

Medidas_Cal_Brut: Tabla de los DATOS DE CALIDAD como cloro residual, conductividad, etc, registrados en ciertos puntos de la red, procedentes del SCADA (medida en continuo), de un data-logger, o bien de un muestreo periódico. Los datos almacenados en esta tabla serán los BRUTOS. Las diferentes señales de Calidad se almacenan en columnas. Cada fila corresponde a un instante de lectura, que se supone el mismo para todas las señales. Si se pretenden detectar diversos parámetros de calidad en un mismo punto, habrá que diferenciarlos declarando un Punto de Medida distinto por cada parámetro de calidad, a través del cual se asociará al nuevo parámetro la señal correspondiente en la tabla. La frecuencia de lectura de la tabla es HORARIA. Si la medida se toma periódicamente y solo en ciertos instantes, basta con dejar en blanco las mediciones correspondientes a las horas que queden fuera de los instantes de medición.

Cada Punto de Medida de Nivel tiene asignado un identificador IdSenal, el cual debe coincidir con alguno de los campos de la tabla Medidas_Cal_Brut.

Puesto que la tabla Medidas_Cal_Brut no guarda las leyes de normalización, no se puede establecer una cardinalidad propiamente dicha. Caso de normalizarse la estructura de la tabla, su cardinalidad sería de 1 a 0, 1 o muchos, puesto que un Punto de Medida puede no generar ningún dato, uno o muchos (lo más habitual).

Existen también tablas que almacenan el conjunto de medidas filtradas de Caudal, Presión, Nivel, Estado de Bombas y Calidad. Son las siguientes:

Medidas_Caud_Filt: Tabla de los DATOS DE CAUDAL registrados por los diferentes caudalímetros, procedentes del SCADA o de un data-logger. Los datos se asumen ya FILTRADOS. Las diferentes señales de caudal se almacenan en columnas. Cada fila corresponde a un instante de lectura, que se supone el mismo para todas las señales. La frecuencia de lectura de la tabla es HORARIA.

Cada Punto de Medida de Caudal tiene asignado un identificador IdSenal, el cual debe coincidir con alguno de los campos de la tabla Medidas_Caud_Filt.

Puesto que la tabla SCADA_Q_Filt no guarda las leyes de normalización, no se puede establecer una cardinalidad propiamente dicha. Caso de normalizarse la estructura de la tabla, su cardinalidad sería de 1 a 0, 1 o muchos, puesto que un Punto de Medida puede no generar ningún dato, uno o muchos (lo más habitual).

Medidas_Pres_Filt: Tabla de los DATOS DE PRESION registrados por los diferentes manómetros, procedentes del SCADA o de un data-logger. Los datos se asumen ya FILTRADOS. Las diferentes señales de presión se almacenan en columnas. Cada fila corresponde a un instante de lectura, que se supone el mismo para todas las señales. La frecuencia de lectura de la tabla es HORARIA.

Cada Punto de Medida de Presión tiene asignado un identificador IdSenal, el cual debe coincidir con alguno de los campos de la tabla Medidas_Pres_Filt.

Puesto que la tabla SCADA_P_Filt no guarda las leyes de normalización, no se puede establecer una cardinalidad propiamente dicha. Caso de normalizarse la estructura de la tabla, su cardinalidad sería de 1 a 0, 1 o muchos, puesto que un Punto de Medida puede no generar ningún dato, uno o muchos (lo más habitual).

Medidas_Niv_Filt: Tabla de los DATOS DE NIVEL registrados por las diferentes sondas de nivel, procedentes del SCADA o de un data-logger. Los datos se asumen ya FILTRADOS. Las diferentes señales de nivel se almacenan en columnas. Cada fila corresponde a un instante de lectura, que se supone el mismo para todas las señales. La frecuencia de lectura de la tabla es HORARIA.

Cada Punto de Medida de Nivel tiene asignado un identificador IdSenal, el cual debe coincidir con alguno de los campos de la tabla Medidas_Niv_Filt.

Puesto que la tabla Medidas_Niv_Filt no guarda las leyes de normalización, no se puede establecer una cardinalidad propiamente dicha. Caso de normalizarse la estructura de la tabla, su cardinalidad sería de 1 a 0, 1 o muchos, puesto que un Punto de Medida puede no generar ningún dato, uno o muchos (lo más habitual).

Medidas_Est_Filt: Tabla de los DATOS DE ESTADOS registrados para elementos como Bombas y Válvulas, susceptibles de tener un estado o posición definido, procedentes del SCADA o de un data-logger. Los datos se asumen ya FILTRADOS. Las diferentes señales de Estado se almacenan en columnas. Cada fila corresponde a un instante de lectura, que se supone el mismo para todas las señales. La frecuencia de lectura de la tabla es HORARIA.

Cada Punto de Medida de Nivel tiene asignado un identificador IdSenal, el cual debe coincidir con alguno de los campos de la tabla Medidas_Est_Filt.

Puesto que la tabla Medidas_Est_Filt no guarda las leyes de normalización, no se puede establecer una cardinalidad propiamente dicha. Caso de normalizarse la estructura de la tabla, su cardinalidad sería de 1 a 0, 1 o muchos, puesto que un Punto de Medida puede no generar ningún dato, uno o muchos (lo más habitual).

Medidas_Cal_Filt: Tabla de los DATOS DE CALIDAD como cloro residual, conductividad, etc, registrados en ciertos puntos de la red, procedentes del SCADA (medida en continuo), de un data-logger, o bien de un muestreo periódico. Los datos se asumen ya FILTRADOS. Las diferentes señales de Calidad se almacenan en columnas. Cada fila corresponde a un instante de lectura, que se supone el mismo para todas las señales. Si se pretenden detectar diversos parámetros de calidad en un mismo punto, habrá que diferenciarlos declarando un Punto de Medida distinto por cada parámetro de calidad, a través del cual se asociará al nuevo parámetro la señal correspondiente en la tabla. La frecuencia de lectura de la tabla es HORARIA. Si la medida se toma periódicamente y solo en ciertos instantes, basta con dejar en blanco las mediciones correspondientes a las horas que queden fuera de los instantes de medición.

Cada Punto de Medida de Nivel tiene asignado un identificador IdSenal, el cual debe coincidir con alguno de los campos de la tabla Medidas_Cal_Filt.

Puesto que la tabla Medidas_Cal_Filt no guarda las leyes de normalización, no se puede establecer una cardinalidad propiamente dicha. Caso de normalizarse la estructura de la tabla, su cardinalidad sería de 1 a 0, 1 o muchos, puesto que un Punto de Medida puede no generar ningún dato, uno o muchos (lo más habitual).

A1.1.6 Tablas de Sectores

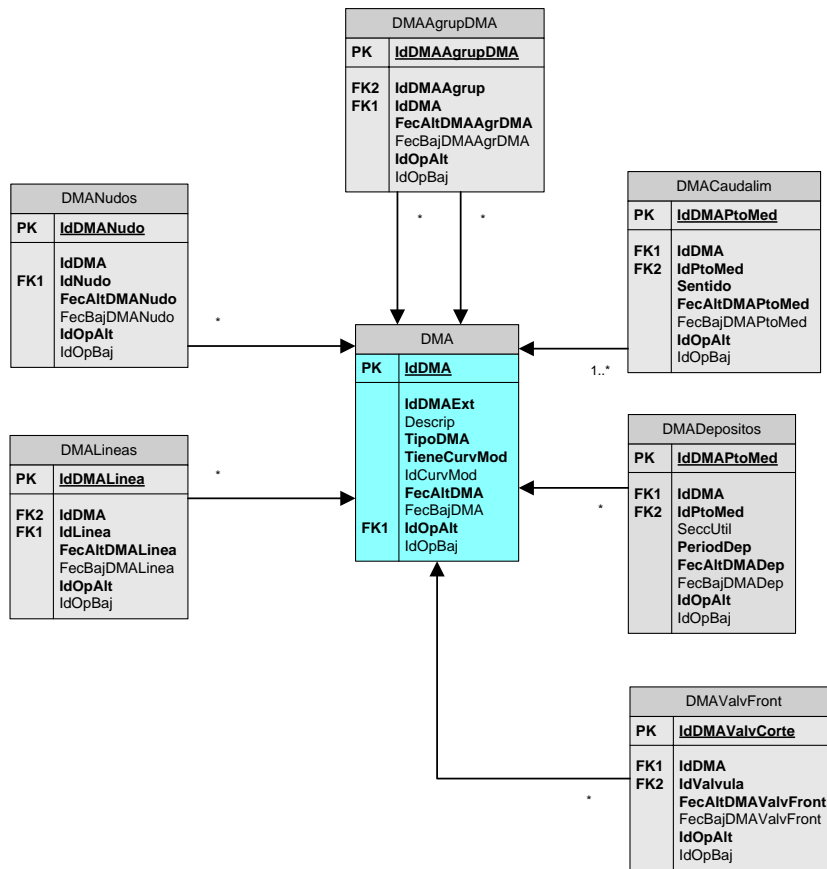


FIGURA 137. TABLAS DE SECTORES.

SECTORES HIDROMÉTRICOS (DMA's) - Tabla 'DMA'

Tabla que contiene todos los Sectores Hidrométricos (o DMA's) considerados en el modelo.

Un Sector Hidrométrico es un sector de la red, cuyas entradas y salidas de caudal están controladas por equipos de medida (caudalímetros).

Se consideran dos tipos de DMA's. Las DMA's simples quedan configuradas por la ubicación de los caudalímetros y válvulas frontera. En principio todas las DMA's simples deben ser contiguas, sin superposición alguna, y cubrir toda la extensión de la red. Puesto que es posible que solo interese analizar algunas DMA's simples sin cubrir toda la red, el problema puede resolverse declarando siempre una DMA Simple Exterior, que acoja a todos los elementos de la red no pertenecientes a las restantes DMA's simples declaradas. En cualquier caso, la DMA exterior nunca se tendrá en cuenta a efectos de balances, tan solo a efectos topológicos.

Una DMA agrupada es un conjunto de DMA's simples que pueden ser adyacentes o no. Las DMA's agrupados no tienen por qué cubrir toda la red ni ser excluyentes. Es decir, dos DMA's agrupadas pueden compartir una misma DMA básica. Además las DMA's agrupadas pueden anidarse entre sí para configurar diferentes niveles de agrupación.

Todas las DMAs, sean simples o agrupadas, convienen en la misma tabla de definición. Las propiedades físicas de una DMA que la caracterizan, sea simple o agrupada, son su tipo (simple o agrupada), que reside en el campo TipoDMA, la indicación de si posee o no una curva de modulación asociada (campo TieneCurvMod), el IdCurvMod de la curva de modulación de la demanda asociada en su caso, y las fechas de creación y destrucción de la DMA, FecInstDMA y FecRetDMA respectivamente.

La configuración de una DMA simple se declara en la tabla DMAptoMed y la configuración de las DMAs agrupadas en la tabla DMAAgrup. En cualquier caso, las fechas de creación y destrucción de cualquier DMA simple deben ser anterior y posterior a la declaración de las DMAs agrupadas. Por otra parte, las fechas de creación y retirada de los caudalímetros y válvulas frontera deberán ser anteriores o posteriores respectivamente a las fechas de creación y retirada de las DMAs simples que éstos definen.

Una DMA simple puede pertenecer o no a una DMA agrupada. Una DMA simple podría pertenecer a varias DMA's agrupadas al mismo tiempo, o en períodos diferentes. Así pues, su IdDMA puede aparecer una, muchas o ninguna vez en la tabla DMAAgrup.

Una DMA puede ser de tipo simple o de tipo agrupada. Si la DMA es agrupada, entonces debe aparecer más de una vez en la tabla de relación entre DMA's simples y DMA's agrupadas (DMAAgrupDMA), puesto que una DMA agrupada estará formada usualmente por más de una DMA simple. También es posible que en el proceso de declaración de las DMA's agrupadas inicialmente no contengan ninguna DMA simple o tan solo una.

Una DMA, sea simple o agrupada, debe tener asociado al menos un punto de medida de caudal aunque lo habitual será que tenga asociados varios caudalímetros, por los que el agua entra o sale de la DMA. Además la asociación de la DMA con el punto de medida puede tener un tiempo de vida limitado, siempre encajado dentro del tiempo de vida de la DMA y del tiempo de pertenencia del punto de medida al sistema de distribución.

Una DMA, sea simple o agrupada, puede alojar en su interior varios o ningún depósito de almacenamiento. Además la asociación de la DMA con un determinado depósito puede tener un tiempo de vida limitado, siempre encajado dentro del tiempo de vida de la DMA y del tiempo de vida del punto de medida declarado para registrar sus variaciones de nivel.

Una DMA, sea simple o agrupada, puede tener asociadas muchas válvulas frontera o ninguna. Además la asociación de una DMA con las válvulas frontera puede tener un tiempo de vida limitado, siempre encajado dentro del tiempo de vida de la DMA y de la válvula frontera.

Una DMA debe tener asociado al menos un Nudo, aunque lo habitual será que tenga asociados muchos Nudos. Además la asociación de la DMA con el Nudo puede tener un tiempo de vida limitado, siempre encajado dentro del tiempo de vida de la DMA y del tiempo de pertenencia del Nudo al modelo.

Sin embargo en el proceso de declaración de las DMA's simples es posible que inicialmente no tenga ninguna Nudo asociado, con lo que una DMA simple puede aparecer finalmente 0 ó muchas veces en la tabla DMA Nudos.

Una DMA debe tener asociada al menos una Línea aunque lo habitual será que tenga asociadas muchas Líneas. Además la asociación de la DMA con la Línea puede tener un tiempo de vida limitado, siempre encajado dentro del tiempo de vida de la DMA y del tiempo de pertenencia de la Línea al modelo.

Sin embargo en el proceso de declaración de las DMA's simples es posible que inicialmente no tenga ninguna línea asociada, con lo que una DMA simple puede aparecer finalmente 0 ó muchas veces en la tabla DMA Líneas.

SECTORES HIDROMÉTRICOS AGRUPADOS - Tabla 'DMAAgrupDMA'

Tabla DMAAgrupDMA de declaración de DMAs Agrupadas.

Una DMA Agrupada se define como la agrupación de una serie de DMAs simples o agrupadas, que normalmente serán adyacentes aunque no es obligado. Los caudalímetros que delimitan una DMA Agrupada no se declaran explícitamente, ya que pueden deducirse a partir de las DMAs simples que las configuran.

Las DMAs Agrupadas no tienen por qué ser contiguas, ni cubrir todo el espacio. Algunas pueden compartir una misma DMA. Por otra parte, pueden anidarse para configurar DMAs de mayor jerarquía.

En la práctica, las DMAs agrupadas obedecen al interés por caracterizar el comportamiento de algunas zonas específicas, como por ejemplo las que dependen de un determinado depósito, o por ejemplo las zonas de mayor antigüedad de la red.

Las DMAs agrupadas pueden declararse y destruirse en cualquier momento. La fecha de asociación entre la DMA Agrupada y cada una de las DMAs que la configuran, se almacena en el campo *FecAltDMAAgrDMA*. Dicha fecha deberá ser igual o posterior a la fecha de alta *FecAltDMA* de las DMAs que configuran la DMA Agrupada.

Una DMA puede ser de tipo simple o de tipo agrupada. Si la DMA es agrupada, entonces debe aparecer más de una vez en la tabla de asociación entre DMA's simples y DMA's agrupadas (DMAAgrupDMA), puesto que una DMA agrupada estará formada usualmente por más de una DMA. También es posible que en el proceso de declaración de las DMA's agrupadas inicialmente no contengan ninguna DMA o tan solo una.

Una DMA simple puede pertenecer o no a una DMA agrupada. Una DMA simple podría pertenecer a varias DMA's agrupadas al mismo tiempo, o en periodos diferentes. Así pues, su *IdDMA* puede aparecer una, muchas o ninguna vez en la tabla DMAAgrup.

ASOCIACIONES DE DMA's y CAUDALÍMETROS - Tabla 'DMACaudalim'

Tabla de asociaciones entre DMAs simples o agrupadas y puntos de medida en los que irán instalados los medidores de caudal. Esta tabla almacena los caudalímetros que delimitan a cada una de las DMAs que hay declaradas. Todo caudalímetro debe tener un sentido de paso del flujo previamente definido, que será +1 si el agua entra en la

DMA y -1 si sale de ella. Ello no impide que en algún momento la lectura sea de signo contrario, como puede suceder con los caudalímetros bidireccionales.

En principio una DMA puede tener asociados muchos puntos de medida y además un punto de medida puede estar asociado simultáneamente a más de una DMA. En el caso de ser simples, un punto de medida puede estar asociado como máximo a dos DMAs y si consideramos la DMA externa como una más, de modo que las DMAs simples cubran todo el espacio, entonces estará necesariamente asociado a dos y solo dos DMAs simples.

Aunque la configuración de las DMAs agrupadas queda bien definida en la tabla *DMAAgrupDMA*, es necesario también declarar en esta tabla los puntos de medida que delimitan a las DMAs agrupadas, los cuales se pueden deducir fácilmente de los correspondientes a las DMAs que agrupa, eliminando aquellos que queden en el interior de la DMA agrupada. Ello permitirá diferenciar el cálculo del caudal inyectado a una DMA agrupada del de sus DMAs simples, ya que los periodos de validez de las medidas podrían ser diferentes.

Por tanto, el identificador de la DMA se repetirá tantas veces en esta tabla como puntos de medida/medidores de entrada o salida tenga asociados, es decir, si una DMA tiene 3 caudalímetros (uno de entrada y dos de salida), el nombre de la DMA debe aparecer 3 veces en el campo *IdDMA*, cada una con su sentido adecuado.

Además, hay que tener en cuenta que un punto de medida/medidor puede pertenecer simultáneamente a más de una DMA (simples o compuestas), por lo que el nombre del punto de medida/medidor se puede repetir en el campo *IdPtoMed*.

La asociación entre una DMA y un punto de medida puede tener un tiempo de vida limitado, por lo que necesariamente debe declararse al menos la fecha de alta de la asociación, *FecAltDMA PtoMed*, la cual deberá ser igual o posterior a las fechas de instalación tanto del punto de medida *FecInstPtoMed* como del medidor *FecInstMed* y de declaración de la DMA, *FecAltDMA*.

Una DMA, sea simple o agrupada, debe tener asociado al menos un punto de medida de caudal aunque lo habitual será que tenga asociados varios caudalímetros, por los que el agua entra o sale de la DMA. Además, la asociación de la DMA con el punto de medida puede tener un tiempo de vida limitado, siempre encajado dentro del tiempo de vida de la DMA y del tiempo de pertenencia del punto de medida al sistema de distribución.

ASOCIACIONES DE DMA's y DEPÓSITOS - Tabla 'DMADepositos'

Tabla de asociaciones entre DMAs simples o agrupadas y Depósitos interiores a la DMA.

Es posible que en el interior de una DMA quede ubicado uno o más depósitos. Para balances a largo plazo, su volumen de almacenamiento puede ser irrelevante frente al volumen total inyectado, pero en balances a corto plazo, así como para caracterizar curvas de modulación, su papel puede ser importante. Llegados al extremo, cualquier aljibe existente en el interior de la DMA podría ser objeto de declaración como un elemento más a tener en cuenta, para balances a corto plazo.

La declaración de depósitos en el interior de una DMA a efectos de balances es optativa, dependiendo de su capacidad. En cualquier caso, si se declara habrá que declarar también un *IdPtoMed*, para acceder a los datos de variación del nivel, los cuales se alojarán en la tabla *Med_Nivel_Filtr*, así como la Sección útil del depósito, para convertir los niveles en volúmenes.

Si el depósito se declara como elemento cartográfico de la red (no es obligatorio), el *IdPtoMed* quedará opcionalmente asociado con el *IdNudo* del depósito que representa, de modo que su sección puede ser declarada también en la tabla *Depósitos*, donde además las opciones son mayores. En cualquier caso, si se declara aquí la *SeccUtil*, ésta primará sobre la otra, y el depósito se supondrá cilíndrico y sin límites de nivel, lo que permite declarar o no el depósito como elemento cartográfico (por ejemplo se puede obviar para pequeños aljibes).

Por otra parte, no todos los depósitos declarados en la cartografía tienen que estar necesariamente asociados a alguna DMA, salvo que se cubra el espacio completo con una DMA exterior. En efecto, muchas DMAs dejan fuera a los depósitos de suministro, ubicando un medidor de caudal en la tubería o tuberías de salida.

La propiedad *PeriodDep* (periodo de validez del depósito en días) se emplea a efectos de balance hídrico en las DMAs y se refiere al número máximo de días para los que el depósito resulta relevante en términos de volumen suministrado o almacenado por el mismo. Es decir, el volumen suministrado o almacenado por el depósito deberá tenerse en cuenta en el balance de la DMA en la que se localiza si el periodo de consulta es inferior al número de días indicado en este campo. De lo contrario, el depósito se considera irrelevante en términos hídricos.

La asociación entre una DMA y un Depósito tiene una Fecha de Alta y puede tener otra de Baja, porque el depósito se inactive, por ejemplo. Un mismo depósito puede asociarse con diferentes DMAs simples a lo largo de tiempo. Por otra parte, en un momento dado un depósito puede estar asociado a varias DMAs, de las cuales solo una puede ser simple, debiendo ser el resto agrupadas.

Cuando se declara una DMA agrupada, su asociación con los depósitos declarados en las DMAs que agrupa debe reproducirse en esta tabla, ya que la consideración del campo *PeriodDep* puede diferir según el alcance de la DMA.

Una DMA, sea simple o agrupada, puede alojar en su interior varios o ningún depósito de almacenamiento. Además la asociación de la DMA con un determinado depósito puede tener un tiempo de vida limitado, siempre encajado dentro del tiempo de vida de la DMA y del tiempo de vida del punto de medida declarado para registrar sus variaciones de nivel.

ASOCIACIONES DE DMA's y VÁLVULAS FRONTERA - Tabla 'DMAValvFront'

Tabla de asociaciones entre DMAs simples o agrupadas y Válvulas Frontera

En principio una DMA simple puede estar rodeada de muchas válvulas manuales de tipo frontera. Además, una válvula frontera puede pertenecer simultáneamente a más de una DMA simple (dos como máximo). En el caso de considerar la DMA exterior, cada válvula frontera deberá estar asociada a dos y solo dos DMAs simples.

Conviene también declarar en esta tabla las válvulas frontera que delimitan a las DMAs agrupadas, los cuales se pueden deducir fácilmente de los correspondientes a las DMAs que agrupa, eliminando aquellas que queden en el interior de la DMA agrupada. Ello permitirá diferenciar el cálculo del caudal inyectado a una DMA agrupada del de sus DMAs simples, ya que los periodos de vida de unas y otras podrían ser diferentes.

Una DMA, sea simple o agrupada, puede tener asociadas muchas válvulas frontera o ninguna. Además la asociación de una DMA con las válvulas frontera puede tener un tiempo de vida limitado, siempre encajado dentro del tiempo de vida de la DMA y de la válvula frontera.

ASOCIACIONES DE DMA's y NUDOS - Tabla 'DMANudos'

Tabla de asociaciones entre DMAs simples y Nudos

En principio una DMA simple puede contener muchos Nudos, pero un Nudo no puede pertenecer simultáneamente a más de una DMA simple. Con lo cual, el IDNudo de un Nudo debería aparecer una sola vez en esta tabla, mientras que el IdDMA de una DMA básica podría aparecer repetido muchas veces, tantas como Nudos contiene. Sin embargo, las DMAs simples pueden crearse y destruirse con el tiempo, de modo de que un Nudo podría pertenecer a más de una DMA simple, siempre que no haya superposición en el tiempo. Asimismo, los Nudos pueden también darse de alta y de baja en el modelo, incorporando o perdiendo con el tiempo su asociación con la DMA simple que la contiene en ese momento.

En consecuencia, todo Nudo debe aparecer 1 o más veces en la tabla DMANudos, garantizando de este modo que está ligado a alguna DMA (a efectos de balances). Por el contrario una DMA puede aparecer 0 o más veces en la tabla DMANudos, puesto que es posible declarar alguna DMA que no tenga ningún Nudo asociada (por ejemplo, en el proceso de creación de la base de datos). Lo normal será que aparezca tantas veces como Nudos contiene o ha contenido a lo largo de su tiempo de vida.

Cabe destacar finalmente que las DMA's agrupadas no deben figurar en esta tabla, puesto que los Nudos que las configuran se pueden deducir a partir de su relación con las DMA's simples que configuran las DMA's agrupadas.

Una DMA debe tener asociado al menos un Nudo, aunque lo habitual será que tenga asociados muchos Nudos. Además la asociación de la DMA con el Nudo puede tener un tiempo de vida limitado, siempre encajado dentro del tiempo de vida de la DMA y del tiempo de pertenencia del Nudo al modelo.

Sin embargo en el proceso de declaración de las DMA's simples es posible que inicialmente no tenga ninguna Nudo asociado, con lo que una DMA simple puede aparecer finalmente 0 ó muchas veces en la tabla DMANudos.

ASOCIACIONES DE DMA's y LINEAS - Tabla 'DMALineas'

Tabla de asociaciones entre DMAs simples y Líneas. En principio una DMA simple puede contener muchas Líneas, pero una Línea no puede pertenecer simultáneamente a más de una DMA simple. Con lo cual, el IDLínea de una Línea debería aparecer una sola vez en esta tabla, mientras que el IdDMA de una DMA básica podría aparecer repetido

muchas veces, tantas como Líneas contiene. Sin embargo, las DMA's simples pueden crearse y destruirse con el tiempo, de modo de que una Línea podría pertenecer a más de una DMA simple siempre que no haya superposición en el tiempo. Asimismo, las Líneas pueden también darse de alta y de baja en el modelo, incorporando o perdiendo con el tiempo su asociación con la DMA simple que la contiene en ese momento.

En consecuencia, toda Línea debe aparecer 1 o más veces en la tabla DMALineas, garantizando de este modo que está ligada a alguna DMA, y con ello sus nudos extremos (a efectos de balances). Por el contrario una DMA puede aparecer 0 o más veces en la tabla DMALineas, puesto que es posible declarar alguna DMA que no tenga ninguna Línea asociada (por ejemplo, en el proceso de creación de la base de datos). Lo normal será que aparezca tantas veces como Líneas contiene o ha contenido a lo largo de su tiempo de vida.

Cabe destacar finalmente que las DMA's agrupadas no deben figurar en esta tabla, puesto que las líneas que las configuran se pueden deducir a partir de su relación con las DMA's simples que configuran las DMA's agrupadas.

Una DMA debe tener asociada al menos una Línea aunque lo habitual será que tenga asociadas muchas Líneas. Además la asociación de la DMA con la Línea puede tener un tiempo de vida limitado, siempre encajado dentro del tiempo de vida de la DMA y del tiempo de pertenencia de la Línea al modelo.

Sin embargo en el proceso de declaración de las DMA's simples es posible que inicialmente no tenga ninguna línea asociada, con lo que una DMA simple puede aparecer finalmente 0 ó muchas veces en la tabla DMALineas.

A1.1.7 Tablas de Suministros

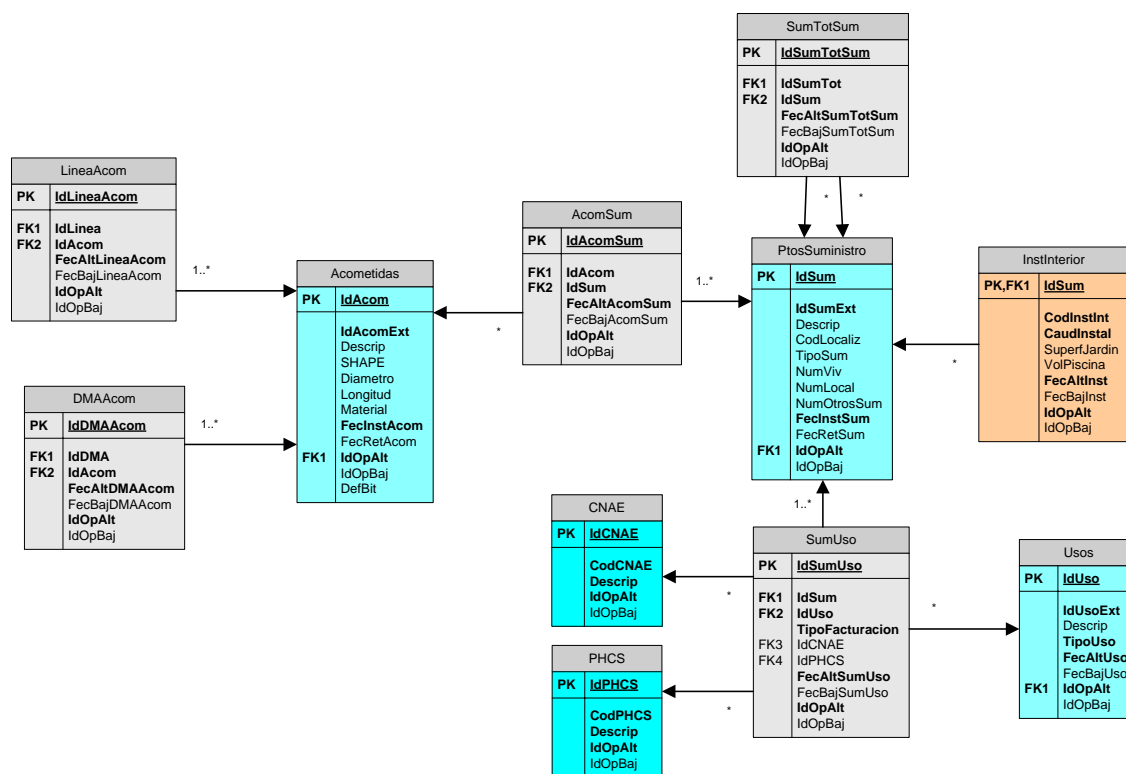


FIGURA 138. TABLAS DE SUMINISTROS.

ACOMETIDAS - Tabla 'Acometidas'

La tabla de acometidas contiene la definición y propiedades físicas de todas las acometidas que han formado parte en algún momento del sistema que distribuye el agua desde las tuberías de servicio hasta los abonados.

Físicamente una acometida es un tramo de tubería que conecta la tubería de servicio de la red de distribución que discurre por la vía pública con los puntos de suministro ubicados a la entrada o en el interior de los inmuebles. Las propiedades físicas fundamentales de una acometida son: el diámetro, longitud y material. La tabla está preparada para almacenar además su trazado a través del campo Shape.

Al añadir una acometida a la base de datos, ésta debe quedar necesariamente asociada a alguna DMA simple (siempre que se contemplen la declaración de DMAs). De lo contrario, el consumo de una acometida podría resultar omitido al efectuar balances por DMAs a través de una consulta.

Asimismo, si se ha construido previamente el modelo de la red y todas sus tuberías están declaradas, toda acometida deberá estar necesariamente asociada a alguna tubería de servicio. De lo contrario, el consumo de la misma podría resultar omitido al trasladar los consumos de las acometidas a los nudos del modelo.

En la tabla de acometidas figuran también las fechas de instalación FecInstAcom y retirada FecRetAcom de cada acometida, las cuales deberán ser anterior y posterior a las fechas de cualquier asociación declarada entre dicha acometida y los punto de

suministro dependiente de ella, así como de cualquier otra declarada entre la acometida asociado con cualquier DMA o tubería.

Toda acometida debe estar asociada necesariamente al menos a una Línea. En caso de estar asociada a más de una Línea, los tiempos de vida de las asociaciones no pueden superponerse, ya que en un momento dado, una acometida deberá entroncar con una única Línea. En caso de cambiar de asociación, las fechas de baja de una y de alta de la siguiente deben ser yuxtapuestas, para evitar la pérdida de caudal.

Toda acometida debe estar necesariamente asociada al menos a una DMA. En algunos casos una Acometida puede estar asociada a más de una DMA, pero en tal caso los tiempos de vida de las DMAs no pueden superponerse, de modo que en un instante determinado una Acometida no puede estar asociada simultáneamente a más de una DMA.

Una acometida puede tener asociados muchos Puntos de Suministro o ninguno. Además la asociación de la Acometida con los Puntos de Suministro puede tener un tiempo de vida limitado, siempre encajado dentro del tiempo de vida de la Acometida y del Punto de Suministro.

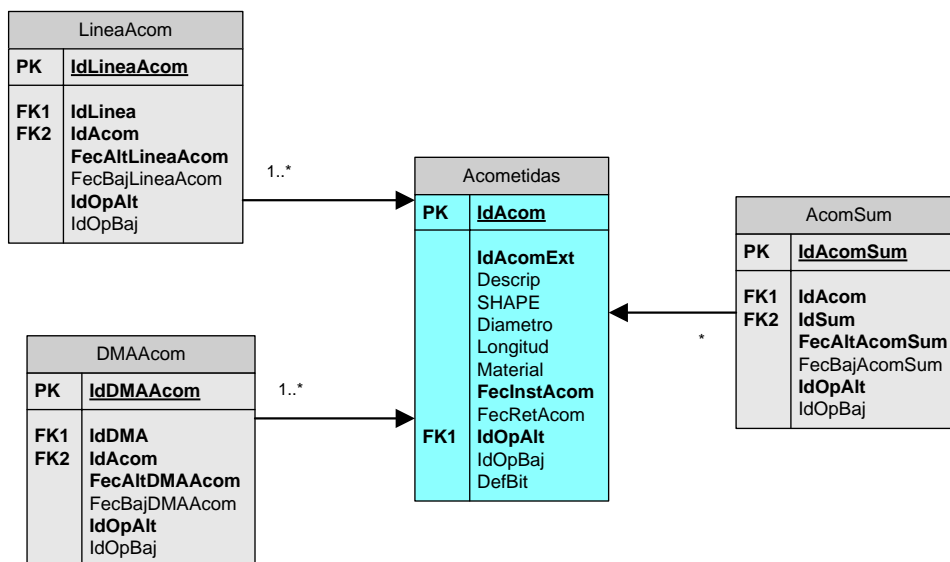


FIGURA 139. TABLAS DE ACOMETIDAS.

PUNTOS DE SUMINISTRO - Tabla 'PtosSuministro'

Para relacionar adecuadamente las acometidas con los contadores de la red, ya se justificó al plantear el modelo conceptual la necesidad de introducir un elemento físico intermedio denominado 'Punto de Suministro'. Un punto de suministro es un punto físico de paso del agua, a través del cual ésta es suministrada a un abonado o a otros puntos de suministro. El punto de suministro identifica las características físicas del punto de enganche de cada usuario a la red, y en él se ubicará usualmente un contador.

La tabla de Suministros contiene la definición y propiedades físicas de todos los puntos de suministro actualmente vigentes o que lo estuvieron en algún momento en el sistema de distribución. Entre dichas propiedades se considera por ahora tan solo propiedad genérica, agrupada bajo el nombre de *CodLocalizacion*, la cual almacenaría el código

de localización del punto de suministro. Por ejemplo, podría utilizarse otro campo para especificar el tipo de alojamiento, pudiendo ser éste una arqueta, una hornacina, el cuarto de contadores, una batería de contadores, el interior de la vivienda del abonado, etc. Sin embargo, ello no se contempla por ahora.

Aunque en la descripción de los puntos de suministro se han diferenciado los tipos de suministro individuales, parciales y totalizadores, desde un punto de vista jerárquico, los puntos de suministro solo pueden ser terminales o totalizadores, lo que se refleja en el campo *TipoSum*. En realidad, el carácter terminal o totalizador de un punto de suministro queda declarado formalmente a través de la tabla de relación *SumSumTot*. Así pues, todos los puntos de suministro, sean terminales o totalizadores, conviven en esta misma tabla, en la que se declaran sus propiedades físicas.

Todo punto de suministro, sea del tipo que sea, debe quedar necesariamente asociado a alguna acometida en el momento en que se añade a la base de datos. De lo contrario el consumo asignado a un suministro podría resultar omitido al acumular éstos para evaluar el consumo de una acometida. Sin embargo, la asociación de un punto de suministro con otro punto de suministro totalizador es optativa, y puede declararse posteriormente, una vez éste dado de alta.

Es importante destacar que a efectos de realizar balances, tan solo se tendrán en cuenta los consumos en los puntos de suministro terminales. Los puntos de suministro totalizadores se emplearán únicamente para corregir los volúmenes inicialmente asignados a los suministros terminales.

Por otra parte, todo suministro de carácter terminal debe estar asociado necesariamente a algún Tipo de Uso. De lo contrario, al efectuar balances de consumos bien por acometidas o bien por tipos de uso, podrían aparecer discrepancias.

Todo suministro tiene asignada una fecha de instalación *FecInstSum* y fecha de retirada optativa *FecRetSum*, las cuales deberán ser anterior y posterior a las fechas de cualquier asociación declarada entre dicho suministro y la acometida de que depende, así como a las fechas de asociación del mismo con cualquier otro suministro del que dependa jerárquicamente, o bien que dependa de él.

Todo Punto de Suministro debe estar necesariamente asociado al menos a una Acometida. En algunos casos un Punto de Suministro puede estar asociado a más de una Acometida, pero en tal caso los tiempos de vida de las Acometidas no pueden superponerse, de modo que en un instante determinado un Punto de Suministro no puede estar asociado simultáneamente a más de una Acometida.

Un suministro debe tener siempre asociado al menos un Tipo de Uso. En otro caso, al acumular el volumen de un suministro por acometidas o DMAs por un lado, y por usos por otro lado, podría haber discrepancias.

La excepción serían los suministros declarados como totalizadores, cuyos volúmenes no se acumulan directamente (solo se utilizan para contraste), y por ello podrían no tener un Uso asociado. Pero como todos los suministros, sean totalizadores o no, se integran en la misma tabla, no cabe hacer distinciones en este punto.

La asociación de un Punto de Suministro con un Tipo de Uso puede tener un tiempo de vida limitado, pero en tal caso, debe yuxtaponerse con otro Tipo de Uso en adelante. El tiempo de vida de la asociación entre Punto de Suministro y Tipo de Uso debe estar siempre encajado entre el tiempo de vida del Punto de Suministro y del Tipo de Uso.

Un punto de suministro puede o no dar servicio a una o varias instalaciones interiores a lo largo de su periodo de vida útil, por lo que se establece una relación de un punto de suministro a cero o muchas instalaciones interiores entre la tabla de suministros y la de instalaciones interiores. No se contempla el caso de que un punto de suministro dé servicio a más de una instalación interior a la vez.

Por último, en la tabla aparecen tres campos de propiedades que hacen referencia al número de viviendas, número de locales comerciales y número de otros suministros alimentados a través del punto de suministro.

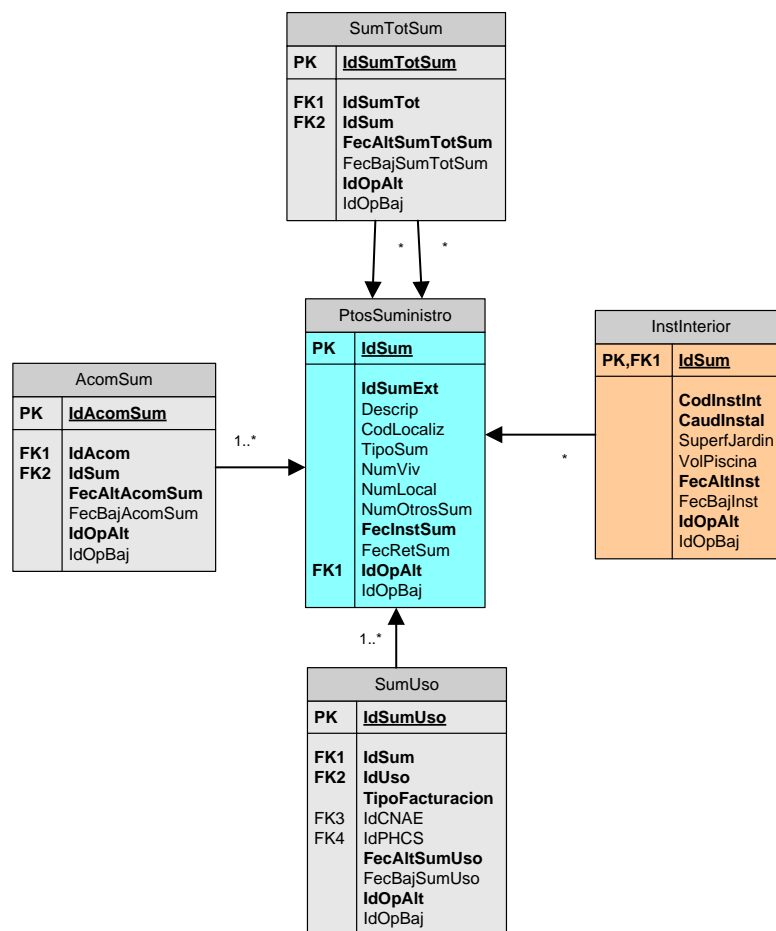


FIGURA 140. TABLAS DE PUNTOS DE SUMINISTRO.

INSTALACIONES INTERIORES - Tabla 'InstInterior'

La tabla de Instalaciones Interiores contiene las características de la instalación interior alimentada a través de un determinado punto de suministro.

Las características recogidas en esta tabla son:

- el código de la instalación interior para suministros colectivos conforme a la clasificación adoptada por la compañía distribuidora.

- El caudal instalado en litros por segundo en la instalación interior.
- La superficie destinada a jardín (caso de que exista) en metros cuadrados y alimentada desde la instalación interior.
- Capacidad en litros de la piscina de la instalación interior (caso de existir).

Toda instalación interior debe estar necesariamente asociada a un punto de suministro. Sin embargo, un punto de suministro puede o no dar servicio a una o varias instalaciones interiores a lo largo de su periodo de vida útil, por lo que la relación entre la tabla de suministros y de instalaciones interiores se considera siempre de un punto de suministro a cero o más instalaciones interiores. En la tabla no se contempla el caso de que un punto de suministro dé servicio a más de una instalación interior a la vez.

FecAltInst y *FecBajInst* recogen respectivamente las fechas de alta y baja de la instalación interior. Estas fechas deben estar encajadas en el tiempo de vida del punto de suministro del que dependen.

USOS - Tabla 'Usos'

La tabla de Usos relaciona los posibles usos o destinos del agua, conforme a la clasificación adoptada por la compañía distribuidora.

Todo Tipo de Uso tendrá asignado como propiedad un campo descriptor y un texto abreviado (DOM, IND, COM, MUN,...) a alojar en el campo TipoUso, que será utilizado posteriormente en informes y diálogos.

Las fechas de creación *FecAltUso* y destrucción o eliminación *FecBajUso* del Tipo de Uso deben ser anterior y posterior a las fechas de cualquier asociación del referido uso con cualquier Punto de Suministro.

Ahora bien, la incorporación de un nuevo Tipo de Uso a la base de datos no exige necesariamente la asociación de éste con ningún Punto de Suministro. Sin embargo, la inversa es en parte cierta, pues como ya se ha dicho, todo punto de suministro terminal debe estar asociado necesariamente a algún tipo de uso. Para evitar incoherencias, siempre es posible comenzar declarando un Tipo de Uso indeterminado, y asignar éste provisionalmente a aquellos puntos de suministro que no estén aún catalogados.

Un Tipo de Uso puede declararse y no estar necesariamente asociado a algún Punto de Suministro, de modo que no aparecería en esta tabla.

Normalmente un mismo Tipo de Uso estará asociado a muchos Puntos de Suministro, y al revés, un Punto de Suministro puede tener muchos Tipos de Uso a lo largo de su vida, pero en cualquier caso dos Tipos de Uso no pueden estar asociados al mismo Punto de Suministro simultáneamente.

ASOCIACIONES DE SUMINISTROS Y SUMINISTROS TOTALIZADORES - Tabla 'SumTotSum'

Esta tabla especifica la relación entre un Punto de Suministro dado y otro posible Punto de Suministro situado aguas arriba que actúa como Totalizador.

Los puntos de suministro, sean terminales o totalizadores, que no tengan ningún otro punto de suministro previo (esto es, que dependen directamente de la acometida), no deben aparecer en esta tabla. En consecuencia no todos los IdSum de los puntos de

suministro declarados en la tabla Suministros tienen que aparecer en la tabla SumSumTot. Ahora bien, en caso de aparecer solo podrán figurar sola vez como IdSum durante el tiempo de vida de la asociación. En caso de aparecer más de una vez, tendrá que ser asociado a otro suministro totalizador distinto, no pudiendo superponerse en este caso los tiempos de vida de una y otra asociación (no se exige aquí la yuxtaposición de los tiempos de vida de las diferentes asociaciones posibles). En definitiva la relación será del tipo 0 o más veces.

En cambio un IdSum dado puede aparecer repetido múltiples veces en la tabla SumSumTot cuando actúa como IdSumTot, esto es, como totalizador de varios suministros parciales. Dicha repetición puede simultanearse en el tiempo o no, siendo también del tipo 0 o más veces.

Un Punto de Suministro puede ser totalizador de cero o muchos suministros descendentes. Así pues, su IdSum puede aparecer ninguna o muchas veces como IdSumTot en la tabla SumSumTot.

Un suministro puede tener asociado un solo totalizador o ninguno. Así pues, su IdSum puede aparecer una sola vez o ninguna en la tabla SumSumTot.

ASOCIACIONES DE ACOMETIDAS Y SUMINISTROS - Tabla 'AcomSum'

Tabla de asociaciones entre Acometidas y Puntos de Suministro.

Conforme al modelo conceptual, en un momento dado una acometida puede dar servicio a muchos puntos de suministro, pero un punto de suministro no puede pertenecer simultáneamente a más de una acometida. De acuerdo con ello, el 'IdSum' de un punto de suministro debería aparecer una sola vez en esta tabla, mientras que el 'IdAcom' de una acometida podría aparecer repetido muchas veces, tantas como puntos de suministro sirva. Sin embargo, las acometidas pueden crearse y destruirse con el tiempo, de modo que un punto de suministro podría tomar el agua desde más de una acometida a lo largo de su tiempo de vida, siempre que no haya una superposición de dos acometidas distintas en el tiempo.

En consecuencia, todo punto de suministro debe aparecer 1 ó más veces en la tabla AcomSum, garantizando de este modo que está ligado a alguna acometida (a efectos de balances). En caso de asociarse a más de una acometida, los tiempos de vida de las diferentes asociaciones deben ser sin solapes, y además yuxtapuestos. Por el contrario, una acometida puede aparecer 0 ó más veces en la tabla AcomSum, puesto que es posible declarar alguna acometida que no tenga ningún punto de suministro asociado (por ejemplo, en el proceso de creación de la base de datos).

Una Acometida puede tener asociados muchos Puntos de Suministro o ninguno. Además la asociación de la Acometida con los Puntos de Suministro puede tener un tiempo de vida limitado, siempre encajado dentro del tiempo de vida de la Acometida y del Punto de Suministro.

ASOCIACIONES DE SUMINISTROS Y USOS - Tabla 'SumUso'

Tabla de asociaciones entre Puntos de Suministro y Tipos de Uso.

En principio, un mismo tipo de uso puede ser compartido por muchos puntos de suministro, y un punto de suministro puede tener varios tipos de uso a lo largo de su

tiempo de vida, pero en este caso, no pueden superponerse en el tiempo aunque debería yuxtaponerse para evitar vacíos.

En la práctica, tan solo los puntos de suministro de tipo terminal, deben tener declarado en todo momento un tipo de uso, para evitar incoherencias a la hora de acumular los volúmenes en los puntos de suministro por diversos criterios.

Por otra parte, como se ha dicho, la declaración de un nuevo tipo de uso no conlleva su asociación necesaria a algún punto de suministro.

En consecuencia, un tipo de uso puede aparecer 0 ó más veces en la tabla SumUso, mientras que todo Punto de Suministro Terminal debe aparecer 1 ó más veces en la tabla SumUso, ya que debe estar siempre asociado a algún tipo de uso durante su tiempo de vida.

Un suministro debe tener siempre asociado al menos un Tipo de Uso. En otro caso, al acumular el volumen de un suministro por acometidas o DMAs por un lado, y por usos por otro lado, podría haber discrepancias.

La excepción serían los suministros declarados como totalizadores, cuyos volúmenes no se acumulan directamente (solo se utilizan para contraste), y por ello podrían no tener un Uso asociado. Pero como todos los suministros, sean totalizadores o no, se integran en la misma tabla, no cabe hacer distinciones en este punto.

La asociación de un Punto de Suministro con un Tipo de Uso puede tener un tiempo de vida limitado, pero en tal caso, debe yuxtaponerse con otro Tipo de Uso en adelante. El tiempo de vida de la asociación entre Punto de Suministro y Tipo de Uso debe estar siempre encajado entre el tiempo de vida del Punto de Suministro y del Tipo de Uso.

Además, a efectos de facturación, la asociación de un Punto de Suministro con un Tipo de Uso queda clasificada por el campo *TipoFacturacion*, que indica si el punto de suministro es facturado o no por la compañía suministradora de agua.

Se han incorporado dos nuevos campos opcionales llamados *IdCNAE* e *IdPHCS* que recogen respectivamente los identificadores internos referentes a los códigos de la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE) y de la clasificación del uso del agua según el Plan Hidrológico de la Cuenca Sur (PHCS).

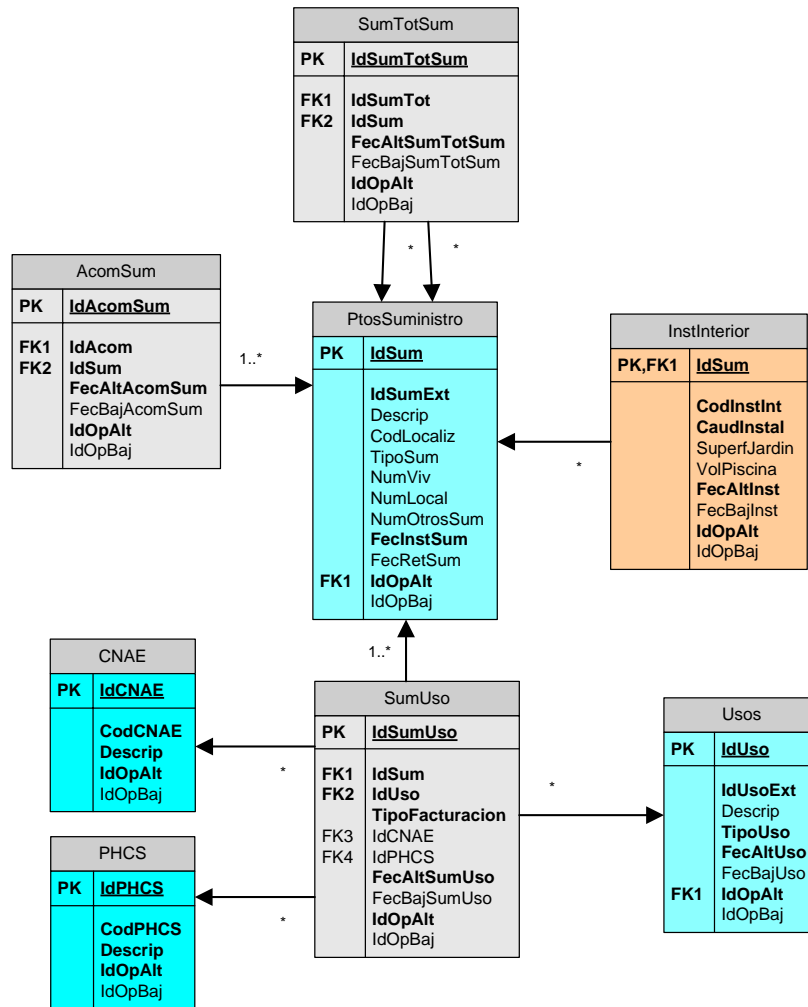


FIGURA 141. TABLAS DE ASOCIACIONES ENTRE SUMINISTROS Y USOS.

CLASIFICACIÓN NACIONAL DE ACTIVIDADES ECONÓMICAS - Tabla 'CNAE'

Esta tabla recoge la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE) según REAL DECRETO 475/2007, de 13 de abril, por el que se aprueba la Clasificación Nacional de Actividades Económicas 2009 (CNAE-2009).

El Real Decreto 1560/1992, de 18 de diciembre, estableció una Clasificación Nacional de Actividades Económicas, denominada CNAE-93, que sufrió una actualización de orden menor en el año 2003, denominada CNAE-93 Rev.1.

Con el objeto de reflejar los cambios estructurales de la economía, y en especial el desarrollo tecnológico habido desde la última revisión de la clasificación, se estableció una Clasificación Nacional de Actividades Económicas actualizada, denominada CNAE-2009.

No todas las asociaciones entre puntos de suministro de la red y tipos de uso del agua van a estar vinculadas a un código CNAE a través del identificador del código IdCNAE ya que dicho campo es opcional en la tabla SumUso.

CLASIFICACIÓN DEL USO DEL AGUA SEGÚN EL PLAN HIDROLÓGICO DE LA CUENCA SUR - Tabla 'PHCS'

Esta tabla recoge la Clasificación del uso del agua según el Plan Hidrológico de la Cuenca Sur (PHCS).

No todas las asociaciones entre puntos de suministro de la red y tipos de uso del agua van a estar vinculadas a un código PHCS a través del identificador del código IdPHCS ya que dicho campo es opcional en la tabla SumUso.

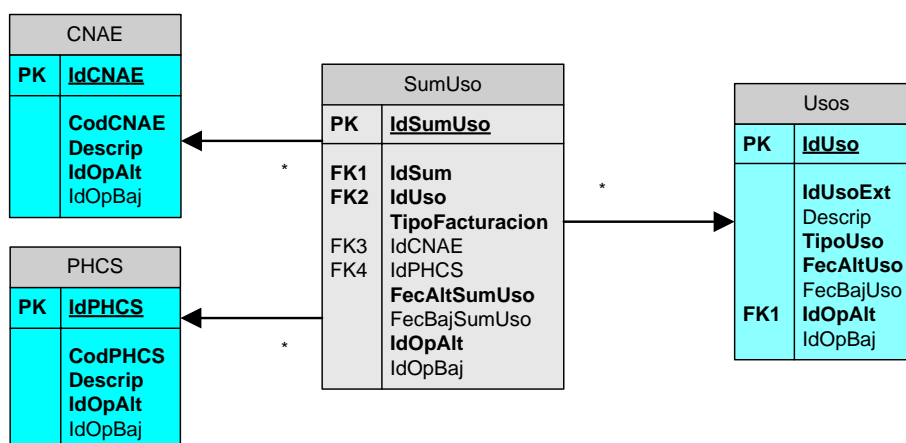


FIGURA 1 42. TABLAS DE CNAE Y PHCS.

ASOCIACIONES DE LÍNEAS Y ACOMETIDAS - Tabla 'LineaAcom'

Tabla de asociaciones entre Líneas y Acometidas.

En principio una Línea puede contener muchas Acometidas, pero una Acometida no puede pertenecer simultáneamente a más de una Línea. Con lo cual, el IDAcom de una Acometida debería aparecer una sola vez en esta tabla, mientras que el IdLinea de una Línea podría aparecer repetido muchas veces, tantas como acometidas contiene. Sin embargo, las Líneas pueden crearse y destruirse con el tiempo, de modo de que una Acometida podría pertenecer a más de una Línea, siempre que no haya superposición en el tiempo. Por otra parte, una línea podría no tener ninguna acometida asociada, y por consiguiente no aparecer su IdLinea en esta tabla. En particular éste será el caso de Bombas y Válvulas, y también el de muchas líneas que representan aducciones o conducciones arteriales.

En consecuencia, toda Acometida debe aparecer 1 o más veces en la tabla LineaAcom, garantizando de este modo que está ligada a alguna Línea (a efectos de balances). Por el contrario una Línea puede aparecer 0 o más veces en la tabla LineaAcom, puesto que es posible declarar alguna Línea que no tenga ninguna acometida asociada, como se ha indicado.

Además de todo ello las fechas de alta y baja de la asociación entre Línea y Acometida, FecAltLineaAcom y FecBajLineaAcom deberán estar encajadas entre el tiempo de vida de la Línea como parte del modelo y el tiempo de vida de la Acometida.

Toda Acometida debe estar asociada necesariamente al menos a una Línea. En caso de estar asociada a más de una Línea, los tiempos de vida de las asociaciones no pueden superponerse, ya que en un momento dado, una acometida deberá entroncar con una única Línea. En caso de cambiar de asociación, las fechas de baja de una y de alta de la siguiente deben ser yuxtapuestas, para evitar la pérdida de caudal.

ASOCIACIONES DE DMA'S Y ACOMETIDAS - Tabla 'DMAAcom'

Tabla de asociaciones entre DMAs básicas y Acometidas.

En principio una DMA simple puede contener muchas acometidas, pero una Acometida no puede pertenecer simultáneamente a más de una DMA simple. Con lo cual, el IDAcom de una Acometida debería aparecer una sola vez en esta tabla, mientras que el IdDMA de una DMA podría aparecer repetido muchas veces, tantas como acometidas contiene. Sin embargo, las DMAs simples pueden crearse y destruirse con el tiempo, de modo de que una Acometida podría pertenecer a más de una DMA simple siempre que no haya superposición en el tiempo.

En consecuencia, toda Acometida debe aparecer 1 o más veces en la tabla DMAAcom, garantizando de este modo que está ligada a alguna DMA (a efectos de balances). Por el contrario una DMA puede aparecer 0 o más veces en la tabla DMAAcom, puesto que es posible declarar alguna DMA que no tenga ninguna acometida asociada (por ejemplo, en el proceso de creación de la base de datos).

Toda Acometida debe estar necesariamente asociada al menos a una DMA. En algunos casos una Acometida puede estar asociada a más de una DMA, pero en tal caso los tiempos de vida de las DMAs no pueden superponerse, de modo que en un instante determinado una Acometida no puede estar asociada simultáneamente a más de una DMA.

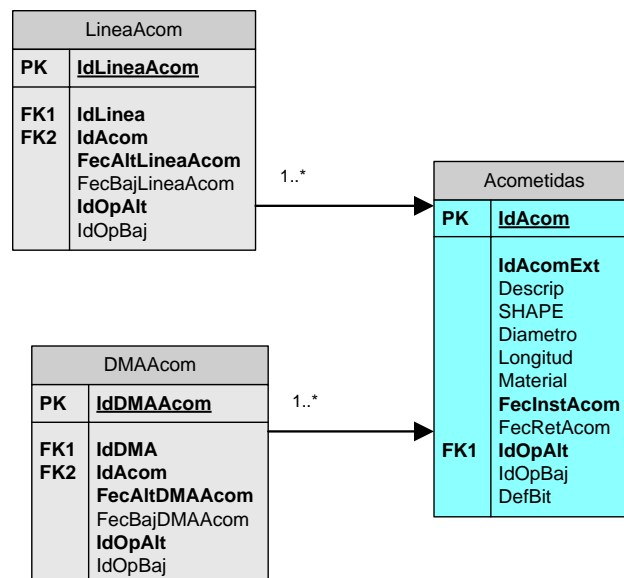


FIGURA 143. TABLAS DE ASOCIACIONES DE LÍNEAS Y DMA'S CON ACOMETIDAS.

A1.1.8 Tablas de Consumos

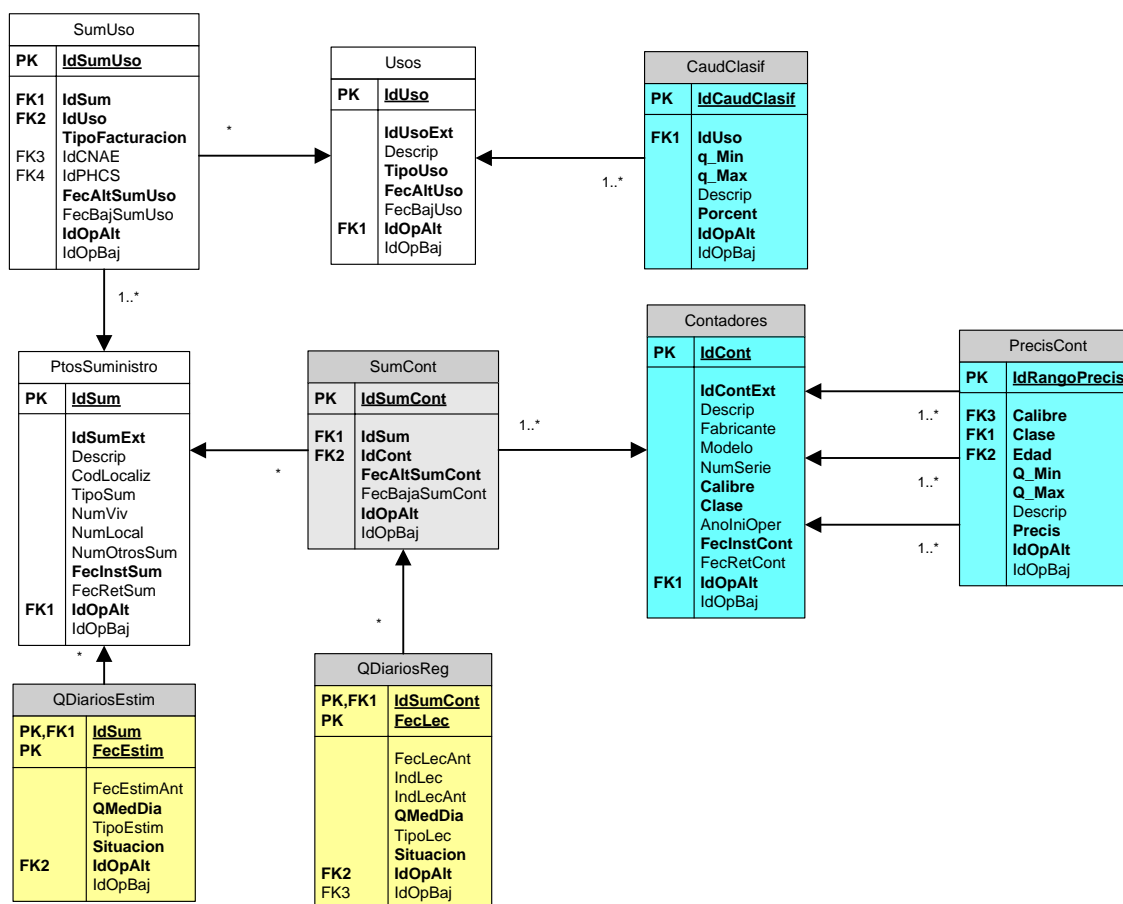


FIGURA 144. TABLAS DE CONSUMOS.

CONTADORES - Tabla 'Contadores'

La tabla de Contadores contiene la definición y propiedades físicas de todos los contadores que han estado en activo en algún momento en el sistema de distribución.

Un contador es un elemento físico con capacidad para medir el volumen de agua que pasa a su través al cabo de un periodo de tiempo, mediante el uso de un acumulador o integrador de tipo mecánico u electrónico. Las propiedades relevantes de un contador, para los fines de la aplicación pueden ser: el fabricante, su número de serie, el calibre y la categoría de precisión.

Los contadores se alojan en los puntos de suministro, ya sean terminales o totalizadores, de modo que todo contador, cuando se añade a la base de datos, debe quedar asociado a algún punto de suministro. De lo contrario el consumo registrado por un contador podría resultar omitido al evaluar los volúmenes abastecidos por un punto de suministro. Sin embargo, lo contrario no es cierto, es decir, un punto de suministro podría no tener alojado ningún contador. En tal caso el volumen de agua proporcionado a través del punto de suministro deberá ser estimado.

También cabe indicar que un mismo contador puede estar asociado a lo largo de su vida a varios puntos de suministro, lo que resulta habitual en las operaciones de

mantenimiento de éstos. Ello se puede reflejar a través de la tabla *SumCont*, que se describe más adelante.

Los campos *FecInstCont* y *FecRetCont* hacen referencia a las fechas de Instalación del contador por vez primera y de retirada definitiva (se puede reparar entre ambas fechas). Estas fechas son independientes de las fechas en que el contador está instalado en un determinado Punto de Suministro, las cuales se reflejan en la tabla *SumCont*. De este modo, a partir de *FecInstCont* es posible calcular la edad del contador, lo que puede ser importante para la posterior estimación de los errores de contaje.

Todo contador debe estar necesariamente asociado al menos a un Punto de Suministro. En algunos casos un mismo Contador puede estar asociado a más de un Punto de Suministro, pero en tal caso los tiempos de vida de las asociaciones no pueden superponerse, de modo que en un instante determinado un determinado Contador solo puede estar asociado con un único Punto de Suministro.

A la hora de caracterizar los Rangos de Precisión de un Contador, intervienen su Calibre, su Clase y su Edad. Puesto que normalmente se diferenciará más de un rango, estos tres campos pueden repetirse conjunta o separadamente a través de todos los registros de la tabla.

Si se va a tener en cuenta la precisión de los contadores, la pareja de campos Calibre y Clase de cada uno de los contadores contemplados en la tabla de Contadores deberá aparecer al menos una vez en la tabla *PrecisCont*, asociada al menos a una Edad. Por consiguiente las relaciones que ligan estos tres campos entre la tabla de Contadores y la tabla *PrecisCont* deberán ser del tipo 1 a 1 o muchos.

La relación entre la Edad de un contador y su Fecha de Instalación no es directa y deberá calcularse cada vez, y redondearse a valor de la Edad más próxima contemplada en la tabla. Ello no obsta para exigir que todo contador caracterizado por su Calibre y Clase, aparezca declarado con al menos con una Edad asociada.

LECTURAS REGISTRADAS POR LOS CONTADORES - Tabla 'QDiariosReg'

La Tabla de Lecturas de Contador *QDiariosReg* almacena el Caudal Medio Diario registrado por un Contador, asociado a un Punto de Suministro, entre dos Fechas de Lectura consecutivas.

Cada registro se corresponde con la fecha de lectura actual *FecLec*, a la que se asocia el índice de la lectura actual *IndLec* marcado por el integrador en el momento de la lectura.

La fecha de lectura anterior *FecLecAnt* y el índice de la lectura anterior *IndLecAnt*, pueden introducirse directamente (en cuyo caso deben comprobarse) o ser determinados directamente por la aplicación.

El caudal medio diario del intervalo *QMedDia* se calcula como la diferencia de lecturas o índices, en m³, dividido por el tiempo transcurrido, en días. Para evitar errores de interpretación, el *QMedDia* puede también introducirse directamente, con lo que la introducción de los índices *IndLec* e *IndLecAnt* resulta optativa (para comprobación) o innecesaria.

El campo *TipoLec* permite saber si la lectura es real o estimada, lo que no se diferencia realmente a la hora de efectuar los cálculos.

Aunque la lectura se asocia usualmente a un Contador desde el punto de vista del usuario, internamente se asociará siempre con una determinada asociación Contador - Punto de Suministro, puesto que el caudal es aportado en dicho punto y registrado por el contador.

En consecuencia, la fecha de lectura *FecLec* deberá estar siempre encajada dentro del tiempo de vida del Punto de Suministro y del tiempo de vida del Contador.

A efectos de facilitar el cómputo del volumen registrado entre dos fechas conviene indicar si una lectura dada es la primera (A), una intermedia (F) o es la última (B), registrada por dicho Contador en dicho Punto de Suministro, lo que se registra en el campo *Situación*. El contenido de este campo debe estar coordinado con las fechas de la asociación del Contador con el Punto de Suministro, aunque no necesariamente debe coincidir la fecha de la primera lectura con la de alta de la asociación, ni la de la última lectura con la fecha de baja de la asociación.

Por otra parte, **cuando se trate de la primera lectura (A) el valor de *QMedDia* se pondrá como -1** al no poder determinar éste hasta la próxima lectura. Asimismo los campos *FecLecAnt* e *IndLecAnt* se quedarán en blanco, caso de tenerse en cuenta.

Un Punto de Suministro puede no tener asociado ningún Contador, o aun teniendo un Contador asociado, no tener ninguna lectura realizada sobre el mismo durante el tiempo de vida de la asociación, por lo que no necesariamente todos los *IdSumCont* deben aparecer en la tabla *QDiarosReg*. Por tanto, una asociación entre un Punto de Suministro y un Contador, puede no tener ninguna lectura asociada, por ejemplo, hasta que pase el lector. Sin embargo lo usual será que al instalar el contador se haga una primera lectura del índice marcado por el integrador, generando una primera lectura en la tabla de *QDiaros*.

Así pues, un *IdSumCont* puede estar 0 ó más veces en la tabla *QDiarosReg*. Por otra parte, la fecha *FecLec* de la lectura actual debe estar comprendida dentro del tiempo de vida del Punto de Suministro y del Contador.

Finalmente, un Punto de Suministro sin Contador asociado puede aún suministrar un cierto volumen, registrado como un caudal estimado en la tabla *QDiarosEstim*.

LECTURAS ESTIMADAS EN SUMINISTROS - Tabla '*QDiarosEstim*'

Tabla de consumos estimados asociados a un Punto de Suministro Sin Contador (*QDiarosEstim*). Los valores de *QMedDia* introducidos en esta tabla se supone que son todos estimados, si bien el tipo de estimación (por cargas, superficie, periodo, ciclos, calibre, etc) puede reflejarse en el campo *TipoEstim*. No cabe hablar de índices de lecturas en este caso.

Cada registro se corresponde con la fecha en que se hace la estimación *FecEstim*, y el campo *FecEstimAnt* correspondiente a la fecha de la estimación anterior puede introducirse directamente, o ser determinado por la aplicación, como en el caso de

QDiarios.

El significado el campo *Situacion* es también el mismo que en la tabla *QDiariosReg* y opera del mismo modo. Así por ejemplo, **en caso de tratarse de la primera estimación (A), el valor asignado a QMedDia será también -1.**

Sin embargo, las estimaciones de *QMedDia* se asocian ahora directamente a un Punto de Suministro, sin pasar por ningún Contador, de modo que las restricciones en cuanto a la *FecEstim* se limitan a indicar que dicha fecha debe estar encajada en el tiempo de vida del Punto de Suministro, dado por los campos *FecInstSum* y *FecRetSum*.

Un Punto de Suministro puede no tener asociado ningún Contador, ni tampoco ninguna lectura estimada en esta tabla.

En la asociación entre un Punto de Suministro y un Consumo Estimado, puede que no haya ningún consumo estimado en dicho Punto de Suministro (por ejemplo, si no se ha activado aún el uso a que iba destinado). Lo normal será que se haga una estimación del consumo cada mes, por ejemplo.

Así pues, un *IdSum* puede estar 0 o más veces en la tabla *QDiariosEstim*. Por otra parte, la fecha *FecLec* de la lectura actual debe estar comprendida dentro del tiempo de vida del Punto de Suministro al que se asocia la lectura.

Por otra parte, la asignación de un consumo estimado a un Punto de Suministro, puede ser compatible con la asignación de un consumo a través de un Contador. En tal caso, se superpondrán ambos volúmenes. Por ejemplo, la avería de un contador, sin reparación, puede subsanarse asignando directamente un consumo estimado al Punto de Suministro (o también, asignando valores estimados de *QMedDia* al Contador en la tabla *QDiariosReg*).

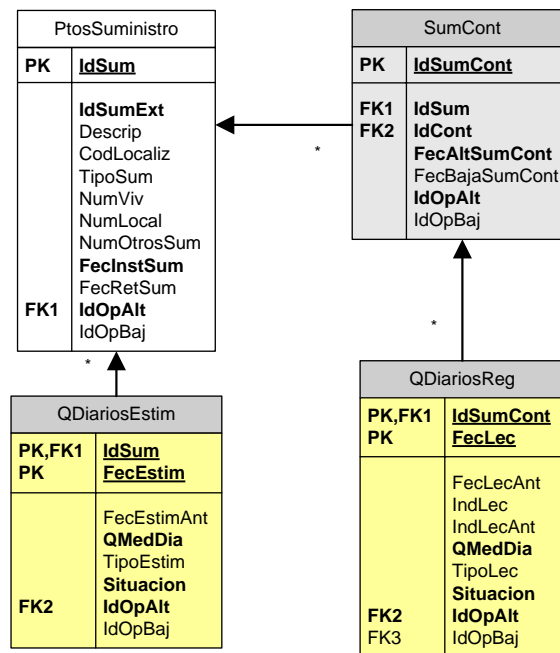


FIGURA 145. TABLAS DE CONSUMOS REGISTRADOS Y ESTIMADOS.

PRECISIÓN DE CONTADORES - Tabla 'PrecisCont'

La tabla de *PrecisCont* contiene la clasificación en rangos de precisión del campo de medida de un determinado contador, caracterizado por su *Calibre*, su *Clase* de precisión y su *Edad*.

Cada rango queda caracterizado por un caudal mínimo Q_{Min} y un caudal máximo Q_{Max} , en valor absoluto, ya que el calibre del contador es conocido. A cada rango se le asocia una precisión (campo *Precision*), expresada en tanto por uno.

El primer rango corresponderá siempre al caudal de arranque del contador Q_a , de modo que $Q_{Min} = 0$ y $Q_{Max} = Q_a$ para dicho rango, siendo además *Precision* = 0.

Usualmente el caudal nominal del contador Q_n se toma como referencia a la hora de establecer los rangos, siendo el número de rangos considerado habitualmente entre 3 y 4, contando el correspondiente al caudal de arranque. Para el último rango se puede hacer $Q_{Max} = 10000$, a fin de garantizar que cualquier valor del caudal quede siempre clasificado. Los caudales que delimitan los diferentes rangos deben ser yuxtapuestos.

Al confeccionar la tabla se considerará únicamente un número limitado de edades. Ésta deberá calcularse en particular para cada contador, y se aproximará a alguna de las edades contempladas en la tabla, que serán las mismas en principio para todos los contadores.

No se declaran en este caso fechas de alta ni de baja asociadas a cada rango de precisión, pues se admite que la clasificación por rangos y precisiones es permanente. No obstante, se pueden realizar cambios en dicha clasificación o en el valor de la precisión, los cuales se aplicarán en adelante a cualquier nueva consulta.

A la hora de caracterizar los Rangos de Precisión de un Contador, intervienen su Calibre, su Clase y su Edad. Puesto que normalmente se diferenciará más de un rango, estos tres campos pueden repetirse conjunta o separadamente a través de todos los registros de la tabla.

Si se va a tener en cuenta la precisión de los contadores, la pareja de campos Calibre y Clase de cada uno de los contadores contemplados en la tabla de Contadores deberá aparecer al menos una vez en la tabla *PrecisCont*, asociada al menos a una Edad. Por consiguiente las relaciones que ligan estos tres campos entre la tabla de Contadores y la tabla *PrecisCont* deberán ser del tipo 1 a 1 o muchos.

La relación entre la Edad de un contador y su Fecha de Instalación no es directa y deberá calcularse cada vez, y redondearse a valor de la Edad más próxima contemplada en la tabla. Ello no obsta para exigir que todo contador caracterizado por su Calibre y Clase, aparezca declarado con al menos con una Edad asociada.

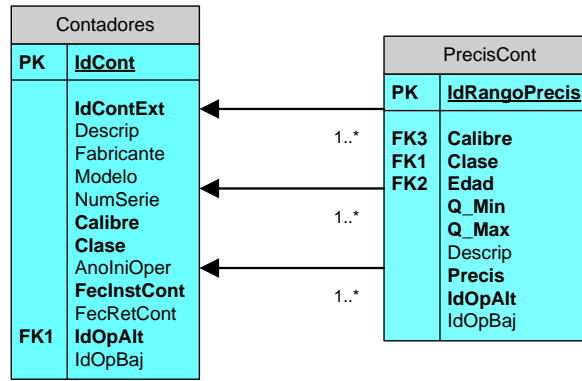


FIGURA 146. TABLA DE CONTADORES.

CLASIFICACIÓN DE CONSUMOS - Tabla 'CaudClasif'

La tabla de *CaudClasif* contiene la clasificación en porcentajes del volumen consumido en un determinado Uso, por franjas de caudal relativo al caudal medio.

Por ejemplo, entre 0,3 y 0,5 veces el caudal medio se consume el 20 % del volumen; entre 0,5 y 1,0 veces el caudal medio el 40 % del volumen; y entre 1,0 y 1,5 veces el caudal medio el 30 % restante. Los límites inferior y superior de cada franja se almacenan en *q_Min* y *q_Max* y debe haber continuidad entre ellos. El porcentaje correspondiente se almacena en el campo *Porcent*.

No se declaran en este caso fechas de alta ni de baja asociadas a cada franja, pues se admite que la clasificación es permanente. No obstante, se admiten cambios en la clasificación de las curvas de demanda por franjas, los cuales se aplicarán en adelante a cualquier nueva consulta.

A la hora de caracterizar el consumo asociado a un determinado uso, éste se divide en varias franjas, por lo que el campo *IdUso* se repetirá varias veces en la tabla. Además si se va a tener en cuenta la clasificación de los consumos, al menos tendrá que declararse una franja de consumo. En consecuencia, la relación será de 1 a 1 ó muchos.

A1.1.9 Auditoría

Las dos tablas encargadas de almacenar la información relativa a la auditoría de todas las sesiones y operaciones de edición sobre los elementos de la geodatabase de GISRed son: *Sesion_Edic* y *Oper_Edic*.

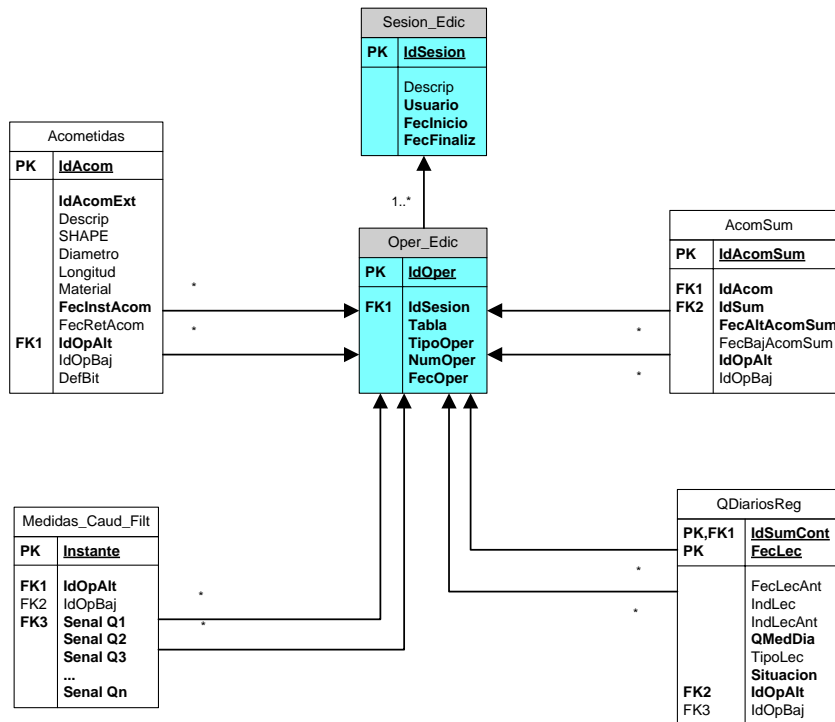


FIGURA 147. TABLAS DE AUDITORÍA.

Las asociaciones entre el campo *IdOper* de la tabla *Oper_Edic* y las diferentes tablas de la GDB son múltiples, pues afectan a todas las tablas de la Geodatabase. En el diagrama anterior se muestran únicamente cuatro tablas a modo de ejemplo, cada una de un tipo diferente: entidad física (*Acometidas*), entidad de relación (*AcomSum*), datos de campo (*Medidas_Caud_Filt*) y lectura de caudal (*QDiariosReg*). Todas las relaciones serán del tipo 1 a 0 ó muchos, pues un *IdOper* puede aparecer o no en una tabla determinada, y caso de aparecer puede repetirse múltiples veces, como se ha comentado. A continuación se describen las dos tablas de auditoría.

SESIONES DE EDICIÓN - Tabla 'Sesion_Edic'

La tabla de sesiones de edición (*Sesion_Edic*) aloja la información básica relativa a una sesión de edición, a lo largo de la cual pueden realizarse operaciones de adición, borrado o cambios de determinados registros, en una o más tablas.

La sesión de edición queda caracterizada por el nombre del usuario que la realiza, por la fecha y hora en que comienza la consolidación de las operaciones de edición previamente preparadas, y la fecha y hora en que terminan de consolidarse todos los cambios.

La grabación de una hora de terminación es síntoma de que todos o parte las operaciones de edición se han realizado correctamente. La clausura de una sesión de edición obliga a abrir otra nueva si se desea realizar nuevos cambios, por ejemplo para corregir y reintroducir aquellas operaciones que no fueron aceptadas la primera vez.

El detalle de las operaciones de edición realizadas se almacena en la tabla *Oper_Edic*.

OPERACIONES DE EDICIÓN - Tabla 'Oper_Edic'

La tabla de operaciones de edición (*Oper_Edic*) almacena el detalle de las operaciones de edición realizadas dentro de una sesión de edición.

Las diferentes operaciones de edición se diferencian por el tipo de operación especificado en el campo *TipoOper* y por el nombre de la tabla a que afecta la operación de edición especificado en el campo *Tabla*. Las 3 operaciones posibles que se pueden llevar a cabo son: *A = Adición*, *B = Borrado* ó *C = Cambio*.

La ejecución correcta de una Operación de Edición termina añadiendo el número de operaciones realizadas del mismo tipo y sobre la misma tabla en el campo *NumOper*, y la Fecha y hora en que se ejecuta la actualización de la tabla correspondiente.

Las asociaciones entre el *IdOper* y las diferentes tablas son múltiples, pues afectan a casi todas las tablas de la Geodatabase. En el diagrama anterior se muestran únicamente cuatro Tablas a modo de ejemplo, cada una de un tipo diferente: entidad física, entidad de relación, datos de campo y lectura de caudal. Todas las relaciones serán del tipo 1 a 0 o muchos, pues un *IdOper* puede aparecer o no en una tabla determinada, y caso de aparecer puede repetirse múltiples veces, como se ha comentado.

A1.2 INCORPORACIÓN DE INFORMACIÓN A LA GDB

Para la incorporación de datos y relleno de las tablas de la geodatabase principal de la aplicación GISRed, se utilizan tablas intermedias llamadas 'estructuradas' por poseer una estructura predefinida por el sistema. Cualquier información que se desee incorporar a la geodatabase de GISRed (tanto espacial como alfanumérica) ha de pasar por las tablas estructuradas para ser validada previamente, antes de ser incorporada al proyecto. De este modo se evitan incongruencias y posibles errores en la misma. Todos los registros de información que no pasan el proceso de validación son marcados para su estudio posterior y rectificación de errores si procede.

ANEXO 2

CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE UNA RED DE
DISTRIBUCIÓN DE AGUA A PRESIÓN MEDIANTE LA EXTENSIÓN
GISRED

ANEXO 2. CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA A PRESIÓN MEDIANTE LA EXTENSIÓN GISRED

A2.1 INTRODUCCIÓN

Este anexo pretende ser una guía rápida en el uso y manejo de la extensión GISRed como herramienta de construcción de modelos de redes de distribución de agua a presión. A lo largo del ejemplo que se presenta, se llevará a cabo la importación de una red simple de distribución de agua almacenada en un fichero CAD, a continuación se verificará y depurarán posibles errores e incoherencias en el esquema de red surgidos tras la importación, se interpolarán cotas en cada uno de los nudos del modelo, se asignarán las demandas base a los nudos de consumo y por último, el modelo de red se exportará a EPANET y se simulará desde el entorno de GISRed. El ejemplo comienza con la instalación y carga de la extensión GISRed a fin de que el usuario pueda seguir pormenorizadamente todos los pasos que se requieren hasta obtener un modelo de red partiendo de un simple fichero CAD.

A2.2 INSTALACIÓN DE LA EXTENSIÓN GISRED

Para instalar la extensión, ejecute el archivo gisred.exe y siga las instrucciones del asistente de instalación. Llegado el punto, el instalador advierte al usuario que seleccione la ruta de instalación. En ese momento el usuario debe introducir la ruta de la carpeta EXT32 ubicada en el directorio donde se encuentra instalado ArcView. Por defecto esta ruta es: c:\ESRI\av_gis30\arcview\EXT32.

Es posible llevar a cabo una instalación personalizada, seleccionando sólo aquellos componentes necesarios (ejemplos, tutoriales...). Tras la instalación, aparece un nuevo archivo llamado GISRed.avx y una carpeta llamada 'GISRED' en el directorio \$AVEXT.

Nota: AVEXT es una variable de entorno que hace referencia al directorio donde se encuentran las extensiones de ArcView.

A2.3 CARGA DE LA EXTENSIÓN

Utilice el diálogo de extensiones de ArcView para cargar la extensión GISRed. GISRed introduce una serie de herramientas personalizadas orientadas a la modelación hidráulica, que se refleja en su entorno de trabajo con la adición de nuevos menús, botones y diálogos.

➤ **Para cargar la Extensión:**

1. Inicie ArcView GIS 3.2.
2. Abra el diálogo de Extensiones (**File | Extensions**).

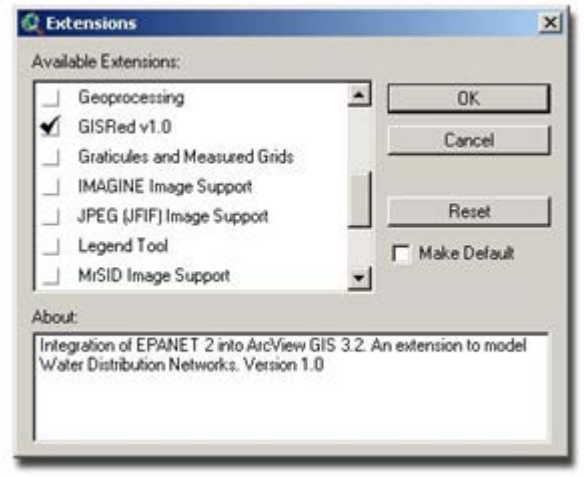


FIGURA 1 48. CARGA DE LA EXTENSIÓN GISRED.

3. Seleccione la Extensión GISRed v1.0 (marque la casilla de selección de la izquierda). Seleccione también la extensión CAD Reader para poder leer ficheros CAD.
4. Una vez cargada la extensión, un documento nuevo llamado 'Scenarios' aparece en la ventana de Administración de Proyectos de ArcView.

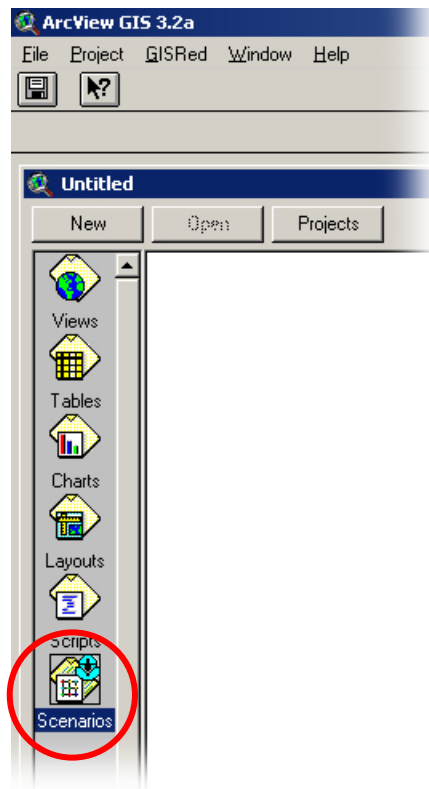


FIGURA 1 49. DOCUMENTO 'SCENARIOS'.

A2.4 CONFIGURACIÓN DE UN PROYECTO GISRED

La primera tarea es crear un nuevo proyecto en GISRed y cerciorarse de que se encuentran seleccionadas ciertas opciones por defecto.

1. Seleccione en la barra de menús **GISRed | New** para crear un nuevo proyecto. Es posible también utilizar el botón **New** de la ventana de proyectos de Arcview cuando se encuentra seleccionado el icono 'documento **Scenarios**'. Otra forma de hacer esto es hacer doble clic en el icono **Scenarios** o usando el botón **Projects** de la ventana de Proyectos de ArcView para abrir el Administrador de proyectos de GISRed y presionar **New**.
2. Asigne un nombre al **Proyecto**, la ruta donde albergar la base de datos del proyecto y un nombre para el **Escenario**. Estas propiedades son necesarias para crear un Nuevo proyecto GISRed. Finalmente presione **Create**.

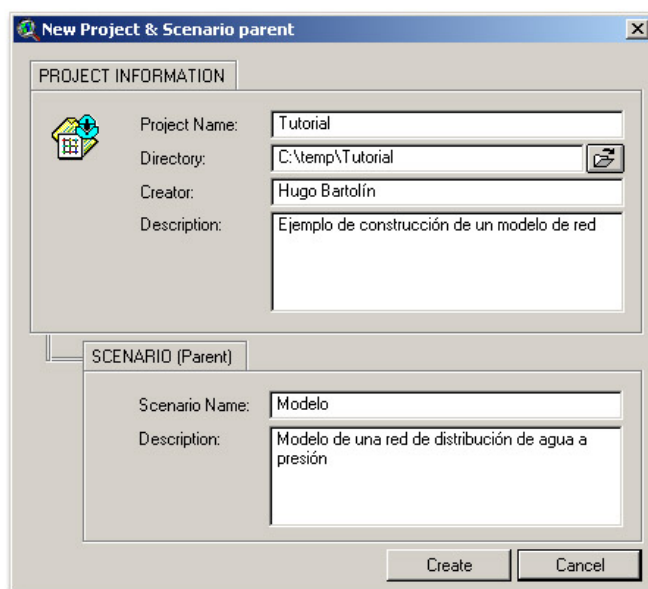


FIGURA 150. NUEVO PROYECTO GISRED.

Se genera un nuevo escenario con dos temas básicos. [Nótese como se crea también un nuevo directorio con todas las tablas necesarias para construir un modelo de red basado en EPANET. En este ejemplo el nuevo directorio corresponde a C:\temp\tutorial]

A2.5 VALORES POR DEFECTO DEL PROYECTO

Antes de pasar a la digitalización o importación de la red, debemos fijar los valores por defecto del proyecto (en particular los prefijos de identificación de elementos de red). La página **ID Labels** del cuadro de diálogo de valores por defecto del proyecto, es utilizada para determinar cómo GISRed asignará por defecto las etiquetas ID a los componentes de la red cuando sean creados por primera vez.

1. Seleccione en la barra de menús **Escenario | Defaults** para abrir el dialogo de **Valores por Defecto del Proyecto**.

2. Seleccione la opción **ID Labels**, e introduzca los prefijos de identificación para cada tipo de elemento (deje en blanco la casilla si desea que el valor por defecto del objeto sea una cadena numérica). La figura siguiente muestra los prefijos existentes por defecto.

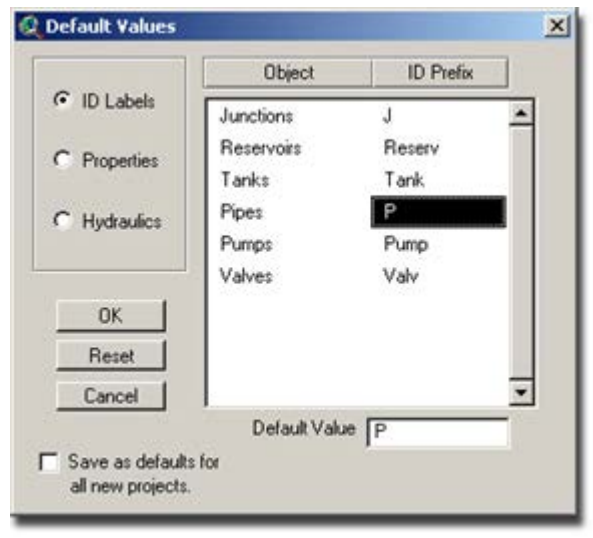




FIGURA 151. VALORES POR DEFECTO DEL PROYECTO.

3. Haga cambios en las páginas **Properties** y **Hydraulics** si es necesario.
4. Pulse **OK** para aceptar los cambios.
5. Si desea guardar los cambios realizados para todos los futuros proyectos, debe marcar la casilla "**Save as defaults...**" que figura al pie del diálogo antes de aceptar los cambios

A2.6 AGREGAR ARCHIVOS CAD AL ESCENARIO Y FIJAR PROPIEDADES

Tenga en cuenta que para poder visualizar dibujos CAD en ArcView, debe cargar primero la extensión **CAD Reader**.

➤ Para añadir y visualizar un dibujo CAD en un escenario:

1. Pulse el botón **Add Theme** .
2. En el desplegable relativo al *Tipo de Fuentes de Datos*, seleccione **Feature Data Source**.
3. Vaya hasta el directorio que contiene el dibujo CAD llamado **RedEjemplo.dwg**. Si el archivo de dibujo no se muestra en el diálogo, es posible que haya olvidado cargar la extensión **CAD Reader**.
4. Pulse sobre el icono de la carpeta para ver la lista de capas existentes y selecciónelas todas utilizando la tecla 'shift'.
5. Pulse **OK** para agregar al escenario las capas como temas independientes.
6. Active el nuevo tema de **Lineas y Texto** (pulse en la casilla situada junto al nombre del tema en la tabla de contenidos). Haga un zoom 'extensión' usando el botón .

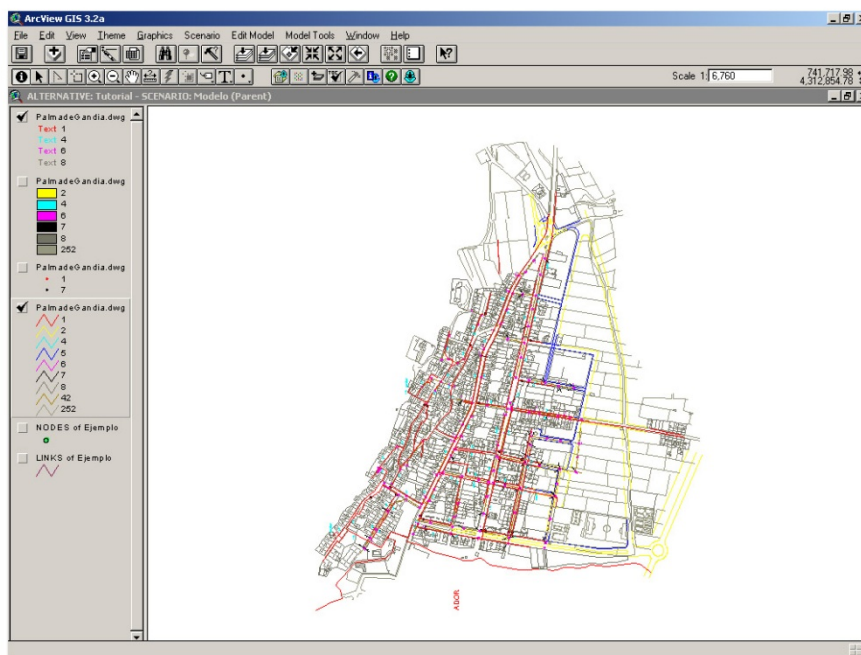


FIGURA 152. DIBUJO CAD EN LA TABLA DE CONTENIDOS DEL ESCENARIO (TOC).



Consejo: Para agregar varios dibujos CAD a una vista/escenario, mantenga pulsada la tecla SHIFT y presione en la lista de archivos. Cuando se añade un tema de dibujo CAD, se utilizan las siguientes propiedades por defecto:

- ArcView automáticamente agrega una leyenda por defecto en la tabla de contenidos (TOC) de la vista / escenario.
- Por defecto, la leyenda queda clasificada por colores correspondientes al color de cada entidad en el archivo fuente.
- Únicamente las capas visibles del dibujo CAD son visualizadas en el tema. Las capas ocultas serán desactivadas en la lista de capas por defecto. Para manipular la visibilidad de la capa, active el tema en la tabla de contenidos, en la barra de menús seleccione Propiedades del Tema (**Theme | Properties**) y elija la Categoría **Drawing**.



Notas


- Cuando se crea un tema, Arcview no lo dibuja inmediatamente en la vista. Esto permite editar la leyenda del tema o cambiar el orden si hay varios temas. Para visualizar un tema, marque la casilla que queda junto al nombre del tema en la Tabla de Contenidos.
- El archivo de dibujo CAD siempre mostrará un icono en forma de carpeta con una lista de cuatro capas clasificadas por clases (líneas, puntos, anotaciones y polígonos), aun cuando el dibujo sólo contenga algunas de esas clases. Por ejemplo, pulsando sobre el icono en forma de carpeta de un archivo de dibujo CAD que no tenga elementos de texto, aparecería la clase llamada *annotation*. Si agregara este tema a su vista/escenario, el tema estaría vacío (ya que no contiene información).

Ahora, renombraremos los cuatro nuevos temas que han sido añadidos al TOC de modo que sean más fáciles de identificar, ya que por defecto reciben el mismo nombre (RedEjemplo.dwg).

A2.6.1 Fijar las propiedades de los temas procedentes de dibujos CAD

Las propiedades de dibujo de los temas procedentes de dibujos CAD, permiten controlar exactamente cómo se dibuja un tema en ArcView. Es posible seleccionar las capas a visualizar en el tema, y aplicar transformaciones de coordenadas para georreferenciarlo correctamente.

➤ Para fijar las propiedades de los temas procedentes de dibujos CAD

1. Seleccione el **tema de dibujo CAD** en la Tabla de Contenidos para hacerlo activo.
2. Pulse el botón de Propiedades del Tema .
3. En el diálogo de Propiedades del Tema, seleccione **'Drawing'** de la lista de categorías.
4. Cambie el nombre del tema que tiene por defecto. Por ejemplo: 'Labels' para el tema de Anotaciones, 'Areas' para el tema de Polígonos, 'Points' para el tema de Puntos y 'Pipes' para el tema de Líneas. Los temas de Puntos y Polígonos no van a ser utilizados en este ejemplo, así que puede mantenerlos desactivados.
5. Adicionalmente, seleccione la capa de **'diametros'** en el tema de *Labels*, y la capa de **'tuberias'** en el tema *Pipes*, y deje las capas restantes sin seleccionar.

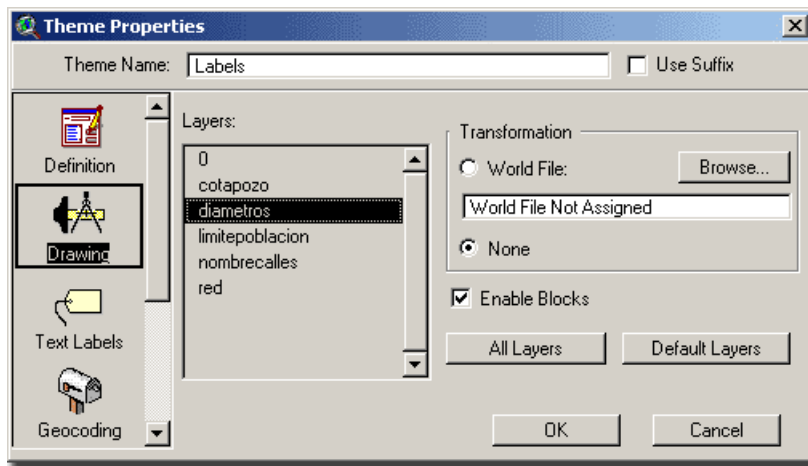


FIGURA 153. CAPA DE ETIQUETAS DE DIÁMETRO EN EL TEMA CAD DE ANOTACIONES.

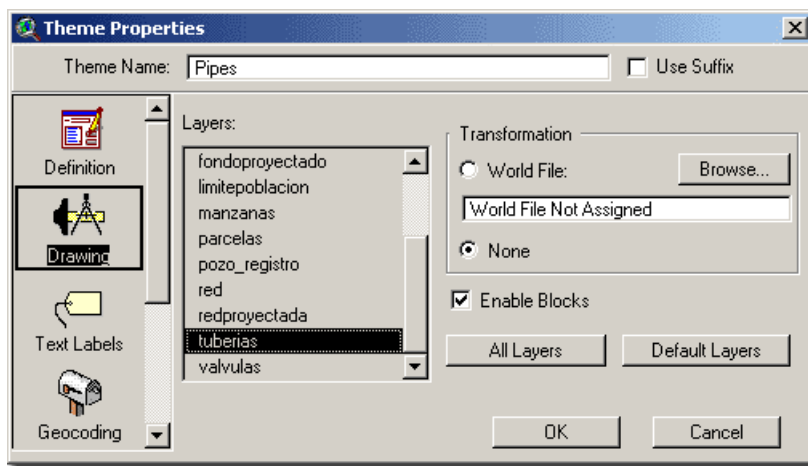


FIGURA 154. CAPA DE TUBERÍAS EN EL TEMA CAD DE LÍNEAS.

Después de estos cambios, el escenario debería verse como sigue:

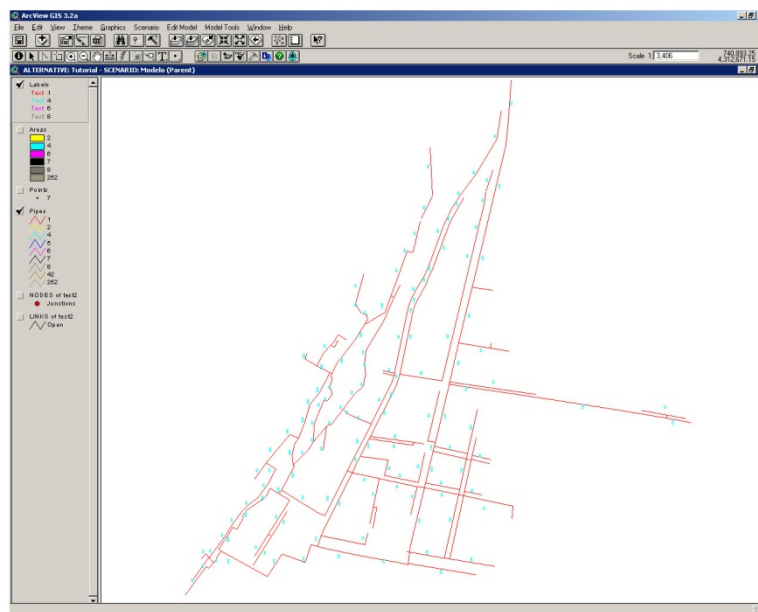


FIGURA 155. CAPAS DE CAD A IMPORTAR.



NOTA: A veces, las etiquetas de diámetros en los dibujos CAD van asociadas a un tema de puntos. En tal caso, debe seguir exactamente los mismos pasos anteriores pero esta vez trabajando con el tema de puntos en vez del tema de anotaciones. Los diámetros pueden estar asociados al tema de líneas o incluso estar dibujados por capas. En este caso consulte el manual de usuario de la aplicación.




Formatos de ficheros CAD soportados por ArcView

ArcView soporta ficheros *.dgn de **MicroStation** y dos tipos de ficheros de dibujo de **AutoCAD**, archivos *.dwg (sólo Windows) y archivos *.dxf (*Drawing Interchange files*). ArcView lee estos archivos directamente y los interpreta como temas de dibujo CAD.

ArcView soporta archivos de diseño 2D y 3D generados por **Microstation** hasta la versión 5.5 y los generados por **AutoCAD** hasta la versión 14 (AutoCAD 2000 si utiliza ArcView 3.2a).

A2.7 IMPORTAR LA CAPA DE TUBERÍAS

➤ Para importar la capa de la red de tuberías:

1. Active el tema básico de líneas del modelo (*Link Theme*).
2. Seleccione **Escenario | Import (Add)** o alternatively pulse el botón . Aparecerá el siguiente diálogo:

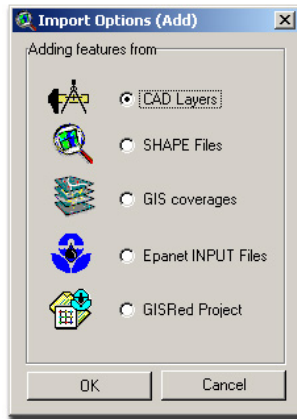


FIGURA 156. SELECCIÓN DEL TIPO DE DATOS A IMPORTAR.

3. Seleccione el tipo 'CAD Layers'. Se abrirá el diálogo de importación de archivos CAD.

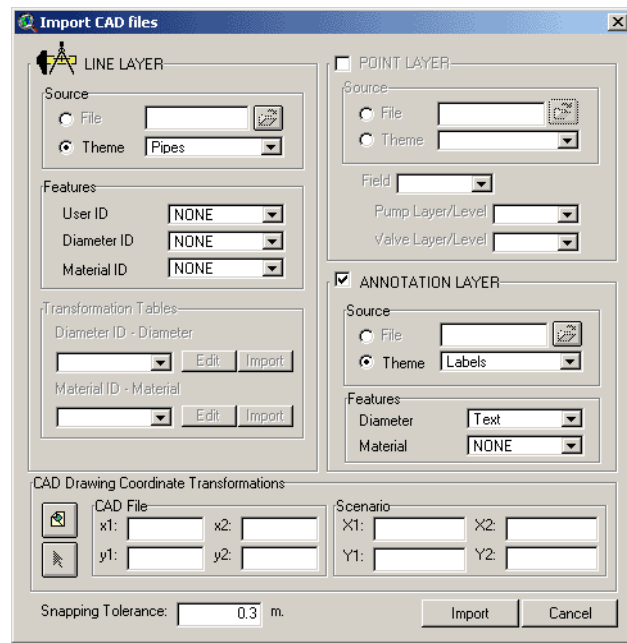


FIGURA 157. DIÁLOGO DE IMPORTACIÓN DE FICHEROS CAD.

4. Seleccione el tema de líneas CAD (del TOC) a importar. Para este ejemplo, seleccione el tema llamado 'Pipes'. Una vez seleccionado, los campos de la tabla asociada serán mostrados en la sección de propiedades (*Features*).
5. Como en este caso no hay propiedades asociadas al Tema de **Pipes**, todas las casillas permanecerán como **NONE**.
6. Marcar la casilla **ANNOTATION LAYER** y seleccionar el tema llamado 'Labels' para capturar las etiquetas de diámetros asociados al tema.
7. Seleccione el campo en la sección **Features** que contiene la referencia del diámetro, '**Text**' en este caso. Esta opción es útil para importar los rótulos que normalmente se dibujan en CAD junto a las líneas/polilíneas cuando se digitaliza una red. Si elige importar anotaciones, seleccione bien un tema de anotaciones

o uno de puntos que contenga datos relevantes en el campo **Text** (campo oculto por defecto en la tabla de atributos del tema CAD).


8. Agregue un valor para la **tolerancia de anclaje** (este valor por defecto es 0,3 m). Esta es realmente la tolerancia usada para comprobar la conectividad entre tuberías cada vez que se importa una nueva línea/polilínea del CAD.
9. En este ejemplo no vamos a aplicar ninguna **transformación de coordenadas**, ya que el dibujo CAD está georreferenciado.
10. Presione **Import** para comenzar con la importación.



NOTA: Recuerde que antes de comenzar con el proceso de importación, siempre puede hacer una selección en el tema de líneas/polilíneas CAD. De esta manera, la importación se aplica únicamente a las líneas/polilíneas seleccionadas.

➤ En el caso de que sea necesario aplicar una **Transformación de Coordenadas** a un dibujo CAD, se procede de la siguiente manera:



1. Una vez seleccionada la capa de líneas, pulse el botón  situado en el diálogo de importación de ficheros CAD.
2. Se abrirá una nueva vista mostrando el dibujo CAD.
3. Presione el **botón con la flecha**.
4. Marque el **primer** punto en el **dibujo CAD** (vista). Observe como las coordenadas del punto aparecen en los campos x1, y1.
5. Marque el correspondiente **primer** punto en el **Escenario**. Observe como las coordenadas del punto aparecen en los campos X1, Y1.
6. Marque el **Segundo** punto en el **Dibujo CAD** (vista)
7. Marque el **Segundo** punto de correspondencia en el **Escenario**.
8. Cuando se han definido todos los puntos, el usuario puede cerrar la ventana previa de del fichero CAD y continuar con el proceso de importación.

Después de este proceso, la red importada debe quedar así:

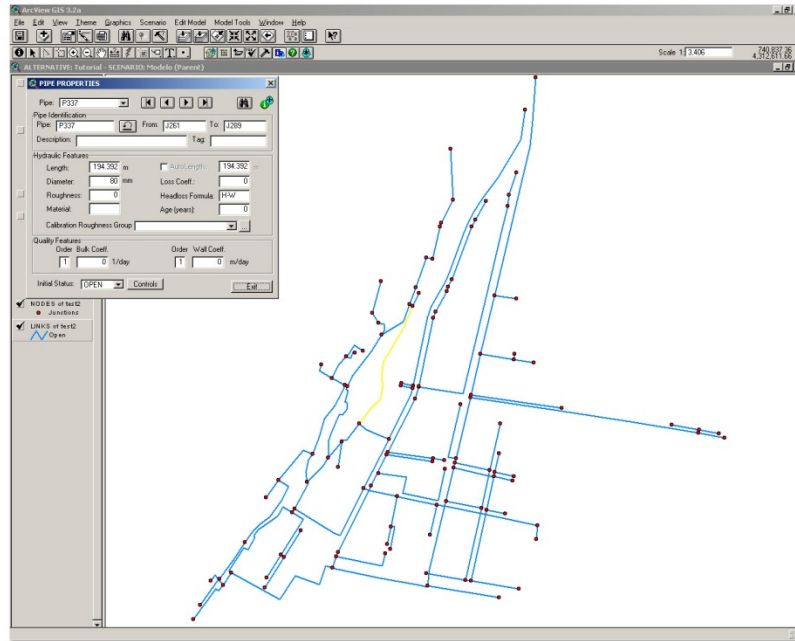



FIGURA 158. MODELO DE RED TRAS LA IMPORTACIÓN DEL FICHERO CAD.

Utilizando el diálogo de propiedades de la tubería, es posible ver que se han importado los diámetros (use la herramienta  y presione en una tubería para abrir el diálogo y ver sus propiedades).



NOTA: Tenga en cuenta que no todos los diámetros asignados automáticamente tienen que ser los correctos, puesto que la aplicación asigna a cada tubería, la etiqueta de diámetro más cercana. Así pues, es muy recomendable comprobar el diámetro asignado al final del proceso.

A2.8 DETECCIÓN Y DEPURACIÓN DE ERRORES

La extensión incluye una serie de herramientas enfocadas a la detección y reparación de errores e inconsistencias en el modelo de red. Por ejemplo, la detección de nudos extremos de tuberías que quedan muy cerca unos de otros dentro de una tolerancia definida; localización de elementos con parámetros de red no definidos o inexistentes (diámetros, rugosidades, cota, material, etc.) y comprobación de la conectividad de la red basada en algoritmos de teoría de grafos. Tras este proceso de verificación, si se detecta alguna anomalía la aplicación muestra un tema de errores en la tabla de contenidos del escenario, indicando los elementos en los que se han detectado dichas anomalías. La extensión dispone también de un navegador que permite saltar de error en error e ir corrigiéndolos.

A2.8.1 Comprobación de la conectividad de la red

En este punto, el usuario debe comprobar la **Conectividad de la red**, con las herramientas de conectividad disponibles.

► Para comprobar la conectividad del modelo de red generado tras la importación y encontrar el número de **subredes desconectadas**:

1. Seleccione **Model Tools | Connectivity**.

2. Seleccione **Connectivity** del diálogo emergente (el resto de opciones aún no se encuentran disponibles en esta versión de GISRed)

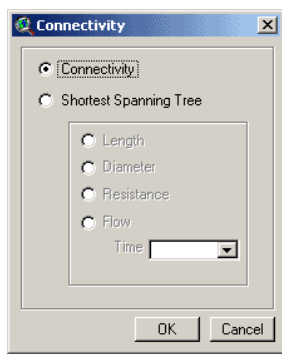


FIGURA 159. DIÁLOGO DE COMPROBACIÓN DE LA CONECTIVIDAD DE LA RED.

3. Presione **OK**.
4. Tras el proceso, aparece un tema nuevo en el escenario, clasificado por el número de subgrafos (**subredes**).

La siguiente figura muestra la red anterior en la cual aparecen 8 subredes inconexas. La falta de conectividad puede ser comprobada haciendo un zoom en las inmediaciones de los extremos desconectados de cada subred.

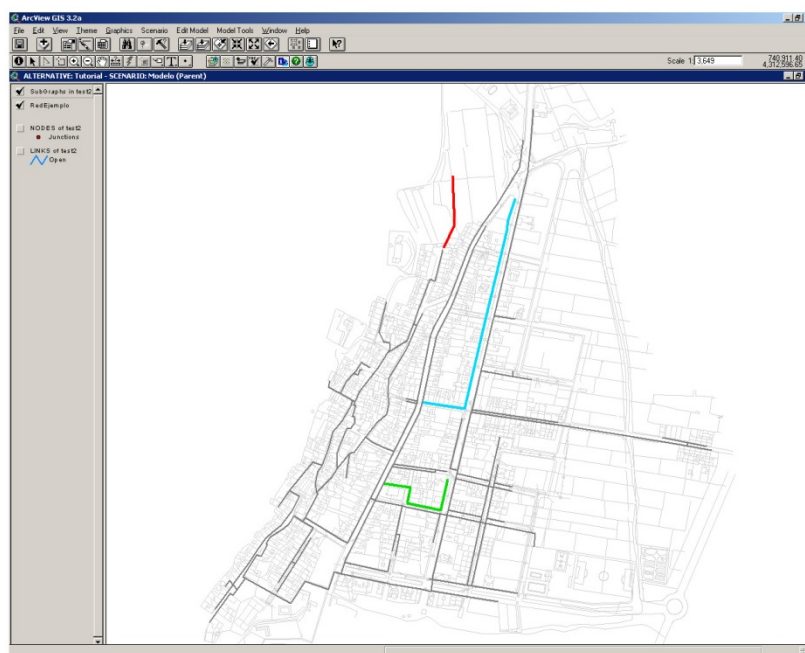


FIGURA 160. PARTES DESCONECTADAS DE UNA RED IMPORTADA.

➤ Para guardar una sesión de ArcView (con escenarios GISRed incluidos) en disco:

1. Seleccione **File | Save Project As...**
2. Especifique una ruta y un nombre para el proyecto.
3. El proyecto se guardará en el disco con la extensión *.apr como un proyecto convencional de ArcView.

A2.8.2 Herramientas de edición

El siguiente paso requiere la utilización de las **herramientas de edición** para corregir los errores de conectividad de la red.

GISRed presenta una serie de herramientas de edición, agrupadas en diferentes barras de herramientas, que son dependientes del tema activo en la tabla de contenidos del escenario. Las barras de herramientas que utilizaremos son:

- **Barra de herramientas de Líneas:** permite añadir tuberías al modelo, editar y modificar vértices, dibujar tuberías introduciendo las coordenadas de todos sus vértices y borrar tuberías.
- **Barra de herramientas de Nodos:** permite añadir nudos de consumo, bombas, válvulas, depósitos, embalses, mover nudos (y consecuentemente todas las tuberías conectadas a él), conectar extremos de tuberías, generar T's, y borrar nudos (fundiendo las correspondientes tuberías siempre que lo permitan sus propiedades). Es también posible convertir el tipo de nudo en cualquier momento, de modo que, por ejemplo, una válvula o bomba puede convertirse en un nudo de consumo y viceversa.

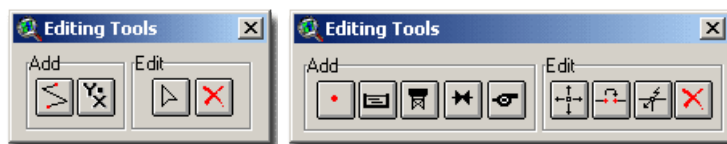




FIGURA 161. BARRAS DE HERRAMIENTAS DE GISRED.

Si analizamos las desconexiones detectadas, comprobaremos que corresponden en su mayoría a nudos muy próximos entre sí, o a nudos muy próximos a tuberías, a las cuales deberían estar conectados formando una T.

Para corregir estos errores utilizaremos las siguientes herramientas:


➤ Conexión de Tuberías


Para conectar el nudo final de una tubería (sólo aquellas con grado de conectividad 1) a otro nudo:

1. Activar el tema de nudos.
2. Abrir la barra de herramientas de nudos pulsando .
3. Pulsar la herramienta .
4. Hacer clic sobre el nudo que se desea conectar (origen). La tubería quedará seleccionada.
5. Hacer clic en el nudo de destino.
6. La tubería quedará conectada al nudo de destino.

➤ Conexión en T

Para conectar el nudo final de una tubería (sólo aquellas con grado de conectividad 1) a cualquier punto de otra tubería para crear una conexión en 'T':

1. Activar el tema de nudos.
2. Abrir la barra de herramientas de nudos pulsando .

3. Pulsar la herramienta .
4. Hacer clic sobre el nudo que se desea conectar (origen). La tubería quedará seleccionada.
5. Hacer clic en el punto de destino de la tubería (este punto no puede ser un nudo).
6. Se crea automáticamente una conexión en 'T'.

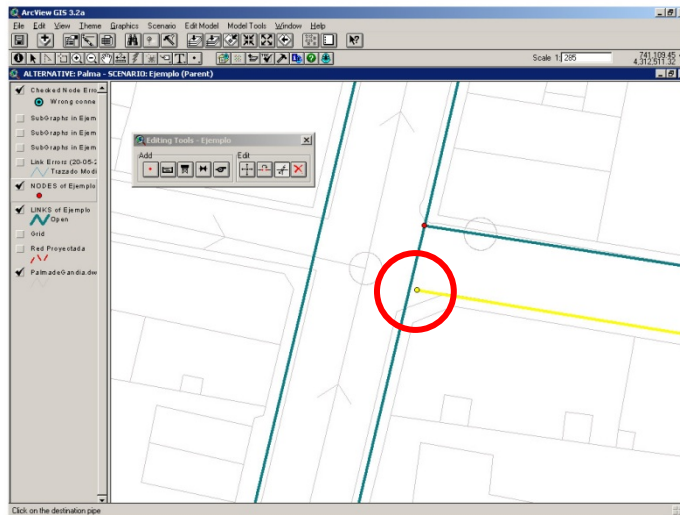




FIGURA 162. CONEXIÓN DE TUBERÍAS.

Una vez corregidas todas las desconexiones, podemos volver a utilizar la herramienta de conectividad para comprobar la existencia de un único grafo o red

A2.8.3 Añadir elementos

Embalse

➤ Para añadir un embalse al modelo, utilizaremos la Barra de Herramientas de Nudos:

1. Activar el tema de nudos en el escenario.
2. Seleccionar **Edit Model | Editing Tools** (*Editar Modelo | Herramientas de Edición*) o pulse el botón  para abrir la barra de herramientas de nudos. Existe una tercera alternativa que es utilizar el menú contextual pulsando el botón derecho del ratón y seleccionando '**Editing Tools**'.
3. Pulsar sobre el botón .
4. Hacer clic sobre el nudo de consumo donde queramos insertar el embalse.

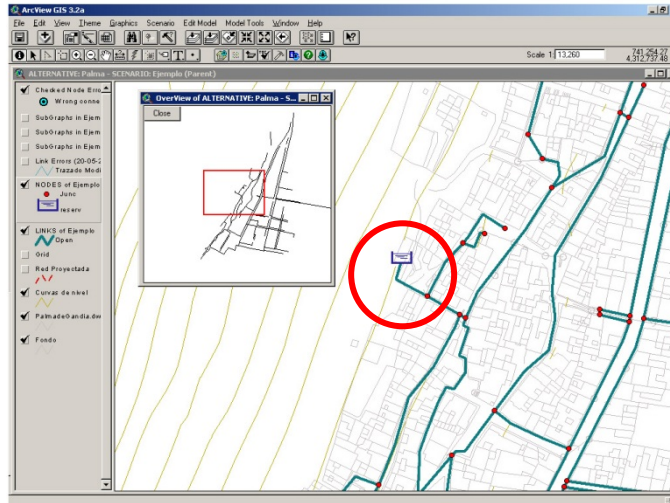



FIGURA 163. AÑADIR UN EMBALSE SOBRE UN NUDO.

Válvula Reductora de Presión

➤ Para insertar una válvula reductora en una tubería del modelo, utilizaremos la Barra de Herramientas de Nudos:

1. Activar el tema de nudos en el escenario.
2. Abrir la barra de herramientas de nudos.
3. Pulsar sobre el botón .
4. Hacer clic en la tubería en la que se desea insertar la válvula.

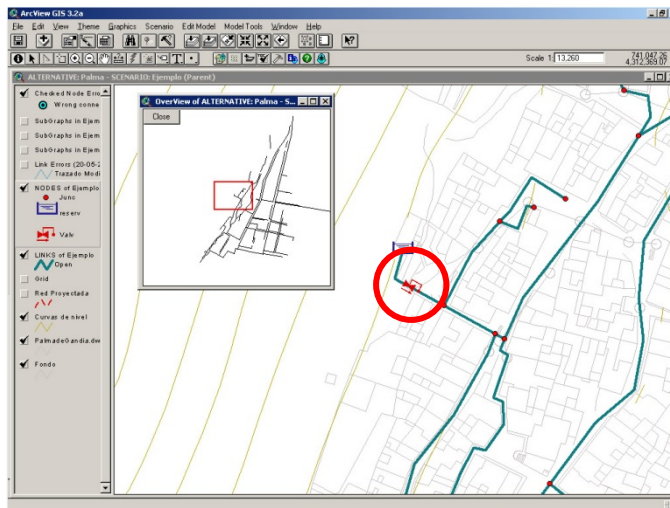


FIGURA 164. INSERTAR UNA VÁLVULA REDUCTORA EN UNA TUBERÍA.

Una vez insertados estos dos elementos, es necesario definir sus propiedades hidráulicas. Esto lo veremos en el siguiente apartado.




NOTA: Se recomienda comprobar el sentido en el que ha sido insertada la válvula reductora.

A2.8.4 Edición de propiedades

Para introducir las propiedades hidráulicas de los elementos que componen el modelo de red, existen una serie de diálogos asociados a cada elemento. Las propiedades que pueden editarse con estos diálogos son las requeridas para construir un modelo hidráulico y de calidad. Asimismo, se dispone de editores de curvas de modulación y de comportamiento, y editores especiales para la introducción de controles simples y reglas compuestas de control asociadas a ciertos elementos de la red. Adicionalmente y al igual que en EPANET, se dispone de un diálogo de asignación de propiedades en grupo.

► Para editar un elemento de red:

1. Activar el tema asociado al elemento (tema de líneas/nudos).
2. Pulsar la herramienta '**Propiedades del Modelo**' (Model Properties) .
3. Hacer clic sobre el objeto en el escenario.
4. Para ver las propiedades de otro elemento, hacer clic directamente sobre el elemento o usar el navegador del editor de propiedades.

Siguiendo esto último, añada las siguientes propiedades para el embalse y la válvula reductora:

EMBALSE

- Puede cambiar el nombre del embalse si lo desea.
- Introduzca como altura total de lámina (**Total Head**) 105 m.

VÁLVULA REDUCTORA

- Puede cambiar el nombre de la válvula si lo desea
- Compruebe que el tipo (**Type**) de la válvula es **PRV**
- Compruebe que el estado forzado (**Fixed Status**) sea **NONE**
- Introduzca como consigna de válvula (**Setting**) un valor de 20m.

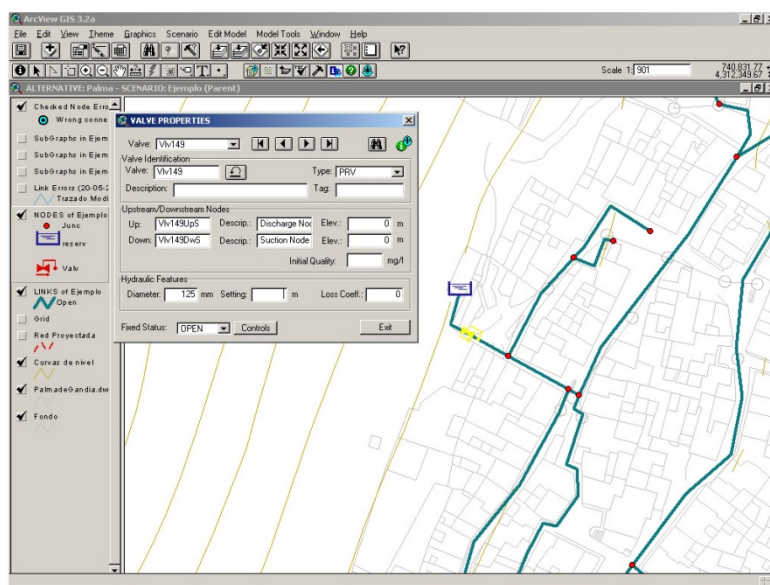


FIGURA 165. PROPIEDADES DE LA VÁLVULA REDUCTORA.

EDICIÓN DE PROPIEDADES EN BLOQUE

Como se señaló anteriormente, es posible la edición de propiedades para un grupo de elementos (del mismo tipo) de la red. En nuestro caso, vamos a asignar una rugosidad inicial a todas las tuberías de la red. Para ello:

1. Seleccionar todas las líneas del modelo de red.
2. Seleccionar la opción de menú **Edit Model | Group Edit** (*Editar Modelo | Editar Grupo*).
3. En la ventana de diálogo que se muestra (**Group Edit**), seleccionar **Pipes|Replace|Roughness|0.1** como indica la figura y pulse OK.

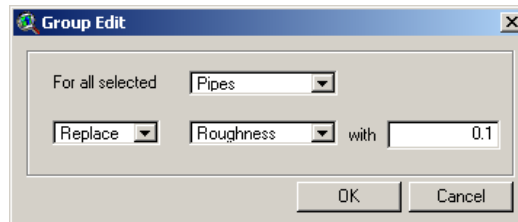


FIGURA 166. EDICIÓN DE PROPIEDADES EN GRUPO. ASIGNACIÓN DE RUGOSIDAD.

A2.9 INTERPOLACIÓN DE COTAS

La cota de un nudo es siempre una propiedad requerida si se pretende llevar a cabo una simulación hidráulica. Además, es un dato fundamental en el proceso de calibración, ya que resulta determinante a la hora de estimar las presiones en los nudos, uno de los parámetros más significativos en lo que respecta a la calidad del servicio. La mayoría de paquetes SIG del mercado proporcionan diversos algoritmos capaces de generar superficies de interpolación a partir de una nube de puntos con un atributo de cota asociado. Los más sofisticados, incluso permiten la generación de modelos digitales del terreno a partir de los cuales se determina la cota de los nudos de la red.

En el caso de GISRed, la asignación de cotas a los nudos se puede realizar de manera manual (nudo a nudo o en bloque) utilizando para ello los diálogos de propiedades, o bien mediante un algoritmo de interpolación que se apoya en un tema de puntos para asignar la cota en los nudos de la red (actuando sobre la totalidad o sobre la selección de nudos); el método utilizado es el de distancias inversas ponderadas (IDW). También es posible utilizar una superficie de interpolación o GRID para llevar a cabo la interpolación. En este caso es necesario disponer de la extensión Spatial Analyst o bien 3D Analyst de ArcView GIS 3.x para poder generar e interpretar este tipo de temas. Estos dos últimos métodos resultan ser los más eficientes cuando se dispone de datos suficientes, como consecuencia de un levantamiento topográfico por ejemplo.

En el ejemplo, vamos a hacer uso de un tema GRID generado previamente. Un tema GRID puede ser generado a partir de una nube de puntos utilizando la extensión Spatial Analyst o bien a partir de un tema con las curvas de nivel del área de estudio, utilizando para ello la extensión 3D Analyst. En nuestro caso, el tema GRID se ha obtenido a partir de un TIN generado con las curvas de nivel disponibles mediante la extensión 3D Analyst.

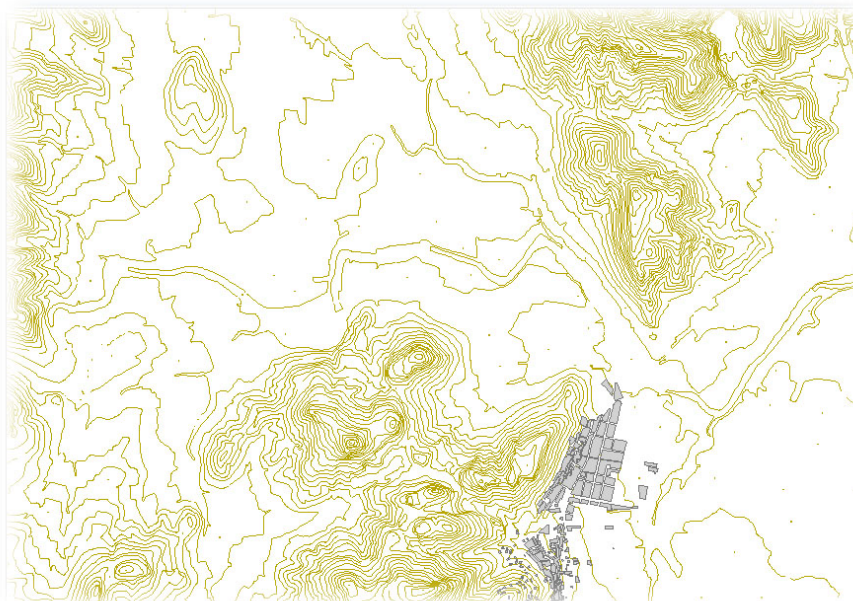


FIGURA 167. CURVAS DE NIVEL.

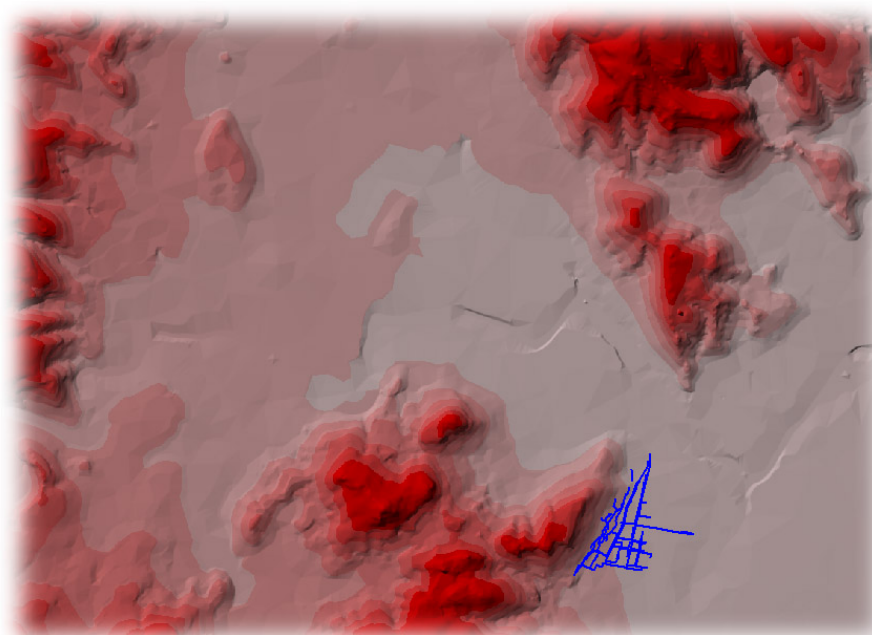


FIGURA 168. GRID CON EFECTO DE RELIEVE (HILLSHADE).

El tema GRID debe aparecer en el TOC del escenario antes de continuar con el proceso de interpolación. Por tanto, si el tema se ha generado en una vista, es necesario trasladar el tema a nuestro escenario. Para ello:

1. Activar el tema GRID en la vista.
2. Seleccionar **Edit | Copy Themes** (Editar | Copiar Temas) en la barra de menús.
3. Activar la ventana del escenario de trabajo.
4. Seleccionar **Edit | Paste** (Editar | Pegar).

Una vez disponible el tema GRID en el escenario, se ha de utilizar el diálogo de Interpolación de Cotas.

5. Seleccionar **Model Tools | Elevation Interpolation...** (Herramientas del Modelo | Interpolación de Cotas...).

Aparecerá el siguiente diálogo:

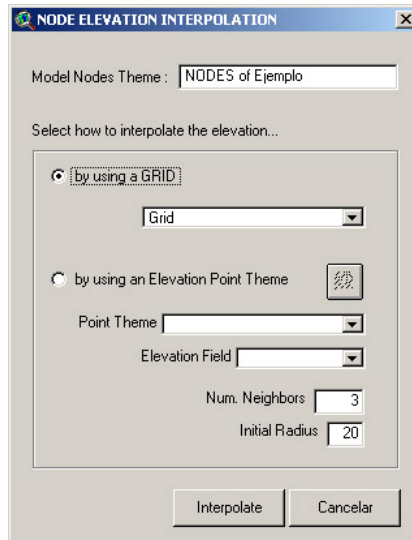


FIGURA 169. DIÁLOGO DE INTERPOLACIÓN DE COTAS.

Nótese como el primer campo dentro del diálogo no se puede editar y corresponde al tema de nudos de la red.


6. Elegir la opción **by using a GRID** y seleccionar el nombre del tema GRID que se va a utilizar para la asignación de cotas. En nuestro caso, seleccionar el tema con nombre 'GRID'.
7. Pulsar el botón **Interpolate** (Interpolación).

Automáticamente se asigna a cada uno de los nudos de la red, el valor de cota asociado a la celda del tema GRID que ocupa su misma posición. El valor de cota de la celda corresponde al valor interpolado a partir del TIN obtenido con las curvas de nivel.

El usuario puede verificar los valores de las cotas una vez finalizado el proceso mediante la generación de un nuevo tema resultado de una consulta.

A2.9.1 Generación de un temático de cotas

➤ Para generar un temático de cotas:

1. Seleccione **Model Tools | Queries** (Herramientas del Modelo | Consultas) de la barra de menús o bien, pulse el botón  de la barra de herramientas de GISRed.
2. Marque la opción **ELEVATION** del apartado de **Nodes**.
3. Pulsar **OK**. Se añadirá un nuevo tema de puntos a la tabla de contenidos del escenario clasificado por cotas.

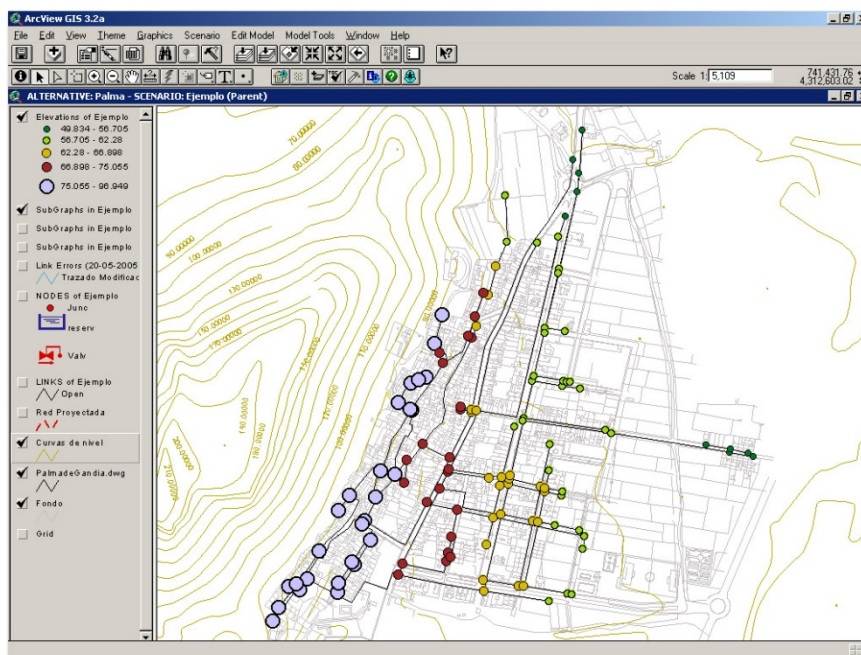


FIGURA 170. GENERACIÓN DE UN TEMÁTICO DE COTAS EN NUDOS.

A2.10 ASIGNACIÓN DE CONSUMOS

Esta es una de las etapas clave dentro del proceso de construcción de un modelo matemático de una red de distribución de agua. La asignación de consumos a los nudos de la red resulta una labor harto difícil sin la ayuda de herramientas que faciliten la tarea de repartir el caudal consumido. Dada la componente espacial de esta tarea, los SIG proporcionan un gran número de herramientas encaminadas a la gestión espacial de toda la información que interviene en el proceso. Normalmente entrará en juego también la posibilidad de conexión con bases de datos o ficheros externos con información acerca de los consumos recopilados por calles, por acometidas, etc. Resulta muy útil en estos casos disponer de un módulo capaz de realizar asignaciones automáticas a partir de estos ficheros o tablas externas, explotando la eficiencia de todas las herramientas disponibles en un SIG. GISRed implementa un gestor de hipótesis de carga y la opción de repartir los consumos a partir de temas de puntos (grandes consumidores localizados por ejemplo, acometidas,...), temas de líneas (agrupación de consumos por calles por ejemplo, ...), o bien temas de polígonos (áreas de consumo o *District Metered Areas* DMA's), sobre ciertos nudos elegidos en función del diámetro de las tuberías a que pertenecen u otros criterios. Se utilizan para ello herramientas de análisis espacial. Además incluye una herramienta en forma de asistente que permite tener en cuenta el reparto del consumo no registrado (ej. debido a fugas).

Esta última opción se utiliza para ajustar el volumen inyectado a la red con el volumen consumido; así, es posible introducir como parámetro de entrada el volumen inyectado o bien utilizar un tema de polígonos en el que se define el rendimiento de la red por zonas o sectores, o bien la inyección total por áreas. En cualquier caso, el volumen no registrado se reparte de manera proporcional a la demanda existente en los nudos de cada zona.

A2.10.1 Reparto de consumos por calles

Siguiendo el ejemplo, se va a llevar a cabo la asignación de demandas a los nudos del modelo más próximos a cada segmento de calle, a partir de una tabla con la serie de consumos acumulados por calles.

Por tanto el tema principal en esta etapa de carga del modelo de red va a ser el callejero de la población objeto de estudio. La siguiente figura muestra el callejero disponible en nuestro ejemplo.

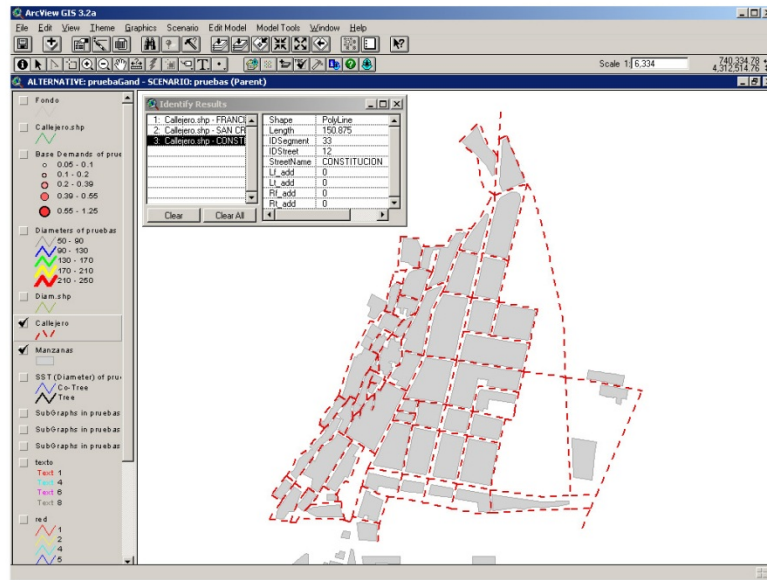


FIGURA 171. CALLEJERO DE LA POBLACIÓN.

Además del callejero, se ha construido una tabla con una hoja de cálculo que especifica el consumo total anual en metros cúbicos existente en cada uno de los segmentos de calle. Con lo cual existe una correspondencia entre cada uno de los registros de la tabla de atributos del callejero y la tabla de consumos registrados.

El primer paso en el proceso de asignación es preparar el tema de consumos. Para ello, vamos a unir la tabla de consumos a la tabla de atributos del callejero y generaremos un nuevo tema de líneas. Para ello:

1. Abrir la tabla de atributos del callejero (**Theme | Table...**).
2. Abrir la tabla de consumos por segmentos de calle (consumos.dbf).
3. Seleccionar el campo IDSegment de la tabla consumos.dbf.
4. Seleccionar el campo IDSegment de la tabla de atributos del callejero.
5. Teniendo activa la tabla de atributos del callejero, llevar a cabo la unión de dichas tablas haciendo uso de la opción **JOIN (Table | Join)**
6. Generar un nuevo tema de líneas producto de la unión de campos. Para ello seleccionar la opción **Theme | Convert to Shapefile...** y nombrar el nuevo tema como **ConsCalles.shp**

A2.10.2 Definición de una curva de modulación

A continuación se utilizará el **Editor de Curvas de Modulación** para importar una curva de modulación. Esta curva está constituida por factores de modulación que cambian con el

instante de tiempo, y se aplica sobre la demanda base de cada nudo de consumo (siempre que tenga asignado este patrón de consumo).

➤ **Para importar el patrón de demanda:**

1. Abrir el editor de curvas de modulación (**Edit Model | Patterns...**) y seleccionar '**New**'.
2. A continuación pulsar el botón '**Load**' y abrir el fichero *curvamodulac.pat*
3. Pulsar el botón **OK** para consolidar la curva importada.
4. Para ver la curva de modulación gráficamente, utilice el botón '**Show Patt.**'

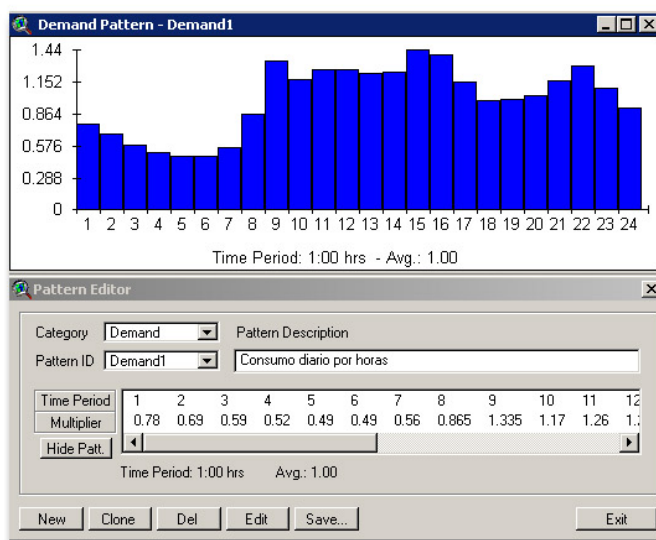


FIGURA 172. IMPORTAR CURVA DE MODULACIÓN.

A2.10.3 Asignación de consumos registrados por calles

Una vez preparado el tema de calles y definida la curva de modulación, se empleará el asistente de asignación de consumos. Para ello:

1. Seleccionar la opción de menú que se encuentra en **Model Tools | Demand Allocation...**
2. Seleccionar la opción **Spatial Allocation** y pulsar **NEXT>>>**
3. Como fuente de datos elegiremos un tema de líneas (**Type = Lines** y **Theme = ConsCalles.shp**). El campo que contiene los identificadores de los segmentos de calle es **IDSegment** y el campo que contiene el consumo anual es **m3_ano**. Las unidades son **m3/year**.
4. Como curva de modulación, elegiremos una única curva para todos los nudos de la red. La curva de modulación elegida será la que importamos en el paso anterior (**Global Pattern = Demand1**)
5. En cuanto al método de asignación, elegiremos el de reparto a todos los nudos más próximos (**Distributing to closest nodes**).

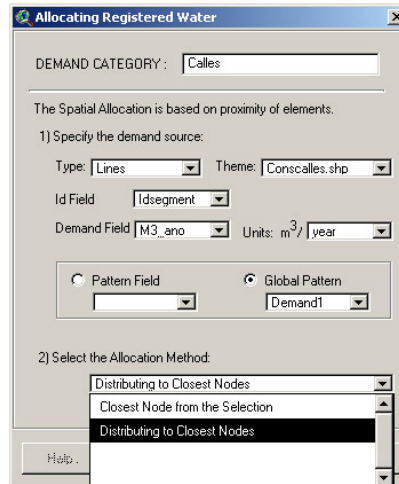


FIGURA 173. DIÁLOGO DE ASIGNACIÓN DE DEMANDAS.

A2.10.4 Asignación del consumo no registrado

A continuación, se va a ajustar el consumo no registrado, suponiendo que el rendimiento de la red es de un 70%. Esto significa que el volumen inyectado es un 30% superior al registrado, con lo cual, a la hora de hacer el balance hídrico total, se ajustará ese 30% de volumen de manera proporcional a la demanda asignada a cada nudo. La manera de hacer esto con GISRed es:

1. Seleccionar **Model Tools | Unaccounted-for Water**
2. En el diálogo que aparece seleccionar la opción **Volume Efficiency (%)** y en **Total Supply** introducir un 30%
3. A continuación pulsar sobre el botón **Adjust**

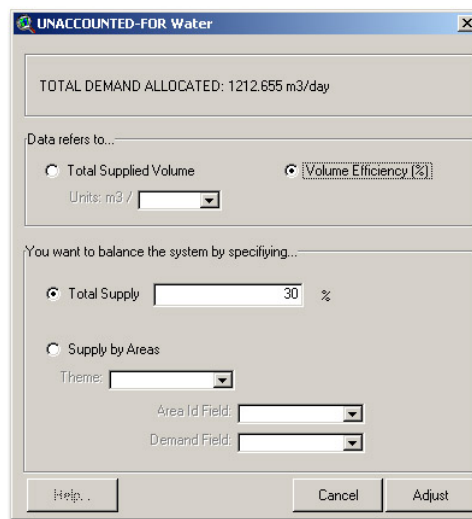


FIGURA 174. AJUSTE DEL CONSUMO NO REGISTRADO.

Para comprobar el resultado final de la asignación, podemos utilizar la opción de menú **Model Tools | Demand Statistics...**

Al seleccionar esta opción, se muestra una ventana donde se detalla el consumo registrado el consumo no registrado, el número de curvas de modulación existentes en el modelo y los nudos de consumo a los que afecta y por último el número de categorías de consumos, en el caso de nudos con demandas múltiples.

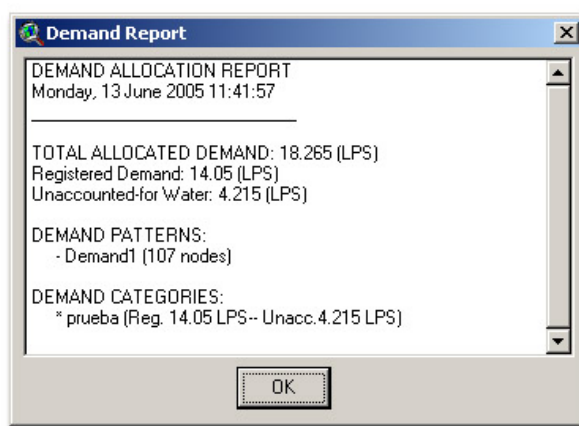


FIGURA 175. ESTADÍSTICAS DE CONSUMOS.

A2.11 LEYES DE CONTROL

Las Leyes de Control son reglas que determinan el modo de operación de la red durante la simulación. Controlan el estado de determinadas líneas de la red en función del tiempo, de los niveles en los depósitos y de las presiones en puntos de referencia de la red. Las leyes de control pueden clasificarse en dos categorías:

- Leyes de Control Simples
- Leyes de Control basadas en Reglas

En el ejemplo, se van a definir un par de leyes de control simples para la válvula reductora de presión que se ha introducido en el modelo.

Para definir las leyes de control simples:

1. Seleccionar **Edit Model | Controls...**
2. Tras la aparición del diálogo de Leyes de Control, elegir la categoría de Leyes de Control Simples (**Simple Controls**).
3. Pulsar OK.

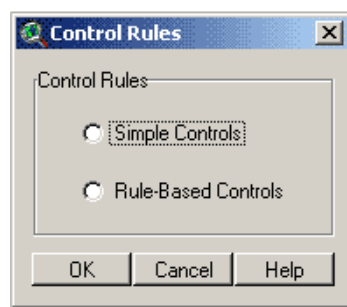


FIGURA 176. DIÁLOGO DE LEYES DE CONTROL.

A2.11.1 Definir leyes de control simples para la válvula reductora de presión

Las Leyes de Control Simples cambian el estado o la consigna de una línea en base a:

- el nivel de agua en un depósito,
- la presión en un nudo,

- el instante de la simulación,
- la hora del día.

En nuestro ejemplo vamos a añadir un par de leyes de control simples que regulen el funcionamiento de la válvula reductora de presión. Las Leyes de Control serán las siguientes:

```
LINK IDValvReduct 25 AT CLOCKTIME 7 AM
LINK IDValvReduct 20 AT CLOCKTIME 10 PM
```

➤ Para añadir una nueva ley de control simple:

1. Pulsar el botón Añadir Control (**Add Control**)
2. Elegir el Identificativo (ID) de la válvula reductora de la primera lista desplegable
3. Añadir la consigna en la siguiente casilla

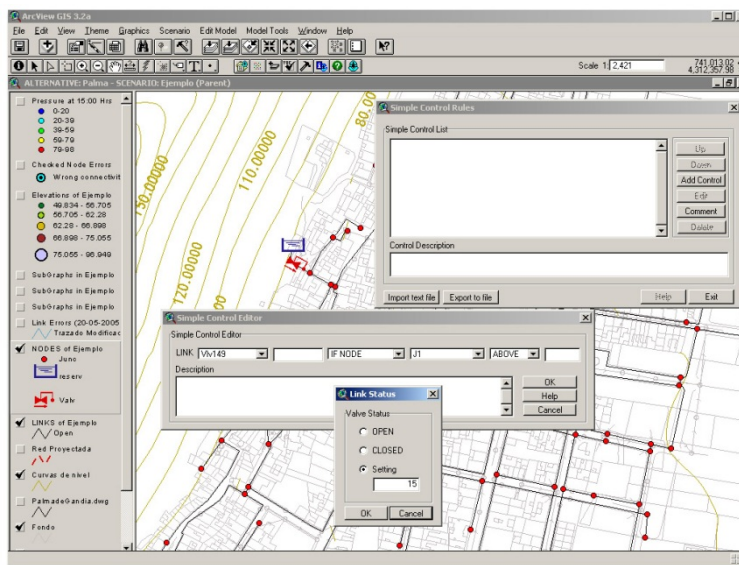


FIGURA 177. AÑADIR LEYES DE CONTROL SIMPLES AL MODELO DE RED.

4. Elegir la condición **AT CLOCKTIME** e introducir la hora
5. Es posible añadir una descripción adicional para cada una de las leyes de control
6. Pulsar OK
7. Repetir los mismos pasos para añadir la segunda ley

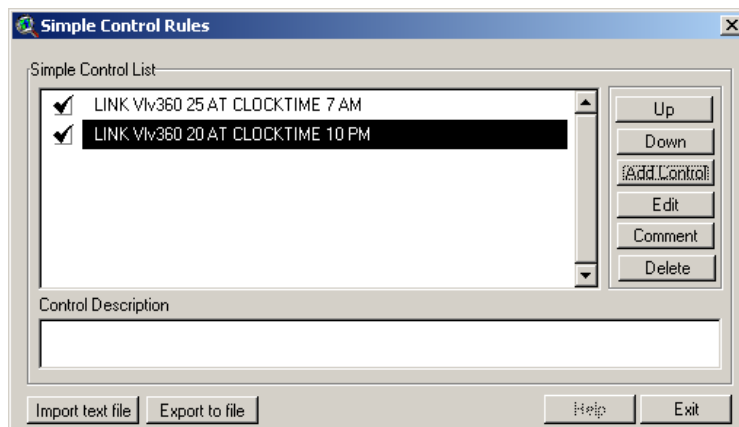


FIGURA 178. LEYES DE CONTROL SIMPLES PARA LA VÁLVULA REDUCTORA.

A2.12 OPCIONES DE CÁLCULO

Una vez definidos y asignados todos los parámetros requeridos por el modelo de red para ser simulado hidráulicamente, es necesario establecer las opciones de cálculo antes de poder simular el modelo.

Existen cinco grupos de opciones que controlan el modo en que se va a llevar a cabo el cálculo hidráulico y de calidad. GISRed los reproduce en tres categorías:

1. Opciones **Hidráulicas (Hydraulics)**
2. Opciones de **Calidad-Reacciones (Quality-Reactions)**
3. Opciones de **Tiempos y Energía (Times-Energy)**.

En este caso se va a asignar una curva de modulación por defecto en las opciones Hidráulicas y se va a cambiar la duración de la simulación en las opciones de tiempo para poder realizar una simulación en periodo extendido.

➤ Para acceder y cambiar estas opciones:

1. Seleccionar **Scenario | Analysis Options** (*Escenario | Opciones de Cálculo*) en la barra de menús.
2. Seleccionar la categoría **Hydraulics** e introducir el nombre de la curva de modulación importada anteriormente en la casilla **Default Pattern**. En este ejemplo el nombre es **'Demand1'**
3. Seleccionar la categoría **Times-Energy** e introducir en la casilla **'Total Duration'** como duración de la simulación, **24 horas**.
4. Para el resto de opciones se aceptarán los valores que vienen por defecto.

La figura siguiente muestra los cambios introducidos.

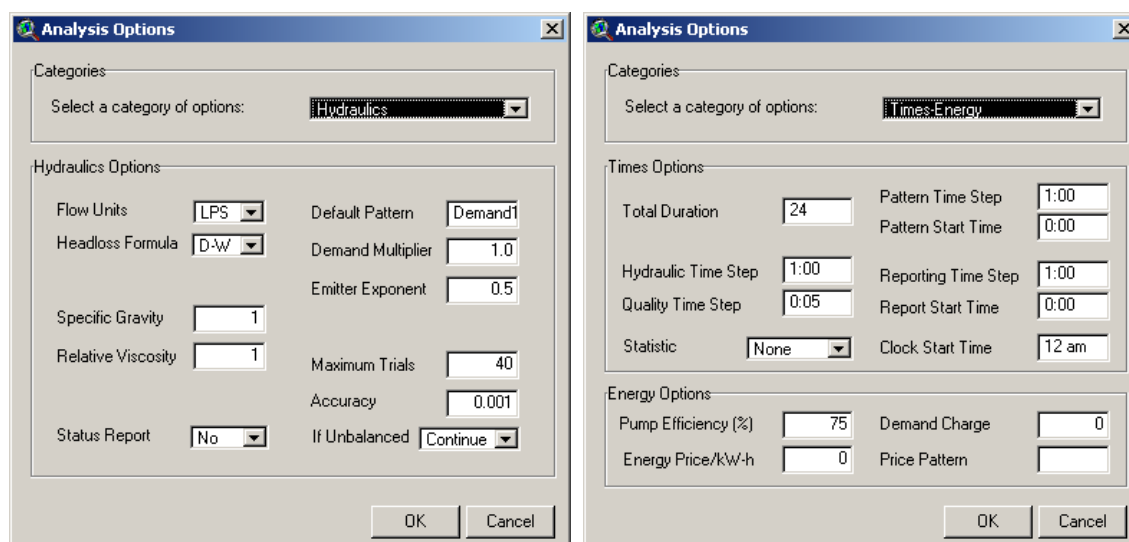


FIGURA 179. OPCIONES DE CÁLCULO.


A2.13 SIMULACIÓN

GISRed genera un archivo de texto con los datos de entrada requeridos por el simulador hidráulico EPANET. Una vez obtenido este fichero, es posible simular desde EPANET, o bien, llamar a su módulo de herramientas y recuperar los datos desde el propio SIG. En este último caso, la aplicación se encarga de almacenar los resultados en tablas de la base de datos, para su consulta posterior.

Para visualizar los resultados de la simulación, se dispone de un navegador en el que se elige la variable a representar y el instante de tiempo. Automáticamente se genera un tema clasificado por colores con los resultados obtenidos.

A2.13.1 Exportación del modelo a Epanet 2

Para exportar la red del ejemplo a un fichero de entrada de EPANET2:

1. Seleccionar **Escenario | Exportar Fichero de Entrada de Epanet (Scenario | Export Epanet Input File)** de la barra de menús o pulsar  en la barra de herramientas de GISRed.
2. Elegir un directorio de destino e introducir un nombre para el fichero de entrada de Epanet.
3. Pulsar OK.

Se genera el fichero INP de entrada a Epanet. Ahora, puede abrir este fichero en EPANET2 y ejecutar la simulación.

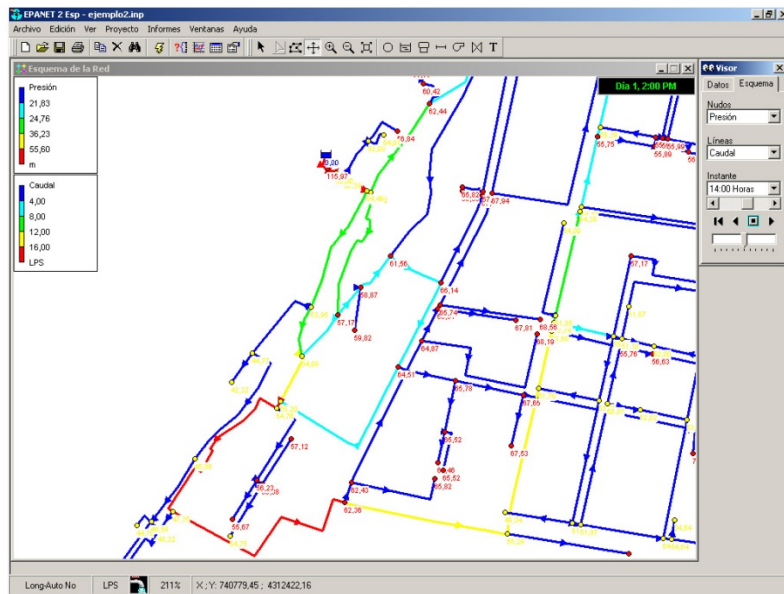


FIGURA 180. SIMULACIÓN DEL MODELO DESDE EPANET2.

A2.13.2 Simulación desde GISRed

Si se desea simular el modelo desde el entorno de GISRed, hay que proceder del siguiente modo:


1. Generar un fichero de entrada a EPANET de la misma manera que se indicó en A2.13.1 si no se ha generado todavía.
2. Seleccionar **Escenario | Ejecutar Simulación, (Scenario | Run Analysis)** de la barra de menús.

3. GISRed requiere un fichero INP para poder ejecutar la simulación. Seleccionar por tanto el fichero INP anterior.

GISRed comienza la simulación del modelo y la barra de estado de ArcView muestra el instante de tiempo simulado.

4. Al final de la simulación, aparecerá una ventana de informe.
5. Pulsar OK para ver los resultados.
6. La ventana del visor del esquema debe aparecer en ese momento.

El visor del esquema permite seleccionar las magnitudes e instante de tiempo a visualizar mediante códigos de colores sobre temas temporales de resultados del Esquema de Red. Para hacer que el tema de resultados sea un tema permanente, pulsar el botón **Guardar Tema (Save Theme)** y dar un nombre al tema en la ventana que se presenta. Los colores del escenario se actualizarán al cambiar el instante de tiempo seleccionado en el Visor.

 **NOTA:** El Visor del Esquema también es accesible desde el menú (**Scenario | Browser of Results**) siempre que previamente se haya ejecutado una simulación.

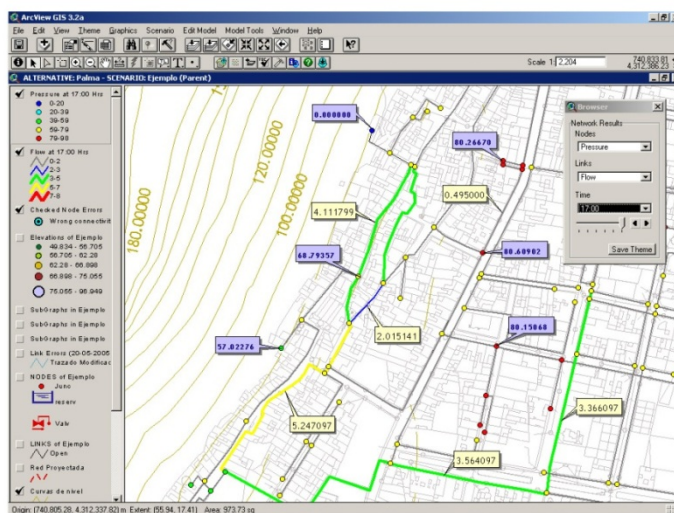


FIGURA 181. SIMULACIÓN DEL MODELO DESDE GISRED V1.0.

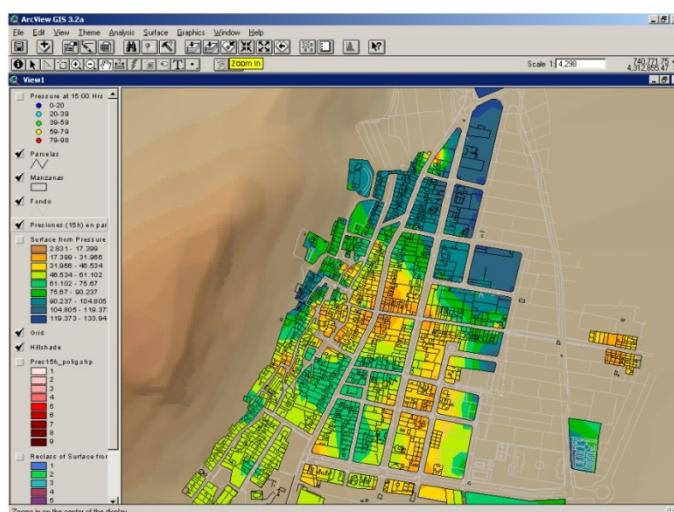


FIGURA 182. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN. PRESIONES (15H) DISTRIBUIDAS POR PARCELAS.

ANEXO 3. EXAMPLE OF A NETWORK MODEL CALIBRATION

Calibration of pipe network systems consists of determining the physical and operational characteristics of an existing system. This is achieved by determining various parameters that, when input into a hydraulic simulation model, will yield a reasonable match between measured and predicted pressures and flows in the network (Shamir et al., 1968)

A3.1 INTRODUCTION

In order to illustrate the capability of the calibration module of the GISRed Extension, the following example is presented. The network to calibrate is a small water distribution system of a hypothetical community, Anytown (USA), originally introduced by Walski et al. in 1987. The network layout is shown in the following picture:

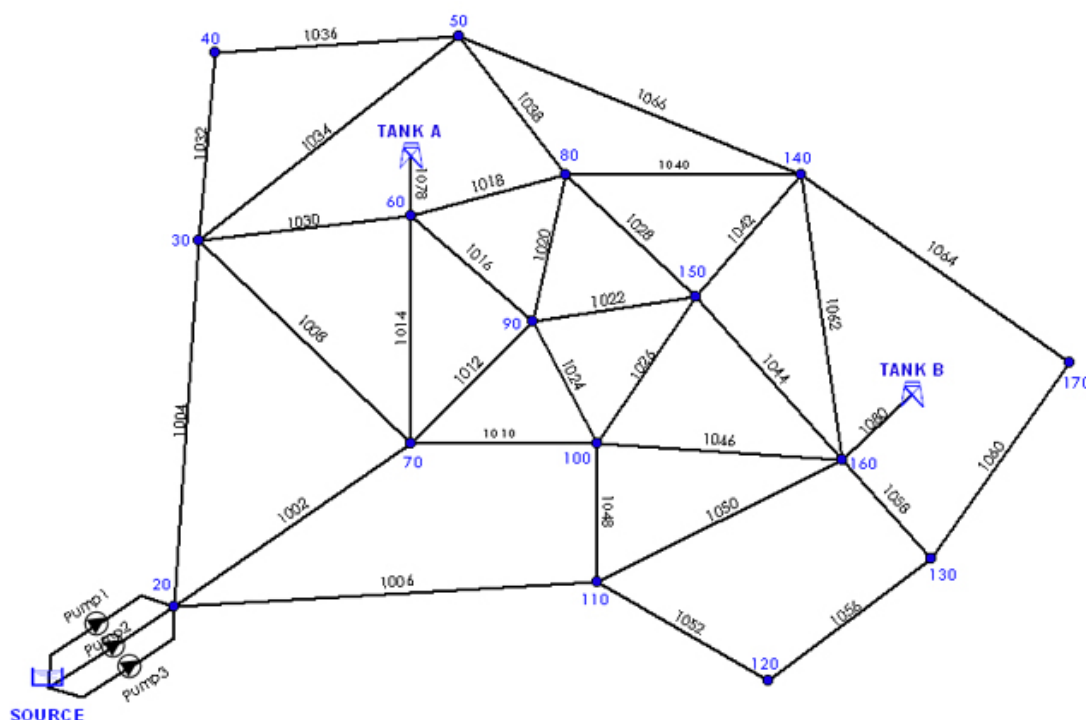


FIGURA 183. ANYTOWN NETWORK LAYOUT.

A3.2 NETWORK PROPERTIES

The water distribution system consists of 40 pipes, 22 junction nodes (16 demand nodes, 6 non-demand nodes), two elevated tanks, one fixed head source (reservoir) and three pumps. The complete network characteristics are given below. For this example, pipe roughness was expressed in terms of the Hazen-Williams C factor. Both tanks have bottom elevations of 65.5 m and overflow elevations of 79.5 m. the water level in the clear-well is maintained at an elevation of 3.04 m. All three pumps have identical pump characteristic curves. **A unique demand pattern** is considered for all demand nodes. **Four monitoring points** located on nodes **40, 90, 120** and **140** recorded head measurements during a hypothetical field test. (Ormsbee, 1989)

NODES

NODE	ELEVATION (m)	DEMAND (l/s)
20	6,23	31,51
30	15,24	12,52
40	15,24	12,52
50	15,24	31,51
60	15,24	50,90
70	15,24	31,51
80	15,24	31,51
90	15,24	63,88
100	15,24	12,52
110	15,24	12,52
120	36,60	31,51
130	36,60	12,52
140	24,40	12,52
150	36,60	12,52
160	36,60	31,51
170	36,60	12,52
TOTAL		404,00

*Red numbers indicate monitoring points | LC = Loading Condition

PIPES

PIPE	NODE 1	NODE 2	LENGTH (m)	DIAMETER (mm)	ACTUAL C-FACTOR (H-W)	ASSUMED C-FACTOR (H-W)	GROUP
1002	20	70	3657	406	120	110	1
1004	20	30	3657	406	120	110	1
1006	20	110	3657	406	120	110	1
1008	30	70	2743	305	70	110	2
1010	70	100	1830	305	120	110	1
1012	70	90	1830	254	70	110	2
1014	70	60	1830	305	70	110	2
1016	60	90	1830	254	70	110	2
1018	60	80	1830	305	70	110	2
1020	80	90	1830	254	70	110	2
1022	90	150	1830	254	70	110	2
1024	90	100	1830	254	70	110	2
1026	100	150	1830	305	70	110	2
1028	80	150	1830	254	90	110	3
1030	30	60	1830	254	120	110	1
1032	30	40	1830	254	120	110	1
1034	30	50	2743	254	120	110	1
1036	40	50	1830	254	120	110	1
1038	50	80	1830	254	120	110	1
1040	80	140	1830	254	130	110	4
1042	140	150	1830	203	130	110	4
1044	150	160	1830	203	90	110	3
1046	100	160	1830	305	90	110	3
1048	100	110	1830	203	90	110	3
1050	110	160	1830	254	90	110	3
1052	110	120	1830	203	90	110	3
1056	120	130	1830	203	130	110	4
1058	130	160	1830	254	130	110	4
1060	130	170	1830	203	130	110	4
1062	140	160	1830	203	130	110	4
1064	140	170	3656	203	130	110	4
1066	50	140	3656	203	130	110	4
1078	60	TANK A	31	305	110	110	5
1080	160	TANK B	31	305	110	110	5

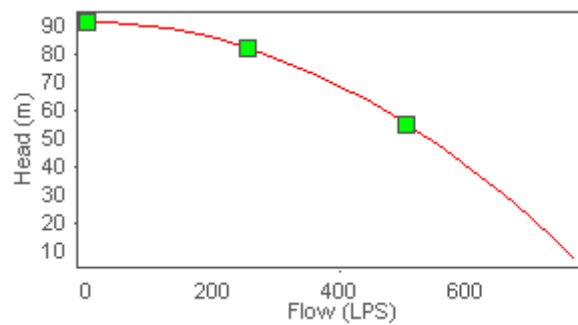
PUMPS

For all loading conditions all three pumps are assumed to be in operation.

PUMP	PIPE	LENGTH (m)	DIAMETER (mm)	C-FACTOR (H-W)
PUMP 1	Suction Pipe	1	1600	150
	Discharge Pipe	1	1600	150
PUMP 2	Suction Pipe	1	1600	150
	Discharge Pipe	1	1600	150
PUMP 3	Suction Pipe	1	1600	150
	Discharge Pipe	1	1600	150

Q-H CURVE (Identical curve for the 3 pumps)

Q-H CURVE	
Q (l/s)	H (m)
0,0	91,40
252,50	82,30
504,70	55,20



TANKS

Both tanks have identical characteristics and are filling and draining during a 24 hours simulation.

NODE	ELEVATION (m)	DIAMETER (m)	INITIAL LEVEL (m)	MAX. LEVEL (m)	MIN. LEVEL (m)
TANK A	65,5	21,55	6	14	0
TANK B	65,5	21,55	6	14	0

SOURCE (RESERVOIR)

NODE	ELEVATION (m)
SOURCE	3.04

DEMAND PATTERN

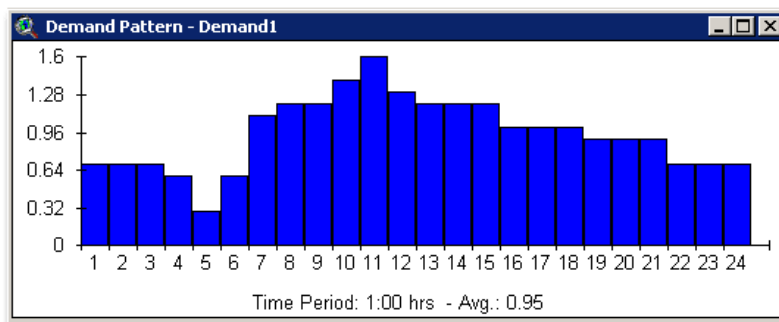


FIGURA 184. CALIBRATION EXAMPLE. DEMAND PATTERN.

A3.3 CALIBRATION PROCESS

The following diagram depicts the process of calibration by means of the GISRed Extension.

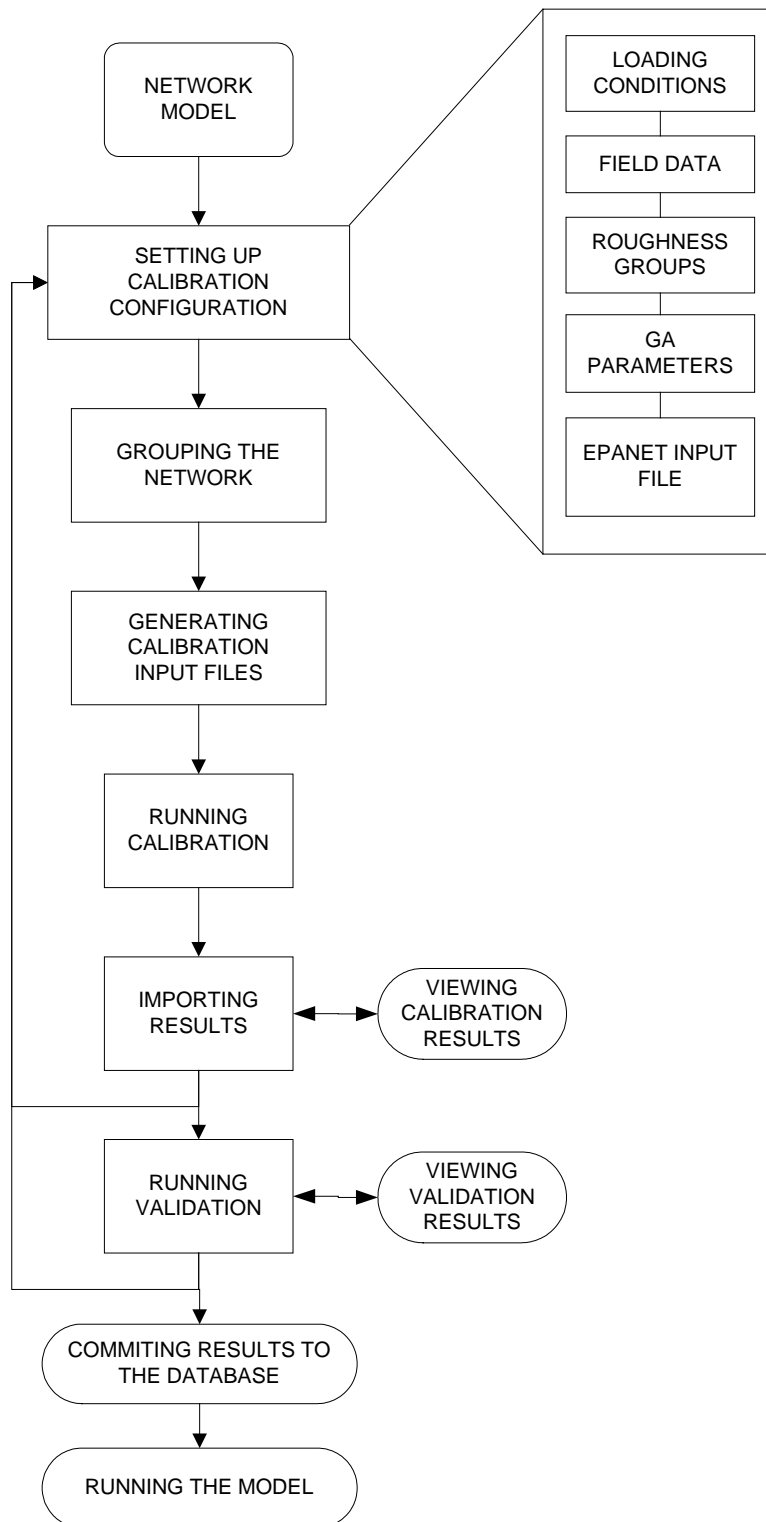


FIGURA 185. GISRED CALIBRATION PROCESS. FLOWCHART.

Our first task is to open the **Anytown network example** if not opened yet.

1. Launch ArcView if it is not already running. Once opened, go to **Extensions** in the **File** menu when the ArcView Project Window is active and select **GISRED 1.0**.
2. Select **Network | Projects** to open the **Anytown** example. If the example is in the list of projects, select it and press open. If not, select **Add**, and enter the details required. Remember that the example is provided along with the extension. So you should have a directory called **Anytown** in $\$AVEXT/GISRED/examples$.

Let us start up by defining a new calibration configuration:

1. Select **Model Tools | Calibration Administrator...** to see the main calibration dialog.
2. Press **New** and fill in all the required information. Enter a name for the Configuration and a path of a valid Epanet input file of the network you want to calibrate (you can always make one from the GISRed interface).

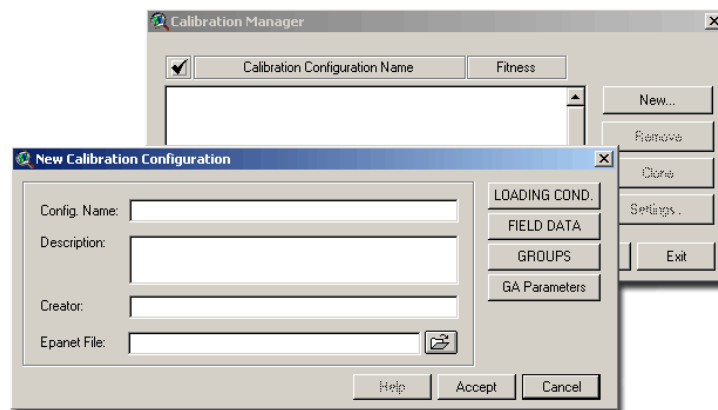


FIGURA 186. NEW CALIBRATION CONFIGURATION.

Before accepting, we are going to enter the rest of the parameters required to make up the calibration configuration.

3. Now, select **Loading Cond.** to open the dialog form. In our example the duration of the simulation is 24 hours. Select all of them (by default if none of them is selected GISRed assumes all of them are to be included in the analysis). Note: to select more than one hour, use the shift key.

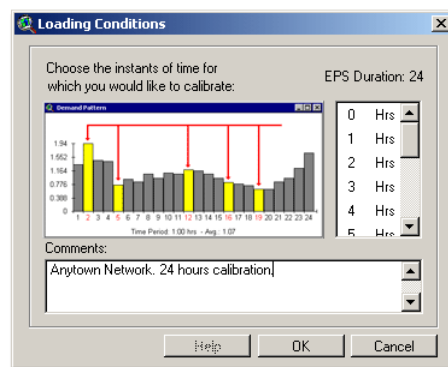


FIGURA 187. LOADING CONDITIONS DIALOG.

The next step is to specify the monitoring points that recorded the **Head Measurements**.

4. Press **Field Data**. Since there are just head measurements available, press Import (from the Head section). Fill in the gaps as shown in the next figure and press Import.

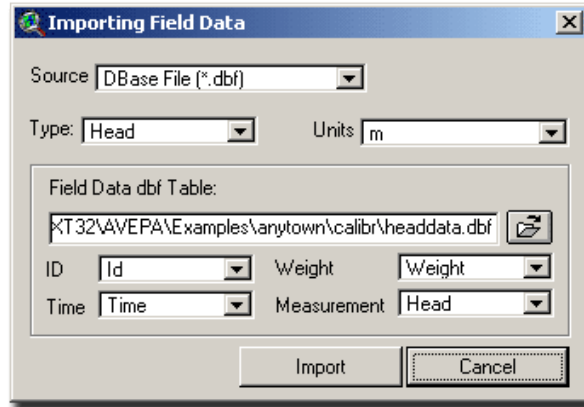


FIGURA 188. IMPORTING FIELD DATA.

After the importation, the main field data dialog should look like this:

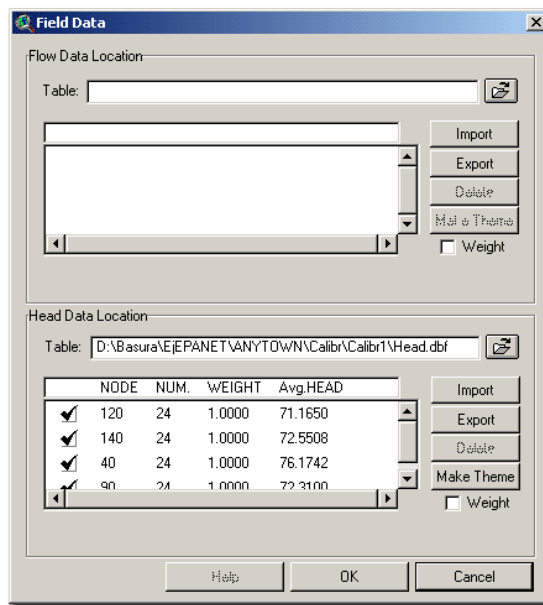


FIGURA 189. FIELD DATA AFTER THE IMPORTATION.

Notice the check marks that appear beside each one of the measurement points. They allow the user to activate/deactivate the measurement. If deactivated, it means the measurement will be used for validation purposes. Press OK to accept all the changes.

Next step is to setup the Roughness Groups.

5. Select **GROUPS** in the New Calibration Configuration Dialog form. Define the following 5 decision variables:

GROUP ID	PRIOR ESTIMATE	Weight
1	140	0.00
2	60	0.00

GROUP ID	PRIOR ESTIMATE	Weight
3	89	0.00
4	135	0.00
5	100	0.00

NOTE1: We will group the network pipes later on, using the classification defined above.

NOTE2: The weight of each group has been set up to 0, thus any prior estimate is neglected in the objective function.

6. Next step is to define the **GA Parameters**.

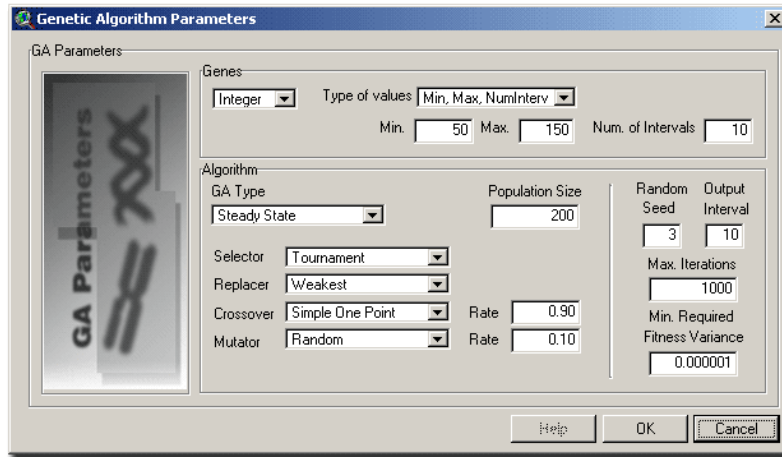



FIGURA 190. GA PARAMETERS DIALOG.

In this example we are going to use **Integer genes** that can take the values from within a finite interval (see Figura 190). For the genetic algorithm the following parameters are selected:

GA Type	STEADY STATE
Selector	TOURNAMENT
Replacer	WEAKEST
Crossover	SIMPLE ONE POINT Rate: 0.90
Mutator	RANDOM Rate: 0.10
Population Size	200
Random Seed	3
Output Interval	10
Max. Iterations	1000
Min. Required Fitness Variance	1e-6

NOTE: To see an explanation of each one of the possible parameters, see the section titled 'The Standard Library' at the end of the example.

7. Finally, the last step is to enter a valid Epanet Input File. If this file does not exist or changes were introduced in the actual model, a new file can be generated using the button  of the GUI.

After setting all the parameters of the calibration configuration and accepting them, the Calibration Manager should look like this:

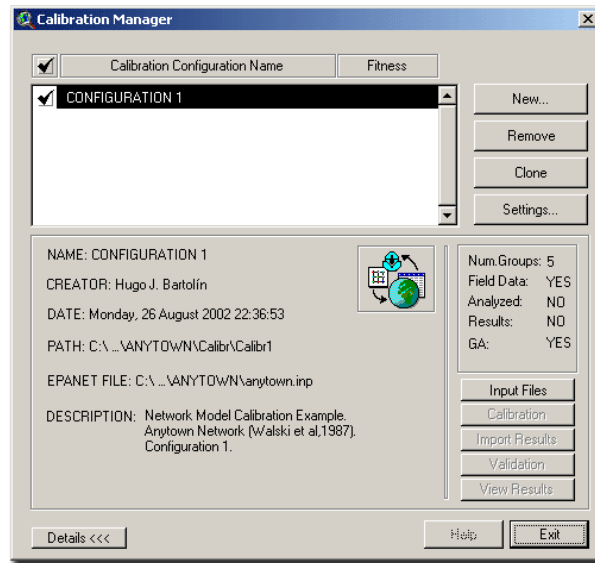


FIGURA 191. CALIBRATION MANAGER.

We have a **new calibration configuration**. The check mark beside the name of the configuration points out the current configuration. Since there might be several different configurations for the same network, the mark indicates the current one (it is obvious that only one configuration may be the current one at a time). By using the menu bar (see Figura 192; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) instead of the calibration manager, the user will be prompted with the dialogs of the selected option for the current configuration.

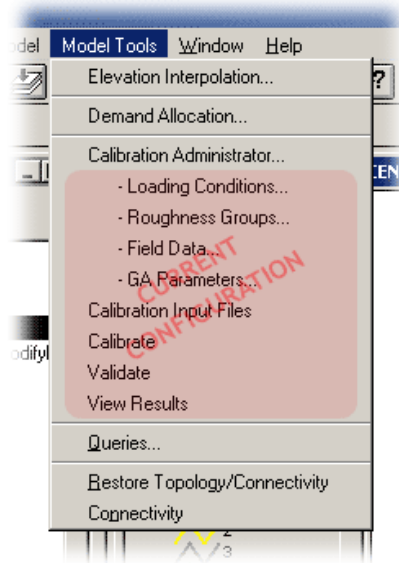




FIGURA 192. CALIBRATION MENU BAR OPTIONS.

Notice that only the button Input Files is active. But before going on with the creation of the calibration input files, the network must be grouped. Thus, exit the calibration manager and continue with the next section

A3.4 GROUPING THE NETWORK

At this point we are ready to group the network pipes. The grouping may be carried out in two possible ways:

1. By using the ArcView tool  to select the pipes manually.
2. By means of particular queries. For this, you have to use the Query Builder tool that ArcView provides, . For instance, you might want to make a query to select all those pipes of the network whose diameter is lower than 300 and higher than 100. The syntax of the query would be: $(([Diameter] > 100) \text{ and } ([Diameter] < 300))$
3. As the pipes are selected, assign them a group by using the **Group Edit** dialog.
 - a. Bring up Edit Model | Group Edit...

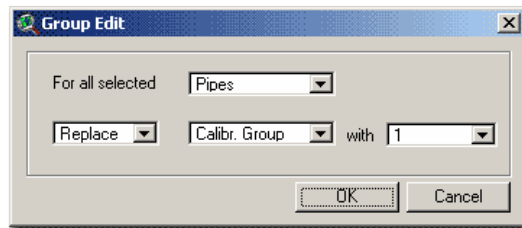


FIGURA 193. GROUP EDITING DIALOG.

- b. Select the property Calibr.Group and the required Group ID from the dropdown list.
- c. Accept.

GISRed shows a report window specifying the number of junctions affected by the change.

Alternatively and if further individual changes are required, the pipe property dialog can be used to assign or change the group which a pipe belongs to.

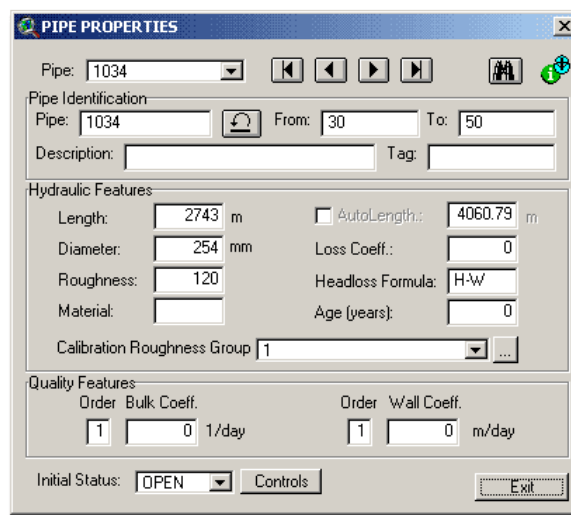


FIGURA 194. PIPE PROPERTY DIALOG. CHANGING CALIBRATION ROUGHNESS GROUP.

A3.5 CALIBRATION INPUT FILES

Following the mainstream of the flowchart of the Figura 185, the next step is the generation of the calibration input files. These files will allow the GA calibrator to do its job. To generate all the files needed, press the button 'Input Files' of the calibration manager (see Figura 191). Three text files are created in the current calibration directory, namely main.in, lccdata.in and ga.in

A3.6 RUNNING A CALIBRATION AND IMPORTING RESULTS

Once the three files are generated by the application, the button Calibration of the Calibration Manager will be activated. Press this button to launch the calibrator. A command window will appear and the calibrator will start running. When it gets to the end of the iterative process, three new files are generated, this time with *.out extension, namely main.out, HQ.out and ga.out. All these text files are imported into GISRed dbf tables.

A3.7 VIEWING CALIBRATION RESULTS

After the importation of all the calibration results, the fitness of the calibration process turns up. In this particular case, and for the GA parameters selected, the fitness appears to be 0.53020.

NOTE: The objective function used by the calibrator is as follows (weighted sum of squared errors),

$$E = \sum_{i=1}^{N_{Heads}} \sum_{j=1}^{N_{LC}} w_{Hij} (H_{ij}^* - H_{ij})^2 + \sum_{i=1}^{N_{Flows}} \sum_{j=1}^{N_{LC}} w_{Qij} (Q_{ij}^* - Q_{ij})^2 + \sum_{k=1}^{N_{PE}} w_{\delta k} (\delta_k^* - \delta_k)^2$$

where:

E = Fitness (dimensionless)

H* = Measured Head

H = Predicted Head

Q* = Measured Flow

Q = Predicted Flow

δ^* = Prior estimate of the decision variable (*Pseudo Measurement*)

δ = Prior estimate of the decision variable

w = weights ($1/\sigma^2$), σ = generalized error (residual, in measurement units)

and the problem is formulated as a constrained optimization problem of weighted least square type, (that is, **Minimise E**), subject to a particular set of nodal demands (loading conditions) and known boundary conditions (reservoir/tank heads, pump/valve status).

In this particular example the terms of flows and decision variable prior estimates are neglected, since we are not considering flow measurements and the weights for all decision variables are set to 0.

To see the entire set of results, press the button **View Results** in the **calibration manager**. The following dialog gets opened up.

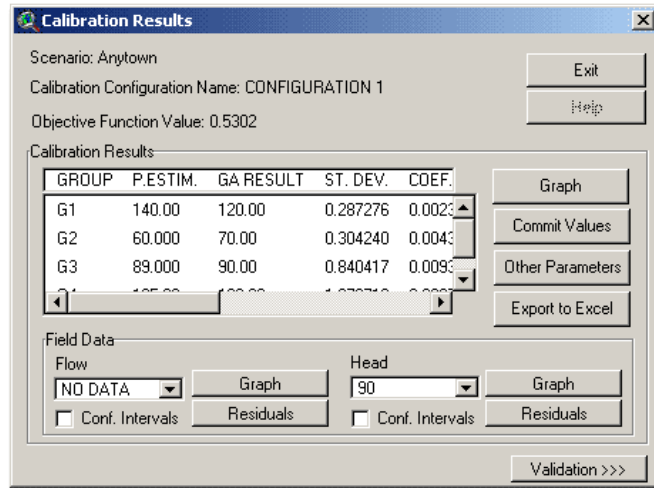
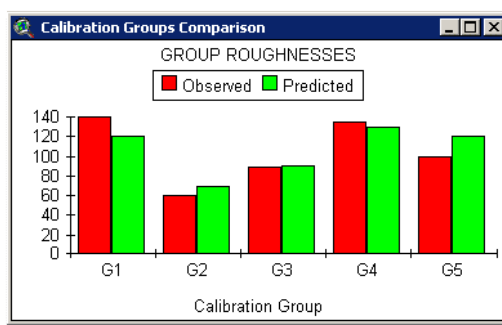


FIGURA 195. CALIBRATION RESULTS DIALOG.

This dialog allows to see several different kinds of graphs. All types are showed below. The first graphic shows the relation between the roughness of all pipe groups (use the **GRAPH** button beside the calibration results to see the graph). The two next graphics show the observed and predicted measurements (for each loading condition) without and with confidence intervals respectively (use the **GRAPH** button beside each one of the field data to see the corresponding graph, check the **Conf. Intervals** to see the confidence intervals along with the predicted values). The last graph depicts the residual values at the selected measurement location, namely the difference between observed measurements and predicted ones (use the **Residuals** button to see this graph).

Note: In this example we are not going to use the Validation part as we used all measurements in the field data dialog to calibrate the network. It is customary for calibration purposes to leave several measurements out of the set just to use them later on for validating the calibration.



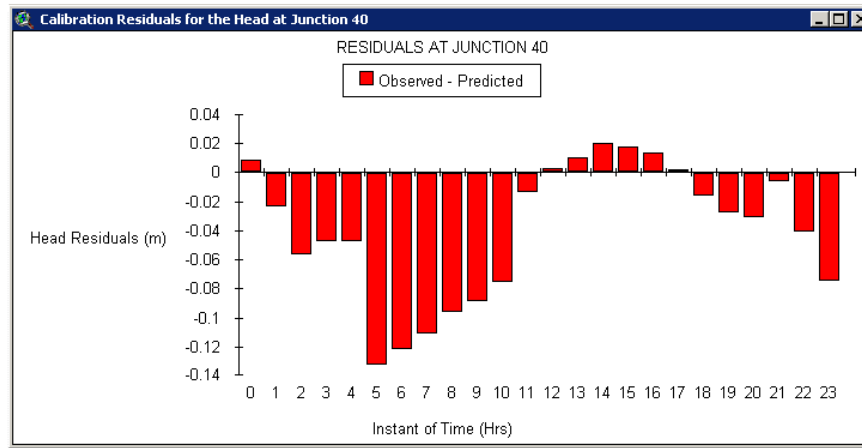
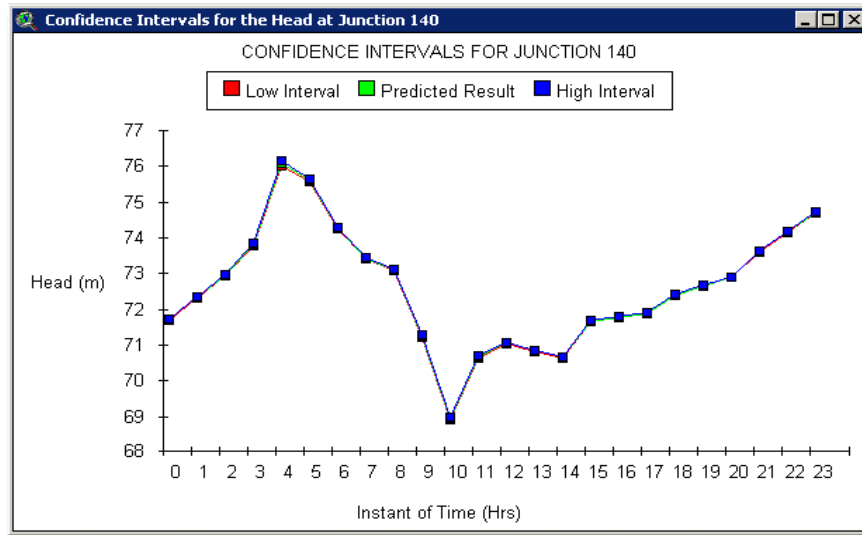
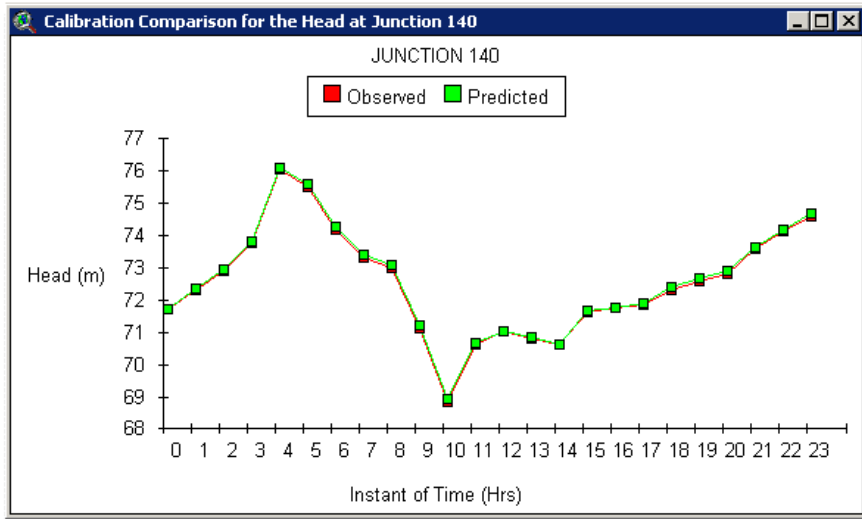


FIGURA 196. DIFFERENT TYPES OF GRAPHS SHOWING CALIBRATION RESULTS.

Another interesting thing that the calibrator computes is a whole set of useful regression statistics that can be used to assess the quality of the obtained calibration problem solution and the goodness of all those adjusted variables.

Use the button **Other Parameters** to see all those statistical analysis results. They can provide insight into the calibration process, quantify the quality of the particular water distribution system model calibration and identify data shortcomings and needs.

Finally, use the button **Commit Values** to replace the roughness of each pipe with those predicted roughness values calculated

A3.7.1 STATISTICS

(Refer to Z. Kapelan thesis, 2002)

➤ Decision Variables (Calibration Parameters) Results:

- **ID:** Identifier of the decision variable.
- **Mean:** Predicted roughness value for the actual decision variable.
- **StDev:** Parameter standard deviation. Absolute uncertainty with which each parameter value is determined.
- **CoeffVariat:** Parameter coefficient of variation. Relative uncertainty with which each parameter value is determined.
- **95%LinearConfidenceInterval:** Linear parameter confidence interval is defined as the interval that contains the true value of the analysed parameter with a probability of 95%, *regardless* of the values of all other parameters.
- **CompScaledSens:** Composite Scaled Sensitivity. It is considered to be a relatively good indicator of the quantity of information provided by all observations (sample and prior information) for the estimation of a particular parameter. It is dimensionless and independent of the observed values, and therefore, the model fit. In an ideal case, all composite scaled sensitivities should have similar values, i.e. observed information should be equally distributed among parameters. According to Hill (1998), the ratio of largest to smallest *cssj* should not exceed app. 100 to maintain a well-posed problem. Obviously, parameters with large composite scaled sensitivities are candidates for splitting into two or more parameters (providing that they represent initially grouped parameters), while those with small values are candidates for either omitting from calibration or grouping with other parameters. Composite scaled sensitivities can also be used to indicate contribution of the potential new observation data.

➤ **OBJECTIVE FUNCTION:** The objective function is the fundamental statistic used to assess overall calibration model fit. *Weighted least squares objective function (see the note earlier on).*

- **Sample component of objective function value**
- **Prior estimate component of objective function value**
- **Maximum Likelihood Objective Function Value :**
Another alternative to a weighted least squares objective is the maximum likelihood objective. By definition, likelihood L is the probability of occurrence of a specific instance of residuals r . Assuming independent and normally distributed residuals, likelihood is defined as follows (Carrera et al., 1986a):

$$L = [\det(2\pi C)]^{-\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{1}{2}r^T C^{-1}r}$$

where: C – generalised error covariance matrix (see above); $\det()$ - matrix determinant operator.

- $$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2 \right)}$$
- **Root Mean Square Error:** $\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2 \right)}$, where: y^* = observations, y = predictions, n = number of observations.
 - **Number of Degrees of Freedom:** $\nu = N_s + N_p - N_a$, where N_s is the number of sampled observations, N_p is the number of prior estimates and N_a is the number of unknown calibration parameters.
 - **Calculated Error Variance:** Defined as $s^2 = E/\nu$, where s is the standard regression error, E is the objective function value and ν is the number of degrees of freedom of the calibration model. If the fit achieved by regression is consistent with the observed data accuracy reflected in weighting W , the expected value of s^2 (and s) is one. Significant deviations of the calculated error variance from one indicate that the fit is not consistent with the weighting scheme. In practice, value of s^2 is, typically, larger than one, indicating usually the presence of model and measurement error(s) or larger than expected measurement error(s). If value of the s^2 is smaller than one it usually indicates existence of smaller than expected measurement errors. Obviously, in the general case when $W \neq 1$, s^2 is a dimensionless number. In the special case when weights are not used ($W=1$, ordinary least squares), s^2 has same units as the measurement errors.
 - **Calculated Standard Error:** (μ_r/σ_r) , where μ_r is the average weighted residual, σ_r is the standard deviation (spread of residual). It is used to indicate, in relative terms, how accurate the fit is, in an ideal case the value should be equal to zero (in practice usually less than a factor which is of the order of magnitude 10^{-1}).
 - **Natural log. of the param. covariance matrix determ.**
 - **Parameter Confidence Region Dimension:** Parameter confidence region addresses the probability that true values of two or more parameters are *simultaneously* within the specified region. In the case of two parameters, the joint confidence region is an ellipse whose actual size is defined by ellipse semi-axes which are proportional to the square roots of the corresponding eigenvalues of the *Cova* (parameter covariance matrix). The direction of the ellipse axis is defined by eigenvectors of *Cova*. The degree of the linear dependence (correlation) between parameters a_1 and a_2 is indicated by the angle between ellipse major axis and the horizontal (parameters a_1 and a_2 are independent when the mentioned angle is equal to zero). Eigenvalues and eigenvectors of the parameter covariance matrix can be computed by singular value decomposition of that matrix.
 - **Trace of the Parameter Covariance Matrix:** Sum of diagonal elements of the covariance matrix. It is an indicator of the overall parameter uncertainty. **NOTE:** *Uncertainty* of an estimated model parameter is usually estimated by parameter variance which is estimated as the corresponding diagonal element of the parameter variance covariance matrix.
 - **Condition Number of the Parameter Covariance Matrix:** defined as a ratio of the maximum and minimum eigenvalue of the above mentioned matrix (equal to 1 in an ideal case).

- **Correlation Coefficient R & R² (Cooley and Naff):** Inspection of the model fit can also be achieved graphically by plotting weighted observations ($W^{1/2}y^*$) versus weighted model predicted variables ($W^{1/2}y$). Ideally, points should be distributed on the line with unit slope and zero intercept. A summary statistics which reflects how well the latter is achieved is given by the correlation coefficient (Cooley et al., 1990). In an ideal case, the value of R should be equal to one. According to Cooley and Naff (1990), values equal to or greater than approximately 0.90 indicate a good model fit. Value R^2 can also be interpreted as a fraction of the total variance of model predictions that can be explained by the model.
- **Akaike Information Criterion (AIC) and Schwarz et al. Information Criterion (BIC):** The statistics called information criteria (IC) accurately reflect the fact that as the number of calibration parameters increases, the reliability of parameter estimates (indicated by absolute or relative parameter uncertainty), on the average, decreases. Several IC exist nowadays. Two most widely used are **AIC** and **BIC** (Carrera et al., 1986b). They are defined as follows:

$$\begin{aligned} \text{AIC} &= S(a) + 2 \cdot N_a \\ \text{BIC} &= S(a) + N_a \cdot \ln(N_o) \end{aligned}$$

where: $S(a)$ – negative natural logarithm of the likelihood. Obviously, the smaller the value of IC, the better the model. Note that above mentioned statistics are of indicative type only, i.e. in the case when values of AIC or BIC for a model with fewer parameters are only slightly larger than the statistics of another model, it is usually better to select the model with fewer parameters (unless additional reasons exist to select a model with more parameters).

For more details, refer to the Thesis of Z. Kapelan, February 2000. University of Exeter.

ANEXO 4

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXO 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PUBLICACIONES EN LAS QUE HA PARTICIPADO EL AUTOR DE LA TESIS

CAPÍTULOS DE LIBROS

- Bartolín, H. (2005). "Construcción de un modelo de una red de distribución de agua a presión mediante la extensión GISRed v1.0". *Análisis, Diseño, Operación y Gestión de Redes de Distribución de Agua con EPANET*. Instituto Tecnológico del Agua. ISBN: 84-6096384-5. Capítulo 15, páginas 409 – 441, Julio 2005.
- Bartolín, H.; Martínez, F. (2005). "Integración de EPANET en ArcView GIS. La extensión GISRed 1.0". *Análisis, Diseño, Operación y Gestión de Redes de Distribución de Agua con EPANET*. Instituto Tecnológico del Agua. ISBN: 84-6096384-5. Capítulo 14, páginas 386 – 408, Julio 2005.
- Bartolín, H.; Martínez, F. (2005). "GISRed 1.0, A GIS-Based tool for water distribution models for master plans". *Effective Modeling of Urban Water Systems. Monograph 13*. Ed. by W. James et al. ISBN: 0-9736716-0-2. Computer Hydraulics Institute (CHI). Guelph, Ontario (Canadá). Capítulo 5, páginas 79 – 92. Febrero 2005.
- Bartolín, Hugo J. (2005). "Water Master Planning in Sueca (Spain)". *GIS Applications for Water, Wastewater, and Stormwater Systems*. ISBN: 9780849320972. CRC Press. Taylor & Francis Group. U. M. Shamsi. Capítulo 17, páginas 362 – 364, Enero 2005.

ARTÍCULOS EN REVISTAS CIENTÍFICAS

- Jiménez, M.A.; Martínez, F; Bartolín, H.; Bou, V (2010). "Analysis, assessment and improvement of fertilizer distribution in pressure irrigation systems". *IRRIGATION SCI - DOI 10.1007/s00271-010-0215-7*; Springer-Verlag 2010. Marzo 2010.
- Jiménez, M.A.; Martínez, F; Bartolín, H.; Bou, V (2010). "Methodology for grouping intakes of pressurised irrigation networks into sectors to minimise energy consumption". *Biosystems Engineering 105* (2010); pág. 429 – 438; Elsevier 2010. February 2010.
- Bartolín, H., Martínez, F., Sancho, H., Ayza, M. (2004). "GISRed v1.0: Una herramienta SIG de ayuda para la confección de modelos y planes directores de redes de distribución de agua". *Tecnología del agua. Volumen XXIV*; número 250; páginas: 32 – 41. Julio 2004.

PUBLICACIONES EN CONGRESOS

- Martínez, F.; Bartolín, H.; Domene, J.; Pérez, J.; Bou, V.; Ferrer, J.A.; Rodríguez, M.; Oliver, V. (2010). "La gestión informatizada del agua inyectada y registrada en la red sectorizada de Málaga". *XXX Jornadas Técnicas de la Asociación Española de Abastecimientos y Saneamiento (AEAS)*. Sevilla. Páginas 165 – 177. 9-11 Junio 2010.
- Jiménez, M.A.; Martínez, F; Arviza, J.; Bou, V; Bartolín, H.; Manzano, J. (2008). "Optimización de la sectorización de redes de riego a presión mediante algoritmos genéticos". *XXVI Congreso Nacional de Riegos. Actas del XXVI Congreso Nacional de Riegos*. Huesca. Junio 2008.
- Sanz, F.; Martínez, F.; Espert, V.; García-Serra, J.; Cabrera, E.; Bartolín, H. (2006). "El análisis de transitorios en grandes conducciones para el transporte de agua. Aplicación al trasvase Júcar-Vinalopó". *VI Edición Diseño e instalación de tuberías para el transporte de agua*. Ávila 2006.
- Bartolín, H.; Martínez, F.; Cortés, J.A. (2006). "Bringing up-to-date WDS models by querying. An EPANET-based GIS geodatabase". *8th Water Distribution Systems Analysis (WDSA)*. American Society of Civil Engineers (ASCE). Cincinnati (USA). Agosto 2006.

- Martínez, F.; Bartolín, H.; Bou, V. (2005). "Integración GIS-SCADA para la gestión técnica de abastecimientos de agua con la ayuda de modelos". X Salón Internacional de Agua, Energía y Medio Ambiente, CANAGUA. Las Palmas de Gran Canaria, Noviembre 2005.
- Martínez, F.; Hernández, V.; Bartolín, H.; Bou, V. (2005). "CALNET Project: Building and updating water distribution models from GIS+CIS+O&M+SCADA". 8th International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI 2005). University of Exeter (UK), Septiembre 2005.
- Bartolín, H.; Martínez, F.; Cortés, J.A. (2005). "Topological GIS-based analysis of a water distribution network model. Applications of the minimum spanning tree". 8th International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI 2005). University of Exeter (UK), Septiembre 2005.
- Martínez F., Bou V., Bartolín H., Alonso J. M., Alvarruiz F., Guerrero D., Hernández V., Llopis J. D., Ramos E. (2004). "Simulation of control strategies in water distribution systems, using SCADA in conjunction with calibrated models obtained from GIS". 6th International Conference on Hydroinformatics. Singapur, Junio 2004.
- Martínez, F.; Bartolín, H.; Bou, V.;Hernández, V.; Alvarruiz, F.; Alonso, J.M. (2004). "Integración SIG-SCADA para la explotación de redes de abastecimiento con la ayuda de modelos". AEAS, Madrid 2004.
- Bartolín, H.; Martínez, F. (2004). "Topological analysis of water distribution systems as a powerful decision support tool". Advanced Computer Technology for Underground Infrastructure (ACTUI, Seminar 24). University of Exeter (UK), Marzo 2004.
- Martínez, F.; Bartolín, H.; Bou (2004). "A general procedure based on graph theory and GA to calibrate WDS including regulating valves". Advanced Computer Technology for Underground Infrastructure (ACTUI, Seminar 24). University of Exeter (UK), Marzo 2004.
- Bartolín Ayala, Hugo J.; Martínez Alzamora, F. (2004). GISRed 1.0, A GIS-BASED TOOL FOR WATER DISTRIBUTION MODELS FOR MASTER PLANS. 13th Conference on Stormwater and urban water systems modeling. Toronto (Canada), 2004.
- Martínez, F.; Bartolín, Hugo J.; Bou, V.; Kapelan, Z. (2003). "Calibration of valve-driven water distribution systems using jointly GIS and genetic algorithms. Application to the WDS of Valencia (Spain). 7th International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI 2003). Imperial College, Londres (UK), Septiembre 2003.
- Bartolín Ayala, Hugo J.; Martínez Alzamora, F. (2003) "Modelling and calibration of water distribution systems. A new GIS approach". 23rd ESRI International User Conference 2003. San Diego, California (USA), Julio 2003.
- Bartolín, H., Martínez, F., Sancho, H. (2003). "Obtención de modelos hidráulicos de redes de suministro de agua desde SIG. Conexión ArcView-EPANET 2". XXIII Jornadas de la AEAS. Salamanca (España), 4-6 Junio 2003.
- Bartolín, H., Martínez, F., Monterde, N. (2001). "Connecting ArcView 3.2 to EPANET 2. A full environment to manage water distribution systems using models". Water software systems: theory and applications. International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI'01). Montfort University, Leicester, UK.

OTROS

- Bartolín, H. (2003). "DESARROLLO DE HERRAMIENTAS PARA LA CALIBRACIÓN DE MODELOS DE REDES HIDRÁULICAS DESDE UN ENTORNO SIG". Trabajo de Investigación para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados (DEA). Dpto. Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, UPV.
- Bartolín, H. (1998). "DESARROLLO DE MEJORAS SOBRE UNA PLATAFORMA DE ENLACE ENTRE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y UN SOFTWARE DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA PARA LA GESTIÓN DE UNA RED DE ABASTECIMIENTO. APLICACIÓN A LA RED DE VALENCIA". Premio BANCAJA Proyecto Final de Carrera. ETSII, UPV.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS GENERALES

- Almandoz, J., Cabrera E., Arregui, F., Cabrera Jr. E. y Cobacho, R. (2005). "Leakage Assessment through Water Distribution Network Simulation", *Journal of Water resources Planning and Management*, 131(6), 458-466.
- Alperovits, E., and Shamir, U., (1977). "Design of Optimal Water Distribution Systems", *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 6, pp. 885-900.
- Anderson, E.J., Al-Jamal, K.H. (1995). "Hydraulic Network Simplification", *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, May/June 1995, 121:3:pp235-240.
- Armstrong, L. (2012). "Hydraulic Modeling and GIS", 1st Edition. ESRI Press.
- AWWA (American Water Works Association), (1999). "Water audits and leak detection", Ed. American Water Works Association. Denver. Colorado. USA.
- AWWA (American Water Works Association), (1999). "Calibration Guidelines for Water Distribution System Modeling", *Proceedings of AWWA 1999 ImTech Conference*. Engineering Computer Applications Committee.
- Boruvka, O. (1926), "O jistém problému minimálním (On a certain minimal problem)". *Prace Mor. Prrodved. Spol. v Brne (Acta Societ. Scienc. Natur. Moravicae)*, III(3), p. 37-58.
- Bosque Sendra, J. (1997). "Sistemas de Información Geográfica", 2ª Edición, Ediciones Rialp, S.A.
- Bostanian, M.B. (2001), "Application of combined GIS and hydraulic model in unaccounted for wáter studies of water distribution networks". MSc Thesis, Civil Engineering Department, University of Tehran, Tehran, Iran.
- Boulos, P.F., Lansey, K.E., Karney, B.W., (2006). "Comprehensive Water Distribution Systems Analysis Handbook for Engineers and Planners". MWH Soft Inc. Publ., Pasadena, CA.
- Bracken I., Webster C. (1989) "Towards a Typology of Geographical Information Systems". *International Journal of Geographical Information Systems* 3: 137-52.
- Burrough P.A. (1986). "Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment". Clarendon. Oxford.
- Cabrera, E., Almandoz, J., Arregui, F., García-Serra, J., (2001). "Auditoría de redes de distribución de agua". *Curso de Mejora del Rendimiento Hidráulico de las redes de Distribución de Agua*. U.D. Mecánica de Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia.
- Cabrera, E., Espert, V., García-Serra, J., Martínez, F. (1996). "Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua". U.D. Mecánica de Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia.
- Christofides, N. (1975). "Graph Theory. An Algorithmic Approach". Academic Press.
- Cubillo, F. et al. (1997), "Guía para la implantación de Sistemas de Información en la gestión de redes de suministro de agua". CENTA. Sevilla, Septiembre 1997.
- Date, C.J. (1995). "An Introduction to Database Systems". 6th Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Department of the Environment (DoE, 1987). "Handling Geographic Information". HMSO, London.
- Deuerlein, J. (2006). "Efficient Supply Network Management Based on Linear Graph Theory". Institute for Water and River Basin Management, Department of Civil Engineering, Geo- and Environmental Sciences, University of Karlsruhe (TH), Germany. pp. 1-18.
- Dijkstra, E. W. (1959), "A note on two problems in diconnection with graphs". *Numerische Mathematik*, 1, p. 269.

- Di Nardo, A., Di Natale, M. (2010). "A Design Support Methodology for District Metering of Water Supply Networks", Annual Conference on Water Distribution Systems Analysis (WDSA), Tucson, Arizona, United States, September 12-15, 2010. ISBN: 978-0-7844-1203-9, ASCE.
- Doe, S., Duncan, G. (2003). "State of the arts in the integration of water supply and geographic information systems". *Envir. Informatics Archives*.
- Edwards, J., Koval, E.J., Lendt, B.W., and Ginther, P.G. (2009). "GIS and hydraulic model integration: Implementing cost-effective sustainable modeling solutions". *Journal AWWA*, Vol. 101, No.11, pp. 34-42.
- Eggenger, C. L., and Polkowski, L. (1976) "Network Modeling and the Impact of Modeling Assumptions". *Journal of the American Water Works Association*, 68 (4), 189.
- Elmasri, R., Navathe, S.B. (1997). "Fundamentals of Database Systems". Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI, 1996). "Using Avenue". Redlands, (USA).
- Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI, 1996). "ArcView Spatial Analyst". Redlands, (USA).
- Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI, 1996). "Using ArcView GIS". Redlands, (USA).
- ESRI (1992), "Understanding GIS. The Arc/Info method".
- García-Serra, J. (1988). "Estudio y Mejora de las Técnicas de Calibración de Modelos de Redes Hidráulicas". Tesis Doctoral. ETSII, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- García-Serra, J., Fuertes, V., Pérez, R. (1997). "Modelización de Sistemas de Distribución de Agua". Conferencia sobre Gestión de Sequías en Abastecimientos Urbanos. Universidad Internacional Menéndez Pelayo (UIMP), Valencia.
- Grayman, W., Rhee, H. (2000), "Assessment of Skeletonization in Network Models", *Proceedings ASCE Water Resources Engineering & Water Resources Planning & management Conf.*, Minneapolis, Minn. (USA).
- Grayman, W.M, Males, R.M., Clark, R.M (1991). "Effects of Skeletonization in Distribution System Modeling". *Proc. AWWA Seminar on Computers in the Water Industry*, Houston.
- Gupta, R., and Prasad, T. D. (2000). "Extended Use of Linear Graph theory for Analysis of Pipe Networks". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 126 (No 1), 56-62.
- Haestad Methods, Walski, T., Chase, D., Savic, D., Grayman, W., Beckwith, S., Koelle, E. "Advanced Water Distribution Modeling and Management", First Edition. Haestad Press, Waterbury, CT USA.
- Hernández, F. (1996). "Tratamiento de Información Espacial. Curso de aplicación de los SIG a la gestión del área técnica de las empresas que prestan los servicios públicos de abastecimiento y saneamiento". Integración con modelos matemáticos de simulación. Sevilla.
- Herrin, G., (1997). "The Fundamentals of Calibration". *Current Methods*. Volume 1, number 1. <http://www.haestad.com>
- Hohl, Pat, Brad, M., (1997) "ArcView GIS Exercise Book", Second Edition. OnWord Press.
- Hunaidi, O. and K. Brothers. (2007), "Optimum size of district metered areas"; in *Water Loss Specialist Conference*, International Water Association, pages 57–66.
- Hutchinson, S., Daniel, H., (1997). "INSIDE ArcView GIS", Second Edition. OnWord Press.

- Huxhold, W.E., (1991). "An Introduction to Urban Geographic Information Systems". University of Wisconsin, Milwaukee (USA), Oxford University Press, Inc.
- Ireland, P. (1994). "The rough guide to GIS", Longman, GeoInformation.
- IWA (2007), "Leak Location and Repair, Guidance Notes" by the Specialist Group Efficient Operation and Management, Water Loss Task Force.
- IWA (2007), "District Metered Areas; Guidance Notes"; by the DMA Team of the Water Loss Task Force.
- Kapelan, Z.S. (2002). "Calibration of Water Distribution System Hydraulic Models", PhD Thesis, School of Engineering and Computer Science, University of Exeter, United Kingdom.
- Kruskal, J. B. Jr. (1956), "On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem". Proceedings American Mathematical Society, 7, p.48.
- Laurini, R., Thompson, D., (1992). "Fundamentals of Spatial Information Systems". Academic Press Ltd.
- Macke, S. (2001). "DC Water Design Extension". Dorsch Consult. May 2001. <http://dcwaterdesign.sourceforge.net>
- Macke, S., Battermann, A., (2001). "A Strategy to Reduce Technical Water Losses for Intermittent Water Supply Systems". Thesis: <http://sdteffen.de/diplom/thesis.pdf>
- Maguire, D. J. (1991), "An overview and definition of GIS", in D. J. Maguire, M. F. Goodchild, & D. W. Rhind (editors), "Geographical Information Systems: Principles and Applications" (Vol. 1). Harlow, UK: Longman Group. pp. 9-20.
- Maksimovic, C., Carmi, N. (1999), "GIS supported analysis of pressure dependant vulnerability of distribution networks to leakage. In Savic, D.A & Walters, G.A. (eds.), Water Industry Systems, Proceedings of CCWI99. University of Exeter, Vol. 2, pp. 85-96.
- Martínez, F.; Fernández, J. (2005), "Pérdidas de carga en tuberías. Coeficientes de Rugosidad". Jornada sobre tuberías de Hormigón armado y postensado. CEDEX, Madrid, 15 Marzo 2005.
- Martínez, F., García Gómez, C. (1998). "Integración del programa Epanet para el análisis de redes de distribución de agua en ArcView 3.0" VII Conferencia Nacional de usuarios ESRI, Madrid.
- Martínez, F., García-Serra, J. (1993). "Modelización Matemática de Sistemas de Distribución de Agua en Servicio". Abastecimientos de Agua Urbanos. Estado Actual y tendencias futuras (pp 189-226). U.D. Mecánica de Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia.
- Martínez, F. y Ulanicki, B., Zehnpfund, A. (1996). "Simplification of Water Distribution Network Models". Hydroinformatics '96. Proceedings of the 2nd International Conference on Hydroinformatics, ETH Zurich, Switzerland, 9-13 September, 1996, Rotterdam, A.A. Balkema, pp. 493-500.
- Maschler, T., Savic, D.A. (1999). "Simplification of Water Supply Network Models through Linearisation". Centre for Water Systems. Report No.99/01. School of Engineering, University of Exeter, Exeter, United Kingdom, p.119.
- May, J. (1994), "Pressure Dependent Leakage" (Concept of Fixed and Variable Area Discharge Paths (FAVAD)) World Water and Environmental Engineering, October 1994.
- McKenzie, R., Seago, C., (2005), "Assessment of real losses in potable water distribution systems: some recent developments", Water Science and Technology: Water Supply Vol. 5, No.1, pp. 33-40, IWA Publishing 2005.
- McKenzie, R., (2006), "AQUALITE v.2.1, Water balance software. User Guide". <http://www.wrc.org.za/SiteCollectionDocuments/Free%20Software/TT315.pdf>

- Michalewicz, Z. (1995), "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", 3rd Edition, New York, Springer-Verlag.
- Monterde, N. (2000). "Desarrollo de una aplicación en el entorno ArcView para el control de fugas y demandas en una red de distribución de agua mediante técnicas de sectorización". Proyecto Final de Carrera. ETSII, UPV.
- Moore, P.B., Harrington, D.A., Hauffen, P.M., Ray, R., and Tejada, R.W. (2008). "Avoiding the GIS-Model Disconnect: Identifying the major hurdles associated with hydraulic model creation and updating from GIS". IDModeling white-paper. Arcadia, CA.
- Morrison J., (2004), "Managing leakage by District Metered Areas: a practical approach", , IWA Water Loss Task Force. Water21, Febrero 2004, pp 44-46.
- Ormsby, T., Napoleon, E., Burke, R., Groessl, C., Feaster, L., (2003), "Getting to Know ArcGIS Desktop, Basics of ArcView, ArcEditor, and ArcInfo", ESRI Press.
- Perelman, L., Maslia, M.L., Ostfeld, A., Sautner, J.B. (2008). "Using Aggregation/Skeletonization Network Models for Water Quality Simulations in epidemiologic studies". June 2008, Journal AWWA 100:6.
- Perelman, L., Ostfeld, A. (2011), "Water Distribution Systems Simplifications through Clustering", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 26, pp. 969-972.
- Planells, P. (1996). "Macromodelización de Redes Hidráulicas a Presión mediante Técnicas de Subestructuración. Aplicación a la Optimización del Régimen de Explotación Diario". Tesis Doctoral. ETSII, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Prim, R. C. (1957), "Shortest connection networks and some generalizations". Bell System Technical Journal, 36, p. 1389.
- Prodanovic, D. (1997). "Bases de Datos para Infraestructuras Urbanas". Curso de Sistemas de Información Geográfica (GIS) aplicados a Redes Hidráulicas. U.D. Mecánica de Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia.
- Puusta, R., Kapelan, Z., Savic, D., Koppela, T. (2009), "A review of methods for leakage management in pipe networks", Urban Water Journal, Vol. 7, No. 1, February 2010, 25–45.
- Rance, J. P., Coulbeck, B., Kosov, S, Bounds, P.L.M. y Ulanicki, B. (2001) "FINESSE – a comprehensive software package for water network modelling and optimisation". International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI'01). Montfort University, Leicester, England.
- Ray, R., Moore, P.B., Harrington, D.A., and Hauffen, P.M. (2008). "The Achilles' Heel of GIS-built Hydraulic Models: Maintaining/Updating a Model from GIS Data." AWWA Conference Proceedings. Denver, CO. American Water Works Association.
- Razavi, A.H., (1997). "ArcView GIS/ Avenue Developer's Guide", Second Edition. OnWord Press.
- Razavi, A.H., Warwick, V., (1997). "ArcView GIS/ Avenue Programmer's Reference", Second Edition. OnWord Press.
- Rogers, D., (2002). "The Art and Science of Hydraulic Model Calibration". Hydroinformatics 2002: Proceedings of the Fifth International Conference on Hydroinformatics, Cardiff, UK.
- Rossman, L. (2000), "Epanet 2 User's Manual". Environmental Protection Agency. Cincinnati, USA. (<http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/wswrd/epanet.html>)
- Saldarriaga, J.G., Naranjo, G., Rothstein, E., (2010), "Metodologías para la sectorización de redes existentes de distribución de agua potable". XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay. Noviembre de 2010.

- Salgado, R. (2001). "Hydrogen: ArcView Hydraulic Model Generator Extension". Hillsborough County Water Department. Florida. <http://arcscripts.esri.com/>
- Schaetzen, W. (2000). "Optimal Calibration and Sampling Design for Hydraulic Network Models", PhD Thesis, School of Engineering and Computer Science, University of Exeter, United Kingdom.
- Scott, C. and Edwards, J.A. (2002). "Water Demand Allocation Using GIS". ESRI User Conference Proceedings. <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc02/pap0364/p0364.htm>
- Sempewo, J., Pathirana, A., Vairavamoorthy, K. (2008). "Spatial Analysis Tool for Development of Leakage Control Zones from the Analogy of Distributed Computing", Proceedings of the 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference WDSA(2008), August 17-20, 2008, South Africa.
- Shamir, U., Howard, C. (1968). "Water Distribution Systems Analysis", Journal of the Hydraulic Division, Vol. 94, No. 1, ASCE.
- Shamsi, U. (2002). "Tools for Water Wastewater and Stormwater". Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Shamsi, U. (2005). "GIS Applications for Water, Wastewater and Stormwater Professionals". Boca Raton, FL: CRC Press.
- Tabesh, M., Asadiyani Yekta, A.H., Burrows, R. (2009). "An Integrated Model to Evaluate Losses in Water Distribution Systems", Water Resources Management, Volume 23, Number 3 (2009), pp. 477-492.
- Tabesh, M., Delavar, M.R. (2003), "Application of integrated GIS and hydraulic models for unaccounted for water studies in water distribution systems (Chapter 14)", Advances in Water Supply Management, Proceedings of the CCWI '03 Conference, London, 15-17 September 2003. ISBN: 978-90-5809-608-1.
- Tabesh, M. (1998), "Implications of the pressure dependency of outflows on data management, mathematical modeling and reliability assessment of water distribution systems". Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Liverpool, UK.
- Taher, S.A., Labadie, J.W. (1996). "Optimal Design of Water-Distribution Networks with GIS", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 122, No. 4, July/August 1996, pp. 301-311
- Tarjan, R. E. (1971) "Depth-first search and linear graph algorithms" SIAM Journal on Computing 1 (1972), pp. 146-160; also Conf. Record Twelfth Annual Symp. on Switching and Automata Theory (1971), pp. 114-121.
- Tiburce V., Chopard P., Hamon J., Elain C., Green A. (1999), "Linking SCADA to a Hydraulic and Water Quality Simulator at the 'Centre des Mouvements de l'Eau' (CME) in Paris, France", International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI'99), Exeter, UK, Vol. 1, (1999), pp 243-257.
- Tomlin, D. (1990), "Geographic Information Systems and Cartographic Modeling", Prentice-Hall.
- Tzatchkov, V.G., Alcocer-Yamanaka, V.H., Bourguett, V. (2006), "Graph Theory Based Algorithms for Water Distribution Network Sectorization Projects", 8th Annual Water Distribution Systems Analysis (WDSA) Symposium, Cincinnati, Ohio, USA. August 27-30, 2006, pp. 1-15.
- USEPA (2005), "Water Distribution System Analysis: Field Studies, Modeling and Management: A Reference Guide for Utilities". EPA/600/R-06/028 December 2005.
- Varma, K.V.K., Narasimhan, S., Bhallamudi, M. (1997), "Optimal Design of Water Distribution Systems using an NLP method", Journal of environmental 1997, vol. 123, no. 4, pp. 381-388.
- Vela, A., Ayza, M., Vidal, R. (1996). "Aplicación y Utilización de Modelos". Vol. II, Cap. 17, Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua. U.D. Mecánica de Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia.

- Water Authorities Association, UKWAA, (1980), "Leakage Control Policy & Practice – Report 26, UK".
- Water Industry Research Ltd, UKWIR (1999), "A Manual of DMA Practice (99/WM/08/23)".
- Walski, T., (1983). "Technique for Calibrating Network Models". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 109, No. 4, October, 1983. ASCE.
- Walski, T., (1984). "Case Study: Pipe Network Model Calibration Issues". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 112, No. 2, Abril, 1986. ASCE.
- Walski, T.M., Brill, E.D., Gessler, J., Goulter, I.C., Jeppson, R.M., Lansey, K., Lee, H.L., Liebman, J.C., Mays, I., Morgan, D.R., et al. (1987). "Battle of the Network Models: Epilogue", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 113, No. 2, ASCE.
- Walski, T., Chase, D.V., Savic, D.A., Graymen, W., Beckwith, S., Koelle, E. (2003). "Advanced Water Distribution Modeling and Management". Exton, PA. Bentley Systems.
- White, C., Victory, T. F., Mulhern, L. (1999). "Using Hierarchical Organization to Reduce Complexity in Water Distribution System Simulation Models", *Proc. of the 26th Annual Water Resources Planning and Management Conf. (Amer. Soc. of Civil Eng.)*, Tempe, AZ.
- White, C. (2001). "Using GIS to implement hierarchical organization in water distribution system simulation models". 20th Annual ESRI Conference, San Diego.
- Yang, S., Hsu, N-S., Louie, P.W.F., Yeh, W.W-G., (1996), "Water distribution network reliability: Connectivity analysis", *Journal of infrastructure systems*, Vol. 2, No. 2, June 1996, pp. 54-64.
- Yazdani, A., Jeffrey, P., (2011), "Applying Network Theory to Quantify the Redundancy and Structural Robustness of Water Distribution Systems", *Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE)*.
- Yazdani, A., Jereya, P. (2011), "Complex network analysis of water distribution systems", School of Applied Sciences, Cranfield University, MK43 0AL, UK.
- Zeiler, M. (1999). "Modeling Our World: The ESRI Guide to Geodatabase Design". Redlands, CA. ESRI Press.