UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Departamento de Ingeniería Civil:

Hidráulica, Energía y Medio Ambiente

E.T.S.I. CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

**Diseño de maniobras de gestión de
presiones en sectores de distribución
de agua y análisis de su impacto**

TESIS DOCTORAL

David J. Vicente González

Directores

Luis Garrote de Marcos

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Raúl Sánchez Calvo

Dr. Ingeniero Agrónomo

2017

Tribunal nombrado por el Mgfco. Y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día de de 2017.

Presidente D.

Vocal D.

Vocal D.

Vocal D.

Secretario D.

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día de de 2017,
en

Calificación:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Agradecimientos

A mis directores de tesis, Luis Garrote y Raúl Sánchez, por compartir sus conocimientos conmigo y por haberme guiado en esta apasionante tarea de investigar. A la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y las fundaciones ‘Carlos González Cruz’ y Agustín Betancourt, por concederme becas de investigación para poder realizar esta tesis.

A la empresa Canal de Isabel II, y al proyecto TecoAgua por facilitarme la tarea de obtención de datos, tanto en oficina como en tareas de campo. Especialmente, quiero agradecer a Francisco Cubillo, Humberto Elías, Rubén Pérez y Alejandro Pinilla, por compartir vuestro conocimiento conmigo de forma altruista y generosa.

A todos los profesores, compañeros de trabajo y de doctorado de la UPM: Paola, Adriadna, Dunia, Ángela, Camille, Fede, Leonor, Juan Carlos, Luis M., Luis C., Jaime y tantos otros con los que he pasado tan buenos momentos y he tomado tantos cafés. Especialmente en este grupo, tengo que destacar a tres personas que a lo largo de estos años se han convertido en grandes amigos y han sido parte fundamental de esta tesis: Cristian; por todos los grandes momentos que hemos pasado juntos, en especial aquellos años en los que recorrimos kilómetros y kilómetros instalando sensores y recabando datos para esta tesis. David; por todas las reflexiones, dudas e inseguridades que he compartido contigo cuando más desorientado me encontraba, y tú siempre transformabas en apoyo, ánimo y motivación. Y Álvaro; por haber estado ahí desde el principio, por servirme de ejemplo de trabajo y por haberme dado caña cuando más lo merecía.

A mis actuales compañeros de trabajo, Fernando, Joaquín y Javier, porque también me han ayudado y apoyado durante esta última etapa, sin duda la más dura. Gracias por ser tan buenos compañeros y por haber confiado en mí para hacerme sentir parte de un pequeño gran equipo. Y sobre todo, por hacerme ir feliz todos los días a trabajar.

A mis amigos, porque os he tenido abandonados mucho tiempo, sobre todo durante el último año. A mis fulanos de Pucela, que pertenecéis a mi familia y sin duda sois los que más he dejado de ver en este último año. A los de Madrid, por todas las cañas que me he perdido y tantos ánimos me habéis dado con el ya clásico: “acaba ya eso Puce”. Y a los de Aranda, por los buenos ratos que paso con vosotros y que quiero seguir pasando.

Y por supuesto y más importante... a mi familia. A mi hermana, por quererme tanto. A mis padres, pero haber sido mi ejemplo desde que tengo uso de razón y hacerme ver que el esfuerzo al final siempre da sus frutos. Y sí, a ti Soraya. Sé que no querías estar aquí, pero tienes que aparecer. Por tu paciencia, tu comprensión, tus ánimos, tus consejos y en definitiva, por haber estado a mi lado todo este tiempo y haber sido el apoyo más importante en los malos momentos. Y por hacerme feliz cada día. Sin duda vosotros, mi familia, sois los que más habéis sufrido este último año de tesis conmigo, viéndome trabajar fin de semana tras fin de semana.

Gracias a todos, de corazón.

Resumen

La presente tesis realiza una contribución metodológica al problema de la gestión integral de procesos de regulación de presión en redes de distribución de agua urbana mediante válvulas reductoras de presión. En este estudio se contemplan dos etapas de este tipo de proyectos: diseño de las maniobras de regulación y evaluación de su impacto.

Las finalidades para las que se puede implantar un plan de este tipo son diversas. Esta tesis se ha focalizado en dos de las más relevantes: reducción de caudal fugado y mejora del servicio sobre usuarios. El caudal fugado tiene una relación directa con la presión de la red. A mayor presión en la red mayor será el caudal perdido a través de pequeños orificios o roturas. Por lo tanto, la reducción de la presión beneficia la disminución de estas pérdidas. Contrariamente, una reducción de presión excesiva, puede influir negativamente en la calidad del nivel de servicio a usuarios. Un criterio establecido de forma generalizada por parte de las empresas operadoras para ofrecer un buen nivel de servicio es definir un valor de presión de referencia de servicio como límite inferior para definir el rango de presión en todos los nodos de la red.

Este conflicto entre reducir la presión para evitar fugas pero no demasiado para no afectar a los usuarios, hace que en ocasiones sea complejo definir las maniobras de regulación más eficientes. Tras una detallada revisión de la bibliografía, se ha observado que los trabajos en este ámbito utilizan, en general, métodos y criterios ‘ad-hoc’ basados en la experiencia del profesional encargado del diseño del plan de gestión de presiones. Existen enfoques más académicos para aspectos concretos, como por ejemplo, la definición de una consigna de regulación a través del planteamiento de problemas de optimización. No obstante, la mayoría de estudios encontrados, si bien aportan gran valor, están enfocados en un aspecto específico, careciendo de capacidad de generalización.

La metodología para el diseño de planes de gestión de presiones propuesto en esta tesis se ejecuta en dos pasos. Primero, la selección de la técnica de regulación más conveniente atendiendo a las características de la zona regulada, a los patrones de consumo y a condicionantes económicos. Segundo, la definición de la consigna de regulación óptima en función de los objetivos perseguidos y las restricciones impuestas en cada caso.

En relación a los métodos para evaluar el impacto que tienen dichas maniobras sobre los objetivos perseguidos – disminución de caudal fugado y mejora del servicio a usuarios – existen múltiples enfoques. Por un lado, se pueden utilizar modelos numéricos con la ventaja de que ofrecen valores de forma distribuida en todos los nodos y líneas, aunque con la desventaja de falta de representatividad de los escenarios hidráulicos que suceden en tiempo real. Por otro lado, existen métodos agregados como la utilización del balance hidráulico y el concepto de Caudal Mínimo Nocturno, más generalizables y utilizando datos obtenidos de dispositivos monitorización, con mayor capacidad de tratamiento en

tiempo real. Su mayor inconveniente es que su utilización conlleva la introducción de una serie de hipótesis simplificadoras, con la incertidumbre asociada en los resultados obtenidos.

Como segundo gran aporte de esta tesis, se proponen una serie de métodos y criterios originales para analizar el impacto de la gestión de presiones. Especialmente relevantes son los sub-métodos propuestos para mejorar diferentes fases de la estimación de fugas a través del concepto caudal mínimo. Los métodos propuestos se aplican sobre varios casos de estudio comparando los resultados con técnicas más convencionales y evaluando su potencial a la hora de mejorar la precisión en las estimaciones.

Los múltiples aspectos tratados, son recogidos finalmente en forma de herramienta que pueda asistir a los gestores de este tipo de infraestructuras y a investigadores en la toma de decisión de estas dos fases – diseño y evaluación del impacto – ofreciendo un entorno versátil, multi-criterio y adaptable a los datos disponibles en cada caso de estudio.

Abstract

This thesis presents a methodological contribution to address the problem about how to manage pressure regulation processes in urban water distribution systems through pressure reducing valves. Two stages of these projects are studied: design of regulation operations and assessment of its impact.

Several purposes can be searched with this type of operations. This thesis has focused on two of the most relevant: reduction of leakage flow and customer service improvement. The leakage flow has a direct relationship with the pressure of the network. The higher the pressure in the network the greater the flow lost through small holes or breaks. Therefore, pressure reduction benefits the decrease of water losses. Conversely, an excessive pressure reduction may adversely affect the quality of service level to users. A widespread criterion implemented by water utilities to comply this target is to offer pressure at all nodes above a predefined value which ensure a good service.

This conflict between reducing the pressure to avoid leakage but not too much to not affect users, makes it sometimes difficult to define the most efficient regulation operation rules. After a detailed review of the literature, it was observed that most of the existing studies or projects in this field use 'ad-hoc' methods and criteria based on the experience of the professional in charge of the design of the pressure management plan. Certain academic approaches are more focused on specific aspects, for example, the definition of a regulation slogan through the approach of optimization problems. However, most of the studies found, while providing great value, are focused on a specific aspect, lacking a capacity for generalization.

The methodology for the design of pressure management plans proposed in this thesis is executed in two steps. First, the most appropriate regulation technique is selected: considering three features: characteristics of the regulated area, consumption patterns and economic constraints. Secondly, the optimal regulation pressure-curve is defined according to the objectives pursued and the constraints imposed in each case.

Related to the existing methods to assess the impact of such operation rules - reducing leakages and improving user level of service - there are multiple approaches. On the one hand, it is possible to use numerical models with the advantage that they offer values in a distributed way in all the nodes and lines. Its main disadvantage is that they can provide results which do not represent real time conditions. On the other hand, there are aggregated methods such as the use of water balance and the concept of Minimum Night Flow, more which can be used more globally and using data obtained from monitoring devices, with greater capacity for real-time evaluation. Its main drawback is that its use involves the introduction of a series of simplifying assumptions, with the associated uncertainty in the results obtained.

As a second major contribution of this thesis, a series of original methods and criteria are proposed to analyze the impact of pressure management. Especially relevant are the sub-methods proposed to improve different phases of leakage estimation through the minimum flow concept. The proposed methods are applied to several case studies by comparing the results with more traditional techniques and evaluating their potential to improve the accuracy of the calculation.

All this aspects have been finally collected in the form of a tool which can assist the managers of these type of infrastructures and researchers in the decision making of these two phases - design and impact assessment - offering a versatile, multi-criteria and adaptable environment to the data available in each case study.

Índice

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE.....	VII
LISTADOS DE IMÁGENES.....	XIII
LISTADO DE TABLAS.....	XX
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 MOTIVACIÓN	2
1.3 OBJETIVOS.....	6
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	11
2.1 SECTORIZACIÓN.....	13
2.1.1 <i>Conceptos generales de la sectorización</i>	13
2.1.1.1 Concepción y origen.....	13
2.1.1.2 Sectorización como parte de un plan de gestión de presiones	14
2.1.2 <i>Beneficios de la implantación conjunta de sectorización y plan de gestión de presiones</i>	15
2.1.2.1 Estimación y disminución del volumen de pérdidas reales.....	15
2.1.2.2 Gestión más eficiente de presión en usuarios	16
2.1.2.3 Otros beneficios de propios de la sectorización	16
2.1.3 <i>Desventajas o inconvenientes de la sectorización</i>	19
2.1.3.1 Reducción de redundancia	19
2.1.3.2 Pérdida de capacidad para hacer frente a requerimientos eventuales de agua	19
2.1.3.3 Problemas de calidad de agua.....	20
2.1.3.4 Costes de inversión en instrumentación y otros	20
2.1.3.5 Barreras culturales.....	21
2.1.4 <i>Características de los sectores y su relación con la gestión de presiones</i>	21
2.1.4.1 Dimensionamiento de sectores	21
2.1.4.2 Aislamiento del sector.....	23
2.1.4.3 Monitorización continua	23
2.1.4.4 Número de entradas.....	24
2.1.4.5 Patrones de consumo homogéneos	24
2.1.4.6 Orografía.....	25
2.1.4.7 Resumen de características, influencia sobre la gestión de presiones y recomendaciones	26
2.1.5 <i>Clasificación de sectores según características hidráulicas y topológicas</i>	27
2.1.5.1 Atendiendo al tipo de red que lo conforma	28
2.1.5.2 Atendiendo al número de entradas	29
2.1.5.3 Atendiendo a la temporalidad de su topología.....	31
2.1.5.4 Atendiendo a las conexiones hidráulicas con red principal u otros sectores	33
2.2 INSTRUMENTACIÓN Y TÉCNICAS DE REGULACIÓN	36
2.2.1 <i>Válvulas Reductoras de Presión (VRPs)</i>	38

2.2.1.1 Beneficios del uso de VRPs respecto a otras alternativas	39
2.2.1.2 Tipos de VRPs.....	40
2.2.2 <i>Técnicas de regulación y tipos de consigna</i>	45
2.2.2.1 Consignas automáticas mediante dispositivos hidro-mecánicos.....	45
2.2.2.2 Consignas gobernadas por controladores electrónicos	48
2.2.3 <i>Otros dispositivos para regular la presión (con acción disipadora de energía)</i>	51
2.2.3.1 Válvula de cierre como elemento regulador	51
2.2.3.2 Máquinas hidráulicas recuperadoras de energía	52
2.3 RELACIÓN ENTRE PRESIÓN, FUGAS, CONSUMO Y AFECCIÓN A USUARIOS	55
2.3.1 <i>Balance hidráulico y desagregación del agua en sub-componentes</i>	56
2.3.1.1 Balance económico.....	57
2.3.1.2 Balance físico: relación con la presión de la red	59
2.3.2 <i>Relación entre presión y caudal fugado</i>	61
2.3.2.1 Características y causas de las fugas.....	61
2.3.2.2 Relación hidráulica entre presión y caudal fugado y expresiones analíticas	64
2.3.3 <i>Métodos de estimación de fugas basado en el concepto de Caudal Mínimo Nocturno</i>	67
2.3.3.1 Cálculo de fugas durante el periodo de caudal mínimo (F_{CMN})	70
2.3.3.2 Cálculo de la presión media de la red (P_{med}).....	75
2.3.3.3 Exponente entre presión y caudal fugado $N1$	78
2.4 MODELACIÓN NUMÉRICA APLICADA A GP Y CÁLCULO DE FUGAS.....	79
2.4.1 <i>Tipos de modelos de análisis</i>	79
2.4.2 <i>Formulación y algoritmos</i>	80
2.4.2.1 Modelos basados en la demanda y basados en la presión.....	80
2.4.3 <i>Modelos de comportamiento de VRPs y su acción reguladora en sectores</i>	82
2.4.3.1 Simulación del comportamiento de VRPs.....	82
2.4.3.2 Simulación de sectores regulados en cabecera mediante VRPs	83
2.4.4 <i>Modelos de fugas en redes</i>	87
2.4.4.1 Elemento emisor (expresión general de caudal fugado).....	87
2.4.4.2 Modelos de área de sección variable.....	88
2.4.4.3 Modelo para representar fugas de fondo	88
2.4.5 <i>Modelos de optimización</i>	89
2.4.5.1 Evolución de los métodos de optimización utilizados.....	89
2.5 CONCLUSIONES EXTRAÍDAS DEL ESTADO DEL ARTE	93
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	97
3.1 MÉTODO DE ANÁLISIS CUALITATIVO BASADO EN EL ESTUDIO DE CASOS.....	99
3.1.1 <i>Características de métodos científicos de análisis cualitativo</i>	99
3.1.1.1 Diferencias principales entre metodologías cuantitativas y cualitativas.....	100
3.1.1.2 Adecuación del método cualitativo al objeto de estudio	101
3.1.1.3 Método de Estudio de Casos (MEC)	102
3.1.2 <i>Aplicación del MEC al objeto de estudio</i>	103
3.1.2.1 Formulación de cuestiones a investigar.....	103
3.1.2.2 Recopilación de documentación especializada	104
3.1.2.3 Fase de análisis	108
3.2 DESARROLLO DE UN ENTORNO DE SIMULACIÓN DE ANÁLISIS HIDRÁULICO	110
3.2.1 <i>Formulación y algoritmos base</i>	110
3.2.1.1 Esquema numérico ‘orientado a la presión’.....	110
3.2.1.2 Formulación de consumos.....	111
3.2.1.3 Formulación de caudales fugados.....	112
3.2.2 <i>Formulación para implementar técnicas de regulación de presión en cabecera de sectores</i>	113
3.2.2.1 Técnicas de regulación y variables intervinientes.....	113

3.3 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE CONSIGNAS DE REGULACIÓN ÓPTIMAS.....	118
3.3.1 Descripción del problema: funciones objetivo y restricciones.....	119
3.3.2 Algoritmo para el diseño de curvas óptimas en función del caudal	120
3.3.2.1 Algoritmo para problemas de optimización de tipo ‘rígido’	120
3.3.2.2 Algoritmo para problemas de optimización de tipo ‘flexible’	121
3.3.3 Definición de consignas en función de la técnica de regulación.....	122
3.4 METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE FUGAS BASADA EN EL CMN.....	125
3.4.1 Análisis de series de caudal durante CMN.....	127
3.4.1.1 Balance hidráulico de entradas y salidas.....	127
3.4.1.2 Selección de periodo de estudio.....	129
3.4.1.3 Análisis y eliminación de componentes temporales a largo plazo para comparar Q_{CMN} antes y después de GP.....	130
3.4.2 Descomposición de caudal durante CMN: estimación de consumo y pérdidas aparentes	132
3.4.2.1 Consumo en usuarios	132
3.4.2.2 Parametrización empírica de consumos nocturnos.....	133
3.4.2.3 Estimación de pérdidas aparentes.....	136
3.4.3 Cálculo de presión media zonal.....	137
3.4.3.1 Método hidráulico.....	138
3.4.3.2 Método topográfico.....	139
3.4.3.3 Método de pérdida de carga entre dos puntos	139
3.4.3.4 Método de medición directa: varios puntos representativos en función del caudal	141
3.4.3.5 Método de medición directa: matriz de sensibilidad de presiones	144
3.4.4 Métodos para determinar exponente $N1$	145
3.4.4.1 Parámetros empíricos de la literatura especializada.....	145
3.4.4.2 Método del promedio entre tipo conducción: rígido/flexible	145
3.4.4.3 Método inverso	146
3.5 RECOPIACIÓN DE DATOS DE CYII	147
3.5.1 Campaña de monitorización de presiones en puntos críticos.....	148
3.5.1.1 Alcance temporal y geográfico de la campaña	148
3.5.1.2 Instrumentación utilizada	150
3.5.1.3 Instalación en campo	152
3.5.1.4 Almacenamiento de datos en servidor y análisis preliminar.....	158
3.5.1.5 Problemas detectados y soluciones adoptadas	158
CAPÍTULO 4. CASOS DE ESTUDIO	161
4.1 MODELOS NUMÉRICOS.....	162
4.1.1 Modelo numérico esquemático: ‘C-Town’	163
4.1.1.1 Contexto en el que se enmarca: BBLAWN.....	163
4.1.1.2 Características del modelo	164
4.1.1.3 Modificación de características de sectores ‘C-Town’	167
4.2 SECTORES REALES – RED DE CYII	169
4.2.1 Contexto y alcance del caso de estudio	169
4.2.1.1 Planes estratégicos instaurados en la red de CYII.....	170
4.2.1.2 Alcance temporal.....	172
4.2.1.3 Alcance geográfico	172
4.2.2 Series temporales de variables hidráulicas.....	173
4.2.3 Consignas de regulación	174
4.2.3.1 Consignas estáticas.....	174
4.2.3.2 Consignas dinámicas.....	175
4.2.4 Características de los sectores	177
4.2.4.1 Parámetros dimensionales de los sectores	177

4.2.4.2 Orografía de la zona	177
4.2.4.3 Localización de puntos de entrada.....	178
CAPÍTULO 5. SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE REGULACIÓN Y DISEÑO DE CONSIGNAS.....	181
5.1 SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE CONTROL A PARTIR DE ANÁLISIS CUALITATIVO DE CASOS DE ESTUDIO A NIVEL GLOBAL.....	183
5.1.1 <i>Objetivos y condicionantes; consideraciones geográficas</i>	186
5.1.2 <i>Selección de tipo de regulación atendiendo al escenario hidráulico</i>	188
5.1.2.1 Selección atendiendo a los patrones de consumo y la pérdida de carga hidráulica.....	189
5.1.2.2 Otras consideraciones relativas a escenarios hidráulicos sobre la selección de técnicas.....	193
5.1.3 <i>Selección de técnica en función aspectos topológicos de la sectorización</i>	197
5.1.3.1 Consideraciones sobre la pérdida de carga y el rediseño de sectores	197
5.1.3.2 Consideraciones sobre número de entradas y tipo de regulación asociadas a ellas	200
5.2 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE CONSIGNAS DE REGULACIÓN	202
5.2.1 <i>Definición de curva óptima ‘caudal - presión de consigna’</i>	202
5.2.1.1 Resultados de la aplicación del problema ‘rígido’	202
5.2.1.2 Resultados de la aplicación del problema ‘flexible’	206
5.2.1.3 Discusión de resultados parciales.....	209
5.2.2 <i>Ajuste de curvas en función del tipo de técnica de regulación</i>	211
5.2.2.1 Modulación basada en el caudal	211
5.2.2.2 Discusión de las curvas de consigna ‘MC’.....	214
5.2.3 <i>Modulación basada en la presión en Punto Crítico – ‘MPc’</i>	215
5.2.3.1 Puntos de presión crítica (i_{PC})	215
5.2.3.2 Análisis de puntos críticos en función del caudal.....	217
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE MÉTODOS PARA EVALUAR EL IMPACTO DE GP	221
6.1 ANÁLISIS DE MÉTODOS PARA CALCULAR P_{MED} MEDIANTE MODELACIÓN NUMÉRICA	222
6.1.1 <i>Métodos basados en datos distribuidos</i>	222
6.1.1.1 Comparación de sub-métodos distribuidos.....	223
6.1.2 <i>Métodos de ‘medición directa’</i>	227
6.1.2.1 Método basado en matriz de sensibilidad de presiones	229
6.2 ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE EN LA APLICACIÓN DE MÉTODOS BASADOS EN CMN A SECTORES REALES	233
6.2.1 <i>Cálculo de variación en CMN</i>	234
6.2.1.1 Análisis preliminar de componentes de series de caudales	235
6.2.1.2 Cálculo con ‘método 1’ (sin retardo y sin ajuste de series)	236
6.2.1.3 Cálculo con ‘método 2’ (sin retardo y con ajuste de series)	238
6.2.1.4 Cálculo con ‘método 3’ (con retardo anual y sin ajuste de series)	241
6.2.1.5 Resumen de resultados: valores medios y dispersión.....	243
6.2.2 <i>Cálculo de Fugas reales durante el CMN</i>	245
6.2.2.1 Cálculo de consumos.....	245
6.2.2.2 Cálculo de fugas antes de las maniobras de regulación.....	248
6.2.2.3 Cálculo de fugas después de las maniobras de regulación	249
6.2.2.4 Reducción de fugas durante el CMN y mejora del rendimiento de red durante CMN	250
6.2.3 <i>Cálculo de P_{med}</i>	251
6.2.3.1 Método topográfico.....	251
6.2.3.2 Métodos basados en pérdida de carga entre dos puntos.....	252
6.2.4 <i>Cálculo de fugas diarias: influencia de exponente $N1$</i>	261
6.2.4.1 Cálculo de presión media durante CMN	261
6.2.4.2 Cálculo de presión media agregadas de forma horaria	262

6.2.4.3 Cálculo de fugas horarias: incertidumbre derivada del exponente N1	267
CAPÍTULO 7. HERRAMIENTA DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES.....	269
7.1 PRESENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA	269
7.1.1 Módulo de importación y configuración básica.....	270
7.1.1.1 Configuración de casos de estudio.....	270
7.1.1.2 Importación de modelos numéricos	271
7.1.1.3 Importación de datos reales	274
7.1.2 Módulo de configuración de técnicas de regulación de presión	277
7.1.2.1 Programación temporal.....	278
7.1.2.2 Modulación local basada en el caudal	279
7.1.3 Módulo de simulación.....	280
7.1.3.1 Aplicación sobre modelos representativos de sectores reales	281
7.1.4 Módulo de análisis del impacto de la gestión de presiones.....	283
7.1.4.1 Análisis de la precisión de las maniobras de regulación	284
7.1.4.2 Influencia de las técnicas de regulación en la reducción de fugas.....	287
7.1.4.3 Comparación de métodos.....	289
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES.....	293
8.1 CONCLUSIONES RELACIONADAS CON EL ‘OBJETIVO 1’	293
8.2 CONCLUSIONES RELACIONADAS CON EL ‘OBJETIVO 2’	295
8.3 CONCLUSIONES RELACIONADAS CON EL ‘OBJETIVO 3’	296
REFERENCIAS	297
ANEXO A. PRE-TRATAMIENTO Y ANÁLISIS PRELIMINAR DE DATOS DE SECTORES REALES DE LA RED DE CYII.....	317
A.1 PRE-TRATAMIENTO DE DATOS: CAUDALES Y PRESIONES EN CABECERA	318
A.1.1 SELECCIÓN DE PERIODOS GLOBALES	318
A.1.2 DETECCIÓN Y ELIMINACIÓN DE ‘OUTLIERS’	320
A.1.3 SELECCIÓN DE SUB-PERIODOS DE ESTUDIO	322
A.2 PRE-TRATAMIENTO DE DATOS: PRESIONES EN PUNTOS CRÍTICOS.....	325
A.2.1 DETECCIÓN Y ELIMINACIÓN DE DATOS ANÓMALOS O PERIODOS NO CONSISTENTES	325
A.2.2 AGREGACIÓN HORARIA DE DATOS DE PRESIÓN CRÍTICA Y COMPARACIÓN ENTRE SERIES	327
A.3 ANÁLISIS DE COMPONENTES TEMPORALES DE SERIES DE CAUDALES	330
A.3.1 ANÁLISIS DE ESTACIONALIDAD ANUAL (E_{T-A})	331
A.3.2 ANÁLISIS DE TENDENCIA (T_T)	335
A.3.3 ANÁLISIS DE ESTACIONALIDAD DIARIA (E_{T-D}).....	338
A.3.4 HETEROCEDASTICIDAD CONDICIONADA A ESTACIONALIDAD ANUAL.....	342
A.3.5 RESUMEN DE COMPONENTES TEMPORALES	343
A.4 TRATAMIENTO MEDIANTE SIG DE DATOS TOPOLÓGICOS Y OROGRÁFICOS	345
A.4.1 SUB-DIVISIÓN DE LA RED EN SECTORES Y DATOS MANEJADOS	345
A.4.2 GENERACIÓN DE SUPERFICIES ALTIMÉTRICAS Y DEPURACIÓN DE DATOS	347
A.4.3 SITUACIÓN DE PUNTOS DE MONITORIZACIÓN.....	349
A.4.4 PROYECCIÓN DE CAPA ‘ACOMETIDAS’	352

Listados de imágenes

Figura 2.1. Esquema de área de gestión de presiones con instrumentación asociada.....	15
Figura 2.2. Efecto de la sectorización en la reducción del tiempo de percepción y localización de fugas.....	17
Figura 2.3. Diferentes niveles de partición de la red para un mismo área.....	22
Figura 2.4. Ejemplo de división de un municipio según tipos de consumo.....	25
Figura 2.5. División de sector en dos debido a diferencias significativas de cota.....	26
Figura 2.6. Tipos de sectores según clasificación histórica (UKWIR 1999).....	28
Figura 2.7. Esquema de sector con una única entrada.....	30
Figura 2.8. Esquema de sector con varias entradas.....	30
Figura 2.9. Esquema de sector con entradas temporales.....	31
Figura 2.10. Ejemplo de sectores aislados geográficamente (izquierda) y topológicamente (derecha).....	32
Figura 2.11. Tipos de sectores atendiendo a sus conexiones con otros sectores o red principal.....	33
Figura 2.12. Sector sin conexiones aguas abajo.....	34
Figura 2.13. Sectores con conexión en cascada.....	34
Figura 2.14. Subsector interno.....	35
Figura 2.15. Sector con salidas a la red principal.....	35
Figura 2.16. Tipos de elementos de regulación y acción que efectúan sobre la altura hidráulica de la red.....	36
Figura 2.17. Esquema de presiones principales y pérdida de carga (ΔP) producida por la VRP.....	38
Figura 2.18. Esquema de VRP de globo (izquierda) y en forma de 'Y' (derecha) y trayectoria del fluido.....	42
Figura 2.19 Esquema de válvulas de diafragma – (a) de una sola cámara; (b) de doble cámara; (c) de sellado directo.....	43
Figura 2.20. Esquema de válvula de pistón de paso anular (GIZ 2011).....	43
Figura 2.21. Válvula de acción directa.....	44
Figura 2.22. Esquema de válvula reductora de presión pilotada (Heimann et al. 2012)	45

Figura 2.23. Ejemplo de cambio de curva modulación de presión en función del caudal variando tarado.....	48
Figura 2.24. Actividades principales para la gestión de fugas (WRP 2001)	56
Figura 2.25. Tiempo de vida de una fuga	62
Figura 2.26. Efecto de la gestión de presiones sobre el volumen de caudal fugado (esquemático).....	62
Figura 2.27. Tipos de fugas y relación con tiempo de vida	63
Figura 2.28. Tipos de orificios en conducciones: circular (izquierda), longitudinal (centro) y circunferencial (derecha)	64
Figura 2.29. Relación entre el coeficiente de descarga de un orificio y el número Re (Lambert, 2001)	66
Figura 2.30. Relación (basada en datos reales) entre caudal consumido, caudal fugado y presión	68
Figura 2.31. Relación entre ratios de pérdidas y presión para distintos coeficientes N1 (Lambert, 2001)	78
Figura 2.32. Esquema de tipos de modelos de análisis hidráulico (<i>basado en</i> Fuertes et al. 2002).....	80
Figura 3.1. Metodología global llevada a cabo (agrupada en sub-secciones) e interrelación entre estas y con los objetivos planteados en la tesis.	98
Figura 3.2. Esquema de análisis cualitativo basado en Método de Estudio de Casos	103
Figura 3.3. Número de documentos recopilados según naturaleza – ‘P.R: Proyectos Reales’; ‘L: Libros’; ‘I.T: Informes Técnicos’; ‘A.C: Artículos Científicos’; ‘E: Expertos – Comunicación personal’.....	105
Figura 3.4. Mapa mundial esquemático con localización de los proyectos más significativos analizados	107
Figura 3.5. Esquema de formulación utilizada para desarrollo de entorno de simulación	110
Figura 3.6. Esquema de algoritmo para búsqueda de consignas óptimas	119
Figura 3.7. Metodología general para el cálculo de fugas basado en el método de CMN.	125
Figura 3.8. Tipos de perfiles de demanda con estacionalidad diaria (Donkor et al. 2014): (a) estacionalidad constante; (b) variación estacional cambiante; (c) estacionalidad constante en serie con componente de tendencia y (d) variación estacional cambiante en serie con tendencia.	131
Figura 3.9. Consumos nocturnos según tipo de vivienda (Cubillo et al. 2008)	135
Figura 3.10. Consumos nocturnos según tipo de vivienda y estación del año (Cubillo et al. 2008).....	135

Figura 3.11. Distribución de usos nocturnos según el tipo de vivienda (Cubillo et al. 2008)	136
Figura 3.12. Metodología global para la determinación de la presión media (P_{med}) de un sector	138
Figura 3.13. Esquema de presiones resultantes en distintos puntos de un sector en función del caudal Q .	140
Figura 3.14. Mapa de red global de CYII (izquierda) y detalle de localización de sectores seleccionados para el estudio (derecha)	149
Figura 3.15. Plano SIG y ortofoto de punto de instalación (izquierda). Detalle de acondicionamiento de la seguridad de la zona (derecha)	153
Figura 3.16. Lectura de presión mediante manómetro analógico y transductor digital	153
Figura 3.17. Pasos para colocación de transductor de presión	154
Figura 3.18. Pasos para conexión de datalogger	155
Figura 3.19. Configuración de entrada analógica	156
Figura 3.20. Configuración de parámetros de frecuencia de muestreo	156
Figura 3.21. Configuración parámetros de volcado de datos	157
Figura 3.22. Configuración de parámetros de comunicación y transmisión de datos	157
Figura 3.23. Instalación de sensor de presión en línea de flujo (izq.) o a altura z_{inst} (der.)	158
Figura 4.1. Visualización desde software EPANET de modelo de red 'C-Town' (Giustolisi 2016)	164
Figura 4.2. Sub-división del modelo en sectores según tipo de patrón de demanda	165
Figura 4.3. Modificaciones efectuadas sobre modelos numéricos	165
Figura 4.4. Esquemas de los sectores analizados de modelo 'C-Town'	166
Figura 4.5. Patrones de consumo semanales de los 2 sub-sectores analizados del modelo 'C-Town'	166
Figura 4.6. Variación del perfil orográfico del sector 'S1'	167
Figura 4.7. Variación del número de entradas en sector 'S1'	168
Figura 4.8. Número de sectores con inicio de plan de GP durante periodo de estudio (2011-2014)	171
Figura 4.9. Alcance geográfico correspondiente a sectores de la Comunidad de Madrid	173
Figura 4.10. Modulación de la consigna instaurada sobre sector 'Parla Oeste'	176
Figura 4.11. Modulación de la consigna instaurada sobre sector 'Coslada Centro'	176
Figura 4.12. Modulación de la consigna instaurada sobre sector 'Móstoles Parque Coimbra parte alta'	177

Figura 4.13. Sectores con diferente densidad de puntos de acometidas por área de superficie.....	177
Figura 4.14. Diferentes localizaciones de puntos de entrada respecto a cotas del resto de nodos: cota intermedia ('Sector - 1'), cota máxima ('Sector - 12) y cota mínima ('Sector - 19)	179
Figura 5.1. Metodología para la instalación de sistemas de gestión de regulación atendiendo a perfil de consumo	189
Figura 5.2. Relación entre fugas y presión en cabecera para demanda baja y constante. Comparación de diferentes valores habituales de exponente de fugas (alpha) [0.5-1.5]....	196
Figura 5.3. Detalle del proceso de desviación en la acción de modulación del controlador con un exponente 'alpha' igual a 1.3.	197
Figura 5.4. Metodología para diseñar un plan de gestión de presiones atendiendo a características de un sector	198
Figura 5.5. Convergencia de algoritmo de regulación de tipo rígido en sectores de estudio 'DMA1' y 'DMA2' con diferentes criterios de inicialización (a-b). Presión mínima (izq.); presión de consigna (der.).	203
Figura 5.6 Evolución de presión en nodos de modelo (DMA2) en función de número de iteración. Destacado en rojo presión mínima (círculo) y P_{ser} objetivo (línea discontinua)	204
Figura 5.7 Convergencia de algoritmo en sectores de estudio 'ky2 y 'esp1' con diferentes criterios de inicialización (a-b). Presión mínima (izq.); presión de consigna (der.).....	205
Figura 5.8. Curvas de consigna óptimas, obtenidas mediante algoritmo 'MC-1E'.....	206
Figura 5.9. Curva de indicador de nivel se servicio utilizada para transformar los valores de presión en indicador de nivel de servicio.....	207
Figura 5.10. Valores óptimos obtenidos en primera iteración para caso de estudio 'DMA2'	208
Figura 5.11. Valores obtenidos de segunda iteración para presiones de cabecera entre próximas al óptimo local hallado en primera iteración	209
Figura 5.12. Orografía de modelos 'esp1 (izq.) y 'DMA2' (der.), destacando situación de VRP de cabecera y de punto crítico.	210
Figura 5.13. Curvas de ajuste de función potencial sobre datos de curva óptima de regulación $P_{PRV}(Q)$	212
Figura 5.14. Consignas de presión P1 y P2 según método de 'doble consigna en función del caudal'	214
Figura 5.15. Evaluación dinámica de puntos críticos en función del caudal total inyectado (Q_i)	216
Figura 5.16. Determinación de rangos de caudales asociados a cada punto crítico.....	217

Figura 5.17. Resultados de control de regulación tipo ‘MPc-1E’ sobre sectores esquemáticos ‘Sector 1’ y ‘Sector 2’ – (izq.) Presiones en nodos críticos en función de caudal; (der.) localización de nodos críticos.....	217
Figura 5.18. Resultados de control de regulación tipo ‘MPc-1E’ sobre sectores reales ‘Sector 3’ y ‘Sector 4’ – (izq.) Presiones en nodos críticos en función de caudal; (der.) localización de nodos críticos.....	218
Figura 5.19. Evolución de presiones en función del caudal en aquellos nodos que en algún momento tiene la presión mínima (nodos referencia).....	219
Figura 6.1. Comparación de resultados de métodos ‘topográfico’ y de ‘pérdida de carga’ con respecto a método de referencia: ‘hidráulico’.....	223
Figura 6.2. Influencia de la orografía en la aplicación del método de ‘pérdida de carga’.	224
Figura 6.3. Ejemplo de caso en el que el punto crítico apenas se ha generado pérdida de carga.....	226
Figura 6.4. Aplicación del método de pérdida de carga utilizando nodo con mayor pérdida de carga.....	227
Figura 6.5. Diferencia entre presión en nodos (P_i) y presión medio (P_{med}) para diferentes caudales (Q_i). Destacado en rojo, punto representativo de presión media ($i_{P_{med}}$); sector ‘DMA1’.....	228
Figura 6.6. Diferencia entre presión en nodos (P_i) y presión medio (P_{med}) para diferentes caudales (Q_i). Destacado en rojo, punto representativo de presión media ($i_{P_{med}}$); sector ‘DMA2’.....	229
Figura 6.7. Variación de matriz de sensibilidad normalizada S’ en función de caudal circulante.....	230
Figura 6.8. Matriz binaria de análisis de sensibilidad de presiones de sector ‘DMA1’ para valores frontera de: 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 0.95, 0.99, 1.....	231
Figura 6.9. Periodos de estudio seleccionados para los sectores analizados mediante ‘Método 1’.....	236
Figura 6.10 Valores de CMN absoluto diarios (izquierda) y CMN_{ref} en función del ancho de ventana (derecha).....	237
Figura 6.11. Resultados gráficos de la aplicación del ‘método 2’: ajuste de series.....	239
Figura 6.12. CMN_{ref} en función del ancho de ventana para sectores con ‘método 2’.....	241
Figura 6.13. CMN_{ref} en función del ancho de ventana para sectores con ‘método 3’.....	242
Figura 6.14. Diagramas de cajas de ‘descenso de CMN’ tras maniobras GP (m^3/s) $\cdot 10^{-3}$	244
Figura 6.15. Proceso para el cálculo de curva de relación ‘Pérdida de carga / Caudal’...	253
Figura 6.16. Sectores con una elevada dispersión en la relación entre variables correlacionadas.....	254

Figura 6.17. Localización de punto de entrada y punto crítico en sectores con elevada dispersión.....	255
Figura 6.18. Ajuste de funciones de relación ‘caudal / pérdida de carga’.....	256
Figura 6.19. Periodos de estudio anterior y posterior a las maniobras de regulación de presión. Punteado a la derecha tramo con valores próximos 0 defectuosos.	257
Figura 6.20. Proceso para el cálculo de relación ‘caudal / pérdida de carga’ en punto representativo de presión media (i_{Pmed}).....	259
Figura 6.21. Relación ‘Caudal / pérdida de carga entre cabecera y punto medio’	260
Figura 6.22. Valores de presión y caudales medios a lo largo de horas del día para periodos anterior y posterior a las maniobras de regulación de presión.....	262
Figura 6.23. Corrección de presiones en cabecera a presiones media para casos de estudio analizados mediante ‘método topográfico’	265
Figura 6.24. Corrección de presiones en cabecera a presiones media para casos de estudio analizados mediante ‘método de pérdida de carga’	266
Figura 7.1. Interfaz principal de la herramienta desarrollada	270
Figura 7.2. Interfaz para describir caso de estudio	271
Figura 7.3. Formato de archivos (.inp) para definir redes y parámetros de análisis hidráulico.....	272
Figura 7.4. Pasos acometidos en el tratamiento de datos importados desde archivos (.inp)	273
Figura 7.5. Interfaz para introducir tipo de variable hidráulica y características.....	275
Figura 7.6. Interfaz de conexión con fuentes externas	275
Figura 7.7. Menú de acciones de importación.....	276
Figura 7.8. Interfaz para diseñar consignas de técnicas de regulación.....	277
Figura 7.9. Ejemplo de diseño de curva de modulación temporal basada en dos presiones de tarado (día/noche)	278
Figura 7.10. Ejemplo de diseño de curva de modulación basada en el caudal	280
Figura 7.11. Resultados obtenidos sobre red ‘ky2’. Esquema de red y presiones resultantes (izquierda) y convergencia de consigna en cabecera y presión en punto crítico (derecha).	282
Figura 7.12. Resultados obtenidos sobre red ‘RELH - A’. Esquema de red y presiones resultantes (izquierda) y convergencia de consigna en cabecera y presión en punto crítico (derecha).....	283
Figura 7.13. Opciones de selección de periodos de análisis.....	284
Figura 7.14. Interfaz de visualización de series hidráulicas	285

Figura 7.15. Análisis de correlación entre variables ‘caudal’ y ‘presión aguas abajo’. Ejemplo real para caso de estudio con regulación ‘basa en caudal’	286
Figura 7.16. Correlación entre caudal y error	287
Figura 7.17. Caudal consumido real y fugas en cada nodo en diferentes instantes de tiempo (SF-1E)	288
Figura 7.18. Caudal consumido real y fugas en cada nodo en diferentes instantes t (MC-1E)	289
Figura 7.19. Comparación de volumen fugado con dos métodos de regulación: ‘SF-1E’ y ‘MC-1E’	290
Figura 7.20. Comparación de presiones en cabecera y mínima: ‘SF-1E’ y ‘MC-1E’	290
Figura 7.21. Comparación de volumen fugado con dos métodos de regulación: ‘SF-1E’, ‘MC-1E’ y ‘PPc-1E’	291
Figura 7.22. Comparación de volumen de fugas (arriba), presión mínima (abajo-izq.) y presión en cabecera (abajo-der.) para escenario con mayor pérdida de carga en función del caudal	291

Listado de tablas

Tabla 2.1. Características de los sectores, influencia sobre sectorización clásica/gestión de presiones y recomendaciones	26
Tabla 2.2. Modelos de válvulas con regulación ‘doble-consigna en función del caudal’	46
Tabla 2.3. Modelos de válvulas con regulación ‘doble-consigna en función del caudal’	47
Tabla 2.4. Modelos de válvulas con regulación ‘doble-consigna en función del caudal’	48
Tabla 2.5. Modelos de controladores electrónicos con regulación ‘en función del caudal’ ..	50
Tabla 2.6. Modelos de controladores electrónicos con regulación ‘en función del caudal’ ..	50
Tabla 2.7. Balance hidráulico económico propuesto por la IWA (Lambert 2002, Lambert 2000).....	57
Tabla 2.8. Balance hidráulico desde el punto de vista físico. Elaboración propia, basado en conceptos de otros autores: Giustolisi y Walski (2012); Gomes et al. (2011); (Cubillo et al. 2008); (UKWI 1994a).....	60
Tabla 2.9. Parámetros propuestos para evaluar fugas durante mínimo nocturno (UKWI 1994b).....	73
Tabla 2.10. Resultados obtenidos en Criminisi et al. (2009) sobre errores ocurridos por subconteo.....	74
Tabla 2.11. Factores de ponderación propuestos para el cálculo de P_{med} (Renaud et al. 2015).....	75
Tabla 2.12. Modelos de optimización para gestión de presiones (Vicente et al. 2015).....	91
Tabla 3.1. Diferencias entre metodología cualitativa y cuantitativa	101
Tabla 3.2. Referencias analizadas sobre casos de estudio basadas en proyectos o redes reales.....	106
Tabla 3.3. Artículos con estudios basadas en CMN (versión extendida de Alkassseh et al., 2013).....	108
Tabla 3.4. Valores de parámetros a y b para deducir F_{ap} en función del caudal consumido C	137
Tabla 3.5. Factores de ponderación introducidos en la herramienta	138
Tabla 3.6. Listado de sectores monitorizados (destacados en negrita y cursiva aquellos seleccionados para el análisis).....	148
Tabla 4.1. Contingencias acontecidas relativas a la “Batalla de las Redes de Agua”	163

Tabla 4.2. Características de los esquemas numéricos extraídos del modelo ‘C-Town’....	166
Tabla 4.3 Listado de sectores considerados como caso de estudio.....	173
Tabla 4.4. Parámetros asociados a maniobras de regulación con consigna de tipo <i>estática</i>	174
Tabla 4.5. Parámetros asociados a maniobras de regulación con consigna de tipo <i>dinámica</i>	175
Tabla 4.6. Información utilizada sobre elementos de la red (extraídos de SIG)	180
Tabla 5.1 Casos reales con plan de regulación de presiones	184
Tabla 5.2. Valores característicos de escenarios hidráulicos analizados.....	213
Tabla 5.3. Presiones en los nodos definidos como puntos críticos para algunos de los escenarios analizados (en negrita , destacada P_{min} correspondiente a cada escenario).....	216
Tabla 6.1. Resultados del cálculo de P_{med} mediante método hidráulico.....	222
Tabla 6.2. Resultados del cálculo de P_{med} mediante método topográfico	222
Tabla 6.3. Resultados del cálculo de P_{med} mediante método hidráulico.....	223
Tabla 6.4. Componentes temporales de las series de caudal total de cada sector de estudio	235
Tabla 6.5. Fechas de cálculo de CMN en sectores analizados a través de ‘método 1’.....	236
Tabla 6.6. Resultados de CMN_{ref} anterior y posterior a maniobras de GP y reducción de caudal; aplicación sobre casos analizados mediante ‘método 1’.....	238
Tabla 6.7. Fechas de cálculo de CMN en sectores analizados a través de ‘método 2’.....	239
Tabla 6.8. Resultados de CMN_{ref} anterior y posterior a maniobras de GP y reducción de caudal; aplicación sobre casos analizados mediante ‘método 2’.....	240
Tabla 6.9. Fechas de cálculo de CMN en sectores analizados a través de ‘método 3’.....	241
Tabla 6.10. Resultados de CMN_{ref} anterior y posterior a maniobras de GP y reducción de caudal; aplicación sobre casos analizados mediante ‘método 3’.....	243
Tabla 6.11. Resultados de CMN_{ref} anterior y posterior a maniobras de GP y reducción de caudal; aplicación sobre casos analizados mediante ‘método 3’.....	243
Tabla 6.12 Consumo medio nocturno (invierno) en función de tipo de vivienda (Cubillo et al. 2008).....	246
Tabla 6.13. Distribución de usos nocturnos para viviendas unifamiliares (Cubillo et al. 2008).....	246
Tabla 6.14. Consumo medio nocturno (invierno) en función de tipo de vivienda y de relación del tipo de uso con la presión de la red	246
Tabla 6.15. Consumos nocturnos medios en invierno en cada sector de estudio en función de su relación de tipo de uso con la presión de la red	247

Tabla 6.16. Rango de consumos nocturnos en invierno en cada sector de estudio en función de su relación de tipo de uso con la presión de la red.....	248
Tabla 6.17. Valores de fugas estimadas durante el periodo de CMN anteriores a maniobras de GP	248
Tabla 6.18. Valores de consumo y presión durante CMN, en periodos anterior y posterior a maniobras de regulación.....	249
Tabla 6.19. Valores de fugas estimadas durante el periodo de CMN posteriores a maniobras de GP	250
Tabla 6.20. Resultados finales de disminución de fugas y mejora del rendimiento de la red debido a las maniobras de gestión de presiones (correspondiente al periodo de caudales mínimos).....	250
Tabla 6.21. Datos de cota de cabecera (VRP), cota media de sector (basado en acometidas) y diferencia de cotas entre cabecera y punto medio	252
Tabla 6.22. Valores de función de ajuste de curva ‘caudal/pérdida de carga’ e indicadores de grado de bondad del ajuste.....	258
Tabla 6.23. Distancias entre punto de cabecera y punto representativo de presión media	259
Tabla 6.24. Datos de presión medios – antes y después de regulación – durante CMN...	262
Tabla 6.25. Valores de fugas medias diarias antes de GP con exponente $N1 = 0.5$	267
Tabla 6.26. Valores de fugas medias diarias después de GP con exponente $N1 = 0.5$	267
Tabla 6.27. Valores de fugas medias diarias antes de GP con exponente $N1 = 1.5$	268
Tabla 6.28. Valores de fugas medias diarias después de GP con exponente $N1 = 1.5$	268

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

Esta tesis tiene como origen y antecedente principal la línea de investigación iniciada en el Grupo de Investigación de Hidroinformática y Gestión del Agua (GIHGA) y la Unidad Docente de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil, Hidráulica y Energética de la Universidad Politécnica de Madrid, referente al estudio de eficiencia en redes de abastecimiento de agua urbana.

El contexto principal en el que se enmarca esta línea es la elaboración del proyecto de investigación ‘*TecoAgua*’. El Proyecto TEcoAgua fue cofinanciado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) dentro del subprograma de apoyo a consorcios estratégicos nacionales de investigación técnica (CENIT-E) al amparo de la Orden CIN/1559/2009 (BOE 2010).

Dentro del mismo se desarrollaron diferentes actividades y tareas, cuyo objetivo principal fue el desarrollo de tecnologías sostenibles para la generación de recursos hídricos alternativos. La actividad en la que se enmarca esta tesis correspondió al apoyo prestado por parte del grupo GIHCA al Canal de Isabel II en **la implantación de un plan de gestión de presiones en la red de distribución de agua de la Comunidad de Madrid**. A lo largo de más de cuatro años (2010-2013), este grupo de investigación de la UPM, junto al departamento de I+D de ‘Canal de Isabel II gestión’ (CYII de aquí en adelante), trabajaron conjuntamente en el desarrollo de un Sistema Integrado para la Gestión Avanzada de Presiones y otra serie de tareas que se citan a continuación:

- Desarrollo de una *guía técnica metodológica* para la elaboración de planes de Gestión de Presiones.
- Análisis de datos concernientes a pruebas piloto de maniobras de *gestión de presiones* llevadas a cabo por la empresa CYII en su red de distribución.
- Creación de un *software de ayuda a la toma de decisiones* para la evaluación, análisis y seguimiento de dichas maniobras.

- Elaboración integral de una campaña de monitorización de presiones en *puntos críticos de la red* (puntos de cada sector con menor presión), en un total de más de 70 sectores.

Posteriormente, tras la finalización del citado proyecto, las actividades relacionadas con el último punto tuvieron continuidad durante el periodo (2013-2014) a través de un contrato de investigación específico para tal propósito y coordinado por el autor y directores de la presente tesis. Este contrato fue el siguiente:

- “Estudio y análisis de los datos obtenidos de los equipos instalados en los puntos críticos en los sectores susceptibles de implantar gestión de presiones en la red de distribución de Canal de Isabel II Gestión” financiado por la empresa *Canal de Isabel II Gestión, S.A.*

Estos dos proyectos han sido los antecedentes principales de esta tesis. No obstante, tras su finalización, lejos de acabar esta línea de investigación se ha proseguido con la misma de forma propia para la consecución de la presente tesis. Si bien durante la fase concerniente a los citados proyectos el estudio se focalizó en el estudio de planes y maniobras de gestión de presiones, durante la segunda fase, el estudio se ha centrado en la *evaluación de su influencia sobre la reducción de pérdidas de agua*, siendo éste uno de los principales objetivos para los que se implanta este tipo de planes.

1.2 Motivación

La *regulación de presiones* se ha convertido en una operación de gran relevancia y globalmente extendida por parte de las empresas operadoras de redes de abastecimiento de agua. El motivo principal son los múltiples beneficios obtenidos con una correcta gestión de este tipo de maniobras entre las que destacan: reducción de caudal fugado, aumento de la calidad de servicio ofrecido a usuarios, ahorro de agua inyectada al sistema (favorable en casos de escasez de disponibilidad de agua), aumento de la vida útil de infraestructura por disminución de roturas y deterioro, ahorro energético, etc. (Fantozzi and Lambert 2010). Dos de los objetivos más perseguidos con esta maniobra y en los que se focaliza esta tesis son: la reducción de caudal fugado y la mejora de servicio a usuarios. Sin embargo su relación con la presión de la red es inversa.

Las pérdidas de agua ocurren a lo largo de toda la red. Se pueden dar en dos formas: pequeños escapes de caudal relativamente bajo (ocurridos a través de puntos de unión, pequeños orificios o dispositivos localizados a lo largo de la red) o grandes pérdidas a través de roturas ocurridas en conducciones. Independientemente del tipo de fuga, la relación entre caudal y presión deriva de los mismos principios físicos. Si se considera que el orificio de salida es fijo, la relación entre ambas variables viene definida por la ecuación de Torricelli (aplicación particular del principio de Bernoulli) la cual expresa que la velocidad del fluido es proporcional a la raíz cuadrada de la presión. Si se considera que la superficie de orificio puede ser variable con la presión, se aplica la teoría FAVAD (May 1994), que tienen en cuenta esta variación. En cualquier caso, independientemente de la

naturaleza de la fuga, existe una relación directa entre caudal fugado y presión que se puede resumir como: a mayor presión en la red mayor será el caudal fugado. Por lo tanto, *para reducir el caudal fugado en un determinado tramo de red, será necesario reducir la presión aguas arriba de dicho tramo.*

El segundo objetivo tratado, mejorar la calidad de servicio a usuarios, está asociado a múltiples factores: presión adecuada, caudal no interrumpido, calidad del agua, etc. En relación a la presión, hay que buscar un equilibrio a la hora de establecer un servicio óptimo. Valores excesivamente altos pueden causar molestias sobre el usuario, mientras que valores bajos pueden ofrecer un servicio no adecuado llegando incluso a interrupciones por falta de presión. Para la búsqueda de esta solución de compromiso, uno de los criterios más extendidos por parte de las empresas operadoras es establecer un valor de presión mínima o presión de referencia (P_{ref}) y tratar de que *todos los usuarios tengan una presión mayor a dicho valor.*

Con la premisa de cumplir esta dualidad (bajar la presión en la medida de lo posible para reducir el volumen de fugas, pero no en exceso para no afectar negativamente al servicio) surge el concepto de **gestión de presiones**. Esta gestión se puede realizar con diversos elementos con capacidad reguladora (válvulas reguladoras de presión, bombas centrífugas, tanques reguladores, etc.) y con diferentes estrategias de planificación: regulación de presión en grandes zonas de alta de la red de abastecimiento, regulación de sectores de distribución, etc.

De entre todas las maniobras y variantes que se pueden englobar dentro de la gestión de presiones, este estudio se centra en maniobras con las siguientes características:

- Elemento regulador: **Válvulas Reductoras de Presión (VRPs).**
- Topología de la zona regulada: tramos de red de distribución finales con estructura de **red mallada y sectorizada** (número limitado de entradas de agua en cada zona).
- Escenario hidráulico: **exceso de presión en cabecera de sector** (propios de redes con funcionamiento por gravedad).

Los motivos principales de centrar el estudio de esta tesis en este tipo de elementos reguladores (VRPs) y estrategia de gestionar la red (redes sectorizadas) son los siguientes:

- Este tipo de válvulas ofrecen un gran rendimiento en cuanto a su relación ‘capacidad reguladora/coste’. Para alcanzar los mismos beneficios, otro tipo de instrumentación como los depósitos o las bombas suelen suponer alternativas mucho más costosas. La regulación mediante depósitos de almacenamiento (controlando su nivel) va asociada a unos costes iniciales muy elevados debido a su proceso constructivo. No obstante, en aquellos lugares en los que exista de ante mano este tipo de elementos pueden resultar una alternativa eficaz. Las bombas centrífugas pueden ser convenientes o incluso obligatorias en topologías en las que exista un déficit de presión. Sin embargo, fuera de estos escenarios, conllevan un coste mucho mayor en términos de instalación, de mantenimiento y de gasto energético.

- En las últimas décadas han aparecido nuevas técnicas y dispositivos complementarios a las válvulas, que han mejorado su eficiencia. Algunos ejemplos son: expansión generalizada de la sectorización como estrategia de gestión de redes (tipo de gestión a la cual se ajusta perfectamente la instalación de este tipo de válvulas), incorporación de controladores electrónicos para definir consignas de presión moduladas, desarrollo de nuevos algoritmos que permiten simular computacionalmente su comportamiento con mayor precisión, etc.
- Dentro de la amplia gama de válvulas reguladoras existentes (limitadoras de caudal, sostenedoras de presión, etc.), las VRPs son un tipo muy utilizado por ajustarse perfectamente a los requerimientos de múltiples redes. Se adecúan especialmente a sistemas de abastecimiento con funcionamiento *por gravedad* en los cuales generalmente existe exceso de presión en la red.
- Por último, particularizando al ámbito de esta tesis, se describirá más adelante un gran plan de gestión de presiones proyectado en la red de Madrid por parte de la empresa Canal de Isabel II gestión (CYII de aquí en adelante). Éste se ha fundamentando en el uso de técnicas de regulación mediante VRPs (tanto estrategias clásicas como más avanzadas), por lo que se ha concebido como un excelente caso de estudio para validar las propuestas metodológicas desarrolladas y analizar los resultados obtenidos de su implantación.

Una gestión eficiente conlleva que, a lo largo del día, la presión sea modulada *en función de las características de las zonas reguladas y de los patrones de consumo*. En periodos de menor demanda la presión del sistema es mayor (cercana a la presión estático tanto menor sea el caudal circulante), la pérdida de carga es menor y por tanto la presión en cabecera debe reducirse para disminuir el caudal fugado a lo largo de la red. Pero si esta reducción es excesiva, puntos interiores del sector con mayor cota pueden sufrir un déficit de presión. Bajo condiciones deficientes, la demanda reclamada por usuarios puede no ser abastecida en su totalidad. Esto supone una reducción de consumo, aumento de la insatisfacción de usuarios y disminución de los ingresos obtenidos por parte de la empresa operadora. En casos extremos, la presión baja puede incluso llevar a interrumpir el servicio temporalmente.

Por el contrario, durante periodos de mayor demanda interesa una mayor presión en cabecera para mejorar el servicio durante este periodo a los usuarios. Además, hay que contemplar las características hidráulicas de la zona regulada. A mayor demanda y por tanto caudal circulante, mayor pérdida de carga. Por ello, para alcanzar la presión mínima de servicio en todos los nodos es recomendable aumentar la presión en cabecera.

Con el paso del tiempo, en las últimas décadas han proliferado *dispositivos, técnicas y consignas de regulación para modular la presión* de la red más o menos sofisticadas asociadas a las VRPs. Tradicionalmente, las consignas han sido gobernadas o bien por la propia acción de la válvula principal o bien por válvulas pilotadas, conectadas hidráulicamente a la principal. Los circuitos hidro-mecánicos, más o menos complejos, han permitido que la presión de salida sea “modulada” de forma más o menos sofisticada. Más recientemente ha proliferado la aparición de dispositivos electrónicos que han permitido

una modulación más precisa, ajustando su curva en función de una determinada variable (tiempo, caudal y presión).

Son innumerables los proyectos y estudios encontrados que abordan el análisis de planes de gestión de presiones, tanto con el ámbito de la práctica profesional como en un contexto académico-científico. Se describen en estos estudios dos fases del plan de regulación principalmente:

- *Fase de diseño de las maniobras de regulación* – Muchos de los estudios describen el diseño y puesta en marcha de un caso de estudio específico. Otros proponen métodos para diseñar consignas de regulación para una determinada técnica de control. Sin embargo, muy pocos suelen comparar diferentes técnicas o consignas, ni se suelen tener en cuenta las características de la zona regulada para su selección.
- *Fase de evaluación del impacto de la regulación* – Por otro lado, otro tipo de estudios se centran en el análisis del impacto generado tras la implantación de un plan de este tipo (tanto en afección a usuarios como sobre todo en reducción de fugas). Este análisis se lleva a cabo generalmente mediante una metodología concreta en cada estudio: ecuaciones empíricas, expresiones simplificadas, balances hidráulicos, modelos numéricos, monitorización, etc.

Esto ha motivado surjan algunas cuestiones relevantes:

- ¿Cómo afectan las características de la zona de regulación en la eficiencia de las maniobras de regulación? ¿Qué tipo de técnica y consigna es la más adecuada en cada caso y en función de los objetivos perseguidos?
- ¿Cómo se puede evaluar el efecto o impacto de la regulación de la presiones? De entre la heterogeneidad de métodos detectados, ¿cuál es el más conveniente y que posible incertidumbre se introduce con métodos simplificados? Y por último, ¿se puede mejorar alguno de estos métodos?
- ¿Existen herramientas para diseñar este tipo de planes o para analizar sus resultados? ¿Qué grado de detalle requieren estas herramientas en cuanto a introducción de datos?

La necesidad de responder a estas preguntas ha motivado que en esta tesis se busque una metodología que permita:

- Asistir en el diseño de planes de GP – Comparando diferentes técnicas de regulación e identificando la más adecuada para cada caso de estudio, considerando los patrones de consumo y las características de la zona de regulación. Como segundo paso, se pretende proponer una metodología para obtener el diseño óptimo de las curvas de consigna de presión asociadas a la técnica seleccionada.
- Mejorar el análisis del impacto de la GP – Proponiendo nuevos métodos que ofrezcan una mejora en la precisión del cálculo, tanto de caudales fugados como de afección a usuarios.

- Establecer un entorno informático, que combine las ventajas de los modelos de simulación y el análisis basado en datos reales, para asistir en planes de GP en las dos etapas citadas: diseño y evaluación de su impacto. Esta herramienta pretende ser adaptativa a la disponibilidad de datos de cada caso, ya sean provenientes de modelos numéricos o de sistemas de monitorización.

1.3 Objetivos

Los objetivos planteados en esta tesis se resumen en tres principales que se enumeran a continuación, cada uno de ellos con una serie de sub-objetivos:

- **1º) Propuesta metodológica para el diseño de planes de GP.** En base a un análisis cualitativo de casos de estudio a nivel global, se definen los factores más relevantes relacionados con el proceso de regulación de presiones, la interrelación entre ellos y se creará una propuesta metodológica para la selección de la técnica de regulación más adecuada en función de las características. Asimismo, se propondrá una metodología para el diseño de consignas avanzadas de regulación para VRPs.
- **2º) Propuesta metodológica para la evaluación del impacto de planes GP.** Esta propuesta está conformada por dos enfoques bien diferenciados: (1) métodos de detalle basados en el análisis de modelos hidráulicos y (2) métodos simplificados basados en el concepto de Caudal Mínimo Nocturno. Este último está orientado a la estimación de fugas y el impacto que supone la gestión de presiones sobre su reducción. Se prestará especial relevancia sobre éste dado que se han detectado múltiples fuentes de incertidumbre en los criterios y métodos utilizados en la literatura especializada. Se propone aquí una metodología con un enfoque '*de abajo hacia arriba (bottom-up)*', multi-criterio y adaptativa a cada caso, y físicamente basada.
- **3º) Creación un Sistema de Ayuda a la Toma de Decisiones para la gestión integral de planes de GP.** Por último, los dos aspectos anteriores serán integrados en forma de herramienta informática que sirva para la toma de decisiones a la hora de diseñar procesos de regulación de presiones y evaluar su efecto sobre los objetivos perseguidos. Esta herramienta servirá tanto para el análisis de modelos numéricos como series de datos discretas provenientes de sensores localizados en redes de abastecimiento reales.

Objetivo 1 – Propuesta metodológica para el diseño de planes de GP

En primer lugar se pretende crear una metodología para implantar planes integrales de gestión de presiones, que contemple los diferentes factores que influyen en estas maniobras. Esta acción se pretende abordar a partir de la consecución de una serie de sub-objetivos:

- *Análisis cualitativo basado en el Método de Estudio de Casos (MEC).* Para ello se han recopilado varios cientos de fuentes de documentación especializada de naturaleza heterogénea: guías e informes técnicos, libros académicos, artículos de investigación, documentación técnica sobre instrumentación, etc. Se ha prestado especial énfasis en aquellos documentos relativos a casos de estudio. A partir de esta documentación se procede a elaborar un análisis comparativo de casos que permita extraer conclusiones sobre los factores más influyentes y su interrelación. En el análisis comparativo se analizarán aspectos como: evolución de cada factor (métodos tradicionales, tendencias, etc.), particularidades según el contexto geográfico/económico que se trate, distinción entre casos de aplicación más estandarizados y casos atípicos, y deducción de mejores opciones de diseño acorde a las características de cada caso de estudio.
- *Propuesta metodológica para la selección de técnicas de regulación en función de las características de la zona de regulación.* Una vez realizado el análisis cualitativo, se deducirán los factores más influyentes y estudiará la relación entre ellos. Con las conclusiones extraídas, se elaborará una propuesta metodológica original para la implantación de planes de este tipo, que tenga en cuenta las características de cada caso de estudio destacando dos aspectos: el patrón de los perfiles de consumo en usuarios y las características de la zona regulada (dimensiones, orografía de la zona, pérdida de carga hidráulica, número de entradas de agua al sector).
- *Propuesta metodológica para el diseño de consignas de regulación avanzadas.* Las consignas de regulación que se implementan sobre las VRPs generalmente vienen determinadas bajo dos criterios: o bien se definen por la persona experta encargada del diseño del plan de gestión de presiones de forma *ad-hoc* para cada caso de estudio o bien se utilizan algoritmos de optimización propuestos en la literatura especializada. Ambos criterios, presentan inconvenientes a la hora de su utilización de forma generalizada. Esta propuesta trata de solventar este hándicap mediante la propuesta de un método para definir curvas de consigna para técnicas de regulación avanzadas, basándose en la simulación de múltiples escenarios hidráulicos a través de modelación numérica. El criterio para este diseño óptimo será la minimización del volumen de agua perdido, cumpliendo la restricción en todo momento de ofrecer una presión mínima para todos los usuarios. Como se verá más adelante, las consignas se estudiarán son las más utilizadas en la actualidad destacando cuatro: (1) presión de salida fija, (2) programación temporal, (3) modulación basada en el caudal y (4) modulación basada en señal de presión en punto remoto.

Objetivo 2 – Propuesta metodológica para la evaluación del impacto de GP

Como se han citado son dos los enfoques que se considerarán: (1) métodos y formulación para el análisis del impacto de la GP a través de modelación numérica y (2) métodos simplificados basados en el concepto de Caudal Mínimo Nocturno.

Con respecto al primer punto (modelos numéricos) se plantea el siguiente sub-objetivo:

- Elaborar una formulación para evaluar el impacto de la GP. En este sentido, se propondrá una formulación para analizar las dos finalidades principales con la que se instaura un plan de GP: impacto de la gestión de presiones en la calidad de servicio a usuarios e impacto de la gestión de presiones en la reducción de caudal fugado.

El segundo gran enfoque es la utilización de métodos simplificados que permitan estimar la reducción de presiones cuando no se dispone de modelos numéricos. En esta línea, la evaluación del nivel de fugas por el método del *Caudal Mínimo Nocturno* es uno de los más extendidos en la práctica profesional. Representa una aproximación sencilla a un problema complejo, y tan sólo requiere un número reducido de registros que pueden ser obtenidos en un periodo razonablemente corto de tiempo, haciendo del método muy atractivo. No obstante, a la hora de aplicar este concepto de CMN, se han detectado múltiples criterios y sub-métodos en la literatura especializada, muchos de ellos con un elevado grado de incertidumbre.

Por ello, este objetivo se centrará en desarrollar una metodología conceptual original, con las siguientes características: enfoque ‘*de abajo hacia arriba (bottom-up)*’, multi-criterio, adaptativa a cada caso y a los datos disponibles, y físicamente basada. Como sub-objetivos planteados en esta sección se alude a varios de los pasos más relevantes que hay que acometer para aplicar esta metodología y al análisis de la incertidumbre asociada a cada uno de estos pasos. Para algunas de estas fases, se propondrán propuestas originales, evaluando la potencial mejora que aportan respecto a métodos clásicos. Concretamente, se han identificado cuatro factores como los más relevantes en esta materia:

- Análisis de series temporales de variables hidráulicas asociadas a la demanda y el caudal circulante en redes de distribución urbanas – En esta línea, se elaborará un estudio exhaustivo de patrones de consumo típicos de este tipo de series, identificando sus componentes más importantes: tendencia, estacionalidades y variabilidad de componente aleatoria. A partir de este estudio, se propondrán una metodología para ajustar las citadas series y reducir el error a la hora de calcular el impacto que tiene la regulación de presiones sobre la reducción de fugas en redes.
- Estudio de sub-componentes durante CMN: consumo y pérdidas aparentes – Ante la necesidad de estimar estas componentes para calcular las pérdidas reales durante el CMN se analizarán diferentes propuestas en la literatura especializada y se compararán entre sí. Se propondrá un método para seleccionar el mejor criterio de estimación en función de los datos disponibles y las hipótesis realizadas.
- Análisis de presión media de la red – Esta variable, fundamental para extrapolar el volumen de fugas al resto de horas diarias, será evaluada a través de diferentes clásicos, y se propondrán varios nuevos enfoques basados en lecturas de presión en un número discreto de nodos de la red. Se evaluará el potencial error introducido comparando los resultados obtenidos con cada uno de estos métodos y los resultados obtenidos de modelos numéricos de detalle.

- Determinación de relación entre presión y caudal fugado – Se analizarán diferentes propuestas para su cálculo, determinando los valores o rangos más adecuados en cada caso y evaluando la incertidumbre asociada al desconocimiento de esta variable.

Objetivo 3 – Crear una herramienta de Ayuda a la Toma de Decisiones en el diseño de planes de GP y la explotación de redes ya reguladas.

Por último, se desarrollará una herramienta informática que sirva para la toma de decisiones a la hora de diseñar PIGP y evaluar su efecto. Para la elaboración de esta aplicación se utilizarán conclusiones extraídas del ‘Objetivo 1’, y se introducirán criterios de cálculo planteados en el ‘Objetivo 2’ integrando así de forma coherente los tres objetivos principales, y dando lugar al título de esta tesis. Adicionalmente, se desarrollará un código de programación específico de este objetivo, orientado a la simulación de redes sectorizadas en las que se desee implantar técnicas de regulación de presión con diferente grado de sofisticación. Para la elaboración de esta herramienta se propone una estructura modular que aluda a cuatro pasos fundamentales de un Sistema de Ayuda a la Decisión. Los sub-objetivos planteados en esta sección estarán relacionados con cada uno de estos módulos, consistiendo en los siguientes aspectos:

- Elaboración de un entorno de programación, adaptativo a diferentes tipos de datos – Con el fin de que la herramienta sea aplicable al mayor número de casos posible, se elaborará una estructura adaptativa a diferentes casos de análisis. Se desarrollará para ello un módulo de adquisición de datos con interfaz de usuario amigable con el fin de poder importar datos de dos tipos: provenientes de datos reales (obtenidos mediante lecturas de sensores que monitorizan la red) o utilizando esquemas numéricos de modelos hidráulicos (utilizando como estándar archivos de esquemas compatibles con el software EPANET).
- Configuración y diseño de consignas de regulación de presión avanzadas – Dado que se desea representar redes sectorizadas con sistemas de regulación de presión, se elaborará un módulo que permita diseñar consignas de regulación avanzadas bajo dos enfoques principales. El primero de ellos será un diseño ‘ad-hoc’ definido por el usuario a partir de un código de parametrización de curvas de consigna. El segundo será un sistema automático de propuesta de curvas de consigna basado en los algoritmos propuestos en el ‘Objetivo 1’.
- Desarrollo de una herramienta de cálculo para el análisis hidráulico de redes con este tipo de regulación – Se elaborará un esquema numérico de cálculo para simular redes de abastecimiento que contemplen los sistemas de regulación anteriormente citados. Para ello, se utilizarán algunos de los esquemas de formulación matriciales más novedosos que representan escenarios más realistas que la formulación clásica utilizada en este tipo de software. Sobre esta base, se introducirá la formulación desarrollada como condiciones de contorno dinámicas para representar simular análisis hidráulico de redes cuya presión es regulada en

cabecera. Se evaluarán los resultados obtenidos aplicándolo a diferentes casos de estudio.

- Creación de módulo de análisis para evaluar el impacto de la regulación de presiones en cuanto a afección a usuarios y a reducción de volumen de fugas – Por último, se creará un módulo que evalúe el impacto de la regulación de presión, permitiendo comparar los resultados obtenidos al aplicar diferentes consignas propuestas. Este módulo incorporará los modelos propuestos en el ‘Objetivo 2’ y enfocados en dos líneas: métodos aplicables a modelos numéricos y métodos simplificados aplicables a series de datos reales en los que no se dispone de datos en tiempo real de modelos numéricos calibrados.

Con todo lo expuesto, se pretende crear una herramienta integral de análisis de este tipo de maniobras que sea adaptativa a un buen número de casos, independientemente de los datos disponibles y de las características de los casos de estudio.

Capítulo 2. Estado del arte

En este capítulo se revisan los antecedentes que fundamentan la investigación que se desarrolla en esta tesis. Al tratarse un gran número de aspectos (interconectados entre sí), el capítulo se ha dividido en cinco partes. Las cuatro primeras recogen un análisis del estado actual de cuatro de los factores más relevantes en esta investigación: (1) sectorización, (2) instrumentación y técnicas de regulación, (3) relación entre presión, fugas y consumo y (4) modelos numéricos. Una quinta sección, resumen las conclusiones extraídas de cada una de las secciones anteriores. Se resumen el contenido de cada parte:

- **Sectorización** – Seleccionar convenientemente el área que va a ser regulada es crucial para que las maniobras sean lo más eficientes posible. En este sentido, la aparición hace unas décadas de la sectorización como estrategia de diseño de redes de distribución ha supuesto un gran avance. Si bien este tipo de sub-zonas acotadas geográfica, topológica e hidráulicamente se ajustan en gran medida a los requerimientos de la gestión de presiones, hay ciertos puntos que deben adaptarse para transformar un sector clásico y conferirle las características finales que debe tener una zona de regulación de presiones. En esta sección se describen los tipos de sectores y las características más importantes en su relación con la GP.
- **Instrumentación y técnicas de regulación** – La Válvula Reductora de Presión (VRP), es el elemento en torno al cual gira la acción de regulación. En este apartado se resumen en primer lugar las características principales de este tipo de instrumentación. En segundo lugar, y dada la importancia que ha cobrado en las últimas décadas la aparición de nuevos métodos de regulación avanzados asociadas a las VRPs se hace clasificación exhaustiva de este tipo de técnicas: tanto de naturaleza hidráulico-mecánica como a partir de dispositivos electrónicos.
- **Relación entre presión, caudal fugado y consumo** – De entre todas las posibles finalidades que se persiguen con la gestión de presiones, en esta tesis se tratan fundamentalmente dos: disminución de fugas y mejora de servicio a usuarios. Para analizar correctamente el impacto que supone la GP sobre cada uno de estos propósitos, hay que comprender la relación física existente entre la

variable presión y el resto de variables intervinientes: caudal fugado y caudal consumido.

- **Simulación mediante modelos numéricos** – El avance computacional, el desarrollo de nuevos algoritmos y la aparición de nuevos modelos numéricos, han permitido simular el comportamiento de sistemas cada vez más complejos. Las maniobras de gestión de presiones no son ajenas a este avance, habiendo surgido diferentes algoritmos de simulación y optimización para: (1) simular algunos fenómenos de comportamiento de redes reguladas campo y (2) optimizar ciertos aspectos de esta maniobra (número de válvulas a instalar, localización, consigna de regulación) atendiendo a diferentes objetivos.

2.1 Sectorización

En este capítulo se describe el concepto de **sectorización** y en particular su relación con el control de presiones de una red. De forma resumida, un sector se puede definir de la siguiente forma: “*una porción o sub-tramo de red, aislado hidráulicamente respecto a zonas aledañas excepto por unos pocos puntos (entradas o salidas), cuyo caudal es monitorizado de forma continuada*”. La finalidad de la sectorización, históricamente, ha sido la mejora en la estimación del *volumen de agua no registrada* y por ende a la mejora en la estimación y posterior reducción de pérdidas de agua (Morrison 2004; UKWI 1980). En las últimas décadas, también se ha adaptado esta estrategia a la búsqueda de otras finalidades como es *la mejora en la gestión de presiones* (Charalambous 2007; Sturm y Thornton 2005;).

A pesar de existir similitudes evidentes de diseño y explotación de un plan de sectorización independientemente de la finalidad perseguida, existen algunas diferencias significativas que han de tenerse presentes. Existe abundante literatura sobre el diseño de redes sectorizadas y su aplicación a la reducción de caudales fugados a través de la estimación de agua no registrada (Morrison et al. 2007; Farley y Trow 2003). Sin embargo, se ha detectado una falta de referencias explícitas al diseño de sectores cuando el objetivo primordial perseguido es la gestión de presiones. Con esta motivación se desarrolla el presente capítulo. Se pretende no sólo sentar las bases para la mejor comprensión del desarrollo de esta tesis, sino que sirva de referencia para futuros proyectos de sectorización que busquen una mejora en sus sistemas de regulación de presiones. Así, se tratará de asentar ideas básicas que a día de hoy no se han encontrado debidamente recogidas y ordenadas en la literatura y se aportarán una serie de recomendaciones para la instauración de este tipo de planes.

2.1.1 Conceptos generales de la sectorización

2.1.1.1 Concepción y origen

La división de las redes de transporte y distribución de agua en sectores hidráulicos o hidrométricos (éste último generalmente utilizado en países latino americanos) ha representado un cambio trascendental en la gestión del suministro de agua para consumo en las últimas décadas. Como tal, desde inicios del siglo XXI, muchas prácticas de planeamiento, diseño y operación de una red han cambiado en su concepción estratégica en la mayor parte de los sistemas de suministro de agua en el mundo.

La idea de aplicar este tipo de estrategia de diseño y explotación a las redes de distribución de agua tiene su origen en la industria del agua del Reino Unido, a principios de la década de los 80. El término de *sector* en su terminología original anglosajona *DMA* (*District Metered Area*), fue introducido por primera vez por la asociación ‘*UK Water Industry Ltd*’ en su informe: “*Leakage Control Policy & Practice (Report 26)*” (UKWIR 1980). En éste se hace referencia a la estrategia de gestionar las redes de suministro de

agua fragmentándolas en áreas de tamaño limitado, delimitándolas geográficamente y aislándolas unas de otras. En adición a este aislamiento hidráulico, el concepto de sector solía ir asociado a la medición y el control del caudal circulante en el interior del sector a través de la continua monitorización de sus puntos de entrada y salida. Para facilitar esta tarea, tradicionalmente, el número de entradas de flujo se suele limitar a uno o dos. A través de estos puntos, conectan hidráulicamente con un tramo de red situado aguas arriba, que o bien se puede tratar de red principal/estratégica (transporta el agua desde su origen hacia áreas cercanas a los núcleos poblacionales) o bien con otros sectores de distribución. En cada una de estas entradas, se instalan dispositivos de medición y control, para tomar con la precisión y frecuencia adecuada los parámetros necesarios para mejorar la eficiencia de la gestión de la red. La continua y más eficiente monitorización ha permitido a su vez mejorar la estimación de los diferentes componentes que conforman el balance hidráulico del agua. Consecuentemente se puede llevar a cabo una estimación más precisa del volumen de **agua no registrada** (concepto muy utilizado en la explotación de este tipo infraestructuras).

2.1.1.2 Sectorización como parte de un plan de gestión de presiones

No obstante, el concepto de sectorización hoy en día tiene una repercusión mucho más notable. Son múltiples las prácticas para las que se puede poner en marcha un plan de sectorización, destacando tres por encima del resto:

- La ya citada **mejora en la estimación de las componentes del balance hidráulico** a través de su continua monitorización, y por ende poder actuar sobre estas fugas para reducirlas.
- Ofrecer una **mayor calidad de servicio a usuarios** en términos de condiciones hidráulicas del agua suministrada en puntos finales de entrega.

No es casualidad que ambos objetivos se tratan de los dos principales beneficios obtenidos igualmente con la **gestión de presiones**. Y es que, en la actualidad, la sectorización está estrechamente ligada a la esta operación de regulación. Sectorización y gestión de presiones coexisten en un amplísimo número de proyectos. Por ello muchos autores han optado por diferenciar terminológicamente dos conceptos: (1) *sectores hidráulicos* o hidrométricos cuyo objetivos fundamental es la continua monitorización (concepto clásico asociada al término inglés DMA – *Disctric Meteres Areas*) y (2) *áreas de gestión de presiones* (Yates y MacDonald 2007; Charalambous 2007), cuando la creación del sector se lleva a cabo con la concepción inicial de que sirva como una parte dentro del plan integral de gestión de presiones. Un esquema típico de áreas de gestión de presiones se recoge en la Figura 2.1.

Aunque algunos aspectos de diseño asociados a ambos conceptos son comunes, otros pueden diferir. En la literatura, se pueden encontrar múltiples referencias al diseño de redes sectorizadas en su concepción más generalista. Algunas de las más relevantes se han materializado en forma de manual o guías técnicas, encontrándose auténticos referentes en el campo de la ingeniería de este tipo de infraestructuras (Morrison et al. 2007; UKWI

1999). También es muy habitual encontrar información sobre sectorización en manuales y libros dedicados a la *reducción de fugas* donde se suele dedicarse un capítulo completo o importantes secciones a este concepto (Thornton et al. 2008; Fanner et al. 2007; Farley y Trow 2003; Farley 2001). No obstante, se ha detectado una falta de documentación específica de diseño de sectores enfocados a la implantación de un plan de gestión de presiones.

Figura 2.1. Esquema de área de gestión de presiones con instrumentación asociada

2.1.2 Beneficios de la implantación conjunta de sectorización y plan de gestión de presiones

La sectorización va asociada de forma intrínseca a la búsqueda de una serie de objetivos: mejor estimación de agua no registrada, localización más eficiente de fugas, etc. Éstas han sido tratadas ampliamente en la literatura especializada (Thornton et al. 2008; Morrison et al. 2007; Fanner et al. 2007; Farley 2001). Si a esta estrategia se le une la gestión de presiones, los beneficios obtenidos pueden incrementarse. En este apartado se describen las principales sinergias que se pueden alcanzar al intervenir ambas técnicas de forma conjunta.

2.1.2.1 Estimación y disminución del volumen de pérdidas reales

Se trata del objetivo histórico de la sectorización cuando se lleva a cabo por sí sola. El concepto de *agua no registrada* engloba todas las sub-componentes del balance hidráulico de las cuales la empresa operadora de la red no tiene constancia del porcentaje que suponen. Retomando la clasificación mostrada en el capítulo anterior sobre el balance hidráulico en redes de distribución (Lambert 2002, Alegre et al. 2000), el agua no registrada se puede definir como suma de tres componentes: volumen autorizado no registrado ($V_{no-reg,out}$), pérdidas debido a fugas reales (F_{real}) y pérdidas aparentes (F_{ap}).

$$V_{no-reg} = V_{no-reg,auto} + F_{real} + F_{ap} \quad (1)$$

La sectorización por sí sola, al acotar geográficamente el área de estudio, permite ejecutar de forma más eficiente el balance hidráulico de la zona de estudio. Disponiendo de datos de consumos en usuarios finales, puede mejorar la precisión a la hora de estimar el volumen de agua no registrada en su conjunto. No obstante, para desagregar este volumen en sus diferentes componentes hay que recurrir a otros métodos. La incorporación de la gestión de presiones puede ayudar a esta labor al influir de forma diferente en cada componente.

Particularizando a una de las componentes que conforman el agua no registrada (pérdidas reales), se pueden obtener uno de los mayores beneficios. Las pérdidas reales, tanto las debidas a roturas o pequeños orificios como las que tienen lugar en elementos de unión o dispositivos (*background leakages*), son sensibles a la presión del sistema. Al reducirse por tanto la presión, el caudal fluyente se reducirá, mientras que otras componentes (agua autorizada no registrada y pérdidas aparentes) no se verán afectadas de igual forma.

2.1.2.2 Gestión más eficiente de presión en usuarios

La *mejora en la gestión de presión en los usuarios* es el otro gran beneficio asociado a la sectorización al llevarse a cabo conjuntamente con maniobras de regulación de presiones. El éxito reside en acotar la zona sobre la que afectarán las maniobras de regulación, pudiéndolas controlar de forma más eficiente (Thornton et al. 2008, Fanner et al. 2007).

Uno de los criterios más utilizados a la hora de evaluar el nivel de servicio a los usuarios (en relación a la presión del sistema), es que en todo momento y todos los puntos regulados, la presión sea mayor o igual a un valor predefinido, lo cual se puede definir mediante la expresión siguiente:

$$P_i > P_{\min} \quad \{\text{para cualquier } i\} \quad (2)$$

Este valor varía en función del criterio de la empresa operadora o de la normativa/reglamentación aplicable en materia de gestión del agua. En España este valor varía de unas zonas a otras, siendo 25 metros columna de agua (m.c.a.) un valor medio habitualmente utilizado. La sectorización y algunas de las propiedades que caracterizan esta técnica, ayudan notablemente a alcanzar este objetivo.

2.1.2.3 Otros beneficios de propios de la sectorización

Adicionalmente a los beneficios conseguidos con la sinergia ‘sectorización-gestión de presiones’ la sectorización por sí misma se ha revelado como una técnica que entraña otras ventajas añadidas: mejora en la estructuración de la red, planificación del desarrollo futuro, facilitar el control y la operación, entre otras. Se describen a continuación los aspectos más significativos de cada una de ellas.

Percepción y localización más rápida de fugas debido a roturas

De todas las componentes tratadas anteriormente, las *pérdidas reales* de agua destacan como el elemento cuyo control es más susceptible de ser mejorado potencialmente con la implantación de redes sectorizadas (Farley 2001, Morrison 2004). La reducción del sistema en áreas más pequeños permite reducir varias de las etapas del *tiempo de vida de una fuga* (Figura 2.2).

- Tiempo de percepción – Al reducirse le número de conducciones y puntos de consumo, se puede evaluar mejor el balance hidráulico del sector y detectar eventos anómalos que se puedan asociar a la aparición de nuevas roturas.
- Tiempo de localización – El acotamiento geográfico permite, una vez percatados de la existencia de una determinada fuga, localizarlas en menor tiempo.

Figura 2.2. Efecto de la sectorización en la reducción del tiempo de percepción y localización de fugas

Mejor estimación de consumos

Análogamente, la mejora en la estimación del balance hidráulico puede suponer una mejor evaluación del volumen real de agua consumido por los usuarios. Esta estimación es otra de las líneas siempre interesantes para las empresas explotadoras al permitir gestionar sus recursos acorde a las necesidades requeridas.

Cuando se dispone de información histórica de suministro de agua a los sectores, es posible identificar los patrones de consumo de cada sector, con sus ciclos diarios, semanales y estacionales, y su relación con otros factores como la meteorología. De esta forma pueden elaborarse modelos representativos de los patrones de consumo de cada sector. Estos modelos permiten realizar predicciones bastante ajustadas a corto plazo de

los consumos esperados a escala horaria, de gran utilidad, por ejemplo para programar una maniobra que afecte al suministro de uno o varios sectores.

Cuando los caudales suministrados se apartan notablemente de los patrones esperados, puede ser indicativo de que se ha producido alguna anomalía en el sector, rotura, maniobra incorrecta, o algún fallo en la instrumentación de medida. Se tiene de esta manera un sistema de alerta temprana para detección de posibles incidencias.

Estructuración de la red

La sectorización de las redes de distribución de agua permite una identificación y definición precisa de una red estratégica o de transporte, que conecta la red principal con los sectores pero que no da servicio directamente a los usuarios. Esta red de transporte generalmente tendrá estructura ramificada, pero con las suficientes redundancias para permitir una explotación flexible y ofrecer alternativas al suministro de los sectores. Internamente al sector, la distribución a los usuarios se realiza mediante las redes malladas clásicas. Cuando la dimensión y características de los sectores lo requieran, también pueden establecerse dentro del sector unas redes primarias o de transporte interno, diferenciadas de la distribución. Con la sectorización se consigue una separación clara entre las distintas categorías de redes: red primaria de transporte, red secundaria en su caso y red de distribución, quedando perfectamente definida la función de cada uno de los elementos y subsistemas.

El análisis del funcionamiento global del sistema se simplifica notablemente mediante una estructura de este tipo. Es posible tratar en un modelo hidráulico cada sector como una unidad (un nudo de demanda), de la que se conocen con precisión sus pautas de consumo, y analizar de forma separada únicamente la red estratégica. Conociendo las condiciones de presión en cada nudo de conexión de la red estratégica con los sectores, puede analizarse cada uno de ellos separadamente. En el cálculo de estructuras complejas, esta técnica se conoce como *subestructuración*, y permite un análisis preciso de grandes sistemas mediante división en estructuras más simples.

Planificación de desarrollos futuros

Una debida estructuración y jerarquización de las redes de abastecimiento es condición esencial para que el desarrollo del sistema se produzca de una forma ordenada, optimizando la utilización de las infraestructuras existentes y las inversiones requeridas en las sucesivas ampliaciones.

La incorporación de un nuevo desarrollo urbano al sistema de abastecimiento puede hacerse incluyéndolo en un sector existente, o creando un nuevo sector. En cualquiera de los dos casos, se deberá verificar que la red de transporte existente es suficiente para asumir las nuevas demandas, y en caso contrario proyectar los refuerzos necesarios. Esta configuración de la red de transporte facilita enormemente la identificación de los puntos débiles del sistema ante la incorporación de nuevas demandas.

Control y operación

Una red sectorizada puede ser controlada en tiempo real en todos sus nudos básicos (vías de suministro, puntos críticos) mediante la instrumentación de medida de caudales, presiones u otros parámetros, integrada en sistemas SCADA.

La ocurrencia de cualquier anomalía puede ser fácilmente detectada, analizada y aislada. Cuando una incidencia, por ejemplo un problema de calidad de agua, afecta a varios sectores, es fácil identificar las vías comunes a todos los sectores implicados y rastrearlas hasta dar con el origen del episodio. De la misma forma, si la anomalía se encuentra localizada en un único sector, será más fácil aislarla con la afección al mínimo número de usuarios.

2.1.3 Desventajas o inconvenientes de la sectorización

La sectorización, a pesar de ser beneficiosa para un buen número de aspectos, puede ser perjudicial para otros. El aislamiento y la creación de fronteras suponen una pérdida de redundancia que puede afectar negativamente tanto a la garantía como a la calidad del servicio. Estos son sólo algunos aspectos que deben ser evaluados a la hora de implantar una estrategia de este tipo a gran escala.

2.1.3.1 Reducción de redundancia

El concepto de sectorización, parece contradecir la tendencia histórica con la que se han venido diseñando las redes de abastecimiento de agua en zonas urbanas en décadas anteriores a los años 80. Tradicionalmente, se asumía la conveniencia de que las redes, al menos en sus tramos finales ya cercanos a las acometidas con usuarios, fueran estructuradas de forma claramente mallada. Este tipo de estrategia ha sido la más utilizada en contraposición a las redes ramificadas, con menos entramados interconectados entre sí y más propias de abastecimiento de agua a zonas de regadío. Surge así el concepto de *redundancia*, el cual hace referencia a la capacidad de un determinado sistema de suplir la demanda de agua, en todos los nodos de la red, bajo diferentes esquemas de operación. En la práctica lo que este concepto implica es que ante cualquier eventualidad que pueda surgir en un determinado tramo de la red (aparición de rotura, cortes de un tramo por realización de obras, cierre imprevisto de válvulas, etc.) el flujo de agua sea capaz de tomar otro camino para llegar finalmente a todos los nodos.

A pesar de este perjuicio, el gran beneficio que se prevé extraer de la sectorización y los grandes resultados ofrecidos por los primeros grandes planes de sectorización implantados en Reino Unido, fortalecen este concepto y rápidamente se extienden por todo el mundo. Pero a su vez, surgen las primeras discrepancias sobre cómo debe ser diseñado un sector de forma óptima.

2.1.3.2 Pérdida de capacidad para hacer frente a requerimientos eventuales de agua

Ligado directamente al apartado anterior, la falta de redundancia puede afectar al empeoramiento en la capacidad de afrontar adecuadamente eventuales incrementos de demanda de agua. Para la gestión de la demanda de agua en instantes en los que ésta pueda crecer de forma extraordinaria, es conveniente disponer de puntos adicionales por los que se pueda “inyectar” caudal adicional. La conformación de las fronteras asociadas a la sectorización va en detrimento de esta maniobra. Una posible solución puede ser localizar puntos de eventual apertura por los que pueda introducirse el caudal requerido en periodos de demanda extraordinarios. Estos *picos de consumo*, pueden ir ligados a diferentes requerimientos:

- Necesidad de caudal adicional para extinción de fuegos.
- Sucesión de eventos singulares que aglutinen un gran consumo por parte de usuarios “normales” en breves periodos de tiempo, por ejemplo, eventos televisivos de gran impacto social.
- Aparición de roturas significativas que hagan derivar al exterior gran parte del caudal inyectado.
- Confinamiento de sub-zonas debido al cierre de conducciones estratégicas para hacer llegar el fluido al lugar de destino: averías, rehabilitación, etc.

2.1.3.3 Problemas de calidad de agua

Una de las mayores afecciones que preocupan a los operadores de redes al subdividir el sistema es el deterioro en la calidad del agua al introducir nuevos testers o al cerrar un gran número de válvulas. Ambos hechos provocan la aparición de “puntos finales” o “puntos ciegos” en la red en los que el agua puede quedar estancada o permanecer un largo tiempo generando parámetros de calidad del agua por debajo de los estándares exigidos.

2.1.3.4 Costes de inversión en instrumentación y otros

Inevitablemente, la instauración de una nueva estrategia en la gestión de la red conlleva la transformación de la misma, en el caso de redes ya implantadas. En este caso, será necesaria una inversión económica importante debido a: instalación de nuevos equipos, personal de trabajo para maniobras de cierre, estudios de cálculo hidráulico de la nueva situación, etc. Una de los aspectos más relevantes es el elevado número de dispositivos de medición, regulación y cierre que se necesitan. También, la necesidad de ejecutar nuevas obras engrosará los costes de implantación.

Para llevar a cabo este control la instrumentación instalada en las vías de suministro principales de cada sector, conectada en línea con el sistema de Telecontrol permite una monitorización continua y en tiempo real de los caudales suministrados. Por otra parte, todos los abonados al servicio de abastecimiento, que suponen la práctica totalidad del consumo autorizado, disponen de contadores individuales para la medida de sus consumos.

2.1.3.5 Barreras culturales

Otro de los escollos a los que se enfrenta la sectorización son las barreras “culturales”. Muchas empresas han venido gestionando durante décadas redes no sectorizadas. La introducción de una nueva estrategia de gestión puede suponer cambios radicales sobre algunos departamentos de las empresas gestoras de la infraestructura, aceptando dichos cambios con cierta reticencia. Algunas secciones como aquellas encargadas del mantenimiento en campo de la infraestructura, o la dedicada al control telemático, deben adaptarse a las nuevas condiciones. Para que este nuevo sistema sea aceptado de forma estable, se necesita por tanto concienciar a todo el personal involucrado en la importancia y la conveniencia de la sectorización.

2.1.4 Características de los sectores y su relación con la gestión de presiones

Para poder aplicar maniobras de control de presiones en zonas sectorizadas es conveniente que las zonas a regular cumplan una serie de características para que esta operación sea más eficiente. Algunos aspectos son comunes a las cualidades que definen de forma intrínseca a los sectores en su concepción más clásica destacando cuatro: limitación de tamaño del sector, aislamiento hidráulico del mismo, número reducido de entradas y monitorización continua. Otros rasgos están intrínsecamente relacionados con la instauración de planes de gestión de presiones, siendo dos los más relevantes: poca variación altimétrica dentro del sector y patrones de consumo entre puntos de consumo homogéneos, etc. A continuación se describen con más detalle los aspectos más relevantes haciendo hincapié en su influencia en las tareas de gestión de presiones.

2.1.4.1 Dimensionamiento de sectores

El tamaño de un sector es crucial para la eficiencia del mismo. Una misma sub-zona de red puede dividirse más o menos con la correspondiente conformación de fronteras, obteniendo zonas más o menos agregadas. La Figura 2.3 muestra gráficamente un mismo tramo de un sistema de distribución de agua ante diferentes niveles de agregación, creándose un mayor o menor número de sectores.

Figura 2.3. Diferentes niveles de partición de la red para un mismo área

Un hecho destacable es que, tanto los beneficios como las desventajas descritas en el punto anterior se verán influenciados de forma trascendental por el grado de partición que se lleve a cabo en el sub-tramo de la red. A mayor grado de subdivisión de un mismo conjunto más se acentuarán, tanto los beneficios obtenidos como los perjuicios asociados a esta estrategia. Por lo tanto, a la hora de dimensionar un sector correctamente se debe encontrar un balance o solución de compromiso entre unos y otros.

Criterios de dimensionamiento para fronteras permanentes

Los criterios que han utilizado las empresas operadoras de agua para el dimensionamiento de los sectores se han basado tradicionalmente en experiencia del experto encargado, relaciones empíricas o indicadores de tamaño (como la longitud de las tuberías principales, conexiones de servicio y propiedades, entre otros). La experiencia ha demostrado que las conexiones de servicio y la longitud del tubo son los más adecuados. Mientras que las conexiones de servicio son el parámetro más generalizada (Gomes et al 2012), la longitud de la tubería es un indicador más fiable en zonas con baja densidad de conexiones (MacDonald y Yates 2005; Morrison et al., 2007). También es recomendable la longitud de las conducciones principales cuando las pérdidas por fricción son significativas. Bajo estos enfoques algunos estudios han propuesto metodologías que pueden aplicarse ampliamente. Yates (2005), por ejemplo, determina el tamaño máximo de DMA en base al tiempo de 'vida de la fuga' estableciendo parámetros para que ninguna de las componentes de este tiempo supere un determinado valor en días. Desde una perspectiva más conceptual, se han sugerido múltiples métodos de optimización. Hunaidi y Hermanos (2007) presentan un tamaño económicamente óptimo DMA basado en un modelo con tres diferentes supuestos teóricos de intervención. Además, las técnicas de 'partición de grafo' también se han utilizado para definir sectores de tamaño óptimo. Diao et al. (2013), por ejemplo, utiliza un método de este tipo para desarrollar un algoritmo para la creación

automática de límites sobre la base de una global de red. La teoría de grafos, junto con técnicas de simulación hidráulica y criterios de optimización heurística, se han utilizado para desarrollar una herramienta de ayuda a la decisión (Di Nardo y Di Natale 2011; Di Nardo et al 2013.). Otro enfoque es la utilización de algoritmos evolutivos multiobjetivo (Bureerat y Sriworamas 2013).

2.1.4.2 Aislamiento del sector

Una de las cualidades intrínsecas de los sectores es que sus fronteras deben quedar claramente definidas. Salvo configuraciones y estrategias más avanzadas, como los micro-sectores (Jiménez 2015) o sectores dinámicos (Wright et al. 2014), los límites fronterizos deben ser permanentes. En muchas ocasiones vienen preestablecidos al abarcar una zona de regulación acotada geográficamente (por ejemplo, aquellos sectores que comprenden íntegramente municipios pequeños o medianos). En el caso de tener que subdividir un gran entramado de red se instalan válvulas de cierre o puntos ciegos en aquellas conducciones que están en contacto con sectores aledaños. Con el fin de asegurar tal aislamiento, una técnica comúnmente utilizada es la prueba de presión cero (MacDonald y Yates 2005). Esto implica la reducción de la presión dentro del distrito mediante la creación de una presión diferencial entre las zonas. A través de la instalación de registradores de presión en el límite de los sectores adyacentes, se puede detectar si estos últimos se ven afectados por la diferencia de presión generada. Con ello, se puede concluir si el aislamiento se ha completado o no.

Existen casos en los que pueda interesar “romper” este aislamiento. En tal caso, se pueden instalar válvulas de cierre especialmente localizadas y preparadas para su ocasional apertura conectando temporalmente dos sectores. Vamvakeridou et al. (2010) propuso un sistema de apoyo a la decisión con un módulo de intervención de este tipo para paliar problemas de garantías de abastecimiento ante la ocurrencia de una rotura importante en alguna conducción estratégica. MacDonald y Yates (2005) utilizaron con el mismo fin válvulas ‘anti-retorno’ para que abrieran esta frontera de forma automática ante necesidades eventos de flujo especiales, como podría ocurrir cuando se requieren flujos de fuego.

2.1.4.3 Monitorización continua

La instalación de caudalímetros en los puntos de entrada y salida es esencial para llevar a cabo a cabo el control y seguimiento del comportamiento hidráulico del área regulada y para realizar los balances hidráulicos correspondientes. En el caso de gestionar la presión, también será fundamental la incorporación de sensores de presión. Estos juegan un papel diferente en función del tipo de regulación que se realice (ver Figura 2.1). El número de sensores y su ubicación difieren en función de la estrategia de regulación que se lleve a cabo. Una configuración llevada a cabo por un gran número de empresas operadoras de agua es la instalación de este tipo de dispositivos en cuatro puntos estratégicos (Vicente 2011): (1) entrada de sector (inmediatamente situado aguas arriba del elemento regulador), (2) inmediatamente aguas abajo del elemento regulador, (3) en algún punto representativo de la presión media (4) y en los puntos críticos del sector

(puntos con menor presión). Los dos primeros permiten observar el comportamiento del dispositivo de regulación y comprobar si la maniobra de regulación es precisa. Los dos últimos, son de gran relevancia para evaluar distintos objetivos perseguidos con la gestión de presiones. Medir la presión en un *punto de presión media*, permitirá extrapolar el nivel de fugas a lo largo del día a partir de datos obtenidos durante horas de caudal mínimo (UKWI 1994a, 1994b). La monitorización de puntos críticos, sirve en muchas campañas como un indicador muy relevante para valorar la calidad del nivel de servicio proporcionado a los usuarios, así como herramienta para métodos aproximados de estimación de caudales fugados.

2.1.4.4 Número de entradas

De forma clásica los sectores se han venido diseñando con una única entrada considerando que este método era el más adecuado para supervisar el agua entrante y controlar su caudal y presión. Sin embargo, se ha comprobado en muchos proyectos que puede ser más beneficioso establecer varias entradas debido por ejemplo al tamaño del sector. Esta configuración puede ayudar a gestionar las necesidades de caudal adicional en períodos de demandas extraordinarias (Levine et al. 2005). Lalonde et al. (2008) identificó la necesidad de incorporar tres puntos de entrada para poder garantizar los requisitos de demanda ante necesidades eventuales contra incendios. No obstante, sólo uno de estas entradas operaba de forma permanente, activando el resto durante los citados períodos. En el caso de querer incorporar métodos de regulación avanzados de presión en todas las entradas habrá que tener especial precaución con este aspecto.

2.1.4.5 Patrones de consumo homogéneos

Cuando se dan diferencias significativas en el patrón de consumo (tanto geográfica como temporalmente) en diferentes zonas del sector, se pueden producir pérdidas de carga discordantes en cada una de ellas, perdiendo eficiencia las maniobras de gestión de presiones.

Es recomendable que cada zona tenga un mismo perfil de consumo atendiendo a varios factores: volumen consumido, distribución temporal de este consumo (perfil de patrón de consumo) franja horaria en la que tiene lugar los picos máximos y mínimos, etc. Atendiendo a estos aspectos, las empresas operadoras suelen definir y categorizar distintos *tipos de uso*. Un ejemplo puede ser la clasificación efectuada en diversos escenarios por CYII distinguiendo entre: (1) doméstico, (2) industrial, (3) comercial, (4) institucional, (5) riego y (6) otros (CYII – comunicación personal).

Cuando se detecta una clara “zonificación” de un subsistema con diferentes tipos de consumo, estos pueden servir para determinar sectores independientes. Supongamos como ejemplo una zona residencial cercana a una potente zona industrial cuya actividad principal se desarrolla durante la noche. A pesar de que el resto de criterios de dimensionamiento y diseño podrían llevar a proyectar un único sector, sería conveniente separar ambas zonas. La Figura 2.4 muestra un ejemplo de cómo se puede gestionar la

división de un municipio en varios sectores debido a la diferenciación en los patrones de consumo de zonas adyacentes.

Figura 2.4. Ejemplo de división de un municipio según tipos de consumo

La importancia de este aspecto se acentúa cuando se instaure un plan de gestión de presiones. En el caso de existir diferencias importantes en los caudales demandados en los puntos de consumo del sector, se pueden producir pérdidas de carga discordantes en distintas ramas o sub-zonas haciendo que la regulación sea menos eficiente o incluso infructuosa.

2.1.4.6 Orografía

Una cuestión importante en la sectorización, sobre todo cuando ésta va encaminada a una posterior puesta en marcha de un plan de gestión de presiones es el rango de cotas de los nodos del sector. Conocer la cota altimétrica en todos los puntos así como la evolución de las cotas de lámina en depósitos (en aquellos casos que corresponda) es fundamental para valorar correctamente este aspecto. Generalmente, la altimetría de un sector se suele definir mediante la diferencia entre los nodos de mayor y menor cota topográfica. Levine et al. (2005) explica cómo, debido a esta circunstancia, se pudieron identificar dos o más distritos en un área de la ciudad de Pittsburgh – Estados Unidos – en la que ‘a priori’ se preveía instaurar un solo sector. La Figura 2.5 muestra un ejemplo de división de un sector debido a diferencia de cotas entra zonas.

Figura 2.5. División de sector en dos debido a diferencias significativas de cota

Puede resultar también eficiente otro tipo de indicadores como la diferencia altimétrica entre la entrada al sector y el punto más elevado (generalmente coincidente con el punto crítico del distrito). Cabe destacar que es difícil recomendar un intervalo adecuado de desnivel para optimizar la gestión de presiones. Esto dependerá de varios aspectos tales como el gradiente de elevación, la densidad de acometidas, la longitud total de las tuberías, entre otros.

2.1.4.7 Resumen de características, influencia sobre la gestión de presiones y recomendaciones

En esta sección se resumen los atributos más importantes descritos a lo largo de los epígrafes anteriores. La Tabla 2.1 muestra una clasificación original de estos atributos, con el grado de importancia dependiendo de si se refieren a un DMA o un PMA, las medidas de adaptación necesarias para pasar de un DMA de un PMA, y ciertas recomendaciones.

Tabla 2.1. Características de los sectores, influencia sobre sectorización clásica/gestión de presiones y recomendaciones

Características de los sectores	Sector clásico	GP	Medidas de adaptación (MA) y recomendaciones (R)
Aislamiento	Alta	Alta	(R) Test de ‘presión cero’ para garantizar aislamiento. (R) Localizar posibles válvulas de entrada en frontera ante necesidades especiales
Dimensionamiento	Alta	Media	(MA) Sectores más pequeños para cumplir requerimientos de gestión de presiones (R) Tamaño determinado a través de técnicas de optimización o ‘tiempo de vida de fugas’. Empleo de parámetros dimensionales con precaución
Monitorización continua	Alta	Alta	(MA) Instalación de sensores de presión en puntos relevantes. (R) Siempre que sea posible, se recomienda sensores en 4 puntos: entorno de VRP (aguas arriba y aguas abajo), punto crítico y punto de presión media.
Uniformidad altimétrica	Baja	Alta	(R) Si diferencia de altura interna es muy elevada, dividir en sectores más pequeños.
Número de entradas	1-3	1-2	(R) Si se requiere más de una entrada por necesidades de caudal, implantar técnicas de regulación fijas o modulación basada en caudal con precauciones

2.1.5 Clasificación de sectores según características hidráulicas y topológicas

De las propias definiciones y descripciones de la sectorización de los apartados anteriores ya se pueden deducir algunas de sus características principales: aislamiento, número reducido de puntos de suministro de agua, medición de caudales continua, etc. Llevando a cabo un análisis de proyectos desarrollados a lo largo del mundo, se pueden encontrar variantes muy heterogéneas en cuanto a la tipología y características de cada sector.

Si bien es cierto que algunas de estas características suelen ser comunes en la mayoría (monitorización continua, número limitado de entradas, aislamiento topológico o estanqueidad respecto a otros sectores, etc.), ninguna de ellas puede afirmarse como cualidades categóricas o universales. Cada proyecto y cada red poseen sus propias particularidades y por esta razón, surgen distintos tipos diferentes.

En esta sección se hace una clasificación de los sectores según diferentes aspectos. Esto se debe a que se considera importante esclarecer algunas particularidades asociadas a diferentes tipologías existentes. Son escasas las referencias encontradas que hagan algún tipo de categorización. La mayoría de referencias encontradas en esta línea (tanto de índole académico-científica como de aspecto más técnico o relacionado con la práctica profesional) aluden a un mismo tipo de clasificación, para lo cual hay que remontarse hasta el año 1999 (UKWIR). Posteriormente, ha seguido citándose como base para el diseño de planes de sectorización por importantes autores referentes en este campo (Fanner et al. 2007, Morrison et al. 2007, Farley 2001,). Atendiendo a la misma, los sectores se deberían clasificar en tres grandes grupos (ver Figura 2.6):

- Sectores de una entrada – Como se auto explica, se trataría de aquellos sectores con única entrada de caudal principal.
- Con varias entradas – Sectores con más de una entrada principal de agua o conexiones con la red de abastecimiento principal.
- Sectores en cascada – Estos serían aquellos sectores que tienen caudal saliente a otros sectores adyacentes localizados aguas abajo desde el punto de vista hidráulico. Se puede decir que se trataría de sectores conectados en cascada.

Figura 2.6. Tipos de sectores según clasificación histórica (UKWIR 1999)

Una clasificación más reciente, enfocada además a la gestión de presiones (GIZ 2011), cita los siguientes grupos principales:

- De una única entrada
- De múltiples entradas
- Dinámicos
- Micro y macro SGP

No obstante, la enorme evolución a la que se ha visto abocadas este tipo de infraestructuras y la heterogeneidad existente hace que quizás, con el paso de las décadas, estas clasificaciones hayan quedado algo obsoletas y exiguas. Por todo ello, y con el fin de aproximar la teoría de la sectorización a la gestión de presiones, hacen que merezca la pena replantear nuevas categorías. Así, los puntos siguientes tratan sobre diferentes tipologías de sectores atendiendo a criterios más específicos.

2.1.5.1 Atendiendo al tipo de red que lo conforma

En esta primera categoría se distingue entre: (1) sectores de red de alta (también definida como red principal, estratégica, de abastecimiento, etc. según la terminología utilizada por cada empresa operadora) y (2) sectores de red de distribución (o red secundaria). Es importante diferenciar estos grupos, algo cualitativos desde el punto de vista hidráulico, para comprender el ámbito de aplicación de la presente tesis: sectores de red de baja o distribución. La diferencia fundamental es que, los primeros suelen recoger el flujo de agua desde elementos de regulación principales situados en alta (embalses, depósitos, estaciones de bombeo) y abastecen a múltiples sectores de distribución. Inversamente, los sectores de distribución son abastecidos por los anteriores y su

regulación se ve limitada a elementos de regulación menores por un número limitado de puntos (como por ejemplo VRPs).

Sectores de red de alta

Son aquellos cuya red principal contiene en su mayoría conducciones “estratégicas” que transportan el agua desde los elementos de regulación o almacenamiento principales, situados en cabecera, hasta puntos cercanos a núcleos urbanos o poblaciones en las que se encuentran situadas la mayor parte de acometidas a usuarios.

La *red estratégica de transporte*, en principio suele estar diseñada con una estructura fundamentalmente ramificada, pero con el suficiente grado de redundancia para garantizar el suministro a todos los sectores en cualquier circunstancia. Sin embargo, para abordar un plan de sectorización a gran escala de todo el sistema, conviene también que la red estratégica de transporte quede sectorizada en cierta medida, con puntos de control en su inicio (depósito, ETAP, bombeo), y en sus puntos finales (puntos de entrega a cada sector de distribución).

En ocasiones la red de transporte puede contener en sí misma parte de red de distribución, es decir, puede dar servicio directo a un número concreto de usuarios. Pero no conviene que este número sea muy elevado.

Sectores de red de baja

Este tipo de sectores, por el contrario, son los que conectan directamente con las acometidas de los usuarios, o lo que es lo mismo, conformando la red de distribución final. En algunos casos, parte de la estructura de estos sectores puede contener también tramos correspondientes a la red transporte, pudiéndose denominar *red de transporte interna o secundaria*.

Son estos los que van a ser tratados a lo largo del presente documento. Y las diferencias principales respecto a los anteriores se pueden resumir en:

- Su estructura es mucho más “mallada” para ganar redundancia hidráulica y garantizar el suministro a todos los nodos de consumo independientemente de la existencia de roturas u otros contratiempos.
- Pueden estar regulados o no en cabecera. En cualquier caso, ésta no afecta a otras zonas.
- Las características de su interior (orografía, tipo de uso, patrón o perfil de consumos) deben ser lo más homogéneas posibles para mayor eficiencia en su gestión.

2.1.5.2 Atendiendo al número de entradas

A continuación se describen los casos más habituales: una única entrada, varias entradas permanentes o varias entradas (alguna de ellas de forma temporal).

Sectores con una única entrada

Este es el caso más sencillo y tradicional. Una entrada de flujo al sector o conexión con la red de alta permite un control óptimo del caudal circulante. Ventajas adicionales a este tipo de entrada son: reducción de costes en instrumentación (caudalímetros) y facilidad de control en el caso de que exista regulación en cabecera (por ejemplo, mediante válvulas reductoras de presión).

Figura 2.7. Esquema de sector con una única entrada

Sectores con varias entradas

Una opción cada vez más utilizada es la inclusión de varias entradas para solventar algunas situaciones problemáticas que pueden surgir fruto de la falta de conexiones con la red principal. Algunos de las soluciones aportadas son: capacidad de reacción ante un fallo, respuesta eficiente ante escenarios eventuales de flujo adicional (caudal contra incendios) o incluso mejora de la calidad del agua (Thornton et al. 2008; Sturm y Thornton 2005).

Figura 2.8. Esquema de sector con varias entradas

Sectores con entradas adicionales temporales

El último caso se da cuando se incluyen varias entradas (como en el caso anterior) pero alguna de ellas funciona sólo temporalmente como entrada secundaria ante eventualidades de demanda específicas. Es habitual que este tipo de temporalidad vaya asociada al volumen de agua solicitado en el interior del sector: a partir de un umbral determinado de caudal se pone en modo activo la válvula secundaria para dar respuesta a dicho escenario. El resto del tiempo, esta conexión permanecerá cerrada. Para dar cabida a este tipo de configuración se suele instalar válvulas de cierre que puedan abrirse o cerrarse. En el caso de existir regulación de presiones y existir VRPs secundarias, se suelen localizar algún ramal por el cual desviar el caudal en el caso de ser necesaria su activación.

Figura 2.9. Esquema de sector con entradas temporales

2.1.5.3 Atendiendo a la temporalidad de su topología

La temporalidad de los sectores, en cuanto a su topología, ha cobrado importancia en los últimos años con la aparición de nuevas estrategias de gestión de redes sectorizadas. Los grupos principales en los que se ha dividido esta sección son: sectores permanentes, sectores temporales y sectores dinámicos.

Cabe destacar en este punto, que la temporalidad a la que se refiere en este apartado no es la misma que la explicada anteriormente relacionada con los *puntos de entrada*. La temporalidad topológica hace referencia al contorno o frontera de cada sector, conformado por el cierre de válvulas que los separan de posibles sectores adyacentes.

Sector permanente

Sector permanente es aquel cuyos límites están definidos y cerrados de forma permanente. Se exceptúa lógicamente los habituales puntos de entrada o salida de caudal (éstos últimos en el caso que existan). Los sectores permanentes se pueden deber a:

- Aislamiento geográfico (ver Figura 2.10 izquierda) – Cuando alrededor suyo no existe infraestructura alguna, por lo que no existe posibilidad de que haya conexiones hidráulicas con otros sectores adyacentes. Este es el caso típico de municipios aislados de tamaño reducido (conformando íntegramente la red de distribución de dicho municipio un único sector).
- Aislamiento topológico (ver Figura 2.10 derecha) – Aquellos, que a pesar de estar colindando con otros sectores hidráulicos, se encuentran separados de estos de forma permanente desde el punto de visto hidráulico. Esto se consigue, o bien a través de la introducción de válvulas de cierre que se encuentran cerradas de forma permanente, o bien a través de la instalación de testereros o puntos ciegos (tramos finales de una conducción) en las conducciones que atraviesan la frontera entre ambos sectores.

Figura 2.10. Ejemplo de sectores aislados geográficamente (izquierda) y topológicamente (derecha)

Sector temporal

En ocasiones, puede interesar aislar una determinada zona de forma transitoria, o bien para realizar pruebas piloto y comprobar la validez del sector o bien para realizar tareas esporádicas de control de fugas.

Estos sectores temporales pueden crearse en forma de subsector. Los grandes sectores se pueden subdividir en dos o más mediante el cierre temporal de las válvulas para que cada subsector se alimente a su vez a través del medidor del sector principal para las actividades de detección de fugas. En este caso, todas las válvulas adicionales necesarias deben tenerse en cuenta en la etapa de diseño.

Sectores dinámicos

Una solución emergente es la aplicación de sectores abiertos y adaptables. Esto se aleja de una de las características históricas de este tipo de estrategias como es la creación de una frontera “permanente”, dando paso a métodos dinámicos con los que se ajustan los límites del sector en cada instante. Esto permite la desagregación de un sector principal en diferentes subsectores a determinadas horas para mejorar la eficiencia de distinguos objetivos. Con este enfoque han surgido varias propuestas como la *microsectorización* (Jiménez 2015) y los sectores con *topología dinámica* (Stoianov y Henderson 2014) y (Wright et al. 2013; 2014). Dos de los proyectos y conceptos más destacados en este sentido son:

- La microsectorización (Jiménez 2015) – Estrategia consistente en la introducción de actuadores oleo-hidráulicos autoalimentados que activan válvulas de mariposa para crear nuevas subestructuras sectorizadas durante la noche. Este método persigue un objetivo: sectorizar la red con un mayor nivel de desagregación durante la noche para efectuar una mejor estimación de agua no controlada, mientras que por el día se vuelve a agregar el sistema en sectores mayores para que el sistema gane en redundancia.

- La topología dinámica – Se trata de una novedosa y reciente alternativa propuesta por Stoianov y Henderson (2014) y Wright et al. (2013; 2014). El enfoque es parecido al anterior mediante la introducción de controladores multi-función con algoritmos de optimización programados. En este caso, el objetivo fundamental es la optimización en la gestión de presiones, por lo que las válvulas de cierre se abren o cierran buscando una regulación de presión con un perfil óptimo de salida de presión. Mediante su aplicación en sectores reales de Reino Unido se optimizó la topología de los sectores a lo largo del día para mejorar la eficiencia de la gestión de presiones.

2.1.5.4 Atendiendo a las conexiones hidráulicas con red principal u otros sectores

Se han distinguido cuatro categorías según los diferentes tipos de conexión entre sectores o entre sector y red de transporte principal (Figura 2.11): (1) sectores sin salidas de caudal aguas abajo (conectados únicamente aguas arriba a la red principal), (2) sectores con salida a otros sectores adyacentes (conexión en cascada), (3) subsectores internos (sectores cuya entrada proviene de otro sector mayor en el que está confinado completamente y (4) sectores con salida a la red principal.

Figura 2.11. Tipos de sectores atendiendo a sus conexiones con otros sectores o red principal

Sectores sin salidas de caudal aguas abajo

El caso más sencillo es el correspondiente a un sector que tan sólo conecta aguas arriba con la red de transporte de agua principal. No existen conexiones aguas abajo, estando aislado de otros sectores. Este es el escenario más habitual en la mayoría de proyectos.

Figura 2.12. Sector sin conexiones aguas abajo

Sectores con salida a otros sectores adyacentes (conexión en cascada)

Un caso también típico, aunque en menor medida que el anterior, es la conexión en cascada. Este tipo de relación entre sectores se da cuando la entrada de un sector coincide con la salida de otro adyacente situado aguas arriba del primero.

Esta alternativa puede ser una buena solución en casos en los que el sector aguas abajo se sitúe lejos de cualquier arteria principal de la red de transporte o no se puedan construir conexiones entre el sector y la citada red.

Conviene advertir que pueden localizarse válvulas reductoras de presión u otros elementos de regulación, no sólo en la entrada del primer sector, sino también en la entrada del segundo (conectado en cascada con el primero).

Figura 2.13. Sectores con conexión en cascada

Subsectores internos

Se denomina *subsector* a aquella zona interna a un sector existente sobre la que se ha actuado instalando válvulas de cierre en su perímetro para proceder a su aislamiento. Esta operación suele realizarse cuando la piezométrica de la nueva zona aislada es sensiblemente distinta al resto del sector pero su área se encuentra completamente confinada dentro de un sector mayor ya existente.

Al igual que en el caso anterior, pueden estar regulados por varios dispositivos en cadena. De esta forma, la regulación de estos últimos estaría supeditada a varios elementos de regulación en cadena: una regulación primaria en la entrada del sector principal y posteriormente una regulación secundaria en la entrada del subsector.

Figura 2.14. Subsector interno

Sectores con salida a la red principal

En ocasiones los sectores tienen salida, en vez de a otro sector adyacente o a subsectores internos, de nuevo a la red principal.

Figura 2.15. Sector con salidas a la red principal

2.2 Instrumentación y técnicas de regulación

Las maniobras de control y regulación de presión se pueden efectuar con todos aquellos elementos o dispositivos que tengan capacidad para generar un cambio en la altura o energía hidráulica de la red. Esta altura, con las maniobras adecuadas, puede ajustarse aportando o disminuyendo la presión del sistema según la expresión de Bernoulli (3):

$$\Delta H = \frac{\Delta P}{\varphi} + z + \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

Cada tipo de dispositivo está diseñado para afectar de forma diferente sobre la presión. El esquema de la Figura 2.16 resume los principales elementos de los que se puede valer para ejercer una acción reguladora y su relación con la energía del sistema.

Figura 2.16. Tipos de elementos de regulación y acción que efectúan sobre la altura hidráulica de la red

Las bombas hidráulicas por ejemplo aportan una “ganancia” energética al inyectar presión al sistema. Son múltiples las líneas de investigación que abordan el tema de la regulación de presión de una red mediante la programación de bombas hidráulicas (López-Ibáñez et al. 2008; Prasad et al. 2006; Boulos et al. 2001). Generalmente, las líneas de investigación se centran en optimizar la programación de las bombas con el objetivo de minimizar la energía consumida mientras que se reduce la presión de la red (para minimizar fugas) y considerando como restricción los requerimientos de presión mínima necesarios para satisfacer la demanda de usuarios.

Mediante el control del nivel de depósitos o tanques, también se puede efectuar una acción de regulación sobre los nodos localizados aguas abajo del mismo (Barán et al. 2005; Cembrano et al. 2000). No obstante, el número de estudios asociadas a estas líneas de investigación parece haber decrecido en los últimos años en detrimento de la opción de efectuar estas maniobras de regulación a través de elementos disipadores de energía.

El tercer tipo de regulación se asocia a métodos en los que se genera una “disipación” de la energía. Para ejercer esta acción debe existir un exceso de presión ya que la acción reguladora se fundamenta en la reducción mediante la interposición de elementos que introduzcan una pérdida de carga localizada en el fluido. Por lo tanto, esta maniobra es propia de sistemas con funcionamiento por gravedad. Históricamente, se han venido utilizando elementos disipadores de energía tales como: tanques de rotura, válvulas de cierre con funcionamiento regulador o válvulas reguladoras. De todos ellos, en la actualidad se puede destacar un instrumento como el más extendido en este grupo: **la Válvula Reductora de Presión (VRP)**.

Como se ha mencionado en la introducción de esta tesis, los equipos y técnicas que se estudiarán en la presente tesis son aquellos relacionados con las VRPs. No obstante, en esta sección se describirán también otro tipo de dispositivos que desempeñan acción disipadora de energía (destacados en línea punteada en la Figura 2.16) por su analogía con las válvulas reductoras de presión. Tradicionalmente, cuando la pérdida de carga requerida era de gran magnitud, se utilizaban elementos como tanques de rotura. Las válvulas de cierre también han sido introducidas con relativa frecuencia con funciones de regulación. Ahora bien, si hay que destacar un tipo de dispositivo como referente para ejercer esta acción estas son las válvulas reguladores, y entre ellas la Válvula Reductora de Presión (VRP). Son innumerables los estudios académico-científicos que se focalizan en este tipo de instrumentación como elemento principal de control de presión (Laucelli 2016; Creaco et al. 2013; Presscot y Ulanicki 2008; Araujo et al. 2006; Jowwit y Xu 1990). Más recientemente, motivados por la necesidad de ahorro energético, se ha detectado un auge en lo que se refiere a introducir máquinas hidráulicas que sean capaces de recuperar energía transformando paralelamente la pérdida de carga generada en forma de energía eléctrica. Así, encontramos otro gran grupo de componentes que pueden ejercer maniobras de reducción de presión turbinando el caudal fluyente y generando así una cierta cantidad de energía eléctrica: microturbinas (Fantozzi et al. 2009; Ramos et al. 2005), bombas con funcionamiento reversible (Parra and Krause 2017; Samora et al. 2016; Carraveta et al. 2013a, 2013b 2013c; Fontana et al. 2012; Giugni et al. 2009) o dispositivos diseñados específicamente para ejercer esta acción bi-funcional. El elevado número de estudios realizados en los últimos años centrados en este tipo de máquinas funcionando como elementos reguladores, pone de manifiesto el gran auge de esta línea de investigación.

En esta sección se describen las características principales de estos elementos que, mediante la acción principal de disipar energía induciendo una pérdida de carga localizada en el sistema, se utilizan para regular la presión de la red.

De entre todos los dispositivos existentes para regular la presión de una red, la presente tesis se focaliza en aquellos que ejercen una acción de **gestión de la presión** mediante una **acción “disipadora” de energía**. Entre todos ellos destacan las **Válvulas Reductoras de Presión (VRPs)** y por tanto se presta especial atención a este elemento.

2.2.1 Válvulas Reductoras de Presión (VRPs)

Existe una amplia gama de ‘válvulas reguladoras’ entendiéndose como tales al conjunto de válvulas cuya función principal es la de *regular* alguna de las principales variables hidráulicas que definen el estado de una red de abastecimiento: caudal y presión. En cuanto a regulación de caudal, algunas de las válvulas más destacadas son las válvulas limitadoras de caudal y las válvulas anti-retorno o unidireccionales. Se pueden incluir en este apartado las válvulas de cierre, dado que su función principal es la impedir el paso de flujo completamente (estado de válvula *cerrado*) o permitir su paso libremente (estado *abierto*).

En relación a las válvulas reguladoras de presión, existen distintas opciones dependiendo de la función principal para la que han sido diseñadas. Entre las más conocidas se encuentran las válvulas sostenedoras de presión y las válvulas reductoras de presión (VRP de aquí en adelante). La función principal de la primera es asegurar una presión mínima aguas arriba de la misma, mientras que la segunda está diseñada para mantener una presión de consigna predefinida inmediatamente aguas abajo del dispositivo.

Una de las características fundamentales de las VRPs y diferenciadoras con respecto a otro tipo de válvulas reguladoras es su capacidad de mantener una presión aguas abajo de la válvula constante (o modulada acorde a una consigna preestablecida). Éste es uno de los beneficios principales de las VRPs con respecto, por ejemplo, a las válvulas de cierre actuando como elemento regulador. Mientras que la caracterización del funcionamiento de las válvulas de cierre viene definido por la *pérdida de carga producida* (en función del caudal circulante y del grado de apertura), la caracterización de las VRPs la determina la propia *presión consignada aguas abajo de la válvula*. Este es un aspecto muy relevante y por el cual se explica gran parte el éxito de este tipo de equipos para regular sistemas de distribución.

De forma somera, se puede decir que la VRP basa su funcionamiento regulador meramente en la generación de una pérdida de carga localizada. Ésta es asimilable a las pérdidas de carga localizadas creadas por cualquier elemento resistente que se encuentra a lo largo del circuito hidráulico de una red de distribución. La pérdida de carga se traduce en una bajada de presión tal y como muestra esquemáticamente la Figura 2.17.

Figura 2.17. Esquema de presiones principales y pérdida de carga (ΔP) producida por la VRP

La presión aguas abajo ($P_{a.abajo}$) resultante será igual a la diferencia entre la presión aguas arriba ($P_{a.arriba}$) de la válvula y la diferencia de presión derivada de la pérdida de carga hidráulica producida en la VRP ΔP . Esta variación de presión, como se ha citado, se puede expresar según la clásica ecuación de pérdida de carga localizada. Estas relaciones se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$P_{a.abajo} = P_{a.arriba} - \Delta P \quad (4)$$

$$\Delta P \cong \Delta H = K \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

Donde K es el coeficiente de descarga, v es la velocidad del fluido y g la aceleración de la gravedad. Precisamente, la única diferencia con respecto a un elemento “estático” que genere pérdidas de carga localizadas (orificios fijos, codos, estrechamientos, etc.) es que este coeficiente varía en función del grado de apertura de la válvula. Para determinadas válvulas, sobre todo de pequeñas dimensiones, este coeficiente también puede variar en función del número de Reynolds (Re), pero esta variación no se suele tener en cuenta a no ser que se desee obtener una precisión muy alta de la pérdida de carga producida.

2.2.1.1 Beneficios del uso de VRPs respecto a otras alternativas

Las VRPs han tomado un rol muy relevante como elemento regulador en las líneas de abastecimiento de agua. Se ha detectado que este tipo de instrumentos son el más extendido a nivel global, tanto en el ámbito académico-científico como sobre todo en proyectos reales implantados a lo largo del mundo. Esta expansión se debe a varios motivos:

- Las VRPs ofrecen un gran rendimiento en cuanto a su relación ‘capacidad reguladora/coste’. Para alcanzar los mismos beneficios, otro tipo de instrumentación como los depósitos o las bombas suelen suponer alternativas mucho más costosas. La regulación mediante depósitos de almacenamiento (controlando su nivel) va asociada a unos costes iniciales muy elevados debido a su proceso constructivo. No obstante, en aquellos lugares en los que exista de ante mano este tipo de elementos pueden resultar una alternativa eficaz. Las bombas centrífugas pueden ser convenientes o incluso obligatorias en topologías en las que exista un déficit de presión. Sin embargo, fuera de estos escenarios, conllevan un coste mucho mayor en términos de instalación, mantenimiento y energético.
- En las últimas décadas se ha extendido masivamente la sectorización como estrategia de diseño y gestión de redes de abastecimiento y distribución. Por condiciones tanto de eficiencia como de implantación (coste, limitación de espacio, etc.) las VRPs se ajustan perfectamente a este rol.
- La aparición de nuevas técnicas y dispositivos complementarios a las válvulas como son los controladores electrónicos han mejorado más si cabe su eficiencia. Si bien tradicionalmente las VRPs han sido gobernadas por pilotos secundarios (válvulas secundarias anexadas al circuito hidráulico de la VRP principal) su capacidad de modulación era limitada. En cambio, los nuevos controladores electrónicos, han

introducido nuevas consignas de modulación que se adecúan perfectamente a los objetivos perseguidos con este tipo de maniobras (ver 2.2.2.2 Consignas gobernadas por controladores electrónicos).

- Dentro de la amplia gama de válvulas reguladoras existentes (limitadoras de caudal, sostenedoras de presión, etc.), las VRPs son un tipo muy utilizado por ajustarse perfectamente a los requerimientos de múltiples redes. Se adecúan especialmente a sistemas de abastecimiento con funcionamiento *por gravedad* en los cuales generalmente existe exceso de presión en la red.
- Por último, particularizando al ámbito de esta tesis, se describirá más adelante un gran plan de gestión de presiones proyectado en la red de Madrid por parte de la empresa Canal de Isabel II gestión (CYII de aquí en adelante). Éste se ha fundamentando en el uso de técnicas de regulación mediante VRPs (tanto estrategias clásicas como más avanzadas), por lo que se ha concebido como un excelente caso de estudio para validar las propuestas metodológicas desarrolladas y analizar los resultados obtenidos de su implantación.

A continuación, y dada la gran importancia de este tipo de válvulas, se describen algunos aspectos relevantes relacionados con estos dispositivos.

De aquí en adelante, a no ser que se indique explícitamente lo contrario, cada vez que se citen los términos **válvula**, **válvula reguladora** o **VRP** se estará haciendo referencia a las **Válvulas Reductororas de Presión**.

2.2.1.2 Tipos de VRPs

Existen diferentes tipos de VRPs atendiendo a su diseño y a los mecanismos internos que incorporan para ejercer su acción reguladora. Cada una de ellas tiene sus ventajas e inconvenientes y ofrecen distinta respuesta ante solicitudes diferentes. Para su selección se deben analizar factores como la variación de presión pretendida, el rango de caudales circulante, su coste económico, el grado de desgaste o probabilidad de fallo asociado a cada una de ellas, etc. Debido a la heterogeneidad existente se pueden encontrar diversas clasificaciones atendiendo a varios criterios: forma de su cuerpo principal, tipo de elemento de cierre, dispositivos de control para ajustar la presión de consigna, entre otras. Esto pone de manifiesto una falta de estandarización que en ocasiones dificulta la selección de la válvula más adecuada para cada caso.

Se han hecho clasificaciones más o menos completas en la literatura especializada en este sentido (Heimann 2012; GIZ 2011; Thornton et al. 2008; Mateos 2006a; UKWI 1994a). Una de las más exhaustivas es la desarrollada por la UKWI (1994a) en la que se clasifican las VRPs en las siguientes categorías: (1) de diafragma con acción ejercida por resorte, (2) operadas mediante pistón, (3) de diafragma operadas hidráulicamente (con cambio de dirección de flujo asimilable a las de pistón), (4) operadas por acción de peso, y (5) de diafragma operadas hidráulicamente sin cambio de dirección de flujo. Al margen de esta enumeración, lo más habitual es encontrarse clasificaciones más exigüas diferenciando entre válvulas de globo en forma de ‘Y’ (atendiendo a la forma de su cuerpo principal),

válvulas de diafragma de pistón (atendiendo a su elemento de cierre) y de acción directa y pilotadas (atendiendo a su elemento de control).

A continuación se describen a las características más relevantes de cada tipo de válvula destacando los aspectos más importantes en cuanto a su influencia en las maniobras de gestión de presiones.

Clasificación según la forma del cuerpo principal y trayectoria del fluido

Atendiendo a la forma del cuerpo principal de la válvula los más habituales son en forma de globo y en forma de ‘Y’. Esta denominación es la más habitual en la literatura técnica especializada (Heimann et al., 2009). Se pueden encontrar también otros términos para referirse a éstas válvulas como ‘de flujo lineal’ para las primeras y de ‘flujo en ángulo’ a las segundas (Mateos 2006a). Esta diferenciación, no se basa meramente en el diseño del cuerpo principal. También se tiene en cuenta la dirección de movimiento de los elementos de cierre u opérculos respecto a la línea principal del fluido (entendiendo como línea principal la directriz de la conducción principal) o la trayectoria del flujo en el interior del cuerpo de la válvula. Este último aspecto afecta directamente sobre la pérdida de carga que sucede en la válvula.

- **Válvulas de globo** – Este tipo de válvulas se caracteriza por disponer de un cuerpo principal en forma esférica o forma de globo. Son relativamente simples en cuanto a diseño y de fácil mantenimiento e instalación al incorporarse y extraerse fácilmente de la cámara de válvulas debido a que se ajustan y extraen directamente hacia arriba. Debido al diseño de los elementos internos con una baja fricción, pueden operar en condiciones diferenciales de baja presión. El elemento de cierre de estas válvulas, u opérculo, se mueve perpendicularmente a la dirección principal de entrada y salida del fluido. Según se va desplazando verticalmente el elemento de cierre deja espacio libre para el tránsito del agua. La trayectoria que se ve obligada a tomar el fluido al atravesar este espacio es prácticamente de 90° respecto a la línea principal de entrada, para a continuación volver a “girar” bruscamente buscando la dirección principal (ver Figura 2.18 – izquierda).
- **Válvulas en forma de ‘Y’** – A diferencia de las válvulas ‘de globo’ éstas se diferencian en dos aspectos fundamentalmente: la dirección del movimiento del elemento de cierre es oblicua respecto a la línea principal, generalmente entre 45° y 60°, y la desviación de la trayectoria principal del agua con respecto a la línea principal es menor que en el caso anterior (ver Figura 2.18 – derecha).

Figura 2.18. Esquema de VRP de globo (izquierda) y en forma de 'Y' (derecha) y trayectoria del fluido

La consecuencia inmediata de esta diferencia en el tipo de trayectoria del flujo, es la pérdida de carga generada cuando la válvula se encuentra en su posición de total apertura. En las válvulas de globo, al producirse una desviación más pronunciada, la pérdida de carga mínima para es mayor que en el caso de las válvulas en 'Y'.

Clasificación según el tipo de elemento de cierre: diafragma y pistón

Otro de las clasificaciones a las que se suele referir es el *tipo de elemento de cierre* que utiliza el cuerpo principal de la válvula para definir el grado de apertura de la misma. Atendiendo a este criterio se puede distinguir entre válvulas de pistón y válvulas de diafragma.

- **Válvulas de diafragma** – Las válvulas de diafragma, o de membrana, son válvulas conformadas fundamentalmente por tres partes: cuerpo, cubierta y diafragma. El ensamblaje del diafragma es la única parte móvil en la válvula principal, estando fijado entre el cuerpo y la cubierta para separar la presión de control (localizada en una cámara superior a la cámara principal) de la presión en la línea principal. Generalmente este tipo de válvulas están operadas hidráulicamente por un piloto. Este piloto incide sobre el espacio entre la cubierta y el diafragma forzando la introducción o extracción de agua dentro de éste espacio. Así la válvula principal modula su posición. Las válvulas de diafragma se puede dividir a su vez en:
 - De una única cámara (ver Figura 2.19 – a) – Son aquellas que se conforman por una única cámara, en la parte superior del diafragma, donde se ejerce la acción de control a través de la presión de esta cámara.
 - De cámara doble (ver Figura 2.19 – b) – Se caracterizan por una cámara de control adicional situada por debajo del diafragma y permite el uso de una fuente de presión externa para ayudar a la apertura total de la válvula en caso de que se ejerza una fuerza de apertura suficiente por la presión de línea principal.

- Con diafragma de sellado directo (ver Figura 2.19 – c) – Estas VRPs se particularizan porque el diafragma ejerce la función de actuador y elemento de cierre al unísono. Tiene una estructura simple y es por lo tanto fácil de mantener y utilizar. Muchos de estos tipos válvula pueden producir pérdidas de carga excepcionalmente bajas. Por lo tanto, pueden regular caudales bajos por lo que pueden considerarse como una gran alternativa en sistemas tanto para sistemas de baja presión como escenarios hidráulicos de muy baja demanda.

Figura 2.19 Esquema de válvulas de diafragma – (a) de una sola cámara; (b) de doble cámara; (c) de sellado directo

- **Válvula de pistón** – Las válvulas de paso de pistón, también conocidas como válvulas de paso anular, son también convenientes para reducir y controlar la presión de forma fiable. Están conformadas por cuerpo de la válvula y un émbolo que se desliza axialmente de forma guiada. A diferencia de las válvulas de diafragma, las cuales suelen estar gobernadas hidráulicamente por pilotos, este tipo de válvulas requieren actuadores externos (ya sea de forma manual, neumática o eléctricamente). Dentro de este grupo destacan las *válvulas de paso anular* como una de las configuraciones más fiables y robustas. Las presiones se controlan cambiando la sección transversal interna de la válvula a partir del movimiento lineal del émbolo resultante a su vez de la conversión del movimiento rotatorio del actuador externo (ver Figura 2.20).

Figura 2.20. Esquema de válvula de pistón de paso anular (GIZ 2011)

Clasificación según tipo de control: acción directa o pilotada

Las válvulas pueden ejercer la acción de regulación por el propio empuje del fluido, caso de las válvulas de acción directa, o estar gobernadas por válvulas secundarias o pilotos conectados hidráulicamente a la válvula principal. Se describen los principales aspectos del comportamiento de cada una de ellas.

- **Válvulas de acción directa** – Las válvulas de acción directa (ver Figura 2.21) son por tanto válvulas hidráulicas automáticas en las que se genera una pérdida de carga localizada en función de su grado de apertura. Su movimiento está regido por la resultante de empujes del propio fluido en contraposición con la fuerza recuperadora de un resorte. Éstas se suelen fabricar con el fin de mantener la presión constante aguas abajo. Por su relativa sencillez, tienen limitadas las funciones que pueden realizar, así como los ajustes relativos a su velocidad de actuación. El funcionamiento de válvulas de tipo ‘acción directa’ suelen ir asociadas a las válvulas de pistón.

Figura 2.21. Válvula de acción directa

- **Válvulas pilotadas** – En el caso de necesitar un mayor dinamismo en la consigna de regulación, se puede automatizar el control local de las VRPs mediante válvulas secundarias o pilotos. Mediante el uso de pilotos se consigue que un cambio en la variable a controlar desate una variación del flujo circulante por el circuito de control, de manera que el cambio inicial sea contrarrestado. Ante un aumento de presión, el opérculo de la válvula principal debe cerrarse, lo que se consigue aumentando la presión en la cámara superior de dicha válvula. A su vez, el aumento de la presión en la cámara superior se consigue reduciendo la sección de paso del propio piloto, al estar éste situado entre la cámara superior y la toma de aguas abajo de la válvula principal. Dichos principios son aplicables tanto a la propia válvula y a la conducción en la que está alojada, como al piloto y al circuito de control en el que se aloja.

Figura 2.22. Esquema de válvula reductora de presión pilotada (Heimann et al. 2012)

La clasificación expuesta puede diferir de otras encontradas en la literatura. En estos apartados se exponen las características principales de las VRP de cara a posteriores argumentos introducidos en la tesis. **Si se quiere más detalle sobre los diferentes tipos de VRP** y su comportamiento se insta al lector a **documentos más específicos** (GIZ 2011; Thornton et al. 2008; Mateos 2006; Sánchez 2006)

2.2.2 Técnicas de regulación y tipos de consigna

Con el paso del tiempo, las técnicas para regular la presión de salida de la VRP o tarado (también llamado consigna de regulación) han ido evolucionando. Tradicionalmente, estas consignas han sido gobernadas o bien por la propia acción de la válvula principal o bien por válvulas pilotadas, conectadas hidráulicamente a la principal. Los circuitos hidro-mecánicos, más o menos complejos, han permitido que la presión de salida sea “modulada” de forma más o menos sofisticada. Más recientemente ha proliferado la aparición de dispositivos electrónicos que han permitido una modulación más precisa, ajustando su curva en función de una determinada variable (generalmente tiempo y caudal). Por otro lado, el tipo de regulación también viene determinado por la ubicación del punto que define la consigna, la cual puede ser local –conectado directamente a la válvula principal – o basada en señal situada en punto remoto.

En este apartado se describen las soluciones más habituales utilizadas tradicionalmente y de forma más reciente, categorizándose en dos grandes grupos: control gobernado de forma hidráulico-mecánica y control gobernado por dispositivos electrónico.

2.2.2.1 Consignas automáticas mediante dispositivos hidro-mecánicos

El primer gran grupo en el que se clasifican las consignas son aquellas en las que no intervienen controladores electrónicos. Estas consignas pueden venir definidas por válvulas automáticas (control de presión por los propios elementos de la válvula principal) o con la ayuda de un controlador hidro-mecánico como son los pilotos hidráulicos. Todos los

esquemas hid no requieren energía externa. Para ejercer la acción reguladora, la VRP (y el piloto en aquellos casos que corresponda), se valen por sí mismos de forma automática. Para ello utilizan la propia fuerza hidrodinámica del agua o fuerza potencial elástica en el caso de incorporar resortes.

Aunque a priori los perfiles de consignas ofrecidos por este tipo de métodos son más limitados que mediante controladores electrónicos, se pueden encontrar múltiples variantes más allá de la clásica consigna de regulación fija.

Presión de salida fija

Este es el tipo de regulación por excelencia históricamente. Consiste en ofrecer, aguas abajo de la válvula, un valor de presión constante predefinido a lo largo del tiempo – ecuación (6).

$$P_{ab}(t) = cte \quad (6)$$

Para obtener la consigna deseada se actúa sobre la compresión inicial del resorte, ya sea del cuerpo principal de la válvula en las de acción directa o del piloto en las válvulas gobernadas con estos controladores. Así mismo, también será necesario regular la apertura de las válvulas de paso que permiten la circulación del agua desde aguas arriba hacia aguas abajo, pasando por la cámara superior de la válvula principal y el piloto, en las válvulas pilotadas, según convenga la velocidad de respuesta de la VRP.

Reducción proporcional

La presión se reduce proporcionalmente respecto a la presión aguas arriba de la válvula. No se requieren dispositivos adicionales, pero su composición es más compleja que las de salida constante y pueden ser más caras. La presión aguas abajo se deduce según la expresión (7).

$$P_{ab}(t) = \alpha P_{ar}(t) \rightarrow \{0 < \alpha < 1\} \quad (7)$$

Donde $P_{ar}(t)$ es la presión aguas arriba de la válvulas a lo largo del tiempo y α el factor de proporcionalidad reductor cuyo valor debe ser mayor a 0 y menor a 1. Este tipo de consigna, de mayor utilización en décadas pasadas, puede presentar un gran inconveniente en redes de abastecimiento con perfiles de consumo variables a lo largo del día y por tanto su utilización ha caído en desuso en detrimento de técnicas más avanzadas. Ejemplos de válvulas con este tipo de consignas son:

Tabla 2.2. Modelos de válvulas con regulación ‘doble-consigna en función del caudal’

Marca	Modelo	Referencia
Bermad	WWT20-PD	(Bermad 2016a)
Dorot	PR(D)	(Dorot 2016a)

El problema de este tipo de válvulas es que, si se regulan para que haya suficiente presión durante el día puede derivar en presiones excesivas nocturnas. Inversamente, si se

regular para minimizar fugas durante la noche, puede resultar una falta de presión durante el día (Mateos 2006b).

Doble consigna en función de caudal

La válvula reduce la presión de aguas arriba a dos posibles presiones aguas abajo (P_1 y P_2), las cuales cambian según la demanda del sector. Esta doble consigna se obtiene introduciendo en el circuito de control o bien dos pilotos, o bien uno sólo que permita la doble regulación mediante válvulas intermedias de tres o más vías, o elementos equivalentes. La selección o accionamiento alternativo de la consigna correspondiente (o piloto en el caso de existir dos) se efectúa de forma hidromecánica por la propia energía del agua en la conducción en función del caudal circulante según la expresión (8).

$$P_{ab}(t) = \begin{cases} P_1 & \text{si } Q \geq Q_{ref} \\ P_2 & \text{si } Q < Q_{ref} \end{cases} \quad (8)$$

Siendo Q_{ref} referencia a partir del cual se activa uno y otro valor para definir la presión de consigna; P_1 la presión consignada para caudales altos y P_2 la presión correspondiente para caudales bajos. Algunos ejemplos de válvulas o controladores que ofrecen este tipo de consignas se recogen en la Tabla 2.3:

Tabla 2.3. Modelos de válvulas con regulación ‘doble-consigna en función del caudal’

Marca	Modelo	Referencia
Cla-Val	98-06	(Cla-Val)
Dorot	PRM (FR)	(Dorot 2016b)

Modulación continua en función del caudal

A pesar de que la modulación basada en el caudal suele asociarse a consignas gobernadas mediante controladores electrónicos, también se puede conseguir este tipo de regulación de forma automática a través de circuitos hidráulicos. Se puede obtener estos perfiles modulados de forma continua a través de pilotos automáticos (activados por la propia presión de la conducción) y cuya consigna está gobernada por válvulas internas que reducen la presión aguas abajo aumenta o disminuye simultáneamente con el caudal circulante. La presión consignada se expresa según (9):

$$P_{ab}(t) = P(Q) \quad (9)$$

En este caso, al tratarse de un tipo de modulación continua, no se tiene una presión aguas abajo fija, sino que se trata de una curva que relaciona presión de tarado con caudal circulante. El ajuste que se realiza en este caso por tanto (ajustando la deformación inicial de resorte o apertura de válvulas de paso) afecta sobre la forma de la curva obtenida (ver Figura 2.23).

Figura 2.23. Ejemplo de cambio de curva modulación de presión en función del caudal variando tarado

Dos claros ejemplos de este tipo de modelos se resumen en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Modelos de válvulas con regulación ‘doble-consigna en función del caudal’

Marca	Modelo	Referencia
Bermad	7PM	(Bermad 2016b)
Dorot	Hymod	(Dorot 2016c)

2.2.2.2 Consignas gobernadas por controladores electrónicos

Durante las últimas dos décadas, han surgido nuevos dispositivos electrónicos y algoritmos de control que han permitido niveles de regulación sobre válvulas reguladoras cada vez más sofisticados. Algunos autores se han referido a ello como técnicas de regulación avanzada de presiones (Vicente et al. 2015; Fantozzi y Lambert 2010; Charalambous y Kanellopoulou 2010). Dentro de las múltiples variantes encontradas, se pueden agrupar de forma global en tres grandes grupos: (a) programación temporal, (b) modulación local basada en el caudal y (c) modulación basada en presión en punto remoto. La incorporación de estas técnicas ha supuesto un importante hito al permitir explorar y desarrollar nuevas formas de gestionar la presión de la red. Sobre todo, permite gobernar con mayor precisión escenarios en los que existe una variabilidad de la demanda relevante en el conjunto de un sector. A continuación se procede a describir las tres técnicas citadas.

Control en programación temporal

Esta técnica define la presión de consigna a través de una curva de programación que relaciona la presión con la variable *tiempo* (10).

$$P_{ab}(t) = f(t) \quad (10)$$

El controlador externo determina diferentes presiones de tarado para distintos intervalos temporales introducidos. Dependiendo del número de consignas que se introduzcan la presión de salida se adaptará con mayor o menor precisión a la demanda de usuarios. Para establecer un perfil lo más parecido al deseado, la previsión de caudal demandado debe ser lo más exacta posible, recurriendo a datos históricos, estudios estadísticos, etc. Así mismo, la variabilidad en el caudal demandado es la que determinará

la conveniencia de un mayor o menor número de intervalos. A continuación se exponen distintas soluciones que ofrece este tipo de regulación.

- Regulación durante un determinado periodo – Durante el periodo de menor caudal demandado, habitualmente por la noche, el controlador en funcionamiento la válvula, no siendo controlada la presión durante el resto del tiempo.
- Doble consigna – Se establecen dos presiones de tarado, uno para los periodos de caudal bajo y otro para caudal elevado. La alternancia entre estas dos presiones puede realizarse mediante dos pilotos conectados a la VRP a través de una válvula intermedia que seleccione uno de los dos. Esta válvula intermedia, a diferencia del caso visto anteriormente cuyo funcionamiento era mecánico se ejecuta mediante programación electrónico.
- Modulación temporal – Se introducen un número de periodos definido por el usuario pudiendo alcanzarse curvas de modulación de gran precisión. Suelen utilizarse en zonas con una variabilidad temporal elevada a lo largo del día o de la semana.

Control en función del caudal

Un sistema basado directamente en el caudal demandado puede ser más efectivo que el anterior, basado en predicciones de demanda. Para ello, se recurre a controladores externos que permiten este tipo de regulación, introduciendo las respectivas funciones caudal/presión de tarado, y a caudalímetros que registran este dato y permiten realizar esta conversión caudal-presión. Existen multitud de sistemas de programación con este tipo de control. A continuación se mencionan los más habituales:

- Doble consigna – Al igual que en el control temporal, se puede establecer dos consignas como presiones de tarado. La diferencia es que en este caso, en vez de venir definidos unos ciertos intervalos temporales, el parámetro que determina una u otra consigna es el caudal circulante; es decir, existe una presión de tarado baja para valores bajos de caudal, y a partir de un cierto gasto la presión de tarado es otra mayor.
- Modulación basada en flujo: presión/caudal – Probablemente se trata de la actuación más extendida en estos momentos a lo largo del mundo. Es la que mejor se adapta a la curva de caudales ya que precisamente su regulación se basa continuamente en este parámetro gracias a su comunicación con un caudalímetro. La presión de tarado viene definida por una función que relaciona el caudal demandado con la presión correspondiente. Una forma habitual de definir esta función es la siguiente:
 - Presión mínima constante hasta un valor determinado de caudal. El punto que lo define sería $(P_{min}; Q_0)$.
 - Presión máxima a partir de otro caudal: $(P_{max}; Q_1)$
 - Definir una relación lineal: $(P = P_{min} + Q \frac{P_{max} - P_{min}}{Q_1 - Q_0})$

Esta última es tan solo una forma de especificar dicha función, pudiendo introducirse cualquier otra. Este método ha demostrado ser el mejor tipo de control en áreas con condiciones cambiantes de demanda, tanto diaria como estacional, de pérdidas de carga, requerimientos de flujo contra incendio habituales, etc. El resultado es un control eficiente de la presión y las pérdidas. Adicionalmente, al reducir los cambios bruscos de presión en los puntos más débiles del sistema, se reducen considerablemente las roturas en las tuberías. Ejemplos de controladores con este tipo de regulación se muestran en Tabla 2.5

Tabla 2.5. Modelos de controladores electrónicos con regulación ‘en función del caudal’.

Empresa	Modelo	Referencia
Mejoras Energéticas	Pegasus+	(Mejoras Energéticas 2016)
-	Condor	-
HWS	ControlMate II	(HWS 2016)
HWS	ControlMate FM	(HWS 2016)
Technolog	Ecowat	(Technolog 2016)

Control en función de presión en punto remoto

Desde mediados de los años noventa, el uso de la modulación basada en la presión de un punto remoto ha ido proliferando. La señal de control es proporcionada por un sensor de presión que monitorea de forma continua el punto de control seleccionado. Este punto habitualmente se trata del *punto crítico* de la red, en cuyo caso el algoritmo del controlador está adaptado para que en todo momento la presión sea superior al valor de presión mínima. Otro tipo de señal puede provenir del *punto representativo de presión media*, en cuyo caso la modulación se basa en la minimización de fugas.

Esta técnica produce mejores resultados que la modulación de punto local, pero también requiere inversiones adicionales para el sensor de presión del nodo remoto y los dispositivos de comunicación. Se puede utilizar transmisión por radio o un modem GPRS/GSM con una tarjeta SIM utilizando el internet para comunicar los resultados.

A pesar de que esta forma de regulación no está tan extendido globalmente como la modulación en función del caudal, su implantación cada vez es mayor como muestra el creciente el número de planes que de GP que la utilizan (Burrows 2014; 2030 WRG 2013; Wyeth et al., 2012, GIZ 2011, i2O 2011, VAG 2009, Fantozzi et al., 2009) y de dispositivos que han emergido (ver Tabla 2.6).

Tabla 2.6. Modelos de controladores electrónicos con regulación ‘en función del caudal’.

Empresa	Modelo	Referencia	Origen señal
i2O	oNet	(i2O 2016)	Pto. crítico
Mejoras Energéticas	Pegasus-P3	(Mejoras Energéticas 2016)	Pto. P_{med}
FAST	RTCP Syst. (Aqualog Master)	(FAST 2016)	Pto. crítico
HWS	ControllerCom	(HWS 2016)	Pto. crítico
Bermad	Model BE/ Model 718-03	(Bermad 2016c)	Pto. crítico
Technolog	Regulo	(Technolog 2016)	Pto. crítico

2.2.3 Otros dispositivos para regular la presión (con acción disipadora de energía)

A pesar de que el estudio se focaliza principalmente en las VRPs, se ha encontrado otros tipos de dispositivos que sirven para regular la presión y cuya acción reguladora se basa en los mismos principios que los de la VRP: disipación de energía. Estos se pueden clasificar en dos grupos: válvulas de cierre parcialmente abiertas y máquinas turbinadoras.

Aunque ambos grupos pueden ser utilizados para reducir la presión de la red, su maniobrabilidad es más limitada y su acción de control se limita generalmente a reducir la presión un determinado valor (en función del caudal circulante, el coeficiente de pérdidas asociado al dispositivo y del grado de apertura en el caso de las válvulas de cierre).

Con carácter exploratorio, se describen los aspectos principales de la utilización de los mismos.

2.2.3.1 Válvula de cierre como elemento regulador

Existe una cierta controversia sobre la utilización de este tipo de dispositivos como elementos reguladores de la presión de una red. La mayoría de válvulas de cierre, aunque diseñadas originalmente para restringir el paso total de fluido de forma bidireccional, pueden ejercer una labor de regulación de presiones operando parcialmente abiertas. Conceptualmente, el fenómeno ocurrido es similar al que sucede en el cuerpo principal de una válvula reguladora de presión: la disminución de paso provoca una aceleración del flujo en el estrechamiento el cual, al volver a la sección normal de la conducción (ensanchamiento), genera una pérdida de energía cinética por desprendimiento y turbulencia. El valor de la pérdida de carga o variación de energía producida en dicho paso viene determinado por la expresión clásica de pérdida de carga localizada (5).

El tipo de válvula más utilizada para esta maniobra de regulación de presión son las de mariposa. En general, esta clase de válvulas es una de las más habituales en redes de distribución dado que se ajustan bien a los rangos de caudales y presiones que acontecen a este nivel, además de disponer de un rango de diámetros nominales muy amplio. Como todo tipo de válvulas, aun completamente abiertas, ofrecen una cierta resistencia definida en este caso por el coeficiente K . Para ángulos cercanos al de apertura completa la pérdida de carga continua siendo pequeña. Sin embargo, según va disminuyendo grado de apertura, es decir según se cierra la válvula, la caída de presión es muy sensible al grado de apertura, incrementándose de forma muy significativa entre los 15° y 70° (Zappe 1999).

Esto significa que, para conseguir una caída de presión determinada hay que establecer el ángulo de apertura correspondiente a través de la relación anterior. Es precisamente en este aspecto donde reside la principal diferencia entre las válvulas reguladoras de presión y las válvulas de cierre operando como tales. En las primeras los elementos de tarado, ya sea resistencia del muelle o presión de agua en cámara auxiliar superior permiten definir directamente la presión aguas abajo de las mismas. Sin embargo, en las segundas, la variable de salida que se define es la caída de presión en vez de la presión de salida.

Generalmente, se han encontrado más detractores que defensores a la hora de dar este tipo de uso a las válvulas de cierre en general y de mariposa en particular. Los propios fabricantes desaconsejan su uso para regular presión y sólo ocasionalmente para regular caudales, afirmando que se han concebido para operar completamente abiertas o cerradas y no para actuar en posiciones intermedias (Mateos 2006a). Se alude además a la necesidad de incorporar dispositivos electrónicos para llevar a cabo un control preciso. Otra gran desventaja es que en muchas ocasiones una pequeña modificación en su posición puede conllevar un cambio muy significativo en la resistencia hidráulica generada, lo cual resulta en una acción muy poco robusta. Esto incluso puede desencadenar fenómenos de inestabilidad importantes en los que se produzcan movimientos rápidos de apertura-cierre generando cambios bruscos en el caudal y la presión (Dorot 2016d). De todo lo expuesto, se deduce que la dificultad de utilizar estas válvulas para regular la presión no estriba en su capacidad de generar una determinada pérdida de carga, sino en su capacidad de controlar la magnitud de dicha pérdida para establecer conseguir la presión deseada en cada momento. Si se es capaz de modular y controlar el grado de apertura de forma estable y precisa se estará en disposición de aseverar que se comporta como un elemento de regulación a todos los efectos.

A pesar de estos detractores se han encontrado casos en los que se opta por estos mecanismos debido entre otros motivos a su bajo coste en comparación con las VRPs, ya sean automáticas o controladas mediante dispositivos electrónicos. En esta línea la empresa Aqualogy, para su proyecto de microsectorización (ver 2.1.5.3 Atendiendo a la temporalidad de su topología – Microsectorización), utilizan válvulas de mariposa para ejercer la acción reguladora, gobernadas por actuadores oleo-hidráulicos.

2.2.3.2 Máquinas hidráulicas recuperadoras de energía

El otro gran grupo de dispositivos que pueden ejercer una función de regulación de presión a través de una acción disipadora de energía son las máquinas con capacidad turbinadora. La pérdida de carga que se produce en la regulación de la presión, que se produce en las válvulas supone una disipación de la energía de presión que contiene el agua, que se traduce en desgaste de los elementos de la propia válvula, ruido y vibraciones y energía calorífica. Dicha presión podría aprovecharse para la obtención de energía eléctrica renovable, mediante la introducción de dispositivos capaces de generar energía de este tipo a la vez que regulan la presión del sistema.

Este tipo de máquinas se pueden clasificar en tres grandes grupos: turbinas o micro-turbinas, bombas en modo reversible o instrumentación diseñada específicamente para ejercer la doble acción (regulación/recuperación de energía).

Tras revisión de literatura actualizada, queda patente que esta línea de investigación tiene una gran proyección por el elevado número de publicaciones recientes (Parra y Krause 2017; Samora et al. 2016^a; Samora et al. 2016b; Fecarotta et al. 2015)

Microturbinas

La introducción de pequeñas turbinas en la red de distribución, es una opción que está cobrando especial relevancia en los últimos años. Éstas también son llamadas por la literatura especializada ‘micro-turbinas’ o ‘pico-turbinas’. No están claramente establecidos los límites para clasificar una turbina en un grupo u otro. Como referencia, en el presente documento se han tomado los rangos expuestos en Paish (2002). En este estudio se determinó un elevado coste unitario por kW producido, siendo de hasta 2.500,00€/kW. Esto hizo que por un tiempo esta opción se considerara poco rentable ‘a priori’ en términos económicos.

Más tarde, se volvió a retomar esta línea de investigación. Una de las primeros que analizó de forma exhaustiva el resultado de incorporar micro-turbinas en redes de distribución fue el llevado a cabo por Ramos et al. (2005). Alguna experiencia con pico-turbinas con un coste en inversión inicial menor sí que ha generado resultados satisfactorios, pero el volumen de electricidad producido, entre 12 y 24 Voltios, es muy reducido (Fantozzi et al. 2009).

No obstante, estas magnitudes pueden servir para autoabastecer equipos electrónicos que se encuentren en la propia estación reguladora (registradores de datos, equipos de transmisión de señal, etc.)

Bombas hidráulicas: funcionando como turbinas

El caso de las bombas hidráulicas es paradigmático. Este tipo de dispositivo, que en su concepción original son creadas para “inyectar” energía hidráulica al sistema, pueden ser utilizadas como instrumento disipador utilizándolas de forma reversible como turbinas – PATs por sus siglas en inglés, (*Pump As Turbine*).

Si bien se pueden encontrar estudios sobre el uso de bombas como turbinas desde hace décadas (Kittredge, 1961), la reciente problemática energética en la que se encuentra inmersa el planeta, ha hecho que resurjan con fuerza fuentes alternativas y renovables de producción de energía eléctrica. A diferencia de las micro-turbinas, el coste de las bombas es relativamente bajo, convirtiéndose éstas en una buena opción en términos económicos (Carravetta et al., 2013a).

A finales de la década de los 90 comienza a resurgir el interés por este tipo de sistemas y se plantea como una alternativa viable para su instalación en redes de distribución (Williams, 1996; Ramos y Borga, 1999). En los últimos cinco años con la ayuda del desarrollo informático, vuelve a repuntar este interés, y se indagan aspectos tanto conceptuales como tecnológicos. Algunos artículos ponen de manifiesto aspectos prácticos como los resultados obtenidos tras la implantación de un PAT en una red real. Podemos encontrar en este sentido distintos enfoques según el objetivo perseguido en cada caso, ya sea producción de energía (Giugni et al., 2009; Arriaga, 2010; Garcia et al., 2011), disminución de caudal fugado (Giugni et al., 2009; Fontana et al., 2012) o consideraciones de tipo económico (Carravetta et al., 2013b). Por otro lado, investigaciones de índole más conceptual tratan temas como: (1) modelación de PATs mediante simulaciones numéricas (Fecarotta et al., 2011); (2) determinación de las curvas características y el punto óptimo

de funcionamiento de una bomba en modo de turbinación (Derakhshan y Nourbakhsh, 2008; Carraveta et al., 2012); (3) estudio y comparativa de los diferentes modos de funcionamiento – hidráulica y eléctrica (Carraveta et al., 2013c).

Otros dispositivos específicos

El último grupo de instrumentos son los dispositivos creados específicamente para ejercer la doble acción o funcionalidad ‘regulación/generación de energía’. A diferencia de la anterior que está siendo muy desarrollada en el ámbito académico-investigador, este tipo de dispositivos se han puesto más de manifiesto en la práctica real con el desarrollo de nuevas tecnologías diseñadas específicamente para actuar como regulador de presión y como generador de energía eléctrica.

Carraveta (2005) propuso un dispositivo hidromecánico longitudinal que cumple esta bifuncionalidad. Se pueden encontrar productos más extendidos comercialmente para el control de presiones con capacidad de regulación avanzada y a su vez generadores de energía (ZEROPEX 2009), pero su viabilidad económica sigue estando en entredicho. Por diversos motivos ningún mecanismo ha recalado de forma generalizada entre las empresas operadoras de redes de agua, por lo que se sigue apostando por la investigación en esta línea y el desarrollo de nuevos mecanismos. Recientemente se ha adjudicado un importante proyecto ‘HYGENET’ financiado por el Programa Europeo ‘LIFE+’, que durante los próximos tres años (2013-2016) tiene por objetivo la fabricación de un dispositivo generador de electricidad, el montaje y puesta en marcha de la máquina y, finalmente, la validación del mismo en un sistema real de un municipio español – Mieres, España (PRODINTEC, 2013). Esto pone de manifiesto la importancia que, a nivel europeo, se está confiriendo a esta línea de investigación sobre aprovechamiento de la energía sobrante en redes de distribución de agua.

2.3 Relación entre presión, fugas, consumo y afección a usuarios

Todas las redes, sin excepción se ven abocadas a perder un determinado volumen de agua a través de su red. Este hecho está corroborado por los datos ofrecidos por la práctica totalidad de empresas encargadas de ofrecer este tipo de servicios. Si se trata de poner cifras sobre el volumen de fugas existentes, aunque de difícil comprobación, suele citarse como valor medio un rango de en torno al 25-30% a nivel mundial, según datos del Banco Mundial (Kingdom et al. 2006).

No obstante, el nivel de fugas que ocurre en cada red varía ampliamente entre unos casos y otros obteniendo un rango muy amplio de volumen de fugas. Esta variación se debe a múltiples factores entre los que destacan: (1) la eficiencia de la gestión de la empresa operadora encargada del suministro de agua y (2) el estado de la infraestructura. Algunos valores que se pueden tomar como referencia para referirse a redes con una gran eficiencia (tanto por ciento de pérdidas respecto a volumen total suministrado) giran en torno al 4% de pérdidas, asociadas a redes altamente consolidadas y controladas. En redes donde la infraestructura y la gestión del recurso son deficientes se puede perder hasta más del 50% del volumen de agua inyectada (generalmente pertenecientes a países en vías de desarrollo).

*Los porcentajes relativos a **pérdidas reales de agua** ofrecidos por empresas gestoras de redes de abastecimiento **españolas** varían notablemente. No obstante, el valor medio según los últimos datos del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2015) es del **15,7%** (correspondientes al año 2013).*

Si bien en España se está por debajo de la media, un valor cercano al 16% de agua “desperdiciada” supone un valor todavía preocupante, por lo que toda medida llevada a cabo para paliar este efecto negativo debe ser bien acogida.

La relevancia de la **reducción de la presión** para disminuir el caudal fugado está contrastada a nivel global en numerosos proyectos y documentos, tanto de índole científico-académica como relacionados con la práctica profesional. La relación entre ambas variables (presión y caudal fugado) ha sido validada por numerosos investigadores y profesionales (Mutikanga et al. 2013; Wu et al. 2011; Puust et al. 2010; AWWA 2009; Thornton et al. 2008; Fanner et al. 2007; Farley and Trow 2003; Lambert 2002; Farley 2001; UK Water Industry 1994a). También se ha sido citada la gestión de presiones como un factor clave para la gestión de fugas por comités especializados de asociaciones relacionadas con el abastecimiento de agua, referentes a nivel mundial.

Figura 2.24. Actividades principales para la gestión de fugas (WRP 2001)

Entre otros grupos destacan: la ‘*Water Loss Task Force*’ de la asociación International Water Association (IWA) y el grupo ‘*Water Loss Reduction Committee*’ de la American Water Works Association (AWWA). Queda patente esta relevancia en el diagrama que resume ‘*las 4 principales actividades para la gestión de fugas*’, propuesto en 2001 (WRP) y utilizado por ambas asociaciones (ver Figura 2.24). En este diagrama se encuentra precisamente la gestión de presiones como una de dichas actividades.

2.3.1 Balance hidráulico y desagregación del agua en sub-componentes

Las pérdidas reales son una parte del volumen total de agua inyectada a la red. Para comprender mejor algunos de los conceptos utilizados en este documento se deben introducir una serie de términos relacionados con las diferentes componentes que conforman el volumen total de agua suministrada o “inyectada” a una red. Una primera y exigua desagregación puede resumirse de la siguiente forma: el agua total suministrada es igual al *agua consumida por los usuarios* más el *agua pérdida* a través de fugas en orificios imperceptibles y roturas.

Sin embargo, aparte de estas pérdidas reales, existen otros componentes que preocupan a las empresas operadoras. Surge así el interés por parte de estas empresas de realizar clasificaciones más detalladas que les sirva para mejorar la gestión de las mismas. En este contexto nace el concepto de *balance hidráulico de los sistemas de abastecimiento*. Mediante éstos las empresas operadoras pueden realizar auditorías del agua suministrado a sus sistemas, tratando de cuantificar cada componente con la mayor precisión posible.

2.3.1.1 Balance económico

El tipo de desagregación que se hace de la cantidad de agua total introducida en la red puede variar entre un caso y otro según los intereses de cada empresa, y por ende los balances pueden diferir.

Tabla 2.7. Balance hidráulico económico propuesto por la IWA (Lambert 2002, Lambert 2000).

Volumen introducido en el sistema (m ³ /año)	Consumo autorizado	Consumo autorizado facturado	Consumo medido	Agua comercializada (m ³ /año)
			Consumo no medido	
		Consumo autorizado no facturado	Consumo medido	
			Consumo no medido	
	Pérdidas de agua	Pérdidas aparentes	Consumo no autorizado	Agua comercializada (m ³ /año)
			Errores de medición	
		Pérdidas reales	Fugas en la red	
			Desborde en depósitos	
			Fugas en conexiones	

No obstante, suelen imperar clasificaciones en las que se descompone el agua en términos económicos y relativos a la capacidad de medición que se tiene sobre esta. Siguiendo este enfoque, uno de los balances hidráulicos más extendidos a nivel global es el propuesto por la IWA (Lambert 2002, Lambert 2000). Éste se resume en la Tabla 2.7.

Como se puede apreciar, el volumen total suministrado (V_{Tot}) se divide en primer lugar en aquella parte destinada al consumo de forma autorizada o consumo total (C_{Tot}) y las pérdidas totales existentes (F_{Tot}). Cada uno de estos grandes bloques se desagrega a su vez en sub-grupos atendiendo a diferentes criterios. Se recogen a continuación una serie de ecuaciones que plasman estas relaciones. Todas ellas se pueden calcular en términos o bien volumétricos o bien de caudal según las expresiones (11) –(15).

$$V_{Tot} = C_{Tot} + F_{Tot} \quad (11)$$

$$C_{Tot} = C_{fac,med} + C_{fac,no-med} + C_{no-fac,med} + C_{no-fac,no-med} \quad (12)$$

Donde:

- $C_{fac,med}$: es la componente de consumo facturado medido (tipo de consumo más generalizado en usuarios finales).
- $C_{fac,no-med}$: es el consumo facturado no medido (facturado a través de convenio o estimaciones).
- $C_{no-fac,med}$: es el consumo no facturado pero medido (para determinados servicios sociales).

- $C_{no-fac,no-med}$: consumo no facturado y no medido (por ejemplo el extraído en caso de necesidad contra incendios).

Por otro lado, las pérdidas se pueden descomponer en:

$$F_{Tot} = F_{Real} + F_{Ap.} \quad (13)$$

$$F_{Real} = F_{real,red.} + F_{real,conex.} + F_{real,dep.} \quad (14)$$

$$F_{ap.} = F_{ap.,no-aut} + F_{ap.,error-med} \quad (15)$$

Donde:

- $F_{real,red}$ – *Pérdidas debidas a fugas en la red principal*. Se trata de forma mayoritaria de la componente de pérdidas reales más importante. Tienen lugar a lo largo del entramado principal de la red (hasta las conexiones domiciliarias), pudiendo deberse a varios motivos: aparición de orificios o roturas en tuberías debido a corrosión o “reventones”, desconexiones o fallos en de sellado en uniones, fugas en válvulas, etc. Usualmente, aunque no siempre, este tipo de fugas van asociadas al concepto de fugas detectables, con las características que ello conlleva: tiempo de vida más corta y tasa de caudal alta.
- $F_{real,conex}$ – *Pérdidas debidas a fugas a partir de conexiones*. Estas fugas son las que tienen lugar desde el punto de conexión con las acometidas de usuarios hasta el punto en el que se registra el volumen de agua consumida (contadores de clientes finales). A diferencia de las anteriores, el tipo de pérdidas que tienen lugar en este tramo son de bajo caudal, y por tanto, con tiempos de vida elevado e incluso duraderas indefinidamente al ser imperceptibles.
- $F_{real,dep}$ – *Pérdidas en depósitos*. Por último, se incluye esta tercera componente de las pérdidas reales. Estas pueden estar causadas por deficiencias en las válvulas de nivel que los controlan o en menor medida por la filtración que se produce en las paredes laterales del depósito. Aunque hay casos en los que puede suponer un volumen significativo, generalmente en redes consolidadas no suele suponer un porcentaje elevado con respecto a las fugas, por lo que quedan fuera del ámbito de estudio de esta tesis.
- $F_{ap,no-aut}$ – *Pérdidas aparentes debido a consumo no autorizado*. Aquellas extracciones de la red que se hacen de forma irregular y no autorizada: vandalismo, robos, etc. El porcentaje que supone estar pérdidas varía mucho en función del país, tanto por motivos culturales y necesidades sociales como por el estado de la infraestructura.
- $F_{ap,error}$ – *Pérdidas aparentes por error de medición*. Con generalidad, computan el porcentaje más elevado de las pérdidas aparentes. Esto se debe al problema coloquialmente conocido en la jerga como “subconteo”: pequeño porcentaje de agua que no se mide o se mide de forma incorrecta en escenarios de caudal bajo. Para

solucionar este problema son habituales, por parte de las empresa operadoras, dirigir campañas de sustitución-calibración-comprobación de contadores de clientes.

2.3.1.2 Balance físico: relación con la presión de la red

Cada una de las sub-componentes citadas arriba tiene una relación diferente con la presión de la red. Es de sobra conocido que las *pérdidas reales* se tratan de una componente ligada muy estrechamente a la presión del sistema (exceptuando las pérdidas debido a desbordamientos en tanques, los cuales quedan fuera del ámbito de este estudio). Por ello la reducción de presión se concibe como una de las maniobras más efectivas para la disminución de fugas. El consumo final en usuarios es un aspecto muy complejo relacionar con la presión, ya que en función del tipo de uso, existen sub-componentes de consumo directamente relacionadas con la presión, otras totalmente independientes y otras parcialmente. Por último, las pérdidas aparentes (robos, errores de medición y sub-conteros) se pueden asumir como un tipo de componente totalmente independiente de la presión por su propia naturaleza (aunque no se han encontrado estudios relevantes que confirmen esta hipótesis).

Debido a esta heterogeneidad, y dado que una de las líneas principales de esta tesis relaciona precisamente estas dos variables (presión y caudal), se ha procedido a realizar un balance hidráulico desde un punto de vista físico. Son varios los autores que han tratado este tipo de desagregación con fines o bien académico-científicos (Giustolisi y Walski 2012; Gomes et al. 2011) o bien destinado a su aplicación a la práctica profesional (Cubillo et al. 2008; UKWI 1994a).

Giustolisi y Walski (2012) realizaron una de las sub-divisiones más destacadas en cuanto a consumo de usuarios. Según ésta, la demanda de consumo se puede dividir en tres componentes:

- Demanda controlada por el volumen (***totalmente independiente de la presión***) – Se asocia a aquellos tipos de usos, aparatos, electrodomésticos, cuyo consumo está limitado por un determinado volumen de agua; es decir, cada vez que se hace uso de este tipo de dispositivos se consume el mismo volumen de agua independientemente de la presión de la red: lavadoras, lavavajillas, inodoros, tanques industriales, etc.
- Demanda no controlada, con coeficiente de descarga estándar (***totalmente dependiente de la presión***) – Este tipo de usos, los cuales pueden tener una duración predefinida o no, se corresponden con orificios de dispositivos que se abren o cierran y cuyo caudal fluyente depende de la presión de la red. La relación caudal consumido/presión depende del coeficiente de descarga del surtidor. Suelen estar asociados a usos exteriores como sistemas de riego o sistemas de protección contra incendios.
- Demanda controlada por el usuario (***parcialmente dependiente de la presión***) – Son aquellos usos cuya control viene determinado por el usuario variando el grado de apertura del grifo/surtidor, hasta alcanzar el caudal deseado. Los ejemplos más evidentes de este tipo de demanda son los relativos a grifos

domésticos o duchas. En el caso de que el servicio sea deficiente (poca presión), pueden llegar a ser totalmente dependientes de la presión.

Además de las tres componentes citadas, añaden un cuarto factor no asociado a consumos: demanda no controlada de tipo fuga. Esta componente es ***totalmente dependiente de la presión*** y su relación con la presión se determina a través de la ley de Torricelli (ver 0. Ley de Torricelli).

Gomes et al. (2011), lleva a cabo otro tipo de desagregación detallada del volumen consumido, clasificando el consumo total en: fugas ocurridas aguas abajo de contadores en usuarios (y por tanto computadas como consumo), consumo doméstico independiente de la presión, consumo doméstico dependiente de la presión, consumo no doméstico (exteriores) independiente y consumo no doméstico dependiente de la presión. A su vez los consumos de exteriores los diferencia entre consumos pequeños y consumos grandes. Este último tipo de sub-división tan sólo repercute en los valores asignados a cada caso, no a su relación con la presión.

Se han encontrado también clasificaciones y valores propuestos para cada sub-componente en otros documentos de carácter más técnico. Algunos han servido como referencia en otros estudios que lidian con esta temática. Un ejemplo son los parámetros y valores propuestas por la asociación United Kingdom Water Industry (UKWI 1994a). Otros documentos son de carácter más específico como el análisis elaborado por CYII sobre microcomponentes de demandas urbana (Cubillo et al. 2008).

Tabla 2.8. Balance hidráulico desde el punto de vista físico. Elaboración propia, basado en conceptos de otros autores: Giustolisi y Walski (2012); Gomes et al. (2011); (Cubillo et al. 2008); (UKWI 1994a).

Volumen suministrado en red de abastecimiento	Totalmente dependiente de la presión	Fugas ocurridas en la red
		Fugas aguas abajo contador
		Consumos no controlados (dependientes presión)
	Independiente de la presión	Pérdidas aparentes
		Consumos controlados por el volumen
	Parcialmente dependiente	Consumos controlados por el usuario

Tras la revisión de la literatura se ha elaborado una clasificación propia para abordar la creación de un balance hidráulico del agua suministrada a una red, fundamentado en esta relación física entre caudal y presión. Este balance se recoge en la Tabla 2.8.

2.3.2 Relación entre presión y caudal fugado

Nota sobre el tratamiento de “pérdidas reales” en esta tesis

- La componente que se tratará a lo largo de esta tesis como ‘fugas’ o ‘pérdidas’ ocurridas en la red conciernen al grupo del balance hidráulico que agrupa las **pérdidas reales**, descartando la pérdidas aparentes a no ser que se citen explícitamente.
- Dentro de este grupo y atendiendo a la Tabla 2.7 **se descartan las pérdidas debidas a desbordes en depósitos** por dos motivos: (1) no están relacionadas directamente a la presión del sistema y (2) no suponen un porcentaje significativo en redes consolidadas, con una gestión correcta y estando bien dimensionadas.
- Las **fugas ocurridas a partir de los contadores en clientes** se imputan como **consumo autorizado** al quedar registradas en los medidores y por lo tanto repercutir positivamente en el balance económico de la empresa operadora de la red.

2.3.2.1 Características y causas de las fugas

Antes de proceder al estudio de la relación hidráulica entre presión y caudal fugado, se presentan una serie de conceptos relativos a las pérdidas de agua debido a fugas con el fin de complementar el conocimiento sobre este efecto que sucede en las redes de abastecimiento y distribución.

Tiempo de vida de una fuga

Para comprender la relación entre presión y caudal fugado, primero es conveniente aclarar el concepto de ‘tiempo de vida’ de una fuga – LRT por sus siglas en inglés *Leakage Run Time*. Básicamente, este concepto cita que el tiempo de vida de una fuga está conformado por tres componentes (ver Figura 2.25):

- Tiempo de percepción (t_{F-P}) – Es el tiempo que transcurre desde que nace la fuga hasta que es detectada su existencia.
- Tiempo de localización (t_{F-L}) – Tiempo desde la detección de la misma hasta que se ubica geográficamente a lo largo de la red.
- Tiempo de reparación (t_{F-R}) – Duración desde que se localiza hasta que finalmente se repara.

Figura 2.25. Tiempo de vida de una fuga

Este concepto es tratado en múltiples artículos, guías y proyectos (Fantozzi y Lambert 2007; Yates 2005; Morrison 2004). Su importancia reside en que para reducir cada componente de este *tiempo de vida* es conveniente un tipo de acción u otra. Por ejemplo, para reducir el t_{F-P} los métodos de detección de eventos anómalos son muy eficaces, mientras que para reducir t_{F-L} la sectorización se concibe como una gran alternativa. La gestión de presiones, su afección no es tan significativa sobre el tiempo de duración de la fuga como por su influencia sobre el valor del caudal fugado. El resultado de esta acción se recoge esquemáticamente en la Figura 2.26.

Figura 2.26. Efecto de la gestión de presiones sobre el volumen de caudal fugado (esquemático)

Tipos de fugas atendiendo a su localización y detectabilidad

Las fugas pueden clasificarse atendiendo a diferentes criterios. Uno de los más relevantes a efectos de la instauración de un plan de regulación de presiones es en función del tamaño de su orificio. Este tamaño influirá directamente tanto en el caudal que fluye a través de ellas como en el tiempo de vida de las mismas. A pesar de que esta clasificación es algo subjetiva las fugas se pueden clasificar en tres tipos (GIZ 2011; Thornton et al. 2008):

- Fugas de fondo – Se trata de pequeños escapes de agua o incluso goteos, generalmente ocurridos en puntos singulares del trazado (uniones entre conducciones, válvulas y otros accesorios). Son prácticamente indetectables y por tanto tampoco se reparan. Aunque su caudal es muy pequeño, este tipo de fugas suelen perdurar indefinidamente o durante un largo periodo de tiempo hasta que se tiene lugar la renovación de la zona afectada (ver Figura 2.27 – a). Suponen

generalmente un porcentaje muy elevado del total de pérdidas ocurridas en redes consolidadas (rendimiento de red elevado).

- Fugas no visibles u ocultas – Son fugas que, aunque mayores a las fugas de fondo, debido a las condiciones del terreno, su profundidad o localización, no aparecen en la superficie. Su presencia se puede detectar mediante métodos acústicos y no acústicos, o identificarlas analizando tendencias en el comportamiento del consumo la zona de estudio (Figura 2.27 (b)).
- Fugas visibles – Suelen ser de un tamaño considerable provenientes principalmente de estallidos o roturas en grandes arterias de la red de distribución. Aparte del volumen de caudal escapado, su característica principal es que se dan las circunstancias para que aparezcan en la superficie rápidamente, con lo que son fácilmente detectables. Estas características hacen que su duración sea menor que las fugas anteriores (reduciéndose las tres componentes del *tiempo de vida*) pero su caudal mucho más elevado como muestra el esquema de la Figura 2.27 (c).

Figura 2.27. Tipos de fugas y relación con tiempo de vida

Los valores asociados al caudal de cada tipo de fuga varía de uno a otros. Un criterio de rangos es el de la expresión (16) recogido en GIZ (2011). El caudal Q_F asociado a cada grupo es el siguiente:

$$Q_F \equiv \begin{cases} \text{Roturas importantes} > 500 \text{ l/h} \\ 250 \text{ l/h} < \text{Fugas detectables} < 500 \text{ l/h} \\ \text{Fugas de fondo (no detectables)} < 250 \text{ l/h} \end{cases} \quad (16)$$

Otro tipo de categorización ampliamente extendida agrupa las fugas en dos tipos según el concepto de BABE (por sus siglas en inglés *Background And Burst Estimates*). Según esta teoría se diferencia entre fugas de fondo o no detectables (*Background leakages*) y fugas detectables (*Burts*), englobando esta última a las *roturas* y las *fugas detectables*.

Valores próximos a 250 l/h son tomados como referencia en la mayoría de estudios para diferenciar entre estos dos tipos de fugas (Schwaller y van Zyl 2014; Hamilton y Krywyj 2012).

Otra línea de representación determina el caudal de este tipo de fugas en función de la presión de la red y de otro parámetro dimensional: kilómetros de red (para conducciones principales) y número de conexiones o propiedades (para conducciones en acometidas de servicio) (Fantozzi y Lambert 2012; Gomes et al. 2011; Fanner et al. 2007; UKWI 1994c). En este caso, los valores son mucho más heterogéneos que en el caso anterior.

Tipos de fugas atendiendo a la forma del orificio

Por último, en relación a las características de las fugas es relevante distinguir la forma del orificio o fractura por el que se produce pérdida. Las más habituales son: orificio circular (Figura 2.28 – izquierda), longitudinal (Figura 2.28 – centro) y circunferencial (Figura 2.28 – derecha). Algunos autores citan otros tipos como la fractura de tipo espiral (Van Zyl y Cassa 2014).

Figura 2.28. Tipos de orificios en conducciones: circular (izquierda), longitudinal (centro) y circunferencial (derecha)

Esta apreciación de la forma del orificio es relevante a la hora de determinar la relación entre presión y caudal fugado atendiendo a pruebas de campo y modelos numéricos que muestran distinta sensibilidad entre ambas variables (Cassa et al. 2010).

2.3.2.2 Relación hidráulica entre presión y caudal fugado y expresiones analíticas

Una vez comprendidas las características y tipos principales de fugas, de una forma cualitativa, es importante entender la relación hidráulica que existe entre presión y el caudal fluyente a través de las aberturas por las que se pierde el caudal.

Ley de Torricelli

La expresión básica y ampliamente conocida que relaciona presión caudal fluyente a través de orificios es la ecuación de Torricelli (17) que indica que la velocidad del flujo a través de un orificio viene dada por:

$$v = \sqrt{2gH} \quad (17)$$

donde v = velocidad; g = aceleración debido a la gravedad; y H = altura debido a la presión en el interior de la conducción.

La ecuación de Torricelli describe la conversión de energía de presión potencial a energía cinética bajo condiciones nulas de pérdida de carga, y en realidad se puede deducir como un caso particular de la ecuación (18) de conservación de energía de Bernoulli que relaciona la energía hidráulica de un fluido según la expresión siguiente:

$$\frac{v_1^2 \rho}{2} + P_1 + z_1 g \rho = \frac{v_2^2 \rho}{2} + P_2 + z_2 g \rho + \Delta H \quad (18)$$

donde v_i = velocidad; ρ = densidad del fluido; P_i = presión hidrostática; z_i = altura; g = aceleración de la gravedad; y ΔH = pérdida de carga entre un punto y otro.

Por otro lado, la presión hidrostática se relaciona con la altura potencial H multiplicando por su peso específico γ , siendo esta última igual a la densidad del fluido ρ por la aceleración de la gravedad g – ecuación (19).

$$\gamma = \rho g \quad (19)$$

Uniando las ecuaciones (8) y (9), aplicando una serie de condiciones de contorno en los puntos 1 y 2 del orificio (inmediatamente interior y exterior al orificio) y despejando el término de velocidad, se obtiene la expresión clásica de Torricelli (17). Las condiciones de contorno introducidas son los siguientes: no existe pérdida de carga ($\Delta H = 0$), los valores de altura son iguales a ambos lados del orificio ($z_1 = z_2$), y la presión en el exterior es nula tomando como referencia la presión atmosférica ($P_2 = 0$).

En un orificio real, el área efectiva del orificio se puede considerar menor a la real debido a la contracción que experimenta el chorro de líquido aguas abajo del orificio (a cuya sección mínima alcanzada se le denomina *vena contracta*). Además se generan pérdidas de energía por fricción. Para tener en cuenta estos factores, se introduce un coeficiente de descarga C_d . Introduciendo este factor y cambiando el término de velocidad v por su relación de caudal Q y área del orificio A se obtiene la ecuación (20) que determina el caudal Q a través del orificio:

$$Q = C_d A \sqrt{2gH} \quad (20)$$

Ecuación potencial: coeficientes β y α

Las aberturas en tuberías pueden considerarse como orificios, por lo se puede aplicar la expresión (20). Sin embargo, en la práctica se ha demostrado que esta ecuación no proporciona un modelo satisfactorio para el comportamiento de las fugas en redes de distribución a presión. Como resultado, se ha adoptado una ecuación simplificada de forma potencial con la que el exponente pudiera ser variado acorde a los resultados obtenidos en cada caso.

$$Q = \beta H^\alpha \quad (21)$$

Donde β es el coeficiente de fuga y α el exponente de fuga.

El coeficiente β , aunque no representa exactamente el coeficiente de descarga C_d , algunos autores lo asimilan erróneamente tomando el factor C para representarlo. Esta expresión presenta dos problemas fundamentales:

- En primer lugar, la suposición acerca de que el coeficiente de descarga es constante no es necesariamente válida para las fugas, ya que se ha encontrado que este coeficiente es función del régimen de flujo (laminar, de transición o turbulento), o lo que es lo mismo del número de Reynolds (Lambert, 2001). Se puede comprobar este hecho en la Figura 2.29, el cual presenta la relación entre el C y el número de Reynolds (Re), para un orificio de 1 mm en una tubería de cobre de 15 mm de diámetro. Las fugas pequeñas son muy sensibles a los cambios de presión dado el cambio en C . En la zona de flujo turbulento totalmente desarrollado, el C se mantiene constante con un valor cercano a 0,75. Mientras que en la zona de transición, este varía entre 0,7 y 0,85. Para flujo laminar, el C aumenta rápidamente hasta 0,8 al aumentar el Re .

Figura 2.29. Relación entre el coeficiente de descarga de un orificio y el número Re (Lambert, 2001)

- Por otro lado, el área de fuga se ha encontrado que también varía con la presión (ver 0 Concepto de orificio de área variable).

A pesar de estas consideraciones, la expresión (21) ha sido tomada como auténtico referente de forma global por parte de la comunidad de expertos relacionados con la práctica profesional en esta empresa y también extendida a múltiples estudios de ámbito académico científico. Lambert (2002) y el comité de la IWA ‘*Water Loss Task Force*’ han sido uno de los mayores impulsores de esta expresión mediante la publicación de un gran número de estudios en los que se analiza y propone valores para el citado exponente al que de forma global han dado a conocer como ‘exponente $N1$ ’ (Lambert y Thornton 2012; Thornton 2003; Lambert 2003; Lambert 2002; Lambert 2001). Así, este parámetro ha sido incluido como estándar propuesto por la IWA en numerosas guías e informes, siendo su rango de variación entre 0.5 y 2.5.

Concepto de orificio de área variable

El concepto de FAVAD (Fixed and Variable Area Discharges – *Áreas de descarga fija y variable*), fue propuesto originalmente por May (1994). A partir de estudios experimentales llevados a cabo en un sector real, John May demostró cómo variando la presión media nocturna el volumen de fugas cambiaba, resultando en una modificación del

área media de los orificios por los que escapaba el fluido. Este aspecto hizo concluir la naturaleza elástica de las conducciones por las que se producen dichas fugas y la necesidad de modificar la expresión (20) derivada de la ley de Torricelli añadiendo un segundo término a (20). La ecuación resultante fue la (22).

$$Q = C_d A \sqrt{2gH} + S C_d A \sqrt{2gH}^{3/2} \quad (22)$$

Donde S representa un coeficiente de expansión.

Este efecto, cuya aplicabilidad fue mostrada a nivel global de sector – es decir representando el comportamiento del conjunto de fugas existentes en un determinado tramo de red – ha sido corroborado posteriormente para fugas individuales. Cassa et al. (2010), utilizando modelación mediante métodos de elementos finitos, mostraron el comportamiento elástico de este fenómeno determinando la variación del área de diferentes tipos de orificios (ver 0 Tipos de fugas atendiendo a la forma del orificio) ante el cambio de presión. Posteriormente, Van Zyl y Cassa (2014) propusieron un índice adimensional (número de fuga L_N) según la expresión siguiente:

$$L_N = \frac{SH}{A} \quad (23)$$

Igualando las expresiones que relacionan el caudal Q con la presión H (21) y (22), considerando el coeficiente adimensional de la expresión (23) y despejando el exponente $N1$ obtenemos la ecuación (24).

$$N1 = \frac{\ln(L_N + 1) - \ln(C')}{\ln(H)} + \frac{1}{2} \quad (24)$$

$$\text{Donde } C' = C / C_d \sqrt{2gH}$$

Por último, destacan los estudios derivados de estos conceptos para analizar el comportamiento visco-elástico de los orificios para diferentes materiales de conducciones y ante distintas solicitaciones de carga (Ssozi et al. 2015; Ssozi 2014).

2.3.3 Métodos de estimación de fugas basado en el concepto de Caudal Mínimo Nocturno

Como se ha citado en la introducción de esta tesis uno de las grandes líneas de esta tesis es la estimación de caudales fugados a través de métodos basados en conceptos relacionados con el Caudal Mínimo Nocturno (CMN). Estos métodos son aplicables en aquellos sistemas o sectores en los que se lleva a cabo una monitorización continua del caudal entrante.

El método, en su concepción más básica, consiste en la extrapolación de las pérdidas reales diarias a partir del cálculo de las mismas durante el periodo del día de menor

demanda. Este periodo varía según los usos y costumbres de cada área controlada, pero generalmente suele darse las horas nocturnas, hecho que da nombre al método.

Según la ecuación de Bernoulli (18), cuando se reduce el caudal circulante y por tanto su velocidad debe aumentar la presión del sistema para que se mantenga la hipótesis de conservación de energía. Esto se traduce en que durante escenario de menor caudal demandado se genere en la red una mayor presión. La Figura 2.30 muestra un ejemplo real de un sector de la red Madrid en el que se observa esta relación inversa entre caudal consumido (línea continua) y presión del sistema (línea discontinua).

Figura 2.30. Relación (basada en datos reales) entre caudal consumido, caudal fugado y presión

A su vez, al existir relación directa entre presión y caudal fugado – ecuaciones (20), (21) – se puede suponer que el nivel de fugas alcanzará un mayor porcentaje durante este periodo, aumentando el caudal fluyente o incluso activando fugas latentes que no tienen lugar ante una presión baja en la red.

El doble hecho de que, (1) durante este periodo las fugas sean mayores y (2) la demanda se reduzca a sus valores mínimos, maximizando el ratio entre ambas componentes, confiere a este periodo la idoneidad para medir con mayor precisión el nivel de fugas.

Para la extrapolación de las pérdidas ocurridas al resto del día, nuevamente se recurre a la relación entre las variables presión y caudal fugado. El contexto en el que nace el método basado en el CMN, que sea de fácil aplicación y que pueda utilizarse por la mayor parte de empresas operadoras, han hecho que se tome la expresión simplificada que relaciona ambas variables de forma potencial (25). A partir de ésta ecuación, determinando un valor fijo para el exponente $N1$, conociendo la presión y fugas durante el CMN (P_{CMN} y F_{CMN}) y disponiendo de la presión en cualquier otro instante ($P(t)$) se puede deducir el caudal fugado en cualquier instante, mediante la expresión siguiente:

$$F(t) = F_{CMN} \frac{P(t)}{P_{CMN}}^{N1} \quad (25)$$

Esta expresión ha sido ampliamente reconocida y utilizada tanto en la práctica profesional como en el ámbito académico-científico (Morrison et al. 2007; Lambert 2002). Gran parte de su existe radica en la su facilidad a la hora de aplicarse a nivel de sector. No obstante, también presenta un gran inconveniente como es la incertidumbre que se pude introducir a la hora de calcular las variables necesarias para estimar $F(t)$. Se ha detectado una heterogeneidad muy amplia en la literatura especializada en tres líneas:

- **Cálculo de fugas durante el periodo de caudal mínimo (F_{CMN})** – Retomando las expresiones (11) y (13) desarrolladas para elaborar el balance hidráulico y aplicadas al periodo de CMN, se deduce que la estimación de fugas durante este periodo requiere el conocimiento de tres componentes: caudal total entrante en sector, consumo real y fugas aparentes – ecuación (26).

$$F_{CMN} = Q_{CMN} - F_{ap,CMN} - C_{CMN} \quad (26)$$

El caudal Q circulante es una variable que como se ha descrito suele ser monitorizada de forma continua por las empresas operadoras. El consumo en usuarios C puede estar o no monitorizado en tiempo real. A través de contadores instalados en clientes, esta variable es siempre conocida. Sin embargo, la frecuencia con la que se emiten los datos difiere de unos planes a otros. En el caso de disponer de dispositivos de telemetría en tiempo real se puede reflejar con precisión esta variable. Cuando no se dispone de esta información con la frecuencia suficiente, es necesario estimar su valor en base a campañas de monitorización o expresiones empíricas. Por último, para estimar las fugas aparentes F_{ap} se suele recurrir a indicadores de porcentajes en función del caudal total entrante o a expresiones empíricas, aunque su exactitud es difícilmente demostrable.

- **Presión media del sector para los valores P_{CMN} y $P(t)$** – A la hora de extrapolar las fugas a nivel de sector, es necesario con un parámetro de presión que sea representativo del comportamiento general de la red. En este sentido, las empresas operadoras suelen colocar un sensor de presión en aquel punto que suponen una presión más cercana a la presión media del sector (P_{med}). No obstante, la determinación se puede basar en distintos criterios. Además, se suele suponer que este punto es invariante a lo largo del tiempo, afirmación que no tiene porqué ser correcta en todos los casos.
- **Relación entre presión y caudal fugado ($N1$)** – Por último, la simplificación de relacionar las variables presión y caudal fugado por orificio mediante un factor exponencial $N1$, requiere la determinación de su valor fijo. Anteriormente (ver 0 Ecuación potencial: coeficientes β y α) se ha descrito diferentes valores y rangos considerados basados en estudios llevados a cabo en redes reales. Este valor influenciará notablemente el resultado obtenido.

Tras lo expuesto se procede a desarrollar diferentes criterios, valores y técnicas que han sido utilizadas en anteriores estudios citando sus ventajas e inconvenientes más notables. Como se verá, el gran número de soluciones que han sido adoptadas, da muestra de la falta de estandarización en esta materia.

Nota sobre el término ‘Caudal Mínimo Nocturno’

La verdadera significancia, desde el punto de vista académico, de este método está asociada a la ocurrencia en la red de un ‘caudal mínimo’. Bajo el supuesto de que el consumo autorizado cae a un mínimo durante las horas nocturnas, de forma generalizada, se le añade el adjetivo ‘nocturno’ a este concepto. Además, son múltiples las fuentes en las que se recomienda un determinado tramo horario como referencia para medir este caudal – generalmente entre las 02:00am y las 04:00am (GIZ 2011; Cheung et al., 2010; UKWI 1994a). No obstante, esta afirmación no tiene porqué ser cierta, pudiendo ocurrir circular el caudal mínimo durante otros periodos. Algunos ejemplos son:

- Sectores con un tipo de actividad predominantemente industrial, con industrias con horario ininterrumpido o mayormente concentrado durante la noche.
- Zonas urbanas con alta actividad asociada al ocio nocturno: zonas costeras durante periodos estivales, zonas céntricas de ciudades con un elevado porcentaje de comercios asociados a este tipo de actividad.

A pesar de ello, y dado la relevancia global que ha adquirido este término se va a mantener en este documento y se citará mediante su acrónimo CMN.

2.3.3.1 Cálculo de fugas durante el periodo de caudal mínimo (F_{CMN})

Determinar el caudal fugado durante este periodo es una de las variables más complejas para estimar el volumen de fugas durante todo el día. En primer lugar, a la hora de llevar a cabo la estimación, hay que distinguir entre las “fugas de fondo” o “inevitables” y las visibles, derivadas de roturas.

Para el cálculo de las primeras se puede recurrir a fórmulas empíricas propuestas en la literatura. Una de las más extendidas, de aplicación no sólo durante el periodo de caudal mínimo, fue desarrollada por Adam Lambert (1999) en base a un conjunto de datos tomados de redes internacionales. La ecuación se recoge en (27):

$$F_{real,inev.} = (18L_{princ.} + 0.8N_c + 25L_{serv})P_{med} \quad (27)$$

Donde $L_{princ.}$ es la longitud de red de conducciones principales; N_c el número de conexiones; L_p longitud de tuberías a partir de acometidas y P_{med} la presión media.

Un segundo enfoque para el cálculo de fugas, también aplicable a fugas visibles como las derivadas de las roturas, es estimarlas indirectamente a través de la deducción del resto de componentes que conforman la ecuación (26): caudal total Q , consumo en

usuarios C y fugas aparentes F_{ap} . Se presentan a continuación algunos de los criterios más extendidos para evaluar cada una de estas tres componentes.

Caudal total (Q_{CMN})

De la expresión (26), la componente de la que se puede disponer con mayor facilidad es el caudal total Q_{CMN} dado que las entradas a los sectores son monitorizadas de forma continua.

Para establecer el valor de referencia utilizado en la ecuación general, se pueden tomar varias alternativas. Una de ellas es quedarse con el valor mínimo de caudal medido instantáneo. En la literatura, la recomendación más habitual es optar por tomar un rango horario fijo como periodo de referencia y calcular el caudal de referencia a partir de la media de todos los valores medidos durante dicho periodo. McKenzie (1999) propone un periodo para calcular este valor medio entre la medianoche y las 04:00 a.m. Otros autores, sugieren un periodo de dos horas, entre las 02:00 y las 04:00 como base para el cálculo (GIZ 2011; Cheung et al., 2010; UKWI 1994a). En cualquier caso, es recomendable tomar estos rangos tan sólo como sugerencias y realizar un estudio de caudales mínimos para cada caso de estudio.

Consumo en usuarios (C_{CMN})

La valoración del consumo en usuarios durante el periodo de mínimo nocturno es probablemente el parámetro para el que más enfoques se han propuesto para su estimación. De forma generalizada, se pueden englobar en cuatro aproximaciones. Ordenadas de mayor a menor grado de precisión se tiene: (1) sistemas de telelectura en tiempo real de todos los contadores en usuarios, (2) monitorización continua de un número limitado de puntos más significativos, (3) estimación basada en campañas ‘ad-hoc’ de medición de consumos y (4) utilización de fórmulas y parámetros empíricos de la literatura especializada.

- *Telelectura de contadores en tiempo real*

Cada vez es mayor la accesibilidad, tanto tecnológica como económica, a instaurar redes de captación de datos y comunicación que permiten telecontrolar grandes volúmenes de datos en tiempo real. Ejemplos muy importantes de la relevancia que está tomando este tipo de sistemas de monitorización y de su gran impacto positivo, son los llevados a cabo por empresas punteras españolas como ‘Aguas de Valencia’ (Guardiola et al. 2016; EMASESA 2016; EMASA 2016).

Disponer de estos datos facilita enormemente la tarea de estimación de pérdidas reales, al poder desagregar la componente de consumo con una fiabilidad mucho mayor que cualquier otro método de estimación planteado de forma empírica o estadística. Considerando cada nodo i de un determinado sector k se plantea la composición del consumo total como la suma de cada uno de los consumos individuales según la expresión:

$$C^k = \sum_{i=1}^n c_i \quad (28)$$

- ***Monitorización continua de consumos más significativos***

Otra opción es monitorizar una muestra de puntos con consumos y extrapolar su patrón de consumo al resto de nodos de la red. En este caso es importante que el perfil de consumo sea homogéneo (o con poca desviación) geográficamente. Los puntos con una variación muy significativa (consumos especiales) deben ser controlados de forma continua.

- ***Campaña de monitorización ‘ad-hoc’***

Se pueden realizar campañas de monitorización ‘ad-hoc’, durante un periodo de tiempo concreto, para obtener valores detallados de consumo y extrapolarlos al resto del año. Este método, indudablemente introducirá un cierto grado de incertidumbre, por lo que hay que ser cautos con este método.

Una campaña de gran relevancia de este tipo fue la ejecutada por la empresa Canal de Isabel II entre los años 2001 y 2006 (Cubillo et al. 2008). En ella se monitorizó de forma exhaustiva una gran muestra de viviendas de diferentes tipos con el fin de caracterizar en detalle el comportamiento de consumos desagregando en distintas componentes. Fruto de este análisis, se dedujeron los siguientes valores durante el periodo de caudales mínimos. Se trata de usos con un perfil típico por lo que estos mínimos se alcanzaban en todos los casos durante el periodo nocturno. En primer lugar se categorizan los consumos entre viviendas unifamiliares y plurifamiliares, para a continuación ofrecer valores distribuidos según tipos de usos (con diferente distribución para cada tipo de vivienda).

El gran peligro y desventaja de este método es que sólo puede aplicarse en zonas con poca variación temporal de consumos. Si se prevén estacionalidades significativas, el periodo de estudio debe contemplar todas ellas: estacionalidad diaria, semanal o anual. Asimismo, es conveniente cerciorarse que no haya habido una tendencia (negativa o positiva) en el perfil de consumos, que sea coherente con la situación actual.

- ***Formulación empírica***

Si no se dispone de datos fidedignos basados en lecturas reales en contadores es habitual recurrir a aproximaciones basadas en fórmulas o parámetros empíricos utilizados en la literatura especializada. La mayor o menor semejanza de dichos valores con la realidad ocurrida en el sector de análisis también será un factor que influirá en la precisión de dicha estimación.

Existen múltiples propuestas, tanto para la formulación del consumo en sub-componentes más desagregadas como para los parámetros asignados a cada una de ellas. Giustolisi et al. (2012) realizan una clasificación de componentes fundamentada en la relación de cada una de éstas con la presión: consumos basados en el tiempo (completamente dependientes de la presión), basados en volumen (independientes), basados en decisión humana (parcialmente dependientes) y fugas aguas abajo de contador de consumo (totalmente dependientes). Otro enfoque es el propuesto por Gomes et al. (2011), en el que se propone una descomposición del consumo durante el periodo de mínimos nocturnos en 4 sub-componentes, en este caso más asociado al tipo de uso: fugas

aguas abajo de contadores (y por tanto computadas como consumo en usuarios), consumo doméstico, consumo no doméstico de pequeños consumidores y consumo no doméstico de grandes consumidores.

En cuanto a los parámetros asignados a cada sub-componente, cada estudio propone sus propios valores, o toman valores de otras referencias. Una de ellas es la parametrización propuesta en el manual de la UKWI (1994b). Los parámetros utilizados se corresponden con los propuestos y se recogen en la Tabla 2.9:

Tabla 2.9. Parámetros propuestos para evaluar fugas durante mínimo nocturno (UKWI 1994b)

Parámetro	Abrev.	Valor	Unidades
Fugas aguas debajo de acometida	$F_{aq-ab,con}$	0.5	l/servicio
Población activa (noche)	Pob_{activa}	6	%
Consumo dom. independiente presión	$C_{dom,p-indep}$	8	l/hab./hora
Consumo dom. dependiente presión	$C_{dom,p-dep}$	2	l/hab./hora
Exponente de relación presión-fugas	$N1$	1	-
Exponente de relación presión-consumo	$N2$	0.5	-

Fugas aparentes ($F_{ap,CMN}$)

Las pérdidas aparentes (F_{ap}) son el último componente que debe estimarse para deducir el volumen de pérdidas reales durante el CMN (26). El balance hidráulico clásico de la IWA (Tabla 2.7) descompone estas pérdidas en dos factores: (1) robos o usos no autorizados y (2) errores de medición. Rizzo et al. (2007) hace una desagregación más detallada enumerando cuatro orígenes principales de esta componente:

- *Robos de agua o extracciones ilegales* – Extracciones a través de conexiones ilegales no controladas mediante medidores de agua o contadores. También pueden deberse a daños intencionales en el contador.
- *Errores de lectura de medición* – Mediciones incorrectas en las lecturas, intencionados o no intencionados.
- *Errores de contabilidad* – Pueden deberse a anomalías de facturación, tales como estimaciones basadas en modelos predictivos o fórmulas empíricas que no reflejan los valores reales de consumo. También se pueden incluir errores de transcripción a la hora de almacenar los datos en bases de datos.
- *Sub-registro en contadores o subconteo* – Incapacidad de un contador para medir con precisión los flujos, especialmente con caudal muy bajo. Con el tiempo este fallo tiende a aumentar acorde con el desgaste del dispositivo.

Este tipo de pérdidas son difícilmente cuantificables de forma rigurosa. Los tres primeros orígenes citados están directamente relacionados con la gestión de la empresa operadora. Las empresas operadoras suelen valerse de campañas ‘ad-hoc’ para estimar el volumen asociado cada sub-componente y tratar de reducirlas.

Para reducir las pérdidas debido a conexiones no autorizadas, Ochoa y Bourguett (2001) plantean una serie de métodos, ninguno de ellos relacionado con la gestión de

presiones, como son: listados estadísticos de consumo bajos mensuales, instalación de correladores en zonas sospechosas, inspecciones visuales, etc.

En cuanto a los errores de medición y contabilidad, el mayor porcentaje de fallos de este tipo derivan de la pérdida de exactitud y la precisión de la instrumentación utilizada, agravada con el paso de los años. Para paliar este problema, las medidas más efectivas son las siguientes: o bien analizar y estimar el error cometido por la instrumentación instalada (Ochoa y Bourguett 2001), o bien llevar a cabo campañas de renovación de instrumentación cuando se detecta que un gran porcentaje de éstos están llegando al fin de su vida útil (Sánchez Cordero 2015).

Por último, el sub-conteo, es un error intrínseco en la mayoría de contadores, el cual se agrava también con el paso del tiempo. Para paliar este efecto negativo también son efectivas las campañas de renovación de instrumentación antigua. Varios autores han estudiado en detalle este aspecto (Couvelis y Van Zyl 2015; Mutikanga et al. 2011; Criminisi et al. 2009). Criminisi et al. (2009) llevó una exhaustiva campaña experimental en la que se analizaban entre otros los siguientes aspectos: caudal a partir del cual comienza a producirse el subconteo, porcentaje de error cometido para diferentes caudales y análisis de sensibilidad de la edad de dichos contadores. Los datos más relevantes de esta relación se recogen en la Tabla 2.10:

Tabla 2.10. Resultados obtenidos en Criminisi et al. (2009) sobre errores ocurridos por subconteo

Edad del contador (años)	Caudal medio de arranque (l/h)	Error medio a 35 l/h (%)	Error medio a 120 l/h (%)
0-5	5.69	-2.6	0.78
5-10	6.69	-8.8	1.18
10-15	12.31	-8.9	2.67
15-20	11.48	-7.9	1.44
20-25	16.43	-19.5	-1.57
25-30	9.92	-27.9*	-2.59
30-35	16.48	-36.8	-6.1
35-40	18.74	-45.1	-8.47
40-45	33.40	-83.1	-17.92

* Se ha modificado el valor original de la cita (-7.9) al suponerse un error de edición

Este tipo de error, al establecer relacionado directamente con el caudal circulante, de forma indirecta puede también asociarse a la presión de la red en aquellos casos en los que las condiciones deficientes de presión influyan en el caudal demandado por los usuarios.

Xin et al. (2014), descomponen las pérdidas aparentes en una serie de componentes, proponiendo complejas expresiones analíticas para su determinación. A pesar del rigor de su investigación con una comprobación experimental, su aplicación práctica a redes reales resulta de gran dificultad.

Precisamente por este motivo, dificultad que entraña estimar las pérdidas aparentes en su conjunto F_{ap} , un gran conjunto de estudios que aluden a este aspecto utilicen criterios simplificados como determinar un porcentaje el número de pérdidas de cada tipo o el

porcentaje de volumen con respecto a la caudal total circulante (Tabesh 2009; AWWA 2009).

2.3.3.2 Cálculo de la presión media de la red (P_{med})

La *presión media zonal* (P_{med}), generalmente asociada a un sector, es un indicador que puede ser utilizado en el seguimiento de múltiples aspectos de redes de distribución: estimación de fugas, gestión de presiones, predicción de roturas, etc. (ILMSS 2013). Como muestra la ecuación (25), su aplicación en el método de CMN es obligatoria, teniendo que deducirse P_{med} no sólo durante el periodo de mínima demanda, sino durante el resto de horas del día.

Para sentar las bases de este apartado, en primer lugar, se describen algunos conceptos fundamentales relacionados con el cálculo de la *presión media* de la red.

- *Presión media horaria del sistema* – Traducido del término inglés *CASP* (*Current Average System Pressure*), es análogo concepto propuesto como indicador de rendimiento por Alegre et al. (2006): Presión Media del Sistema. En nuestro caso particular, se toma este término como la aplicación de la presión media P_{med} aplicada a un sector j durante el instante u hora h .
- *Presión media zonal mínima* – Concepto análogo al tratado en Renaud et al. (2012) AZNP (*Average Zone Night Pressure*). Conceptualmente tiene el mismo significado que el AZNP referido. Se ha optado por erradicar de su denominación el término “nocturno” en analogía a lo tratado a lo largo de este capítulo.
- *Punto de Presión Media: i_{Pmed}* – Nodo del sector cuya presión a lo largo del día es más representativa del comportamiento global del sector. Se trata por tanto de un nodo cuya diferencia respecto a la presión media a lo largo del día es mínima.
- *Factor de ponderación: c_i* – Para definir el punto que represente la presión media del sistema, puede asignarse a cada nodo un *peso* o *factor de ponderación* por el cual se multiplique la elevación de los nodos. El factor elegido, en ocasiones dependerá de la información disponible. Algunos de los más relevantes son recogidos en la Tabla 2.11:

Tabla 2.11. Factores de ponderación propuestos para el cálculo de P_{med} (Renaud et al. 2015)

Variable	Expresión	Método utilizado
Elevación	$w_i = 1$	M.D.; M.H; M.A
Consumo medio	$w_i = \sum_{h=1}^{24} q_{h,i}$	M.H.
Longitud tuberías	$w_i = \frac{1}{2} \sum l_i$	M.D.; M.H; M.A

No obstante, la determinación de esta P_{med} , en ocasiones, puede resultar confusa o poco precisa en función de los datos disponibles de la red. No se ha encontrado un gran número de documentos que traten este aspecto. Uno de los más completos es el análisis propuesto por Renaud et al. (2015). En dicho estudio, se evalúan diversos métodos para la

determinación de P_{med} de un sub-tramo de red. Así, se mencionan tres técnicas: método hidráulico, método topográfico y método basado en medición directa.

Método hidráulico

Posiblemente, se trata de la técnica más precisa para determinar P_{med} dado que tiene en cuenta la presión en cada nodo de la red para calcular la presión media. Su mayor inconveniente es que, para su utilización, es obligatorio disponer de modelos de detalle de los sectores que se quieren calcular.

Mediante el modelo numérico se simula el comportamiento hidráulico de la red, determinando la presión en cada nodo ' i ' y para cada instante de tiempo ' t '. Por lo tanto, se trata de un método que considera la variación de presión a lo largo del día, así como la demanda en cada nodo y la pérdida de carga. Los pasos para el cálculo de la presión media son los siguientes:

- Cálculo de la presión $P_i(t)$ en cada nodo i e instante t mediante la resolución del modelo numérico en régimen cuasi-estático.
- Adjudicar un peso a cada nodo (c_i), de entre los propuestos en la Tabla 2.11: cota del nodo, demanda de agua o longitud de tuberías.
- Cálculo de la presión media ponderada para cada hora del día, según la expresión (29):

$$P_{med}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n P_i(t) \times w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (29)$$

- En este punto se puede, o bien tomar esta expresión como referente para calcular la presión del sistema en cada instante, o bien agregar como un valor diario único a lo largo del día (Renaud 2012), según la ecuación (30):

$$P_{med}^{dia} = \frac{\sum_{t=1}^{24} P_{med}(t)}{24} \quad (30)$$

Una de las ventajas de este método, en detrimento de los explicados a continuación, es su precisión al calcularse de forma dinámica para cada instante de tiempo. Si bien es habitual que las empresas operadoras dispongan de modelos hidráulicos de detalle que les permita ejecutar esta técnica, estos modelos suelen utilizarse durante la fase de diseño de la red. Su aplicación en tiempo real, necesario para la estimación de fugas, depende de los sistemas SCADA utilizados en cada empresa. Si no se dispone de una red de telemetría adecuada con lectura de consumos en tiempo real, este método pierde precisión en los resultados ofrecidos.

Método topográfico

Este método se basa en la topología de la red, y más específicamente la orografía o altitud de la infraestructura. La principal diferencia con respecto al anterior es que se

desprecian las pérdidas de carga generadas en la red debido a la variación de caudal circulante. Así, la variable realmente tratada es la *presión estática* del sector. Consecuentemente, este método resulta muy indicado cuando se tiene constancia de un nivel de pérdida de carga despreciable o poco significativo. Este caso se puede dar en bajo los siguientes supuestos: escenarios hidráulicos con bajas velocidades medias a lo largo del día (red con poco caudal medio inyectado), redes con poca diferencia topográfica o redes con diámetros de diseño sobredimensionados (García et al. 2006).

Por otro lado, es prácticamente generalizado que las empresas operadoras de este tipo de infraestructuras dispongan de planos cartográficos de sus redes o información archivada en sistemas tipo SIG (Sistemas de Información Geográfica) en los que se recoge la distribución geográfica de cada elemento de su red. Por lo que este método, es fácilmente aplicable con esta información. Los pasos a acometer con este método son los siguientes:

- Calcular el punto de altura topográfica o elevación media ponderada (z_{med}). Al igual que en el caso anterior, se puede establecer criterios de ponderación (31):

$$z_{med} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \times w_i}{w_i} \quad (31)$$

Donde z_i es la elevación orográfica o altitud de cada uno de los nodos que representan puntos de suministro de caudal a usuarios.

- Una vez establecida la altura topográfica ponderada, punto que representará la presión media del sector, se calcula la presión media en cada instante como la diferencia entre la presión en cabecera – aguas abajo del elemento regulador (P_{ab}) – y la diferencia de cotas entre la cabecera (z_{ab}) y z_{med} (32).

$$P_{med}(t) = P_{ab}(t) - \Delta(z_{cabecera} - z_{med}) \quad (32)$$

En nuestro caso el dispositivo regulador situado en cabecera se trata de la válvula reguladora de presión por lo que la presión en cabecera, siguiente la terminología de esta tesis se puede establecer como P_{ab} . No obstante, este método puede utilizarse igualmente en el caso de que no exista VRP o haya cualquier otro elemento regulador: bombas, depósitos o tanques de almacenamiento, etc. En tal caso, se mantendrá el término $P_{cabecera}$ para definir esta expresión.

Método de medición directa

Este método, a diferencia de los dos anteriores en los que se analizan todos los puntos que conforman el sector, se basa en la evaluación de la presión en un único punto de la red (o un número reducido de ellos). Esta técnica ofrece varias ventajas. En primer lugar los modelos hidráulicos, si no están convenientemente calibrados, pueden desviarse del comportamiento real de la red. En segundo lugar, si bien suele ser más sencillo obtener algunas de las condiciones de contorno que requiere el modelo como la P_{ab} , es difícil conocer en tiempo real otras condiciones como la demanda en todos los usuarios C_{tot} .

El punto clave para aplicar este método con garantías es la correcta elección del punto representativo del comportamiento global de la zona de estudio en cuanto a presión se refiere ($i_{P_{med}}$). Para ello se puede valer de la experiencia del encargado de la explotación del sector o de buscando analíticamente el nodo que más se aproxima a la P_{med} calculada a partir de uno de los dos métodos anteriores: método hidráulico (29), si se dispone de modelos numéricos, o método topográfico (32). Una vez definido, basta con instalar un dispositivo de monitorización y tomar los datos medidos.

2.3.3.3 Exponente entre presión y caudal fugado $N1$

En un apartado anterior ya se desarrollaron diferentes enfoques (desde una perspectiva analítica) para deducir la relación entre caudal fugado y presión. El método del CMN utiliza una expresión simplificada para relacionar ambas variables.

El experto reconocido mundialmente Allan Lambert, y la International Water Association, han sido los mayores impulsores de este exponente y de los que más estudios han realizado sobre el mismo para definir su valor.

Después de recopilar datos de empresas operadoras a nivel global (Reino Unido, EEUU, Japón, Brasil, etc.) se determinó que el rango para este exponente podría variar entre 0.5 y 2.5. Basándose en más de 100 pruebas de campo, Thornton y Lambert (2005) acotaron el exponente $N1$ en un rango menor entre 0.5 y 1.5, alcanzando valores próximos a 2.5 tan sólo ocasionalmente. Más tarde, Fantozzi y Lambert (2010) sugirieron valores de 0.5 y 1.5 fijos dependiendo de si los tubos son rígidos o flexibles, respectivamente. La Figura 2.31 muestra la significativa variación de valores para el cálculo de fugas a través de la expresión (25) al variar el valor del exponente $N1$ entre el rango de valores utilizado habitualmente.

Figura 2.31. Relación entre ratios de pérdidas y presión para distintos coeficientes $N1$ (Lambert, 2001)

2.4 Modelación numérica aplicada a GP y cálculo de fugas

Los modelos hidráulicos que simulan el comportamiento de los sistemas de distribución de agua a presión se han convertido en herramientas estándar en la ingeniería de servicios de agua. Su utilización hoy en día es un estándar por parte de las empresas operadoras de agua, aplicándolo a diferentes fases del proyecto de redes como: diseño, calibración, rehabilitación y operación. El diseño de planes de gestión de presiones no es ajeno a este hecho. Asimismo, cada vez son más y más precisos los modelos utilizados para representar el volumen de caudal fugado a través de la red (ya sea en a través de roturas o en forma de fugas de fondo).

En este apartado se describe la formulación y técnicas más extendidas – desde los enfoques más clásicos hasta las últimas aproximaciones desarrolladas – para representar los dos principales aspectos tratados en esta tesis: técnicas de regulación de presión y caudal fugado.

2.4.1 Tipos de modelos de análisis

Uno de los factores fundamentales que definen el tipo de modelo hidráulico que se trata es la presencia o no de la variable temporal en su formulación. Atendiendo a su relación con esta variable, los modelos de análisis se pueden clasificar en tres grandes grupos: (a) modelos estáticos, (b) modelos cuasi-estáticos, de periodo extendido (o dinámicos no inerciales) y (c) modelos dinámicos inerciales.

- **Modelos de análisis estático** – Representan el estado de una red a presión en un instante dado, sin considerar la variación temporal de las condiciones de contorno. El análisis determina los valores de las variables hidráulicas del sistema (presión en nodos, caudales y velocidades en líneas, altura en depósitos, etc.) ante un determinado escenario hidráulico permanente fijo (consumo en nodos, niveles en embalses, etc.).
- **Modelos cuasi-estático o de periodo extendido** – Este tipo de modelos sí que considera la variación de las variables a lo largo del tiempo, pudiéndose representar por ejemplo escenarios hidráulicos típicos como la variación diaria de consumo en usuarios. Se supone un cambio gradual y suficientemente lento en las condiciones de contorno, como para despreciar la inercia del fluido y sus efectos. Su resolución se basa en la misma formulación que en los modelos estáticos, asignando diferentes condiciones de contorno en cada paso temporal. Por este motivo, muchos autores no los consideran modelos dinámicos propiamente dichos, sino una superposición de estados estáticos (Fuertes et al. 2002).
- **Modelos de análisis dinámico inerciales** – En estos modelos sí que se considera la inercia del fluido y los cambios en las condiciones de contorno afectan

sobre la energía puesta en juego en el sistema. Son adecuados para representar procesos que involucren cambios rápidos de velocidad, como aperturas o cierres de válvulas rápidos, aparición de roturas repentinas o arranques/paradas de estaciones de bombeo. A su vez, este tipo de modelos se puede sub-dividir en *modelos rígidos* o *modelos elásticos* en función de si tienen en cuenta o no la deformabilidad del fluido y la elasticidad de la conducción.

El tipo de modelo a elegir para representar cada proceso depende entre otros factores de la escala temporal necesaria para simular con precisión los efectos de dicho proceso. Si bien el grado de sofisticación de cada grupo es diferente, generalmente siendo más precisos cuanto menor sea la escala temporal, también aumenta la complejidad a la hora de conformarlo. La Figura 2.32 muestra un esquema de la relación entre la complejidad de los modelos y la escala temporal adecuada para cada uno.

Figura 2.32. Esquema de tipos de modelos de análisis hidráulico (*basado en Fuertes et al. 2002*)

Para simular el comportamiento de un sub-tramo de red amplio, por ejemplo correspondiente a un sector, los modelos cuasi-estáticos son los más adecuados. A la hora de analizar un sector con regulación de presión (sobre todo con consignas moduladas) es fundamental evaluar el comportamiento hidráulico a lo largo del tiempo. Los modelos inerciales son más adecuados para simular procesos de más de detalle.

2.4.2 Formulación y algoritmos

2.4.2.1 Modelos basados en la demanda y basados en la presión

Modelos ‘orientados a la demanda’

Entre la amplia gama de software existente en el mercado – EPANET (Rossman 2000), WaterCAD, Infowork, SynerGEE, etc. Si bien existen algunas diferencias entre ellos, la mayoría de ellos utilizan la misma o muy similar formulación y el mismo algoritmo para la resolución del sistema de ecuaciones: algoritmo del gradiente (Todini y Pilati 1987; Salgado et al. 1988). Este esquema numérico de análisis se engloba dentro de

lo que se llaman ‘*modelos orientados a la demanda*’ (en inglés *DDA*, como acrónimo de ‘*Demand-Driven Analysis*’).

Este tipo de análisis asume que las demandas son funciones conocidas en el tiempo y son independientes de la presión en el sistema. El objetivo global de un modelo hidráulico es reproducir presiones en los nodos y flujos en las conducciones de enlace, satisfaciendo los valores de demanda fija en los nodos del sistema. Bajo condiciones normales la mayoría de los modelos de simulación basados en DDA presentan normalmente soluciones razonables. La formulación del problema mediante el método del gradiente supone resolver el sistema de ecuaciones recogido en la expresión (33), basado en las ecuaciones de conservación de energía y balance de masas.

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_{10}H_0 \\ q \end{bmatrix} \quad (33)$$

Donde A_{11} representa la matriz de resistencias en las líneas del modelo, A_{12} es la matriz de incidencias de nodos y líneas de altura desconocida, A_{21} su traspuesta, Q el vector de caudales desconocidos en líneas, H el vector de alturas piezométricas en los nudos, A_{10} la matriz de incidencias de nodos con altura piezométrica conocida, H_0 dichas alturas y q los caudales conocidos en nodos (consumos). Resulta así un sistema de ecuaciones recogido en (34):

$$\begin{aligned} S_1: A_{11}[Q] + A_{12}[H] + A_{10}[H_0] &= [0] \\ S_2: A_{21}[Q] - [q] &= [0] \end{aligned} \quad (34)$$

Si se desea más detalle sobre cada estas componentes se remite al lector a las siguientes referencias: (Rossman 2002 – apéndice D.1 ‘Analysis algorithms’), (Fuentes et al. 2002 – Capítulo 2 ‘Modelos de análisis’), (Todini y Pilati 1988).

Modelos ‘orientados a la presión’

Si bien los modelos anteriores han gozado tradicionalmente de gran éxito por su buena respuesta ante la simulación de escenarios hidráulicos bajo condiciones “normales”, éstos presentan limitaciones en otros casos. El motivo fundamental es la independencia entre caudal en nodos y altura piezométrica – ver (34) –, ofreciendo resultados poco realistas a la hora de simular escenarios hidráulicos en los que la demanda depende significativamente de la presión de la red. Los caudales de demanda no son sólo funciones del tiempo sino de la presión, ya que las salidas de los nudos se producen a través de orificios (por ejemplo, grifos abiertos o válvulas de riego). Puede darse el caso que incluso se complete el caudal demandado aun existiendo presiones negativas.

Con esta motivación, en la última década se ha experimentado un auge de otro tipo de modelos de análisis: modelos ‘orientados a la presión’. La formulación se basa en la planteada en la expresión anterior (33) con una ligera variación: el elemento nulo de la primera matriz A_{22} deja de ser nulo, según la expresión (35):

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_{10}H_0 \\ q \end{bmatrix} \quad (35)$$

A diferencia del sistema de ecuaciones (34) aquí se contempla una componente en el balance de masas que relaciona el caudal q en los nodos con su altura piezométrica H . Bajo esta premisa han surgido múltiples enfoques metodológicos basados en este tipo de esquemas numéricos (Liserra et al. 2014, Liu et al. 2011, Pathirana 2010, Giustolisi 2008, Cheung et al. 2005).

2.4.3 Modelos de comportamiento de VRPs y su acción reguladora en sectores

La simulación de la acción de una VRP puede estar enfocada a simular dos procesos:

- El comportamiento de la propia VRP, de forma local.
- El comportamiento de un sector o sub-tramo de red regulado en cabecera por válvulas de este tipo.

2.4.3.1 Simulación del comportamiento de VRPs

Los modelos enfocados en de VRPs los clasificamos en dos tipos según el tipo de acción por el que es gobernada la válvula principal: válvulas accionadas de forma hidromecánica o válvulas accionadas por dispositivos electrónicos.

Acción hidro-mecánica

Su comportamiento (apertura/cierre) se simula modelando mediante expresiones analíticas los procesos físicos que intervienen en el cuerpo principal de la VRP y las válvulas piloto en caso de existir en su circuito hidráulico. Requiere la comprensión detallada de los componentes internos de cada válvula (resorte, cámara de agua superior, válvulas piloto, rozamiento, etc.). El desplazamiento del opérculo de la VRP, el cual define su grado de apertura, viene determinado por solución de las expresiones analíticas fruto de la acción resistente de los elementos de acción en contraposición a la fuerza de presión ejercida por el fluido.

Los primeros modelos de este tipo han simulado redes de distribución, con válvulas de acción directa o automáticas en régimen permanente, ofreciendo generalmente un carácter más conceptual que real (Jeppson y Davies, 1976; Chandrasekar, 1980; Collins, 1981; Berghout y Kuczera, 1997). Presscott y Ulanicki (2003) han simulado, esta vez en régimen variable, una VRP con modelos matemáticos, basados en los fenómenos físicos que se producen en los diferentes elementos de dicha válvula. En el caso de los reguladores de presión de acción directa, no se ha encontrado contraste experimental de los modelos analíticos de los mismos, si bien éstos han sido estudiados empíricamente (Bernuth y Baird, 1990).

Una de las aproximaciones más detalladas es la desarrollada por Sánchez (2006). Este estudio se aplicó sobre válvulas reductoras para sistemas de riego, denominadas aquí *llaves hidráulicas automáticas*, aunque conceptualmente los procesos intervinientes son similares a los ocurridos en VRPs utilizadas en redes urbanas. El comportamiento de estas válvulas

fue analizado mediante la simulación de los principios físicos involucrados en el interior de las mismas. Más adelante, Sánchez et al. (2015, 2014) aplicó estos conceptos para el análisis del comportamiento de varias VRPs funcionando en la misma línea de agua, ya sea en paralelo o en serie.

Por último, otro de los procesos que en los que se centran algunos estudios en el comportamiento de la VRP ante escenarios hidráulicos de caudal muy bajo. Es bien conocido que ante caudales bajos pueden producirse inestabilidades en forma de oscilaciones, aunque el motivo de este comportamiento no es del todo conocido. Ulanicki y Skworcow (2014) examinaron este efecto simulando, mediante modelos dinámicos con estructuras de control abiertas y cerradas (retroalimentadas), la “reacción” de una VRP con escenarios de caudal bajo.

Acción ejercida por controladores electrónicos

Otro grupo de modelos simulan el comportamiento local de VRPs reguladas mediante dispositivos electrónicos. En este sentido son más escasas las referencias. Ulanicki et al. (2000) evaluaron diferentes tipos de control, incluyendo estrategias de control abiertas (con control predictivo) y cerradas (retroalimentadas por la propia señal obtenidas aguas abajo de la válvula). Presscot y Ulanicki (2008), tras sus hallazgos referentes al análisis del comportamiento dinámico de VRPs (Presscot y Ulanicki 2003) incorporaron un modelo dinámico de VRP gobernada por controlador de tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo) y evaluaron tanto el comportamiento local como su influencia en una red esquemática regulada aguas abajo de ésta.

2.4.3.2 Simulación de sectores regulados en cabecera mediante VRPs

El segundo gran bloque de modelos de análisis que incorporan VRPs – con diferentes técnicas de regulación – son aquellos que examinan la influencia de la presión de consigna sobre el sector/sub-tramo de red, regulado aguas abajo de la válvula. Para este tipo de análisis, se utilizan de forma generalizada modelos dinámicos de *periodo extendido*.

En análisis de periodo extendido, las válvulas se formulan como líneas de la red (análogas a las conducciones) con un determinado coeficiente de pérdida de carga. La diferencia respecto a una conducción normal con pérdida de carga continua es que a las válvulas se les asigna unos valores particulares a determinadas matrices y coeficientes que definen el algoritmo de análisis: matriz Jacobiana de elementos, matriz derivativa de pérdidas de carga y factor de corrección de caudal – más detalle sobre este aspecto se pueden encontrar en Rossman (2000) ‘Apéndice D, Algoritmo de Análisis’. La matriz de coeficientes de este tipo de elementos reguladores se computa después de que se hayan analizado el resto de líneas del modelo, calculando su flujo. Posteriormente se aplican las operaciones lógicas de estado de las válvulas respectivas al tipo de consigna asignado.

A continuación se describen los principales aspectos sobre la modelación de este tipo de válvulas y diferentes alternativas de tipos de consigna.

Modelación fundamental de VRPs en modelos de análisis en periodo extendido: consigna de tipo ‘salida fija’

En general, una VRP puede operar en uno de los sus tres modos básicos (Simpson 1999):

- Modo estándar/activo – En el modo estándar o activo la presión en el lado de aguas arriba de la válvula (H_i) es mayor que la presión de ajuste consignada en la válvula (H_{set}). En dicho caso la VRP trabaja activamente ajustando su resistencia para mantener la presión preestablecida aguas abajo (H_j). La presión aguas abajo por tanto se expresa mediante (36):

$$H_j = H_{set} \quad (36)$$

- Modo abierto/inactiva – En este modo de funcionamiento, la presión aguas arriba es menor que la presión de ajuste/consigna más la pérdida localizada mínima cuando la válvula se encuentra totalmente abierta (H_{p-min}). Como resultado, la válvula se abre completamente. La presión en el lado de aguas abajo es igual a la presión aguas arriba menos la pérdida de carga localizada mínima generada según (37).

$$H_j = H_i - H_{p-min} \quad (37)$$

- Modo cerrado – Este modo de funcionamiento la presión en el lado de aguas abajo de la VRP es mayor que la presión aguas arriba y que la presión de consigna. Cuando esto ocurre, la válvula se comporta como una válvula de retención o antirretorno para evitar que el flujo de agua fluya en sentido inverso al deseado.

Para representar la consigna más clásica de las VRPs, después de calcular el flujo el resto de red y obteniendo la presión en los nodos situados inmediatamente aguas arriba (H_i) y aguas abajo (H_j) de la válvula, se aplican las condiciones lógicas siguientes. Las variables intervinientes en el cálculo son: caudal fluyente a través de la línea que representa la VRP (q_{ij}), caudal de tolerancia – utilizando en el proceso iterativo del algoritmo de análisis (Q_{tol}), presión de tolerancia – ídem al anterior (H_{tol}), es la presión de tarado/ajuste/consigna expresada en energía hidráulica (H_{set}), y la pérdida de carga mínima cuando la VRP está totalmente en modo ‘abierta/inactiva’ (H_{p-min}).

Si el modo de funcionamiento de la válvula en el estado inicial es ‘activa’ entonces:

$$si \left\{ \begin{array}{l} q_{ij} < Q_{tol} \rightarrow VRP: cerrada \\ H_i < H_{set} + H_{p-min} - H_{tol} \rightarrow VRP: abierta \\ Otra condición \rightarrow VRP: activa \end{array} \right\} \quad (38)$$

Si el modo de funcionamiento de la válvula en el estado inicial es ‘abierta’ entonces:

$$si \left\{ \begin{array}{l} q_{ij} < Q_{tol} \rightarrow VRP: cerrada \\ H_i > H_{set} + H_{p-min} - H_{tol} \rightarrow VRP: activa \\ Otra condición \rightarrow VRP: abierta \end{array} \right\} \quad (39)$$

Por último, si el modo de funcionamiento de la válvula en el estado inicial es ‘cerrada’ entonces:

$$si \left\{ \begin{array}{l} H_i > H_j + H_{tol} \text{ y } H_i < H_{set} - H_{tol} \rightarrow VRP:abierta \\ H_i > H_j + H_{tol} \text{ y } H_j < H_{set} - H_{tol} \rightarrow VRP:activa \\ Otra\ condici3n \rightarrow VRP:cerrada \end{array} \right\} \quad (40)$$

Aplicando estas condiciones l3gicas se simula el comportamiento de la VRP a lo largo del tiempo, considerando sus posibles modos de funcionamiento.

Programaci3n temporal

La programaci3n local en funci3n del tiempo es un tipo de regulaci3n avanzada de presiones con un nivel de sofisticaci3n menor a las dos siguientes (basada en caudal y en punto remoto). Para la simulaci3n de esta t3cnica en modelos de *análisis de periodo extendido* basta con asignar la presi3n de consigna deseada en cada paso de tiempo y aplicar la formulaci3n anterior. Es decir, la única diferencia respecto a la ‘consigna de salida fija’ es que H_{set} varía en funci3n del tiempo. Esto se puede expresar a trav3s de (41).

$$\begin{aligned} H_j &= H_{set,1} \text{ si } t > t_0 \text{ y } t < t_1 \\ H_j &= H_{set,2} \text{ si } t > t_1 \text{ y } t < t_2 \\ &\dots \\ H_j &= H_{set,n} \text{ si } t > t_{n-1} \text{ y } t < t_n \end{aligned} \quad (41)$$

Siendo $H_{set,h}$ cada una de las presiones de consigna introducidas para cada periodo de tiempo $[t_h \rightarrow t_{h+1}]$.

Algunos estudios se han enfocado en la b3squeda de una curva de programaci3n óptima a lo largo del tiempo. Para diseñar esta curva se han planteado algunas propuestas basadas en problemas de optimizaci3n. Awad et al. (2010) propone mediante t3cnicas de algoritmos gen3ticos la curva óptima adaptada a cada tramo horario analizado. No obstante, esta consigna se fundamenta en la b3squeda de la presi3n óptima para dos periodos de tiempo prefijados de antemano, por lo que se acerca m3s a una regulaci3n temporal de tipo ‘día/noche’ en la que se establece de forma independiente la presi3n óptima durante cada uno de los dos periodos. Ulanicki et al. (2008) y posteriormente Abdelmeguid (2011) plantean un enfoque para buscar de forma m3s precisa una curva de optimizaci3n basada en el m3todo de algoritmos gen3ticos.

Modulaci3n basada en el caudal

Sobre la modulaci3n local basada en el caudal demandado, no se han encontrado referencias relevantes sobre formulaci3n para modelos de análisis en periodo extendido.

$$\begin{aligned} H_j &= H_{set,1} \text{ si } q_{ij} > Q_1 \text{ y } q_{ij} < Q_2 \\ H_j &= H_{set,2} \text{ si } q_{ij} > Q_2 \text{ y } q_{ij} < Q_3 \\ &\dots \\ H_j &= H_{set,n} \text{ si } q_{ij} > Q_{n-1} \text{ y } q_{ij} < Q_n \end{aligned} \quad (42)$$

Un planteamiento simplificado es la introducción de una serie de operaciones lógicas en el modelo de análisis que contemplen diferentes presiones de consigna $H_{set,q}$ para diferentes intervalos de caudal (42). A pesar de no tratarse de una verdadera modulación (expresada de forma continua) es una aproximación que puede ser válida para cierto tipo de análisis.

Debido a la relevancia de este tipo de control, algunos autores han ofrecido modelos matemáticos para mejorar u optimizar las curvas que relacionan ‘presión de tarado/caudal’ implementadas por los controladores electrónicos que ofrecen este tipo de regulación. Prescott y Ulanicki (2008) propusieron un controlador proporcional-integral-derivativo dependiente del caudal demandado. Consiste en un algoritmo de control retroalimentado, basado en la diferencia entre la presión de tarado teórica y la presión de salida, que proporciona una señal de control modificando la apertura VRP. En la misma línea, Li et al. (2010) propuso varios algoritmos evaluando el comportamiento dinámico de una VRP con un controlador de caudal modulado bajo diferentes escenarios hidráulicos, tanto teóricos como reales. Centrándose en la curva de modulación AbdelMeguid (2011) y anteriormente AbdelMeguid y Ulanicki (2010) utilizaron algoritmos genéticos para optimizar la presión de salida de la VRP para minimizar las fugas de fondo de la red. Las variables de decisión del problema de optimización fueron los coeficientes de un polinomio de segundo grado que definía dicha relación.

Modulación basada en punto remoto

La última técnica tratada por su significancia es la modulación basada en la presión en un punto remoto. En primer lugar cabe destacar el punto del que proviene la señal. Generalmente se trata del punto crítico de la red, aunque también se puede optar por otros puntos como, siendo el segundo en relevancia el punto representativo de la presión media.

Destaca que la mayoría de algoritmos propuestos utilizan el punto crítico como base para obtener la señal de punto remoto. Nicolini y Zovatto (2009) propusieron una formulación en bucle cerrado con realimentación de las mediciones de presión en tiempo real en el punto crítico. Campisano et al. (2012, 2010) describieron los resultados de su investigación numérica y evaluaron la efectividad de un algoritmo basado en una serie de nodos “sensibles” identificando el punto crítico en cada instante. El tipo de control propuesto en este caso se trataba de un controlador proporcional. Este último y el presentado por Sanz et al. (2012) se basan en la corrección de la presión en la válvula, de forma proporcional al error entre la presión deseada en el punto crítico y la teórica. Por último, Creaco y Franchini (2013) propusieron un nuevo algoritmo basado en la pérdida de carga inducida por la válvula de regulación. La mayor parte de estas propuestas sustentan su ajuste de control en la diferencia o error entre presión medida (P_{pc}) y presión teórica (P_{pc-set}). Aplicando una constante de proporcionalidad K_p sobre dicho error calculan la variación de ajuste de la válvula $\Delta\alpha$ según la expresión:

$$\Delta\alpha = K_p(P_{pc} - P_{pc-set}) \quad (43)$$

Una de las desventajas de esta formulación es que requiere un buen ajuste del parámetro K_p . Un parámetro demasiado bajo podría hacer que se tardara en alcanzar el ajuste óptimo, mientras que un valor muy alto puede provocar reacciones del sistema demasiado bruscas con oscilaciones incluso alrededor de la consigna óptima (Creaco y Franchini 2013).

Más recientemente, se ha expandido esta línea de investigación enfocando el análisis en la búsqueda de otros tipos de controles – igualmente fundamentados en señal en punto remoto –pero actuando sobre otras variables. Page et al. (2016) y anteriormente Giustolisi et al. (2015), proponen nuevos algoritmos de control dirigidos a ajustar o bien la *resistencia* o *coeficiente de pérdida localizada* de la válvula ($K_{perd-loc}$) y o bien directamente la pérdida de carga (ΔH). En ambos casos se obtienen resultados más estables que con el anterior tipo de control basado en el grado de apertura de la VRP.

2.4.4 Modelos de fugas en redes

Los diferentes enfoques utilizados para la modelación de fugas están basados generalmente en los conceptos expuestos anteriormente sobre relación entre presión y caudales fugados en tuberías individuales (ver 2.3.2.2 Relación hidráulica entre presión y caudal fugado). A continuación se describen algunos de los más expandidos en la literatura.

2.4.4.1 Elemento emisor (expresión general de caudal fugado)

La expresión de la ecuación (21) ha sido ampliamente utilizada para la simulación de fugas en modelos de análisis en periodo extendido. Esta expresión ha sido introducida por ejemplo en la formulación del EPANET, la cual denomina este tipo de orificios como ‘emisores’ en los que hay que definir dos parámetros: β mal denominado en esta ocasión “coeficiente de descarga” y α como el exponente de fugas (Rossman 2000). Uno de los inconvenientes de este método es que, si bien la este software permite definir de forma individual el coeficiente β , utiliza un mismo exponente α para todo el conjunto de redes (proporcionando como valor predeterminado 0.5, asimilable a fugas en orificios de conducciones fijas).

En ocasiones se utilizan ambos parámetros de forma global para representar el conjunto de fugas ocurridas, sin individualizar ninguno de los dos (Laucelli y Meniconi 2015). La definición del coeficiente β suele asociarse a un conjunto amplio de factores como: número de fugas, estado de la tubería (edad, corrosión, etc.) y cargas exteriores. El valor del coeficiente exponencial α suele estar más circunscrito a la hidráulica de la fuga, gobernada principalmente por el material de la misma (flexibilidad o rigidez asociada).

El principal inconveniente de formular las fugas mediante esta expresión (continua) es que pueden darse escenarios no realistas para caudales muy bajos. En la Figura 2.29, presentada anteriormente, para caudales de fuga muy bajos en los que se presenta régimen laminar, se observa como el coeficiente de descarga (directamente relacionado con β), puede variar significativamente en función del caudal.

Por otro lado, si la presión y más relevante si cabe conceptualmente, al tratarse de una función continua, ante la aparición en algún punto de presiones negativas, el caudal resultante también es negativo. Esto da lugar en la simulación a que aquellos nodos en los que se ha definido un emisor y resultar el análisis presión < 0 , se inyecte agua por dicho punto, escenario absurdo donde los haya. La posibilidad de que esto tenga lugar es que, internamente, este tipo de emisores se formulan a partir de elementos tipo “embalse ficticio”, los cuales tienen la propiedad de poder suministrar o recibir fluido partiendo de una condición de contorno de presión igual a cero.

2.4.4.2 Modelos de área de sección variable

La incorporación del concepto de área de sección variable (22), si bien han sido ampliamente estudiados para fugas individuales, no han sido aún incorporados en modelos de análisis de periodo extendido de forma generalizada al presentar dificultades a la hora de resolver el sistema de ecuaciones, tanto para modelos ‘dirigidos por la demanda’ (33) y aquellos ‘dirigidos por la presión’ (35).

La única aproximación encontrada ha sido la propuesta por Piller y Van Zyl (2015) en la que se añade dicha formulación a un sistema de ecuaciones ‘dirigidos por la presión’. En éste se presenta una formulación para el sistema de ecuaciones de energía basada en un ‘problema de minimización’ con las presiones en los nodos como incógnitas básicas. El algoritmo de resolución se basa en el método de Newton, introduciendo un factor de amortiguamiento para asegurar la convergencia del sistema.

2.4.4.3 Modelo para representar fugas de fondo

Las fugas de fondo, fugas imperceptibles que ocurren a lo largo de todas las redes, se suponen como dependientes de las condiciones de la tubería y su presión media. Asumiendo que ocurren en mayor o menor medida en todas las conducciones, se han presentado modelos que incluyan este tipo de fugas en cada una de las líneas del modelo hidráulico. El modelo adoptado de forma más generalizada para representar este fenómeno es el propuesto por Germanopoulos (1985) y extendido de forma global, entre otros, por Giustolisi (2014, 2012, 2008). Esta formulación expresa las fugas en cada conducción (f_k) según la expresión (44)

$$f_k(P_{k,med}) \begin{cases} \beta_k L_k P_{k,med}^{\alpha_k} & \text{si } P_{k,med} > 0 \\ 0 & \text{si } P_{k,med} < 0 \end{cases} \quad (44)$$

Donde el subíndice k representa cada conducción del modelo, $P_{k,med}$ la presión media en la tubería, L_k la longitud, y β_k y α_k los parámetros de fugas. Esta expresión ha sido incorporada con éxito en modelos de análisis ‘dirigido por la presión’ (Berardi et al. 2015, Laucelli y Meniconi 2015, Giustolisi 2014, Giustolisi 2012), presentando resultados más realistas por el término de caudal nulo ante escenarios de presión negativa.

2.4.5 Modelos de optimización

A pesar de que en esta tesis no se trata el problema de la gestión de presiones desde una perspectiva de optimización, resulta relevante esta línea de investigación por lo que se describen las características principales de los modelos. El objetivo principal suele focalizarse en la *minimización* del exceso de presión de la red con el objetivo de reducir fugas.

La mayor parte de estudios utilizan este tipo de técnicas de programación matemática para minimizar las fugas determinando (1) la *ubicación* y (2) el *ajuste* del PRV. Existen similitudes evidentes entre un buen número de problemas, utilizando la misma formulación (o muy similar) en relación a la función objetivo perseguida. Las *restricciones* del problema implican el cumplimiento de las ecuaciones que gobiernan el modelo de red (balance de masas y de energía), y la definición de una presión mínima para todos los nodos.

Con respecto a los métodos de optimización utilizados, se pueden encontrar dos grandes grupos: optimización matemática y métodos heurísticos. Los enfoques de optimización matemática utilizan ecuaciones hidráulicas para la formulación de problemas. Se puede utilizar una amplia gama de métodos dependiendo de la naturaleza de las variables utilizadas en el problema, de las restricciones impuestas y de la función objetivo buscada: programación lineal (PL), programación no lineal (PNL), programación lineal entera mixta (PLEM) y la programación no lineal entera mixta (PNLEM).

Métodos heurísticos como los algoritmos genéticos (AG) o el ‘*simulated annealing*’ (SA) están cobrando popularidad en gran parte por la independencia de su utilización respecto al simulador hidráulico. Los AG implican un enfoque de optimización evolutivo que sigue el concepto de evolución mediante el desarrollo estocástico de un número de poblaciones de soluciones, utilizando una función de aptitud u objetivo determinada. Los métodos SA se basan en el concepto de exploración del espacio de la solución, disminuyendo lentamente la probabilidad de aceptar soluciones menos precisas.

2.4.5.1 Evolución de los métodos de optimización utilizados

Son escasos los estudios que integran modelos de optimización en casos reales. Wright et al., (2014) ha intentado implementar los resultados obtenidos de un problema de optimización en una red real de Reino Unido. Una alternativa que trata de estrechar la brecha entre los enfoques teóricos y prácticos es probar un problema de optimización en un modelo representativo de una red real. Esto se ha hecho en un número significativo de estudios (Eck y Mevissen 2013, Gomes et al., 2012, Nicolini et al, 2010, Awad et al., 2009). En contraposición, es más habitual la utilización de modelos esquemáticos tipo *benchmark*, menos representativos de los sistemas reales.

Variables de optimización: localización, ajuste y número de VRPs

Uno de los primeros modelos creados con este enfoque fue el propuesto por Germanopoulos y Jowitt (1989) y ampliado en Jowitt y Xu (1990). Los autores

desarrollaron un modelo que consistió en una red de 25 nodos en la que la ubicación de la válvula y el control de válvulas se optimizan mediante el método de PL. Esta red ha sido ampliamente citada en la literatura, estableciendo así una referencia científica para futuros modelos de optimización. Varios autores han utilizado este ejemplo para diferentes propósitos que incluyen la búsqueda de la consigna óptima de la válvula (Vairavamoorthy y Lumbers 1998, Savic y Walters 1995), optimización conjunta de localización y consigna (Liberatore y Sechi, Reis et al., 1997) y añadiendo una tercera variable como es el número óptimo de válvulas (Nicolini y Zovatto 2009, Araujo et al., 2006). Giugni et al. (2014) también utilizaron la misma red, pero con el fin de evaluar el potencial hidroeléctrico recuperable de una red de distribución, en lugar de la minimización de fugas. Aparte del modelo de Germanopoulos y Jowitt se han presentado otros problemas de optimización. Gomes et al. (2012) presentó un modelo para identificar los puntos de entrada óptimos en los sectores. Las técnicas de optimización utilizada fue el método meta-heurístico SA.

Optimización de técnicas de regulación avanzadas

En referencia a problemas de optimización de consignas de ajuste de las válvulas, la mayoría de los estudios citados anteriormente se refieren a una consigna de tipo *salida fija*. También se han descrito problemas de ajuste de presión de tarado de válvulas para técnicas de regulación avanzadas como modulación en función del tiempo o del caudal. Ulanicki et al. (2008) describieron un método PNL para optimizar una curva tiempo-presión. Awad et al. (2009) utilizaron una técnica de AG como un método de optimización para determinar el tipo de regulación más apropiado entre *salida fija* y *modulación temporal* y también para optimizar la ubicación y el ajuste de la VRP. Ulanicki et al. (2008) y AbdelMeguid y Ulanicki (2010) exploraron la optimización de la curva presión-caudal para técnicas de regulación de tipo *modulación basada en el caudal*. Esta curva se definió como una curva polinómica de segundo orden buscándose los parámetros óptimos de dicha curva mediante AG.

Métodos de optimización

En cuanto a las técnicas de optimización utilizadas, existe una clara tendencia desde la utilización de métodos de linealización y PNL a la utilización de algoritmos probabilísticos o meta-heurísticos. Inicialmente, los modelos de Germanopoulos y Jowitts (1989) y Jowitt y Xu (1990) fueron examinados con métodos de PL. Los problemas de PL se caracterizaron por una rápida convergencia y la obtención de una solución global óptima, aunque para su resolución era necesario introducir ciertas simplificaciones. La naturaleza no lineal de las ecuaciones relativas a la resolución de redes, derivó en la proliferación de enfoques de PNL (Dai y Li, 2014, Pezzinga y Pititto, Ulanicki et al, 2000, Alonso et al 2000, Vairavamoorthy y Lumbers, 1998). El principal inconveniente de este método es que, si bien se puede encontrar un óptimo local, se necesitan conocimientos adicionales para evaluar la calidad de la solución y determinarla como solución global del problema.

Con el objetivo de evitar este problema, muchos autores han propuesto nuevos problemas de optimización basados en métodos heurísticos o estocásticos como los algoritmos AG o SA. Como las técnicas heurísticas calculan sus soluciones mediante

enfoques probabilísticos, no se garantiza un óptimo global, aunque la solución puede ser cercana. Varios investigadores han abordado el problema GA (Giugni et al., 2014, AbdelMeguid y Ulanicki 2010, Nicolini y Zovatto 2009, Araujo et al., 2006, Savic y Walters, 1995). SA es otra técnica utilizada con frecuencia.

Para facilitar la comprensión del análisis realizado en esta sección, algunos de los trabajos citados se presentan cronológicamente en la Tabla 2.12. En esta tabla se pueden encontrar las principales características de cada problema de optimización: variables de decisión, función objetivo, método de optimización utilizado y si se ha utilizado el mencionado *benchmark* de Jowitt's y Germanopoulos (1990).

Tabla 2.12. Modelos de optimización para gestión de presiones (Vicente et al. 2015).

Autores	Año	Variable decisión	Método optimización	Red: Jowitt's y Germanopoulos
Gemanopoulos y Jowitt	1989	L, S	PL	S
Jowitt y Xu	1991	S	PL	S
Savic and Walters	1995	S	AG	S
Reis et al.	1997	L, S	AG	S
Vairavamoorthy y Lumbers	1998	S	PNL	S
Tucciarelli et al.	1999	S	SA	N
Unalicki et al.	2000	S*	PNL	N
Pezzinga y Pititto	2005	L, S	AG, PNL**	N
Araujo et al.	2006	N, L, S	AG	S
Liberatore y Sechi	2009	L, S	MH	S
Nicolini y Zovatto	2009	N, L, S	AG	S
AbdelMeguid y Ulanicki	2010	S***	AG	N
Awad et al.	2010	L, S	AG	N
Mahdavi et al.	2010	L, S	AG	N
Gomes et al.	2012	L, S	SA	N
Eck y Mevissen	2013	L, S	PNLEM	N
Giugni et al.	2013	L, S	AG	S
Wright et al.	2014	L, S	PML	N
Dai and Li	2014	L, S	PLEM-PNL	S

(*) Consigna para modulación basada en tiempo.

(**) Dos problemas de optimización: localización de válvula con AG y consigna con PNL

(***) Consigna para modulación basada en el caudal.

La tabla recoge la siguiente información:

- Variable de decisión (*Columna 3^a*) – Se trata de la variable que define el problema, es decir, la que se trata de optimizar: (L) localización de la válvula en el sector, (S) *setting* de la válvula o presión de consigna y (N) número de válvulas.
- Método de optimización (*Columna 4^a*) – Técnica de optimización utilizada entre: (PL) Programación Lineal, (PNL) Programación No Lineal, (PLEM) Programación Lineal Entera Mixta, (PNLEM) Programación No Lineal Entera Mixta, (AG)

Algoritmo Genético, (MH) método meta-heurístico no determinado y (SA) algoritmo de tipo ‘simulated annealing’.

- Red: Jowitt’s y Germanopoulos (*Columna 5^a*) – Si se utiliza como *benckmark* el modelo propuesto por Jowitt’s y Germanopoulos (1990).

2.5 Conclusiones extraídas del estado del arte

Una vez examinado la situación actual de los aspectos más relevantes de la gestión de presiones y su influencia en la disminución de caudales fugados, se han extraído una serie de conclusiones que han servido de sustento para desarrollar la metodología del capítulo siguiente. Las conclusiones más relevantes se recogen a continuación.

Conclusiones relativas a la sectorización

Las conclusiones más relevantes extraídas referentes a la '*sectorización y su relación con las maniobras de regulación*' son las siguientes:

- La sectorización es una estrategia que, efectuada conjuntamente con maniobras de gestión de presiones, puede resultar muy eficaz en la disminución de fugas. Esto ha dado lugar a que muchos autores diferencien la sectorización tradicional de este tipo de zonificación denominándolas '*zonas de presión regulada*' (Yates y MacDonald 2007; Charalambous 2007). No obstante, si bien se ha encontrado un gran número de información especializada sobre sectorización en su concepción más clásica (Thornton et al. 2008; Fanner et al. 2007; Farley y Trow 2003; Farley 2001), no existen apenas documentos que describan la utilización de este tipo de estrategias específicamente para la gestión de presiones.
- Con el fin de diseñar sectores, es importante conocer cuáles son las principales características de éstos y su relación con la regulación de presiones. En este sentido tampoco se ha encontrado información específica que aluda a este aspecto. De hecho, son escasas las clasificaciones que se hacen de los sectores en función de sus parámetros de diseño (UKWIR 1999). Algunas de las cualidades más relevantes detectadas son: número de entradas, temporalidad de la frontera, orografía interna o las conexiones hidráulicas con otros tramos de red.
- La creación de clasificaciones de sectores atendiendo a diferentes características, permitiría analizar más fácilmente la eficiencia de éstos sobre las maniobras de regulación de presión. Por este motivo, se han incluido sub-apartados con este tipo de categorización, y se han resumido en la Tabla 2.1 junto a la influencia de cada parámetro en la gestión de presiones. Además se mencionan algunas recomendaciones y medidas de adaptación. Este tipo de clasificación será la base para el análisis posterior.

Conclusiones relativas a la instrumentación y técnicas de regulación

Las conclusiones más relevantes extraídas referentes a la '*instrumentación*' son las siguientes:

- Dentro de las múltiples técnicas y dispositivos disponibles para ejercer la acción de regulación de la red, las Válvulas Reductoras de Presión se han posicionado como

uno de los elementos más expandidos por su relación beneficio/coste. Este tipo de elementos son muy convenientes en redes con exceso de presión como pueden ser las que funcionan principalmente por gravedad. El funcionamiento de este tipo de válvulas ha sido ampliamente estudiado y su utilización es sobradamente conocida por parte de las empresas operadoras de agua.

- El aspecto más innovador relacionado con este elemento regulador son las *técnicas de regulación* junto a sus posibilidades en cuanto a *consignas* ofrecidas. Esta regulación se puede lograr de forma hidráulica (a través de pilotos y circuitos hidro-mecánicos más o menos complejos) o mediante controladores electrónicos. La evolución de ambos enfoques, pero especialmente los últimos, es continúa apareciendo nuevos dispositivos y algoritmos y algoritmos que mejoran la objetivos perseguidos con la regulación. Sin embargo, algunas aproximaciones son limitadas y no consideran algunos aspectos relevantes como: las características de la serie de consumos en un sector o el posible “dinamismo” de los nodos de referencia (en el caso de controles basados en señal en punto remoto).
- Las características del sector regulado (número de entradas, orografía, tipo de consumo, etc.) puede influir de forma muy significativa en la precisión alcanzada por la regulación. En función de estas características, puede ser más conveniente utilizar una u otra técnica. Sin embargo, apenas existen documentos o referencias que aludan a este aspecto (GIZ 2011). Con ello, se deduce que un análisis de la relación entre *técnicas de regulación* y *características de cada sector* sería muy adecuado y beneficioso para una mejora en la implantación de este tipo de planes.
- Un nuevo tipo de técnicas que se está utilizando para regular la presión de la red es la utilización de dispositivos capaces de recuperar parte de la energía disipada en la acción de regulación. Si bien estos no han sido incluidos en el estudio de esta tesis, se cita este punto al detectarse un gran número de estudios enfocados en este aspecto. Estos dispositivos se pueden categorizar principalmente en tres tipos: microturbinas (), bombas con funcionamiento reversible (Carraveta et al., 2013c, Carraveta et al., 2012, Fecarotta et al., 2011) o dispositivos diseñados específicamente para ejercer esta acción bi-funcional (PRODINTEC, 2013).

Conclusiones relativas a la relación entre presión, fugas, consumo y nivel de servicio

Las conclusiones más relevantes extraídas referentes a la ‘*gestión de presiones y su relación con la disminución de fugas*’ son las siguientes:

- La ocurrencia de pérdidas en redes de distribución debido a caudales fugas es un problema global e inevitable de solucionar de forma integral. Dentro de las múltiples medidas que se pueden adoptar para paliar esta problemática, la reducción de presión de la red es de las maniobras más eficaces por la relación directa entre las variables *presión* y *caudal fugado* (May 1994). También existe una relación entre *presión* y *consumo* que en ocasiones no es considerado convenientemente (Giustolisi et al. 2012).

- El proceso físico ha sido amplia y detalladamente estudiado a nivel de fuga individual (Cassa et al. 2010, Van Zyl y Cassa 2014). Sin embargo, su extrapolación a nivel de sector es muy complejo debido al elevado número de incógnitas sobre las fugas: número de fugas existentes, tipos de fuga atendiendo a su caudal y al lugar donde se producen (empalmes entre conducciones, pequeños orificios, grandes roturas, etc.). Por este motivo, se han propuesto varios métodos para estimar mediante expresiones más simplificadas el volumen de fugas a nivel de sector.
- En este sentido, los métodos basados en el Caudal Mínimo Nocturno (CMN) han sido aplicados con gran éxito de forma global (Morrison et al. 2007; Lambert 2002). Analizando la utilización de este método se han detectado numerosos enfoques para distintos pasos implicados en este método. En este sentido destaca la heterogeneidad existentes a la hora de calcular:
 - (1) Cálculo de CMN o bien mediante expresiones empíricas (Adam Lambert 1999) o bien mediante desagregación en sub-componentes (Gomes et al. 2011, UKWI 1994b);
 - (2) Estimación de presión media de la red, detectándose varios métodos como el hidráulico el topográfico y el de medición directa (Renaud et al. 2015). Además, se han considerado posibles mejoras sobre algunos de ellos.
 - (3) Extrapolación de fugas al resto de horas a través de la relación entre presión y caudal fugado mediante el exponente N1 (Lambert 2002). Si bien es generalizada su utilización, los valores utilizados se comprenden dentro de un rango suficientemente amplio como para introducir importantes errores en el cálculo.

Esta variabilidad de sub-métodos, fórmulas empíricas y valores utilizados, ha hecho que se considere necesaria una aclaración y clasificación de los mismos. Además, se debe establecer una serie de recomendaciones sobre su utilización en función del caso de estudio.

Conclusiones relativas a la modelación numérica

Las conclusiones más relevantes extraídas referentes a la '*modelación numérica de planes de regulación y cálculo de fugas*' son las siguientes:

- La modelación numérica ha sido utilizada de forma habitual desde hace décadas para la simulación y el análisis hidráulicos de redes de abastecimiento de agua complejas. No obstante, la formulación más expandida es aquella '*dirigida a la demanda*' (Rossman 2000), que si bien representa escenarios adecuados para condiciones "normales" puede introducir importantes errores en la representación de procesos altamente sensibles a la presión de la red.
- Por este motivo, se está detectando un crecimiento en la utilización de otro tipo de modelos: '*dirigidos a la presión*'. Estos modelos, son más realistas a la hora de representar procesos dependientes de la presión, como son las fugas o las

componentes de consumo dependientes de la presión, incluyendo escenarios de presión escasa de forma generalizada (Liserra et al. 2014, Liu et al. 2011, Pathirana 2010, Giustolisi 2008, Cheung et al. 2005).

- La simulación de fugas a través de modelos de análisis basados en la demanda, se suele representar mediante elementos formulados con una dependencia total de la red. En el contrastado software EPANET, y otros programas análogos basados en esta formulación, estos elementos se les denomina ‘emisores’ (Rossman 2000). El algoritmo interno formulado como un embalse ficticio en cola para simular la liberación de caudal a presión atmosférica, hace que ante escenarios de presión negativa se “inyecte agua en la red”.
- La modelación de técnicas de regulación ha sido abordado desde diferentes perspectivas: optimización de consignas de técnicas avanzadas de regulación (AbdelMeguid 2011, Presscot y Ulanicki 2008), optimización de presión para VRPs de salida fija, o propuestas para la simulación de técnicas en tiempo real en modelos en periodo extendido, como las basadas en señal en punto remoto (Giustolisi et al. 2015). No obstante, apenas se hace alusión a la conveniencia de utilizar una u otra técnicas en función de las características de la sectorización (Awad et al. 2010). El estudio de este factor aportaría un gran paso en la mejora de los sistemas de ayuda a la decisión aplicables tanto al ámbito académico-científico como en la práctica profesional.

Capítulo 3. Metodología

Tras el análisis del estado del arte (Capítulo 2) se ha puesto de manifiesto que, para diseñar de forma adecuada un plan de regulación de presiones y evaluar su posterior impacto, es necesario considerar un gran número de factores: características de la zona de regulación o sector, tipo de instrumentación y técnica de regulación, relación entre presión caudal fugado y consumo, etc.

Los objetivos y sub-objetivos planteados son de diferente naturaleza y en consecuencia los métodos asociados a cada uno de ellos también deben serlo. Algunos objetivos son de naturaleza más holística, como la determinación de las características de los sectores más influyentes en las maniobras de regulación o la selección de la técnica de regulación más adecuada en función de las primeras. Otros tienen carácter analítico, como la búsqueda de propuestas metodológicas para diseñar consignas de regulación óptimas o para mejorar la evaluación del impacto de dichas maniobras. Por último, otro bloque metodológico está orientado al desarrollo de código de programación para la creación de un entorno de simulación de análisis hidráulico y de ayuda a la decisión en planes de este tipo.

En este capítulo se describe la metodología llevada a cabo para la consecución de los tres objetivos principales propuestos en esta tesis. Las etapas fundamentales se resumen en los siguientes epígrafes y se resumen gráficamente en la Figura 3.1:

- Metodología de análisis cualitativo para evaluar proyectos de regulación de presión a nivel mundial
- Desarrollo de un entorno de modelación numérica para la simulación de escenarios hidráulicos de redes de abastecimiento y la evaluación de las propuestas metodológicas de los apartados 3.3 y 3.4.
- Propuesta metodológica conceptual para el diseño de curvas de regulación de presión para técnicas avanzadas
- Propuesta metodológica conceptual para la evaluación del impacto de las maniobras de regulación a través de sistemas de monitorización
- Recopilación de datos de plan estratégico de Gestión de Presiones ejecutado por la empresa Canal de Isabel II

Figura 3.1. Metodología global llevada a cabo (agrupada en sub-secciones) e interrelación entre estas y con los objetivos planteados en la tesis.

3.1 Método de análisis cualitativo basado en el estudio de casos

La gestión de presiones abarca un gran número de sub-procesos o etapas, difíciles de comprender de forma aislada e interrelacionadas entre sí. Analizar cuantitativamente un proceso ingenieril tan complejo de forma integral es prácticamente imposible. En estos casos, una primera aproximación metodológica muy adecuada es recurrir a métodos de análisis cualitativos, en ocasiones denostados por ciertos sectores científicos. Si bien éstos son comunes en el ámbito de las ciencias sociales en las ciencias puras o aplicadas, como es el caso de la ingeniería.

Con esta idea se ha desarrollado una metodología de tipo cualitativa para concluir determinados aspectos sobre la regulación de presiones. Dado el extensivo número de casos de estudio revisados sobre planes de regulación de presiones, tanto en el ámbito académico-científico como en la práctica profesional, se decidió tomar un método que tuviera precisamente los *casos de estudio* como fundamento de la misma. Esta metodología se ha aplicado a las dos ramas principales de este estudio:

- **Gestión de presiones** – Se han buscado proyectos que versen sobre un plan integral de regulación de presiones o que se focalicen en alguna de sus fases principales: objetivo perseguido con la regulación, sectorización, tipo de regulación, modelos de simulación u optimización.
- **Técnicas para estimar caudales fugados** – El concepto del CMN es uno de los más utilizados en la práctica profesional para estimar volúmenes de caudal fugado. As su vez, se ha detectado una gran heterogeneidad en el procedimiento seguido en cada caso. Por estos motivos, se ha considerado otra gran área para abordar mediante metodología cualitativa.

3.1.1 Características de métodos científicos de análisis cualitativo

Existen múltiples métodos de investigación. Yacuzzi (2005) presenta tres condiciones principales a la hora de decidir qué método elegir deben considerarse:

- El tipo de pregunta de investigación que se busca responder.
- El control que tiene el investigador sobre los acontecimientos que estudia.
- La “edad del problema”, es decir, si el problema es un asunto contemporáneo o un asunto histórico.

Acorde a estas cuestiones, la primera decisión que se debe realizar respecto al método de investigación a elegir será si ésta metodología se basará en métodos cuantitativos, cualitativos o mixtos.

Por otro lado, según Snow and Tomas (1994), los métodos de investigación se pueden clasificar según el propósito pretendido:

- Explicativo – Si se busca descubrir los vínculos entre las variables y el fenómeno a la vez que dotar a las relaciones observadas de suficiente racionalidad teórica.
- Descriptivo – Si se pretende identificar los elementos clave o variables que inciden en un fenómeno.
- Predictivo – Si se examinan las condiciones límites de una teoría.

Sarabia (2014) indica que en lo metodológico, la investigación científica actual es una espiral ‘inductiva–hipotética–deductiva’ con dos pasos procesales esenciales:

- Fase heurística o de descubrimiento – Etapa de observación, descripción, reflexión y generalización inductiva, con miras a generar hipótesis (lo que podría ser verdadero como solución al problema, respuesta a la cuestión o explicación del fenómeno).
- Fase de justificación-confirmación – Proceso de comprobación del fundamento de una hipótesis por medio de un procedimiento o dispositivo previsto al efecto (y susceptible de ser reproducido).

De acuerdo con lo anterior, Martínez (2011) considera que algunas de las actividades relevantes en el proceso de investigación científica son:

- La observación y descripción del fenómeno.
- La exploración de la realidad para la generación de hipótesis explicativas sobre el comportamiento, las causas y los efectos del fenómeno.
- El contraste y justificación de la hipótesis propuesta en la idea de garantizar su verdadera capacidad de explicación.

En este contexto, cabe resaltar que las metodologías más convenientes para la fase heurística o de descubrimiento son las cualitativas, mientras que las utilizadas para la fase de justificación y confirmación son de carácter cuantitativo. Con este tipo de análisis se parte de cuestiones generales, para posteriormente formular preguntas más particulares en aquellos puntos que se detecte una falta de conocimiento riguroso del comportamiento del objeto estudiado en mayor o menor grado.

3.1.1.1 Diferencias principales entre metodologías cuantitativas y cualitativas

En ocasiones, se trata de desprestigiar el método cualitativo achacándole inconvenientes como los siguientes: subjetividad, no generalizable al total de la población, medición poco controlada, carencia de resultados o plantear más preguntas de las que se resuelven. Sin embargo, cada método tiene sus ventajas e inconvenientes y se adecúan de distinta forma a cada ámbito de aplicación.

Sus características son significativamente distintas. Las diferencias son tales que tradicionalmente se ha venido asociando cada una de ellas a un campo distinto de la

ciencia. Así, erróneamente, el método cualitativo se relaciona en ocasiones biunívocamente con las ramas científicas más “puras” como son la Medicina, Biología, Matemáticas, etc. Por el contrario, la metodología cualitativa suele ir ligada a las ciencias sociales donde la subjetividad es predominante sobre el análisis de tipo más objetivo. Algunas de las diferencias principales que ha llevado a este supuesto se recogen en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1. Diferencias entre metodología cualitativa y cuantitativa

Investigación cualitativa	Investigación cuantitativa
Centrada en la fenomenología	Basada en la inducción probabilística
Observación naturista sin control	Medición penetrante y controlada
Subjetiva	Objetiva
Inferencias de sus datos	Inferencias más allá de los datos
Exploratoria, inductiva y descriptiva	Confirmatoria, inferencial, deductiva
Orientada al proceso	Orientada al resultado
Datos "ricos y profundos"	Datos "sólidos y repetibles"
No generalizable	Generalizable
Holístico	Particularista
Realidad dinámica	Realidad estática

3.1.1.2 Adecuación del método cualitativo al objeto de estudio

Para el presente estudio, a pesar de tratarse de un contexto más cercano a las ciencias puras o aplicadas, como es el de la Ingeniería Hidráulica, se ha tomado como referente los conceptos del método cualitativo por su adecuación al tipo de análisis propuesto en esta fase del estudio. Sin embargo se considera apropiada esta elección dada su perfecta adecuación al objetivo que se pretende alcanzar. Algunas razones que justifican esta elección, y retomando las preguntas planteadas por Yacuzzi (2005), son las siguientes:

- *Tipo de pregunta que se pretende resolver* – Se trata de obtener, propuestas conceptuales generalizables para la implantación de plantas de gestión de presiones y estimación de caudales fugados.
- *Control que ejerce el investigador sobre los acontecimientos* – El control que se ejerce es parcial por el propio tipo de estudio que se desea llevar a cabo. Se podría hablar de tener un cierto control cuando el análisis se pudiera validar mediante ensayos en redes reales o en laboratorio. La globalidad que abarca el estudio no ha permitido recurrir a la experimentación mediante pruebas piloto, al no estar en disposición de modificar el tarado de VRPs que gobiernen sectores hidrométricos de redes de distribución. Tampoco tendría significancia la experimentación en laboratorio por la escala del problema (estudio a nivel de sector de red). La realización de ensayos de laboratorio, por limitaciones de espacio y presupuesto, se habría visto reducido a pruebas simplificadas en conducciones aisladas o a lo sumo en pequeños tramos de red conformados por varias conducciones. Estas pruebas, en ningún caso, hubieran cumplido los requerimientos necesarios para extraer conclusiones extrapolables a grandes redes.

- *Edad del problema* – Este tipo de maniobras de regulación de presión mediante VRPs pilotadas se remonta al año 1879, año del que data la primera patente por el ingeniero George Ross (Mateos 2007). Desde esta fecha, la evolución de esta operación ha evolucionado enormemente convirtiéndola en una acción de gran “dinamismo”. El análisis de este estudio se circunscribe a las últimas décadas respecto a la redacción de esta tesis (periodo en el que se han producido grandes cambios en la regulación de presiones con la introducción de nuevas estrategias como la sectorización o la aparición de dispositivos electrónicos o modelos numéricos computacionales). En los últimos 10 años se ha detectado un auge en la implantación de este tipo de planes o al menos un aumento significativo en la documentación relativa a la implantación de dichos planes.

3.1.1.3 Método de Estudio de Casos (MEC)

Tras haberse declinado por un análisis de tipo cualitativo para la primera fase del estudio, se procedió a elegir el método de trabajo. Un gran número de los documentos recabados sobre gestión de presiones y estimación de fugas aludían a proyectos o planes reales ejecutados por empresas operadoras de redes de abastecimiento. Además, el volumen de documentación recopilada fue muy amplio. Ambos aspectos hicieron decantarse por una metodología de análisis denominada *Método de Estudio de Casos* (MEC) (Yin 2013; Mohd 2008; Martínez 2011; Stake 2006; Yacuzzi 2005). Algunas de las características principales de los MEC, se describen a continuación:

- Permiten descubrir relaciones entre características, en el marco de un esquema conceptual explicativo.
- La relevancia del caso y su posible generalización no provienen del lado estadístico, sino del lado lógico.
- Las características del *caso de estudio* se extienden a otros casos por la fortaleza del razonamiento explicativo.
- Los casos de estudio suelen centrarse en dos líneas:
 - Descriptiva, si lo que se pretende es identificar y describir los distintos factores que ejercen influencia en el fenómeno estudiado.
 - Exploratoria, si a través de las mismas se pretende conseguir un acercamiento entre las teorías inscritas en el marco teórico y la realidad objeto de estudio.
- Este método, a diferencia de estudios cuantitativos, es inapropiado para el contraste de hipótesis ofreciendo sus mejores resultados en la generación de teorías.
- Permite captar adecuadamente la heterogeneidad y el rango de variación existente de algún aspecto concreto o del conjunto.
- Facilita la selección deliberada de aquellos casos que se revelan:

- o bien representativos de un comportamiento – En este caso interesa identificar características comunes de estos casos para generar hipótesis.
- o por el contrario, críticos en algún aspecto – Estos sirven para valorar una teoría ya existente o en desarrollo, ya sea aceptándola o rechazándola (siempre con la prudencia de saber que estamos trabajando con una metodología cualitativa).

3.1.2 Aplicación del MEC al objeto de estudio

A continuación se describen los principales aspectos de la aplicación del MEC al objeto de estudio. Siguiendo los principios de este método, y basándose en diversas estrategias encontradas en la literatura fundamentadas en este tipo de técnicas (Mohd 2008; Martínez 2011), se ha elaborado un diagrama propio (ver Figura 3.2) que resumen los pasos principales acometidos.

Figura 3.2. Esquema de análisis cualitativo basado en Método de Estudio de Casos

3.1.2.1 Formulación de cuestiones a investigar

Las cuestiones que se han querido resolver mediante este análisis son las siguientes:

- Factores más influyentes en las maniobras de gestión de presiones y recomendaciones para su implantación.
- Técnicas existentes para estimación de fugas basadas en el concepto de CMN, y propuesta de posibles mejoras.
- Detección de diferencias relevantes entre proyectos y extracción de conclusiones en cuanto al origen de estas diferencias: contexto geográfico, condicionantes topológicos de la red y restricciones tecnológicas o económicas, entre otros.

- Evolución temporal de los factores más significativos para poder concluir técnicas obsoletas y tendencias futuras.

3.1.2.2 Recopilación de documentación especializada

Una vez planteadas las cuestiones a resolver, se procedió a recopilar información especializada en esta empresa.

Naturaleza de la documentación e información recabada

Para obtener una perspectiva global de la gestión de presiones y la estimación de fugas la documentación consultada ha sido de naturaleza heterogénea, desde manuales técnicos, hasta informes sobre proyectos reales, pasando por artículos y documentos de carácter más académico-científico. No obstante, al querer obtenerse una percepción cercana a la realidad de la práctica profesional se ha profundizado en información referente a proyectos de implantación real. A éstos les acompaña estudios de ámbito científico-académico, informes técnicos e incluso comunicación directa con expertos mundiales en la materia. Se resumen a continuación las principales fuentes:

- *Casos de estudio sobre proyectos reales* – Como reza la denominación del método utilizado, se ha prestado especial atención al estudio de casos reales. Este tipo de información se ha obtenido de informes especializados redactados por empresas operadoras de agua, trabajos presentados en congresos o jornadas especializadas, artículos científicos, etc. Los estudios reales encontrados tienen dos enfoques diferentes:
 - Casos descriptivos – Estos casos de estudio suelen apoyarse en proyectos ya implantados. Suelen ofrecer resultados de las operaciones ejecutados con mayor o menos grado de detalle cuantitativo.
 - Casos exploratorios – Este tipo de estudios pretende establecer un mayor acercamiento a algún aspecto entre teorías inscritas en el marco teórico y la realidad objeto de estudio. Por tanto, suelen estar focalizadas en algún aspecto concreto de la maniobra de gestión de presiones, tratándose en ocasiones de aplicaciones de teorías formuladas en estudios de investigación.
- *Libros y manuales* – Los libros académicos y manuales técnicos han sido la base para comprender los fundamentos teóricos relativos a los fenómenos físicos asociados a la regulación de presiones. Se han revisado diversas materias de la ingeniería. Conceptos sobre ingeniería civil hidráulica han sido los más consultados, no olvidando otros campos como la ingeniería mecánica o ingeniería de sistemas de control.
- *Información técnica* – Este grupo engloba un número heterogéneo de documentación como: guías técnicas, informes de comisiones especializadas, hojas de especificaciones técnicas sobre dispositivos, documentos de patentes, etc. Con

este tipo de información se ha tratado de adquirir conocimiento sobre la tecnología disponible y las técnicas o estrategias de implantación.

- *Publicaciones del carácter académico/investigador* – Se ha prestado atención a los últimos avances en materia investigadora relacionados con la gestión de presiones a través de artículos publicados en revistas científicas especializadas y de artículos de conferencias. Suelen enfocarse en algún aspecto concreto como: comportamiento hidráulico de VRPs, dimensionamiento de sectores, modelos de simulación de fugas en redes, optimización de consignas de regulación de una válvula, algoritmos de detección o estimación de fugas, etc. A pesar de su visión parcial del problema, su análisis es muy valioso a la hora de revelar nuevos modelos que ayuden a comprender los fenómenos ocurridos.
- *Consulta directa a expertos* – En último lugar, pero no menos relevante, se ha consultado a una serie de profesionales expertos en todo el mundo. En el ámbito nacional los expertos consultados pertenecen a algunas de las empresas operadoras de agua de mayor relevancia como son Canal de Isabel II Gestión (Francisco Cubillo, Humberto Elías, Rubén Miguel) y Grupo Suez (Félix Mendaza, Antonio Jiménez). Éstas han proporcionado información sobre las estrategias e instrumentación implantada en sus redes. En el contexto internacional destacan expertos de una gran trayectoria, tanto en el ámbito científico como en la práctica profesional, con los que se ha realizado video-conferencias y se han intercambiado múltiples correos. Algunas de las cuestiones más relevantes sobre las que se ha discutido han sido: particularidades sobre implantación de planes de gestión de presiones en Norte America (George Kunkel, Julian Thornton), relación entre presión y caudal fugado (Adam Lambert, Jakobus VanZyl), relación entre presión y ocurrencia de nuevas roturas (Adam Lambert) y modelación avanzada de redes de distribución (Orazio Giustolisi).

La Figura 3.3 resume el número de fuentes consultadas de cada tipo.

Figura 3.3. Número de documentos recopilados según naturaleza – ‘P.R: Proyectos Reales’; ‘L: Libros’; ‘I.T: Informes Técnicos’; ‘A.C: Artículos Científicos’; ‘E: Expertos – Comunicación personal’

Casos de estudio relativos a planes de gestión de presiones

Dentro del elevado número de documentos relativos a planes de gestión de presiones destacan aquellos cuyo contenido hace referencia a *casos de estudio reales*. La mayoría de ellos han sido proyectados en infraestructuras existentes, mientras que otros aluden a estudios en los se utiliza un modelo numéricos representativo de una red real para analizar un determinado aspecto de la maniobra de regulación. La Tabla 3.2 recoge esquemáticamente los casos más significativos, agrupados geográficamente por continentes.

Tabla 3.2. Referencias analizadas sobre casos de estudio basadas en proyectos o redes reales

Continente	Investigación cualitativa
África	Burkina Faso (GIZ 2011); Marruecos (Benahmed 2007; ElFarissi et al. 2010); Sudáfrica (Mckenzie et al. 2009; Meyer et al. 2009; Shepherd y Poona 2010; Burrows 2014); Zimbabwe (Marunga et al. 2006)
América del Norte	Canadá (Lalonde 2005; Lalonde et al. 2008; Yates et al. 2014); EEUU (Levine et al. 2005; Sturm y Thornton 2005; Kunkel and Sturm 2011)
América del Sur y Central	Las Bahamas (Fanner 2007); Brasil (GIZ 2011); Perú (GIZ 2011)
Asia	Arabia Saudí (2030 WRG 2013); China (Xu et al. 2014); Filipinas (Eguia et al. 2012); India (UN-HABITAT 2006); Indonesia (Rogers 2005); Irán (Mahdavi et al. 2010); Israel (Feldman et al. 2012); Japón (Ariyoshi 2014); Malasia (Chai 2006; Morrison et al. 2007; Wyeth and Chalkl. 2012); Tailandia (Anuvongnukroh et al. 2007); Turquía (Karadirek et al. 2012)
Europa	Bosnia Herzegovina (Kovac 2007); Bulgaria (Dimitrov et al. 2011; Paskalev et al. 2011); Chipre (Charalambous 2007); Croacia (Kovac 2007); España (Miguel, 2009; Aqualogy 2015; Martinez-Codina et al. 2015); Eslovaquia (VAG 2009); Grecia (Kanakoudis et al., 2014); Italia (Fantozzi, et al. 2009; Nicolini et al. 2010; Fontana et al. 2012); Macedonia (Ristovski 2011); Reino Unido (Awad et al. 2008; Awad et al. 2010; Li et al. 2010; AbdelMeguid 2011; IZO 2011; Wright et al. 2014); Serbia (Babic et al. 2014)
Oceanía	Australia (Sydney W.C. 2005; Girard et al. 2007; Mistry 2007; Bailey 2009; Beaton and Lambert 2013); Nueva Zelanda (Pilipovic et al. 2003)

La extensión geográfica de los estudios evaluados es muy heterogénea, habiéndose evaluado estudios acometidos en cinco continentes. Esta perspectiva se recoge en la Figura 3.4. El hecho de no limitar el análisis a un único caso o incluso una única región terrestre (sobre todo en el caso de proyectos implantados en redes reales) ha permitido reconocer rasgos distintivos de los métodos utilizados y los objetivos perseguidos en diferentes zonas del mundo.

Figura 3.4. Mapa mundial esquemático con localización de los proyectos más significativos analizados

Casos de estudio sobre técnicas de estimación de fugas mediante concepto CMN

Para evaluar la influencia de la ejecución de maniobras de reducción de presiones frente a la disminución de caudales fugados, se ha decidido aplicar métodos de cálculo basados en el concepto de CMN. Las razones son fundamentalmente dos:

- La primera es que se ha detectado un gran número de estudios que hacen referencia a este método entre otros motivos por su fácil aplicabilidad, lo que le hacen un método idóneo en la práctica profesional.
- La segunda es que, a pesar de esta gran relevancia, se ha detectado una falta de estandarización en su aplicación, convirtiéndolo en ocasiones en una técnica que puede dar lugar a errores.

A la hora de explorar la documentación especializada que hace referencia a este método, se ha detectado que se concentra en dos tipos de fuentes: informes o guías técnicas muy ligadas al ámbito de la práctica profesional en el que se presentan el concepto y su utilización desde un punto de vista metodológico general (Farley 2001; Lambert 1999; WRC 1994) y artículos de congresos y de ámbito académico-científico en los que se suele utilizar como herramienta para analizar un caso de estudio. Si bien el primer origen aporta información más general, el segundo caso es especialmente interesante al poner de manifiesto la diversidad de sub-métodos existentes. La Tabla 3.3, basada en un análisis similar llevado a cabo por Alkassseh et al. (2013), recoge algunos de los estudios más significativos en esta línea.

Tabla 3.3. Artículos con estudios basadas en CMN (versión extendida de Alkaseh et al., 2013)

Metodología	GP	País	Referencia
Modelo estocástico	No	España/EEUU	García et al., 2003
Caudal de Referencia Estimado (ERF – inglés)	No	Palestina	Mimi et al., 2004
Componentes nocturnas: ecuaciones empíricas	No	Rep. de Corea	Lee et al., 2005
Modelo (EPANET) y comp. nocturnas (WRC 1994)	No	Portugal	Covas et al., 2006
Modelo de simulación (EPANET)	Sí	Zimbabue	Marunga et al., 2006
Medida directamente	Sí	Australia	Girard et al., 2007
Comparación con métodos empíricos	Sí	Canadá	Hunaidi et al., 2007
Balance del agua; estimación límites de CM	Sí	Italia	Fantozzi et al., 2009
Ecuaciones empíricas; modelo simulación (EPANET)	Sí	Irán	Tabesh et al., 2009
Técnicas de calibración de modelo (EPANET)	No	Brasil	Cheung et al., 2010
Comp. nocturnas (WRC 1994)	Sí	Portugal	Gomes et al., 2010
Detección fugas mediante análisis sensibilidad presión	No	España	Pérez et al. 2011
Balance del agua; comp. nocturnas (WRC 1994)	Sí	Bulgaria	Kalinkov et al., 2011
Estimación CM; modelo simulación (EPANET)	Sí	Turquía	Karakirek et al., 2012
Análisis parámetros de consumos nocturnos	No	Portugal	Loureiro et al., 2012
Ecuaciones empíricas (Farley 2001; Lambert 1999)	No	Guyana	Peters et al., 2012
Análisis estadístico	No	Malasia	Alkaseh et al., 2013
Análisis de influencia de la temperatura	Sí	China	Wu et al., 2013
Modelo de optimización	No	Portugal	Ribeiro et al. 2015

En su estudio, estos autores enumeraron 5 artículos mientras que en el presente estudio se ha extendido la búsqueda a un total de 17, habiéndose adquirido una perspectiva más completa para elaborar el análisis. La información resumida es la siguiente:

- *Metodología (Columna 1^a)* – Resume el sub-método sobre el que se ha aplicado el concepto del CMN.
- *GP, acrónimo Gestión de Presiones; (Columna 2^a)* – La segunda columna indica si se el análisis examina la influencia de la gestión de presiones sobre la reducción de fugas.

3.1.2.3 Fase de análisis

En este capítulo se ha limitado a explicar los pasos metodológicos para llevar a cabo un análisis cualitativo basado en el Método de Estudio de Casos (MEC), cuyas fases principales se recogen en el diagrama la Figura 3.2. De estas fases, dos de ellas (*fase de análisis y fase de extracción de conclusiones*) se han desarrollado íntegramente en un capítulo en la sección de análisis.

Identificación de factores más relevantes

En primer lugar se organizó dicha información en bases de datos, destacándose los factores más relevantes de cada documento. Basándose en el número de apariciones de cada factor y su relevancia el estudio se han seleccionado 4 como los aspectos claves a

analizar: (1) objetivos que se persiguen con la regulación de presiones, (2) sectorización, (3) instrumentación utilizada y tipos de regulación y (4) modelos de simulación numérica de este proceso. Como se puede observar, estos cuatro factores son los que han sido desarrollados en el capítulo anterior (Capítulo 2. Estado del arte).

Análisis comparativo

Una vez identificados los factores clave o más influyentes en la operación de Gestión de Presiones se procedió a comparar los casos entre sí para poder extraer las oportunas conclusiones. Algunas de las técnicas que se llevaron a cabo para realizar este análisis fueron los siguientes:

- Observar de cada factor seleccionado, cuáles son los más comunes y cuáles se asocian a casos singulares. Si los resultados o conclusiones extraídas son similares, se trató de asociar patrones comunes en el diseño del plan de gestión de presiones.
- Agrupar los casos por contextos geográficos, sociales o culturales. Se pueden encontrar patrones o criterios comunes asociadas a estos aspectos.
- Ordenar los casos temporalmente, para poder deducir consideraciones sobre la evolución temporal de cada factor.

3.2 Desarrollo de un entorno de simulación de análisis hidráulico

La segunda fase metodológica ha sido la construcción de un entorno de modelación para simular los escenarios hidráulicos objeto de estudio. El desarrollo de este entorno se clasifica en las siguientes etapas:

- Formulación y algoritmos base utilizados para la resolución de redes de abastecimiento de agua.
- Formulación de técnicas de regulación de presión en cabecera.

3.2.1 Formulación y algoritmos base

En esta sección se describe la formulación y los algoritmos introducidos en la herramienta para la simulación de escenarios hidráulicos de redes de distribución. Estos se recogen esquemáticamente en la Figura 3.5 junto a algunos de los autores que han propuesto las expresiones más relevantes de cada sección.

Figura 3.5. Esquema de formulación utilizada para desarrollo de entorno de simulación

3.2.1.1 Esquema numérico ‘orientado a la presión’

La formulación utilizada para el desarrollo de este tipo de esquemas numéricos se basó en primera instancia en el sistema de ecuaciones y algoritmos matemáticos creados por la USAPE para el software EPANET (Rossman 2000). Éstos se han incorporado a través de ‘EPANET Programmer’s Toolkit’. Este *toolkit* ha sido adaptado como una ‘clase’ de Matlab, habiéndose utilizado el toolkit desarrollado por Kyriakou y Eliades (2015): EPANET-Matlab toolkit.

Esta librería se trata de un software de código abierto, desarrollado originalmente por el ‘Centro de Investigación KIOS’ para Sistemas Inteligentes y Redes de la Universidad de Chipre que opera dentro del entorno de Matlab, para proporcionar una interfaz de programación para la última versión de EPANET. El objetivo de EPANET Matlab Toolkit es servir de marco de programación común para la investigación y el desarrollo en el creciente campo de las redes de agua inteligentes.

Tras una primera aproximación en este entorno de simulación se comprobó que no era válida su utilización de forma integral para los objetivos planteados en esta tesis. Esto se debe a la formulación original inherente en la que se basa este software, fundamentada en

un enfoque de tipo ‘*deman-driven*’ o dirigido u orientado en la demanda de los nodos. Como se puede ver en el sistema de ecuaciones resultante de este tipo de esquemas (34), este tipo de análisis asume que las demandas son funciones conocidas en el tiempo y son independientes de la presión en el sistema. Esto imposibilita representar de forma realista algunos de los escenarios hidráulicos que se desean plantear, fundamentalmente aquellos aspectos relacionados con la dependencia del consumo en usuarios con la presión de la red: déficit de presión, tipos de consumidores dependientes de la presión, etc.

Para solventar este problema, se decidió modificar la formulación base y optar por esquemas de tipo ‘*pressure-driven*’ u orientados a la presión de la red como el que recoge el sistema de ecuaciones de la expresión (35) (Liserra et al. 2014, Liu et al. 2011, Pathirana 2010, Giustolisi et al. 2008, Cheung et al. 2005).

En cuanto al algoritmo para resolver el sistema de ecuaciones planteado se ha tomado el propuesto Giustolisi et al. (2008) y utilizado ampliamente por otros autores en una serie de competiciones científicas denominadas ‘*Battle of (...)*’ (Berardi y Giustolisi 2016; Giustolisi et al. 2014), enmarcadas en los congresos ‘Water Distribution Systems Analysis’ (WDSA) (ver 4.1.1.1 Contexto en el que se enmarca: BBLAWN).

3.2.1.2 Formulación de consumos

La formulación matemática para representar los consumos en usuarios en modelos de tipo ‘*pressure-driven*’ permite relacionar la demanda de cada nodo i (d_i) con su consumo real (c_i). De entre los diferentes enfoques que se pueden aplicar para la simulación de consumos, en esta tesis se han categorizado en tres grandes grupos en función del tipo de uso que se desea representar y su relación con la presión de la red. Estos son los siguientes:

- Consumo independiente de la presión: asociados a usos basados en consumo volumétricos.
- Consumos totalmente dependientes a la presión: basados en usos con salida de orificio libre a la atmósfera.
- Consumos parcialmente dependientes a la presión: basados en decisión de usuario.

Independientemente del tipo de consumo, todos ellos tienen en común la necesidad de una presión mínima para tenga lugar, definida mediante el parámetro P_{min} . Por debajo de este valor, el consumo será nulo, mientras que en caso de ser mayor, su valor dependerá del tipo de consumo que se trate.

El primer caso – consumos independientes – se ha formulado como un tipo de consumo que siempre se da en su totalidad igualando la demanda deseada por el usuario según (45):

$$c_i(P_i) \equiv \begin{cases} d_i \rightarrow P_i > P_{min} \\ 0 \rightarrow si P_i < P_{min} \end{cases} \quad (45)$$

El segundo caso – totalmente dependiente – se formula como un caudal de agua fluyendo de forma incontrolada por orificio libre (fórmula de Torricelli) con un coeficiente

de velocidad (C_i) correspondiente al tipo de dispositivo por el que se libera el flujo según (46):

$$c_i(P_i) \equiv \begin{cases} C_i \sqrt{P_i} \rightarrow P_i > P_{min} \\ 0 \rightarrow si P_i < P_{min} \end{cases} \quad (46)$$

El tercer caso – parcialmente dependiente – asociado a usos en los que el consumo se divide en dos escalones: una en la que interviene la decisión del usuario (para presiones bajas) y otra en la que el consumo es igual a la demanda deseada (para presiones altas). Esta relación de difícil generalización, se formula en este estudio según la propuesta realizada en Giustolisi et al. (2012), mediante la cual se define un valor de presión de servicio (P_{serv}) a partir del cual se produce este escalón. La expresión resultante quedaría definida según (47) y (48):

$$c_i(P_i) \equiv \begin{cases} d_i \rightarrow P_i > P_{serv} \\ C_i \sqrt{P_i} \rightarrow P_{min} < P_i < P_{serv} \\ 0 \rightarrow si P_i < P_{min} \end{cases} \quad (47)$$

$$C_i = \frac{d_i}{\sqrt{P_{serv}}} \quad (48)$$

Donde: c_i es el consumo real en cada nodo i , d_i es la demanda, P_i es la presión resultante del análisis hidráulico, P_{serv} es la presión a partir de la cual se considera que un servicio se satisface en condiciones normales y P_{min} la presión mínima necesaria para que tenga lugar caudal circulante (siendo este último un valor cercano a 0).

3.2.1.3 Formulación de caudales fugados

La formulación matemática para representar caudales fugados se ha tomado de Germanopoulos (1985). Ésta formulación, planteada para representar fugas de fondo, ha sido posteriormente extendida por numerosos autores en investigaciones relativas a modelación numérica (Nazif et al. 2010, Tabesh et al. 2009, Giustolisi et al. 2008). La mayor particularidad de su formulación es que se computa inicialmente a nivel de líneas de red (j), en lugar de los nodos. Así, esta se expresan según (49) la presión media en la línea ($P_{j,media}$) que se calcula como valor medio de las presiones en los nodos de conexión de dicha línea.

$$f_{fondo,j}(P_{j,media}) \equiv \begin{cases} C_j \sqrt{P_{j,media}} \rightarrow P_i > P_{min} \\ 0 \rightarrow si P_i < 0 \end{cases} \quad (49)$$

$$C_j(P_{j,media}) = \beta_j L_j P_{j,media}^{\alpha_j} \quad (50)$$

Donde $f_{fondo,j}$ son las fugas de fondo asociadas a las líneas j del modelo, β_j y α_j son parámetros asociados a las fugas en las conducciones y $P_{j,media}$ es la presión media en la conducción. En este estudio, no se consideran fugas puntuales asociadas a grandes roturas.

3.2.2 Formulación para implementar técnicas de regulación de presión en cabecera de sectores

El siguiente gran bloque de programación desarrollado para el entorno de simulación es la modelación de las **técnicas de regulación de presión en cabecera**. Los métodos programados han sido algunas de las más relevantes y extendidos globalmente (Vicente et al. 2015). Se pueden clasificar en dos grandes grupos en función de la naturaleza del elemento actuador (hidro-mecánicos o electrónicos) o en cuatro categorías en función de la variable que gobierna la presión de consigna. Estos son: (1) salida fija, (2) programación temporal, (3) modulación en función del caudal y (4) modulación basada en presión en punto crítico.

En este punto cabe reseñar varias hipótesis realizadas en el modelo construido:

- *La VRP tendrá un estado de funcionamiento ‘activo’ en todo momento (Hipótesis 1)* – El comportamiento de la válvula puede operar en sus tres formas tradicionales en función del escenario hidráulico en el que se encuentre: cerrada (si se detecta flujo en contrasentido al diseñado), totalmente abierta (en el caso de que la presión de consigna definida es mayor a la presión aguas arriba más la pérdida de carga mínima generada) o activa (cuando opera normalmente ofreciendo una presión agua abajo igual a la consignada). Ahora bien, a no ser que se especifique lo contrario, a lo largo del estudio se considerará que en todo momento la presión aguas arriba de la válvula será suficientemente elevada. Esto deriva en que su estado de funcionamiento sea ‘activa’ en todos los instantes, resultando la presión aguas abajo de la VRP la definida como presión de consigna.
- *La localización de la VRP será en un contorno de la zona de regulación actuando como punto de entrada al sector (Hipótesis 2)* – Los modelos tradicionales permiten la introducción de válvulas en cualquier punto de la red independientemente del tramo de sub-red que tengan aguas arriba. En el presente estudio, debido a la estructura de programación y la formulación desarrollada, existe la limitación de que aguas arriba de la misma tan sólo se exista una fuente de caudal entrante (tanques o embalses) unidos debidamente mediante la respectiva línea de esquema de red.

Estas hipótesis o limitaciones no interfieren en los objetivos del análisis al presentar situaciones realistas de los casos que se quieren representar: sectores regulados en cabecera (hipótesis 2) con un exceso de presión (hipótesis 1).

Se expone a continuación la formulación para representar cada técnica de regulación programada elaborada para implementar las nuevas propuestas conceptuales.

3.2.2.1 Técnicas de regulación y variables intervinientes

Las consignas de regulación han sido formuladas de acuerdo a las variables que gobiernan las mismas en cada caso. Se especifican a continuación:

Salida fija

En el caso de la Salida Fija (SF), caso más sencillo, bastará con establecer un valor de consigna único dado que este será constante a lo largo del tiempo (51):

$$P_{VRP}(t) = P_1\{cte\} \quad (51)$$

Programación temporal

La programación temporal se define a partir de la introducción de una serie de intervalos temporales a cada uno de los cuales se le asigna un valor de presión. La parametrización llevada a cabo es la siguiente:

- En primer lugar, se ha implementado la opción de diferenciar una consigna para cada día de la semana, atendiendo a la realidad existente en cuanto a la variación de consumos a lo largo de la semana. Entre las sub-opciones contempladas se encuentran: (a) seleccionar una única consigna para todos los días, (b) diferenciar entre días laborales y festivos, (c) diferencia entre ‘lunes a viernes’ y fines de semana y (d) una consigna para cada día.
- En segundo lugar, y ya enfocados en la variación diaria, se parametriza la variable independiente de la curva (tiempo) introduciendo el número de intervalos de los que se va a componer la curva diaria de consigna.
- Por último, se deben introducir los valores de la variable dependiente (P_{PRV}) para cada intervalo horario definido.

Modulación local basada en el caudal (1 entrada)

En el caso de la modulación basada en el caudal se ha programado tres sub-tipos de consigna correspondientes a tres técnicas de regulación que son gobernadas por esta variable.

- Función escalonada.
- Función continua expresada mediante ecuación analítica.
- Función continua linealizada por tramos.

➤ Función escalonada. La función escalonada sirve para representar sistemas de regulación gobernados por una serie discreta de pilotos mecánicos. Un claro ejemplo de este tipo de regulación es el de ‘*doble consigna, utilizando dos pilotos*’. En este caso, se define un valor de caudal de referencia (Q_{ref}) y dos valores de consigna asociados a cada uno de los pilotos – expresión (52): P_{VRP-1} y P_{VRP-2} . Cuando el caudal circulante es mayor a Q_{ref} el circuito hidráulico activa el primer piloto instaurándose la presión P_{VRP-1} . En caso contrario, si el caudal es menor a Q_{ref} , la presión de consigna será P_{VRP-2}):

$$P_{VRP}(Q) \equiv \begin{cases} P_{VRP-1} \rightarrow \text{si } Q_{tot} > Q_{ref} \\ P_{VRP-2} \rightarrow \text{si } Q_{tot} \leq Q_{ref} \end{cases} \quad (52)$$

- Función analítica. Otro tipo de modulación para regular la presión, gobernada por pilotos automáticos, es la relativa a dispositivos que tienen la capacidad de regular de forma continua en función del caudal (Dorot 2016c). Estos se pueden definir mediante expresiones analíticas que representen el fenómeno físico ocurrido a través de un circuito hidromecánico. En esta tesis se tomará como expresión de referencia una ecuación potencial (53) en la que se pueden configurar los parámetros asociados a la misma:

$$P_{VRP}(Q) = a * Q^b + c \quad (53)$$

Donde a , b y c son los parámetros a definir en función del dispositivo y de la consigna deseada.

- Función continua linealizada por tramos. Al igual que en el caso de la programación temporal, en la que se define la curva por tramos (en dicho caso discretizada en base al tiempo), este tipo de modulación requiere la definición de un número de tramos y después se asignan valores de presión de consigna a cada uno de ellos. Se define así, por tramos, una curva que relaciona presión y caudal con la flexibilidad que el usuario desee ofrecer a esta tarea. Este tipo de regulación es propio de dispositivos electrónicos.

Modulación local basada en el caudal (Varias entradas)

Aquellos casos de estudio en los que el sector tenga varias entradas, y se desee implantar este tipo de modulación en todas ellas, requiere consideraciones especiales a la hora de elaborar el algoritmo de control para que funcione de forma eficiente. Este algoritmo busca dar respuesta a un problema que ha ocurrido en la práctica profesional.

Yates y MacDonald (2007) llevaron a cabo en un distrito de Halifax, Canadá, varias estrategias de control en sectores con múltiples entradas: la primera con dos controladores de *basados en caudal* y la segunda un *controlador temporal* y otro en *función del caudal*. En ambos casos, el comportamiento de una válvula fue influenciado por la otra. En el primer caso, se creó un fenómeno de retroalimentación negativa, que finalmente resultó en el cierre completo de una de las válvulas. AbdelMeguid y Unalicki (2010) también encontraron este fenómeno desde un punto de vista científico cuando intentaron implementar un problema de optimización en un modelo de red de alimentación múltiple. En el segundo caso, se creía que el uso de un controlador TM para regular la segunda válvula era una buena idea, mientras que la válvula principal aseguraría un suministro adicional para las demandas de emergencia si fuera necesario. Sin embargo, su éxito fue limitado.

Para solventar este problema, los mismos autores del estudio de caso de Halifax, desarrollaron un método basado en la comunicación entre entradas (Yates et al., 2014). Primero, identificaron el problema y lo atribuyeron al hecho de que las dos válvulas estaban operando independientemente en el nivel de control. Cada controlador utilizó su propio medidor de flujo para regular la válvula correspondiente. Para corregir el problema, los controladores de cada estación de suministro tenían que utilizar la misma variable de proceso, es decir, el flujo total de ambos medidores.

Bajo esta premisa, se ha incorporado un algoritmo de control que contemple los hallazgos y la propuesta instrumental llevada a cabo por Yates et al. (2014). Considerando un sector con k entradas, cada una de ellas con una curva de modulación $P_{ab}^k(Q)$, la expresión que determina la presión en cada entrada será (54):

$$P_{ab}^k(Q) = \varphi^k \left(\sum_{n=1}^k (Q_n) \right) \quad (54)$$

Siendo φ la función que relaciona presión en una entrada k y caudal total entrante en el sector.

Modulación basada en presión en punto remoto

Por último se describen las ecuaciones introducidas para aproximar la regulación basada en presión en punto remoto. El funcionamiento de este tipo de regulación es que la regulación efectuada por la VRP en cabecera de sector genere una presión de salida de forma que en el punto crítico se alcance la presión de referencia teniendo en cuenta la diferencia de cotas entre ambos puntos y la pérdida de carga generada a lo largo del recorrido. En el presente estudio se trabajará bajo el supuesto de que el comportamiento hidráulico de la red cambia de forma instantánea ante una variación de sus condiciones de contorno. A pesar de que se trata de una hipótesis simplificativa del problema, es suficiente para abordar el análisis que se desea llevar a cabo.

Cabe destacar que para una representación fiel del comportamiento hidráulico de la red bajo esta técnica de control sería conveniente incorporar un parámetro de tiempo de control o recurrir a modelos dinámicos inerciales rígidos (aunque estos son poco adecuados para simular redes con un gran número de líneas estructuradas de forma mallada). El concepto de tiempo de control (T_c) define el intervalo entre dos periodos de adquisición de datos consecutivos para efectuar la regulación. A pesar de que la regulación en tiempo real ofrece en muchas aplicaciones mejores resultados cuanto menor sea T_c , en el caso de las redes de distribución, el orden de magnitud se debe considerar para T_c suele estar en el entorno de varios *minutos* para obtener una regulación en tiempo real efectiva (Campisano 2010). Esto se debe, entre otros motivos, a que el nodo está lejos del dispositivo y el estado del sistema no puede cambiar instantáneamente. Algunas aproximaciones planteadas en esta línea han establecido 5-minutos como intervalo para T_c (Page 2016, Giustolisi et al. 2015).

Una vez aclarado este aspecto, la consigna se determina en base a dos pasos:

- Establecimiento de consigna – En la mayoría de casos encontrados en la literatura se establece un único valor a lo largo del tiempo para esta consigna. Sin embargo, en la práctica real es habitual encontrarse casos en los que la consigna sea dinámica a lo largo del tiempo, pudiéndose definir dos o más presiones de referencia (por ejemplo, para diferenciar valores diurnos y nocturnos).
- Número de puntos críticos considerados – Otra hipótesis generalizada, tanto en la práctica profesional como en la mayoría de investigaciones recabadas, es la suposición de que el punto crítico es invariante espacialmente. Se recuerda que el punto crítico es el nodo con menor presión en la red bajo unas determinadas condiciones hidráulicas. En este estudio se contemplan las dos opciones: considerar un punto único (en cuyo caso se toma el punto de menor presión bajo un escenario de carga estático) o considerar una serie de nodos en función del caudal circulante y teniendo en cuenta la pérdida derivada.

3.3 Metodología para el diseño de consignas de regulación óptimas

En esta sección se describe la metodología propuesta para la definición de los valores de consigna óptimas para las diferentes técnicas de regulación descritas en el apartado anterior (ver 3.2.2.1 Técnicas de regulación y variables intervinientes). Este aspecto, crucial a la hora de diseñar cualquier tipo de plan de gestión de presiones, se trata sin embargo de uno de los puntos con mayor carencia de estandarización.

En la actualidad los valores de consigna, generalmente, se definen de forma ‘ad-hoc’ para cada proyecto según lecturas tomadas en in-situ o en base a la experiencia del encargado del diseño del plan (Sánchez-Jiménez 2008; Mistry 2007; Kovac 2007). Otro enfoque es el cálculo de los valores óptimos mediante problemas de optimización. Los problemas de optimización suelen ser aplicados sobre modelos numéricos, para los que se define tanto la función objetivo del problema como sus restricciones matemáticas. En el caso de problemas asociados a técnicas de regulación de tipo ‘Salida Fija’ se busca un valor único de consigna. La restricción más habitual introducida en estos casos, a parte de las inherentes al cumplimiento de balance energético y de caudales en la red, es establecer que todos la presión en todos los nodos sea superior a un valor preestablecido de referencia (Kanakoudis et al., 2014; Nicolini et al. 2010; Araujo 2006). Esta se expresa según (55):

$$P_i > P_{ser} \quad (55)$$

siendo i cualquier nodo de la red y P_{ser} la presión de servicio mínima deseada.

Proyectos con técnicas de regulación avanzadas como la ‘Modulación basada en Caudal’ o la ‘Programación Temporal’, que requieren curvas continuas como consigna, pueden introducir nuevas expresiones en su formulación. No obstante, la restricción anterior (55) suele mantenerse en todos ellos (AbdelMeguid y Ulanicki 2010). Esto hace que en ocasiones, el problema de optimización sea demasiado “rígido” y su aplicación en la práctica real no sea idónea desde varios puntos de vista: beneficio económico a la empresa operadora, beneficio medioambiental, etc. Este hecho se agrava considerando las particularidades de la zona de regulación.

Con esta finalidad se propone un algoritmo multi-criterio para diseñar valores/curvas de consigna de presión de regulación óptimas en VRPs, para sistemas de regulación estática/dinámica respectivamente. Se proponen diferentes criterios y expresiones como funciones objetivo y restricciones del problema para añadir flexibilidad en esta tarea, acorde a las necesidades de cada proyecto. La Figura 3.6, recoge esquemáticamente los pasos principales del algoritmo desarrollado:

- Primero se establece el problema a través de la función objetivo perseguida y la aplicación de las restricciones.
- Segundo lugar se calcula la curva óptima para el rango de caudales aplicable al caso de estudio en cuestión.

- Tercero y último, se ajusta la consigna más conveniente a la curva óptima teniendo en cuenta las restricciones aplicadas y las limitaciones de la técnica de regulación.

Figura 3.6. Esquema de algoritmo para búsqueda de consignas óptimas

3.3.1 Descripción del problema: funciones objetivo y restricciones

La función objetivo y restricciones del problema variarán en función de la finalidad perseguida en el proyecto. Esta tesis se ha focalizado en tres de ellos: disminución de fugas, disminución de caudal inyectado en la red (que aúna el caudal fugado más el consumido, y cuyo beneficio se asocia a periodos de sequía o escasez de recursos hidráulicos) y mejorar la calidad de servicio a usuarios. A estos tres, se añade un cuarto objetivo que no suele ser citado como objetivo en la literatura especializada (sobre todo en el ámbito académico) pero que es un aspecto clave en la gestión de esta operación desde el punto de vista de la empresa operadora: la repercusión económica derivada de estas operaciones.

3.3.2 Algoritmo para el diseño de curvas óptimas en función del caudal

3.3.2.1 Algoritmo para problemas de optimización de tipo ‘rígido’

Para determinar la consigna óptimo de este tipo de problemas se ha diseñado un algoritmo para determinar el valor óptimo teniendo en cuenta la restricción de que a todos los nodos de la red y en todo momento se les ofrezca una presión mínima de servicio P_{ser} definida por el usuario. Esta restricción se representa mediante la expresión (56):

$$P_i > P_{ser} \quad (56)$$

Siendo i cualquier nodo de la red. Los valores necesarios para el desarrollo de este algoritmo son los siguientes:

- P_{ser} : presión de servicio mínima deseada.
- P_{iter-0} : presión de consigna para inicializar el algoritmo iterativo de cálculo (puede ser definida por el usuario o asignada de forma predeterminada por la aplicación).
- P_{cab} : presión en cabecera, aguas arriba de la VRP.
- j_{max} : número máximo de iteraciones.
- P_{tol} : valor de tolerancia permitido para considerar válida la aproximación del valor calculado con el valor buscado.

La utilización de cada uno de estos parámetros se explica a continuación.

Paso 1 – Inicializar valor de consigna (P_{iter-0})

Para inicializar el algoritmo iterativo de búsqueda de la consigna óptima de regulación, el usuario puede introducir un valor de inicialización P_{iter-0} . La única consideración que se debe atender debido a restricciones hidráulicas de la red es que este valor inicial sea menor a la presión en cabecera aguas arriba de la VRP. Por ello, el primer criterio a la hora de establecer P_{iter-0} será que su valor sea igual a P_{cab} según la expresión (57):

$$P_{iter-0} = P_{cab} \quad (57)$$

También se va a evaluar como valor inicial el de P_{ser} (58):

$$P_{iter-0} = P_{ser} \quad (58)$$

Paso 2 – Modificación de valor de consigna P_{VRP} en cada iteración

El valor de consigna de la VRP (P_{VRP}) se irá modificando en cada iteración j partiendo del valor inicial definido anteriormente (59):

$$P_{VRP}(0) = P_{iter-0} \quad (59)$$

Este valor se irá modificando hasta el número máximo de iteraciones permitidas j_{max} (valor también configurable por el usuario). En cada iteración, el valor de la consigna varía con un incremento igual a la diferencia entre el valor resultante mínimo del modelo numérico (P_{min}) y la presión de servicio deseada (P_{ser}) acorde a la expresión (60):

$$P_{VRP}(j) = P_{VRP}(j-1) + \Delta(P_{min}(j), P_{ser}) \quad (60)$$

Siendo $P_{VRP}(j)$ la presión de consigna en la iteración j , $P_{VRP}(j-1)$ el valor de presión de consigna en la iteración anterior y $\Delta(P_{min}, P_{ser})$ la diferencia entre la presión mínima calculada – considerando todos los puntos de la red – y la presión de servicio mínima deseada.

En cada iteración se evalúa la diferencia entre la presión mínima resultante P_{min} y la presión de servicio mínima deseada P_{ser} . En el caso de que esta diferencia sea menor que el valor de tolerancia introducido (P_{tol}) se da por válida la solución tomando dicho valor como resultado final (61). En el caso de que el número de iteraciones alcance el valor máximo, se debe examinar el modelo tratando de detectar posibles errores en su diseño.

$$si \ |P_{min}(j) - P_{ser}| < P_{tol} \rightarrow P_{VRP}(j) = P_{VRP} \quad (61)$$

Paso 3– Repetir este proceso para un rango de caudales Q acorde al caso de estudio

Así, la condición (56) se transforma en su forma análoga dependiente del caudal (62):

$$P_i(Q_n) > P_{ser} \quad (62)$$

Siendo i cualquier nodo de la red y Q_n el caudal total circulante por el sector para cada uno de los n valores en los que se ha discretizado el problema (entendiendo como tal a la suma de consumos más fugas). Para cada caudal Q_n se determina el valor necesario de presión en cabecera para que se cumpla esta condición. Los pasos fundamentales son dos procesos iterativos, uno embebido en el otro:

- Un primer nivel de bucle iterativo ha consistido en discretizar el rango de caudales posibles de cada caso de estudio en un número suficiente de caudales para definir una curva continua $P_{PRV}(Q)$. El bucle siguiente se resolverá para cada uno de los valores Q_n definidos.
- Un segundo bucle iterativo consistente en los pasos ‘1’ y ‘2’ para cada uno de estos caudales.

3.3.2.2 Algoritmo para problemas de optimización de tipo ‘flexible’

En el caso de enfocarse el problema introduciendo otro tipo condiciones diferentes al caso anterior, se ha recurrido a un método de optimización basado en la simulación masiva de casos. Para ello, y gracias al entorno de simulación desarrollado, se calculan los resultados para un número de casos determinado cuyas condiciones de contorno se

encuentre dentro del rango factible de posibilidades. Los pasos específicos acometidos son los siguientes:

En primer lugar se discretiza el rango de valores factible de presión de consigna en un número suficiente para aproximar el valor óptimo. Una vez calculado el entorno del óptimo local, se discretiza dicho entorno con la precisión requerida y se vuelve simular cada uno de los casos para calcular nuevamente el valor óptimo.

La ventaja que presenta este método, es que permite su utilización para cualquier modelo numérico (independientemente de su formulación). Lógicamente, para su utilización se debe disponer del modelo de simulación numérica que represente cada uno de los escenarios requeridos. La otra ventaja es que el cálculo del óptimo se puede fundamentar en cualquier parámetro externo a dicho modelo, siempre y cuando se establezca la relación entre variables hidráulicas del modelo (presiones, caudales, fugas), y los parámetros externos: valore económico, indicadores de rendimiento, etc.

3.3.3 Definición de consignas en función de la técnica de regulación

Una vez definida la curva óptima, se elaborarán los correspondientes curvas que mejor se ajusten a ésta curva óptima. Según el tipo de técnica de regulación se desarrollará un tipo de algoritmo u otro.

Salida fija

Para asignar un valor a este tipo de consigna, se debe evaluar la presión en cada nodo i del sector, bajo el escenario hidráulico crítico de menor presión, equivalente al instante de mayor caudal demandado (Q_{max}) suponiendo una presión en cabecera constante (P_{cab}).

Programación temporal

En este caso, el valor asignado a cada intervalo temporal en el que se divide la curva ' $P_{PRV}-T$ ' debe obtenerse a partir del análisis de series temporales previas al inicio de las maniobras.

En patrones con una gran estabilidad (supongamos con estacionalidad perfecta), se puede ajustar con gran precisión cada una de los valores de consigna de los intervalos horarios a un valor de caudal y tomar para dicho tramo horario el valor correspondiente a la curva óptima del apartado anterior. En el caso de que P_{ser} deseada sea constante a lo largo del tiempo, esta condición restrictiva se puede expresar mediante los valores de dicha curva. No obstante, uno de los beneficios de este tipo de regulación es la posibilidad de establecer diferentes P_{ser} para distintos tramos horarios. En tal caso, la condición (56) se transformaría en la expresión (63), donde $P_{ser}(h)$ es la presión de servicio mínima deseada en función de la hora h .

$$P_i(h) \geq P_{ser}(h) \quad (63)$$

- En el caso de optar por una consigna día-noche como máximo se establecen dos valores de consigna P_{ser}^1 y P_{ser}^2 e indicar los instantes t_1 y t_2 en los que la consigna debe cambiar de un valor a otro.
- Cuando se desee una programación más modulada, se podrán definir tantos valores de presión como intervalos horarios.

Modulación basada en el caudal

Para el ajuste a otro tipo de consignas relacionadas con la modulación en función del caudal se realizan los siguientes procesos:

(a) Modulación continua (basada en función)

Dado que se basa en un ajuste de función potencial, se tomará la función de estas características con un mejor ajuste, evaluando este último mediante el coeficiente de determinación R.

(b) Doble consigna

En el caso de dispositivos básicos de pilotos automáticos doble pilotaje (activados alternativamente en función del caudal), se debe establecer en primera instancia el valor de caudal a partir del cual se activa uno u otro dispositivo (Q_{ref}) y en segundo lugar el valor de P_{PRV} para cada uno de los dos casos (P_1 y P_2). En este caso, se definen los criterios para establecer tanto Q_{ref} como P_1 y P_2 .

El valor de Q_{ref} se definirá a partir del historial de caudales entrantes en el sector. Tomando el rango de valores $[Q_{min}-Q_{max}]$, el valor de referencia se tomará como la media de estos dos valores según (64).

$$Q_{ref} = \frac{Q_{min} + Q_{max}}{2} \quad (64)$$

A partir de este valor se han determinado los valores de presión de consigna P_1 y P_2 . Siguiendo el criterio de que en todo momento se ofrezca una presión mínima a todos los usuarios, se establecen los siguientes valores de la curva óptima $P_{PRV}(Q)$ para los siguientes valores de Q, según (65):

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{PRV}(Q = Q_{ref}) \rightarrow si \ Q < Q_{ref} \\ P_2 &= P_{PRV}(Q = Q_{max}) \rightarrow si \ Q \geq Q_{ref} \end{aligned} \quad (65)$$

(c) Modulación continua por tramos

Por la propia definición de la función objetivo y las restricciones impuestas, la curva óptima a diseñar con este tipo de regulación es la propuesta en la resultante del apartado anterior. Esta función se discretizará en función del número de puntos introducidos.

Modulación basada en presión en punto remoto

En el caso de implantar este tipo de regulación, si sólo se utiliza un punto de monitorización y se haya corroborado la existencia de varios puntos críticos en función del caudal, es inevitable introducir algún error.

Como criterio más restrictivo se propone tomar el nodo que mayor rango de caudal abarca siendo el nodo crítico. Otra solución será tomar diferentes nodos como punto de referencia para regular la presión, en función del caudal circulante.

3.4 Metodología para estimación de fugas basada en el CMN

En esta sección se describe la metodología desarrollada, basada en el concepto de ‘Caudal Mínimo Nocturno’, para el cálculo de fugas. Este método se basa en un enfoque “de abajo hacia arriba” (término denominado como *bottom-up* en inglés). A su vez, el proceso se puede describir como una técnica multi-criterio al valerse de múltiples formulaciones con diferentes grados de sofisticación. Se pretende así que el método propuesto sea adaptativo a múltiples casos, independientemente del tipo de datos disponibles y las características del sector analizado.

Partiendo de los conceptos originarios del método de CMN, se han identificado los puntos con mayor incertidumbre y se ahonda en la resolución de cada uno de ellos con diferentes enfoques. En un capítulo posterior se analizarán cada uno de ellos comparándose los resultados obtenidos y evaluando el potencial error derivado de su utilización. La Figura 3.7 recoge de forma esquemática la metodología global de este método, basándose en la disposición de una serie limitada de variables como son: *presiones* (en cabecera de forma obligatoria y opcionalmente en punto crítico y punto de presión media), *caudales circulantes* (debiendo considerar tanto caudales entrantes como salientes) y *consumos en usuarios*.

Figura 3.7. Metodología general para el cálculo de fugas basado en el método de CMN

La expresión general y clásica, ya citada en el capítulo anterior, para extrapolar las fugas durante el CMN al resto de horas del día es la siguiente:

$$F(t) = F_{CMN} \frac{P(t)}{P_{CMN}}^{N1} \quad (66)$$

La estructura de esta sección se clasifica según cuatro puntos identificados como los más relevantes o de mayor incertidumbre a la hora de calcular el nivel de fugas mediante este método:

- Análisis de series de caudal suministrado a zonas urbanas – Balance hidráulico global y estudio de patrones de series de caudal y su influencia en el cálculo de la reducción de fugas por la regulación de presiones durante el CMN.
- Descomposición de CMN en sub-componentes principales del balance hidráulico: consumo, pérdidas reales y pérdidas aparentes.
- Cálculo de la presión media (P_{med}) mediante diferentes sub-métodos.
- Cálculo del exponente $N1$ que relaciona presión con caudal fugado y análisis de incertidumbre.

NOTA – Métodos de estimación de fugas tratados en esta tesis

El estudio de fugas en redes de distribución alude a múltiples procesos relacionados con este factor: detección de su aparición, localización, estimación de caudal fugado, etc. A su vez cada uno de estos fenómenos puede ser analizado mediante un amplio número de métodos, técnicas o dispositivos. Esta tesis se particulariza en los siguientes aspectos:

- **Proceso analizado:** *estimación de caudal fugado.* Se deja a un lado otras acciones relacionadas con la gestión integral de fugas como son la detección temprana o su localización. Para su análisis, algunos de los métodos más efectivos son las técnicas de análisis de datos mediante técnicas de inteligencia artificial y la utilización de instrumentación basados en métodos acústicos, respectivamente. En esta tesis, se analiza exclusivamente la estimación cuantitativa de caudales fugados.
- **Enfoque:** *determinista, basado en conceptualización física de este fenómeno.* De entre todos los dos grandes grupos aplicables a la estimación de fugas se ha optado por un enfoque determinista basado en formulación que representa procesos físicos. La formulación y expresiones tratadas a lo largo de esta tesis (ya sean tomadas de literatura especializada o propuestas originalmente) conlleva diferentes niveles de precisión: desde expresiones analíticas hasta parámetros simplificados, pasando por expresiones empíricas.
- **Ámbito o nivel dimensional:** *cálculo de fugas a nivel de sector.* Dentro de los estudios que analizan y el volumen o caudal ocurrido en redes de distribución existen dos niveles claramente diferenciados: estudio de fugas a nivel individual y estudio a nivel de sector. En este documento, si bien se alude en determinados apartados a conceptos propios de la modelación y cálculo de fugas individuales, el contexto general tratado es el nivel de sector o sub-tramo completo de red.

3.4.1 Análisis de series de caudal durante CMN

El primer paso para calcular el volumen de fugas en un sector es estimar su valor para el periodo de caudal mínimo. Según la expresión (26) para deducirlo hay que recurrir al balance hidráulico global de la red durante dicho periodo. Tras los conceptos descritos en el capítulo de sectorización, se incorpora un nuevo componente en la ecuación del balance incorporando los caudales salientes (Q_{Sal}). Así, junto al resto de componentes – caudal entrante (Q_{Ent}), consumo en usuarios (C) y fugas aparentes (F_{Ap}) – las fugas reales (F_{Real}) se deducen de la siguiente forma:

$$F_{Real} = Q_{Ent} - Q_{Sal} - C - F_{Ap} \quad (67)$$

Las dos primeras componentes de la fórmula corresponden a las entradas y salidas principales que fluyen hacia/desde el sector. Estas variables suelen estar monitorizadas por lo que no requieren cálculos mediante expresiones analíticas o formulación empírica. No obstante, para obtener un valor de caudal de referencia que pueda aplicarse con garantías al cálculo de fugas y al análisis de la gestión de presiones sobre su reducción, es conveniente tener en cuenta una serie de consideraciones. Tres de ellas han sido detectadas como aspectos claves, por lo que se han introducido en el algoritmo de cálculo como pasos fundamentales para efectuar este cálculo. Estos son los siguientes:

- **Balance hidráulico entradas y salidas de un sector** – En este primer paso cobra gran relevancia las clasificaciones expuestas en el capítulo anterior sobre los tipos de sectorización existentes (2.1.5. Clasificación de sectores según características hidráulicas y topológicas). Se consideran así conceptos como el número de entradas y salidas del sector, la temporalidad de las mismas (permanentes, temporales o en función del caudal) o la conexión entre sectores.
- **Análisis de datos de caudal (antes y después de la implantación del plan de GP) y ajuste de series temporales** – El segundo paso acometido es el análisis de posibles componentes temporales dentro de las series de caudal total que pueda distorsionar el cálculo del impacto de la regulación de presiones. Este concepto no ha sido encontrado en ningún estudio previo, y se considera de gran relevancia al poder introducir una distorsión significativa sobre los cálculos efectuados con este método.
- **Cálculo del caudal mínimo de referencia de un periodo determinado** – Una vez ajustadas las series de caudal, el último paso es determinar el valor que se tomará como referencia entre diferentes criterios que se pueden tomar para definir el caudal durante el mínimo nocturno: considerar un único valor, media de un rango de valores, periodo fijo o variable, etc.

3.4.1.1 Balance hidráulico de entradas y salidas

Se describen en este apartado las ecuaciones introducidas en el algoritmo de cálculo que atienden a las diferentes características de los sectores en cuanto a sus entradas y

salidas de caudal principales (sin considerar por tanto las extracciones por consumos ni las derivadas de fugas).

Número de entradas y salidas

- Número de entradas (Q_{Ent}) – Es habitual como se ha explicado encontrarse sectores con más de una entrada, debiéndose considerar todas ellas. Para un sector con n entradas el caudal total se introduce según (68):

$$Q_{Ent} = \sum_{i=1}^n Q_{Ent,i} \quad (68)$$

- Número de salidas (Q_{Sal}) – Análogamente, las salidas de cada sector han de considerarse conjuntamente. Así un sector con m salidas, se expresará de la forma (69):

$$Q_{Sal} = \sum_{i=1}^m Q_{Sal,i} \quad (69)$$

- Los sectores con aislación aguas abajo geográfica o topológica serán de la forma (70):

$$Q_{Sal} = 0 \quad (70)$$

Entradas temporales

La activación o apertura de alguna entrada (denominadas en ocasiones entradas ‘secundarias o auxiliares’) puede verse abocada al cumplimiento de un determinado escenario o circunstancia. Los más destacados son las siguientes:

- Entradas secundarias/auxiliares en función del caudal – Son aquellas entradas, con o sin válvula de regulación, que se activan cuando el caudal requerido por el sector supera un determinado umbral Q_0 :

$$Q_{Ent,sec} \begin{cases} \text{Operativa si } \sum_{i=1} Q_{Ent,i} \geq Q_0 \\ \text{Cerrada si } \sum_{i=1} Q_{Ent,i} < Q_0 \end{cases} \quad (71)$$

- Entradas secundarias/auxiliares en función del tiempo – Son aquellas entradas, con o sin válvula de regulación, que se activan durante un determinado intervalo temporal según la expresión siguiente:

$$Q_{Ent,sec} \begin{cases} \text{Operativa si } t \geq t_0 \text{ y } t < t_1 \\ \text{Cerrada si } t < t_0 \text{ o } t \geq t_1 \end{cases} \quad (72)$$

- Un caso especial de entrada en un sector es cuando se necesita crear una apertura no habitual debido a necesidades excepcionales, tales como: dar solución a un corte inesperado de la línea principal, pruebas o test de presión entre sectores adyacentes, etc. Este escenario también se ha incluido como un parámetro a introducir por el usuario en la herramienta.

Sectores conectados hidráulicamente

Cuando un sector está conectado hidráulicamente con otro sector adyacente (conexión en cascada, o sector temporal englobado en otro), existe una relación biunívoca entre ambos que debe ser considerada a la hora de realizar el balance hidráulico de ambos. En este caso, el caudal de salida del primero será igual al caudal entrante en el segundo. Suponiendo dos sectores $j=1$ y $j=2$, siendo el primero aquel situado aguas arriba y el segundo el situado aguas abajo (en términos hidráulicos):

$$Q_{Sal,1} = Q_{Ent,2} \quad (73)$$

3.4.1.2 Selección de periodo de estudio

El segundo paso ha sido determinar el periodo o instante que se va a considerar para analizar las fugas. Se pueden tomar varios criterios para la selección del periodo de estudio y calcular a partir de éste el valor de *caudal de referencia*. Varios aspectos pueden considerarse a la hora de determinar este caudal de referencia:

- **Hora o rango horario de referencia** – Si bien se puede emplear cualquier hora o rango horario como referencia temporal (Cabrera et al. 2005), está aceptado de forma generalizada la conveniencia de utilizar aquellos periodos en los que el caudal circulante por la red es mínimo. Los motivos ya han sido expuestos con anterioridad (ver 2.1.4 Método de estimación de fugas basado en el concepto de CMN). Dentro del tramo entendido como ‘periodo nocturno’ se puede seleccionar el valor mínimo diario, una misma hora fija, o la media de un periodo nocturno. Muchos autores han recomendado rangos horarios para calcular el caudal de referencia (GIZ 2011; Cheung et al., 2010; McKenzie 1999; UKWI 1994a), siendo la franja más recurrida entre las 02:00 y las 04:00 a.m.
- **Longitud del periodo** – Otro aspecto a considerar es la longitud de la serie. Ésta se puede reducir a un mínimo de un día y prolongar lo que se estime oportuno. Tomar periodos muy cortos puede ofrecer la ventaja de tener más control sobre los datos recabados; por el contrario, cualquier posible error cometido en la toma de datos o la estimación de consumos (debido al carácter estocástico de esta componente) suele ser suavizado al seleccionar periodos más largos.
- **Lapso o retardo temporal** – Por último, es importante conocer el perfil de caudal entrante (asociado al patrón de consumo en usuarios) y seleccionar si es conveniente un periodo de tiempo con un determinado retardo o lapso. En el caso de seleccionar un periodo corto de análisis y de existir variaciones significativas en los consumos en función del día de la semana, es conveniente tomar los datos con un lapso semanal. Por otro lado, si la longitud del periodo de estudio es larga y existen evidentes variaciones de consumos estacionales, puede tomarse un lapso anual para la selección de los datos. Una alternativa a este último criterio es el ajuste de los perfiles de caudal, eliminando componentes a largo plazo como tendencia o estacionalidad anual. Esto se desarrolla con más detalle en el apartado siguiente (ver 3.4.1.3).

3.4.1.3 Análisis y eliminación de componentes temporales a largo plazo para comparar Q_{CMN} antes y después de GP

Por último se describe un paso, no mencionado en la literatura especializada citada, de gran relevancia para el análisis de la influencia de la regulación de presiones sobre la reducción de fugas. Este consiste en analizar la existencia de posibles componentes a largo plazo en la serie temporal de caudales. Más concretamente se prestado especial atención a la posible existencia de:

- Estacionalidad anual
- Tendencia
- Heterocedasticidad condicionada a estacionalidad anual

Para efectuar el análisis de caudales de cada sector, se debe descomponer la serie total de caudal demandado Q_t en sus componentes en base de serie temporal (74), siendo estas: tendencia (T_t), estacionalidades (E_t) y la componente de irregularidad o ruido blanco (ε_t).

$$Q_t = T_t + E_t + \varepsilon_t \quad (74)$$

En cuanto a las estacionalidades, se pueden encontrar de diversa naturaleza en función de la serie temporal que se trate. En el caso de series de caudal de agua en entornos urbanos, las estacionalidades más destacadas son dos: diaria y anual (E_{t-d} y E_{t-a} respectivamente). Si bien la primera es prácticamente generalizada, existiendo ciclos diarios de consumo, la anual es consecuencia de múltiples factores por lo que se debe analizar su existencia o no en función del caso de estudio. Con todo esto, la expresión anterior se convierte en (75).

$$Q_t = T_t + E_{t-d} + E_{t-a} + \varepsilon_t \quad (75)$$

Pueden existir otro tipo de estacionalidades en sectores específicos: semanal, mensual, trimestral, etc. Pero estas son menos habituales. No hay que confundir la estacionalidad diaria con la existencia de estacionalidades de tipo diario que varíen según el día de la semana. Se abordará este detalle más adelante.

Todos los casos tomados presentan variación diaria. Si bien es una evidencia esta existencia, el tipo de estacionalidad varía entre unos casos y otros. La Figura 3.8 recoge de forma esquemática una serie de perfiles de consumo, todos ellos con estacionalidad, pero de diferentes características. Los esquemas presentados están basados en una serie más amplia propuesta por Donkor et al. (2014).

Figura 3.8. Tipos de perfiles de demanda con estacionalidad diaria (Donkor et al. 2014): (a) estacionalidad constante; (b) variación estacional cambiante; (c) estacionalidad constante en serie con componente de tendencia y (d) variación estacional cambiante en serie con tendencia.

Análisis de componente de estacionalidad anual (E_{t-a})

Dada la escasa longitud inter-anual de las series, no se ha podido implementar métodos clásicos de análisis de series temporales como los modelos estadísticos autorregresivos o de medias móviles (modelos AR, MA, ARMA o ARIMA).

Alternativamente, y dado el carácter periódico de las curvas de demanda, se ha optado por llevar a cabo varios ajustes de funciones analíticas y tomar la mejor alternativa. Las funciones que han sido consideradas, debido al carácter periódico de las mismas, han sido dos de naturaleza sinusoidal: series de Fourier y suma de funciones sinusoidal. El primer tipo de ajuste (series de Fourier) tiene la forma siguiente (76):

$$f(x) = a_0 + \sum_i^n a_i \cos(x * w) + b_i \sin(x * w) \quad (76)$$

Donde:

- $f(x)$ es la función de ajuste por series de Fourier
- a_0 , a_i , b_i y w son parámetros de ajuste.
- x es la variable independiente.
- n el orden del grado de ajuste de la función.

Por su parte, el ajuste por sumas de senos utiliza una terminología similar pero con la siguiente estructura (77):

$$f(x) = \sum_i^n a_i \sin(b_i x + c_i) \quad (77)$$

Análisis de componente de tendencia (T_{t-a})

Para considerar este efecto, se propone ajustar los datos a través de funciones analíticas o recurrir a métodos numéricos. Entre estas opciones destacan como opciones a valorar:

- Función lineal, cuando se intuya una variación constante en la tendencia: $\Delta T_t = 0$.
- Función de otro tipo (polinómicas, exponenciales, etc.) cuando se la variación vaya cambiando con el tiempo: $\Delta T_t \neq 0$.
- Deducción a partir del método de medias móviles, eliminando la estacionalidad diaria.

En ocasiones, para deducir la expresión que mejor ajusta a los datos se recurrirá a estadísticos básicos como el valor de ajuste de R-cuadrado.

Análisis de estacionalidad diaria (E_{t-d})

Se analiza a continuación la estacionalidad diaria, teniendo en cuenta que ésta puede ser estable a lo largo de todos los días o variar en función del día de la semana. En este sentido las posibilidades que se evaluarán son:

- Estacionalidad diaria estable todos los días (T1).
- Diferenciación entre días laborales y festivos (T2).
- Estacionalidad diferente cada día de la semana (T3).

Análisis de heterocedasticidad

Por último, una vez detectadas las anteriores componentes, se analiza la variabilidad de la componente aleatoria (ε_t), o lo que es lo mismo, si existe homocedasticidad o heterocedasticidad.

Si se detecta algún tipo de ley que gobierne esta variabilidad se efectuará la transformación correspondiente sobre la serie para considerar este efecto.

3.4.2 Descomposición de caudal durante CMN: estimación de consumo y pérdidas aparentes

3.4.2.1 Consumo en usuarios

En este apartado se tratan diversos conceptos que se han relevado como significativos para definir correctamente una metodología de estimación de consumo en usuarios (C). Destacan los siguientes puntos:

- *Tipo de datos disponibles en base a red de monitorización de consumos* – La exactitud con la que se estimará el consumo en un sector dependerá en gran medida del plan de monitorización que se esté llevando a cabo por parte de la

empresa operadora sobre esta variable. Se describirán algunos aspectos clave como: número de usuarios monitorizados y frecuencia de muestreo.

- *Desagregación de consumo total en sub-componentes* – Otro aspecto a considerar es el tipo de uso al que va destinado cada porción de agua. Cuanto mayor sea el conocimiento del tipo de actividad o aparato al que va destinado el volumen de agua, mayor será el número de sub-componentes en los que se pueda desagregar el consumo total. Este aspecto es especialmente relevante para el análisis de planes de gestión de presiones, al existir componentes total o parcialmente dependientes de la presión y otras independientes.

El plan de monitorización que se lleve a cabo sobre el sector de estudio influirá enormemente sobre la precisión en su valoración. Dos aspectos esenciales en este sentido son: (1) número de puntos de consumo auscultados y (2) frecuencia de muestreo.

- Número de nodos monitorizados – Cuanto mayor sea el número de puntos cuyo gasto es medido, mayor será la precisión en la apreciación final. Aunque este aspecto también dependerán íntimamente de la homogeneidad de los patrones de consumo. Así, sectores con mayor homogeneidad no requerirán tantos puntos de monitorización como otros con perfiles más heterogéneos.
- Frecuencia de muestreo – La frecuencia con la que se miden, transmiten y tratan los datos recabados por los equipos sensores determinará en gran medida el método que se pueda utilizar para evaluar el consumo. Los consumos en usuarios mediante contadores es una variable generalmente monitorizada por las empresas operadoras de agua, ya que de ello dependen los ingresos por facturación de agua suministrada. El problema, generalmente, es que la frecuencia con la que se reciben y tratan los datos de consumos es demasiado elevada (pueden aglutinarse los datos en periodos diarios, semanales o incluso mensuales). Con esta frecuencia es difícil desagregar temporalmente dicho volumen en valores horarios, mínimos recomendables para la utilización de los métodos basados en el caudal mínimo nocturno.

3.4.2.2 Parametrización empírica de consumos nocturnos

Si no se dispone de datos fidedignos basados en lecturas reales en contadores es habitual recurrir a aproximaciones basadas en fórmulas o parámetros empíricos utilizados en la literatura especializada. La mayor o menor semejanza de dichos valores con la realidad ocurrida en el sector de análisis también será un factor que influirá en la precisión de dicha estimación.

Utilización de formulación y parámetros referencia en la literatura

Uno de los enfoques utilizados en este estudio es el propuesto por Gomes et al. (2011) con algunas modificaciones. En dicho estudio, se propone una descomposición del consumo durante el periodo de mínimos nocturnos en 4 sub-componentes: fugas aguas debajo de contadores (y por tanto computadas como consumo en usuarios), consumo doméstico,

consumo no doméstico de pequeños consumidores y consumo no doméstico de grandes consumidores.

En la presente propuesta se modifica esta desagregación eliminándose la diferenciación entre pequeños/grandes consumidores no domésticos, por añadir complejidad no relevante a la desagregación de consumos. Con esto, la ecuación tomada para expresar el consumo en un sector k es la siguiente:

$$C^k = F_{ag-ab,con}^k + C_{dom}^k + C_{no-dom}^k \quad (78)$$

Donde: C es el consumo total, $F_{ag.ab,con}$ son las fugas aguas abajo de contadores, C_{dom} consumo asociado a usos en zonas domésticas y C_{no-dom} los consumo asociados a usos no domésticos. Es relevante esta desagregación ya que cada componente se comportará de forma diferente en relación a la presión de la red. Además, se simplifica la descripción de cada sub-componente, aludiendo al número A continuación se incluyen las expresiones con las que se calculan cada sub-componente:

$$F_{ag-ab,con}^k = F_{ag-ab,con} \times \left(\frac{P_{servicio}}{P_{ref}} \right)^{N1_{dom}} \quad (79)$$

$$C_{dom} = (Pob_{tot} \times Pob_{activa}) \times \left[C_{dom,p-indep} + C_{dom,p-dep} \times \left(\frac{P_{servicio}}{P_{ref}} \right)^{N2} \right] \quad (80)$$

$$C_{no-dom} = C_{no-dom,p-indep} + C_{no-dom,p-dep} \times \left(\frac{P_{servicio}}{P_{ref}} \right)^{N2} \quad (81)$$

Análisis de consumos mediante campañas ad-hoc

La utilización de formulación empírica ha sido ampliamente utilizada en numerosos estudios. No obstante, la incertidumbre asociada a su extrapolación a casos concretos puede ser muy elevada. En este sentido, es recomendable obtener datos específicos del caso de estudio en cuestión.

Entre los años 2001 y 2006 Canal de Isabel II se llevó a cabo una campaña de monitorización exhaustiva sobre una serie de viviendas de diferentes tipos con el fin de caracterizar en detalle el comportamiento de consumos desagregando en distintas componentes (Cubillo et al. 2008). Fruto de este análisis, se dedujeron los siguientes valores durante el periodo de caudales mínimos. Se trata de usos con un perfil típico por lo que estos mínimos se alcanzaban en todos los casos durante el periodo nocturno. En primer lugar se categorizan los consumos entre viviendas unifamiliares y plurifamiliares, para a continuación ofrecer valores distribuidos según tipos de usos (con diferente distribución para cada tipo de vivienda).

Los consumos durante el periodo nocturno se muestran en la Figura 3.9, donde se analizan los consumos durante franjas horarias entre las 2:00 am y las 5:00 am. Se comprueba como el mínimo se da entre las 3 y las 4 con un consumo medio de 5.9

litros/hora·vivienda, siendo menor en viviendas plurifamiliares (8.15 *litros/hora·vivienda*) que en viviendas unifamiliares (3.68 *litros/hora·vivienda*).

Figura 3.9. Consumos nocturnos según tipo de vivienda (Cubillo et al. 2008)

Estos datos son valores medio, obtenidos del análisis de dos periodos estacionales diferentes: verano e invierno. La Figura 3.10 muestra estos resultados.

Figura 3.10. Consumos nocturnos según tipo de vivienda y estación del año (Cubillo et al. 2008)

La desagregación en sub-componentes es detallada y la distribución porcentual difiere significativamente entre cada tipo de vivienda. Una de las principales diferencias, es la incorporación de un uso ‘exterior’ para viviendas plurifamiliares. La Figura 3.11 muestra esta distribución de usos.

Figura 3.11. Distribución de usos nocturnos según el tipo de vivienda (Cubillo et al. 2008)

3.4.2.3 Estimación de pérdidas aparentes

Para estimar las pérdidas aparentes F_{ap} se han establecido dos criterios: el primero más general y el segundo considerando el subconteo como componente relacionadas con el caudal consumido.

Criterio 1 – Volumen total de F_{ap} como porcentaje de caudal de consumo C

Considerar el conjunto de pérdidas aparentes como porcentaje respecto al agua total suministrada. De forma predeterminada, la aplicación introduce un valor igual al 2.75%, valor medio del rango propuesto por la AWWA para este tipo de pérdidas (2009) que lo determina entre el 0.5 y el 5%.

Criterio 2 – Relación empírica entre F_{ap} por subconteo y caudal consumido C

El tratamiento que se da con el segundo criterio difiere entre tres de las componentes (consumos no autorizados, errores de medición y errores de contabilidad) y la cuarta (subconteo). Para las tres primeras se mantiene una relación porcentual respecto a C . El subconteo en cambio se calcula a partir de expresiones empíricas deducidas de los valores propuestos en estudios experimentales (Criminisi et al. 2009 – ver Tabla 2.9). Este estudio arroja valores que relacionan las variables caudal (l/h) y error (%) para caudales de 35 y 120 (l/s) y diferentes edades de contadores. El error viene dado por la expresión (26):

$$\varepsilon = \frac{C_{ind} - C_{real}}{C_{real}} 100 \quad (82)$$

Donde V_{ind} es el volumen indicado por el contador y V_{real} el volumen real.

Para deducir el error en función del caudal de forma continua, se han definido funciones lineales a partir de los valores ofrecidos, y en función de la edad del conjunto de contadores, resultando funciones de la forma (83):

$$\varepsilon(C) = aC + b \quad (83)$$

Las fugas aparentes F_{ap} se calculan en función del error en la forma (84):

$$F_{ap} = C(-\varepsilon(C)/100) \quad (84)$$

El signo negativo del error representa que cuanto mayor es el error en signo negativo, es decir cuando menor sea el caudal no medido por el contador, mayor será el volumen de fugas aparentes. Finalmente, la expresión resultante es la siguiente (85):

$$F_{ap} = - \left(\frac{aC^2 + bC}{100} \right) \quad (85)$$

Los valores de a y b son función de la edad medio de los contadores y se recogen en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Valores de parámetros a y b para deducir F_{ap} en función del caudal consumido C

Edad del contador (años)	a	b
0-5	-3.99	0.04
5-10	-12.91	0.12
10-15	-13.66	-0.14
15-20	-11.75	0.11
20-25	-26.88	0.21
25-30	-38.32	0.30
30-35	-49.44	0.36
35-40	-60.18	0.43
40-45	-109.94	0.77

A partir de la edad media de contadores introducida por el usuario y los parámetros incorporados en la aplicación, ésta calcula el volumen de F_{ap} . Es relevante este factor dado que gran parte de las expresiones desarrolladas son aplicadas durante el periodo de CMN. Al analizar la influencia de la regulación de presiones sobre la reducción de fugas, también se podrá valorar (negativamente) el volumen que se dejará de facturar al considerar esta componente.

3.4.3 Cálculo de presión media zonal

Para el cálculo de la presión media zonal (P_{med}) se han incorporado varios métodos con diferentes grados de detalle, concretamente cuatro: (1) hidráulico, (2) topográfico, (3) basado en puntos representativos, y (4) basado en la pérdida de carga. Dos de ellos se fundamentan en técnicas utilizadas o propuestas por otros autores (método hidráulico y método topográfico) aunque introduciendo ciertas modificaciones para su aplicación en el presente estudio. Los dos restantes son originalmente desarrollados para este estudio.

Algunos de estos métodos requieren determinado tipo de datos por lo que su aplicación se verá abocada a la información disponible. La metodología global se recoge esquemáticamente en la Figura 3.12.

Figura 3.12. Metodología global para la determinación de la presión media (P_{med}) de un sector

Se procede a describir la metodología específica desarrollada para cada uno de ellos.

3.4.3.1 Método hidráulico

Este método, introducido para el análisis de sectores con modelos hidráulicos, requiere la presión en cada uno de los nodos de la red. La presión media ponderada horaria se calcula de forma dinámica para cada paso temporal, en función de un determinado factor de ponderación. Este valor resulta de la ecuación (27).

Los criterios que se han introducido como factor de ponderación son los recogidos en la Tabla 3.5:

Tabla 3.5. Factores de ponderación introducidos en la herramienta

Variable	Expresión
Uniforme	$w_i = 1$
Consumo	$w_i = c_i$
Longitud tuberías	$w_i = \frac{1}{2} \sum l_i$
Núm. acometidas	$w_i = \sum ac.$

Los tres primeras factores (*uniforme*, *consumo* y *longitud de tuberías*), ya fueron propuestos por Renaud et al. (2015) aunque uno de ellos (*consumo*) ha sido modificado.

En el presente estudio se considera el consumo real en cada paso temporal, mientras que los citados autores proponen el consumo medio diario. Además, es reseñable la referencia al *consumo* en lugar de a la *demanda*, variables que como se ha explicado anteriormente pueden diferir en modelos ‘basados en la presión’ con escenarios hidráulicos de presión baja. Para definir la *longitud de tubería* se ha tomado el criterio propuesto por Renaud et al., tomando la media de las longitudes de todas las conducciones que llegan a un nodo. Por último, se ha incluido un cuarto factor – *número de acometidas* – para aquellos casos en los que el esquema de red importado representa modelos con elevado grado de simplificación y cada nodo de red agrega múltiples acometidas.

3.4.3.2 Método topográfico

El método topográfico ha sido aplicado al análisis de los dos tipos de entradas de datos: modelos numéricos y datos reales referentes a la red de CYII. El proceso desarrollado para el cálculo de P_{med} es el descrito en el capítulo anterior (29), (30), habiéndose automatizado el proceso de lectura de alturas z_i y pesos w_i . En función de la naturaleza de los datos analizados se llevan a cabo los siguientes procesos.

3.4.3.3 Método de pérdida de carga entre dos puntos

Por último, se propone un método original para calcular la $P_{med}(t)$ basado en mediciones reales recabadas en varios puntos diferentes al punto representativo $i_{P_{med}}$. Este método surge como respuesta ante una necesidad detectada en la práctica profesional. A pesar de la conveniencia de monitorizar el punto de presión media para la estimación de fugas (EC 2015a; Lambert 2015 – comunicación personal), aún son muchas las empresas que no han estandarizado en su práctica habitual la localización y monitorización de dicho punto. En cambio, es habitual encontrarse un control continuo en dos puntos clave:

- *Punto o puntos de entrada al sector* – En estos nodos se toma la presión de cabecera aguas abajo de la válvula reguladora (P_{ab}), que será la que determine la presión en el resto de puntos del sector en función del caudal circulante y la pérdida de carga.
- *Punto o puntos críticos* – Estos nodos, son aquellos puntos del interior del sector que reciben menos presión ($P_{p.critico}$). Si bien el punto puede ser variable a lo largo del tiempo, salvo escenarios singulares suele corresponderse con un único punto (o región de puntos cercana) o a lo sumo dos puntos si existe variación de consumos significativa en diferentes zonas).

A partir de las medidas tomadas en estos dos puntos, se propone una metodología para deducir la P_{med} del sector de forma continua. Los pasos específicos se describen a continuación.

Paso 1 – Establecer punto representativo $i_{P_{med}}$ a partir del método topográfico

A partir del método hidráulico o topográfico determinar el $i_{P_{med}}$. En el caso de utilizar el método hidráulico, como se ha explicado anteriormente, este punto puede variar a lo

largo del tiempo. Para describir esta propuesta metodológico asumiremos que existe un único nodo.

Paso 2 – Establecer relación entre pérdida de carga en punto crítico y caudal circulante

Cada sector, en función de sus características topológicas y del rango de caudales circulante a lo largo del día, sufrirá una variación en la pérdida de carga. Para deducir la pérdida de carga en función del caudal puede establecerse una correlación entre ambas variables: caudal circulante (Q) y pérdida de carga (ΔH). La pérdida de carga se deduce según la expresión (86):

$$\Delta H_{crit}(Q) = P_{crit}(Q) - P_{crit}(Q_0) \quad (86)$$

Donde $\Delta H(Q)$ es la pérdida de carga en función del caudal Q ; $P_{crit.}(Q)$ es la presión medida en el punto crítico en función del caudal y $P_{crit.}(Q_0)$ es la presión en el punto crítico ante caudal circulante nulo, o lo que es lo mismo, la teórica presión estática. Como se puede observar en la Figura 3.13, la presión estática se puede deducir a partir de la presión en cabecera ante este escenario ($P_{cab}(Q_0)$) y la diferencia de cotas entre los nodos en cabecera (z_{cab}) y el punto crítico (z_{crit}) (87).

$$P_{crit}(Q_0) = P_{cab}(Q_0) + z_{cab} - z_{crit} \quad (87)$$

Uniendo las expresiones (86) y (87) y suponiendo una presión en cabecera constante independientemente del caudal, resulta la expresión que relaciona pérdida de carga con el caudal a partir de la medición de la presión en cabecera y punto crítico (88):

$$\Delta H_{crit}(Q) = P_{crit}(Q) - P_{cab}(Q) + \Delta z_{cab \rightarrow pt.crit} \quad (88)$$

Figura 3.13. Esquema de presiones resultantes en distintos puntos de un sector en función del caudal Q

Paso 3 – Establecer relación entre presión en punto representativo del sector (P_{med}) y presión en punto crítico (P_{crit})

El tercer paso es determinar la relación entre la pérdida de carga ocurrida en el punto crítico y la pérdida de carga del punto de presión media. Como se observa en la Figura 3.13 la presión en el punto de presión media tendrá un valor intermedio entre la presión en cabecera y la presión en el punto crítico que también resultará en función del caudal. Este método debe utilizarse con precaución ya que han de asumirse una serie de hipótesis simplificadoras, presentando algunas limitaciones que se enumeran a continuación:

- Debe establecerse de antemano una relación entre la pérdida de carga y la distancia al punto de cabecera. Esa relación, que sólo puede determinarse mediante modelación hidráulica, se puede suponer lineal entre la pérdida de carga medida en los dos puntos en los que se ha recabado datos de presión. En la Figura 3.13 se muestra cómo, independientemente de la pérdida de carga entre cabecera y punto crítico, se propone una pérdida de carga lineal. Esta relación se expresa a través de la ecuación siguiente:

$$\frac{\Delta H_{cab \rightarrow cri}}{L_{cab \rightarrow cri}} = \frac{\Delta H_{cab \rightarrow med}}{L_{cab \rightarrow med}} \quad (89)$$

- El punto representativo de la presión media es conveniente que esté localizado entre la cabecera y el punto crítico. Si bien se puede aplicar aunque no se dé esta circunstancia, la incertidumbre introducida es mayor.
- Se necesita la relación de distancias entre el punto de cabecera y el de presión media ($L_{cab-med}$), y entre punto de cabecera y punto crítico ($L_{cab-cri}$). En el caso de no disponer de la relación de distancias entre la cabecera y el punto representativo de la presión media ha de recurrirse a extrapolar una pendiente constante entre los tres puntos: cabecera, punto medio y punto crítico. Por lo tanto para deducir la pérdida de carga en este caso se debe asumir una pendiente constante que permita relacionar cota altimétrica con distancia recorrida por el fluido a través del sector.

$$\frac{\Delta H_{cab \rightarrow cri}}{z_{cab \rightarrow cri}} = \frac{\Delta H_{cab \rightarrow med}}{z_{cab \rightarrow med}} \quad (90)$$

Bajo estos supuestos, igualando las ecuaciones (89) y (90), y sustituyendo los términos relativos a la pérdida de carga por su relación con la presión y la diferencia de cotas (88), particularizando esta última para el punto crítico y el punto medio, se puede calcular la presión en el punto medio a través de (91):

$$P_{med}(Q) = P_{cab}(Q) - \Delta z_{cab \rightarrow med} - \left(\frac{\Delta z_{cab \rightarrow med}}{\Delta z_{cab \rightarrow cri}} (P_{cab} - P_{cri} - \Delta z_{cab \rightarrow cri}) \right) \quad (91)$$

3.4.3.4 Método de medición directa: varios puntos representativos en función del caudal

En la práctica profesional es habitual encontrarse que, para determinar la presión media de un sector de forma continua, se recurra a medir un punto de la red con sensores

de presión (2.3.3.2. Cálculo de la presión media de la red (P_{med}) – método de medición directa). El punto seleccionado como referencia, llamado *punto de presión media* ($i_{P_{med}}$), suele ser único, considerándose invariante a lo largo del tiempo. Bajo este supuesto, para estimar posteriormente el volumen de fugas, bastaría con monitorizar únicamente un solo nodo de la red. La selección de este nodo generalmente suele determinarse o bien mediante el método hidráulico o el topográfico, descritos anteriormente.

Sin embargo, en redes con una apreciable variación de pérdida de carga en función del caudal demandado (teniendo en cuenta tanto la variación temporal como la geográfica), la consideración de un único punto puede introducir importantes errores en el cálculo. Existen redes en las que la localización del nodo más próximo a la P_{med} puede variar significativamente, incurriendo en importantes errores si no se contempla este hecho. Algunos autores han abordado este problema, aunque de forma limitada. García et al. (2005) analizaron el potencial error que se cometía en la estimación de caudal fugado al considerar cada uno de los nodos de una red. Este análisis, abordó un problema de gran interés e influencia y poco analizado de forma generalizada, aunque consideraba ciertas simplificaciones que aquí sí se han plasmado.

Con esta premisa, se ha desarrollado un algoritmo para evaluar este hecho cuyos pasos principales se describen a continuación. Este módulo, sólo se encuentra disponible para la evaluación de modelos numéricos (no de series de datos reales) dada la lógica necesidad de disponer de un modelo completo del comportamiento de la red.

Paso 1 – Determinación de presión media ponderada de un sector (P_{med})

El primer paso consiste en el cálculo de la P_{med} para cada instante analizado (t) a lo largo de un día. Para ello, se ha utilizado el método hidráulico descrito anteriormente. Se obtienen así 24 valores de presión media, considerando el caso particular de un análisis a lo largo del día ($P_{med}(t)$).

Paso 2 – Cálculo de punto representativo de presión media en cada paso temporal

A continuación se calcula el punto representativo de la presión del sector $i_{P_{med}}$. Para ello, el algoritmo analiza la desviación entre la presión resultante en cada nodo (P_i) y la presión media ponderada P_{med} . A partir de las desviaciones ocurridas en cada instante de tiempo (para un análisis de periodo extendido) se calcula el error en cada nodo i y se toma como punto representativa aquel cuyo error es menor.

Esta desviación se puede determinar de varias formas. El primer enfoque calcula la desviación como media de los errores absolutos en cada paso temporal según la expresión (92):

$$i_{P_{med}} = i \rightarrow \min \left\{ \frac{\sum_{h=1}^{24} |P_{med}(t) - P_i(t)|}{24} \right\} \quad (92)$$

En el caso de querer penalizar con mayor significancia los valores más alejados a P_{med} se puede recurrir a tomar el error cuadrático medio como factor para medir esta desviación (93), criterio utilizado por García et al. (2006):

$$i_{P_{med}} = i \rightarrow \min \left\{ \sqrt{\sum_{h=1}^{24} (P_{med}(t) - P_i(t))^2} \right\} \quad (93)$$

Paso 3 – Selección de un conjunto mayor a uno de puntos representativos P_{med}

Por la propia definición de las expresiones anteriores el punto representativo $i_{P_{med}}$ es único a lo largo del día. En la práctica profesional este aspecto resulta muy conveniente y práctico en términos económicos y de gestión al poder disponer de la P_{med} con tan sólo un dispositivo de medición. Sin embargo, en sectores con una variación significativa en la pérdida de carga en función del caudal circulante, puede ser conveniente tomar varios puntos como “conjunto de puntos representativos”.

Tomar un elevado número de nodos dentro de este conjunto tampoco resultaría práctico al tener que evaluar continuamente cada escenario y decidir qué punto representa con más precisión la presión media. Pero cuando la desviación de un nodo según las expresiones anteriores varía notablemente ante determinados escenarios hidráulicos, sí que puede resultar adecuado tomar 2 o 3 nodos para evaluar la P_{med} .

Para ello, se ha incorporado un proceso de ‘ayuda a la decisión’ mediante el cual la aplicación recomienda la selección de varios $i_{P_{med}}$ cuando detecta una alta desviación del error de la P_{med} si se selecciona un solo punto. Los pasos de este proceso, particularizado para un análisis en periodo extendido diario (24 horas) son los siguientes:

- Calcular el $i_{P_{med}}$ en cada hora $h \{1:24\}$, pudiendo resultar un máximo de 24 nodos.
- Calcular el error en cada hora h y para cada nodo i que ha sido previamente determinado como $i_{P_{med}}$ en algún instante h .
- Establecer el rango de caudales circulantes $\{Q_{min}; Q_{max}\}$ tomando los valores mínimo y máximo del total de caudales analizados en el periodo extendido.
- Determinar el número de puntos que se desea tomar como puntos representativos.
- Calcular el caudal referencia (Q_{ref}) para el cual el error entre dos $i_{P_{med}}$ es igual (teniendo en cuenta su valor absoluto dado que el error de uno será de signo positivo y el otro de signo negativo).

Una vez determinado el valor de Q_{ref} se tomará como P_{med} el valor ofrecido por el $i_{P_{med}}$ seleccionado por la aplicación. Particularizando para 2 puntos representativos resultaría la expresión (94).

$$i_{P_{med}}(Q) \equiv \begin{cases} i_{P_{med}}^1 \rightarrow si \ Q_{tot} > Q_{ref} \\ i_{P_{med}}^2 \rightarrow si \ Q_{tot} \leq Q_{ref} \end{cases} \quad (94)$$

3.4.3.5 Método de medición directa: matriz de sensibilidad de presiones

Otro aspecto que se concibe relevante a la hora de determinar los puntos óptimos para instalar los sensores de presión es su capacidad para detectar la variación de presión que ocurre en la red debido a variaciones en el consumo en usuarios. Con cada escenario hidráulico, el balance energético del sector se redistribuye. Por tanto, la región de influencia varía en función del consumo en cada nodo, generándose diferentes pérdidas de carga. Una variación importante de consumos en una zona del sector que no sea capaz de detectar un sensor, puede inducir a errores a la hora de medir la presión a través de monitorización en un punto. Este aspecto cobra mayor relevancia cuanto mayor sea el carácter estocástico de consumos en el sector.

No se han encontrado referencias que aludan a técnicas de medición de presión media que consideren esta posible variación del escenario de consumos, ni a la posibilidad de aplicar métodos que tengan en cuenta el campo de sensibilidad de presiones que es capaz de detectar una determinado sensor.

Se propone así un método para identificar el campo de sensibilidad de cada nodo de la red ante la ocurrencia de variaciones en otros tantos puntos. Este método se basa en los estudios de sensibilidad de presión aplicados a otro contexto de la redes de distribución: la localización de fugas y su aislamiento a partir de la instalación de sensores de presión. Son múltiples los estudios que recurren a técnicas de “sensibilidad nodal a la presión” para el objetivo citado (Bort et al. 2014, Casillas et al. 2013, Pérez et al. 2011).

En esta propuesta se adapta este método para la búsqueda de la influencia de cada variación de consumo en un punto de un sector en la presión en el resto de nodos. Se crea así una matriz que denominaremos “matriz de Sensibilidad de regulación en cabecera (S)”. Esta se obtiene mediante la expresión (95):

$$S = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial q_n} \\ \dots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial q_n} \end{pmatrix} \quad (95)$$

Donde cada elemento s_{ij} de la matriz mide el efecto que tiene la variación de consumo (q_j) en cada punto en cuanto a la presión en cada nodo susceptible de ser monitorizado (P_i). En sectores de características habituales, tanto en tamaño como en grado de mallado, es extremadamente complejo determinar S de forma analítica. Bajo este supuesto, se plantea un análisis multi-escenario basado en la simulación de $i \times j$ casos, donde i es el número de puntos cuyo valor de presión es medido y j los nodos con variación de consumo. Cada elemento de la matriz se calcula ejecutando una simulación variando el consumo en cada q_j y calculando la variación de presión en cada punto P_i . Dado que se desea ver la sensibilidad global de todo el sector, la variación de consumos se inducirá sobre cada nodo del sector. Asimismo, como ‘a priori’ todos los nodos serán susceptibles de ser puntos representativos de la presión media, se evaluará la variación de presión en

todos ellos. Por lo tanto, resultará una matriz simétrica de $n \times n$, siendo n el número total de nodos del sector.

Esta matriz de sensibilidad dependerá de las condiciones de contorno de cada simulación (presión en entradas y demanda total o caudal circulante) (Pérez et al. 2011). Por este motivo es necesario realizar un análisis de la sensibilidad para cada uno de los escenarios posibles.

3.4.4 Métodos para determinar exponente N_1

La relación entre presión y caudal, de forma generalizada, suele expresarse mediante ecuaciones simplificadas como el conocido exponente N_1 (Lambert 2002) ampliamente referenciado en la literatura. El definir este coeficiente como un único valor es una medida adoptada de forma generalizada por la mayoría de casos prácticos. Sin embargo su reducción a un único valor es una simplificación demasiado vaga tal y como se ha discutido con anterioridad.

Despejando el coeficiente N_1 se puede estimar su valor siempre que se disponga de valores fidedignos de fugas y presiones en diferentes instantes de tiempo.

3.4.4.1 Parámetros empíricos de la literatura especializada

Los utilizados de forma habitual se comprenden dentro del rango entre 0.5 y 1.5. Valores menores a 0.5 no son contemplados dado que este es el exponente resultante de forma analítica de la expresión de Torricelli. Fantozzi y Lambert (2010) sugirieron valores de 0.5 y 1.5 fijos dependiendo de si los tubos son rígidos o flexibles, respectivamente.

No obstante, pueden darse casos en los que este exponente se eleve hasta valores próximo a 2.5, tal y como se ha comprobado en casos de estudio relativo a la red de abastecimiento de Japón (Lambert 2002).

3.4.4.2 Método del promedio entre tipo conducción: rígido/flexible

Este método se fundamenta en los parámetros del método anterior, pero a diferencia del anterior en el que se toma un mismo exponente para el conjunto de la red, se clasifican previamente las conducciones en función de los parámetros que más influyen en sus fugas como son: material, edad, etc.

Esta clasificación puede servir para establecer un valor diferente para cada conducción en función de estas características (en el caso de realizarse un estudio mediante modelos hidráulicos) o para extrapolar un valor medio a partir simplemente de las características de la red. Éstas generalmente pueden extraerse de archivos tipo SIG como capas vectoriales.

$$N_k^1 = \frac{\sum_{i=1}^n N_i^1 \times L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (96)$$

El valor del exponente N_1 asociado a cada tubería dependerá de la clasificación que se haga de este parámetro. Como clasificación base se puede tomar una desagregación de conducciones en función de si su material es rígido o flexible según la expresión (97):

$$N_i^1 \begin{cases} 0.5 & \text{si } j \text{ es rígida} \\ 1.5 & \text{si } j \text{ es flexible} \end{cases} \quad (97)$$

3.4.4.3 Método inverso

Para la utilización de este método es necesaria la disposición de uno o varios puntos con observaciones medidas y fiables, tanto de caudal como de presión. Como se ha explicado, durante el periodo en el que ocurre el mínimo caudal es cuando mejor se puede estimar el exponente N_i que relaciona caudal fugado con presión.

El periodo de mínimo nocturno no se circunscribe a un único instante, sino que puede considerarse un determinado rango de horas (generalmente entre la 01:00 am y las 05:00 am) en las que tiene lugar dicho mínimo.

En el caso de disponer de observaciones fiables, tanto de caudal como de presión, y estando convencidos de existir un número de volumen de agua significativo en relación al volumen de agua total introducido en la red, se puede determinar el exponente N_i a partir de estas medidas. Para ello, se debe realizar una operación inversa (de ahí el nombre asignado a este método) entre pares de valores Q-P en diferentes instantes. Despejando de la expresión clásica que relaciona ambos valores en distintos instantes (98) el exponente N_i se puede determinar según la expresión siguiente:

$$N_1 = \ln \left(\frac{F_1}{F_0} \right) / \ln \left(\frac{P_1}{P_0} \right) \quad (98)$$

Para determinar con mayor precisión este parámetro, es recomendable adquirir un gran número de mediciones correspondientes a distintos instantes y realizar la estimación del exponente a partir del valor medio de todas las medidas recogidas. En cuando a qué instantes considerar se puede llevar a cabo dos alternativas:

- Si se es consciente de que el periodo de caudal mínimo se prolonga a lo largo de varias horas cada día, se puede desagregar el periodo en varios tramos y tomar las medidas medias de cada tramo. Este método ha sido seguido por algunos autores (Cheung et al. 2010) tomando como rango de caudal mínimo el periodo comprendido entre las 2:00 y 4:00 y desagregándolo en intervalos de media hora.
- Otra alternativa es, si se dispone de datos durante varios días en los que existe una cierta variación de presión a la misma hora, se puede tomar como referencia la media de todo el intervalo considerado como mínimo y compararlo con los valores de otros días.

Es importante para llevar a cabo este método, que exista cierta variación de presión en las medidas comparadas para no cometer errores.

3.5 Recopilación de datos de CYII

En este apartado se describen los datos y la información recabados concernientes a las maniobras de regulación de presión. Las fuentes de información han sido dos:

- **Bases de datos corporativas de CYII** – Los datos extraídos o proporcionados por el equipo del departamento de I+D+I de la empresa fueron posteriormente tratados.
- **Campaña de monitorización** – Para tomar datos de presiones en puntos críticos, se elaboró una campaña de monitorización que se describirá en detalle en esta misma sección.

La naturaleza de esta información se puede categorizar en los siguientes grupos:

- *Series temporales de variables hidráulicas* – Se trata de series temporales de duración variable (según disponibilidad de datos) y paso de tiempo regular fijo. El tramo temporal obtenido en todas ellas abarca periodos tanto anteriores como posteriores al instante de inicio de maniobras de gestión de presiones. Las variables hidráulicas consideradas han sido cuatro: (1) caudales de entrada en sectores, (2) presión en cabecera de sector (aguas arriba de la VRP), (3) presión regulada en cabecera (medida inmediatamente a la salida de la VRP) y (4) presión en puntos críticos de cada sector.
- *Datos de las maniobras de regulación efectuadas en válvulas* – Fechas en las que se efectúa cada maniobra y las consignas asociadas. Entre las consignas se distinguirá entre: valores únicos para consignas “estáticas” o con salida fija y curvas de modulación para consignas dinámicas asociadas a controladores electrónicos.
- *Parámetros sobre caracterización de sectores* – Otro gran bloque grupo de información es la relativa a la caracterización de sectores. Esta puede referirse a varios aspectos: dimensiones (superficie ocupada, longitud de conducciones principales, número de acometidas), datos poblacionales (número de habitantes, número de contratos, tipo de viviendas), características topológicas del sector (número de entradas, número de salidas), orografía (cota o elevación de cada nodo significativo de la red, profundidad de instalación de tuberías).
- *Otros datos sobre sectores* – Por último, aunque no se visualice en los resultados y el análisis de este estudio, ha sido imprescindible para la gestión previa de los datos otro tipo de información de carácter auxiliar como: localización administrativa de cada sector, municipio en el que se encuentra, códigos identificativos de sector, códigos de la instrumentación instalada en ellos, etc.

3.5.1 Campaña de monitorización de presiones en puntos críticos

A pesar de existir una estructura de auscultación muy extensiva en la red de CYII, en el momento de la elaboración de esta tesis, la presión en puntos críticos (P_{pc}) no era una variable hidráulica controlada de forma regular. Los motivos principales por los que se ejecutó esta campaña fueron dos: (1) comprobar o evaluar la eficiencia de las maniobras de gestión de presiones implementadas por CYII, (2) adquirir información para poder utilizarla como parte de una de las propuestas originales planteadas para estimar el nivel de fugas.

La conveniencia y oportunidad de abordar esta tarea fue promovida por la Subdirección de I+D+I de Canal de Isabel II gestión y encomendada al Grupo de Investigación GIHGA de la UPM. El diseño, dirección y puesta en marcha de la campaña se llevó a cabo por el autor de este estudio realizando un plan *ad-hoc* para la toma de datos de esta variable en un buen número de sectores.

3.5.1.1 Alcance temporal y geográfico de la campaña

El periodo temporal en el que se tomaron datos abarca desde julio de 2011 hasta septiembre de 2014 dividiéndose en dos periodos:

- El primero enmarcada dentro del proyecto TecoAgua (desde julio del año 2011 hasta la finalización del proyecto en mayo de 2013).
- El segundo desde el 01 de septiembre de 2013 al 30 de septiembre de 2014.

El listado completo de sectores se recoge en la Tabla 3.6. En negrita y cursiva se destacan aquellos seleccionados para el análisis dado que sus periodos son coincidentes con los datos de otras variables hidráulicas.

Tabla 3.6. Listado de sectores monitorizados (destacados en negrita y cursiva aquellos seleccionados para el análisis)

Sectores monitorizados		
AF1 Moscardó Zofio	<i>Coslada Centro</i>	Pinto Área Empresarial
AF2 Parque Ciudad de Los Ángeles	Coslada Industrial	Pinto el Cascajal
AF2 Poligono Industrial El Gato	Coslada San Fernando	Pinto La Tenería
AF2 Poligono La Resina	E Camino Vinateros	Pinto el Cascajal
AF2 Villaverde Bajo	Fuenlabrada Este	Pueblo de Barajas
Alcobendas Alto	Fuenlabrada Loranca	Quijorna
<i>Alcobendas Centro Alto</i>	Fuente el Saz	Recinto Ferial Juan Carlos I
Alcobendas Centro Bajo	<i>Getafe Atalayuela</i>	Retamares Lucero
Alcobendas Industrial	<i>Getafe El Bercial</i>	Retamares Puerta del Ángel (1)
Alcobendas Moraleja Norte	<i>Getafe Este</i>	Retamares Puerta del Ángel (2)
Aranjuez la Montaña	Getafe Los Ángeles	Retamares Puerta del Ángel (3)
Arroyomolinos Avenida de Europa	Getafe Los Molinos	Rivas Industrial
<i>Barrio el Aeropuerto</i>	GO Ciudad Universitaria	T1 Barrio Buenavista
BC1 Aeropuerto	<i>Las Rozas Monteverde</i>	Titulcia Parte Alta
BC1 Aledaños de la calle Suecia	Las Rozas Punta Galea	Torrejón de Ardoz Soto del Henar.
BC1 Avenida los Andes	<i>Leganés Butarque</i>	Torrejón de la Calzada

Sectores monitorizados		
BC1 Barrio de Valdebernardo	Leganés PAU2	Torrejón Norte
BC1 Barrio Santa Eugenia	Leganés Valdepelayo	Torrejón Sur
BC1 Cárcavas de San Lorenzo	Manzanares el Molino	Valdemaqueda
BC1 Ciudad Pegaso	Móstoles Covimar	Valdemoro La Postura
BC1 Horcajo	Mostoles Parque Coimbra Alto	Valdemoro Este
BC1 La Paloma	Móstoles Princesa	Valdemoro Oeste
BC1 La Piovera	Navalcarnero Pueblo (1)	Valdetorres Pueblo
BC1 Palomeras	Navalcarnero Pueblo (2)	Velilla de San Antonio Casco Urb.
BC1 Polígono Rejas	Numancia y Portazgo	Velilla de San Antonio Políg. Ind.
BC1 Valderribas	Parla Oeste	Villanueva de la Cañada Moch.
Colmenar Viejo Este	Parque Empres. Juan Carlos I	Villanueva de la Cañada Pueblo

A lo largo de la primera fase se llegaron a monitorizar un total de 45 sectores. Esta fase se puede subdividir a su vez en dos etapas; la primera de aproximadamente 10 meses de duración (desde el inicio hasta los meses de abril de 2012) y la segunda con una duración de un año y 3 meses (desde abril 2012 hasta septiembre de 2013). Durante la segunda fase, de 1 año de duración, se han monitorizado un total de 37 sectores, dos de ellos ('Alcobendas Industrial' y 'Pinto el Cascajal') ya monitorizados durante la fase anterior. Al igual que el anterior caso, esta etapa se subdivide en dos etapas; la primera de una duración media de 8 meses (septiembre 2013 hasta mayo de 2014) y la segunda de 4 meses (junio/julio hasta finalización de contrato el 30 de septiembre de 2014). Así en total se han llegado a medir en algún momento 81 sectores, con una duración total de más de 3 años de periodo de estudio alternando fechas entre diferentes sectores.

No obstante, de este amplio número, se ha considerado aquellos cuya información se complementa temporalmente con la información recabada de otras variables: series históricas de caudal, de presión en cabecera y las consignas introducidas en las VRPs. En la Tabla 3.6, estos sectores están destacados en letra negrita y cursiva. También se pueden observar los sectores seleccionados en la

Figura 3.14. Mapa de red global de CYII (izquierda) y detalle de localización de sectores seleccionados para el estudio (derecha)

3.5.1.2 Instrumentación utilizada

La instrumentación principal utilizada está compuesta por un conjunto de tres dispositivos, cada uno con funcionalidades básicas en el proceso de monitorización:

- Transductor de presión – Ejerce las acciones de medición (sensor) y transducción o conversión de a una señal estándar (transductor).
- Registrador de datos (*datalogger*) – Almacenan las señales recabadas por los anteriores en forma de datos
- Equipo de comunicación – Transmiten los datos almacenados hacia servidores que posteriormente serán interpretados para aportar información.

A estos equipos, hay que añadir una serie de instrumentación adicional que ha servido para diferentes tareas: manómetro analógico para comprobar presión, herramientas para instalar equipos en acometidas, etc.

Sensores de presión

Como dispositivo principal para la toma de medidas se ha seleccionado transductores de presión de tipo manométrico de la marca ‘RS’ (RS® 2016). Las especificaciones técnicas más relevantes se resumen a continuación:

- Rango de lectura: $0 \rightarrow 10$ bar ($0 \rightarrow 101.97$ mca).
- Precisión: $\pm 0.25\%$.
- Salida analógica $4 \rightarrow 20$ mA

Se seleccionaron sensores con este rango de lectura al considerándose un rango adecuado para el tipo de nodos a monitorizar. La regulación de la empresa CYII define como presión mínima a ofrecer a todos los usuarios de 25 mca. A pesar de esto, la mayor parte de sectores de la red de CYII tienen una presión excesiva (debido entre otros motivos al funcionamiento por gravedad con una diferencia orográfica existente importante entre los puntos de origen y el destino final), por lo que podía preocupar superar el límite superior de lectura de los sensores. Tras consultar con la empresa los rangos habituales de P_{pe} , generalmente menores a dicho valor, se concluyó que se trataba de un rango conveniente para los objetivos del estudio. En cuanto a la precisión, también de concluyó que era suficiente al existir fuentes de incertidumbre bastante mayor a esta precisión, por lo que la imprecisión introducida por el sensor se podía considerar despreciable.

Registradores de datos – *dataloggers*

Las funciones de este dispositivo son las de, transducir, almacenar y transferir los datos medidos por el sensor de presión. Los equipos seleccionados fueron dataloggers de la compañía *Microcom*, por un lado el modelo ‘Nemos’ y por otro el ‘Nemos LQ’ (Microcom© 2016), siendo la diferencia más relevante que el segundo incluye una sonda de presión integrada. Algunas especificaciones técnicas destacadas son:

- Profundidad histórica de datos: 40000 registros
- Rango de presión (para *Nemos LQ*): $0 \rightarrow 10$ bar.
- Grado de protección de estanqueidad: IP67 con conexión estanca para todas las señales.

Estos dispositivos son sistemas de adquisición de datos de caudal y presión con comunicación GPRS concebidos específicamente para su instalación en arquetas y entornos con un alto grado de humedad (grado de protección IP67). Gracias a su bajo consumo y a las pilas de litio de alta capacidad integradas se obtuvieron autonomías de varios años en la operación estándar establecida (registro de caudal cada 5 minutos y transmisión vía GPRS diaria), sin necesidad de alimentación externa.

Se equipos especialmente diseñados para una sencilla instalación y diagnóstico del sistema. De este modo, los parámetros más importantes de estado del equipo se pueden visualizar fácilmente a través de los LED de estado que indican la intensidad de campo GSM y los posibles errores detectados, todo ello sin necesidad de ningún equipamiento especial. Es destacable su pequeño tamaño y el empleo de conectores IP68 de alta calidad para todas las señales. Todas estas características hacen del *Nemos LQ* un dispositivo particularmente adecuado para aplicaciones de control de mínimos nocturnos en redes de suministro de agua.

Estructura de comunicación y transmisión de datos

Para transmitir los datos almacenados en los dataloggers con una frecuencia de envío diaria, se utilizaron dos elementos:

- Antenas GSM – Se tratan de antena bibanda de 5dB, con base magnética para mejor sujeción y una longitud de cable de 2.5 m.
- Tarjetas telefónicas – Se contrataron tarjetas SIM (Vodafone y Movistar) con función de transmisión de datos vía GSM o GPRS.

Instrumentación y herramientas auxiliares

Como instrumentación auxiliar más relevante destacan los siguientes equipos:

- Manómetro analógico – Se utilizaron manómetros analógicos antes de la instalación de cada sensor de presión para comprobar dos aspectos: (1) que la presión en el punto de instalación no fuera superior al límite del rango del sensor, lo que podría ocasionar la rotura del mismo y (2) verificar que ambas presiones, la medida analógicamente y la digital obtenidas con el conjunto sensor/datalogger, eran iguales (teniendo en cuenta la posible desviación debido a la precisión de los aparatos).
- Llaves de cierre con válvula de bola – En cada punto de instalación se instalaron platos finales junto a una manguera acabada en llaves de paso con válvulas de cierre de tipo bola para permitir o bloquear completamente el paso del agua. Estas llaves permitieron el corte de caudal para efectuar la instalación correctamente.

- Ordenador portátil – Para la comprobación de los datos registrados *in-situ* fue necesario disponer en todo momento de un ordenador portátil mediante el cual visualizar los datos que se estaban almacenando en el datalogger.
- Baterías – Siempre se llevaron pilas de litio de 7.2v 14AH para la sustitución de las mismas en el caso de agotamiento de las anteriores.
- Herramientas y accesorios de fontanería – Para la colocación de los dispositivos se utilizaron todo tipo de herramientas, acoples de fontanería y accesorios como: llaves inglesas, destornilladores, teflón, boquillas reductoras de latón, bridas, etc.

3.5.1.3 Instalación en campo

La instalación del equipamiento en campo fue una de las tareas fundamentales a la hora de monitorizar la red. Durante esta fase, son múltiples los problemas e imprevistos surgidos, fruto de las dificultades propias del trabajo en campo.

Los puntos sobre los que se procedió a instalar los dispositivos de lectura y almacenamiento de datos vinieron determinados por la empresa operadora de agua de la red ‘Canal de Isabel II gestión’. Los puntos elegidos para colocar cada sensor se correspondió con aquellos nodos de cada sector de estudio a los que llegaba una menor presión, tomando el criterio generalmente de seleccionar el punto de elevación máxima o el más lejano a la cabecera del sector.

El proceso de instalación se ha tratado de estandarizar al máximo, para lo cual se ejecutaron en todos los sectores los mismos pasos, resumiéndose a continuación.

- Localización de punto de instalación y acondicionamiento de la seguridad de la zona.
- Lectura de presión mediante manómetros analógicos.
- Colocación de transductor de presión.
- Conexión e instalación registrador de datos o ‘datalogger’.
- Configuración de software para registro y transmisión de datos
- Fijación de equipos.

Localización de punto y acondicionamiento de la seguridad de la zona

El primer paso fue examinar la localización de los puntos seleccionados por la empresa CYII para instalar los sensores basándose en los siguientes datos suministrados: dirección, mapas SIG, ortofotos y nombre identificativo de la arqueta (Figura 3.15 – izquierda). Se prepararon rutas óptimas agregando zonas próximas para cada batida efectuada. Una vez en las proximidades de la zona, se buscó la arqueta interpretando las líneas de los mapas SIG y comparando con las líneas de las tapas de las arquetas desde la superficie. La arqueta correcta se diferenciaba al visualizar la manguera y llave de paso instalada por la empresa operadora.

Una vez situados en la zona de trabajo, la primera tarea a la hora de realizar cualquier actividad de campo fue garantizar las condiciones de seguridad, tanto de las personas encargadas de acometer la actividad en cuestión como la de cualquier otro sujeto que pueda verse afectado por las tareas desempeñadas. Para ellos se adquirieron conos y bandas de señalización de obra, dejando en su interior espacio suficiente para el trabajo de instalación (Figura 3.15 – derecha).

Figura 3.15. Plano SIG y ortofoto de punto de instalación (izquierda). Detalle de acondicionamiento de la seguridad de la zona (derecha)

Comparación de lectura de presión mediante manómetro analógico y digital

Para garantizar que la lectura obtenida por los transductores fuera la correcta, antes de proceder a su instalación se realizaba una lectura con manómetro analógico. El manómetro seleccionado fue de tipo Bourdon (Figura 3.16 – izquierda), tenía un rango de medición de entre 0 y 10 bares, suficiente para la presión encontrada en los sectores de estudio (entre 20 y 90 bares).

Figura 3.16. Lectura de presión mediante manómetro analógico y transductor digital

La lectura tomada por el manómetro era comparada por la ofrecida en tiempo real por el transductor (Figura 3.16 – derecha). Se daba por correcta una lectura del transductor si la diferencia entre ésta y la del manómetro era menor a un m.c.a (metro columna de agua), considerando la conversión $1mca = 0.1 \text{ bares}$.

Montaje de transductor de presión

El montaje del transductor de presión se efectuó acometiendo una serie de pasos para los que se requirió material de fontanería que permitieran el perfecto ajuste de los transductores sobre las llaves instaladas por Canal de Isabel II. Los pasos efectuados se resumen gráficamente en la Figura 3.17.

- Cambio de diámetro de boca de empalmen, cuando fuera necesario, mediante piezas de montaje de tipo contrarrosca hexagonales reductoras (Figura 3.17 – arriba/izquierda).

Figura 3.17. Pasos para colocación de transductor de presión

- Cubrimiento de rosca con teflón para evitar pérdidas de agua por goteo (Figura 3.17 – arriba/derecha).
- Instalación de transductor y ajuste (Figura 3.17 – abajo/izquierda).
- Apertura de llave de paso de caudal (Figura 3.17 – abajo/derecha).

Conexión de datalogger

Una vez conectado hidráulicamente el transductor a la red, se procedió a la conexión del datalogger o registrados de datos. Los pasos ejecutados en esta acción fueron los siguientes:

- Conexión de datalogger con transductor (Figura 3.18 – arriba/izquierda).
- Conexión de antena con datalogger (Figura 3.18 – arriba/derecha).
- Conexión de baterías 4x1.5 V (Figura 3.18 – abajo/izquierda).

- Finalmente, conexión ordenador portátil para configuración de software (Figura 3.18 – abajo/derecha).

Figura 3.18. Pasos para conexión de datalogger

Configuración de parámetros de señal de entrada

Los registradores de datos adquiridos de la marca Microcom©, en concreto los modelos citados (Nemos y Nemos LQ) incorporan su propio software para configurar todas las acciones de almacenamiento y transmisión de datos. En primer lugar se configuraron los parámetros relativos a la entrada analógica. En la Figura 3.19 se muestra la interfaz donde se configuran estos parámetros, para convertir la señal analógica adquirida del transductor de presión y su transformación en datos representativos de la magnitud física medida.

Figura 3.19. Configuración de entrada analógica

Los parámetros a introducir son los siguientes: nombre y unidades de la magnitud física medida, tipo de señal analógica recibida (en este caso miliamperios comprendidos en el rango estándar de 4-20 mA), y las equivalencias en magnitudes físicas que representan los límites inferior y superior de dicha señal (0 mca para 4 mA y 101.97 mca para 20 mA).

Configuración de parámetros de frecuencia de muestreo

La frecuencia de muestreo introducida fue de 5 minutos. Esta frecuencia se ha considerado suficiente para representar el perfil de presiones de un sector. La mayoría de estudios de referencia que aluden a la monitorización de datos en redes, citan un paso temporal 15-minutal como una frecuencia suficientemente precisa para representar la variación del escenario hidráulico en la mayoría de sectores de distribución de agua (EC 2015b, Mounce et al. 2011, Criminisi et al. 2009, Farley 2001).

En este caso se ha tomado un paso temporal de control 5-minutal (300 segundos) para tener mayor detalle del perfil de consumos (ver Figura 3.20). Menos frecuencia puede derivar en problemas relevantes de agotamiento de baterías como cita la hoja de especificaciones técnicas, habiéndose tratado de un problema en otros estudios similares (Savic et al. 2008).

Figura 3.20. Configuración de parámetros de frecuencia de muestreo

Configuración de parámetros de comunicación y transmisión de datos a servidor

Para finalizar la configuración del software asociado al equipo del datalogger, se introdujeron los parámetros necesarios para transmitir los datos almacenados en el registrador.

- En primer lugar se introdujo la frecuencia de volcado de datos, siendo un paso diario (Figura 3.21)

Figura 3.21. Configuración parámetros de volcado de datos

- El segundo conjunto de parámetros son los relativos a la comunicación GPRS, indicando el servidor de destino de los datos (dirección IP y puerto) y los parámetros APN propios de la compañía de la tarjeta SIM utilizada en cada dispositivo (Figura 3.22).

Figura 3.22. Configuración de parámetros de comunicación y transmisión de datos

Fijación de equipos

La fijación de los sensores se llevó a cabo con las precauciones y medidas necesarias para garantizar la precisión de la lectura tomada. Cada instrumento requiere sus propias especificaciones técnicas para cumplir estas garantías. En el caso de los sensores de presión hay un aspecto que debe considerarse: la altura de instalación respecto a la línea de caudal (z_{inst}).

La presión es sensible a la cota a la que se tome. Idealmente, convendría instalar el sensor de presión a la misma altura de la línea principal de flujo para minimizar el posible error introducido (ver Figura 3.23, izquierda). Sin embargo en muchas ocasiones fue

imposible instalarlo en dicha cota debido a varios motivos: falta de espacio para instar el sensor a dicha altura, elevación excesiva de la arqueta de acceso, etc. En estos casos se suele situar el sensor a una cierta altura respecto a la línea principal mediante la incorporación de una manguera u otro elemento de conducción entre la tubería y el sensor (Figura 3.23, derecha).

Figura 3.23. Instalación de sensor de presión en línea de flujo (izq.) o a altura z_{inst} (der.)

En estos casos, hay que tener en cuenta la diferencia de cotas a la que se instala el sensor para la medición de la presión real que existe en la tubería según la expresión siguiente:

$$P_{pond}^h = P_{medida} \pm z_{inst} \quad (99)$$

El símbolo $\pm$ vendrá determinado por la cota a la que esté situado el sensor respecto a la línea de flujo principal: $(-)$ si se localiza por debajo de ésta y $(+)$ si está por encima (siendo esta última el escenario más habitual).

3.5.1.4 Almacenamiento de datos en servidor y análisis preliminar

Los datos almacenados en el registrador y transmitidos por los equipos de comunicación se descargaban con una periodicidad diaria en servidores externos proporcionados por la propia empresa Microcom©.

3.5.1.5 Problemas detectados y soluciones adoptadas

Previa y posteriormente a la instalación de la instrumentación se ha llevado a cabo un protocolo de actuación para destinado a mantener el buen estado de los equipos y comprobar la validez de los datos obtenidos. Estas tareas se engloban en los siguientes grupos: (1) preparación de rutas y seguimiento de sectores, (2) testeo de equipos en laboratorio, y (3) comprobación de validez de los datos adquiridos.

- Si se colocaban los dispositivos en el fondo de las arquetas eran susceptibles de inundarse. Esto derivó en la necesidad de colocar los equipos a una cierta altura sobre el fondo del receptáculo que los contenía.

- Comprobar que se deja abierta la llave de paso de agua. En dos ocasiones se dejó cerrado sin percatarse hasta la primera recepción de datos...
- La presión en algunos casos superaba el límite superior del rango de lectura... +100 mca. Rotura de sensor
- Datos fallidos
 - Cuando hay fallo dato negativo, mala conexión = -10.2 mca
 - Cuando la presión es excesiva = 92.774 mca

Capítulo 4. Casos de estudio

Para aplicar las propuestas conceptuales planteadas y los algoritmos desarrollados, descritos en la sección metodológica se han tomado casos de estudio de naturaleza distinta:

- **Modelos numéricos** – Se ha tomado un modelo de red esquemática para analizar diferentes métodos y aspectos planteados en la sección metodológica. El modelo en cuestión se trata de la red ‘C-Town’ utilizada como *benchmark* en múltiples estudios (Berardi y Giustolisi 2016; Jolly et al. 2014). Este esquema, utilizado como referencia en diferentes apartados, se ha ido modificando *ad-hoc* en materia de condiciones de contorno (presión en cabecera y consumo en usuarios) y condiciones topológicas (número de entradas y orografía del terreno).
- **Modelos numéricos representativos de redes reales** – Un segundo bloque de modelos numéricos utilizados son dos modelos representativos de redes reales. El primero, modelo ‘ky2’ se trata de una red de la ciudad de Kentucky proporcionada por la empresa que gestiona este tipo de sistemas (*Kentucky Infrastructure Authority*) y ofrecida como caso de estudio en Jolly et al. (2013). El segundo, que denominaremos ‘esp1’ es un modelo numérico que representa un sector de distribución española ya utilizado por el autor de esta tesis en un estudio anterior (Vicente 2014).
- **Datos provenientes de sectores reales** – Por último se han tomado una serie de sectores de la red de abastecimiento y distribución de la Comunidad de Madrid, gestionados por la empresa ‘Canal de Isabel II gestión’. En esta sección, además de describir las características de los sectores de estudio y los factores que conciernen a las maniobras de regulación de presión, se desarrolla con detalle la campaña de monitorización elaborada integralmente por el autor de estudio para recabar datos de presión en puntos críticos.

A continuación se describen con detalle los aspectos más relevantes de cada caso de estudio así como la justificación y contexto metodológico en el que se aplica cada caso de estudio.

4.1 Modelos numéricos

En esta sección se presenta el segundo bloque de casos de estudio utilizados. El subcapítulo anterior presentaba una lista de sectores reales, instaurados a lo largo de las redes de abastecimiento y distribución de la Comunidad de Madrid. A pesar de suponer una fuente de información muy valiosa para los objetivos de esta tesis, una de las desventajas principales de dichas series es que los datos recabados corresponden a puntos singulares de cada sector, no disponiendo de información completa del comportamiento hidráulico de la totalidad de la red.

En el caso de que se desee conocer el comportamiento global de un determinado tramo de una red completa, hay que recurrir a modelos numéricos, con los que cuales sí que se puede evaluar el estado del caso de análisis en el punto que se desee. Por este motivo, y para poder completar el análisis de las metodologías propuestas, se ha tomado como segundo caso de estudio una serie de modelos numéricos representativos de redes reales. Mediante estos modelos, se tratarán de validar los algoritmos planteados en dos de las líneas principales desarrolladas: primero, en las maniobras que conciernen a la *gestión de presiones* y segundo, las propuestas dirigidas a mejorar la *estimación de caudales fugados*.

Los modelos elegidos para llevar a cabo estos análisis, ante la falta de esquemas numéricos detallados de los sectores analizados en la sección anterior, son una serie de modelos utilizados como *benchmarks* en la literatura especializada (Berardi y Giustolisi 2016; Jolly et al. 2014) y otro representativo de una red real española utilizado en un estudio anterior (Vicente 2014). Estos se describen a continuación:

- A) Modelo ‘C-Town’ (Berardi y Giustolisi 2016) – Se trata de un modelo numérico esquemático desarrollado originalmente para una serie de contenedores denominados ‘*The Battle of the Water Networks (BWN)*’ (Batalla de las Redes de Agua). A lo largo de los años, este modelo se ha ido evolucionando en distintas conferencias, habiendo evolucionado según el propósito de la competición. El modelo utilizado en este estudio ha sido utilizado en su concepción original, así como modificaciones del mismo llevadas a cabo para analizar distintos aspectos de la caracterización de sectores.
- B) Colección de redes UK Kentucky (Jolly et al. 2014) – Como segundo gran bloque de redes, se ha tomado una colección de redes reales cuyos modelos han sido ofrecidos por la ‘Universidad de Kentucky’. Estos modelos fueron descritos en la referencia citada, con la motivación de que sirvieran de *benchmark* en el área de las redes de distribución de agua con diferentes propósitos de investigación.
- C) Modelo representativo de red española (Vicente 2014) – Por último, se ha utilizado un modelo representativo de una red española (sin determinarse su origen específico), en el que también se han realizado diversas modificaciones atendiendo a los propósitos del estudio.

4.1.1 Modelo numérico esquemático: ‘C-Town’

A continuación se procede a explicar el modelo en el que se fundamenta el esquema numérico tomado como *benchmark* para este estudio.

4.1.1.1 Contexto en el que se enmarca: BBLAWN

El esquema numérico utilizado como caso de estudio es un esquema de red denominada ‘C-Town’. Se trata de un modelo utilizado de forma extendida en el ámbito académico-científico. El contexto en el que se encuadra este esquema es una serie de eventos que han tenido lugar durante las últimas conferencias ‘Water Distribution Systems Analysis’ (WDSA) de gran relevancia en el sector de las redes de abastecimiento y distribución. Dentro de estas conferencias, y desde hace más de una década se han propuesto una serie de “batallas” o competiciones. El último precedente data del año 2014, durante la 16ª edición de este congreso y la competición fue titulada como ‘*Battle of Background Leakage Assessment for Water Networks* (BBLAWN)’ (Berardi y Giustolisi 2016; Giustolisi et al. 2014).

El objetivo de estas competiciones es desarrollar y proponer nuevas metodologías y/o algoritmos para la modelación de fenómenos relacionados con el abastecimiento y distribución de agua urbana en redes a presión. En cada edición se han establecido esquemas numéricos estandarizados, sirviendo como plataforma para comparar resultados entre las diferentes propuestas metodológicas. Según ha ido evolucionando este tipo de eventos, también han evolucionado los esquemas utilizados. No obstante, las tres últimas ediciones coinciden en la utilización de un modelo único, habiéndose convertido en un referente para la propuesta de problemas de simulación y optimación en este campo. Cada edición se caracteriza por el planteamiento de un nuevo enfoque en cuanto a la búsqueda de soluciones aplicables a redes de abastecimiento y distribución.

Tabla 4.1. Contienda acontecidas relativas a la “Batalla de las Redes de Agua”

Ed.	Año	Nombre de la contienda	Reference	Lugar congreso
1 ^a	1985	Battle of the Water Networks (BWN)	-	-
2 ^a	2006	Battle of the Water Sensor Networks (BWSN)	Ostfeld et al. 2008	Cincinnati, Ohio (USA)
3 ^a	2010	Battle of the Water Calibration Networks (BWCN)	Ostfeld et al. 2012	Tucson, Arizona (USA)
4 ^a	2012	Battle of the Water Networks Design (BWN-II)	Marchi et al. 2014	Adelaide (Australia)
5 ^a	2014	Battle of the Background Leakage Assessment Water Networks (BBLAWN)	Berardi y Giustolisi 2016	Bari (Italia)
6 ^a	2016	Battle of Water Networks - DMA ¹	-	Cartagena (Colombia)

¹ En el momento de redacción de la presente tesis, aún no había tenido lugar la última edición asociada a este serie de eventos: 6ª edición (Battle of Water Networks - DMA), correspondiente al congreso WDSA – Cartagena, Colombia.

En la Tabla 4.1 se recogen las diferentes contiendas que han tenido lugar en este marco con algunos de los datos sobre las conferencias en las que se desarrollaron.

4.1.1.2 Características del modelo

El esquema utilizado representando el modelo numérico de la red ‘C-Town’ está representado en la Figura 4.1. Se trata un esquema representativo de un tramo de red muy adecuado para los propósitos de este estudio al estar compuesto por varios tipos de patrones de demanda, lo cual se puede asimilar a la existencia de varios sectores.

Figura 4.1. Visualización desde software EPANET de modelo de red ‘C-Town’ (Giustolisi 2016)

Para la mejor aplicación de la metodología propuesta en el capítulo anterior se han introducido una serie de modificaciones sobre la estructura original de esta red que se resumen a continuación:

- En primer lugar, se ha dividido la red completa en sub-tramos o sectores asociados a cada uno de los patrones de consumo que tienen lugar. Es decir, en cada sector, todos los nodos interiores de consumo siguen un mismo tipo de patrón, si bien la demanda base puede ser diferente. Esta sub-división se puede contemplar en la Figura 4.2. Una vez descompuesto el modelo en los 5 sub-modelos (S1, S2, S3, S4 y S5), se han tomado los correspondientes a los sectores S1 y S2. La selección de los mismos se ha basado en su tamaño y el número de elementos que contienen. El resto de sectores (S3, S4 y S5) no se consideraron adecuados para la finalidad de este estudio por sus reducidas dimensiones (poco representativos de sectores reales).

Figura 4.2. Sub-división del modelo en sectores según tipo de patrón de demanda.

- A continuación, se introdujeron una serie de modificaciones enfocadas a eliminar cualquier elemento regulador existente. Así, se han eliminado las bombas de impulsión así como tanques de regulación (estos últimos, en ocasiones se han transformado por elementos tipo embalse) (ver Figura 4.3).

Figura 4.3. Modificaciones efectuadas sobre modelos numéricos

- Por último, inmediatamente aguas debajo de cada embalse (representativos de puntos de conexión con red de alta en redes de abastecimiento) se incorporaron automáticamente una VRP con la consigna deseada para cada caso.

Los sectores resultantes, S1 y S2 se recogen gráficamente en la y sus características principales se resumen en la Tabla 4.2.

Figura 4.4. Esquemas de los sectores analizados de modelo ‘C-Town’

Tabla 4.2. Características de los esquemas numéricos extraídos del modelo ‘C-Town’

Sector	Nodos		Conducciones			Número entradas	Rango cotas
	#	Rango demanda (l/s)	#	Longitud (km)	Diámetro medio (mm)		
S1	132	[30.2 → 96.6]	150	23.94	240.7	1	[4.17 → 58.0]
S2	103	[18.5 → 62.2]	116	15.11	171.6	1	[32.0 → 113.08]

En cuanto a los perfiles de consumo, todos los puntos internos de cada sector siguen un patrón común, pero diferentes en cada sector. Estos tienen una duración total de 168 horas (7 días) con estacionalidad diaria propia de redes urbanas. Estos patrones se recogen gráficamente en la Figura 4.5.

Figura 4.5. Patrones de consumo semanales de los 2 sub-sectores analizados del modelo ‘C-Town’

4.1.1.3 Modificación de características de sectores ‘C-Town’

Con el objetivo de analizar diversos aspectos relativos a la caracterización de sectores y su relación con el impacto de la GP sobre estos, se han efectuado algunas modificaciones sobre los sectores utilizados como *benchmark* en este estudio. Así, los parámetros que han sido variados son los siguientes:

- Orografía – Se ha cambiado la cota de los nodos generando diferentes perfiles orográficos: sectores con diferentes perfiles de pendiente (progresión constante, irregularidades o ‘picos’ internos) y diferentes rangos de desnivel máximo.
- Número de entradas – Partiendo de la base de sectores con una única entrada (localizada en el punto natural de conexión del modelo ‘C-Town’), se han añadido en sendos modelos una segunda entrada.
- Patrón de consumos – Se ha desarrollado un generador de perfiles de consumo con los que generar diferentes tipos de patrones teniendo en cuenta variabilidad tanto temporal como espacial.

Modificación de la orografía

Uno de los parámetros que desea analizar es la influencia de la orografía del sector en la gestión de presiones. Para ello, se ha modificado la cota de los nodos de cada sector con el fin de obtener distintos perfiles de sector (Figura 4.6).

Figura 4.6. Variación del perfil orográfico del sector ‘S1’

Modificación del número de entradas

Respetando la entrada natural de caudal de cada uno de los dos sectores, se ha añadido sendas conexiones en otros puntos para evaluar el impacto que supondría la inclusión de una segunda entrada en los sectores analizados (Figura 4.7).

Figura 4.7. Variación del número de entradas en sector 'S1'

Modificación de perfil de consumos

Por último, el tercer parámetro modificado ha sido el patrón de consumos interno. Esta variación se ha introducido en dos sentidos:

- *Variación espacial* – Asignando diferentes valores a cada nodo del sector. En este caso se han considerado pequeñas variaciones aleatorias de la demanda base de cada nodo, tomando un coeficiente de variación del 50% sobre su valor original.
- *Variación temporal* – Introduciendo distintos patrones de consumo a lo largo del tiempo (fijando el mismo patrón para todos los nodos). En este caso se han introducido diferentes escenarios de patrones de consumo: (1) estables a lo largo (con variación estacional diaria pero sin variación inter-diaria), (2) con variación estacional diaria, misma tendencia global pero variación inter-diaria y (3) con variación estacional diaria y variación estacional anual (lo cual genera una tendencia a corto plazo).

4.2 Sectores reales – red de CYII

Se ha utilizado como segundo gran bloque de casos de estudio un conjunto de sectores reales pertenecientes a la red de abastecimiento y distribución de la Comunidad de Madrid. Estos están gestionados íntegramente por la empresa Canal de Isabel II Gestión, empresa operadora y gestora de casi la totalidad de la infraestructura de abastecimiento de agua en esta región geográfica. Concretamente colección de casos seleccionada consta de aquellos sectores en los que se introdujeron maniobras de gestión de presiones en cabecera durante el periodo 2010-2014.

En el presente apartado se describen los aspectos más significativos concernientes a este caso de estudio. Se resume en los siguientes apartados:

- Contexto en el que se enmarca el caso de estudio – En la última década, CYII ha introducido importantes planes estratégicos, renovando la gestión de su red. Dos de los más relevantes han sido un *plan de sectorización* global (abarcando la práctica totalidad de su red) y otro *plan de gestión de presiones*. Ambos planes, estrechamente ligados entre sí, se encuentran entre los proyectos más importantes a nivel nacional en este ámbito. Otra razón fundamental a la hora de seleccionar este caso de estudio es que fue el marco en el que se desarrolló un proyecto de investigación – proyecto TecoAgua (BOE 2010) – en el que participaron conjuntamente la empresa CYII junto a la universidad UPM.
- Datos utilizados – Los datos utilizados conciernen a las maniobras de gestión de presiones realizadas por parte de la empresa CYII. Las fuentes de información para recabar estos datos fundamentalmente son dos: (1) bases de datos corporativas de la empresa (en las que se recopilaron datos sobre las maniobras de regulación en VRPs, series históricas de presiones y caudales en cabecera de sectores y características topológicas de sectores) y (2) campaña de monitorización realizada *ad-hoc* por el equipo de la UPM (a través de la cual se obtuvieron datos de presiones en puntos críticos).
- Descripción de campaña de monitorización – La citada campaña de monitorización para recopilar información sobre presiones en puntos críticos fue dirigida y realizada íntegramente para cumplir los objetivos de la presente tesis. Por este motivo se describen con detalle los aspectos más relevantes de la misma, destacando los siguientes: (1) preparación y ejecución de la campaña, (2) instrumentación utilizada y (3) sectores monitorizados y periodos durante los que se ha recabado datos.

4.2.1 Contexto y alcance del caso de estudio

El contexto en el que se encuadra el presente caso de estudio se puede resumir en dos aspectos: (1) planes estratégicos desarrollados por la empresa CYII (en particular un *plan de sectorización* y otro de *gestión de presiones*) y (2) el proyecto de investigación

‘TecoAgua’, en el que se ejecutaron tareas específicas relacionadas con la monitorización y el análisis de datos de presiones, para la consecución de algunos de los objetivos propuestos en la presente tesis.

4.2.1.1 Planes estratégicos instaurados en la red de CYII

Evolución de plan de Sectorización

Como primer paso a la implantación de zonas de regulación de presiones, en la red de CYII, se produjo previamente un extensivo **plan de sectorización**. La idea de una mayor compartimentación y control de la red de distribución fue ganando fuerza motivado fundamentalmente por varios aspectos:

- *Preocupación por la escasez de agua* – Siempre se ha conocido que un porcentaje importante del agua derivada de los embalses y captaciones se perdía antes de llegar al contador de los usuarios. Se intuían sus causas principales: usos municipales no controlados, fugas y roturas en conducciones, fraudes, subconteo de contadores, etc., pero se desconocía dónde podían concentrarse esas pérdidas. Con la llegada de periodos de gran escasez de agua acrecentó la preocupación por la eficiencia de los sistemas de abastecimiento surgida en la década de los 90 debido a una de las sequías más severas que se recuerdan en la región de Madrid.
- *Crecimiento urbanístico* – El incesante crecimiento que tuvo lugar a lo largo del siglo XX en las grandes ciudades de la región trajo como consecuencia una estructura de las redes bastante desordenada, e incluso anárquica.

A finales de la década de los 90 se hicieron varios estudios sobre la viabilidad de sectorizar las zonas de demanda. Se disponía entonces de un modelo hidráulico calibrado y actualizado del esqueleto (red básica) de la red de distribución del municipio de Madrid. Partiendo de ese modelo, y con ayuda de sistemas de información geográfica corporativos, se fueron creando modelos detallados con la red completa de cada una de las zonas de demanda de la capital, y posteriormente del municipio de Móstoles.

Entre los años 1996 y 2001, se desarrollaron unos estudios de sectorización de varias zonas de presión del municipio de Madrid y del municipio de Móstoles. El objetivo era dividir en grandes sectores estas zonas para su mejor control. Solamente se consiguieron implantar en campo dos zonas piloto. Hubo grandes dificultades para la instalación de caudalímetros en la red de distribución, ya que no existía apenas ninguno instalado con antelación a estos estudios y supuso un gran choque en la empresa el cerrar sectores, cuando la cultura era mallar lo máximo posible.

Fue en 2004 cuando la dirección del Canal decidió definitivamente abordar la sectorización de las redes, iniciándose los trabajos en 2005. Un primer punto de partida fue el plan TEDIS iniciado unos años antes y que consistía en la instalación de instrumentos de medida telecontrolados, de caudal y nivel, en los más de 200 depósitos locales existentes. En muchas ocasiones estos depósitos alimentan pequeños núcleos de población que constituyen, por sí mismos un único sector, o pueden desdoblarse fácilmente en un

reducido número de sectores. Con este precedente, la sectorización se fue expandiendo por toda la red de Canal hasta convertirse en un '**Plan de Sectorización**' que durante el periodo que abarca el alcance temporal de datos de esta tesis (2010-2014) seguía siendo uno de los planes estratégicos de la empresa.

Evolución de planes de Gestión de Presiones en CYII

Posteriormente, y estrechamente ligado al anterior se sucedió el '**Plan de Regulación de Presiones**'. Un plan a gran escala de la envergadura como el acometido en la red de CYII, es conveniente que evolucione de forma paulatina. Esto permitió ir conociendo el comportamiento de los procesos instaurados, detectando problemas inicialmente no esperados y pudiendo dar solución a los mismos de forma específica. Por ello, en el marco de este programa, los sectores regulados se han ido implantando poco a poco, comenzando con una serie de pruebas piloto para más adelante llevar a cabo una implantación más global.

Desde el año 2004 en el que se colocó la primera válvula reductora de presiones (VRP de aquí en adelante) en la cabecera de un sector, hasta la fecha de finalización del periodo de análisis de esta tesis (2014) con 101 sectores completamente gobernados por VRPs, el crecimiento del número de sectores regulados fue progresivo. Anteriormente a 2004, múltiples sectores ya se encontraban gestionados en cabecera por VRPs u otro tipo de elementos reguladores. Sin embargo, no fue hasta 2004 cuando se instaura por primera vez un sector de estas características en el marco del plan global de regulación de presiones de la red de Canal. La Figura 4.8 muestra la progresión de instalación de sectores regulados en cabecera desde el año 2011 hasta 2014.

Figura 4.8. Número de sectores con inicio de plan de GP durante periodo de estudio (2011-2014)

4.2.1.2 Alcance temporal

El alcance temporal en el que se enmarca el caso de estudio coincide con la duración del proyecto de investigación ‘*TecoAgua*’: desde febrero del 2010 hasta el año 2014. El Proyecto TEcoAgua fue cofinanciado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) dentro del subprograma de apoyo a consorcios estratégicos nacionales de investigación técnica (CENIT-E) al amparo de la Orden CIN/1559/2009 (BOE 2010). Dentro del mismo se desarrollaron diferentes actividades y tareas. El contrato en el que se enmarcan las actividades de esta tesis correspondió al apoyo prestado al Canal de Isabel II en la implantación de un plan de gestión de presiones en la red de distribución de agua de la Comunidad de Madrid.

A lo largo de más de cuatro años (2010-2014), el Grupo de Investigación de Hidroinformática y Gestión del Agua (GIHGA) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), junto al departamento de I+D de Canal de Isabel II, trabajaron conjuntamente en el desarrollo de un Sistema Integrado para la Gestión Avanzada de Presiones (SYGAP) y otra serie de tareas que se citan a continuación:

- Desarrollo de una guía técnica para la elaboración de planes de Gestión de Presiones.
- Análisis de información concerniente a pruebas piloto de gestión de presiones desarrolladas por la empresa CYII en su infraestructura.
- Elaboración de un software para la evaluación y seguimiento de maniobras de control de presiones en redes sectorizadas.
- Monitorización de presiones en puntos críticos de más de 70 sectores. Esta última tarea tuvo continuidad a través de un contrato de investigación específico para tal propósito y coordinado por el autor y directores de la presente tesis.

4.2.1.3 Alcance geográfico

El alcance geográfico del estudio cubre una colección de sectores repartidos territorialmente a lo largo de la Comunidad de Madrid. Esta zona geográfica está gestionada en su práctica totalidad por la empresa CYII, colaboradora en el citado proyecto. En la Figura 4.9 se puede observar un mapa esquemático de la zona de actuación referida. A la derecha de la figura, se observa un detalle de la red de distribución (azul) junto a la zonificación (gris) que delimita cada uno de los sectores.

Figura 4.9. Alcance geográfico correspondiente a sectores de la Comunidad de Madrid

Del conjunto de sectores instaurados hasta la fecha de finalización del periodo de estudio (un total de 344 sectores), se seleccionaron aquellos en los que se iniciaron las maniobras de regulación de presiones dentro del periodo 2010-2013 (Tabla 4.3).

Tabla 4.3 Listado de sectores considerados como caso de estudio

Sector de estudio	Fecha inicio	Componentes					
		E_{t-a}	T_t	E_{t-d}			H_c
				T1	T2	T3	
Alcobendas Centro Alto	30/03/2012	Sí	-				No
Barrio el Aeropuerto	13/12/2011	-	-				No
BC1 Horcajo	18/01/2013	-	-				No
BC1 La Piovera	12/12/2011	Sí	-				No
BC1 Parque Empr. JCI	11/12/2011	Sí	-				No
Coslada Centro	06/05/2011	Sí	-				Sí
Getafe Atalayuela	20/12/2012	Sí	-				No
Getafe El Bercial	25/09/2012	Sí	-				No
Getafe Este	18/11/2011	Sí	-				No
Las Rozas Monteverde	14/12/2011	Sí	-				Sí
Mostoles Parque Coimbra	12/07/2011	Sí	-				Sí
Parla Oeste	19/05/2011	Sí	-				Sí
Torrejón Sur	06/07/2011	Sí	-				No
Valdetorres Pueblo	29/11/2011	-	-				No

4.2.2 Series temporales de variables hidráulicas

Los datos sobre variables hidráulicas recabados de cada sector son heterogéneos en cuanto a duración de periodo y punto monitorizados. Los datos se pueden encontrar en el 'Anexo A: Pre-tratamiento y análisis preliminar de datos de sectores reales de la red de CYIF. Las variables utilizadas son las tres siguientes:

- Caudales – Todos los sectores disponen de caudalímetros en sus entradas por lo que las series de caudales están disponibles en todos los sectores.
- Presión en cabecera – Existen sectores en los que se dispone de datos de presión en cabecera únicamente aguas arriba de la VRP. Éstos han sido descartados al no disponerse de una variable fundamental para efectuar el análisis como es la presión aguas abajo del dispositivo de regulación.
- Presión en punto crítico – No todos los sectores fueron monitorizados en punto crítico.

4.2.3 Consignas de regulación

Durante el periodo que abarca el análisis llevado a cabo, coincidente con la duración del proyecto TecoAgua (2010-2013), se pusieron en marcha maniobras de regulación de presión con los cuatro tipos de regulación descritos a lo largo del documento:

- Regulación estática o de *salida fija* – SF
- Programación de la presión basada en el tiempo – $P(t)$ o $P-T$
- Modulación de la presión basada en el caudal – $P(Q)$ o $P-Q$
- Modulación de la presión basada en presión en punto remoto o crítico – $P(P_c)$ o $P-P_c$

De todas ellas, la regulación de tipo *salida fija* ha sido la más implantada durante el periodo de estudio. Éste es el tipo de control más básico y económico al suponer el funcionamiento “natural” de una VRP y no incorporar controladores electrónicos. Utilizando el argot empleado por CYII, denominaremos a este tipo de control como regulación *estática*. El resto de técnicas que sí están gobernadas por dispositivos electrónicos quedarán englobadas en el grupo de técnicas *dinámicas*.

4.2.3.1 Consignas estáticas

Las consignas en la regulación de tipo *estático* son valores únicos, dado que este tipo de ajuste ofrece una presión fija aguas abajo de la válvula.

Tabla 4.4. Parámetros asociados a maniobras de regulación con consigna de tipo *estática*

Sector de estudio	Fecha inicio	Presión media aguas arriba (m.c.a.)	Consigna regulación (m.c.a.)
Barrio el Aeropuerto	13/12/2011	85	55
BC1 Horcajo	11/09/2012	60	50
BC1 La Piovera	12/12/2011	80	54
Getafe Atalayuela	20/12/2012	97	50
Getafe El Bercial	25/09/2012	69	55
Getafe Este	18/11/2011	45	35
Las Rozas Monteverde	14/12/2011	45	34

Parque Empresarial Juan Carlos I	11/12/2011	55	40
Valdetorres Pueblo	29/11/2011	45	35

La Tabla 4.4 muestra los siguientes parámetros asociados a las maniobras de regulación estática: fecha de puesta en marcha de las maniobras de regulación, valor fijado como consigna de regulación y presión media habitual existente aguas arriba de las mismas.

4.2.3.2 Consignas dinámicas

A lo largo del tiempo, CYII ha ido incorporando y testeando nuevos dispositivos de regulación y técnicas de control de gestión de presiones. Entre los años 2011 y 2012, se pusieron en marcha 10 pruebas piloto con consignas *dinámicas* en diversos sectores. Las características de estas pruebas piloto, incluyendo la instrumentación utilizada y el tipo de regulación efectuado, se resumen en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Parámetros asociados a maniobras de regulación con consigna de tipo *dinámica*

Sector	Fecha inicio	Modelo de VRP	Modelo de Controlador	Técnica de regulación
Alcobendas Centro Alto	30/03/2012	Ross	Pegasus	Programación Temporal
Coslada Centro	24/11/2011	Bermad	Pegasus	Modulación Caudal
Móstoles Parque Coimbra	12/07/2011	Ross	Condor	Programación Temporal
Parla Oeste	19/05/2011	Ross	Pegasus	Modulación Caudal
Torrejón Sur	12/07/2011	Dorot	Condor	Modulación Caudal

En cada uno de estos sectores se establecieron consignas de control. En algunos casos se utilizó una consigna mientras que en otros se llevó a cabo un proceso de calibración de curvas a base de ‘prueba-error’, hasta encontrar la curva más adecuada para cada caso. El criterio seguido para definir estas curvas fue que en todo momento se ofreciera presión suficiente en todos los puntos del sector en horas de mayor consumo mientras que en las horas de mínimo consumo (con mayor presión por tanto) se redujera para minimizar el caudal fugado resultante. Las consignas definidas se muestran en las figuras siguientes:

Figura 4.10. Modulación de la consigna instaurada sobre sector 'Parla Oeste'

Figura 4.11. Modulación de la consigna instaurada sobre sector 'Coslada Centro'

Figura 4.12. Modulación de la consigna instaurada sobre sector ‘Móstoles Parque Coimbra parte alta’

4.2.4 Características de los sectores

En este apartado se analizan diferentes parámetros relativos a la caracterización de los sectores. Muchos de los aspectos analizados aquí han sido calculados mediante análisis geoespacial a través de herramientas SIG.

4.2.4.1 Parámetros dimensionales de los sectores

Las dimensiones del sector y la distribución de los puntos de demanda en su interior es el primer aspecto analizado. Los puntos seleccionados son los correspondientes a la capa de ‘acometidas’. La Figura 4.13 recoge ejemplos de dos sectores con diferentes valores de densidad espacial de los puntos de su interior.

Figura 4.13. Sectores con diferente densidad de puntos de acometidas por área de superficie

El tamaño de cada sector y los parámetros dimensionales (basados en número de acometidas y longitud de tuberías) están

4.2.4.2 Orografía de la zona

La orografía o altimetría del sector regulado Se presenta el análisis de este factor sobre los sectores de estudio a través de los indicadores propuestos anteriormente. Para ello, se

considera la distribución espacial de las ‘acometidas’ de la red. El proceso de cálculo espacial ha sido elaborado a través de acciones de análisis geoespacial y herramientas tipo SIG y se recoge Anexo A.4.

4.2.4.3 Localización de puntos de entrada

La localización de los nodos interiores es otro de los factores relevantes para el diseño de las maniobras de regulación de presión. Resulta de especial interés la cota del punto o los puntos de entrada al sector y su relación respecto a la altura del resto de nodos de demanda. Esta localización será determinante sobre el diseño de la consigna de regulación al influir directamente en el doble objetivos ‘reducir fugas – mejorar servicio a usuarios’.

Para llevar a cabo un estudio en detalle de este factor, se han tomado todos los sectores de estudio de la red de CYII y se han elaborado los perfiles altimétricos de cada sector. Estos perfiles se han elaborado a través de los nodos que conforman la infraestructura de la red (válvulas de corte y de desagüe obtenidas de capas tipo GIS) y proyectando sobre ellos los nodos de acometidas de red.

A continuación, la Figura 4.14 muestra varios ejemplos de sectores con localizaciones de punto de entrada diferente en cuanto a la relación entre su cota y la del resto de nodos interiores del sector.

- En la sub-figura de arriba, correspondiente al sector ‘*Alcobendas Centro Alto*’, el punto de entrada se encuentra situado a una *altura intermedia* con respecto a las cotas del resto de nodos.
- La sub-figura del medio, ‘*Getafe Este*’, el punto de entrada se sitúa en la zona alta del sector, estando todos los nodos (o la mayor parte de ellos) situados a una cota inferior.
- La sub-figura inferior, ‘*Torrejón Sur*’, el punto de entrada se sitúa en la zona baja del sector, estando todos los nodos (o la mayor parte de ellos) situados a una cota superior.

Figura 4.14. Diferentes localizaciones de puntos de entrada respecto a cotas del resto de nodos: cota intermedia ('Sector - 1'), cota máxima ('Sector - 12) y cota mínima ('Sector - 19)

Los datos han sido tomados de archivos vectoriales de tipo SIG y tratados con el software libre ‘Quantum GIS’ (QGIS Development Team 2012). Se explica a continuación tanto el tipo de información extraída como el tratamiento que se le ha dado para adaptarlos a los fines del estudio.

Información utilizada

De partida se disponía de información de un elevado número de elementos de la red distribuida en “capas” vectoriales asociadas a cada elemento. Según el tipo de elemento de cada capa, se pueden clasificar en: poligonales (polígonos de sectores), lineales (tubos), o puntos siendo éste el mayor número (acometidas, desagües, válvulas reguladoras de presión, ventosas, válvulas de alivio, válvulas de cierre, válvulas de retención y caudalímetros).

La mayor parte de información utilizada para este estudio se concentra en unos pocos elementos. Se resumen en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Información utilizada sobre elementos de la red (extraídos de SIG)

Tipo de elemento	Capa vectorial	Atributos utilizados
Polígono	Sectores	Nombre
		Nº viviendas
		Nº habitantes
Lineal	Tubos	Longitud
		Material
Puntos	Caudalímetros	Coordenadas (X,Y)
	VRPs	Coordenadas (X,Y)
	Acometidas	Coordenadas (X,Y)
	Desagües	Coordenadas (X,Y)
		Cota (Z)

Desagregación por sectores

El alcance espacial de las capas de elementos ofrecidas por la empresa es la totalidad de su red. Por ello, como primer paso, se ha procedido a desagregar cada capa acorde a los sectores que serán analizados. Como primer paso, se han realizado procesos básicos de gestión de archivos SIG, superponiendo capas de diferentes elementos y realizando intersecciones utilizando como base la capa ‘Sectores (Polígonos)’.

Capítulo 5. Selección de técnicas de regulación y diseño de consignas

Este primer capítulo correspondiente a los resultados del estudio se focaliza en el ‘Objetivo #1’ planteado en esta tesis: *“diseñar una propuesta metodológica para la implantación de técnicas de regulación de presiones, en función de las características hidráulicas y topológicas de cada sector”*.

A la hora de diseñar el plan de regulación de presiones, son dos los pasos fundamentales a los que se pretende dar respuesta:

- Primero, seleccionar la técnica de regulación más adecuada.
- Segundo, una vez seleccionada la técnica, definir su consigna.

En la práctica profesional ambos pasos, generalmente, se resuelven ‘ad-hoc’ para cada caso de estudio en base a la experiencia de la persona encargada del diseño de este proceso. La primera parte – selección de la técnica de control – suele fundamentarse en experiencias previas, condicionantes económicos o técnicos y recomendaciones recogidas en la literatura especializada. No obstante, estas recomendaciones suelen carecer de estandarización. En cuanto a la segunda fase – definición de las consignas – existen dos enfoques principales: (1) métodos de prueba y error mediante maniobras ‘in-situ’ hasta dar con los valores perseguidos en algún punto de referencia (punto crítico o punto representativo de presión media) y (2) enfoques más académicos a partir de la resolución de problemas de optimización. El mayor inconveniente de los primeros es su falta de generalización, mientras que los segundos pueden ser difíciles de instaurar en casos reales con sub-sistemas de red grandes o complejos.

Ante esta tesitura, para resolver cada uno de estos dos problemas, se propone un método de análisis que se aborda en dos pasos de diferente naturaleza.

- En primer lugar, para seleccionar la técnica de control más conveniente, se opta por un enfoque cualitativo basado en el análisis holístico de un gran número de proyectos reales llevados a cabo a lo largo del mundo. Para ello se ha seguido la metodología descrita en el apartado 3.1 (Método de análisis cualitativo basado en el estudio de casos). Una vez recopilada la información, se han seleccionado los factores más influyentes esta acción, y posteriormente se exponen criterios para la selección de la técnica más adecuada en función de dichos factores. La justificación de este enfoque cualitativo es el gran número de variables que intervienen en este tipo de maniobras, lo cual dificulta un enfoque cuantitativo que sea generalizable a todos los casos. Por otro lado, el análisis de un gran número de casos para obtener una perspectiva global del problema, hace que la recopilación de datos sea sesgada en función de los datos ofrecidos en cada estudio. Esto ha imposibilitado la aplicación de métodos cuantitativos de detalle de forma generalizada. Esto no habría permitido caracterizar correctamente un plan de gestión de presiones más que para un número muy específico de casos sin tener en cuenta un buen número de particularidades y condicionantes existentes en la práctica real.
- En segundo lugar, la metodología para definir consignas de regulación óptimas, sí que se ha establecido a partir de un enfoque cuantitativo, utilizando esquemas de modelación numérica. Una vez seleccionada la técnica de regulación o control más adecuada, el establecimiento de la consigna óptima también es un problema en el que se ha detectado una falta de estandarización. Un gran número de estudios se focalizan en obtener el valor de consigna idóneo para una regulación de tipo salida fija fundamentado en problemas de optimización. El establecimiento de curvas de consignas óptimas para técnicas de regulación avanzadas también se ha abordado desde la perspectiva de problemas de optimización. En muchos de estos casos, o bien su extrapolación a la práctica real es compleja o bien las hipótesis introducidas pueden resultar demasiado simplificadoras. Un claro ejemplo es la suposición que se hace en la mayoría de estudios de tomar un único nodo de la red como punto crítico. En el análisis realizado en este estudio se propone un método que considera un buen número de factores influyentes a la hora de diseñar las consignas de regulación óptimas y se aporta una metodología que aporta un mayor grado de flexibilidad que enfoques más rígidos planteados en otros estudios de optimización, con el fin de su acercamiento a la implantación en la práctica real.

En resumen, el análisis efectuado en este capítulo consta de dos partes:

1) Selección de técnicas de regulación – Se ha llevado a cabo un análisis bajo un enfoque holístico, basado en el método de estudio de casos, permitiendo: (a) determinar las variables más influyentes en la regulación de presión y (b) recomendar las técnicas de regulación que mejor se ajustan en función de las características de cada caso.

2) Diseño de curvas de consigna óptimas – Por otro lado, se ha propuesto una metodología para definir las curvas óptimas de regulación, a partir de un método de optimización basado en la simulación de casos (*simulation-based optimization*).

5.1 Selección de técnicas de control a partir de análisis cualitativo de casos de estudio a nivel global

Este primer sub-apartado dedicado al diseño de las maniobras de regulación de presión se focaliza en la selección de la regulación más adecuada para cada caso, en función de una serie de parámetros relevantes en este tipo de procesos: objetivo perseguido, características topológicas de los sectores, características hidráulicas de la red – pérdida de carga, y perfiles de consumo (volumen total y patrones de consumo), y otro tipo de condicionantes (económicos y técnicos). El objetivo es desarrollar una metodología que sirva de ayuda a la decisión en esta labor de seleccionar el tipo de control más adecuado.

Para ello, se han llevado a cabo dos métodos de análisis:

- El primero, de carácter cualitativo, basado en el método de estudio de casos descrito el apartado 3.1. Este ha permitido determinar los factores más influyentes en el proceso de regulación y definir un primer nivel de recomendaciones basado en proyectos implantados a lo largo de todo el mundo.
- El segundo, ha consistido en la simulación, mediante un entorno de modelación numérica, de algunos de los escenarios planteados, para validar-contrastar algunas de las hipótesis extraídas del análisis cualitativo. Para esta sección, se ha utilizado el entorno de simulación desarrollado ‘ad-hoc’ para esta tesis y descrito en el apartado 3.2 (Desarrollo de un entorno de simulación de análisis hidráulico).

Estos dos métodos se han integrado en el análisis de forma dual, sirviendo de apoyo para las conclusiones finales extraídas.

En primer lugar, se procede a definir los casos que han servido para el análisis cualitativo global, los factores clave detectados y la propuesta metodológica general desarrollada a partir de este primer análisis. Para facilitar este análisis comparativo resultó de gran utilidad la agrupación de datos, parámetros, valores, etc. relativos a cada uno de los factores a examinar. Tres de ellos – objetivos perseguidos, tipo de regulación y modelos numéricos – han sido resumidos de forma esquemática en la Tabla 5.1. Los casos de estudio a los que se hace referencia son los recogidos en la Tabla 3.2. La información contenida en esta tabla se resume a continuación.

- *Real o modelo (Columna 5^a)* – Cita qué casos se han implantado en la práctica real (R) o si se ha analizado mediante modelación numérica (M).
- *Tipo de regulación (Columna 6^a)* – Indica el tipo de regulación según los acrónimos estándares del documento: SF, MC, MT, MP.
- *Objetivos (Columna 7^a)* – Refiriéndose a reducción de fugas (F) o consumos (C). El tercer objetivo tratado – nivel de servicio a usuarios – es un objetivo perseguido de forma intrínseca en todos los proyectos citados.

Tabla 5.1 Casos reales con plan de regulación de presiones

Continente	Referencia	País	Ciudad/Región	Real o Modelo	Tipo de Regulación	Objetivos
África	Marunga et al. 2006	Zimbabue	Mutare	R, M	SF	F, C
	Benahmed 2007	Marruecos	Casablanca	R	MC	F, C
	Mckenzie et al. 2009	Sudáfrica	Emfuleni	R	SF	F, C
	Meyer et al. 2009	Sudáfrica	Cape Town	R	SF	F, C
	ElFarissi et al. 2010	Marruecos	Chefchaouen	R	SF, MC	F
	Shepherd and Poona 2010	Sudáfrica	Durban	R	SF, MT, MC	F, C
	GIZ 2011	Burkina Faso	Ouagadougou	M	SF	F
	Burrows 2014	Sudáfrica	Durban	R	MP	F
América	Lalonde 2005	Canadá	York Region	R	MC	F
	Levine et al. 2005	Estados Unidos	Pittsburgh, PA	R	SF	F
	Sturm and Thornton 2005	Estados Unidos	Seattle, WA	R	SF, MC	F
	Fanner 2007	Las Bahamas	New Providence	R	SF, MT, MC	F
	Lalonde et al. 2008	Canadá	Toronto	R	MC	F
	GIZ 2011	Brasil	Sao Paulo	R	MT, MP	F
	GIZ 2011	Perú	Lima	R	N.C	F
	Kunkel and Sturm 2011	Estados Unidos	Philadelphia, USA	R	MC	F
Asia	Yates et al. 2014	Canadá	Halifax	R	SF, MC	F
	Rogers 2005	Indonesia	Jakarta	R, M	SF, MT	F
	Chai 2006	Malaysia	Sandakan	R	N.C	F
	UN-HABITAT 2006	India	Indore	R	N.C	F
	Anuvongnukroh et al. 2007	Tailandia	Bangkok	R	N.C	F
	Morrison et al. 2007	Malasia	Johor	R	MT	F
	Mahdavi et al. 2010	Irán	Mahalat	M	SF	F
	Eguia et al. 2012	Filipinas	Manila	M	SF, MT, MC	F
	Feldman et al. 2012	Israel	Beer Sheva	M	N.C	F
	Karadirek et al. 2012	Turquía	Antalya	M	SF	F
	Wyeth and Chalkl. 2012	Malasia	Selangor	R	MP	F
	2030 WRG 2013	Arabia Saudí	Jeddah	R	MP	F
Europa	Xu et al. 2014	China	Beijing	R	N.C	F
	Charalambous 2007	Chipre	Limassol	R	SF, MC	F
	Kovac 2007	Bosnia&Herzegovina	Grazanica	R	SF, MC	F
	Kovac 2007	Croacia	Zagreb	R	SF, MC	F
	Awad et al. 2008	Reino Unido	Yorkshire	M	SF, MT, MC	F, C
	Fantozzi, et al. 2009	Italia	Reggio Emilia	R	MP	F, C
	VAG 2009	Eslovaquia	Bardejov	R	MP	F
	Awad et al. 2010	Reino Unido	Yorkshire	M	SF, MT	F, C
	Li et al. 2010	Reino Unido	-	M	MC	F
	Nicolini et al. 2010	Italia	Udine	M	SF	F
	AbdelMeguid 2011	Reino Unido	Oldham	M	MT, MC	F
	Dimitrov et al. 2011	Bulgaria	Burgas	R	SF	F
	I2O 2011	Reino Unido	London	R	MP	F
	Paskalev et al. 2011	Bulgaria	Razgrad	R	SF	F
	Ristovski 2011	Macedonia	Skopje	R	MC	F
	Fontana et al. 2012	Italia	Napoli	R, M	SF	F
	Babic et al. 2014	Serbia	Belgrade	R	SF	F, C
	Kanakoudis et al., 2014	Grecia	Kos and Kozani	R, M	SF, MT	F, C
	Wright et al. 2014	Reino Unido	-	R, M	SF, MC	F
	Aqualogy 2015	España	Torremolinos	R	SF	F
	Vicente et al. 2015	España	Madrid	R	SF,MT,MC,MP	F
Oceanía	Pilipovic et al. 2003	Nueva Zelanda	Waitakere	R	SF	F, C
	Sydney W.C. 2005	Australia	Sydney	R	N.C	F, C
	Girard et al. 2007	Australia	Gold Coast	R	FM	F, C
	Mistry 2007	Australia	Hervey Bay	R	SF, MC	F, C
	Bailey 2009	Australia	Logan city	M	MC	F, C
	Beaton and Lambert 2013	Australia	Yarra Valley	R	N.C	F, C

Tras el análisis realizado de cada caso de estudio así como de la correspondiente información referente a diseño de sistemas, se han realizado una serie de propuestas metodológicas para abordar la tarea de seleccionar la mejor técnica de regulación en función de una serie de aspectos relevantes en la tarea de la gestión de presiones.

Se trata aquí de una metodología general, que pretende servir de guía para la instauración de cualquier tipo de operación regulación de presiones. A continuación se procede a explicar dicho método el cuyo esquema se puede ver en la figura siguiente el cual se explica a continuación:

- Primero – La primera tarea al abordar este problema es tener claro el *objetivo* que se persigue con la implantación de la regulación y los *condicionantes* impuestos. En este sentido, resulta muy relevante la diferenciación entre zonas geográficas del mundo. Cada área o región tiene sus propias características, sus objetivos primordiales y sus condicionantes. Estos factores serán claves a la hora de diseñar el plan de regulación de presiones.
- Segundo – Tras determinar los objetivos y condicionantes generales hay que analizar las variables hidráulicas del sistema entre las que destacan los perfiles de presión y caudal. La correspondencia entre estas dos variables definirá una serie de escenarios hidráulicos para cada caso de estudio, que deberá ser analizado a la hora de seleccionar la técnica de regulación más adecuada. Entre los aspectos más significativos a prestar atención cobran especial relevancia los siguientes: patrones de consumo y su relación con la pérdida de carga hidráulica resultante a lo largo del sector, caída de presión que se desea establecer, rango de variación de caudal circulante y caudal máximo, porcentaje de fugas y porcentaje de consumos dependientes de la presión.
- Tercero – A continuación se debe analizar la *zona de implantación* el plan destacando una cuestión fundamental: ¿es una zona ya definida, o se va a realizar un diseño de partida sobre la misma? La forma a proceder será bien distinta dadas las restricciones propias del primer caso o la libertad de partir de cero a la hora de adaptar el sector al objetivo perseguido.
- Cuarto – Una vez diseñado adecuadamente el sector se debe elegir el *tipo de regulación* más adecuado al objetivo perseguido y las variables hidráulicas del sistema.
- Quinto – Con el tipo de regulación ya conocemos la *instrumentación requerida*, sobre todo en lo referente a si será necesario un controlador externo o no, y que características debe tener este. Para la selección de los distintos dispositivos también hará falta considerar de nuevo las variables hidráulicas.

5.1.1 Objetivos y condicionantes; consideraciones geográficas

Para asegurar la representatividad del estudio, la lista de estudios de casos analizados incluye ejemplos de cinco continentes (ver columna 1 – Tabla 5.1). El análisis reveló diversos grados de aceptación y niveles de desarrollo a lo largo del mundo. Por ejemplo, mientras que la GP es ampliamente utilizada en Europa, es menos común en el contexto norteamericano. Como cada red es única, las características topológicas de cada red, los patrones de consumo y los condicionantes técnicos o económicos determinarán el tipo de regulación más adecuada. No obstante, se han detectado ciertas similitudes entre redes localizadas en las mismas zonas geográficas que ayudan a comprender las particularidades de cada región. Se resumen a continuación algunos puntos clave.

Europa

En algunos países, por ejemplo, en el Reino Unido, se ha reconocido desde hace más de 30 años que la gestión eficaz de la presión es fundamental en una gestión efectiva de las fugas de una red (Fanner 2007). Esto hace que precisamente Reino Unido sea uno de los principales impulsores de la GP, con un elevado número de programas instaurados en la última década. La sub-división de la red en zonas aisladas con el propósito de gestionar la presión (dando paso de los clásicos DMAs a PMAs) ha sido una práctica estándar desde los años 80 (Morrison 2004). Algunas de las técnicas más avanzadas de gestión de presiones están siendo introducidas por empresas operadoras de agua más importantes de este país de forma generalizada: Scottish Water, Severn Trent Water, South East Water o Yorkshire Water (Awad et al., 2008). También, se han planteado e instaurado en la práctica real innovadores modelos de optimización en redes específicas de todo el país (Wright et al., 2014, Awad et al., 2009). En este contexto, el Proyecto Neptuno (Li et al., 2010, Savic et al., 2008) destacó por los conocimientos teóricos y prácticos desarrollados relacionados con la gestión de fugas y de la presión. Todos estos ejemplos ponen de relieve los esfuerzos e iniciativas llevados a cabo en el Reino Unido, alimentando el desarrollo continuo y la creación de nuevos métodos y tecnología.

Siguiendo esta tendencia, muchos otros países europeos han llevado a cabo proyectos de gran envergadura. Algunas empresas españolas están introduciendo programas de GP a gran escala como parte de sus planes estratégicos (Aqualogy 2015, Miguel et al., 2009). Por ejemplo, Canal de Isabel II Gestión, en el marco del citado proyecto TecoAgua, puso en marcha un plan de GP a gran escala que involucraba en el año 2015 a algo más de 100 sectores, y se sigue instaurando en la actualidad. En este plan se ensayaron inicialmente todas las técnicas descritas para el control de la presión, tanto con controladores automáticos como electrónicos. En el año 2015 la proporción de técnicas implantadas resultaban los siguientes valores: SF (64%), MT (19%), MC (4%) y MP (13%).

Norte América

En Norteamérica, los objetivos por los que se diseña un plan de este tipo son similares a los de Europa (Sturm y Thornton 2005). Sin embargo, hay algunas diferencias relevantes, sobre todo relativas a los condicionantes, que influyen en gran medida en el diseño de estas maniobras.

Algunas empresas de servicios públicos de América del Norte son reticentes a emplear la gestión avanzada de presiones por razones técnicas y financieras (pérdida de retorno económico, pérdida de capacidad hidráulica, empeoramiento de calidad del agua, etc.) (Thornton et al. 2008; Fanner 2007). Estas desventajas, comunes en todo el mundo, sin embargo se ponen de mayor manifiesto en esta zona del mundo, debido quizás a una falta de cultura histórica.

Un ejemplo paradigmático de las diferencias entre Europa y Norte América es la relevancia que se le presta a los incendios en Estados Unidos y Canadá. Las regulaciones de la Asociación Nacional de Protección Contra Incendios (National Fire Protection Association – NFPA) (Benfer y Scheffey 2014) requieren que toda red tenga suficiente capacidad hidráulica para mantener la presión y los caudales para combatir incendios. Si bien esta exigencia suele ser obligatoria en la mayoría de países con redes consolidadas, en Norteamérica alcanza un estado de condición restrictiva que se convierte en un auténtico condicionante a la hora de planear los programas de regulación de presión. Debido a este hecho, se evitan por parte de múltiples operadoras la implementación de algunos tipos de controles de presión en bucle abierto como los de SF o MT. Una alternativa a priori más atractiva es la de la modulación basada en bucles cerrados como la que ofrecen la MC o MP, al presentar la ventaja de tener una salida de presión adaptable a los escenarios hidráulicos en tiempo real (Kunkel y Sturm 2011).

Otro problema encontrado en el uso de un sistema de GP en América del Norte es que las redes, generalmente, están dimensionadas para satisfacer los altos requerimientos de bombeo, mientras que en Europa se diseñan a menudo para satisfacer las demandas de los usuarios (Sturm y Thornton 2005). Una consecuencia de esto es una menor velocidad y por lo tanto un menor grado de pérdida de carga, reduciendo la efectividad de las técnicas de regulación de presión avanzadas.

Australia

En los últimos quince años se ha llevado a cabo un importante plan de GP a gran escala en Australia. Una severa sequía, descrita como la peor en el registro histórico para el sureste del país (Dijk et al., 2013), afectó a esta región del país entre 2001 y 2009. La llamada ‘Sequía del Milenio’ llevó a un programa a gran escala de gestión de la demanda a nivel nacional, con la mayoría de las grandes empresas de servicios públicos implementando planes de GP. El objetivo fue, no sólo reducir fugas y roturas, sino también disminuir el consumo, con el objetivo principal de reducir la cantidad de agua suministrada al sistema. Algunos de los casos australianos citados en la Tabla 5.1 son ejemplos de este tipo programas (Beaton y Lambert 2013, Bailey 2009, Girard y Stewart 2007, Sydney Water 2005).

Países con redes poco consolidadas: países en vías de desarrollo

Muchos países en vías de desarrollo operan sus redes de forma ineficiente, con pérdidas muy elevadas de agua y rendimientos hidráulicos de la red que pueden reducirse en algunos casos hasta el 30-40%. Esto se debe sobre todo a infraestructuras deficientes y extracciones ilegales de agua. El problema se agrava con presiones excesivas dado el elevado número de fugas existentes a lo largo de estas redes (Babic et al., 2014). Aunque la GP puede ser una solución eficaz para reducir las pérdidas, las soluciones deben adaptarse a las circunstancias locales de cada caso. En un gran número de proyectos, esta gestión va orientada a reducir el caudal total suministrados para ahorrar agua en lugar de la reducción de fugas. Algunos países en vías de desarrollo o con un nivel de desarrollo alcanzado en las últimas décadas, se pueden encontrar importantes plantas de GP a gran escala. Sudáfrica (Burrows 2014, Shepherd y Poona 2010, McKenzie et al 2009, Meyer et al 2009) y Malasia (Wyeth et al., 2012, Morrison et al., 2007, Chai 2006) merecen especial atención al significativo número de proyectos desarrollados. Sudáfrica ha sufrido una transformación importante desde los años noventa, cuando los primeros proyectos a gran escala se llevaron a cabo en Johannesburgo (McKenzie et al., 2000), continuando en la actualidad.

5.1.2 Selección de tipo de regulación atendiendo al escenario hidráulico

Para diseñar cualquier tipo de actuación en una red de abastecimiento o distribución de agua es fundamental disponer de los escenarios hidráulicos que se prevén en la zona de estudio, y analizar el rango de caudales totales circulantes. Para ello, suelen ser analizados una serie de escenarios hidráulicos discretos como son el escenario de caudales medio, punta y mínimo.

Las maniobras a aplicar para regular la presión no están exentas de esta necesidad. El tipo de consumo que tiene lugar en una zona que se proyecta como zona a regular es crucial a la hora de diseñar un correcto plan de gestión de presiones. En el capítulo referente a la sectorización (ver 2.1 Sectorización) ya se hacía mención explícita a este aspecto, al tratarse como una de las características más importantes a la hora de diseñar un sector con fines de regulación. No obstante, en procesos como la gestión de presiones, no sólo debe ser analizado los escenarios puntuales citados, sino la distribución de perfiles a lo largo del día.

En este apartado se analizan los aspectos principales que conciernen a la relación entre: los *patrones de consumo* y los *tipos de regulación de presión* existentes. Se pretende así establecer una serie de criterios y recomendaciones para elegir la regulación más adecuada para cada caso en función de las características del consumo.

5.1.2.1 Selección atendiendo a los patrones de consumo y la pérdida de carga hidráulica

Se expone a continuación una propuesta metodológica para la instauración de sistemas de regulación de presiones en función del perfil de demanda que tenga lugar en el sector. Para elaborar el diagrama de flujo resultante se han seguido criterios observados en proyectos reales implantados a lo largo del mundo y conclusiones extraídas de literatura especializada (tanto de índole científica como relacionada con la práctica profesional).

La mayor parte de recomendaciones y criterios expuestos han sido recogidos debidamente en el artículo de relacionado con esta tesis (Vicente et al. 2015). Asimismo, se recoge esquemáticamente en la Figura 5.1.

Figura 5.1. Metodología para la instalación de sistemas de gestión de regulación atendiendo a perfil de consumo

Salida de presión fija

La regulación de presión con *salida de presión fija*, se recomienda en los siguientes escenarios de consumo:

- Perfil uniforme de la demanda – En aquellos casos en los que el perfil de agua demandado sea estable a lo largo del tiempo, la *salida fija* se concibe como una de las mejores alternativas, al suponer una solución de bajo coste que puede dar solución de forma eficiente (Fanner 2007; Sturm y Thornton 2005).

- Escenarios con demanda de caudal bajo – Cuando el caudal circulante es relativamente bajo, las pérdidas de carga continuas serán también bajas (Rogers 2005). No en vano, el caudal (o la velocidad dependiendo de cómo se exprese la ecuación clásica de pérdidas de carga continuas) es la variable más influyente al estar elevada al cuadrado. Por tanto, la presión hidráulica en los puntos interiores del sector no se verá afectada de forma significativa por los posibles cambios de consumo que tengan lugar cuando se trate de rangos relativamente bajos.
- Variación con tendencia a largo plazo – Cuando existe una variación gradual a largo plazo (por ejemplo con tendencia ascendente/descendente), puede aplicarse este tipo de consigna con la pertinente revisión del tarado de la válvula cuando se prevea una pérdida de eficiencia en el objetivo perseguido.

Por el contrario, este tipo de regulación no es aconsejable generalmente en las siguientes situaciones:

- Variación intra-diaria significativa de volumen a lo largo del día – Esta variación supondrá diferentes niveles de pérdida de carga: elevados en periodos de gran consumo y bajos en periodos de escaso consumo. Se obtiene así el efecto opuesto al deseado para ofrecer un buen nivel de servicio a usuarios. Hay que destacar que en circunstancias en las que las pérdidas de carga resultantes sean bajas, independientemente del caudal circulante (sectores pequeños, redes sobredimensionadas, etc.), este tipo de regulación puede ser barajado como una buena alternativa (García et al. 2006; Sturm y Thornton 2005).
- Variación inter-diaria debido a estacionalidad semanal/mensual – Bajo el mismo argumento recogido en el punto anterior si existe una variación de consumo en diferentes días de la semana (por ejemplo, ascenso relevante de población en una zona en fines de semana) no se recomienda la *salida fija* debido a los problemas que pueden derivar de la variación en la pérdida de carga.

Como se puede deducir de los criterios anteriores, existen situaciones intermedias en las que es difícil discernir entre la idoneidad o no de este tipo de regulación. Un interrogante evidente en este caso, es establecer a partir de qué rango de variación de caudal o de pérdida de carga producida es asumible introducir o descartar este tipo de regulación.

Programación temporal

Se enumeran los escenarios para los que la *programación temporal* se proyecta como una alternativa eficaz:

- Patrones de demanda repetitivos sobre una base diaria (estacionalidad diaria) – Es habitual encontrarse sectores urbanos con una marcada estacionalidad a lo largo del día. El consumo varía pero de forma constante cada día, siguiendo un patrón. El patrón de esta estacionalidad puede estar marcado por un ciclo estacional día/noche, alcanzando máximos durante el día y mínimos nocturnos (Kanakoudis et al. 2014; Shepherd y Poona 2010; ESMAP 2009; Barry 2007). Este es uno de los

casos más típicos de sectores urbanos con un tipo de uso predominantemente doméstico o comercial. También es común que exista más de un ciclo a lo largo del día, por ejemplo alcanzando un pico por la mañana y otro por la tarde. En cualquier caso, cualquier tipo de estacionalidad diaria será válida a la hora de implantar este tipo de regulación siempre y cuando sea estable.

- Estacionalidad semanal – Existen casos en los que la estacionalidad puede ser semanal, en lugar de diaria. Este caso se puede darse por diversas circunstancias: zonas de segunda residencia o turísticas en las que aumente el consumo notablemente durante fines de semana (Charalambous 2005). Contrariamente, pueden existir zonas con un consumo en días laborales y bajar su consumo significativamente los fines de semana (zonas de uso comercial).

Este tipo de control no se recomienda en los siguientes casos:

- Consumos estables o uniformes – A priori, en aquellos casos en los que el perfil de agua sea uniforme también se puede optar por la *programación temporal* como alternativa (al igual que la consigna de *salida fija*). Sin embargo, el coste que conlleva la incorporación de un controlador electrónico en contrapartida al reducido coste de las válvulas con tarado fijo no hace viable esta opción en muchos casos.
- Perfiles con tendencia (ascendente o descendente) con pendiente significativa – No es recomendable incluir este tipo de regulación en aquellos casos en los que, aun habiendo una estacionalidad constante, ésta va acompañada de un cambio de tendencia.
- Escenarios en que puedan existir necesidades eventuales y repentinas de introducir caudal de emergencia – Este caso se da de forma habitual zonas geográficas con especial atención a satisfacer demandas de agua para la lucha contra incendios. Por ello, su uso no está muy extendido en América del Norte donde ésta se convierte en una de sus mayores preocupaciones (Thornton et al. 2008; Fanner 2007).

Modulación local basada en caudal

Los beneficios de la modelación local basada en el caudal entrante están ampliamente demostrados en un gran número de proyectos reales a lo largo del mundo (Ristovski 2011; McKenzie et al. 2009; Lalonde et al. 2008; Mistry 2003). A continuación se citan las mayores ventajas de la *modulación local basada en el caudal* en relación al perfil de consumo:

- Cambios de consumo sin patrón estable – Uno de los beneficios principales de este tipo regulación es su capacidad de adaptación al perfil de demanda en tiempo real. Esto lo hace altamente recomendable en sectores cuya demanda puede variar a lo largo del día/semana sin seguir un patrón establecido que permita utilizar la *programación temporal* como alternativa factible.
- Rápidos cambios de tendencia – Si existen cambios de tendencia en el consumo (incremento o decremento), es decir con una pendiente pronunciada, puede ser una

opción viable frente a la *salida fija*. La diferencia con el caso de cambio de tendencia suave es que en aquella se podía barajar la posibilidad de revisar periódicamente el nuevo tarado dando solución al nuevo volumen de agua consumido. En este caso, al producirse de forma más rápida, por ejemplo debido a la construcción de nuevas viviendas, es más fiable una regulación basada en el caudal.

- Incrementos de consumo significativos en periodos cortos de tiempo – Es recomendable para aquellos sectores en los que pueda existir aumentos repentinos de consumo por un incremento de consumidores en periodos específicos. Un ejemplo son zonas en las que se localice algún tipo de instalación que pueda recoger un gran volumen de consumidores durante periodos concretos de tiempo: instalaciones que organizan eventos, estadios o pabellones deportivos, etc.
- Necesidad de dar respuesta a solicitudes contra incendios – En aquellas zonas en las que es prioritaria la capacidad de ofrecer presión ante requerimientos para la lucha contra incendios es una gran alternativa la modulación basada en caudal. Por este motivo se ha convertido en una de las soluciones más populares en América del Norte (Thornton et al. 2008; Fanner 2007).

No se recomienda para los siguientes casos:

- Soluciones tratadas en los apartados anteriores – A pesar de poderse utilizar para perfiles de consumo en los que también son aptas las alternativas barajadas con anterioridad (*salida fija* y *programación temporal*), los costes que implican este tipo de regulación lo hacen menos apto.
- Escenarios con variaciones de consumo altamente estocásticas (tanto espacial como temporalmente) – A pesar de poder adaptarse a la demanda en tiempo en real, esta técnica requiere la incorporación de una curva que relaciona presión/caudal. Para determinar ésta, es necesario previamente analizar el perfil de consumo en el sector. En el caso de que éste sea totalmente cambiante y puedan generarse diferentes escenarios en cuanto a pérdida de carga se refiere, sobre todo debido a diferentes distribuciones de consumo espacialmente hablando, la curva asignada al controlador puede perder eficiencia.

Modulación basada en presión en punto remoto (punto crítico)

El último gran tipo de regulación es la modulación basada en la presión medida en puntos remotos, generalmente los puntos críticos del sector. Los escenarios más favorables para aplicar esta técnica son:

- Cambios de consumo sin patrón estable – Al igual que en el caso de la *modulación basada en caudal* una característica intrínseca de este método es su capacidad de adaptación en tiempo real al perfil demandante. Por el mismo motivo, es una alternativa muy eficaz en sectores cuya demandas cambiantes a lo largo del día/semana sin seguir un patrón estable (Wyeth and Chalk 2012; I2O Water 2011; Fantozzi et al. 2009).

- Escenarios con variaciones de consumo altamente estocásticas (tanto espacial como temporalmente) – A diferencia de la *modulación basada en el caudal* la consigna de presión aguas debajo de la válvula no depende de una curva predefinida por el diseñador del plan de gestión de presiones. La adaptación en este caso, al basarse en la presión que le llega a puntos remotos, está 100% actuando en tiempo y adaptándose de forma instantánea a los requerimientos del sistema (con la rapidez que permita la frecuencia de muestreo de datos en punto remoto). Esto le confiere características óptimas ante cambios muy significativos de consumo y distribuciones espaciales poco estables que generen pérdidas de carga diferentes en cada caso.

Para acabar con esta sección se exponen algunos casos en los que este tipo de control no es el más efectivo:

- Casos estables o con cambios estacionales – A pesar de poder implantarse, los beneficios que presente no quedan tan patentes como en otros en detrimento del coste que conlleva su instalación y mantenimiento.
- Necesidad de dar respuesta a solicitaciones repentinas contra incendios – En este caso es más beneficioso la *modulación en función del caudal* al responder automáticamente al cambio de caudal demandado.

5.1.2.2 Otras consideraciones relativas a escenarios hidráulicos sobre la selección de técnicas

Si bien los patrones de consumo y su relación con la pérdida de carga son los dos aspectos más relevantes para seleccionar la técnica de control más adecuada, hay que tener en cuenta otro tipo de condicionantes relacionados con los escenarios hidráulicos. En este sentido se han detectado los siguientes escenarios como aspectos de gran relevancia:

- Caída de presión elevada (asociada a presiones en cabecera altas).
- Diferencia de caudales elevada (gran diferencia entre caudal mínimo y caudal punta).
- Escenarios con un porcentaje elevado de caudal dependiente de la presión.

Caída de presión elevada

Cuando la reducción de presión que se va a llevar a cabo es de una magnitud muy elevada puede ser necesario colocar más de una válvula en la misma línea – **disposición en serie**. La motivación para instaurar este tipo de configuración puede deberse fundamentalmente a dos motivos (Mateos 2006a):

- *Evitar problemas de cavitación* – La reducción de presión en una magnitud muy elevada puede provocar un problema de cavitación a la salida de la válvula. Por ello la colocación de varias válvulas en serie, con la consiguiente bajada escalonada de presión, es una buena solución para este caso.

- *Seguridad* – La necesidad de disminuir un gran salto de presión también puede asociarse a puntos clave en el suministro de agua en la red. Con dos válvulas se gana notablemente en seguridad. En el caso de fallar una de ellas (por ejemplo, quedando completamente abierta) la otra podrá ejercer la acción reguladora mitigando el peligro o inconveniente que conlleva una presión excesiva en el interior del sector que se desea regular.

En cuanto a las técnicas de regulación implantadas en este tipo de configuración se recomienda la siguiente disposición:

- Para definir la presión de tarado o consigna de la primera válvula se recomienda introducir un tipo de control de tipo salida fija (SF). El valor de esta consigna de salida deberá cumplir dos restricciones. El primero es que la caída de presión resultante, no exceda en ningún caso la recomendada por el fabricante de la VRP. El valor de caída de presión podrá variar si la presión aguas arriba de la válvula varía. El segundo, es que la presión aguas abajo de esta primera válvula no sea menor a la presión máxima que se desea obtener aguas abajo de la segunda válvula durante periodos pico de demanda más la pérdida de carga mínima resultante estando esta última completamente abierta. La justificación de este último aspecto es que en todo momento la segunda válvula tenga la capacidad de regulación deseada para cualquier escenario hidráulico.
- En la segunda válvula se recomienda introducir el sistema de control final que se desea ofrecer sobre el sector de regulación. A partir de la presión resultante de la anterior VRP se puede ejercer un control más sofisticado en esta segunda, introduciendo el elemento de control más adecuado para cada caso. Esta presión de tarado o consigna puede ser dinámica si se introduce un elemento controlador (hidráulico o electrónico) como elemento gobernador de la consigna.

Con esto se consigue que funcionando ambas válvulas se produzca un pequeño escalonamiento que evite en cierta medida la cavitación. Asimismo se consigue una presión mejorada sobre la presión en cabecera en el caso de que falle alguna de las dos válvulas: la presión deseada si falla la primera (con un riesgo de producirse el fenómeno de cavitación), y una presión mayor si la que falla es la segunda – valor que por un periodo de tiempo relativamente corto hasta que se sustituya o arregle la válvula, no debe dañar las conducciones aguas abajo.

Diferencia de caudales elevado

En el caso de que los patrones de consumo varíen notablemente a lo largo del día, puede ser recomendable instalar varias VRPs en paralelo en la misma cámara de regulación. Así como el caso anterior da por resultado una disposición ‘en serie’ a este tipo de configuración se le puede denominar **dual o en paralelo** (Mateos 2006a). Con este tipo de disposición se pretende dar cabida a dos situaciones: (1) escenarios de caudal circulante elevado y (2) escenarios con mucha diferencia rango de caudales.

- En el primer caso, antes escenarios de caudal punta, puede resultar conveniente derivar el flujo entre varias ramas, cada una de ellas con sendas VRPs. Este tipo

de válvulas, como la mayor parte de dispositivos de acción reguladora, tienen un rango de operación recomendado en materia de presiones y caudales. La eficiencia de la acción reguladora dependerá en gran medida de la adecuación a estos rangos recomendados por el fabricante. Si los caudales totales circulantes son muy elevados, puede optarse por dimensionar la VRP acorde a dicho caudal (lo cual puede incurrir en elevados costos) o localizar varias VRPs en paralelo de menores dimensiones. Adicionalmente esta configuración ofrece un plus en aspectos de seguridad y mantenimiento. En el caso de fallar una válvula o tener que retirarla para realizar tareas de limpieza o mantenimiento, siempre se dispondrá de otra, con lo que no se interrumpirá la acción reguladora. Numerosos proyectos han optado por este tipo de disposición reportando las ventajas obtenidas (Meyer et al. 2009, McKenzie 2009, ESMAP 2009, Barry 2007) incluyendo un gran número de sectores de la red de CYII.

- Otro de los problemas más habituales a la hora de seleccionar las dimensiones de la VRPs es que la más adecuada para escenarios hidráulicos medios y puntas sea poco efectiva para caudales muy bajos. Sobre todo en el caso de válvulas de diafragma se puede producir una secuencia de movimientos pulsatorios que pueden desgastar notablemente los componentes internos de la válvula. Con la colocación de una VRP más pequeña para caudales bajos este problema puede ser mitigado (McDonald et al. 2005). Existen válvulas específicas para rangos de caudal muy bajos (Heimann et al. 2012, Heimann 2009). Con esta configuración se pretende que la acción reguladora sea precisa al efectuarse alternativamente por cada una de las válvulas en función del caudal circulante.

Escenarios con un porcentaje elevado de caudal dependiente de la presión

En el caso de que un elevado porcentaje de la componente de caudal circulante dependa directamente de la presión de la red, hay que tener precauciones con las técnicas basadas en modulación de caudal o MC, y en concreto aquellas que tienen un ajuste continuo (o bien mediante actuadores mecánico-hidráulico o bien controladores electrónicos). Los primeros, basan su comportamiento en los procesos mecánicos del circuito interno: presiones hidráulicas en las diferentes cámaras y fuerzas de los elementos mecánicos resistentes: muelles, opérculos, etc. (Bermad 2016b, Dorot 2016c). Su comportamiento dinámico se puede aproximar mediante una expresión analítica. Los parámetros para definir estas leyes se puede modificar, pero tienen un elevado grado de rigidez. En contraposición, los actuadores gobernados por controladores electrónicos aportan más flexibilidad a la hora de definir la curva de consigna (Mejoras Energéticas 2016, HWS 2016, Technolog 2016).

No obstante, tanto con unos como con otros (especialmente con los primeros por su mayor rigidez en el comportamiento), hay que tener en cuenta el escenario hidráulico habitual para el que van a ejercer la acción reguladora y analizar si son compatibles bajo condiciones de dependencia total del caudal circulante con la presión de la red. Algunos casos en los que se el flujo depende en gran medida de la presión son los siguientes:

- Escenarios con un elevado porcentaje de fugas respecto al caudal total circulante.
- Escenarios cuyo consumo depende de la presión por déficit de presión.
- Escenarios cuyo consumo depende de la presión por tipo de uso.

En todos estos casos, puede originarse un proceso inestabilidad que haga que la válvula se cierre o se abra completamente. Esto se debe a que el valor de consigna con este tipo de control lo define el punto de coincidencia entre la curva de consigna y la curva de comportamiento entre caudal circulante y presión en cabecera. Al tratarse de un escenario en el que el caudal puede variar significativamente en función de la segunda variable, este punto de coincidencia puede alcanzarse después de varias iteraciones y desviándose con respecto al punto de funcionamiento esperado y deseado. Esta desviación será más notable, cuanto más influencia tenga la presión sobre el caudal. Las variables por tanto que influyen en este proceso son por un lado la propia curva de consigna definida y por otro una serie de características hidráulicas de la red: relación entre presión y fugas, coeficientes de pérdida de carga en conducciones, y tipos de uso (relación entre consumos y fugas).

Para ilustrar este fenómeno, se ha simulado este tipo de consignas numéricamente a través del entorno de simulación desarrollado y descrito en el apartado metodológico 3.2 (Desarrollo de un entorno de simulación de análisis hidráulico). Este análisis se ha aplicado sobre un modelo numérico: modelo ‘C-Town’ sector ‘DMA2’ (Berardi y Giustolisi 2016).

La Figura 5.2 muestra un ejemplo del modo de funcionamiento de esta técnica de regulación ante un escenario de demanda de usuarios muy baja, y por tanto, es predominante el porcentaje de fugas en relación al caudal total inyectado en la red. Para el mismo caso de estudio, se ha variado el exponente que relaciona caudal fugado y presión, dentro de un rango habitual de valores, entre 0.5 y 1.5 (propio de conducciones fija y más flexibles respectivamente).

Figura 5.2. Relación entre fugas y presión en cabecera para demanda baja y constante. Comparación de diferentes valores habituales de exponente de fugas (α) [0.5-1.5].

Para calcular la presión de cabecera obtenida por este sistema de control partimos de una presión de partida muy baja. El punto de funcionamiento final lo determinará un proceso iterativo en el que el controlador va abriendo la válvula principal. Se muestra un detalle de este fenómeno para el caso en el que el exponente es igual a 1.3, en la Figura 5.3.

Figura 5.3. Detalle del proceso de desviación en la acción de modulación del controlador con un exponente 'alpha' igual a 1.3.

5.1.3 Selección de técnica en función aspectos topológicos de la sectorización

Las características del sector es un factor muy relevante a la hora de configurar un plan de gestión de presiones. Son múltiples los aspectos que han de considerarse. La Figura 5.4 recoge un diagrama que contempla algunos de los puntos más relevantes a tener en cuenta.

5.1.3.1 Consideraciones sobre la pérdida de carga y el rediseño de sectores

El primer paso incluido en la propuesta metodológica desarrollada es la evaluación de la pérdida de carga que se produce en el conjunto de puntos del sector. En el caso de tener poca significancia se podrá seleccionar el tipo de regulación más conveniente, siempre teniendo en cuenta los beneficios obtenidos en contraposición al coste de instalación de cada tipo de control.

Figura 5.4. Metodología para diseñar un plan de gestión de presiones atendiendo a características de un sector

Rediseño de forma permanente

En el caso de que esta pérdida de carga sea muy relevante, la primera gran cuestión a plantearse es si se puede reconfigurar algunas características del sector para mejorar su eficiencia: incluir más entradas, subdividir el sector en varios de menor tamaño, etc. Recordemos que grandes pérdidas de carga influirán negativamente en el alcance de los objetivos principales planteados en este tipo de proyectos: ofrecer más calidad de servicio a usuarios en forma de presión en horas de mayor consumo, mientras que se reduce la presión en los periodos de caudal mínimo para reducir el caudal perdido en la red a través de pequeños orificios o roturas.

Si se pueden rediseñar algunos parámetros del sector, habrá que estudiar la opción de subdividir el sector en otros más pequeños. Esta opción ha sido considerada en algunos proyectos tras observar resultados poco adecuados para la regulación de presiones.

- En algunas ocasiones esta necesidad de diseñar nuevamente el sector se debe a querer utilizar una zona previamente aislada únicamente con fines de monitorización (clásicos *DMAs*). En Lemosos – Chipre (Charalambous 2005) se recoge un ejemplo de este tipo, en el que se tuvo que redimensionar, acotando el número máximo de conexiones a acometidas (estableciendo el límite en 3000) e instalando para ello válvulas de cierre para conformar nuevas fronteras.
- En otros casos, el rediseño se puede deber a la necesidad de subdividir la zona bajo por criterios orográficos (limitar el desnivel entre los puntos más y menos elevados). Como ejemplo, un sector ya implantado en Pittsburgh – EEUU (Levine et al. 2005) tuvo que dividirse en dos subsectores para no exceder la presión máxima en una gran zona localizada en una cota orográfica más baja. Así, un desnivel máximo de 112 metros se redujo a 2 zonas con diferencias de 67 y 45 metros respectivamente.

Rediseño de forma temporal o periódico

Con las nuevas estrategias de sectorización existentes que permiten la modificación de sus fronteras de forma temporal (tanto en dimensiones como número de conexiones con la red de aguas arriba) se puede barajar la posibilidad de transformar el sector tan sólo durante un periodo de tiempo determinado para mejorar la eficiencia de la monitorización (y así realizar un mejor balance hidráulico y por ende mejorar la estimación de caudal perdido). En el capítulo dedicado a la *sectorización* ya se hizo mención explícita a diferentes posibilidades de diseño atendiendo a la temporalidad de sus fronteras y dimensiones. Se recuerdan que las estrategias barajadas en este sentido pueden ser diversas: sector temporal, micro-sectorización y sectores dinámicos. Varias de estas alternativas han sido probadas con éxito en proyectos reales:

- En 2010, la empresa española *Aqualogy* lanzó el proyecto de *microsectorización* (Jiménez 2015) el cual está siendo implementado con éxito en muchas ciudades a nivel nacional (Murcia, Tarragona y Torremolinos entre otras) e internacional (Santiago de Chile). El proyecto consiste en la introducción de un actuador hidráulico autoalimentado que activa válvulas de mariposa para habilitar nuevas fronteras en el interior de sectores durante periodos nocturno. Se consigue con esto llevar a cabo una estimación de caudales fugados más precisa durante los instantes de menor consumo mientras que el resto del día se puede ampliar la red para aumentar la redundancia de la misma y gestionar un mayor área mediante regulación de presiones.
- Otra alternativa es la “topología dinámica” propuesta por Stoianov y Henderson (2014) y Wright et al. (2013; 2014). Este método consiste en optimizar la topología de los sectores a lo largo del día para mejorar la eficiencia de la gestión de presiones en cada instante. Para ello se utilizaron controladores de gestión

avanzada y la programación de válvulas fronterizas para su automatizar su apertura/cierre. Esta metodología y su tecnología asociada fue puesta en marcha en dos sectores de Reino Unido. Se eliminaron así algunas desventajas de una topología permanente, tales como la redundancia y la capacidad de optimizar el servicio ante la aparición de fallos en determinadas conducciones.

La determinación de qué estrategia es la más beneficiosa queda fuera del ámbito de estudio de esta tesis.

5.1.3.2 Consideraciones sobre número de entradas y tipo de regulación asociadas a ellas

El segundo gran paso a tratar es decidir analizar el número de entradas necesarias supeditadas generalmente a: tamaño del sector, dimensionamiento de las conducciones (sobre todo las principales), volumen total demandado en periodos de pico de consumo, etc.

Una vez establecido el número más adecuado de entradas bajo los criterios de dimensionamiento oportunos se diferencian dos opciones bien diferenciadas:

- Necesidad de una sola entrada
- Necesidad de varias entradas

Una entrada única

El estudio de requerimientos hidráulicos puede ofrecer la posibilidad de abastecer al sector a través de un único punto de conexión con la red de aguas arriba. Si resulta esta opción resulta muy beneficiosa en términos de gestión de presiones al poder instaurar el tipo de regulación más conveniente atendiendo a otros criterios: análisis de consumos y objetivos perseguidos.

Varias entradas con consigna de regulación de presión de salida fija

El estudio de consumos puede derivar en la necesidad de incluir varias entradas para garantizar los requerimientos de demanda en momentos de consumo más alto o para dar solución a eventuales necesidades de consumo extra.

El análisis previo de las dos secciones anteriores (análisis de consumos y objetivos perseguidos) puede determinar la suficiencia de instaurar un tipo de regulación con *salida fija*. En este caso, no hay inconveniente alguno en instaurar en ambas entradas VRPs con este tipo de consigna.

Varias entradas: una con salida fija y otro con regulación dinámica

Es particularmente relevante esta opción en el caso de América del Norte. Esta configuración ofrece garantías para solventar la necesidad de responder a solicitudes de caudal adicional. En esta zona geográfica este requerimiento es obligatorio para la lucha contra incendios. Un enfoque utilizado de forma sistemática en la mayoría de casos

analizados en Norteamérica (Yates et al 2014. Kunkel y Sturm 2011; . Lalonde et al 2008; Lalonde 2005 Sturm y Thornton 2005) implica la inclusión de una válvula de control de gestión avanzada de presiones (modulación en función del caudal o en función de presión en punto remoto) para que actúe como elemento de regulación del principal durante los períodos de demanda normal. El resto de entradas inyectarán actúan sólo como entradas secundarias, supeditadas a la primera, y con una consigna de presión fija. Con esta configuración, las válvulas de apoyo están configuradas para abrir sólo durante periodos de demanda máxima o ante requerimientos contra incendios.

Varias entradas con regulación dinámica

Una opción cada vez más utilizada por empresas operadoras de agua es la inclusión de los sistemas de gestión de presiones avanzada (programación temporal, modulación basada en caudal o en punto remoto) en varias entradas. En este caso, pueden surgir problemas de retroalimentación negativa entre válvulas.

Uno de los primeros casos fue descrito por Yates y MacDonald (2007). Se llevaron a cabo pruebas en un barrio de Halifax, Canadá, con dos estrategias: la primera con dos controladores *basados en el caudal* y el segundo con un controlador con *programación temporal* y otro con *modulación basada en caudal*. En ambos casos, el comportamiento de una válvula estuvo influenciado por la otra. En el primer caso, el fenómeno de inestabilidad resultó en el eventual cierre completo de la válvula basada en caudal. En el segundo, se llegó al extremo de un comportamiento no convergente de ambos controladores, resultando en la apertura y cierre continuos de ambas VRPs. Abdelmeguid y Unalicki (2010) buscaron paliar este problema, contrastado analíticamente este comportamiento bajo un enfoque científico. Propusieron un algoritmo para optimizar este tipo de alimentación. Con una entrada con *programación temporal* vieron un mejor comportamiento del conjunto pero con un éxito limitado.

Un paso importante muy significativo para solucionar este problema recientemente ha sido el propuesto por Yates et al. (2014). Sobre el mismo caso de estudio de Halifax, Canadá (Yates y MacDonald 2007) se aplicó una solución novedosa. Primero descubrieron el origen del problema anterior atribuyéndolo al hecho de que las dos VRPs actuaban de forma independiente a nivel de control. Cada controlador utilizaba su propio caudalímetro para regular la válvula. Para corregir el problema dedujeron que tenían que utilizar una única variable para ambas válvulas: el volumen total entrante, es decir, la suma de cada uno de los caudales fluyentes por todas las entradas. Por último, desarrollaron un algoritmo de control que transformaba la medición de caudal en cada caudalímetro en un caudal global a través de la transferencia de comunicación entre ambos. Se asignó dicho algoritmo sobre los dos controladores, obteniendo una respuesta estable y exitosa.

5.2 Metodología para el diseño de consignas de regulación

En este apartado se presenta la metodología descrita en el apartado 3.3 para la definición de consignas de regulación. La estructura de esta sección sigue los pasos descritos en el citado apartado y recogidas esquemáticamente en la Figura 3.6. El funcionamiento del algoritmo se ilustra aplicando diferentes casos sobre una serie de modelos numéricos.

5.2.1 Definición de curva óptima ‘caudal - presión de consigna’

El segundo paso es definir la curva óptima que relaciona la presión de consigna de la VRP (P_{PRV}) en función del caudal circulante. Para ello, se debe discretizar el rango de caudales del caso de estudio en un número suficiente de pasos como para obtener una “modulación” de dicha curva. Si esta discretización es de n pasos, se obtendrán valores de P_{PRV} para n valores de caudal (Q_n). La obtención de la curva difiere entre un problema de tipo rígido (imposición estricta de la presión de servicio mínima en cada nodo) o problemas de tipo flexible (en los cuales se permite que el valor de presión en los nodos se aleje del valor mínimo, introduciendo un factor de penalización).

Para el primer tipo de problema, el algoritmo definido busca para cada Q_n la diferencia o error entre la presión mínima de la red (considerando todos los nodos) y la presión mínima de servicio deseada. Se pueden encontrar más detalles en el capítulo de metodología (ver 3.3.2.1 Algoritmo para problemas de optimización de tipo ‘rígido’).

El segundo tipo de problemas, se lleva a cabo mediante el método de optimización basado en la simulación de casos discretos.

5.2.1.1 Resultados de la aplicación del problema ‘rígido’

Se presentan los resultados de la aplicación del algoritmo de problema rígido. Se ha hecho especial hincapié en el análisis de la convergencia del algoritmo, tanto en el alcance de la presión mínima del modelo como de la consigna de regulación. Para inicializar el algoritmo se han considerado dos criterios: (a) tomar un valor de presión en cabecera elevado (igual a 100 en este caso de estudio particular) y (b) comenzar con el valor igual a la P_{ser} mínima deseada. En este último caso se ha tomado como valor de referencia 25 mca.

Modelos sectores esquemáticos

El primer bloque de casos de estudio han sido los esquemas de red desagregados del modelo ‘C-Town’ (Giustolisi 2016). La Figura 5.5 muestra los resultados obtenidos del análisis de convergencia del algoritmo para los dos sectores examinados: DMA1 y DMA2.

Se ha considerado sus respectivas variantes topológicas ‘A’ (explicadas en el capítulo anterior). La Figura 5.6 muestra la evolución de la presión en todos los nodos de uno de los casos específicos anteriores (DMA2-A), con criterio de inicialización (b). Se puede observar cómo la presión en los nodos parte de un valor relativamente bajo, fruto del P_{iter-0} para ir creciendo progresivamente hasta que la presión mínima (correspondiente en este caso al nodo ‘33’) se va aproximando a la línea que marca la referencia de la P_{ser} buscada.

Figura 5.5. Convergencia de algoritmo de regulación de tipo rígido en sectores de estudio ‘DMA1’ y ‘DMA2’ con diferentes criterios de inicialización (a-b). Presión mínima (izq.); presión de consigna (der.).

Figura 5.6 Evolución de presión en nodos de modelo (DMA2) en función de número de iteración.
Destacado en rojo presión mínima (círculo) y P_{ser} objetivo (línea discontinua)

Modelos de sectores reales

Aplicando este tipo de análisis a sectores de mayor tamaño (más representativos de sectores reales), se obtienen resultados similares en cuanto a la convergencia de la consigna y la presión mínima alcanzada en el punto crítico.

La convergencia a la hora de alcanzar el valor de consigna se alcanza en 2 o 3 iteraciones dependiendo del criterio de inicialización tomado. En cualquier caso, sigue siendo un valor muy bajo a pesar de tratarse de sectores mucho más grandes en número de longitud de red y nodos, con respecto a los modelos de sectores esquemáticos anteriores.

La muestra un ejemplo análogo para el modelo ‘esp1’. En los gráficos de convergencia de este ejemplo se observa, como mayor diferencia respecto al ejemplo anterior, cómo se alcanza el valor de regulación con tan sólo una iteración.

Figura 5.7 Convergencia de algoritmo en sectores de estudio ‘ky2 y ‘esp1’ con diferentes criterios de inicialización (a-b). Presión mínima (izq.); presión de consigna (der.)

Obtención de curva óptima ‘ Q - P_{PRV} ’

Una vez comprobada la eficiencia del algoritmo en cuanto a convergencia para alcanzar el resultado óptimo para cada valor de caudal Q_n , se puede definir la curva completa que relacione Q y P_{PRV} .

Se presentan los resultados obtenidos tras la aplicación de este algoritmo para el diseño de curvas completas ‘ Q - P_{PRV} ’. La curva completa se ha aplicado nuevamente a los

cuatro casos: los dos modelos esquemáticos (DMA1 y DMA2) y los dos casos representativos de sectores reales (ky2 y esp1).

En este apartado de resultados se pone énfasis en los resultados relativos a la búsqueda de la curva óptima que relaciona presión de consigna (P_{PRV}) con caudal entrante en el sector (Q_{tot}). Para ello, se aplica el algoritmo descrito anteriormente. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.8.

Figura 5.8. Curvas de consigna óptimas, obtenidas mediante algoritmo ‘MC-1E’

5.2.1.2 Resultados de la aplicación del problema ‘flexible’

En el caso de optar por un problema de tipo ‘flexible’ se ha recurrido a un ‘método de optimización basada en simulaciones de casos’ (ver 3.3.2.2 Algoritmo para problemas de optimización de tipo ‘flexible’).

El ejemplo siguiente se basa en la búsqueda del óptimo atendiendo al nivel de servicio proporcionado a los usuarios, pero flexibilizando la restricción impuesta en el caso anterior de que todos los nodos deben superar una determinada presión.

Para ello, se plantea una función como indicador de nivel de servicio basado en el rango de valores de la presión. La Figura 5.9 muestra un ejemplo de curva utilizada

basada en los valores de presión mínimo y máximo deseados, y la asignación de valores a cada rango.

Figura 5.9. Curva de indicador de nivel se servicio utilizada para transformar los valores de presión en indicador de nivel de servicio

En el ejemplo siguiente se han tomado los siguientes valores:

- P_{min} – Presión mínima igual a 10
- P_{ser} – Presión de servicio ideal igual a 25
- P_{max} – Presión de servicio máxima deseada igual a 50

Esta curva se ha aplicado sobre los casos anteriores, obteniéndose las curvas de consigna óptimas bajo este nuevo enfoque. Para ello se ejecutan los siguientes pasos:

- Se determina el rango de caudales que se desea evaluar. En este caso, se establecen los mismos rangos para cada caso, analizados en el ejemplo anterior.
- Discretización de primer nivel de rango de presión de consigna – En primer lugar se definen una serie de valores de presión de consigna como escenarios a evaluar. Para el primer nivel de discretización se ha tomado valores desde 5 mca hasta el máximo alcanzando en el apartado anterior, con un paso de 5 mca.
- Se calculan las presiones en cada nodo.
- Se transforman los valores de presión en los valores de indicador de nivel de servicio según la curva de la Figura 5.9.
- Se calcula el valor medio para valor de presión de consigna en cabecera.
- Se dibuja la curva que relaciona presión de consigna con valor del indicador, hallando el valor máximo (valor que más se aproxima al rendimiento óptimo).
- Una vez deducido este valor se repite el proceso con una mayor precisión, acotando el entorno del rango de valores analizado.

Las figuras siguientes – Figura 5.10 y Figura 5.11, muestran los resultados obtenidos de este proceso iterativo para el caso ‘DMA2’.

Figura 5.10. Valores óptimos obtenidos en primera iteración para caso de estudio ‘DMA2’

Figura 5.11. Valores obtenidos de segunda iteración para presiones de cabecera entre próximas al óptimo local hallado en primera iteración

5.2.1.3 Discusión de resultados parciales

Sobre la convergencia del algoritmo

En todos los casos analizados se alcanza rápidamente la convergencia de la presión de consigna óptima para satisfacer el doble objetivo: minimizar fugas mientras que se satisface a todos los usuarios con una presión de servicio mínima. Esta convergencia se alcanza con un número de iteraciones de entre 1 y 4, muy alejado del número máximo de iteraciones introducidas.

La inicialización del algoritmo se ha llevado a cabo con dos criterios: “desde abajo” o “desde arriba”. En el primer caso se introduce el valor de P_{ser} como valor inicial, mientras que en el segundo se introduce el valor de la presión aguas arriba de la VRP (P_{ar}), valor que en ningún caso podrá ser superado. En la mayoría de casos analizados, el número de iteraciones necesarias es el mismo independientemente del criterio utilizado, excepto en el

modelo ‘ky2’ de Kentucky, en el que con un método se alcanza la convergencia rápidamente (2 iteraciones – “desde arriba”) mientras que con el otro criterio son necesarias 3 iteraciones.

Otras de las conclusiones extraídas es que, ante la viabilidad de utilizar los dos criterios de inicialización, cobra más significancia el primer criterio – valor de inicialización igual a presión en cabecera de sector. Éste criterio servirá a su vez como *indicador a la hora de decidir el tipo de regulación*, dado que si la primera y por tanto consecuentes iteraciones se inicializan al alza ($P_{iter-1} > P_{iter-0}$) se confirma que la gestión de presiones no es una solución válida para alcanzar los objetivos planteados.

Interpretación de los resultados de curva de consigna óptima

El caso ‘esp1’ donde tan sólo es necesaria una única iteración para alcanzar el valor deseado. Si “a priori” se podría pensar que el tamaño de sector sería un factor relevante para la rápida convergencia, este caso desmiente este supuesto. Analizando aspectos topológicos/topográficos de los sectores se pueden extraer algunas conclusiones:

- El tamaño del sector no es un factor sensible al número de iteraciones necesarias del algoritmo.
- Sectores cuyo punto crítico (P_{cr}) está muy cercano a la cabecera del sector convergerá con la primera iteración al no establecerse apenas pérdidas de carga (ver Figura 5.12 - izquierda).
- Los casos que mayor número de iteraciones han requerido son aquellos con un mayor desnivel entre la cabecera y el punto crítico (Figura 5.12 – derecha).

Figura 5.12. Orografía de modelos ‘esp1 (izq.) y ‘DMA2’ (der.), destacando situación de VRP de cabecera y de punto crítico.

La mayoría de casos, presentan valores de consigna por debajo de la P_{ab} . Sin embargo, en el caso del modelo ‘DMA2’, el valor final necesario para cumplir los dos objetivos hace necesaria una presión en cabecera P_{VRP} mayor a 100 mca (ver Figura 5.5 – abajo), valor tomado como referencia de la P_{ab} . Este escenario es incompatible con la operación de la red con los supuestos establecidos, dado que una VRP tan sólo “disipa” energía, siendo

incapaz de “inyectar” energía en forma de presión o altura piezométrica sobre el fluido. Para ello, sería necesario recurrir a bombas centrífugas.

En este tipo de casos, resultará imprescindible introducir otro tipo de elementos de regulación: bombas hidráulicas, depósitos de cola o entradas alternativas de agua más cercanas a los puntos críticos desde la red de alta.

También, se puede extraer como conclusión que el criterio de inicialización del algoritmo iterativo, en base a la presión aguas arriba del sector puede ser interesante para valorar la posibilidad de instaurar este tipo de método de regulación. En el caso de que en cada iteración *aumente* el valor de presión P_{VRP} se puede determinar esta técnica de regulación como no válida para cumplir los objetivos propuestos, dado que la VRP se encontraría siempre abierta al solicitarse una presión aguas abajo más elevada que la que se ofrece en red de alta.

5.2.2 Ajuste de curvas en función del tipo de técnica de regulación

La modulación basada en caudal ha sido analizada desde una perspectiva similar a las anteriores. La diferencia más significativa es que la regulación se basa en la *solicitud en tiempo real* del caudal demandado.

5.2.2.1 Modulación basada en el caudal

Dispositivos de tipo hidráulico-mecánica: modulación basada en caudal

En el caso de que se desee instaurar un controlador de tipo hidráulico, la curva de consigna a introducir es menos flexible. Esto se debe a que la curva se fundamenta en procesos físicos (y por tanto analógicos) que suceden en el circuito hidro-mecánico, imposibilitando la incorporación de pares de puntos no relacionados entre ellos, como sí se puede hacer en un entorno digital como el que ofrecen los controladores electrónicos.

Ante la falta de datos precisos sobre las válvulas que regulan con este tipo de pilotos, se ha recurrido a la fórmula planteada en la sección de estado del arte deducida de gráficos extraídos de Hymod (Dorot 2016c). Así, la ecuación considerada para ajustar este tipo de dispositivos tendrá la forma de una función de tipo ‘potencial’ según la expresión siguiente:

$$P_{PRV}(Q) = a * Q^b + c \quad (100)$$

Donde a , b y c son parámetros de ajuste de la función.

Atendiendo a esta formulación, se analiza el ajuste de las curvas anteriores (Figura 5.8) a una expresión del tipo (100), resultando las funciones de ajuste de la Figura 5.13.

Figura 5.13. Curvas de ajuste de función potencial sobre datos de curva óptima de regulación $P_{PRV}(Q)$

Para evaluar la precisión con la que podría ajustarse un piloto de este tipo (hidromecánico) a la curva óptima, se evalúa esta función a partir de una serie de estadísticos que definen la bondad del ajuste. Estos son:

- Suma de Cuadrados de los Errores (SCE)
- Coeficiente de determinación (R)
- Raíz del Error Cuadrático Medio (RECM)

La muestra los valores correspondientes cada uno de estos estadísticos para los cuatros casos analizados.

Tabla 5.2. Valores característicos de escenarios hidráulicos analizados

Sector	SCE	R	RECM
DMA1	52.81	0.994	1.71
DMA2	4.32	0.999	0.49
ky2	461.76	0.989	5.06
esp1	23.32	0.991	1.14

Doble consigna en función del caudal

En el caso de dispositivos básicos de pilotos automáticos doble pilotaje (activados alternativamente en función del caudal), se debe establecer en primera instancia el valor de caudal a partir del cual se activa uno u otro dispositivo (Q_{ref}) y en segundo lugar el valor de P_{PRV} para cada uno de los dos casos (P_1 y P_2). En este caso, se definen los criterios para establecer tanto Q_{ref} como P_1 y P_2 .

El valor de Q_{ref} se definirá a partir del historial de caudales entrantes en el sector. Tomando el rango de valores $[Q_{min}-Q_{max}]$, el valor de referencia se tomará como la media de estos dos valores según (101).

$$Q_{ref} = \frac{Q_{min} + Q_{max}}{2} \quad (101)$$

A partir de este valor se han determinado los valores de presión de consigna P_1 y P_2 . Siguiendo el criterio de que en todo momento se ofrezca una presión mínima a todos los usuarios, se establecen los siguientes valores (102) :

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{PRV}(Q = Q_{ref}) \\ P_2 &= P_{PRV}(Q = Q_{max}) \end{aligned} \quad (102)$$

Podrían establecerse otros valores para P_1 y P_2 sin seguir el criterio estricto de suministrar la P_{ser} en todo momento a todos los usuarios. En tal caso se puede establecer los valores medios del rango al que van a abastecer, según la expresión

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{PRV}(Q = Q_1) \\ P_2 &= P_{PRV}(Q = Q_2) \end{aligned} \quad (103)$$

Siendo respectivamente:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{Q_{ref} + Q_{min}}{2} \\ Q_2 &= \frac{Q_{max} + Q_{ref}}{2} \end{aligned} \quad (104)$$

Con estos criterios se han calculado los resultados que obtenidos han sido los siguientes (Figura 5.14):

Figura 5.14. Consignas de presión P1 y P2 según método de ‘doble consigna en función del caudal’

5.2.2.2 Discusión de las curvas de consigna ‘MC

Sobre la “forma” de las curvas de consigna $P(Q)$

Se analizan el diseño de las consignas o curvas $P_{PRV}(Q)$ obtenidas. Hay que dejar patente que, en esta sección, no se considera la posible falta de presión en cabecera aguas arriba de la VRP. Se analizan los datos obtenidos sin tener en cuenta si se puede o no, en estos casos de estudio específicos, ofrecer la presión de consigna en función de la presión aguas arriba.

Una primera conclusión evidente, es que todas las curvas son ascendentes con respecto al caudal. Esto es lógico dado que a mayor caudal, mayor pérdida de carga se produce y por tanto es necesario un valor de P_{PRV} mayor. El aspecto realmente interesante es la “forma” de las consignas óptimas resultantes. En la Figura 5.8 e observan diferentes perfiles de curva. Algunos aspectos relevantes son los siguientes:

- Los casos de estudio ‘DMA1’ y ‘esp1’ tienen una pendiente de crecimiento inicial muy baja. A partir de un cierto valor se produce un punto de inflexión en el que la pendiente de la curva crece significativamente. Esta curva, podría asimilarse a dos

tramos lineales: (1) un primer tramo horizontal para caudales bajos y (2) un segundo tramo para la zona con mayor pendiente de la curva óptima.

- En el caso de estudio ‘DMA2’ se obtienen una curva con una forma muy marcada, asimilable a una función exponencial.
- El caso de estudio ‘ky2’ tiene una forma más particular generándose una curva con un punto de inflexión en el que existe un cambio en la curva.

Sobre el ajuste de dispositivos hidráulicos con funciones específicas $P(Q)$ a la curva óptima

- Controladores electrónicos – En el caso de controladores electrónicos, se puede establecer de forma generalizada una serie de pares de puntos que definen la curva $P(Q)$. Por lo que la mayor o menor similitud
- Pilotos hidro-mecánicos – En este caso, la función que relaciona caudal con presión de consigna está más restringida, variable hasta cierto punto.

5.2.3 Modulación basada en la presión en Punto Crítico – ‘MPc’

En el caso de la modulación basada en presiones en punto crítico, el factor más relevante que hay que considerar es qué nodos que se tomará como referencia.

5.2.3.1 Puntos de presión crítica (i_{PC})

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, son escasos los estudios que contemplan la posible variación geográfica de este tipo de puntos. Y sin embargo este aspecto es crucial para evaluar correctamente la eficiencia de los planes de gestión de presiones. Este hecho cobra más importancia aún cuando la regulación se está realizando basada en la señal de este propio punto. En este apartado se desarrollo un algoritmo para la evaluación y localización del punto remoto de forma dinámica.

Variación de i_{PC} en función del caudal demandado

El primer paso es examinar la evolución de la presión mínima (P_{min}) en función del caudal total circulante en el sector. Ante un escenario de demanda nulo o próximo a cero, al ser la pérdida de carga piezométrica despreciable, el punto crítico de la red será el de mayor cota al corresponderle la menor energía piezométrica. Según va aumentando el caudal circulante, las pérdidas de carga van aumentando en cada uno de los ramales del sector, lo que puede derivar en distribuciones diferentes de la línea piezométrica a lo largo del sector.

Primero se evalúa si efectivamente el punto crítico, nodo con menor presión, modifica su localización en función del caudal total demandado (fijando un mismo patrón de consumo para todos los usuarios). Para ello se establece un rango de valores de caudal,

acordes con el diseño de cada red, y se evalúa el nodo de presión crítica para cada escenario hidráulico. En la Figura 5.15 se muestra una red esquemática utilizada como *benchmark* en este estudio y los diferentes puntos obtenidos como punto crítico para diferentes caudales Q_i .

Figura 5.15. Evaluación dinámica de puntos críticos en función del caudal total inyectado (Q_i)

Una vez deducidos los posibles puntos críticos, se obtiene la presión de todos ellos para todos los escenarios analizados. Siguiendo este ejemplo, se toman 3 nodos como susceptibles de ser puntos críticos: J102, J128 y J34. La Tabla 5.3 muestra la presión en cada uno de estos puntos para los seis escenarios analizados.

Tabla 5.3. Presiones en los nodos definidos como puntos críticos para algunos de los escenarios analizados (en **negrita**, destacada P_{min} correspondiente a cada escenario).

Nodo	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
J102	21.91	20.33	17.30	13.30	8.91	4.70
J128	22.95	20.89	16.91	11.67	5.89	0.42
J34	50.89	42.26	23.91	9.81	4.22	1.54

Con la presión de cada punto, para todo el rango de caudales, se puede determinar los valores de caudal a partir de los cuales conviene seleccionar un nodo u otro como punto crítico. Estos valores son en los que se cruzan las curvas de presión de cada nodo, seleccionando en todo momento el tramo cuya envolvente va quedando debajo del resto. La Figura 5.16 muestra gráficamente cómo se han determinado 4 tramos para la obtención de esta envolvente.

Figura 5.16. Determinación de rangos de caudales asociados a cada punto crítico

El algoritmo, resuelve matemáticamente esta envolvente obteniendo las funciones de cada serie interpolando valores entre pares de puntos, después se genera la intersección entre cada par de nodos y por último se toma los tramos de menor valor. Se obtiene así una envolvente que determinará la ley de localización de puntos críticos en función del caudal circulante.

5.2.3.2 Análisis de puntos críticos en función del caudal

Para el análisis de esta técnica de regulación el primer punto que se debe considerar es qué puntos son susceptibles de ser el punto crítico del sector.

Figura 5.17. Resultados de control de regulación tipo 'MPc-1E' sobre sectores esquemáticos 'Sector 1' y 'Sector 2' – (izq.) Presiones en nodos críticos en función de caudal; (der.) localización de nodos críticos.

Figura 5.18. Resultados de control de regulación tipo ‘MPC-1E’ sobre sectores reales ‘Sector 3’ y ‘Sector 4’ – (izq.) Presiones en nodos críticos en función de caudal; (der). localización de nodos críticos.

Figura 5.19. Evolución de presiones en función del caudal en aquellos nodos que en algún momento tiene la presión mínima (nodos referencia)

En los cuatro casos analizados se observa el mismo patrón de comportamiento hidráulico en relación a la presión en nodos siguiendo el criterio general tomado. En el momento en el que se “cruzan” dos líneas de energía de presión en función del caudal, el antiguo nodo que gobernaba la consigna de presión mínima crece de forma sustancial. Esto se debe a que la pérdida de carga generada por la nueva línea gobernante es mayor que la anterior, con lo que la subida en la P_{PRV} afecta significativamente sobre el antiguo nodo de referencia, haciendo que suba su presión.

Capítulo 6. Análisis de métodos para evaluar el impacto de GP

Este capítulo se focaliza en el impacto que la gestión de presiones ejerce sobre la red. Concretamente se abordan dos aspectos relativos a la estimación en el nivel de fugas utilizando el concepto de Caudal Mínimo Nocturno (ver 3.4).

En primer lugar, se analizan sobre una serie de modelos numéricos diferentes sub-métodos propuestos para calcular la presión media de la red. Este es se trata de una de las variables más relevantes, tanto para el cálculo de las fugas a través del concepto de CMN como para examinar la influencia de la gestión de presiones en el nivel de servicio de usuarios.

En segundo lugar, se analiza la incertidumbre que conlleva la utilización del método de CMN, aplicando este método (con diferentes sub-criterios) sobre una serie de sectores reales. La estructura de esta sección es acorde con los puntos identificados de mayor interés en cuanto a su influencia en el cálculo y el grado de incertidumbre que a su vez introducen:

- Cálculo de caudal mínimo nocturno y variación de éste tras las maniobras de regulación.
- Cálculo de pérdidas reales durante CMN por descomposición en sub-componentes: consumo, pérdidas aparentes y pérdidas reales.
- Cálculo de la presión media (P_{med}) mediante diferentes sub-métodos.
- Análisis y asignación de valores de relación ‘presión-caudal’.

6.1 Análisis de métodos para calcular P_{med} mediante modelación numérica

En esta sección se lleva a cabo un estudio comparativo de métodos para calcular la presión media de cada uno de los sectores examinados (aplicando los métodos descritos en el capítulo metodológico).

6.1.1 Métodos basados en datos distribuidos

Método hidráulico

El método hidráulico, ecuación (2.17), se ha aplicado con los tres factores de ponderación (w_i) propuestos en la Tabla 3.5: uniforme ($w_i=1$), consumo ($w_i=c_i$) y longitud de conducciones ($w_i=l_i$), deduciéndose el valor de este último como la mitad de las longitudes de las conducciones conectadas a cada nodo. Los resultados se recogen en la Tabla 6.1.

Una vez calculado P_{med} para cada caudal Q y con diferentes factores de ponderación w_i se ha procedido a calcular el punto representativo de la presión media (i_{med}) con este método.

Tabla 6.1. Resultados del cálculo de P_{med} mediante método hidráulico

Escenario	Sub-modelo 'A'			Sub-modelo 'B'		
	$w_i=1$	$w_i=c_i$	$w_i=l_i$	$w_i=1$	$w_i=c_i$	$w_i=l_i$
Q1	51.12	50.96	53.03	45.43	45.12	45.69
Q2	48.81	48.47	50.85	43.18	42.71	43.58
Q3	44.25	43.61	46.59	38.67	37.83	39.37
Q4	38.77	38.40	41.33	33.13	32.40	34.04
Q5	33.48	33.92	36.08	28.08	28.06	29.01
Q6	28.77	30.26	31.33	24.36	25.32	25.20

Método topográfico

Los resultados del método topográfico se recogen en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Resultados del cálculo de P_{med} mediante método topográfico

Escenario	Sub-modelo 'A'			Sub-modelo 'B'		
	$w_i=1$	$w_i=c_i$	$w_i=l_i$	$w_i=1$	$w_i=c_i$	$w_i=l_i$
Q	51.29	51.13	53.21	45.57	45.32	45.89

Métodos basado en ‘pérdida de carga’ entre puntos

Los resultados del método propuesto basado en la pérdida de carga entre dos puntos son los recogidos en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3. Resultados del cálculo de P_{med} mediante método hidráulico

Escenario	Sub-modelo ‘A’			Sub-modelo ‘B’		
	$w_i=1$	$w_i=c_i$	$w_i=l_i$	$w_i=1$	$w_i=c_i$	$w_i=l_i$
Q1	51.12	50.96	53.03	45.43	45.12	45.69
Q2	48.81	48.47	50.85	43.18	42.71	43.58
Q3	44.25	43.61	46.59	38.67	37.83	39.37
Q4	38.77	38.40	41.33	33.13	32.40	34.04
Q5	33.48	33.92	36.08	28.08	28.06	29.01
Q6	28.77	30.26	31.33	24.36	25.32	25.20

6.1.1.1 Comparación de sub-métodos distribuidos

Comparando los resultados de los tres métodos para calcular la presión media del sector (P_{Med}) se puede observar cómo para los cuatro modelos analizados, el método de pérdida de carga mejora el topográfico, siendo esta mejora mayor cuanto mayor es el caudal total demandado.

Figura 6.1. Comparación de resultados de métodos ‘topográfico’ y de ‘pérdida de carga’ con respecto a método de referencia: ‘hidráulico’

La diferencia en todos los casos, para caudales próximos a 0 es nula. En este escenario, apenas se produce pérdida de carga por lo que la presión real (medida por el método hidráulico) en la red es cercana a la presión estática (que es la que estima mediante el método topográfico). De igual forma, el ser prácticamente nula la pérdida de carga en el punto crítico (base para el cálculo del método de ‘pérdida de carga’), el error cometido para caudales bajos es menor en escenarios de circulación baja.

En todos los casos, el método de pérdida de carga introduce menos error que el topográfico, por lo que se concibe como un método válido para este tipo de estimaciones. No obstante, esta diferencia en el error difiere entre casos. Mientras que en los sectores 2 y 3 esta diferencia es muy pronunciada, llegando a una reducción del error muy relevante, en los otros dos casos la diferencia en el error es menos significativa.

Algunos factores detectados que influyen en la precisión del método de pérdida de carga se describen a continuación.

Influencia de la orografía

La orografía del sector es crucial para que el método propuesto se pueda aplicar como válido. Uno de los supuestos a la hora de utilizar este método es suponer una pendiente constante entre los puntos en los que se obtiene las mediciones reales.

Figura 6.2. Influencia de la orografía en la aplicación del método de ‘pérdida de carga’

El ejemplo de la Figura 6.2 muestra dos casos con misma topología de red y mismo escenario hidráulico, pero diferente orografía. Se ha generado este ejemplo ad-hoc, de forma que el error topográfico sea el mismo y poder evaluar la influencia del terreno en el cálculo del método de pérdida de carga. El ejemplo de la izquierda (DMA1 original), se puede observar como el relieve es más irregular, teniendo picos interiores. En el ejemplo de la derecha (DMA1 modificado) se ha generado un terreno con una pendiente más o menos constante entre los puntos de cabecera y punto crítico, siendo la cota topográfica mínima en el primer punto y máxima en el segundo. En este caso, el error cometido es menor que en el primero.

Influencia de la selección del punto crítico

En los casos anteriores se ha tomado como criterio para seleccionar el punto crítico, aquel con mayor cota altura. Este supuesto, será válido para los casos en los que la entrada al sector y el punto crítico estén en puntos lo más alejados posibles.

Otra de las claves para la correcta aplicación del método de pérdida de carga es que el punto en el que se basa la pérdida se produzca la mayor pérdida posible. El punto crítico puede ser alguno que por cota piezométrica reciba la menor presión de la red. Sin embargo para aplicar este método es más conveniente utilizar el punto que más pérdida de carga se genere.

En el ejemplo de la Figura 6.3 se observa cómo al estar situado el punto crítico muy cercano a la cabecera del sector, la pérdida de carga no es relevante, por lo que la trasposición al resto del sector será mínima. Esto hace que los resultados obtenidos sean prácticamente iguales a los del método topográfico.

Figura 6.3. Ejemplo de caso en el que el punto crítico apenas se ha generado pérdida de carga

Este mismo caso se ha calculado utilizando como base la presión del punto que más pérdida de carga genera (generalmente, se tratará de uno de los más alejados hidráulicamente al nodo de cabecera).

En este caso, el método sí que mejora el topográfico aunque se observa que no de forma muy significativa.

Figura 6.4. Aplicación del método de pérdida de carga utilizando nodo con mayor pérdida de carga

6.1.2 Métodos de ‘medición directa’

El método de medición directa se basa en la lectura directa de medidas de presión en un punto que previamente ha sido definido como representativo del sector.

Uno de los falsos supuestos que se han encontrado en estudios que llevan a cabo este método es la suposición de que este punto será invariante en función del caudal. Como se puede observar en la Figura 6.6 el nodo más cercano a la presión media del sector ($i_{p_{med}}$) varía en función del caudal total circulante (Q_i). Este hecho contradice el criterio generalizado de que dicho nodo no varía a lo largo del tiempo.

Figura 6.5. Diferencia entre presión en nodos (P_i) y presión medio (P_{med}) para diferentes caudales (Q_i). Destacado en rojo, punto representativo de presión media (i_{pmed}); sector 'DMA1'.

Figura 6.6. Diferencia entre presión en nodos (P_i) y presión medio (P_{med}) para diferentes caudales (Q_i). Destacado en rojo, punto representativo de presión media ($i_{P_{med}}$); sector ‘DMA2’

6.1.2.1 Método basado en matriz de sensibilidad de presiones

Estudiando los contornos de error de las gráficas anteriores entre la presión en cada nodo (P_i) y la presión media (P_{Med}) se puede ver cómo se crean varias curvas de contorno diferentes con el mismo tipo de error. Tomando el contorno del menor error, se podría tomar algún punto dentro de estas curvas para instalar el punto de referencia. Sin embargo, la representatividad de cada punto, aunque el error cometido sea el mismo, será bien diferente ante variaciones de presión internas.

El método basado en la matriz de sensibilidad de presiones, analiza la influencia de cada variación de consumo en un punto de un sector en la presión en el resto de nodos, creando así una matriz de ‘Sensibilidad’ (S) – ver expresión (95).

Cada elemento s_{ij} de la matriz mide el efecto que tiene la variación de consumo (q_j) en cada punto en cuanto a la presión en cada nodo susceptible de ser monitorizado (P_i). En

sectores de características habituales, tanto en tamaño como en grado de mallado, es extremadamente complejo determinar S de forma analítica. Bajo este supuesto, se plantea un análisis multi-escenario basado en la simulación de $i \times j$ casos, donde i es el número de puntos cuyo valor de presión es medido y j los nodos con variación de consumo. Cada elemento de la matriz se calcula ejecutando una simulación variando el consumo en cada q_j y calculando la variación de presión en cada punto P_i . Dado que se desea ver la sensibilidad global de todo el sector, la variación de consumos se inducirá sobre cada nodo del sector. Asimismo, como ‘a priori’ todos los nodos serán susceptibles de ser puntos representativos de la presión media, se evaluará la variación de presión en todos ellos. Por lo tanto, resultará una matriz simétrica de $n \times n$, siendo n el número total de nodos del sector.

En este caso, se ha optado por “normalizar” las matrices para obtener resultados comparables. Para ello, cada fila de la matriz se ha dividido entre el valor máximo que resulta de esa fila. Este valor coincidirá con el elemento de la diagonal, al ser el punto que sobre el que más afecta una variación de presión el propio punto que lo mide.

Figura 6.7. Variación de matriz de sensibilidad normalizada S' en función de caudal circulante

La Figura 6.7 muestra un ejemplo gráfico de la matriz de sensibilidad sobre el que se han tomado un número discreto de nodos para visualizar los resultados. En esta matriz se

puede observar cómo los valores máximos igual a 1 se alcanzan en la diagonal de la matriz por el motivo descrito.

Esta matriz de sensibilidad dependerá a su vez de las condiciones de contorno de cada simulación (presión en entradas y demanda total o caudal circulante). Por este motivo es necesario realizar un análisis de la sensibilidad para cada uno de los escenarios previstos. La Figura 6.7 muestra un ejemplo de los resultados de la matriz de sensibilidad normalizada del sector DMA1, para diferentes caudales.

Una vez desarrollada esta matriz, el siguiente paso es establecer un criterio para discernir entre los puntos que se consideran “sensibles” a una variación y los que no.

Figura 6.8. Matriz binaria de análisis de sensibilidad de presiones de sector ‘DMA1’ para valores frontera de: 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 0.95, 0.99, 1

Para ello, se define un valor como frontera de lo que se puede considerar como sensible o no. En este sentido, se puede crear una matriz binaria que tendrá el valor de 1 si el valor del elemento de la matriz es mayor a dicha frontera y 0 en caso contrario. Con este

criterio, se puede crear una matriz “binaria” que será dependiente del valor de frontera que se considere. Como se observa en la Figura 6.8, esta matriz, según se va aumentando el valor de referencia de “frontera” va disminuyendo el número de valores 1 de la misma, concentrándose cada vez más sobre la diagonal principal.

6.2 Análisis de incertidumbre en la aplicación de métodos basados en CMN a sectores reales

En esta sección se muestran los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología descrita en el apartado 3.4 a una serie de sectores de distribución de agua reales, para evaluar el impacto que tienen las maniobras de gestión de presiones sobre uno de los objetivos primordiales tratados en esta tesis: reducción de fugas. Estos sectores de estudio son los recogidos en el capítulo correspondiente (ver 4.2), todos ellos incluidos en el territorio de la Comunidad de Madrid y gestionados por la empresa CYII.

El análisis se subdivide en 5 apartados. Los 4 primeros se corresponden con los cuatro pasos destacados para calcular el nivel de fugas a partir del concepto de CMN. Recordemos que estos son:

- Cálculo de Caudal Mínimo Nocturno de referencia (CMN_{ref}).
- Cálculo de fugas durante dicho periodo (F_{CMN}).
- Cálculo de presión media (P_{med}).
- Cálculo de exponente de relación ‘caudal fugado-presión’ (exponente $N1$).

En todos ellos, se implementan diferentes técnicas, en función del tipo de datos recabados en cada caso y la consistencia de las series de datos temporales disponibles. El quinto apartado muestra los resultados globales obtenidos relativos a volumen de fugas disminuido tras la implantación de las maniobras de regulación a lo largo del día, y se analiza la incertidumbre propagada introducida en cada uno de los pasos anteriores.

Este análisis se ha apoyado de forma muy significativa en la herramienta desarrollada para la ayuda a la toma de decisiones, por lo que se irá presentando el uso que se ha dado a esta a lo largo de la sección. También, se ha llevado a cabo un gran esfuerzo de pretratamiento de datos previo al análisis propiamente dicho. La mayor parte de acciones relativas al pretratamiento se pueden encontrar desarrolladas con más profundidad en el ‘Anexo A. Pre-tratamiento y análisis preliminar de datos de sectores reales de la red de CYII’. Al final del documento.

NOTA – Sobre los métodos utilizados y la incertidumbre de los resultados

Varios de los métodos o criterios utilizados implementados, así como algunas hipótesis asumidas, presentan un grado de incertidumbre significativo. Esta incertidumbre es representativa de la realidad con la que plantean muchos de los estudios basados en el concepto CMN en la práctica profesional. El objetivo principal de esta sección, más que el de ofrecer datos que pueden no ser precisos en todos los casos, es discutir precisamente sobre la incertidumbre que conlleva la utilización de estos métodos y sentar algunas bases para su mejor utilización.

6.2.1 Cálculo de variación en CMN

El CMN_{ref} se puede calcular mediante diferentes criterios, en función de la combinación que se haga de algunos de los aspectos recogidos en el apartado recogidos en el apartado 3.4.1. Estos son los siguientes:

- *Balance hidráulico de entradas y salidas (3.4.1.1)* – En primer lugar, todos los sectores de estudio tienen una topología con tan sólo una entrada y sin salida a sectores anexos conectados en cascada ni a la red de alta. Por lo tanto, este aspecto se reduce a su expresión más simplificada, cuyo caudal total corresponde con el caudal de entrada por el único punto.
- *Selección de periodo de estudio (3.4.1.2)* – En segundo lugar ha de definirse el periodo de estudio conveniente para calcular el valor de referencia del CMN, tanto antes como después de las maniobras de regulación. En el apartado referido, se hace mención a tres aspectos que se deben tener en cuenta para calcular este valor: (1) hora o rango horario de referencia, (2) longitud del periodo de estudio y (3) retardo o lapso temporal.
- *Análisis y eliminación de componentes de consumo a largo plazo* – Por último, para aquellos casos en los que no se dispone de datos monitorizados de consumo en usuarios (como es el presente caso) hay que introducir consumos estimados. A pesar de introducir un elevado grado de incertidumbre en el posterior cálculo de las pérdidas reales, para valorar correctamente el efecto que la gestión de presiones tiene sobre su disminución de fugas, ha de eliminarse de las series de caudales totales las componentes a largo plazo relativas a los perfiles de consumo.

En base a estas consideraciones y combinando entre sí determinados criterios, se han establecido tres métodos estándares para el cálculo de la diferencia de anterior y posterior a las maniobras de regulación. En todos ellos se ha utilizado como valor de CMN diario (CMN_{diario}) el mínimo valor de caudal horario, independientemente de la hora a la que se produzca éste. También hay que desatacar que para evitar el efecto distorsionador de cambios de consumo semanales (por ejemplo entre días de diario y fines de semana) todos los periodos considerados se han tomando en bloques de 7 días.

Las otras dos variables relativas al periodo de estudio sí que han sido modificadas: longitud del periodo de estudio, y lapso o retardo respecto al instante de maniobras de GP. También se ha variado el aspecto relativo al *ajuste de series*, eliminando las componentes a largo plazo. La utilización de ésta técnica se ha visto supeditada a la naturaleza de los perfiles en la series de caudal, a la disponibilidad de datos estables y al instante de las maniobras de regulación, en relación a la serie disponible de datos. Los métodos se resumen en los siguientes epígrafes:

- **Método 1 – Sin retardo temporal y sin ajuste de series.** Se ha utilizado en los casos en los que la serie de caudales no presenta variaciones significativas a largo plazo o en aquellas situaciones en las que se ha tenido que limitar la longitud del periodo de estudio a un valor reducido (por falta de datos generalmente). En este último supuesto se trabaja con la hipótesis de que la serie no sufre

modificaciones relevantes de consumo antes y después de las maniobras de regulación.

- **Método 2 – Sin retardo temporal y con ajuste de series.** Este criterio se ha implementado cuando se ha dispuesto de series suficientemente largas como para deducir el comportamiento estacional de la serie de $CMN_{diarios}$. En este caso, se ha utilizado la primera anualidad completa de datos para definir la función de ajuste a la serie, replicando la misma al resto de años y sustrayendo estos valores de la serie original.
- **Método 3 – Con retardo temporal anual y ajuste de series.** Por último, cuando la serie de caudales presenta una componente estacional relevante, pero no se puede ajustar la misma en un periodo anterior a las maniobras de regulación, se ha optado por abordar el análisis tomando un periodo anterior a las maniobras y otro posterior, pero un lapso de n años. Se supone en este caso, al igual que en el ‘método 1’, que la serie no se verá influenciada por la variabilidad de consumos al corresponder el mismo periodo estacional.

Hay que dejar claro en este punto, que el cálculo llevado a cabo en este apartado se focaliza en el *descenso de CMN*. El cálculo de CMN de referencia (CMN_{ref}) para deducir el nivel de fugas se implementará en el apartado siguiente.

6.2.1.1 Análisis preliminar de componentes de series de caudales

Para la aplicación de estos métodos previamente ha sido fundamental analizar las componentes de cada serie de caudales. En función de los tipos de perfiles semanales y sobre todo de la existencia o no de componentes a largo plazo se desarrollarán unos pasos y otros para la aplicación de los tres métodos anteriores. La Tabla 6.4 recoge las componentes en las que se ha desagregado las series de caudales recabadas de cada sector.

Tabla 6.4. Componentes temporales de las series de caudal total de cada sector de estudio

Sector de estudio	Fecha inicio	Componentes					
		E_{t-a}	T_t	E_{t-d}			H_c
				T1	T2	T3	
Alcobendas Centro Alto	30/03/2012	Sí	-				No
Barrio el Aeropuerto	13/12/2011	-	-				No
BC1 Horcajo	18/01/2013	-	-				No
BC1 La Piovera	12/12/2011	Sí	-				No
BC1 Parque Empr. JCI	11/12/2011	Sí	-				No
Coslada Centro	06/05/2011	Sí	-				Sí
Getafe Atalayuela	20/12/2012	Sí	-				No
Getafe El Bercial	25/09/2012	Sí	-				No
Getafe Este	18/11/2011	Sí	-				No
Las Rozas Monteverde	14/12/2011	Sí	-				Sí
Mostoles Parque Coimbra	12/07/2011	Sí	-				Sí
Parla Oeste	19/05/2011	Sí	-				Sí
Torrejón Sur	06/07/2011	Sí	-				No
Valdetorres Pueblo	29/11/2011	-	-				No

En el Anexo A (subsección A.3), se desarrolla con más detalle el análisis llevado a cabo. Los acrónimos recogidos en la tabla son los siguientes: estacionalidad anual (E_{t-a}), tendencia (T_t), patrón diario (E_{t-d}) y heterocedasticidad condicionada anual (H_c). En cuanto al patrón diario se diferencia a su vez tres tipos de patrones:

- T1: patrón diario estable todos los días.
- T2: patrón diario diferente entre días laborales y festivos.
- T3: patrón diario diferente cada día de la semana.

6.2.1.2 Cálculo con ‘método 1’ (sin retardo y sin ajuste de series)

Este método se ha aplicado sobre aquellos sectores en los que no se han detectado componentes anuales – estacionalidad anual, tendencia o heterocedasticidad condicionada – (o bien porque no existen o bien porque la extensión de la serie no permite su análisis). Según la Tabla 6.4, estos sectores son: ‘Barrio el Aeropuerto’, ‘BC1 Horcajo’ y ‘Valdetorres Pueblo’.

Las series se han prolongado en la misma magnitud (número de días) tanto para el periodo anterior a las maniobras de regulación (hacia atrás) como posterior (hacia adelante). A esta longitud de la serie en ambos sentidos lo vamos a denominar ‘ancho de ventana’. Los límites de los periodos seleccionables se muestran en el Anexo A (A.1.3). Estos límites se basan o bien en la finalización de la serie total o bien en la consistencia de los datos. Sobre estos datos se ha llevado a cabo previamente un proceso de depuración también recogido en el citado Anexo A (A.1.2). La Figura 6.9 y la Tabla 6.5 muestran los periodos de estudio para los dos casos sobre los que se aplica este método.

Figura 6.9. Periodos de estudio seleccionados para los sectores analizados mediante ‘Método 1’

Tabla 6.5. Fechas de cálculo de CMN en sectores analizados a través de ‘método 1’

Sector	Número de días	Anterior a GP		Posterior a GP	
		Inicio	Fin	Inicio	Fin
Barrio el Aeropuerto	91	12/09/2011	12/12/2011	13/12/2011	13/03/2012
BC1 Horcajo	35	13/12/2012	17/01/2013	18/01/2013	22/02/2013
Valdetorres pueblo	329	03/01/2011	28/11/2011	29/11/2011	23/10/2012

Aun tratándose de casos sin variación estacional anual (las series tan sólo se componen de estacionalidad o patrón diaria y componente aleatoria), el CMN varía en función del ancho de ventana seleccionado. Esta variabilidad puede deberse a cambios en la presión (en cuyo caso estaría asociada a variación del volumen de fugas o de componente de consumo dependiente de la presión) o más generalmente al carácter estocástico del consumo.

En la Figura 6.10 se muestran los resultados de CMNs calculados para cada uno de los tres sectores:

- Las sub-figuras de la izquierda, muestran los valores de CMN_{diario} . La serie azul ‘antes de GP’ parte desde el día anterior al inicio de maniobras (día 1) y sigue “hacia atrás” en la serie global. La serie roja ‘después de GP’ parte del mismo día de maniobras de regulación (día 1) y sigue “hacia adelante” en la serie global.
- Las sub-figuras de la derecha muestran el CMN medio o CMN_{ref} calculado en función del ancho de ventana (número de días utilizado para calcular el CMN). Este se calcula como la media de todos los caudales diarios anteriores. La línea negra discontinua muestra diferencia entre el CMN antes y después de las maniobras, es decir, la reducción derivada de la gestión de presión.

Figura 6.10 Valores de CMN absoluto diarios (izquierda) y CMN_{ref} en función del ancho de ventana (derecha)

Se puede apreciar en ambos casos cómo la reducción del CMN depende del ancho de ventana. La Tabla 6.6 recoge los valores finalmente obtenidos de CMN medio, ofreciendo su valor global medio y la desviación estándar.

Tabla 6.6. Resultados de CMN_{ref} anterior y posterior a maniobras de GP y reducción de caudal; aplicación sobre casos analizados mediante ‘método 1’

Sector	CMN (anterior a GP) (m ³ /s) · 10 ⁻³		CMN (posterior a GP) (m ³ /s) · 10 ⁻³		Diferencia CMN (m ³ /s) · 10 ⁻³	
	Media	Desv.est.	Media	Desv.est.	Media	Desv.est.
Barrio el Aeropuerto	2.05	0.25	1.09	0.03	0.96	0.27
BC1 Horcajo	1.85	0.18	1.10	0.11	0.76	0.26
Valdetorres Pueblo	6.70	0.41	5.14	0.48	1.56	0.33

6.2.1.3 Cálculo con ‘método 2’ (sin retardo y con ajuste de series)

Este método se ha aplicado sobre los casos de estudio en los que se ha detectado una componente de tendencia continua o aquellos en los que se han detectado componentes estacionales anuales – estacionalidad anual y heterocedasticidad condicionada – y suficiente periodo de datos previo a las maniobras de regulación para poder llevar a cabo el ajuste de las series. Este periodo previo, se ha definido como límite inferior al menos un año completo de datos. Los pasos acometidos mediante este método se resumen a continuación:

- Paso 1 – Eliminación de datos anómalos sobre la serie de CMN diarios.
- Paso 2 – Ajuste de función senoidal, mediante series de ‘Fourier’ o ‘suma de senos’ (ver Anexo A – subsección A.3). El ajuste se ha llevado a cabo fijando como frecuencia de las funciones resultantes un valor de $(2\pi/365)$.
- Paso 3 – Replicación de la función de ajuste del paso 2 a lo largo del periodo de estudio total.
- Paso 4 – Ajuste de la serie de datos de CMNs restando la serie replicada ajustada.

Refiriéndose nuevamente a los datos recogidos en el Anexo A – sub-sección Anexo A.1.3 – los casos a los que aplicado este método son los siguientes: ‘Alcobendas Centro Alto’, ‘BC1 Parque Empresarial JCI’, ‘Getafe Atalayuela’, ‘Las Rozas Monteverde’

Tabla 6.7. Fechas de cálculo de CMN en sectores analizados a través de ‘método 2’

Sector	Número de días	Anterior a GP		Posterior a GP	
		Inicio	Fin	Inicio	Fin
Alcobendas Centro Alto	266	07/07/2011	29/03/2012	30/03/2012	21/12/2012
BC1 Parque Empr. JCI	14	26/12/2011	10/12/2011	11/12/2011	25/12/2011
Getafe Atalayuela	63	17/10/2012	19/12/2012	20/12/2012	21/02/2013
Las Rozas Monteverde	364	14/12/2011	13/12/2012	14/12/2012	13/12/2013

Los pasos enumerados anteriormente se muestran gráficamente (ver Figura 6.11) en forma de resultados para los sectores con una mayor longitud de serie disponible: ‘Alcobendas Centro Alto’ y ‘Las Rozas Monteverde’. En el paso 2, se puede observar cómo se lleva a cabo el ajuste de la serie de CMNs mediante una función de tipo ‘series de Fourier’, fijando previamente el periodo anual deseado para dicha función. Esto permite prolongar correctamente esta función de ajuste para el resto de años – ‘Paso 3’ – para posteriormente restarlo de la serie inicial ‘Paso 4’.

Figura 6.11. Resultados gráficos de la aplicación del ‘método 2’: ajuste de series

Los resultados obtenidos se muestran numéricamente en la Tabla 6.8 y gráficamente en la Figura 6.12.

Tabla 6.8. Resultados de CMN_{ref} anterior y posterior a maniobras de GP y reducción de caudal; aplicación sobre casos analizados mediante ‘método 2’

Sector	CMN anterior a GP (m³/s) · 10 ⁻³		CMN posterior a GP (m³/s) · 10 ⁻³		Diferencia CMN (m³/s) · 10 ⁻³	
	Media	Desv.est.	Media	Desv.est.	Media	Desv.est.
Alcobendas Centro Alto	25.28	5.37	20.22	3.02	5.06	3.34
BC1 Parque Empr. JCI	1.09	0.13	0.86	0.05	0.23	0.18
Getafe Atalayuela	10.32	0.79	8.63	0.91	1.69	0.38
Las Rozas Monteverde	1.70	0.41	1.09	0.39	0.61	0.36

Figura 6.12. CMN_{ref} en función del ancho de ventana para sectores con ‘método 2’

6.2.1.4 Cálculo con ‘método 3’ (con retardo anual y sin ajuste de series)

Este método se ha aplicado sobre aquellos sectores en los que se asume un comportamiento estacional anual, pero el periodo de estudio no es suficiente como para poder realizar un ajuste de las series como en el ‘método 2’. Estos periodos se pueden ver en el Anexo A – subsección A.3. Los sectores calculados mediante este método son: ‘BC1 La Piovera’, ‘Coslada Centro’, ‘Getafe El Bercial’, ‘Getafe Este’, ‘Móstoles Parque Coimbra’, ‘Parla Oeste’ y ‘Torrejón Sur’.

Tabla 6.9. Fechas de cálculo de CMN en sectores analizados a través de ‘método 3’

Sector	Número de días	Anterior a GP		Posterior a GP	
		Inicio	Fin	Inicio	Fin
BC1 La Piovera	14	28/11/2011	12/12/2011	28/11/2012	18/12/2012
Coslada Centro	70	24/02/2011	05/05/2011	24/02/2012	05/05/2012
Getafe El Bercial	147	25/09/2011	19/02/2012	25/09/2012	19/03/2013
Getafe Este	28	15/09/2011	13/10/2011	15/09/2012	13/10/2012
Móstoles Parque Coimbra	91	01/01/2011	01/04/2011	01/01/2012	01/04/2012
Parla Oeste	147	01/11/2010	28/03/2011	01/11/2011	28/03/2012
Torrejón Sur	182	01/01/2011	02/07/2011	01/01/2012	02/07/2013

Los resultados obtenidos se muestran numéricamente en la Tabla 6.10 y Figura 6.13.

Figura 6.13. CMN_{ref} en función del ancho de ventana para sectores con ‘método 3’

Con esta metodología han surgido varios sectores los cuales, contraindicando el sentido común de lo que debería ocurrir, no se produce una reducción del CMN_{ref} tras las maniobras de gestión de presiones, sino que este valor aumenta. En concreto, estos son los sectores ‘Getafe Este’, ‘Móstoles Parque Coímbra’ y ‘Parla Oeste’.

Esto indica que este método debe utilizarse con cautela. Su aplicación será adecuada siempre que se haya cerciorado previamente que el perfil de consumos de un año a otro no ha variado. Son múltiples los factores que pueden afectar sobre esta variabilidad: incremento/decremento poblacional fijo, condicionantes externos como factor climatológico, etc. En todos estos casos, la utilización de este método es poco recomendable.

Tabla 6.10. Resultados de CMN_{ref} anterior y posterior a maniobras de GP y reducción de caudal; aplicación sobre casos analizados mediante ‘método 3’

Sector	CMN anterior a GP (m ³ /s) · 10 ⁻³		CMN posterior a GP (m ³ /s) · 10 ⁻³		Diferencia CMN (m ³ /s) · 10 ⁻³	
	Media	Desv.est.	Media	Desv.est.	Media	Desv.est.
BC1 La Piovera	3.96	0.16	2.37	0.04	1.59	0.12
Coslada Centro	38.02	2.65	24.71	3.75	13.31	5.95
Getafe El Bercial	8.50	0.78	4.87	0.55	3.63	1.08
Getafe Este	11.70	1.11	14.61	1.90	-2.90	2.93
Móstoles Parque Coímbra	14.31	2.29	16.69	1.77	-2.37	0.68
Parla Oeste	17.98	0.36	19.57	0.79	-1.59	0.83
Torrejón Sur	61.47	9.99	37.04	5.97	24.44	15.47

6.2.1.5 Resumen de resultados: valores medios y dispersión

La Tabla 6.11 recoge todos los resultados obtenidos en los apartados anteriores. Desatan los tres valores negativos obtenidos a través del ‘método 3’, indicando una mala praxis.

Tabla 6.11. Resultados de CMN_{ref} anterior y posterior a maniobras de GP y reducción de caudal; aplicación sobre casos analizados mediante ‘método 3’

Sector	Método	CMN anterior a GP (m ³ /s) · 10 ⁻³		CMN posterior a GP (m ³ /s) · 10 ⁻³		Diferencia CMN (m ³ /s) · 10 ⁻³	
		Media	Desv.est.	Media	Desv.est.	Media	Desv.est.
Alcobendas Centro Alto	2	25.28	5.37	20.22	3.02	5.06	3.34
Barrio el Aeropuerto	1	2.05	0.25	1.09	0.03	0.96	0.27
BC1 Horcajo	1	1.85	0.18	1.10	0.11	0.76	0.26
BC1 Parque Empr. JCI	2	1.09	0.13	0.86	0.05	0.23	0.18
BC1 La Piovera	3	3.96	0.16	2.37	0.04	1.59	0.12
Coslada Centro	3	38.02	2.65	24.71	3.75	13.31	5.95
Getafe Atalayuela	2	10.32	0.79	8.63	0.91	1.69	0.38
Getafe El Bercial	3	8.50	0.78	4.87	0.55	3.63	1.08
Getafe Este	3	11.70	1.11	14.61	1.90	-2.90	2.93
Las Rozas Monteverde	2	1.70	0.41	1.09	0.39	0.61	0.36
Móstoles Parq. Coímbra	3	14.31	2.29	16.69	1.77	-2.37	0.68
Parla Oeste	3	17.98	0.36	19.57	0.79	-1.59	0.83
Torrejón Sur	3	61.47	9.99	37.04	5.97	24.44	15.47
Valdetorres Pueblo	1	6.70	0.41	5.14	0.48	1.56	0.33

Para visualizar la distribución de los valores de CMN reducido se proyecta en la Figura 6.14 los valores en forma de diagrama de caja.

Figura 6.14. Diagramas de cajas de ‘descenso de CMN’ tras maniobras GP ($\text{m}^3/\text{s} \cdot 10^{-3}$)

6.2.2 Cálculo de Fugas reales durante el CMN

Para deducir el nivel de fugas durante el CMN se han de eliminar las componentes de *consumo* y *pérdidas aparentes* según la expresión (67). Estas dos componentes, sin disponer de datos monitorizados, también pueden introducir un elevado grado de incertidumbre en el cálculo. Las componentes relativas a *pérdidas aparentes*, dado que se carecía de datos sobre la misma, no ha sido considerada en el análisis.

6.2.2.1 Cálculo de consumos

Datos utilizados e hipótesis realizadas

Los consumos se han calculado a partir de una campaña ad-hoc que se llevó a cabo por la propia empresa CYII y publicada en forma de cuaderno de I+D+i (Cubillo et al. 2008). Detalles sobre esta campaña se pueden ver en 3.4.2.2. En este estudio se lleva a cabo un exhaustivo análisis de consumos domésticos, parametrizando los mismos en función de múltiples aspectos. Para los objetivos de este análisis, se han tomado los datos correspondientes a consumos nocturnos. Estos datos, ofrecidos en unidades de 'litros/vivienda/hora' vienen desagregados según los siguientes parámetros:

- Periodo estacional: invierno-verano
- Tipo de vivienda: unifamiliar y plurifamiliar.
- Tipo de uso doméstico: grifo, lavadora, lavavajillas, cisterna, ducha, exterior y fugas.

Para llevar a cabo este cálculo se han realizado las siguientes hipótesis:

- Los valores tomados de consumo se han considerado para periodos de invierno. Es en estos periodos cuando menor consumo tiene lugar en los sectores (la mayoría de uso residencial) y por otro lado cuando la serie es más estable.
- Las series de caudales que se han ajustado mediante el 'método 2' en el apartado anterior, se han hecho realizado precisamente en base a valores de consumo en periodo de *invierno*. Ante la eliminación de componente variable de consumos,

éstos se han ajustado para un valor inicial tomando como referencia valores de invierno. Esto, ha permitido utilizar los valores precisamente de este periodo.

- Todos los sectores se han tratado acorde a estos valores, independientemente de su uso predominante. La mayoría de sectores analizados se asocian a un uso predominante ‘residencial’ por lo que los usos domésticos predominan. No obstante, unos pocos como puede ser el caso de ‘Barrio el Aeropuerto’ o ‘Parque Empresarial Juan Carlos I’, pueden tener otro tipo de usos regularmente por lo que la incertidumbre en éstos será mayor.

Desagregación en componentes en función de su relación con la presión

Tomando los valores de la Figura 3.10 (Cubillo et al. 2008), los consumos horarios por vivienda, durante el invierno varían entre los siguientes rangos (Tabla 6.12):

Tabla 6.12 Consumo medio nocturno (invierno) en función de tipo de vivienda (Cubillo et al. 2008)

Tipo de vivienda	Consumo (l/viv./h)		
	Inferior	Superior	Media
Unifamiliar	5.8	7.4	6.6
Plurifamiliar	3.6	4.2	3.9

En este mismo documento, se recogen la distribución de usos nocturnos. Estos se muestran en la Tabla 6.13 en función del tipo de vivienda: unifamiliares y plurifamiliares. Además, se añade una columna en la que se indica la naturaleza que se va a asignar a cada tipo de uso en función de su relación con la presión de la red.

Tabla 6.13. Distribución de usos nocturnos para viviendas unifamiliares (Cubillo et al. 2008)

Tipo de uso	Tipo de vivienda		Dependencia de presión
	Unif.(%)	Pluri.(%)	
Fugas	5	21	Dependiente
Grifo	26	31	Parcial
Lavadora	4	5	Independiente
Lavavajillas	1	1	Independiente
Cisterna	11	29	Independiente
Ducha	13	13	Parcial
Exterior	39	-	Dependiente

Con los valores de consumos nocturnos medios de la Tabla 6.12 y las distribuciones de la Tabla 6.13, se ha calculado el consumo medio para cada tipo de uso. Finalmente se han agrupado estos valores en función del tipo de relación con la presión de la red agrupándolos en tres categorías. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 6.14.

Tabla 6.14. Consumo medio nocturno (invierno) en función de tipo de vivienda y de relación del tipo de uso con la presión de la red

Tipo de uso	Consumo (l/viv./h)		Dependencia de presión	Consumo (l/viv./h)	
	Unif.	Pluri.		Unif.	Pluri.

Tipo de uso	Consumo (l/viv./h)		Dependencia de presión	Consumo (l/viv./h)	
	Unif.	Pluri.		Unif.	Pluri.
Fugas Exterior	0.33	0.82	Dependiente	2.9	0.82
Grifo	2.57	-	Parcialmente dependiente	2.58	1.72
Ducha	1.72	1.21			
Lavadora	0.86	0.51	Independiente	1.07	1.36
Lavavajillas	0.27	0.19			
Cisterna	0.07	0.04			
	0.73	1.13			

El siguiente paso ha sido obtener los consumos horarios mínimos por sector, al multiplicar los valores anteriores por el número de viviendas de cada tipo en cada sector. Éstas se han tomado de las bases corporativas de CYII en la que se citan el número de contratos de cada sector por tipo de vivienda. La Tabla 6.15 recoge los datos de vivienda junto a los consumos medios horarios nocturnos calculados.

Tabla 6.15. Consumos nocturnos medios en invierno en cada sector de estudio en función de su relación de tipo de uso con la presión de la red

Sector	Viviendas		Consumo (l/s)			
	Unif.	Plurif.	Depend.	Parcial	Independ.	Total
Alcobendas Centro Alto	1483	15517	4.73	8.48	6.30	19.51
Barrio el Aeropuerto	1	563	0.13	0.27	0.21	0.61
BC1 Horcajo	0	2653	0.60	1.27	1.00	2.87
BC1 La Piovera	515	649	0.56	0.68	0.40	1.64
BC1 Parque Empr. JCI	-	-	-	-	-	-
Coslada Centro	1390	13228	4.13	7.32	5.41	16.86
Getafe Atalayuela	1	-	0.0008	0.0007	0.0003	0.002
Getafe El Bercial	343	0	0.28	0.25	0.10	0.62
Getafe Este	1954	970	1.79	1.86	0.95	4.61
Las Rozas Monteverde	173	132	0.17	0.19	0.10	0.46
Móstoles Parq. Coímbra	820	1193	0.93	1.16	0.69	2.78
Parla Oeste	2183	15125	5.20	8.79	6.36	20.36
Torrejón Sur	1726	14537	4.70	8.18	6.00	18.89
Valdetorres Pueblo	1243	506	1.12	1.13	0.56	2.81

El sector ‘BC1 Parque Empresarial Juan Carlos I’, no se dispone de datos de viviendas. De forma análoga, el sector ‘Getafe Atalayuela’ no se considera consistente al tratarse de un sector de uso predominantemente ‘industrial’ y no disponer de datos sobre sus consumos.

Dispersión de datos de consumo

Considerando los valores límite de consumos de la Tabla 6.12, en lugar de los valores medios, se puede estudiar la posible dispersión de los resultados. En este caso se han sustraído los dos casos mencionados, para los cuales no se cuenta con datos consistentes de consumo debido a la falta de valores de vivienda, tanto unifamiliares como plurifamiliares. Los resultados se recogen en la Tabla 6.16

Tabla 6.16. Rango de consumos nocturnos en invierno en cada sector de estudio en función de su relación de tipo de uso con la presión de la red

Sector	Consumo (l/s)							
	Dependiente		Parcialmente		Independiente		Total	
	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.
Alcobendas Cent. Alto	4.31	5.15	7.78	9.18	5.80	6.81	17.89	21.13
Barrio el Aeropuerto	0.12	0.14	0.25	0.29	0.20	0.23	0.56	0.66
BC1 Horcajo	0.56	0.65	1.17	1.36	0.93	1.08	2.65	3.10
BC1 La Piovera	0.50	0.62	0.61	0.75	0.36	0.44	1.47	1.81
BC1 Parque Emp. JCI	-	-	-	-	-	-	-	-
Coslada Centro	3.77	4.50	6.71	7.92	4.96	5.84	15.45	18.27
Getafe Atalayuela	-	-	-	-	-	-	-	-
Getafe El Bercial	0.24	0.31	0.22	0.28	0.09	0.11	0.55	0.70
Getafe Este	1.59	2.00	1.66	2.07	0.85	1.05	4.09	5.12
Las Rozas Monteverde	0.15	0.19	0.17	0.21	0.09	0.11	0.41	0.51
Móstoles Parq. Coímb.	0.83	1.03	1.04	1.27	0.63	0.76	2.50	3.06
Parla Oeste	4.73	5.68	8.05	9.54	5.84	6.88	18.62	22.10
Torrejón Sur	4.28	5.12	7.50	8.87	5.52	6.49	17.30	20.48
Valdetorres Pueblo	0.99	1.25	1.01	1.26	0.50	0.62	2.49	3.13

6.2.2.2 Cálculo de fugas antes de las maniobras de regulación

Una vez calculados los valores de referencia de consumo (para periodos invernales), se ha procedido a calcular las fugas reales. Este proceso se acomete en dos pasos:

- Calcular el valor de CMN de referencia (CMN_{ref}), a partir de valores de $CMN_{diarios}$ en periodo invernal.
- Extraer la componente de consumo calculada en este apartado, obteniendo el valor de ‘fugas reales’ antes de GP.

En la Tabla 6.17 se muestran los valores medios calculados de fugas durante el periodo de mínimo nocturno, junto al porcentaje que supone respecto al total de caudal.

Tabla 6.17. Valores de fugas estimadas durante el periodo de CMN anteriores a maniobras de GP

	CMN	Consumo	Fugas	%
Alcobendas Cent. Alto	25.28	19.51	5.77	22.82
Barrio el Aeropuerto	2.05	0.61	1.44	70.24
BC1 Horcajo	1.85	2.87	-1.02	-
BC1 La Piovera	3.96	1.64	2.32	58.59
Coslada Centro	38.02	16.86	21.16	55.65
Getafe El Bercial	8.50	0.62	7.88	92.71
Getafe Este	11.70	4.61	7.09	60.60
Las Rozas Monteverde	1.70	0.46	1.24	72.94
Móstoles Parq. Coímb.	14.31	2.78	11.53	80.57
Parla Oeste	17.98	20.36	-2.38	-
Torrejón Sur	61.47	18.89	42.58	69.27
Valdetorres Pueblo	6.70	2.81	3.8	58.06

6.2.2.3 Cálculo de fugas después de las maniobras de regulación

Para el periodo posterior a las maniobras de regulación, se parte de los valores de descenso de CMN calculados anteriormente y recogidos en la Tabla 6.11. La disminución de caudal total tras la reducción de presión se asume estar conformada, por un lado por un descenso del consumo dependiente a la presión y por otro por una disminución de las fugas. Por ello, los pasos ejecutados para deducir las fugas durante este tramo son:

- Calcular la componente de consumo que se reduce, a través de la ecuación que relaciona presión y consumo (107).

$$\frac{C_1}{C_0} = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{N3} \quad (105)$$

Donde C_0 y C_1 , y P_0 y P_1 son los consumos y presiones medias durante los instantes de análisis en los periodos anterior y posterior respectivamente; $N3$ es el exponente que relaciona presión y caudal, el cual se asume un valor igual a 0.5.

La Tabla 6.18 recoge los valores P_0 , P_1 , C_0 y C_1 . Los dos primeros se han extraído de las series de datos ofrecidas por la CYII y depurados posteriormente como se describe en Anexo A – A.1.2. El consumo dependiente de la presión C_0 anterior a la regulación se ha calculado y recogido en la Tabla 6.18.

Tabla 6.18. Valores de consumo y presión durante CMN, en periodos anterior y posterior a maniobras de regulación

Sector	Presión		Consumo	
	Antes (P_0)	Después (P_1)	Antes (C_0)	Después (C_1)
Alcobendas Cent. Alto	53.28	39.47	4.73	4.07
Barrio el Aeropuerto	95.68	59.06	0.13	0.10
BC1 Horcajo	67.83	52.89	0.60	0.53
BC1 La Piovera	102.04	63.81	0.56	0.44
Coslada Centro	40.36	36.42	4.13	3.92
Getafe El Bercial	69.56	66.23	0.28	0.27
Getafe Este	45.28	36.49	1.79	1.61
Las Rozas Monteverde	46.11	35.44	0.17	0.15
Móstoles Parq. Coímb.	58.84	41.23	0.93	0.78
Parla Oeste	32.07	22.39	5.20	4.35
Torrejón Sur	75.61	59.76	4.70	4.18
Valdetorres Pueblo	47.65	41.65	1.12	1.04

- Deducir las fugas durante este periodo a través del balance diferencial entre ‘diferencial de caudal’ y ‘diferencial de consumo’.

$$\Delta CMN = \Delta C + \Delta F \quad (106)$$

En la Tabla 6.19 se recogen los valores tanto de diferencia de CMN, calculados en la sección anterior, como de diferencia de consumos. A partir de estos datos, y con las fugas durante el periodo anterior a las maniobras se ha calculado las fugas durante el tramo posterior a la regulación.

Tabla 6.19. Valores de fugas estimadas durante el periodo de CMN posteriores a maniobras de GP

Sector	Δ CMN	Consumo			Fugas		
		Antes	Después	Δ Cons.	Antes	Δ Fugas	Después
Alcobendas Cent. Alto	5.06	4.73	4.07	0.66	5.77	4.4	1.37
Barrio el Aeropuerto	0.96	0.13	0.10	0.03	1.44	0.93	0.51
BC1 Horcajo	0.76	0.60	0.53	0.07	-1.02	0.69	-0.69
BC1 La Piovera	1.59	0.56	0.44	0.12	2.32	1.47	0.85
Coslada Centro	13.31	4.13	3.92	0.21	21.16	13.1	8.06
Getafe El Bercial	3.63	0.28	0.27	0.01	7.88	3.62	4.26
Getafe Este	-2.90	1.79	1.61	0.18	7.09	-	-
Las Rozas Monteverde	0.61	0.17	0.15	0.02	1.24	0.59	0.65
Móstoles Parq. Coímb.	-2.37	0.93	0.78	0.15	11.53	-	-
Parla Oeste	-1.59	5.20	4.35	0.85	-2.38	-	-
Torrejón Sur	24.44	4.70	4.18	0.52	42.58	23.92	18.66
Valdetorres Pueblo	1.56	1.12	1.04	0.08	3.8	1.48	2.32

6.2.2.4 Reducción de fugas durante el CMN y mejora del rendimiento de red durante CMN

Finalmente, una vez deducidas las fugas antes y después de la gestión de presiones y el evaluando respecto al caudal circulante, se puede calcular tanto el porcentaje de fugas reducidas como la mejora en el rendimiento de la red. Todos estos valores, recordemos, se corresponden con el tramo de mínimo caudal circulante (nocturno). Los resultados se pueden ver en la Tabla 6.20.

Tabla 6.20. Resultados finales de disminución de fugas y mejora del rendimiento de la red debido a las maniobras de gestión de presiones (correspondiente al periodo de caudales mínimos).

Sector	Fugas (litros/segundo)				Rendimiento red (%)		
	Antes	Después	Δ Fugas	% Dism.	Antes	Después	Mejora
Alcobendas Cent. Alto	5.77	1.37	4.4	76.26	22.82	6.78	16.08
Barrio el Aeropuerto	1.44	0.51	0.93	64.58	70.24	46.79	23.45
BC1 Horcajo	-	-	-	-	-	-	-
BC1 La Piovera	2.32	0.85	1.47	63.36	58.59	35.86	22.73
Coslada Centro	21.16	8.06	13.1	61.91	55.65	32.62	23.03
Getafe El Bercial	7.88	4.26	3.62	45.94	92.71	87.47	5.24
Getafe Este	7.09	-	-	-	-	-	-
Las Rozas Monteverde	1.24	0.65	0.59	47.58	72.94	59.63	13.31
Móstoles Parq. Coímb.	11.53	-	-	-	-	-	-
Parla Oeste	-2.38	-	-	-	-	-	-
Torrejón Sur	42.58	18.66	23.92	56.18	69.27	50.38	18.89
Valdetorres Pueblo	3.8	2.32	1.48	38.95	58.06	45.14	12.92

6.2.3 Cálculo de P_{med}

El cálculo de la presión media se ha realizado fundamentalmente a través de dos métodos de los descritos en el apartado metodológico: método topográfico y método de pérdida de carga. La aplicación de uno u otro se vio supeditada a la disponibilidad de datos y los resultados de los mismos:

- **Método 1 – Topográfico.** Este método, aplicado habitualmente en casos donde se ha comprobado que la pérdida de carga es relativamente baja – como pueden ser las redes sobredimensionadas – (Renaud et al. 2015; García et al. 2006), se ha aplicado en el presente análisis a todos los sectores de estudio.
- **Método 2 – Pérdida de carga entre puntos monitorizados.** La aplicación de este método se realizó sobre aquellos sectores de los que se disponía datos consistentes y suficientes para conformar una curva de relación caudal/pérdida de carga. El procedimiento seguido en este método se describe en el apartado 3.4.3.3 (Método de pérdida de carga entre dos puntos).

6.2.3.1 Método topográfico

Pre-tratamiento de datos orográficos y topológicos

Para la evaluación de datos correspondientes a sectores reales se ha desarrollado un proceso de importación automática de información proveniente de capas tipo SIG, o archivos vectoriales geográficos. El proceso ha sido elaborado ‘ad-hoc’ para la estructura de archivos y el tipo de información contenida en los archivos del caso de estudio analizado. Información y resultados detallados sobre este proceso se puede encontrar en el Anexo A – subsección A.4. La información engloba geográficamente la totalidad de la red de CYII, disponiendo de datos de los un gran número de elementos de la red: superficie de sectores, caudalímetros, desagües, conducciones, válvulas (de corte, tipo ventosa, reguladoras, de alivio, de retención, etc.) o puntos de acometida, entre otros. Los pasos ejecutados para extraer la información necesaria se recogen a continuación:

- Selección de elementos que se desean utilizar: superficie de sectores, conducciones, puntos de acometida, válvulas de corte y VRPs.
- Crear intersección entre capas de *superficie de sectores* y el resto de elementos (Anexo A – subsección A.4.1).
- Generación de contornos de altura a partir de elementos distribuidos espacialmente que contienen el atributo cota – válvulas de corte, desagües, y otro tipo de válvulas. Para ello se generaron superficies con un elevado grado de ajuste a partir de estos elementos, eliminando previamente aquellos datos anómalos detectados (Anexo A – subsección A.4.2).
- Obtención de factor de ponderación w_i a partir de uno de los parámetros incluidos en la Tabla 3.5. En este caso se ha tomado como factor el número de acometidas, al ser el más preciso para evaluar la afección a usuarios a falta de disponer de

consumos en dichos nodos. Dado que no se disponía de las alturas del elemento ‘acometidas’ se proyectó su capa vectorial sobre la superficie generada con los elementos anteriores (Anexo A – subsección A.4.4).

Cálculo de cota media (z_{med})

Por último, se calcula la elevación media del sector (z_{med}). Ésta se ha deducido utilizando como factor de ponderación la cota de los puntos de acometida. Así, la expresión para calcular en este caso específico z_{med} se deduce de la siguiente forma (107):

$$z_{med} = \frac{\sum_{i=1}^n (z_i) \times w_i}{w_i} \quad (107)$$

Donde z_i y w_i son los niveles de cota y el número de acometidas en cada nivel respectivamente. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 6.21.

Tabla 6.21. Datos de cota de cabecera (VRP), cota media de sector (basado en acometidas) y diferencia de cotas entre cabecera y punto medio

Sector	$z_{cabecera}$ (m)	Número acometidas	z_{med} (m)	Diferencia cotas (m)
Alcobendas Centro Alto	688	3188	683.18	4.82
Barrio el Aeropuerto	606	139	608.10	-2.10
BC1 Horcajo	688	97	686.41	1.59
BC1 La Piovera	667	624	643.82	23.18
BC1 Parque Empr. JC I	668	31	633.64	34.36
Coslada Centro	649	2471	631.50	17.5
Getafe Atalayuela	597	129	594.71	2.29
Getafe El Bercial	628	301	627.77	0.23
Getafe Este	604	2718	568.29	35.71
Las Rozas Monteverde	763	187	755.45	7.55
Leganés Butarque	648	667	638.85	9.15
Mostoles Parque Coimbra	650	938	630.68	19.32
Parla Oeste	660	3521	643.23	16.77
Torrejón Sur	567.9	3221	579.21	-11.28
Valdetorres Pueblo	662	1173	651.79	10.21

6.2.3.2 Métodos basados en pérdida de carga entre dos puntos

El método de pérdida de carga se ha llevado a cabo acorde a los pasos descritos en el apartado 3.4.3.3, para el cálculo de la presión media de cada sector. Se aclaran los siguientes aspectos:

- Se mantienen la hipótesis simplificativa de pérdida de carga lineal a lo largo del trayecto del fluido entre los dos puntos (Fuertes et al. 2002).
- Como factor de ponderación, se ha utilizado el parámetro “acometidas”, siendo éste uno de los más utilizados en redes con una elevada densidad de acometidas como son las zonas residenciales (Renaud et al. 2015).

- Se calcula el punto representativo de presión media a través de otro método (topográfico o hidráulico)
- Se aplica la curva ‘pérdida carga/caudal’ con la correspondiente corrección considerando la diferencia de distancias entre ‘punto de cabecera → punto monitorizado’ y ‘punto de cabecera → punto representativo de presión media’.

Cálculo de curvas relación ‘pérdida de carga / caudal’

Las curvas que relacionan pérdida de carga con caudal circulante se han obtenido a partir de las mediciones de presión en dos puntos: entrada al sector (o cabecera) y punto más alto (o punto crítico). La Figura 6.15 recoge esquemáticamente el proceso llevado a cabo para el cálculo de la curva ‘pérdida de carga / caudal’, tomando los resultados reales de un caso específico (sector ‘Alcobendas Centro Alto’).

Figura 6.15. Proceso para el cálculo de curva de relación ‘Pérdida de carga / Caudal’

Los pasos son los siguientes:

- Paso 1 – Correlacionar ‘caudal’ con ‘diferencia de presiones entre puntos’.

- Paso 2 – Deducir de datos topológicos diferencia de cotas entre ambos puntos.
- Paso 3 – Ajuste la gráfica de correlación de las variables anteriores restando la diferencia de cotas sobre la diferencia presiones para obtener la ‘pérdida de carga’
- Paso 4 – Calcular la curva de mejor ajuste a partir de una ley potencial.

Figura 6.16. Sectores con una elevada dispersión en la relación entre variables correlacionadas

Con los datos ya consolidados, se estudió la relación entre las variables ‘ Q ’ y ‘ $P_{cab} - P_{cri}$ ’. Los datos obtenidos fueron dispares en cuanto a grado de correlación. La mitad de los casos de estudio (un total de 6) presentaron resultados con una gran dispersión (ver Figura 6.16).

Tratando de dar respuesta a esta dispersión en los datos, se analizaron las características de los sectores. En todos estos casos se observó que, o bien el tamaño del sector era reducido, o bien los dos dispositivos de monitorización estaban localizados muy próximos entre sí (ver Figura 6.17). Este aspecto se diferenciaba de los sectores a los que sí se les pudo asignar una función de ajuste de tipo potencial con un grado de ajuste más adecuado.

Figura 6.17. Localización de punto de entrada y punto crítico en sectores con elevada dispersión

Para llevar a cabo este método, se han efectuado una serie de acciones de preproceso de datos (ver Anexo A. Pre-tratamiento y análisis preliminar de datos de sectores reales

de la red de CYII). La sub-sección de este anexo ‘A.1’ hace referencia al tratamiento de los datos obtenidos de las bases corporativas de CYII: *caudal* (Q) y *presión en cabecera* (P_{cab}) de sector. Análogamente, el anexo ‘A.2’ recoge el tratamiento llevado a cabo sobre los datos recabados en la campaña de monitorización de *presión en puntos críticos* (P_{cri}). Algunas de las acciones acometidas fueron: eliminación de datos anómalos, selección de periodos consistentes, agregación temporal (de un paso 5-minutal a horario en el caso de *presión en punto crítico*) y búsqueda de periodos de solapamiento entre variables las tres variables.

Figura 6.18. Ajuste de funciones de relación ‘caudal / pérdida de carga’

La distancia entre ambos puntos se debe medir según la trayectoria recorrida por el fluido. A falta de modelos hidráulicos que permitieran corroborar el recorrido bajo los escenarios hidráulicos impuestos, se optó por medir mediante software tipo SIG la distancia más corta entre ambos.

Frente a los casos anteriores, el resto sí que se ajustaron mediante funciones potenciales. Esta función es la esperada al ser de este tipo las leyes hidráulicas que relacionan pérdida de carga h con el caudal Q . La estructura de la función potencial original utilizada para el ajuste de los datos de pérdida de carga (h) en función del caudal (Q) tenía la estructura siguiente:

$$h(Q) = a * Q^b \quad (108)$$

Donde a , b son parámetros de ajuste.

En algunas de las gráficas se puede observar una desviación significativa de la curva de ajuste para determinados rangos de caudal: casos de ‘Getafe El Bercial’ y ‘Parla Oeste’.

- En el caso de ‘Getafe el Bercial’ la dispersión tiene lugar en un rango cercano a 0. Analizando la serie de datos de partida se observa un conjunto de valores “sospechosos” de producir esta dispersión (ver Figura 6.19). Al observarse que estos valores incoherentes afectan directamente sobre todo el periodo de análisis disponible posterior al inicio de maniobras de regulación, se decide descartar este caso de estudio para el resto del análisis por falta de consistencia en los datos.

Figura 6.19. Periodos de estudio anterior y posterior a las maniobras de regulación de presión.

Punteado a la derecha tramo con valores próximos 0 defectuosos.

- En el caso del sector ‘Parla Oeste’ la anomalía detectada afecta a los datos comprendidos entre el rango aproximado de caudales entre los 0.06 y 0.12 m³/s como se puede observar en la gráfica de la Figura 6.18 (sub-figura abajo/izquierda). Este rango, corresponde al tramos de curva de consigna entre la

que varía la presión de cabecera, tratándose de una tipo de regulación de ‘modelación basada en caudal’ (ver Figura 4.5). Es posible que esta anomalía se deba a una incorrecta agregación horaria de los datos (o bien de presión en cabecera o bien de presión en punto crítico) para este tramo. Por ello, los puntos que presentan esta significativa dispersión son descartados del ajuste pero se continúa con su análisis como caso de estudio con este método.

Restan así finalmente cinco casos en los que se ha podido ajustar debidamente una función de tipo potencial a los datos. Los parámetros de dicha función – a , b en la ecuación (108) – se recogen en la Tabla 6.22, junto a una serie de indicadores de bondad del ajuste. Los indicadores tomados han sido: (1) coeficiente de determinación R^2 y (2) la desviación del error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés).

De estos cinco casos se puede observar como el sector ‘Móstoles Parque Coímbra’ tiene un coeficiente de correlación muy bajo (igual a 0.003). Analizando además el parámetro b de la ecuación resultante, se puede afirmar que la pérdida de carga en esta zona no es dependiente del caudal, pudiéndose considerar despreciable. Para el resto de casos, el coeficiente de determinación es heterogéneo, desde un valor de 0.11 hasta 0.79.

Tabla 6.22. Valores de función de ajuste de curva ‘caudal/pérdida de carga’ e indicadores de grado de bondad del ajuste

Sector	Parámetros $h(Q)$		Bondad de ajuste	
	a	b	R^2	RMSE
Alcobendas Centro Alto	30.78	1.53	0.11	1.23
Coslada Centro	305.4	1.75	0.79	1.35
Móstoles Parque Coímbra	1.29	0.16	0.003	1.11
Parla Oeste	108.6	2.35	0.25*	0.50*
Torrejón Sur	1294	2.99	0.70	0.80

* Valores de sector ‘Parla Oeste’ basados en datos depurados

De estos cinco casos se puede observar como el sector ‘Móstoles Parque Coímbra’ tiene un coeficiente de correlación muy bajo (igual a 0.003). Analizando además el parámetro b de la ecuación resultante, se puede afirmar que la pérdida de carga en esta zona no es dependiente del caudal, pudiéndose considerar despreciable. Para el resto de casos, el coeficiente de determinación es heterogéneo, desde un valor de 0.11 hasta 0.79.

Sub-método 1 - Transformación de curva a punto representativo de presión media

Para el cálculo del punto representativo de presión media se ha partido de la cota de z_{med} calculada en el apartado anterior (ver Tabla 6.21 – columna 4^a z_{med}), utilizando como factor de ponderación las acometidas. A partir de esta cota se deduce el elemento más cercano a dicha cota y se procede a transformar las curvas de la Figura 6.18 atendiendo a la distancia entre el nodo seleccionado como representativo y el nodo monitorizado. La Figura 6.20 muestra los pasos principales llevados a cabo para el cálculo de la curva ‘caudal / pérdida de carga’ para el caso del sector ‘Torrejón Sur’. El proceso de cálculo se puede resumir en los siguientes pasos:

- Definición de punto representativo de presión media (i_{Pmed})– en este caso a partir de la P_{med} calculada mediante el método topográfico (Figura 6.20 arriba-izquierda).
- Determinación de distancia hidráulica desde nodo de cabecera hasta i_{Pmed} e i_{Pcrit} (Figura 6.20 arriba-derecha)
- Transformación de curva mediante interpolación lineal de los valores en función de la distancia (Figura 6.20 abajo)

Figura 6.20. Proceso para el cálculo de relación ‘caudal / pérdida de carga’ en punto representativo de presión media (i_{Pmed})

En la Tabla 6.23 se recogen los resultados obtenidos relativos a los dos primeros pasos para los 4 sectores que restan para aplicar esta metodología. La última columna, recoge el cociente entre las distancias entre i_{Pcrit} e i_{Pmed} .

Tabla 6.23. Distancias entre punto de cabecera y punto representativo de presión media

Sector	Pto. crítico (i_{Pcrit})		Pto. medio (i_{Pmed})			$\frac{\text{dist}(i_{Pcrit})}{\text{dist}(i_{Pmed})}$
	Id	Dist.(km)	Id	Dist.(km)	Cota Z_{med}	
Alcobendas Centro Alto	‘DE.44LM’	1.157	‘233567’	0.971	683.17	1.19
Coslada Centro	‘DE.54IS’	5.350	‘178843’	4.152	631.50	1.29
Parla Oeste	‘DE.64JF’	1.392	‘530789’	1.635	643.23	0.85
Torrejón Sur	‘DE.55DE’	3.322	‘139919’	1.844	579.20	1.80

Valores mayores a '1' indican que la distancia entre el punto de cabecera al punto de presión media es menor que la del punto de cabecera al punto crítico. Esto implica que la pérdida de carga sea menor que en el punto crítico. Esto se en tres de los cuatro casos. El único sector en el que el punto de presión media está más alejado que el punto monitorizado como crítico, y en consecuencia la pérdida de carga será mayor, es el caso de 'Parla Oeste'. Las gráficas finales que representan la relación buscada 'Caudal / pérdida de carga entre cabecera y punto medio' se recogen en la Figura 6.21.

Figura 6.21. Relación 'Caudal / pérdida de carga entre cabecera y punto medio'

6.2.4 Cálculo de fugas diarias: influencia de exponente $N1$

Por último, con los datos de fugas durante el CMN – deducidas a partir de los dos primeros apartados de esta sección (ver 6.2.1 y 6.2.2) – y la relación entre presión en cabecera y presión media de cada sector (ver 6.2.3), se han extrapolado las fugas deducidas durante el periodo de caudales mínimos al resto de horas diarias. Este proceso se lleva a cabo a través de la fórmula global del método del CMN – ecuación (66). Se recuerda de nuevo la misma.

$$F(t) = F_{CMN} \frac{P(t)^{N1}}{P_{CMN}} \quad (109)$$

Los pasos acometidos han sido los siguientes:

- Calcular la presión media y fugas durante el CMN: P_{CMN} y F_{CMN}
- Calcular la presión durante el resto de horas.
- Extrapolar las fugas nocturnas F^{CMN} al resto de instantes a través de la ecuación (66) y asignando un valor al exponente $N1$.

6.2.4.1 Cálculo de presión media durante CMN

Para calcular la presión media durante el periodo de caudales mínimos, se ha aplicado el método topográfico, al asumirse la hipótesis de pérdida de carga despreciable para los rangos de caudales mínimos.

Así, a partir de los valores de presión en cabecera durante el CMN (ver Tabla 6.18) y la relación de presiones entre cabecera y punto medio a partir de las cotas de los nodos de consumo (ver Tabla 6.21), se ha calculado los valores de P_{CMN} medios para cada sector de estudio. Estos se recogen en la Tabla 6.24 tanto para el periodo anterior a las maniobras como el posterior.

Tabla 6.24. Datos de presión medios – antes y después de regulación – durante CMN

Sector	Presión cabecera		Diferencia cotas (m)	Presión media	
	Antes ($P_{cab,0}$)	Después ($P_{cab,1}$)		Antes ($P_{med,0}$)	Después ($P_{med,1}$)
Alcobendas Cent. Alto	53.28	39.47	4.82	58.10	44.29
Barrio el Aeropuerto	95.68	59.06	-2.10	93.58	56.96
BC1 Horcajo	67.83	52.89	1.59	69.42	54.48
BC1 La Piovera	102.04	63.81	23.18	125.22	86.99
Coslada Centro	40.36	36.42	17.5	57.86	53.92
Getafe El Bercial	69.56	66.23	0.23	69.79	66.46
Getafe Este	45.28	36.49	35.71	80.99	72.2
Las Rozas Monteverde	46.11	35.44	7.55	53.66	42.99
Móstoles Parq. Coímb.	58.84	41.23	19.32	78.16	60.55
Parla Oeste	32.07	22.39	16.77	48.84	39.16
Torrejón Sur	75.61	59.76	-11.28	64.33	48.48
Valdetorres Pueblo	47.65	41.65	10.21	57.86	51.86

6.2.4.2 Cálculo de presión media agregadas de forma horaria

El siguiente paso ha sido calcular los valores de presión y caudales para cada periodo horario al que se quiere extrapolar las fugas. Por conveniencia los datos se han agrupado en tramos horarios, obteniendo valores para cada una de las 24 horas del día. Los valores relativos a caudales han sido necesarios para el cálculo de la presión media en aquellos casos en los que se ha considerado pérdida de carga. La Figura 6.22 recoge gráficamente los valores de presión y caudal obtenidos para cada uno de los periodos de estudio (tanto anterior como posterior a la regulación de presión).

Figura 6.22. Valores de presión y caudales medios a lo largo de horas del día para periodos anterior y posterior a las maniobras de regulación de presión

Las gráficas anteriores muestran los valores de presión horaria en cabecera. Para obtener la presión media se aplica la corrección correspondiente:

- Los sectores ‘Alcobendas Centro Alto’, ‘Coslada Centro’ y ‘Torrejón Sur’, como se ha mostrado en la sección anterior, se ha definido curvas de ajuste de la pérdida de carga en función del caudal. Estas curvas se corresponden con la ley potencial expuesta en (108) y los parámetros recogidos en Tabla 6.22. A partir de estos valores, se aplica la corrección correspondiente a la pérdida de carga en función del caudal.
- El resto de sectores se ha corregido mediante los valores de diferencia de cotas de la Tabla 6.24.

En las siguientes figuras se puede observar la corrección de presiones.

Figura 6.23. Corrección de presiones en cabecera a presiones media para casos de estudio analizados mediante ‘método topográfico’

Figura 6.24. Corrección de presiones en cabecera a presiones media para casos de estudio analizados mediante ‘método de pérdida de carga’.

6.2.4.3 Cálculo de fugas horarias: incertidumbre derivada del exponente N1

Por último, ya con todos los datos calculados, se puede extrapolar las fugas nocturnas al resto de horas del día. En este paso, la influencia del exponente N1 será clave. Se ha calculado para dos rangos de valores que se pueden considerar límites:

- N1 = 0.5. Valor asociado a conducciones fijas, sin deformación en función de la presión de la red.
- N1 = 1.5. Dentro del rango de valores para conducciones flexibles, se toma este valor como límite superior.

Tabla 6.25. Valores de fugas medias diarias antes de GP con exponente N1 = 0.5

Sector	Fugas antes (litros/segundo)			
	F _{CMN}	P _{CMN}	P _{diaria}	F _{diaria}
Alcobendas Cent. Alto	5.77	58.10	56.74	5.70
Barrio el Aeropuerto	1.44	93.58	91.95	1.43
BC1 La Piovera	2.32	125.22	99.17	2.06
Coslada Centro	21.16	57.86	64.09	22.27
Getafe El Bercial	7.88	69.79	68.99	7.83
Las Rozas Monteverde	1.24	53.66	41.62	1.09
Torrejón Sur	42.58	64.33	58.68	40.67
Valdetorres Pueblo	3.8	57.86	56.57	3.76

Tabla 6.26. Valores de fugas medias diarias después de GP con exponente N1 = 0.5

Sector	Fugas después (litros/segundo)			
	F _{CMN}	P _{CMN}	P _{diaria}	F _{diaria}
Alcobendas Cent. Alto	1.37	44.29	50.73	1.47
Barrio el Aeropuerto	0.51	56.96	53.54	0.49
BC1 La Piovera	0.85	86.99	86.46	0.85
Coslada Centro	8.06	53.92	53.17	0.51
Getafe El Bercial	4.26	66.46	57.77	3.97
Las Rozas Monteverde	0.65	42.99	42.15	0.64
Torrejón Sur	18.66	48.48	50.53	19.05
Valdetorres Pueblo	2.32	51.86	50.28	2.28

Tabla 6.27. Valores de fugas medias diarias antes de GP con exponente $N1 = 1.5$

Sector	Fugas antes (litros/segundo)			
	F_{CMN}	P_{CMN}	P_{diaria}	F_{diaria}
Alcobendas Cent. Alto	5.77	58.10	56.74	5.57
Barrio el Aeropuerto	1.44	93.58	91.95	1.40
BC1 La Piovera	2.32	125.22	99.17	1.64
Coslada Centro	21.16	57.86	64.09	24.67
Getafe El Bercial	7.88	69.79	68.99	7.74
Las Rozas Monteverde	1.24	53.66	41.62	0.85
Torrejón Sur	42.58	64.33	58.68	37.10
Valdetorres Pueblo	3.8	57.86	56.57	3.67

Tabla 6.28. Valores de fugas medias diarias después de GP con exponente $N1 = 1.5$

Sector	Fugas después (litros/segundo)			
	F_{CMN}	P_{CMN}	P_{diaria}	F_{diaria}
Alcobendas Cent. Alto	1.37	44.29	50.73	1.68
Barrio el Aeropuerto	0.51	56.96	53.54	0.46
BC1 La Piovera	0.85	86.99	86.46	0.84
Coslada Centro	8.06	53.92	53.17	0.50
Getafe El Bercial	4.26	66.46	57.77	3.45
Las Rozas Monteverde	0.65	42.99	42.15	0.63
Torrejón Sur	18.66	48.48	50.53	19.86
Valdetorres Pueblo	2.32	51.86	50.28	2.21

Capítulo 7. Herramienta de ayuda a la toma de decisiones

7.1 Presentación de la herramienta

Se presenta en este capítulo la herramienta desarrollada para la ayuda a la toma de decisiones en planes de gestión de presiones, haciendo hincapié en sus funcionalidades más destacadas y una serie de pruebas de concepto llevadas a cabo mediante la aplicación de diferentes tipos de casos de estudio. La Figura 7.1 muestra la interfaz principal de inicio junto a los botones que se van a destacar en este documento.

Sobre algunos de los botones accionables de esta ventana, algunos de ellos no se van a describir por no presentar interés más allá que para acciones de visualización o configuración básica interna del programa. Los destacados en la figura anterior, se corresponden con los cuatro módulos principales citados en el capítulo 3:

- Módulo de importación de datos y configuración básica (botones ‘1’ de la Figura 7.1).
- Módulo de configuración de técnicas de regulación de presión (botón ‘2’ de la Figura 7.1).
- Módulo de simulación hidráulica (botón ‘3’ de la Figura 7.1)
- Módulo de ayuda a la toma de decisiones (botón ‘4’ de la Figura 7.1)

Figura 7.1. Interfaz principal de la herramienta desarrollada

7.1.1 Módulo de importación y configuración básica

El primer módulo ha sido desarrollado con el objetivo de importar y configurar los datos del caso de estudio en cuestión. Los bloques desarrollados son los siguientes:

- Características de la zona de regulación.
- Esquemas numéricos de red – Se ha desarrollado un código para la interpretación automática de archivos con formato estandarizado de tipo '*input file*' (.inp) propios del software EPANET (Rossman 2000).
- Series de datos reales – En el caso de optar por un análisis basado en datos, se han creado una serie de vínculos con fuentes externas, contemplando tres opciones: hojas Excel, bases de datos, archivos tipo ASII.

7.1.1.1 Configuración de casos de estudio

En primer lugar se deben configurar los parámetros básicos relativos al sector de estudio cuyos datos se van a importar. Es indispensable este primer paso para la creación de las correspondientes librerías del sistema en las cuales se almacenará toda la información: series de datos, parámetros de configuración, opciones de análisis, etc.

Figura 7.2. Interfaz para describir caso de estudio

Algunas de las variables son obligatorias en todos los casos (nombre y código). Otras se activarán en función de si la opción de importación seleccionada son ‘modelos numéricos’ (número de entradas) o datos reales (longitud de red, número de acometidas, número de entradas, diferencia de cota máxima, viviendas y habitantes). Una vez definidas las características del sector, se procede a la importación de datos.

7.1.1.2 Importación de modelos numéricos

Si el caso de estudio es un modelo numérico se ha desarrollado un código de conexión de la herramienta con el archivo de origen que incluye la información relativa a la red que se desea analizar. Para ello se ha creado una interfaz de usuario que despliega un menú de búsqueda para seleccionar el archivo deseado. Éste debe tener una extensión (.inp) propia de archivos tipo ‘*input file*’ del software EPANET y establece un código interno identificador activo hasta la finalización del análisis.

Estructura de los archivos

A través de este formato se puede describir íntegramente, tanto las características de la red como los parámetros necesarios para ejecutar el análisis hidráulico. La información se puede generar mediante archivos de texto (.ascii, .txt), siempre y cuando siga una estructura tabular predefinida y se nombren con la extensión indicada anteriormente (.inp). También pueden crearse de forma gráfica gracias a la interfaz de EPANET y exportarse posteriormente a través del menú de exportación de redes: ‘File/Export/Network...’. La Figura 7.3 recoge una muestra de un archivo tipo ‘*inp*’ destacando sus atributos principales:

- Encabezados – Cada elemento descriptivo de la red o propiedad/parámetro relativo al análisis hidráulico viene determinado por un encabezado nominativo con el atributo tratado (en azul en la Figura 7.3)

- **Propiedades** – A cada elemento le corresponde una serie de propiedades que lo definen. Estos se enumeran debajo de cada *encabezado* en columnas (en el caso de elementos descriptivos de la red) o en filas (en el caso de opciones de análisis).
- **Valores** – Por último, y siguiendo la misma estructura tabular de cada elemento, se incorporan los valores asignados a cada propiedad.

Figura 7.3. Formato de archivos (.inp) para definir redes y parámetros de análisis hidráulico

Elementos requeridos

Una vez seleccionado el archivo de importación, el sistema comprueba que contenga todos los elementos requeridos de forma obligatoria para ejecutar el posterior análisis y que los valores asociados a estos elementos estén correctamente estructurados. Los elementos obligatoriamente solicitados son los siguientes:

- **[JUNCTIONS]** – Nodos de demanda de la infraestructura. Las propiedades asociadas son las siguientes: (*ID*) nombre identificador, (*Elev*) elevación o cota topográfica, (*Demand*) demanda base del nodo y (*Pattern*) patrón de consumo al que va asociada dicha demanda base.
- **[PIPES]** – Se trata de las ‘líneas’ del modelo que representan las conducciones que unen los nodos de la red. Las propiedades a definir son: (*Nodos de Inicio/Fin*) identificadores de los nodos que definen el inicio y fin de la conducción, (*Length*) longitud, (*Diameter*) diámetro de la conducción, (*Roughness*) rugosidad, (*Minor Losses*) pérdidas localizadas y (*Status*) define si está abierta/cerrada.
- **[RESERVOIRS]** – Son nodos situados en cabecera, con presión conocida. Sus atributos son: (*Head*) presión en el nodo y (*Pattern*) patrón que sigue el perfil de presión del nodo a lo largo del tiempo.

Estos tres son los elementos de red que se necesitan importar obligatoriamente desde los archivos ‘.inp’. A parte de estos se deben importar los siguientes parámetros: [COORD] donde se incluyen las coordenadas de cada nodo en ejes X e Y, y [OPTIONS] que describen los parámetros hidráulicos necesarios para efectuar el análisis (unidades, tipo de formulación de pérdida de carga continua, etc.)

La aplicación se ha preparado para considerar otros elementos de regulación en la red como tanques/depósitos [TANKS] o bombas [PUMPS]. No obstante, dado el objetivo de este estudio, no se explica con detalle su proceso de importación. Otro de los elementos clave de las redes, las válvulas [VALVES], tampoco se definen desde los archivos estandarizados, sino que se han definido a través de una interfaz creada ‘ad-hoc’ para los propósitos del estudio.

Tratamiento y estandarización de los datos

Una vez importados los archivos, la información es tratada y guardada como variables internas del programa, para a continuación efectuar una serie de procesos de estandarización al código del programa desarrollado. Los pasos más importantes se recogen en la Figura 7.4:

Figura 7.4. Pasos acometidos en el tratamiento de datos importados desde archivos (.inp)

- El primer paso es identificar el tipo de unidades existentes y convertirlas a unidades internacionales. Para ello el programa identifica las unidades con las que se ha conformado el archivo de origen y transforma las unidades en consecuencia.
- Por otro lado, la pérdida de carga que define la resistencia en tuberías es unificada a la fórmula de Hazen–Williams (110), independientemente de la fórmula contemplada en el archivo ‘inp’: Hazen–Williams, Chezy–Manning o Darcy–Weisbach. La seleccionada es una de las más utilizadas para determinar pérdidas de carga en conducciones. Sólo puede ser utilizada para líquidos tipo agua, y en régimen turbulento (ambas, afirmación asumidas en el presente estudio). Chezy–Manning es más utilizada para el estudio de flujo en canales abiertos. Mientras que Darcy–Weisbach, a pesar de ser teóricamente más correcta y vale para todo tipo de líquidos y regímenes, presenta el inconveniente de ser función de la velocidad, lo cual requiere un proceso iterativo para deducir su coeficiente.

$$\Delta H = 4.727 C^{-1.852} D^{-4.871} L Q^{1.852} \quad (110)$$

Donde, ΔH es la pérdida de carga, C el coeficiente rugosidad (Hazen-Williams), D el diámetro de la conducción, L su longitud y Q el caudal circulante.

- El siguiente paso acometido es la generación de archivos internos en los que se guarda, de forma estructurada toda la información relevante sobre los nodos y las líneas del modelo. Así, se crean 4 archivos fundamentalmente: (1) nodos internos, con toda la información relativa a nodos internos de la red (con presión desconocida), (2) nodos de presión conocida, utilizados para representar la entrada de caudal al sector más la cota energía de presión ofrecida en dicho punto a partir de la consigna introducida (), (3) líneas, con todas las características hidráulicas de las conducciones y (4) coordenadas, en el que se guardan la localización geográfica de cada elemento (a efectos de visualización de resultado de los análisis).
- Por último, se conforman las matrices y la formulación necesaria para proceder a la simulación de la red.

7.1.1.3 Importación de datos reales

Para importar series de datos reales, se ha desarrollado un código de conexión de datos con fuentes externos. El resultado final de este módulo es una nueva interfaz a través de la que se pueden definir los campos de conexión en función de los siguientes parámetros: el tipo de datos a importar, sus características y el origen de los mismos (Figura 7.5).

Definición del tipo de variable hidráulica

En primer lugar de deben definir las características de las variables que se van a importar. Entre los parámetros a introducir se incluyen:

- Tipo de variable hidráulica – Nombre a la variable que se desea importar entre las siguientes: presiones (aguas arriba de VRP, aguas abajo de VRP, presión en punto crítico y presión en punto representativo), caudales entrantes/salientes y consumos en usuarios. De todos ellos, las variables de presión aguas abajo P_{ab} y caudal entrante Q_{En} son opciones obligatorias, mientras que el resto determinarán el tipo de análisis que se podrá efectuar.
- Unidades – A cada variable hidráulica se le debe asociar las unidades correspondientes.
- Paso temporal – La frecuencia con las que han sido registrados los datos también es un parámetro obligatorio para poder tratar los datos y comparar con el resto de variables introducidas (mensual, diario, horario, n-minutal, etc.).

Figura 7.5. Interfaz para introducir tipo de variable hidráulica y características

Conexión con fuentes externas

Los datos externos pueden provenir de varias fuentes. Es necesario establecer los mecanismos de conexión oportunos en función del tipo de origen que se trate. La aplicación se ha diseñado para importar datos de tres de los formatos más habituales: bases de datos, hojas de cálculo y archivos tipo ASCII. Como en el caso anterior, se ha desarrollado una interfaz para incorporar variables (Figura 7.6).

Figura 7.6. Interfaz de conexión con fuentes externas

- *Bases de datos* – La fuente más frecuente en la que las grandes empresas operadoras almacenan sus registros es en *gestores de bases de datos*. Para establecer la conexión con este tipo de fuentes, se deben introducir los parámetros requeridos: driver asociado al gestor de base de datos, dirección URL, ruta y archivo de origen, y sentencia SQL para importar los datos. Se han introducido

una serie de parámetros de forma predeterminada para algunos de los gestores de bases de datos más habituales – Microsoft Access, MySQL y ORACLE – cargando sus drivers y URLs correspondientes.

- *Hojas de cálculo* – En el caso de conectar con hojas de cálculo se debe introducir los parámetros correspondientes a la ruta/nombre del archivo, la hoja de cálculo referida y las celdas en las que se encuentran los valores.
- Archivos de texto ASCII o CSV – Si los datos vienen en archivos de texto estructurados también pueden importarse vinculando al archivo origen.

Tipo de acción a ejecutar en proceso de importación

Por último, a la hora de importar los datos, se ha desarrollado una última interfaz para la importación de datos y la gestión de esta tarea, pudiendo seleccionarse tres opciones (ver Figura 7.7): (a) importar datos históricos, (b) actualizar datos, siempre y cuando existan datos anteriores de la variable que se desea actualizar o (c) seleccionar datos específicos entre dos fechas de un periodo seleccionado:

- Importar datos históricos – Se realiza un formateo de los posibles datos internos al caso de estudio y la variable hidráulica seleccionada y se importan los datos existentes en la fuente de origen.
- Actualizar datos – La aplicación detecta el último registro existente de la variable referida e importa aquellos datos posteriores a dicha fecha.
- Seleccionar periodo – En este caso, el usuario puede seleccionar un periodo específico a través de la definición de las fechas de inicio y fin.

Figura 7.7. Menú de acciones de importación

7.1.2 Módulo de configuración de técnicas de regulación de presión

El tercer módulo consiste en la configuración y programación de las técnicas de regulación avanzada de presión que se desean analizar. Los cuatro tipos más relevantes y extendidos globalmente son (1) salida fija, (2) programación temporal, (3) modulación en función del caudal y (4) modulación basada en presión en punto crítico (Vicente et al. 2015). Para su diseño se ha creado una nueva interfaz que facilite la creación de las curvas de modulación para los casos de regulación avanzada y vincule estas consignas con los puntos de regulación deseados en el caso de los modelos numéricos.

Sobre cada una de estas opciones se han introducido una serie de propuestas conceptuales originales que conciernen a la relación de cada una de estas técnicas con aspectos relativos a la sectorización como: variación de consumos, orografía del sector o número de entradas. Se expone aquí la metodología para configurar las consignas de cada técnica y la programación elaborada para implementar las nuevas propuestas conceptuales.

Figura 7.8. Interfaz para diseñar consignas de técnicas de regulación

Para cada sector se podrán implementar tantas consignas como se desea, entiendo que puede desearse un periodo de pruebas en el que es habitual variar la presión de tarado. Para ello, se introducirá el tipo de consigna deseada y las fechas entre las que se desea representar dicha consigna.

Conceptualmente, se han incluido dos enfoques:

- *Diseño parametrizado de consignas* – Se ha definido una serie de parámetros para diseñar curvas ‘ad-hoc’ según el deseo del usuario. Esta parametrización será especialmente útil para el análisis de pruebas ya implantadas.

- *Diseño optimizado de consignas* – En el caso de disponer de modelos numéricos sobre los que se desee estudiar diferentes alternativas de regulación, se establecen una serie de criterios de optimización para diseñar la consigna óptima en cada caso en función del caudal circulante y la pérdida de carga. La restricción fundamental para el diseño de estas consignas será que en todo momento, todos los nodos de la red perciba una presión mínima de servicio (P_{ser})

7.1.2.1 Programación temporal

La programación temporal se define a partir de la introducción de una serie de intervalos temporales a cada uno de los cuales se le asigna un valor de presión. Los pasos seguidos son los siguientes:

- En primer lugar, se ha implementado la opción de diferenciar una consigna para cada día de la semana, atendiendo a la realidad existente en cuanto a la variación de consumos a lo largo de la semana. Entre las sub-opciones contempladas se encuentran: (1) seleccionar una única consigna para todos los días, (2) diferenciar entre días laborales y festivos, (3) diferencia entre ‘lunes a viernes’ y fines de semana y (4) una consigna para cada día.
- En segundo lugar, y ya enfocados en la variación diaria, se debe determinar el número de intervalos de los que se va a componer la curva diaria de consigna. En la casilla ‘*número de intervalos*’ se introducirá este valor, teniendo en cuenta que la curva comenzará a las 00:00 horas y acabará a las 23:59.
- Una vez introducido el número de intervalos la aplicación, comenzando desde las 00:00 horas, solicita al usuario la hora final y la presión de tarado para dicho periodo (Figura 7.9). El último tramo únicamente solicita presión de tarado al finalizar a las 23:59 horas de forma automática.

Figura 7.9. Ejemplo de diseño de curva de modulación temporal basada en dos presiones de tarado (día/noche)

Consideración de variación de tendencia anual a lo largo del sector

Este tipo de regulación es conveniente cuando existe un patrón de demanda estable (aunque variable a lo largo del día). No obstante, este efecto que a corto plazo puede estar claramente definido, a largo plazo, puede detectarse una variación de consumo que requiera una actualización de la curva de programación (GIZ 2011). Para tales casos, se incluye una opción de recálculo mensual de la curva atendiendo a la demanda total circulante.

7.1.2.2 Modulación local basada en el caudal

En el caso de la modulación basada en el caudal se han introducido varios sub-tipos de consigna. Tres de ellas se corresponden con métodos expuestos en el capítulo anterior, los cuales puede derivar de controles hidráulico-mecánicos o gobernados por controladores electrónicos. Estas se resumen en: (1) modulación continua derivada una expresión analítica, (2) doble consigna basada en determinación de caudal referencia y (3) modulación por tramos. A estas se añade una cuarta técnica, específica para sectores con varias entradas en los que se desea implantar este tipo de regulación. Esta última se fundamenta en los resultados presentados por Yates et al. (2014), en los que sugirió un tipo de control basado en el caudal para sectores con varias entradas.

Doble consigna

En este caso, se define un valor de caudal de referencia (Q_{ref}) a partir del cual se asigna un valor de presión (P_1), cuando el caudal circulante es mayor a Q_{ref} , u otros valores de presión (P_2) en caso contrario. Esto se recoge mediante la expresión (111):

$$P_{ab}(Q) \equiv \begin{cases} P_1 \rightarrow si \ Q_{tot} > Q_{ref} \\ P_2 \rightarrow si \ Q_{tot} \leq Q_{ref} \end{cases} \quad (111)$$

Para este tipo de consigna discontinua en el que la determinación de uno u otro valor es función de un valor fijo, es conveniente la introducción de un parámetro como la histéresis. Así se ha incluido para este parámetro un valor predeterminado de 2mca que puede ser modificado por el usuario.

Modulación continua (basada en función)

Otro tipo de modulación es la consigna de presión en función del caudal a partir de una expresión matemática que represente el proceso físico ocurrido a través de un circuito hidromecánico (Dorot 2016c).

Modulación por tramos

Al igual que en el caso de la programación temporal, en la que se define la curva por tramos, este tipo de modulación requiere la definición del número de tramos y después asignar valores de caudal a cada uno de ellos.

- En este caso, también hay que introducir número de intervalos para definir la curva. A diferencia del anterior, aquí no se definirán intervalos constantes, sino con pendientes así que la definición de la curva se hará por puntos (Figura 7.10).

Figura 7.10. Ejemplo de diseño de curva de modulación basada en el caudal

- Una vez introducidos el número de puntos, la aplicación solicita uno a uno estos pares de valores ' $Q-P_{ab}$ '. Automáticamente, el programa va solicitando los demás pares de puntos hasta haber introducido todos acorde con el número de tramos definido, momento en el cual activa el botón de creación de consigna.
- A partir de los pares de puntos definidos y sus valores, la presión de consigna en función del caudal se calcula mediante interpolación entre pares de puntos adyacentes al valor de caudal circulante.

7.1.3 Módulo de simulación

La formulación se basa en la planteada en la expresión (35) la cual representa modelos de tipo 'dirigidos a la presión' los cuales son más representativos de escenarios hidráulicos reales.

Consumos

La formulación matemática de los consumos en los modelos PDA se basa en variables de presión en lugar de en variables de demanda. De los enfoques existentes que relacionan presión con consumo se ha tomado la formulación propuesta por Giustolisi et al. (2012). De forma simplificada, las expresiones utilizadas para definir el consumo real vienen recogidas en las expresiones (47) y (48):

$$c_i(P_i) \equiv \left\{ \begin{array}{l} d_i \rightarrow P_i > P_{serv} \\ C_i P_i \rightarrow P_{min} < P_i < P_{serv} \\ 0 \rightarrow si P_i > P_{min} \end{array} \right\} \quad (112)$$

$$C_i(P_i) = \frac{d_i}{\sqrt{P_{serv}}} \quad (113)$$

Donde: c_i es el consumo real en cada nodo i , d_i es la demanda, P_i es la presión resultante del análisis hidráulico, P_{serv} es la presión a partir de la cual se considera que un servicio se satisface en condiciones normales y P_{min} la presión mínima necesaria para que tenga lugar caudal circulante (siendo este último un valor cercano a 0).

Caudal fugado

La formulación matemática para representar caudales fugados fue propuesta inicialmente por Germanopoulos (1985). Ésta formulación, planteada para representar fugas de fondo, ha sido posteriormente extendida por numerosos autores en investigaciones relativas a modelación numérica (Nazif et al. 2010, Tabesh et al. 2009, Giustolisi et al. 2008).

Considerando la teoría FAVAD (May 1994) en la que se relaciona el caudal fugado con la presión, y teniendo en cuenta la variabilidad del área de orificio (ver (22)), se plantean las siguientes ecuaciones para simular tanto las fugas de fondo como las derivadas de roturas puntuales:

$$f_{fondo,j}(P_j) = \beta_j L_j P_{med,j}^{\alpha_j} \quad (114)$$

$$f_{roturas,i}(P_i) = \beta_i P_i^{\alpha_i} \quad (115)$$

Donde $f_{fondo,j}$ son las fugas de fondo asociadas a las líneas j del modelo, β_j y α_j son parámetros asociados a las fugas en las conducciones y $P_{med,j}$ es la presión media en la conducción. Por otro lado $f_{roturas,i}$ son fugas debidas a roturas u orificios de relevancia asignadas a nodos i , con β_i y α_i como parámetros asociados a este tipo de fugas y P_i la presión en i .

7.1.3.1 Aplicación sobre modelos representativos de sectores reales

La Figura 7.11 muestra las gráficas de convergencia el sector de estudio ‘ky2’ (derecha), junto a las presiones de todos los nodos en el instante en el que se ha alcanzado la consigna óptima sobre el esquema de la red (izq. arriba) y en forma de gráfico para todos los nodos.

Con este ejemplo se puede observar cómo, para alcanzar la P_{serv} en todos los nodos en sectores de gran tamaño, pueden existir otras zonas del sector con un exceso de presión que conlleve un gran volumen de fugas.

Figura 7.11. Resultados obtenidos sobre red 'ky2'. Esquema de red y presiones resultantes (izquierda) y convergencia de consigna en cabecera y presión en punto crítico (derecha).

La Figura 7.12 muestra un ejemplo análogo para el modelo 'esp1'. La presión media P_{Med} del conjunto de presiones en este caso es menor al caso anterior, lo que se traducirá en un menor volumen de fugas.

Figura 7.12. Resultados obtenidos sobre red 'RELH - A'. Esquema de red y presiones resultantes (izquierda) y convergencia de consigna y presión en cabecera y presión en punto crítico (derecha).

7.1.4 Módulo de análisis del impacto de la gestión de presiones

Este módulo se ha diseñado para evaluar tres aspectos: (1) la precisión con la que se están efectuando las maniobras de regulación de presión y (2) la influencia de las mismas en la reducción de fugas.

Como primera funcionalidad, común a todos los tipos de análisis, se ha introducido una opción para la selección del periodo de estudio. Esta acción permite seleccionar la fecha que se desea analizar entre una de las siguientes opciones (ver Figura 7.13):

- *Datos históricos* – Se representa todo el registro de datos que se almacena de la variable seleccionada.
- *Último/a* – Se puede seleccionar un periodo en función de la fecha actual en la que se realiza el estudio, tomando como referencia el día actual, periodo desde el día anterior, o última semana/mes/año.

- *Seleccionar periodo* – Se seleccionan manualmente las fechas de inicio o y fin, introduciendo las mismas en el formatos adecuado.
- *Selección por eventos* – Cuando se introduce una de las consignas en el módulo de configuración de consignas de regulación, se solicita las fechas de inicio y fin de las mismas, pudiéndose seleccionar la opción de ‘hasta la actualidad’, la cual se prolonga indefinidamente hasta la fecha actual. El sistema detecta para cada caso de estudio cuántos eventos hay asociados. Estos pueden ser seleccionados y el programa automáticamente selecciona los datos entre las fechas de inicio y fin de dichos eventos, así como el tipo de consigna que se introdujo.

Figura 7.13. Opciones de selección de periodos de análisis

The figure displays four variations of the 'Seleccionar fecha:' form, illustrating different selection methods:

- Top Left:** Shows the 'Datos históricos' option selected. The 'Último/a:' dropdown is set to 'Hoy'. The 'Seleccionar Periodo:' section has empty date fields for 'Fecha Inicio' and 'Fecha Fin'.
- Top Right:** Shows the 'Último/a:' dropdown menu open, listing options: 'Hoy', 'Ayer', 'Semana', 'Mes', and 'Año'.
- Bottom Left:** Shows the 'Seleccionar Periodo:' option selected. The 'Fecha Inicio' field is highlighted with a blue selection box.
- Bottom Right:** Shows the 'Selección por Eventos:' option selected. The 'Selección por Eventos:' dropdown is set to '2'. Below this, there is a section titled 'Modulación basada en Caudal' with two date fields: '01/09/2010' and '23/12/2010'.

7.1.4.1 Análisis de la precisión de las maniobras de regulación

La primera funcionalidad de introducida en este módulo es el análisis de la precisión de las maniobras de regulación efectuadas. Es conveniente conocer si la regulación se está efectuando acorde a la consigna definida y calcular el posible error cometido.

Análisis temporal y comparación de series de datos

La sección de consulta/comparativa de datos tiene como objetivo poder visualizar de forma preliminar series temporales de las variables hidráulicas más relevantes del sistema. Seleccionando el caso de estudio correspondiente se activa un menú desplegable de ‘Selección de variables’. Las variables que aparecerán en dicho menú serán sólo aquellas que contengan registros para cada caso de estudio. Se pueden seleccionar una o dos variables, según el tipo de consulta que se desee realizar.

- *Variables con unidades diferentes* – En este caso, la gráfica adapta de forma automática los rangos de cada variable y las representa con diferente grado de

zoom, incluyendo para cada una de las variables un eje de ordenadas en cada uno de los laterales. Esto hace que la visualización por parte del usuario sea muy cómoda y pueda extraer conclusiones más fidedignas de su comparación. Como ejemplo se muestra a continuación una gráfica que incluye el caudal entrante en un sector y la presión aguas abajo de la válvula reguladora. Al tratarse de un periodo en el que se llevaba a cabo una *modulación basada en flujo* se espera que estas dos series de registros estén íntimamente relacionadas como así se puede observar en la gráfica.

Figura 7.14. Interfaz de visualización de series hidráulicas

Variables con las mismas unidades – Si las variables que seleccionadas tienen las mismas unidades, no conviene el tratamiento de zoom que se da en el caso anterior. En este caso interesa que se respete la magnitud física real para que el usuario tenga una percepción real de la comparación entre ambas. Por ello en este caso, se incluye un único eje de ordenadas en las unidades de ambas variables.

Se pueden realizar análisis de correlación entre distintas variables. Para ello el sistema detecta los pares de puntos que se puedan correlacionar y genera una representación gráfica de sus puntos. Mediante la aplicación se pueden extraer los estadísticos básicos como recta de regresión, detección de valores máximo/mínimos, valores anómalos, o filtrar información según criterios establecidos por el analista.

Figura 7.15. Análisis de correlación entre variables ‘caudal’ y ‘presión aguas abajo’. Ejemplo real para caso de estudio con regulación ‘basa en caudal’

Análisis de la precisión de las maniobras de regulación

Este apartado se ha desarrollado para evaluar la precisión alcanzada en las maniobras de regulación y está pensada para las series de datos reales (los datos de modelos numéricos, al plantearse de forma determinista, ofrecen la respuesta de regulación ideal introducida). Para ello, se evalúa el error cometido o desviación entre la presión ideal consignada y la que realmente se está midiendo aguas abajo de la VRP. Para cada tipo de regulación existe la misma terna de tipos de análisis.

- *Error consigna* – Representa la desviación entre la presión consignada y la presión real medida aguas abajo de la VRP.
- *Correlación (error/variable hidráulica)* – Correlación entre el error y algunas de las variables hidráulicas independientes a la presión aguas abajo: caudal entrante, consumo total, presión aguas arriba, entre otras. Destaca la correlación entre error y caudal, dado que es generalizada la suposición de que el caudal puede afectar significativamente en las maniobras de regulación.

Figura 7.16. Correlación entre caudal y error

Análisis de caudales fugados y reducción tras implantación de regulación de presión

7.1.4.2 Influencia de las técnicas de regulación en la reducción de fugas

El nivel de fugas reducido será diferente utilizando una técnica de regulación u otra. En este apartado se presentan los resultados obtenidos de fugas y consumos resultantes utilizando diversas técnicas de regulación y comparando los datos entre sí.

El modelo numérico calcula automáticamente el volumen de fugas en cada instante de cálculo, el rendimiento de la red y representa las fugas en cada uno de los nodos.

La Figura 7.17 y Figura 7.18 muestran varios ejemplos de cuatro pasos temporales ($t=1:00$, $t=7:00$, $t=15:00$ y $t=22:00$) para regulaciones de tipo SF-1E y MC-1E respectivamente.

Figura 7.17. Caudal consumido real y fugas en cada nodo en diferentes instantes de tiempo (SF-1E)

Figura 7.18. Caudal consumido real y fugas en cada nodo en diferentes instantes t (MC-1E)

7.1.4.3 Comparación de métodos

Para evaluar el impacto generado por cada uno de las técnicas de regulación en cuanto a reducción de fugas se ha comparado el volumen de fugas total resultante fruto de la aplicación de cada uno de los algoritmos. La Figura 7.19 muestra un ejemplo gráfico de comparación del volumen total de fugas, mediante la utilización de las técnicas de salida fija 'SF-1E' y modulación basada en caudal 'MC-1E'.

Se puede observar, como era previsible, que el volumen total fugado a lo largo del día es mayor con la consigna de regulación SF, dado que ésta debe ajustarse para cumplir siempre la restricción de ofrecer una presión mínima sobre todos los usuarios. Esto se puede ver en la Figura 7.20.

Figura 7.19. Comparación de volumen fugado con dos métodos de regulación: ‘SF-1E’ y ‘MC-1E’

Figura 7.20. Comparación de presiones en cabecera y mínima: ‘SF-1E’ y ‘MC-1E’

Añadiendo a este análisis un tercer tipo de regulación ‘Modulación basada en presión en punto remoto – PPC-1E’, obtenemos similares datos que la modulación basada en caudal excepto durante un paso temporal (ver Figura 7.21).

Figura 7.21. Comparación de volumen fugado con dos métodos de regulación: ‘SF-1E’, ‘MC-1E’ y ‘PPc-1E’

Figura 7.22. Comparación de volumen de fugas (arriba), presión mínima (abajo-izq.) y presión en cabecera (abajo-der.) para escenario con mayor pérdida de carga en función del caudal

Capítulo 8. Conclusiones

8.1 Conclusiones relacionadas con el ‘Objetivo 1’

Las conclusiones más relevantes extraídas referentes al ‘Objetivo 1’ son las siguientes:

Sobre la metodología de análisis cualitativo basado en el Estudio de Casos

- Pese al poco prestigio que algunos investigadores reportan a una metodología de estudio cualitativa, tras este estudio se deduce que es una buena herramienta para caracterizar una operación complejo, cuya comprensión analítica a día de hoy no se puede examinar de forma global por el elevado número de factores que intervienen.
- Un método de análisis basado en el estudio de casos, permite ver las últimas tendencias sobre el tema a examinar. Asimismo, al estar basado en prácticas reales, muestra una perspectiva realista del problema, incidiendo en ocasiones en los errores incurridos, aspecto poco habitual en las investigaciones de laboratorio.
- Por otro lado, los análisis de naturaleza cuantitativa suelen aportar una visión parcial del proceso estudiado, no pudiéndose llevar a cabo el objetivo de interrelacionar factores.
- Los continuos avances, sobre todo en materia tecnológica, que rodean este tipo de operaciones confieren al problema un *carácter dinámico* difícil de tratar mediante un análisis cuantitativo.

Sobre la propuesta metodológica para la selección de la técnica de regulación y diseño de curvas de consigna

- La creación de una metodología para el diseño e implantación de PIGP de forma global y generalizada a todos los casos es una práctica imposible. Es indispensable analizar cada caso y examinar sus particularidades. No obstante, las propuestas

llevadas a cabo son un punto de partido para estas acciones de diseño e implantación que no se ha encontrado hasta ahora en la literatura especializada.

- La sectorización es una estrategia muy útil trabajando conjuntamente con la regulación de presiones. Para determinar su tamaño uno de los criterios más adecuados, es tener el conocimiento y la capacidad de respuesta ante un fallo en el interior del sistema en un tiempo relativamente corto, sin que los usuarios afectados por la avería se vean gravemente perjudicados. Otros parámetros fundamentales son la pérdida de carga en los puntos interiores y la homogeneidad en los patrones de consumo.
- Siempre que las solicitudes de caudal lo permitan, una única conexión con la red de aguas arriba a no ser que se hayan realizado pruebas del comportamiento utilizando varios puntos de regulación con óptimos resultados de funcionamiento.
- La micro-sectorización dinámica o temporal es un caso muy a tener en cuenta en próximos planes de sectorización sobre todo en zonas urbanas muy densas, cascos antiguos de ciudades, zonas de especial impacto medioambiental, etc.
- Así como hasta hace relativamente pocos años la regulación más habitual era la de salida fija, actualmente se está implantando de manera generalizada en redes consolidadas regulación avanzadas destacando en número de actuaciones la 'modulación basada en flujo'. La elección de la técnica de regulación más conveniente viene en gran parte determinado por el tipo de patrones de consumo existentes en un sector.
- La posible existencia de otras restricciones (técnicas, de comunicación, económicas, etc.) hacen que en ocasiones se deba optar por técnicas de regulación diferentes a la solución óptima. En este caso, hay que tener en consideración los dispositivos hidráulico-mecánicos.
- Son escasos los métodos encontrados para diseñar curvas óptimas de regulación para las técnicas avanzadas existentes a día de hoy. La propuesta incluida en este estudio introduce conceptos como la evaluación del punto crítico en cada instante para ajustar la curva al óptimo buscado.
- La mayoría de enfoques encontrados en la literatura para esta acción de diseño de curvas, consideran como restricción impositiva el cumplimiento de que todos los nodos superen una determinada presión de servicio. La introducción de métodos que flexibilicen este problema hacen que el encargado del diseño pueda optar por buscar otros objetivos como la mejora del servicio a usuarios, a la vez que se reduce el volumen de caudal fugado.

8.2 Conclusiones relacionadas con el ‘Objetivo 2’

Las conclusiones más relevantes extraídas referentes al ‘Objetivo 2’ son las siguientes:

- Existe una amplia gama de métodos para la estimación de fugas en redes de agua urbano. En concreto, aquellos basados en el concepto del Caudal Mínimo Nocturno tienen una gran trascendencia y son utilizados de forma generalizada debido a su fácil puesta en práctica.
- No obstante, las incertidumbres asociadas a este método son múltiples, pudiéndose introducir un error significativo en los cálculos. Algunos de los factores identificados como más susceptible de ser analizados con detalle son: análisis de series de caudales, extracción de componentes de consumo y pérdidas aparentes durante este periodo, cálculo de la presión media y exponente que relaciona presión con caudal fugado.
- Analizando la utilización de este método se han detectado numerosos enfoques para distintos pasos implicados en este método. En este sentido destaca la heterogeneidad existentes a la hora de calcular: (a) expresiones para descomponer el CMN o bien mediante expresiones empíricas (Adam Lambert 1999) o bien mediante desagregación en sub-componentes (Gomes et al. 2011, UKWI 1994b); (b) estimación de presión media de la red, detectándose varios métodos como el hidráulico el topográfico y el de medición directa (Renaud et al. 2015) y (c) extrapolación de fugas al resto de horas a través de la relación entre presión y caudal fugado mediante el exponente N1 (Lambert 2002). Si bien es generalizada su utilización, los valores utilizados se comprenden dentro de un rango suficientemente amplio como para introducir importantes errores en el cálculo.
- El análisis de series de caudales y el ajuste de estas funciones desagregando sus componente temporales (tendencia, estacionalidad anual y heterocedasticidad) es fundamental para no sobreestimar o subestimar los cálculos del impacto de la gestión de presiones sobre la reducción de fugas.
- La comparación de sub-métodos, fórmulas empíricas y valores utilizados, muestra una variabilidad muy importante en los resultados obtenidos por lo que es importante conocer sus particularidades y saber cuándo se puede aplicar cada uno. En este sentido destaca los enfoques para el cálculo de la Presión Media de la red. El método original propuesto en esta tesis, basado en la pérdida de carga entre dos puntos, sirve para mejorar otros métodos como el topográfico. Su precisión aumenta en función de las características del sector, sobre todo teniendo presente la orografía del mismo y dónde se localiza el punto de referencia sobre el que se efectúan los cálculos.

8.3 Conclusiones relacionadas con el ‘Objetivo 3’

Las conclusiones más relevantes extraídas referentes al ‘Objetivo 3’ son las siguientes:

- No se han detectado herramientas centradas en el análisis específico y simulación de redes sectorizadas con sistemas de regulación avanzados de presión.
- El diseño de un sistema de ayuda a la decisión, no sólo conlleva el diseño de los algoritmos de cálculo sino también una estructuración adecuada para las fases previas (importación de datos y configuración de parámetros de estudio) y para el desarrollo de un interfaz que permita interactuar al usuario con la aplicación.
- La formulación utilizada para la simulación de redes, ha sido ‘*dirigidos a la presión*’. Estos modelos, son más realistas a la hora de representar procesos dependientes de la presión, como son las fugas o las componentes de consumo dependientes de la presión, incluyendo escenarios de presión escasa de forma generalizada (Liserra et al. 2014, Liu et al. 2011, Pathirana 2010, Giustolisi 2008, Cheung et al. 2005). La formulación clásica ‘*dirigida a la demanda*’ (Rossman 2000), se ha detectado que introduce importantes errores en la representación de procesos altamente sensibles a la presión de la red.
- Se ha elaborado un algoritmo para diseñar la curva óptima “ideal” teniendo en cuenta como función objetivo la *minimización del volumen de fugas* pero considerando siempre la restricción de que todos los usuarios dispongan de una presión mínima de servicio.
- A partir de esta curva ideal, se ha analizado el grado de ajuste a la misma mediante diferentes técnicas de regulación. La *modulación basada en el caudal*, por su propia definición, presente los resultados más adecuados cuando se puede parametrizar por tramos. Sus otras opciones hidro-mecánicas presenta mayor error de precisión y por tanto introducen mayor volumen de fugas, en especial la de doble consigna. Igualmente, la consigna de tipo *salida fija* puede ser un opción muy económica pero se aleja mucho del óptimo para escenarios en los que existe una gran pérdida de carga. La *programación temporal* presenta valores adecuados cuando el patrón de consumo es estable, pudiéndose ajustar a escenarios con diferentes pérdidas de carga siempre y cuando se conozcan con precisión las componentes temporales de la series de caudales. La *modulación basada en presión en punto remoto* puede ser muy eficaz, cuando no existe un efecto “dinámico” del punto crítico. En tal caso, una opción interesante puede ser tomar dos puntos como puntos remotos (uno para un intervalo menor de caudales y otro para el intervalo mayor), reduciéndose significativamente el volumen de pérdidas.

Referencias

- 2030 WRG-Water Resources Group (2013). "Leakage reduction in a city – City of Jeddah, Saudi Arabia." <<http://www.waterscarcitysolutions.org>> (Dic. 28 2014).
- AbdelMeguid, H., and Ulanicki, B. (2010). "Pressure and leakage management in water distribution systems via flow modulation PRVs". *Proc. of the 12th Water Distribution Systems Analysis Conf.*, ASCE, Tucson, Arizona, U.S., 1124-1139.
- AbdelMeguid, H. (2011). "Pressure, leakage and energy management in water distribution systems". Ph.D. thesis, De Monfort Univ., Leicester, United Kingdom.
- Alegre, H. y Coelho S.T. (1995). Hydraulic performance and rehabilitation strategies: the use of levels-of service. Capítulo de libro: '*Improving Efficiency and Reliability in Water Distribution Systems*', 267-282. Cabrera and A. F. Vela (eds.), Kluwer Academic Publishers.
- Alegre, H., Baptista, J.-M., Cabrera Jr, E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W., Parena, R. (2006). Performance Indicators for Water Supply Services. *IWA Manual of Best Practice, 2nd Edition*. ISBN 1843390515 IWA Publishing.
- Alkaseh, J. M., Adlan, M. N., Abustan, I., Aziz, H. A., & Hanif, A. B. M. (2013). Applying minimum night flow to estimate water loss using statistical modeling: a case study in Kinta Valley, Malaysia. *Water resources management*, 27(5), 1439-1455.
- Alonso, J. M., Alvarruiz, F., Guerrero, D., Hernández, V., Ruiz, P. A., Vidal, A. M., Martínez, F., Vercher, J. and Ulanicki, B. (2000). "Parallel computing in water network analysis and leakage minimization". *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 126(4), 251-260.
- Alvisi, S., Franchini, M., y Marinelli, A. (2003). A stochastic model for representing drinking water demand at residential level. *Water Resources Management*, 17(3), 197-222.
- Anuvongnukroh, V., Makmaitree, U., Chuenchom, T., Sethaputra, S. and Waldron, T. (2007). "Design and establishment of a very large scale low pressure DMA project". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2007*, IWA, Bucharest, Romania, 226-236.
- Araujo, L. S., Ramos, H. and Coelho, S. T. (2006). "Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management". *Water resour. manag.*, 20(1), 133-149.

- Ariyoshi H. (2014). Strategy for Water Leakage Control in Japan. *IWA Workshop on Water & Energy and Water Loss 2014, Japan Water Works Association (JWWA)*.
- Arriaga, M. (2010). Pump as turbine—A pico-hydro alternative in Lao People's Democratic Republic. *Renewable Energy*, 35(5), 1109-1115.
- Awad, H., Kapelan, Z. and Savić, D. (2008). “Analysis of pressure management economics in water distribution systems. *Proc. of the 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conf.*, Kruger National Park, South Africa, 1-12.
- Awad, H., Kapelan, Z., Savić, D.A. (2010). “Optimal setting of time-modulated pressure reducing valves in water distribution networks using genetic algorithms”. *Proc. of the 10th Int. on Computing and Control for the Water Industry, Integrating Water Systems*, Taylor and Francis Group, London, UK, 31-37.
- AWWA (2009). “Water audits and loss control programs – 3rd Edition (Manual of water supply practices – M36”. *American Water Works Association*, Denver, CO, USA.
- Babic, B., Dukic, A., and Stanic, M. (2014). Managing water pressure for water savings in developing countries. *Water SA*, 40(2), 221-232.
- Bailey, R. (2009). Managing the risk of constructing DMAs in the implementation of a large scale pressure and leakage management program. *Technical Report*, Logan City Water, Queensland, Australia.
- Bamezai, A. and Lessick, D. (2003). Is system pressure reduction a valuable water conservation tool? Preliminary evidence from the Irvine Ranch Water District. <<http://www.irwd.com/save-water-money/irwd-research-studies>> (Jan. 08, 2013).
- Barán, B., von Lücken, C., and Sotelo, A. (2005). Multi-objective pump scheduling optimisation using evolutionary strategies. *Advances in Engineering Software*, 36(1), 39-47.
- Barry J.A. (2007). “*WATERGY: Energy and Water Efficiency in Municipal Water Supply and Wastewater Treatment*” ‘The alliance to save Energy’, Febrero 2007.
- Bartlett, L (2004) Pressure dependent demands in Student Town Phase 3: B.Eng Final Year Project Report Dept of Civil and Urban Engineering, Rand Afrikaans University (now University of Johannesburg), South Africa.
- Beaton, R. and Lambert, A. (2013). Influence of Pressure/Burst Relationships on asset renewal planning – Australian Experiences. *Global Leakage Summit, London, March 2013*
- Benahmed, E., Lucente, D. and Lorrain, G. (2007). “The modulation of the pressure in Casablanca – LYDEC”. *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2007*, IWA, Bucharest, Romania, 237-240.
- Benfer, M. E., and Scheffey, J. L. (2014). “Evaluation of fire flow methodologies.” <<http://www.nfpa.org/~media/files/research/researchfoundation/research->

- foundation-reports/for-emergency-responders/rfevaluationoffireflowmethodologies.pdf?la=en) (Sep. 9, 2015).
- Berardi, L., y Giustolisi, O. (2016). Special issue on the battle of background leakage assessment for water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(5), 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000667.
 - Berardi, L., Laucelli, D., Ugarelli, R., y Giustolisi, O. (2015). Leakage management: planning remote real time controlled pressure reduction in Oppegård municipality. *Procedia Engineering*, 119, 72-81.
 - Bermad Water Control Solutions (2016a). Model WWT20-PD – Proportional Pressure Reducing Valve. <<http://www.bermad.com.au/wp-content/uploads/2013/09/pdf17.pdf>>
 - Bermad Water Control Solutions (2016b). Model 7 PM – Pressure management valve; flow compensated pressure reducing valve. <<http://www.bermad.com/product/model-7pm/>> (Dic. 01, 2016).
 - Bermad Water Control Solutions (2016c). Model 718-03 – Electronic control valve. <<http://www.bermad.com.au/products/718-03-electronic-control-valve/>> (Dic. 01, 2016).
 - BOE (2010). Resolución de 21 de enero de 2010, del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial, por la que se publican las ayudas concedidas correspondientes a la convocatoria del año 2009 del Programa Cenit. REF BOE-A-2010-2069. «BOE» núm. 34, de 8 de febrero de 2010, páginas 11817 a 11818.
 - Bort, C. G., Righetti, M., and Bertola, P. (2014). Methodology for leakage isolation using pressure sensitivity and correlation analysis in water distribution systems. *Procedia Engineering*, 89, 1561-1568.
 - Boulous, P. F., Wu, Z., Orr, C. H., Moore, M., Hsiung, P., y Thomas, D. (2001). Optimal pump operation of water distribution systems using genetic algorithms. Proc., Distribution System Symp., AWWA, San Diego, 23–25.
 - Bureerat, S. and Sriworamas, K. (2013). “Simultaneous topology and sizing optimization of a water distribution network using a hybrid multiobjective evolutionary algorithm”. *Applied Soft Computing*, 13(8), 3693-3702.
 - Burrows, A. (2014). “Advanced pressure management Durban – South Africa case study.” *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2014, IWA, Viena, Austria. 30 Mar. – 2 Apr, 2014.*
 - C-Valve (2010). “PFR. Hydraulically flow modulated pressure control – is this the way forward?”. <<http://www.cvalves.com/pics/content/2552010132055.pdf>> (Oct. 02, 2014).
 - Campisano, A., Creaco, E., and Modica, C. (2010). RTC of valves for leakage reduction in water supply networks. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 136(1), 138-141.

- Campisano, A., Modica, C., and Vetrano, L. (2012). Calibration of proportional controllers for the RTC of pressures to reduce leakage in water distribution networks. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 138(4), 377-384.
- Carravetta, A., Del Giudice, G., Fecarotta, O., y Ramos, H. M. (2013a). Pump as Turbine (PAT) Design in Water Distribution Network by System Effectiveness. *Water*, 5(3), 1211-1225.
- Carravetta, A., Fecarotta, O., Sinagra, M., y Tucciarelli, T. (2013b). Cost-benefit analysis for hydropower production in water distribution networks by a pump as turbine. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(6), 04014002.
- Carravetta, A., del Giudice, G., Fecarotta, O., y Ramos, H. M. (2013c). PAT Design Strategy for Energy Recovery in Water Distribution Networks by Electrical Regulation. *Energies*, 6(1), 411-424.
- Carravetta, A., Del Giudice, G., Fecarotta, O., y Ramos, H. M. (2012). Energy production in water distribution networks: A PAT design strategy. *Water resources management*, 26(13), 3947-3959.
- Carraveta, A. (2005). Idrovalvola con turbine per il recupero dell'energia idraulica in esubero nelle reti di distribuzione idrica. *Conferenza nazionale politica energetica in Italia*, Bologna (Italy).
- Casillas, M. V., Garza-Castanon, L. E., y Puig, V. (2013, July). Extended-horizon analysis of pressure sensitivities for leak detection in water distribution networks: Application to the Barcelona network. In *Control Conference (ECC), 2013 European* (pp. 401-409). IEEE.
- Cassa, A. M., Van Zyl, J. E., and Laubscher, R. F. (2010). A numerical investigation into the effects of pressure on holes and cracks in water supply pipes. *Urban Water J.*, 7 (2), 109-12.
- Cembrano, G., Wells, G., Quevedo, J., Pérez, R., and Argelaguet, R. (2000). Optimal control of a water distribution network in a supervisory control system. *Control engineering practice*, 8(10), 1177-1188.
- Chai, A. (2006). "A Case Study on Leakage Management in Sandakan, Malaysia". *32nd WEDC International Conference, Colombo, Sri Lanka, 2006*.
- Charalambous, B. (2005). "Experiences in DMA redesign at the Water Board of Lemesos, Cyprus". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Leakage 2005*, IWA, Halifax, Canada, 403-413.
- Charalambous, B. (2007). "Effective pressure management of district metered areas". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2007*, IWA, Bucharest, Romania, 241-255.
- Charalambous, B. and Kanellopoulou, S. (2010). "Applied pressure management techniques to reduce control leakage". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Leakage 2010*, IWA, Sao Paulo, Brazil, Jun. 06-09, 2010.

- Cheung, P. B., Van Zyl, J. E., & Reis, L. F. R. (2005). Extension of EPANET for pressure driven demand modeling in water distribution system. *Computing and Control for the Water Industry*, 1, 311-316.
- Couvelis, F. A., y Van Zyl, J. E. (2015). Apparent losses due to domestic water meter under-registration in South Africa. *Water SA*, 41(5), 698-704.
- Creaco, E., and Franchini, M. (2013). "A new algorithm for real-time pressure control in water distribution networks". *Water Sci. Technol.: Water Supply*, 13(4), 875-882.
- Criminisi, A., Fontanazza, C. M., Freni, G., y La Loggia, G. (2009). Evaluation of the apparent losses caused by water meter under-registration in intermittent water supply. *Water Science and Technology*, 60(9), 2373-2382.
- Cubillo, F., Moreno, T. y Ortega, S. (2008). Microcomponentes y factores explicativos del consume doméstico de agua en la Comunidad de Madrid. *Cuadernos de I+D+I (4)* Edición Canal Isabel II Gestión ed. ISBN: 978-84-933694-9-1.
- Cullen, R. (2004). "Pressure vs. consumption relationships in domestic irrigation systems". B. Sc.Thesis, Univ. of Queensland, Queensland, Australia.
- Dai, P. D. and Li, P. (2014). "Optimal Localization of Pressure Reducing Valves in Water Distribution Systems by a Reformulation Approach". *Water Resources Management*, 28(10), 3057-3074.
- Davis, P., Burn, S., Moglia, M., and Gould, S. (2007). A physical probabilistic model to predict failure rates in buried PVC pipelines. *Reliability Engineering and System Safety*, 92(9), 1258-1266.
- Derakhshan, S., y Nourbakhsh, A. (2008). Experimental study of characteristic curves of centrifugal pumps working as turbines in different specific speeds. *Experimental thermal and fluid science*, 32(3), 800-807.
- Di Nardo, A., and Di Natale, M. (2010). "A design support methodology for district metering of water supply networks". *Proc. 12th Annual Int. Conf. on Water Distribution Systems Analysis*, ASCE, Tucson, Arizona, U.S. 870-877.
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G. F., and Venticinque, S. (2013). "An automated tool for smart water network partitioning". *Water resour. manag.*, 27(13), 4493-4508.
- Diao, K., Zhou, Y., and Rauch, W. (2013). "Automated creation of district metered area boundaries in water distribution systems". *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 139(2), 184-190.
- Dijk, A. I., Beck, H. E., Crosbie, R. S., Jeu, R. A., Liu, Y. Y., Podger, G. M., and Viney, N. R. (2013). "The Millennium Drought in southeast Australia (2001–2009): Natural and human causes and implications for water resources, ecosystems, economy, and society." *Water Resources Research*, 49(2), 1040-1057.

- Dimitrov, G., Tenev, G., and Krustev, T. (2011). "Regulation of the water pressure in the water supply network in the residential areas of Burgas". *Water Utility Journal*, (1), 49-55.
- Donkor, E. A., Mazzuchi, T. A., Soyer, R., y Alan Roberson, J. (2014). Urban water demand forecasting: review of methods and models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(2), 146-159.
- Dorot (2016a). PRM(D) - Series 300 Valves. Folleto técnico.
- Dorot (2016b). PRM(FR) -Válvula reguladora de presión de dos niveles con comando hidráulico de Flujo. Folleto técnico.
- Dorot (2016c). HyMod - Pressure Reducing Valve with Hydraulic Flow Modulation. Dorot matholding group. < http://www.dorot.com/index.php?page_id=436>. Último acceso (Dic, 01, 2016).
- Dorot (2016d). Butterfly valves vs. Globe type valves for pressure regulation. Dorot matholding group. <http://www.dorot.com/index.php?page_id=830>. Último acceso (Dic, 01, 2016).
- EC – European Commission (2015a). EU Reference document Good Practices on Leakage Management WFD CIS WG PoM – Main Report. ©European Union, 2015. ISBN 978-92-79-45069-3, DOI: 10.2779/102151.
- EC – European Commission (2015b). EU Reference document Good Practices on Leakage Management WFD CIS WG PoM – Anex II, Case Study document. ©European Union, 2015. ISBN 978-92-79-45069-3, DOI: 10.2779/102151.
- Eck, B. and Mevissen, M. (2013) "Fast non-linear optimization for design problems on water networks" World Environmental and Water Resources Congress 2013.
- Eguia, E.M., Acosta, J.A. and Palomas, N.S. (2102). "Utilisation of a calibrated hydraulic model for water supply optimization". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2012*, IWA, Manila, Philippines, Feb. 26-29, 2012.
- ElFarissi, Z. and Boudan, Y. (2010). "Water pressure management". *Technical report*, ONEP, Office National Eau Potable Maroc, Tanger, 2011.
- EMASA (2016). Proyecto de I+D+I: "Implantación de contadores electrónicos y del sistema de telelectura mediante radio (SIGECA – RIAC)". EMASA, website oficial < https://www.emasa.es/?page_id=86>.
- EMASESA (2016). Proyecto de I+D+I: "AMICO II; ECOWAMER". EMASESA website oficial < <http://www.emasesa.com/idi/proyectos-de-idi/>>
- ESMAP EECI (2009). "Good practices in city energy efficiency: Emfuleny Municipality, South Africa – Water Leak Management Project" Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP) Reports, October 2009.
- Fanner, P.V. (2007). "Pressure management works.....and doesn't!" *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2007*, IWA, Bucharest, Romania, 214-225.

- Fanner, P.V., Sturm, R., Thornton, J., Liemberger, R., Davis, S.E. and Hoogerwerf, T. (2007). "Leakage Management Technologies". *Pressure management as a leakage management tool*, AWWA Research Foundation, Denver, CO, USA, 119-142.
- Fantozzi, M., Calza, F., and Kingdom, A. (2009). "Introducing advanced pressure management at Enia utility (Italy): experience and results achieved". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2009*, IWA, Cape Town, South Africa, Apr. 26-29, 2009.
- Fantozzi, M. and Lambert, A. (2010). "Recent developments in pressure management". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Leakage 2010*, IWA, Sao Paulo, Brazil, Jun. 06-09, 2010.
- Fantozzi, M., and Lambert, A. (2012). "Residential night consumption—assessment, choice of scaling units and calculation of variability." *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2012*, IWA, Manila, Philippines, Feb. 26-29, 2012.
- Farley, M. (2001). "Leakage management and control. A best practice training manual". World Health Organization, eds., Geneva, Switzerland, 2001.
- Farley, M. and Trow, S. (2003). "Losses in water distribution networks: a practitioner's guide to assessment." *Pressure management*, IWA Publishing, London, UK, 145-182.
- Fast S.p.A. (2014). Active Pressure Management for a smart water network. *Folleto commercial*, FAST < <http://www.fastonline.it/en/product/rtcp-system/>> (Dic. 29, 2016).
- Fecarotta, O., Aricò, C., Carravetta, A., Martino, R., y Ramos, H. M. (2015). Hydropower potential in water distribution networks: Pressure control by PATs. *Water Resources Management*, 29(3), 699-714.
- Fecarotta, O., Carravetta, A., y Ramos, H. (2011). CFD and comparisons for a pump as turbine: mesh reliability and performance concerns. *Int J Energy Environ*, 2(1), 39-48.
- Feldman, M., Geller, Y., and Fantozzi, M. (2012). "Pressure and leakage management in a water system using integrated mathematical models and specialist water loss software: Mei Sheva case study in Israel". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2012*, IWA, Manila, Philippines, Feb. 26-29, 2012.
- Fontana, N., Giugni, M., and Portolano, D. (2012). "Losses reduction and energy production in water-distribution networks". *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 138(3), 237-244.
- Fuertes, V. S., García-Serra, J., Iglesias, P. L., López, G., Martínez, F. J. y Pérez, R. (2002). Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua. Ed. Grupo Mecánica de Fluidos (Universidad Politécnica de Valencia), 1ª Edición. ISBN: 84-89487-06-5.

- Garcia, J. P., Marco, A. C., y Santos, S. N. (2011). "Use of centrifugal pumps operating as turbines for energy recovery in water distribution networks. Two case study." *Journal of Advanced Material Research*. Vol (107), pp. 87-92.
- García V.J., Cabrera E. and Cabrera E.Jr. (2006): "The minimum night flow method revisited" 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA. Agosto 2006.
- Gargano, R., Tricarico, C., del Giudice, G., y Granata, F. (2016). A stochastic model for daily residential water demand. *Water Science and Technology: Water Supply*, 16(6), 1753-1767.
- Germanopoulos, G., and Jowitt, P. W. (1989). "Leakage reduction by excess pressure minimization in a water supply network". *ICE Proceedings*, Ice Virtual Library, 87(2), 195-214).
- Germanopoulos, G. (1985). A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models. *Civil Engineering Systems*, 2(3), 171-179.
- Girard, M., and Stewart, R. A. (2007). "Implementation of pressure and leakage management strategies on the Gold Coast, Australia: case study". *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 133(3), 210-217.
- Giugni, M., Fontana, N., and Ranucci, A. (2014). "Optimal location of PRVs and turbines in water distribution systems". *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 140(9).
- Giugni, M., Fontana, N., y Portolano, D. (2009). Energy saving policy in water distribution networks. In *International conference on renewable energies and power quality, European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality*, Valencia (pp. 15-17).
- Giustolisi, O., Campisano, A., Ugarelli, R., Laucelli, D., y Berardi, L. (2015). Leakage management: WDNNetXL pressure control module. *Procedia Engineering*, 119, 82-90.
- Giustolisi, O., Berardi, L., Laucelli, D., Savic, D., Walski, T., y Brunone, B. (2014). Battle of background leakage assessment for water networks (BBLAWN) at WDSA conference 2014. *Procedia Engineering*, 89, 4-12.
- Giustolisi, O., and Walski, T. M. (2012). "Demand components in water distribution network analysis." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 138(4), 356-367.
- Giustolisi, O., Savic, D., y Kapelan, Z. (2008). Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(5), 626-635.
- GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit) (2011). "Guidelines for water loss reduction: a focus on pressure management". *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH and VAG-Armaturen GmbH*. <<http://www.waterlossreduction.com>> (Jan. 17, 2014)

- Gomes, R., Sa Marques, A., and Sousa, J. (2011). “Estimation of the benefits yielded by pressure management in water distribution systems”. *Urban Water J.*, 8(2), 65-77.
- Gomes, R., Sá Marques, A., and Sousa, J. (2012). “Identification of the optimal entry points at District Metered Areas and implementation of pressure management”. *Urban Water J.*, 9(6), 365-384.
- Greyvenstein, B., and Van Zyl, J. (2007). “An experimental investigation into the pressure –leakage relationship of some failed water pipes”. *J. Water Supply Res. Technol. - Aqua*, 56(2), 117-124.
- Guardiola, J.C., Castillo J., González V., Barba J. y Pérez J.J. (2016). Management of water supply services through integral operation based on advanced Smart Metering schemes: A case study. IWA Leading Edge Conference, Jerez de la Frontera 2016.
- Guo, S., Zhang, T. Q., Shao, W. Y., Zhu, D. Z., and Duan, Y. Y. (2013). “Two-dimensional pipe leakage through a line crack in water distribution systems”. *J. Zhejiang Univ.-SCI A*, 14(5), 371-376.
- Hamilton, S., and Krywyj, D. (2012). “The problem of leakage detection on large diameter mains.” *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2012*, IWA, Manila, Philippines, Feb. 26-29, 2012.
- Heimann, A., Meyer, N. y Liemberger, R. (2012). Tailoring the specifications for Pressure Reducing Valves. *IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2012*, IWA, Ferrara, Italy, 57-67.
- Heimann A. (2009). “PRV use for leakage reduction: various technical.” <http://www.dorot.com/index.php?page_id=1145> (Dic. 2016).
- Herrera, M., Torgo, L., Izquierdo, J., y Pérez-García, R. (2010). Predictive models for forecasting hourly urban water demand. *Journal of hydrology*, 387(1), 141-150.
- Hunaidi, O., and Brothers, K. (2007). “Optimum size of district metered areas”. *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2007*, IWA, Bucharest, Romania, 57-67.
- HWS-Water Ltd (2010). Products. <<http://www.hwmglobal.com/products/water-networks/pressure-control/>> (Ene. 02, 2016).
- I2O Water Ltd – Burrows, A. (2010). Controller and control system for a pressure reducing valve. *United States Patent Application Publication*. Pub. Number: US 2010/0168927 A1.
- I2O Water (2011). “Improving customer service and leakage reduction through advanced pressure management; project profile: Veolia Water Central”. Internal report. <<http://www.i2owater.com/solutions/advanced-pressure-management/cases/>> (Jan. 29, 2014).
- I2O Water (2016) – official website. <<http://es.i2owater.com/soluciones/>> (Jan. 02, 2016).

- ILMSS (2013). Guidelines relating to the assessment and calculation of Average Pressure in water distribution systems and zones. ILMSS Ltd. www.leakssuite.com
- Jiménez, A. (2015). "Control activo de fugas. (CAF)." Aqualogy brochure - Internal report.
- Jolly, M. D., Lothes, A. D., Sebastian Bryson, L., y Ormsbee, L. (2013). Research database of water distribution system models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(4), 410-416.
- Jowitt, P. W., and Xu, C. (1990). "Optimal valve control in water-distribution networks". *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 116(4), 455-472.
- Kanakoudis, V. and Gonelas, K. (2014). "Applying pressure management to reduce water losses in two Greek cities' WDSs: Expectations, problems, results and revisions." *16th Conference in Water Distribution System Analysis, WDSA 2014, Bary, Italy. 14-17 July.*
- Karadirek, I. E., Kara, S., Yilmaz, G., Muhammetoglu, A., and Muhammetoglu, H. (2012). "Implementation of hydraulic modelling for water-loss reduction through pressure management". *Water Resour. Manag.*, 26(9), 2555-2568.
- Kittredge, C.P. (1961). Centrifugal pumps used as hydraulic turbines Trans. *ASME, J. Eng. Power*, pp. 74-77.
- Kovac, J. (2007). "Case studies in applying the IWA WLTF approach in the West Balkan region: pressure management". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2007*, IWA, Bucharest, Romania, 199-215.
- Kunkel, G., and Sturm, R. (2011). "Piloting proactive, advanced leakage management technologies." *Journal-American Water Works Association*, 103(2), 62-75.
- Kyriakou, D., Eliades, M. (2015). A Matlab class for EPANET water distribution simulation libraries. *Paquete/librería de software (código para lenguaje MATLAB)* Descarga online: <http://epanet.de/developer/matlab.html.en>.
- Lalonde, A.M. (2005). "Use of flow modulated pressure management in York Region, Ontario, Canada". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Leakage 2005*, IWA, Halifax, Canada, 176-184.
- Lalonde, A.M., Au, C., Fanner, P. and Lei, J. (2008). "City of Toronto water loss study and pressure management pilot." <<http://www.miya-water.com/data-and-research/articles-by-miyas-experts/case-studies/>> (Oct. 29 2013)
- Lambert, A. (1994). Accounting for losses: The bursts and background estimates (BABE) concept. *Water and Environment Journal*, 8 (2), 205-214.
- Lambert, A. O., Brown, T. G., Takizawa, M., y Weimer, D. (1999). A review of performance indicators for real losses from water supply systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 48(6), 227-237.
- Lambert, A. (2001). "What do we know about pressure-leakage relationships in distribution systems". *Proc. IWA Conf. on System Approach to Leakage Control and*

- Water Distribution Systems Management*, ISBN 80-7204-197-5, IWA, Brno, Czech Republic.
- Lambert, A. O. (2002). "International report: water losses management and techniques". *Water Sci. Technol.: Water Supply*, 2(4), 1-20.
 - Lambert, A. (2003). "Assessing non-revenue water and its components: A practical approach." *Water* 21, 5(4), 50–51.
 - Lambert, A. and Thornton, J. (2012). "Pressure:bursts relationships: influence of pipe materials, validation of scheme results, and implications of extended asset life". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2012*, IWA, Manila, Philippines, Feb. 26-29, 2012.
 - Laucelli, D., y Meniconi, S. (2015). Water distribution network analysis accounting for different background leakage models. *Procedia Engineering*, 119, 680-689.
 - Lee, H., Chung, S., Yu, M., Koo, J., y Hyun, I. (2005). Applicable background minimum night flow for leakage management of small district metered areas in Korea. *Water Science and Technology: Water Supply*, 5(3-4), 181-188.
 - Levine, B., Lucas, J., Cynar, P., Hildebrand, T., Morgan, W. (2005). "Pressure management in the Pittsburgh area: a working and economical solution". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Leakage 2005*, IWA, Halifax, Canada, 159-167.
 - Li, P., Postlethwaite, L., Prempain, E., Ulanicki, B. (2010). "Flow modulated dynamic pressure control with Aquai-Mod controller". *Proc. 10th In. Conf. on Computing and Control for the Water Industry*. Integrated Water Systems, Boxall J. and Maksimovic, C., eds., 63-69.
 - Liberatore, S., and Sechi, G. M. (2009). "Location and calibration of valves in water distribution networks using a scatter-search meta-heuristic approach". *Water Resour. Manag*, 23(8), 1479-1495.
 - Liu, J., Yu, G., and Savic, D. (2011). "Deficient-network simulation considering pressure-dependent demand". *Sustainable solutions for water, sewer, gas, and oil pipelines (ICPTT 2011)*, 886-900.
 - Liserra, T., Maglionico, M., Ciriello, V., y Di Federico, V. (2014). Evaluation of reliability indicators for WDNs with demand-driven and pressure-driven models. *Water resources management*, 28(5), 1201-1217.
 - López-Ibáñez, M., Prasad, T., and Paechter, B. (2008). "Ant Colony Optimization for Optimal Control of Pumps in Water Distribution Networks." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:4(337), 337-346.
 - MacDonald, G., and Yates, C. D. (2005). "DMA design and implementation, a North American context". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Leakage 2005*, IWA, Halifax, Canada, 168-175.
 - Mahdavi, M., Hosseini, K., Behzadian, K., Ardehsir, A., and Jalilsani, F. (2010). "Leakage control in water distribution networks by using optimal pressure

- management: A case study”. *Proc., of the 12th Water Distribution Systems Analysis 2010*, ASCE, Tucson, Arizona, United States, 1110-1123.
- Martínez, P.C. (2011). El método de estudio de caso: estrategia metodológica de la investigación científica. *Revista científica Pensamiento y gestión* (20), 165-193.
 - Martinez-Codina, A., Cueto-Felgueroso, L., Castillo, M. and Garrote, L. (2015). “Use of pressure management to reduce the probability of pipe breaks: A bayesian approach.” *J. Water Resour. Plann. and Manage. In press*.
 - Marchi, A., Salomons, E., Ostfeld, A., Kapelan, Z., Simpson, A. R., Zecchin, A. C., ... y Walski, T. (2013). Battle of the water networks II. *Journal of water resources planning and management*, 140(7), 04014009.
 - Marunga, A., Hoko, Z., and Kaseke, E. (2006). “Pressure management as a leakage reduction and water demand management tool: The case of the City of Mutare, Zimbabwe”. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(15), 763-770.
 - Mateos, M. (2007). Errores, observaciones y anécdotas en instalaciones de conducciones – 1ª Edición. Ed. Bellisco, Madrid, España.
 - Mateos, M. (2006a). Válvulas reductoras de presión: clasificación, descripción, errores y soluciones – 2ª Edición. Ed. Bellisco, Madrid, España.
 - Mateos, M. (2006b). Errores y fallos en la instalación de Válvulas Reductoras de Presión – 1ª Edición. Ed. Bellisco, Madrid, España.
 - May, J. (1994). “Pressure dependent leakage.” *World Water and Environmental Engineering*, Oct. 13, 1994.
 - Mckenzie R.S., Bhagwan, J.N., and Wegelin, W.A. (2000). “Some recent developments in water demand management in South Africa.” *Presented at WISA 2000, Sun City, South Africa, 28 May – 1 June, 2000*.
 - Mckenzie R. S., Wegelin, W. (2009). “Implementation of pressure management in municipal water supply systems”. *EYDAP Conference ‘Water: the Day After’*, EYDAP, Athens, Greece, March 2009.
 - Mejoras Energéticas, S.A. (2016). Pegasus / Pegasus P3. < <http://www.mejoras-energeticas.com/gestion-presiones.html> > (Jan. 10, 2016).
 - Meyer N., Engelbrecht M., Wright D. (2009). “Large scale pressure management implementation in the City of Cape Town”. *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2009*, IWA, Cape Town, South Africa, Apr. 26-29, 2009.
 - Microcom© (2016). “Nemos LQ – Guía rápida”. Microcom Sistemas Modulares, S.L.
 - Miguel, R. and Rodriguez, L. (2009). “Diseño de la sectorización de la red de distribución de Canal”. *I Jornadas de Ingeniería del agua II*. 27, 28 October, 2009. Madrid, Spain.

- Mimi, Z., Abuhlaweh, O., Wakileh, V., y Staff, J. W. U. (2004). Evaluation of water losses in distribution networks: Rammallah as a case study. *Water Science and Technology: Water Supply*, 4(3), 183-195.
- Mistry P. (2007). "Pressure management to reduce water demand and leakage". <http://findmoreleaks.com/case_studies.php> (Jan., 20 2014)
- Mohd K.B. Case Study: A Strategic Research Methodology. *American Journal of Applied Sciences*, 5(11), 1602-1604.
- Morrison, J. (2004). "Managing leakage by District Metered Areas: a practical approach". *Water21, February 2004*. 44-46.
- Morrison, J., Tooms, S., and Rogers, D. (2007). "District metered areas; guidance notes". International Water Association (IWA), specialist group on efficient operation and management of urban water distribution systems, water loss task force, version, 1. <<http://www.pseau.org/outils/biblio/resume.php?d=2682>> (Jan., 10 2014).
- Mounce, S. R., Mounce, R. B., y Boxall, J. B. (2011). Novelty detection for time series data analysis in water distribution systems using support vector machines. *Journal of hydroinformatics*, 13(4), 672-686.
- Mutikanga, H. E., Sharma, S. K., and Vairavamoorthy, K. (2013). "Methods and tools for managing losses in water distribution systems". *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 139(2), 166-174.
- Mutikanga, H. E., Sharma, S. K., y Vairavamoorthy, K. (2011). Assessment of apparent losses in urban water systems. *Water and Environment Journal*, 25(3), 327-335.
- Nash, J. E., y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Nicolini, M., and Zovatto, L. (2009). "Optimal location and control of pressure reducing valves in water networks". *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 135(3), 178-187.
- Nicolini, M., Giacomello, C., and Deb, K. (2010). "Calibration and optimal leakage management for a real water distribution network". *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 137(1), 134-142.
- Ochoa, L., y Bourguett, V. (2001). Reducción integral de pérdidas de agua potable. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) – 2ª Ed.*, México. ISBN: 968-7417-23-4.
- Ostfeld, A., Salomons, E., Ormsbee, L., Uber, J. G., Bros, C. M., Kalungi, P., ... y Lansey, K. (2011). Battle of the water calibration networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(5), 523-532.

- Page, P. R., Abu-Mahfouz, A. M., y Yoyo, S. (2016). Real-time adjustment of pressure to demand in water distribution systems: Parameter-less P-controller algorithm. *Procedia Engineering*, 154, 391-397.
- Paish, O. (2002). Small hydro power: technology and current status. *Renewable and sustainable energy reviews*, 6(6), 537-556.
- Parra, S., y Krause, S. (2017). Pressure management by combining Pressure Reducing Valves and Pumps As Turbines for water loss reduction and energy recovery. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 12(1), 89-97.
- Paskalev, A., Ivanov, S. and Tanev, M. (2011). "Water loss reduction in Razgrad demonstrative project through active leakage control, pressure management and the relationship between pressure management and leakage: The case of Kooperative Pazar DMA". *Water Utility Journal*, (2), 3-21.
- Pathirana, A. (2010). "EPANET2 desktop application for pressure-driven demand modeling". *Proc. 12th Annual Int. Conf. on Water Distribution Systems Analysis*, ASCE, Tucson, Arizona, U.S.
- Pérez, R., Puig, V., Pascual, J., Quevedo, J., Landeros, E., y Peralta, A. (2011). Methodology for leakage isolation using pressure sensitivity analysis in water distribution networks. *Control Engineering Practice*, 19(10), 1157-1167.
- Pezzinga, G., and Pititto, G. (2005). "Combined optimization of pipes and control valves in water distribution networks". *J. Hydraul. Res.*, 43(6), 668-677.
- Pilipovic, Z. and Taylor, R. (2003). "Pressure management in Waitakere city, New Zealand – a case study". *Water Sci. Technol.: Water Supply* 3 (1-2), 135–141.
- Piller, O., y Van Zyl, J. E. (2014). Incorporating the FAVAD leakage equation into water distribution system analysis. *Procedia Engineering*, 89, 613-617.
- Prasad, T., López-Ibáñez, M., and Paechter, B. (2008) Ant-Colony Optimization for Optimal Pump Scheduling. *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*: pp. 1-8. doi: 10.1061/40941(247)77.
- Prescott, S. L., and Ulanicki, B. (2008). "Improved control of pressure reducing valves in water distribution networks". *J. Hydraul. Eng.-ASCE*, 134(1), 56-65.
- Prescott, S. L., y Ulanicki, B. (2003). Dynamic modeling of pressure reducing valves. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(10), 804-812.
- PRODINTEC (2013). Presentación del proyecto HYGENET, para la generación de energía eléctrica a partir de las redes de distribución y abastecimiento de aguas municipales. Nota de prensa.
<http://www.prodintec.es/prodintec/es/g_noticias?accion=detalleNoticia&id=158>
- Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D. A., and Koppel, T. (2010). "A review of methods for leakage management in pipe networks". *Urban Water J.*, 7(1), 25-45.

- Quantum GIS Development Team 2012. Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <<http://www.qgis.org/es/site/>>
- Ramos, H., Tamminen, S., y Covas, D. (2009). Water supply system performance for different pipe materials part II: sensitivity analysis to pressure variation. *Water Resources Management*, 23(2), 367-393.
- Ramos, H., Covas, D., Araujo, L., y Mello, M. (2005). Available energy assessment in water supply systems. In *XXXI IAHR Congress, Seoul, Korea* (pp. 11-16).
- Ramos, H., y Borga, A. (1999). Pumps as turbines: an unconventional solution to energy production. *Urban Water*, 1(3), 261-263.
- Reis, L. F. R., Porto, R. M., and Chaudhry, F. H. (1997). "Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm". *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 123(6), 317-326.
- Renaud, E., Sissoko, M. T., Clauzier, M., Gilbert, D., Sandraz, A.C. and Pillot, J. (2015). Comparative study of different methods to assess average pressures in water distribution zones. *Water Utility Journal*, 10, 25-35.
- Ribeiro, L., Sousa, J., Marques, A. S., y Simões, N. E. (2015). Locating leaks with TrustRank algorithm support. *Water*, 7(4), 1378-1401.
- Ristovski, B. (2011). "Pressure management and active leakage control in particular DMA (Lisiche) in the city of Skopje, FYROM". *Water Utility Journal*, (2), 45-49.
- Rizzo, A., Vermersch, M., St John, S. G., Micallef, G., and Pace, R. (2007). Apparent water loss control: the way forward. *Water*, 21(9), 45-47.
- Rogers, D. (2005). "Reducing leakage in Jakarta, Indonesia". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Leakage 2005*, IWA, Halifax, Canada, 253-260.
- Rossman, L. A. (2000). EPANET 2 user's manual, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati.
- RS® (2016) 'Sensor de Presión Manométrica, 0→10bar, 10→30 V dc, IP65'. Último acceso <<http://es.rs-online.com/web/p/sensores-de-presion/4554624/>>.
- Salgado, R., Todini, E., y O'Connell, P.E. (1988). Extending the gradient method to include pressure regulating valves in pipe networks. *Proc. Inter. Symposium on Computer Modeling of Water Distribution Systems*, University of Kentucky, May 12-13.
- Samora, I., Manso, P., Franca, M. J., Schleiss, A. J., y Ramos, H. M. (2016a). Energy Recovery Using Micro-Hydropower Technology in Water Supply Systems: The Case Study of the City of Fribourg. *Water*, 8(8), 344.
- Samora, I., Manso, P., Franca, M. J., Schleiss, A. J., y Ramos, H. M. (2016b). Opportunity and Economic Feasibility of Inline Microhydropower Units in Water Supply Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(11), 04016052.

- Sánchez Cordero, A. (2015). Evaluación del error global de contadores de agua domésticos y análisis de su degradación a partir de una muestra real. Análisis económico como criterio de renovación. *Universidad Politécnica de Valencia (UPV)*, Tesina Fin de Máster <http://hdl.handle.net/10251/73219>.
- Sánchez-Jiménez, E.H. (2008). Sistema de gestión de presiones en redes de abastecimiento: experiencia piloto y estandarización. *Informe interno 'Canal de Isabel II', anotaciones OCT 2008*.
- Sánchez, R., Vicente, D. J., Rodríguez-Sinobas, L. (2015). Modelación y caracterización de estaciones de regulación de presión en redes de distribución de agua urbana. *IV Jornadas de Ingeniería del Agua*, Córdoba, España.
- Sánchez, R., Juana, L., Rodríguez-Sinobas, L., Vicente, D. J., Laguna, F. V., y Garrote, L. (2013). Funcionamiento de reguladores de presión en paralelo y en serie. *III Jornadas de Ingeniería del Agua*, Valencia, España.
- Sanz, G., Pérez, R., and Sánchez, R. (2012). "Pressure control of a large scale water network using integral action". *Proc. Conf. on Advances in PID Control*, IFAC, Brescia, Italy, 2(1), 270-275.
- Sarabia, F.J. Métodos de investigación social y de la empresa. Ediciones Pirámide, 2014.
- Savic, D. A., and Walters, G. A. (1995). "An evolution program for optimal pressure regulation in water distribution networks". *Eng. Optimiz.*, 24(3), 197-219.
- Savic, D. A., Boxall, J. B., Ulanicki, B., Kapelan, Z., Makropoulos, C., Fenner, R., Soga, K., Marshall, I.W., Maksimovic, C., Posthlehwaite, I., Ashley, R. and Graham, N. (2008). "Project Neptune: Improved operation of water distribution networks." In *The 10th Water Distribution System Analysis Symposium*, August 2008.
- Shepherd, M.A. and Poona, V.A. (2010). "Reducing non-revenue water in the Durban Central Business District" http://www.ewisa.co.za/literature/files/69_21%20Shepherd.pdf
- Shirzad, A., Tabesh, M. and Farmani, R. (2014). "A comparison between performance of support vector regression and artificial neural network in prediction of pipe burst rate in water distribution networks". *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(4), 941-948.
- Simpson, A.R. (1999). Modeling of pressure regulating devices – a major problem yet to be satisfactorily solved in hydraulic simulation. *Water Distribution Systems Conference*, Division of Water Resources Planning and Management, American Society of Civil Engineers, Tempe, Arizona, 7-9 June.
- Snow, C.C., y Thomas, J.B. (1994). Field research methods in strategic management: contributions to theory building and testing. *Journal of management studies*, 31(4), 457-480.

- Ssozi, E. N. (2014). *The effect of viscoelastic deformation in pipe cracks on leakage response to variations in pressure* (Doctoral dissertation, University of Cape Town).
- Ssozi, E. N., Reddy, B. D., y Van Zyl, J. E. (2015). Numerical Investigation of the Influence of Viscoelastic Deformation on the Pressure-Leakage Behavior of Plastic Pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(3), 04015057.
- Stake, R.E. (2006). Multiple case study analysis. Ed. The Guilford Press, New York, NY, EEUU.
- Stoianov, I. and Henderson, K. (2014). "From static to adaptative control of network topologies for improving systems resilience [DMA v2.0]." *SWIG workshop (Sensors for Water Interes Group), October, 2014 Telemetry & Control Systems for Smarter and Resilient Operation of Water Supply Networks, 15th October, London*.
- Sturm, R., and Thornton, J. (2005). "Proactive leakage management using District Metered Areas (DMA) and pressure management–Is it applicable in North America." *IWA International Specialised Conference 'Leakage 2005'. Halifax, Canadá* (pp. 415-427).
- Schwaller, J., and van Zyl, J. E. (2014). Modeling the pressure-leakage response of water distribution systems based on individual leak behavior. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(5), 04014089.
- Sydney Water (2005). "Water conservation and recycling; implementation report". <<http://www.sydneywater.com.au/swe/index.htm>> (Nov. 22, 2013)
- Technolog (2016). Regulo – SMS/GPRS Electronico PRV controller. <http://www.technolog.com/water/products/pressure-control/12/regulo-sms-gprs-electronic-prv-controller.html>> (Ene. 02, 2016).
- Thornton, J., and Rizzo, A. (2002, November). Apparent losses, how low can you go. In *Proceedings of the leakage management conference* (pp. 20-22).
- Thornton, J. (2003). "Managing leakage by managing pressure: a practical approach". *Water21*, October 2003. 43-44.
- Thornton, J., and Lambert, A. (2005). "Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: burst frequency and pressure: consumption relationships". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Leakage 2005*, IWA, Halifax, Canada, 347-357.
- Thornton, J. and Lambert, A. (2007). "Pressure management extends infrastructure life and reduces unnecessary costs". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2007*, IWA, Bucharest, Romania, 511-521.
- Thornton, J., Sturm, R. and Kunkel, G. (2008). "Water loss control". *Controlling real losses - pressure management*. McGraw-Hill Companies – 2nd edition, USA, 301-343.
- Todini, E., y Pilati, S. (1988). A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. *Computer applications in water supply* (Systems analysis and simulation), B. Coulbeck, and C. H. Orr, eds., Vol. 1, Wiley, London, 1–20.

- Todorovic, B., Tsakiris, G., y Prodanovic, D. (2011). A pilot initiative for improved urban demand estimation based on stochastic analysis of water consumption. *Water Utility Journal*, 1, 19-29.
- Tucciarelli, T., Criminisi, A., and Termini, D. (1999). "Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation". *J. Hydraul. Eng.*, 125(3), 277-285.
- UKWI – United Kingdom Water Industry editor (1980). "Leakage control policy and practice". London, Sewers and Water Mains Standing Technical Committee – UK National Water Council/Water Services Association/WRc, 1980 (Report No. 26).
- UKWI – United Kingdom Water Industry editor (1994a). "Managing leakage – Report G: Managing water pressure". UK Water Industry, Engineering and Operations Committee. ISBN: 1 898920 12 5.
- UKWI – United Kingdom Water Industry editor (1994b). "Managing leakage – Report E: Interpreting measured night flows". UK Water Industry, Engineering and Operations Committee. ISBN: 1 898920 10 9.
- UKWI – United Kingdom Water Industry editor (1994c). "Managing leakage – Report F: Interpreting measured night flows". UK Water Industry, Engineering and Operations Committee. ISBN: 1 898920 10 9.
- UK Water Industry Research Ltd (1999). Manual of DMA Practice.
- Ulanicki, B., Bounds, P. L. M., Rance, J. P., and Reynolds, L. (2000). "Open and closed loop pressure control for leakage reduction". *Urban Water*, 2(2), 105-114.
- Ulanicki, B., AbdelMeguid, H., Bounds, P., and Patel, R. (2008). "Pressure control in district metering areas with boundary and internal pressure reducing valves." *Proc. 10th Int. Water Distribution System Analysis Conf.*, ASCE, Kruger National Park, South Africa, Aug. 17-20, 2008.
- Ulanicki, B., y Skworcow, P. (2014). Why PRVs tends to oscillate at low flows. *Procedia Engineering*, 89, 378-385.
- UN-HABITAT (2006). "Water Demand Management Strategy and Implementation Plan for Indore". UN-HABITAT, eds., Nairobi, Kenya.
- VAG (2009). "Pressure management in Bardejov." *VAG-Armaturen GmbH* <<http://www.vag-india.com/es/fields-of-application/pressure-management.html>> (Jan. 10, 2014).
- Vairavamoorthy, K., and Lumbers, J. (1998). "Leakage reduction in water distribution systems: Optimal valve control". *J. Hydraul. Eng.-ASCE*, 124(11), 1146-1154.
- Vamvakeridou-Lyroudia, L.S., Bicik, J., Awad, H., Morley, M.S., Savic, D.A. y Kapelan, Z. (2010). "Developing and implementing a real-time intervention management model for water distribution systems". *Proc. of the 10th Int. on Computing and Control for the Water Industry*, Integrating Water Systems, CCWI, 339-345.

- Van Zyl, J. E., and Clayton, C. R. I. (2007). "The effect of pressure on leakage in water distribution systems". *Proc. of the ICE-Water Management*, 160(2), 109-114.
- Van Zyl, J. E., and Cassa, A. M. (2011). "Linking the power and FAVAD equations for modeling the effect of pressure on leakage". *Proc. 11th Int. Conf. on Computing and Control of the Water Industry*, CCWI, D. A. Savic, Z. Kapelan, and D. Butler, eds., Univ. of Exeter, Exeter, UK.
- Van Zyl, J.E. (2014). "Theoretical modeling of pressure and leakage in water distribution systems". *16th Conference in Water Distribution System Analysis, WDSA 2014, Bary, Italy. 14-17 July*.
- Van Zyl, J. E., y Cassa, A. M. (2014). Modeling elastically deforming leaks in water distribution pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(2), 182-189.
- Vicente, D. J. et al. (2011). Hacia el diseño óptimo de un plan de Gestión de Presiones en redes de distribución de agua urbana. *II Jornadas de Ingeniería del Agua (JIA)*, Barcelona.
- Vicente, D. J. (2014). Comparación de diferentes métodos de determinación de la presión media en sistemas de distribución de agua, para la estimación de caudal fugado. *VIII Seminario Líneas Prioritarias RLHE (Red de Laboratorios de Hidráulica de España)*, Madrid, Junio 2014.
- Vicente, D. J., Garrote, L., Sánchez, R., y Santillán, D. (2015). Pressure Management in Water Distribution Systems: Current Status, Proposals, and Future Trends. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(2), 04015061.
- Walski, T., Bezts, W., Posluszny, E. T., Weir, M., & Whitman, B. E. (2006). "Modeling leakage reduction through pressure control". *Journal (American Water Works Association)*, 147-155.
- Wang, Y., Zayed, T., and Moselhi, O. (2009). "Prediction models for annual break rates of water mains". *J. Performance of Constructed Facilities*, 23(1), 47-54.
- WaterWorld (2011). "Pressure management system to help UK's Severn Trent cut water leakage" <<http://www.waterworld.com/articles/2011/03/pressure-management-system-in-uk.html>> (Jan. 02, 2015).
- Watson, T., Christian, C., Mason, A., Smith, M., and Meyer, R. (2004). "Bayesian-based pipe failure model". *J. Hydroinform.*, 6, 259-264.
- Kingdom, B., Liemberger, R. y Marín, P. (2006). *The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries. How the Private Sector Can Help: A Look at Performance-Based Service Contracting*. Water supply and sanitation sector board discussion paper series – Paper N°8. The World Bank Group edited.
- Williams, A. A. (1996). Pumps as turbines for low cost micro hydro power. *Renewable energy*, 9(1), 1227-1234.
- Wright, R., Stoianov, I. and Parpas, P. (2013). "Dynamic topology in water distribution networks". CCWI 2013, Perugia, Italy.

- Wright, R., Stoianov, I., Parpas, P., Henderson, K. and King, J. (2014). "Adaptive water distribution networks with dynamically reconfigurable topology". *Journal of Hydroinformatics*, doi:10.2166/hydro.2014.086.
- WSAA (2009) Guidelines relating to the calculation of Average Pressures in Water Distribution Systems and Zones. Prepared by Wide Bay Water Corporation for Water Services Association of Australia, as part of WSAA Asset Monitoring Project PPs-3, November 2009.
- Wyeth, G. and Chalk, R. (2012). "Delivery of 30 Ml/d Leakage Reduction Through Intelligent Pressure Control". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2012*, IWA, Manila, Philippines, Feb. 26-29, 2012.
- Xin, K., Tao, T., Lu, Y., Xiong, X., y Li, F. (2014). Apparent Losses Analysis in District Metered Areas of Water Distribution Systems. *Water resources management*, 28(3), 683-696.
- Xu, Q., Chen, Q., Li, W., and Ma, J. (2011). "Pipe break prediction based on evolutionary data-driven methods with brief recorded data". *Reliability Engineering and System Safety*, 96(8), 942-948.
- Xu, Q., Chen, Q., and Ma, J. (2013). "Optimal pipe replacement strategy based on break rate prediction through genetic programming for water distribution network". *J. Hydro-environ. Res.* 7(2), 134-140.
- Xu, Q., Chen, Q., Ma, J., Blanckaert, K. and Wan, Z. (2014). "Water Saving and Energy Reduction through Pressure Management in Urban Water Distribution Networks". *Water Resources Management*, 28(11), 3715-3726.
- Yacuzzi, E. (2005). El estudio de caso como metodología de investigación: teoría, mecanismos causales, validación. *Serie Documentos de Trabajo, Universidad de Centro de Estudios Macroeconómicos de Argentina (CEMA)*, N°296.
- Yates, C. (2005). "Water Accountability–The New Way". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Leakage 2005*, IWA, Halifax, Canada, 15-21.
- Yates, C. and MacDonald, D. (2007). "Advanced Pressure Management via Flow Modulation: The Dartmouth Central PMA". *Proc., IWA Int. Specialized Conf. Water Loss 2007*, IWA, Bucharest, Romania, 541-548.
- Yates, C., Campbell, R. and MacDonald, G. (2014). "Advanced pressure management utilizing automated PRV control in a dual supply DMA." *Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference 2014, CSCE, Halifax, Nova Scotia. 28-31 May, 2014*.
- Yin, R.K. (2013). Case Study Research: Design and Methods – 5ªEdición. Ed. SAGE Publications Ltd, London, UK.
- Zappe, R.W.(1999). Valve selection handbook – 4th ed. Ed. Gulf Publishing Company, Houston, TX. ISBN 0-88415-886-1.
- Zeropex (2009). Free, clean and predictable: Renewable power generation from fluid pressures. *Energi i VA-sektoren*, 15. september 2009.

Anexo A. Pre-tratamiento y análisis preliminar de datos de sectores reales de la red de CYII

A.1 Pre-tratamiento de datos: caudales y presiones en cabecera

El primer paso acometido sobre los datos asociados a la red de CYII fue una serie de acciones de pre-tratamiento para depurar los posibles errores incluidos en sus series. Entre estas acciones se encuentran:

- Disponibilidad de datos. Se examina la longitud de los datos disponibles y el solapamiento entre ellos.
- Detección y eliminación de datos anómalos o ‘outliers’.
- Selección de sub-periodos de estudio (anterior y posterior a maniobras de regulación).

A.1.1 Selección de periodos globales

La selección de la longitud de cada serie se ha basado dos factores:

- *Disponibilidad de datos* – La colección inicial de sectores de los que se disponía algún tipo de serie era de 81 sectores. Muchos de ellos fueron descartados al no disponer de datos en fechas que se correspondieran con las proximidades a la fecha de inicio de maniobras de regulación de presión. Finalmente, la muestra seleccionada consta de 24 sectores.
- *Periodos solapados* – Las variables determinantes para llevar a cabo el análisis en cualquier caso son: caudal y presión aguas abajo de VRP. Se han comparado ambas series, definiendo los periodos de solapamiento entre ambas

Disponibilidad de datos

La primera fase fue comparar los periodos de datos en el entorno de la fecha de maniobras de gestión de presiones, tanto anterior como posterior, para cada caso de estudio. La colección sectores analizados se muestra en la Tabla Anexo-A 1, en la que se registran los periodos de datos disponibles de cada una de las siguientes variables:

- Fecha de inicio de maniobras de regulación de presión (valor – día).
- Caudal entrante (periodo – días).
- Presión aguas abajo de la VRP (periodo – días).
- Presión aguas arriba de la VRP (periodo – días).
- Presión en punto crítico (en aquellos casos de estudio de los que se disponga esta variable) (periodo – días).

Tabla Anexo-A 1. Series de datos de variables hidráulicas de sectores de estudio.

Sector de estudio	Fecha inicio	Caudal		Presión aguas arr.		Presión aguas abajo		Presión pto. crítico	
		Inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin
Alcobendas Centro Alto	30/03/2012	01/01/2010	25/02/2013	-	-	01/01/2010	24/02/2013	09/02/2012	23/04/2013
Barrio el Aeropuerto	13/12/2011	10/06/2011	25/02/2013	-	-	10/06/2011	24/02/2013	09/11/2011	17/04/2012
BC1 Horcajo	18/01/2013	07/05/2012	18/06/2013	-	-	11/09/2012	27/02/2013	02/04/2012	23/04/2013
BC1 La Piovera	12/12/2011	21/07/2011	25/02/2013	-	-	21/07/2011	24/02/2013	07/10/2011	14/04/2012
BC1 Parque Empr. Juan Carlos I	11/12/2011	07/12/2010	25/02/2013	-	-	07/12/2010	24/02/2013	10/10/2011	23/04/2013
Coslada Centro	06/05/2011	01/01/2010	25/02/2013	01/01/2010	24/02/2013	14/02/2011	25/02/2013	29/08/2011	11/04/2013
Getafe Atalayuela	20/12/2012	19/11/2010	25/02/2013	-	-	19/11/2010	24/02/2013	24/10/2012	30/03/2013
Getafe El Bercial	25/09/2012	01/01/2010	22/02/2013	-	-	01/01/2010	24/02/2013	16/04/2012	21/01/2013
Getafe Este	18/11/2011	01/01/2010	25/02/2013	-	-	01/01/2010	24/02/2013	01/10/2011	19/04/2012
Las Rozas Monteverde	14/12/2011	01/01/2010	25/02/2013	-	-	01/01/2010	24/02/2013	-	-
Leganés Butarque	18/12/2012	01/01/2011	14/01/2013	-	-	01/01/2011	14/01/2013	-	-
Mostoles Parque Coimbra	12/07/2011	01/01/2011	14/01/2013	01/01/2011	14/01/2013	01/06/2010	14/01/2013	11/10/2011	23/04/2013
Parla Oeste	19/05/2011	01/01/2010	25/02/2013	14/09/2010	24/02/2013	01/01/2010	24/02/2013	11/10/2011	16/04/2012
Torrejón Sur	06/07/2011	01/01/2010	25/02/2013	28/10/2011	24/02/2013	01/01/2010	24/02/2013	10/01/2012	23/04/2013
Valdetorres Pueblo	29/11/2011	01/01/2011	18/06/2013	-	-	01/01/2010	24/02/2013	09/11/2011	17/04/2012

Periodos de datos solapados entre series

Sobre los periodos completos de cada variable, se toman periodos más específicos en los que exista solapamiento entre las dos variables determinantes: caudal y presión aguas abajo VRP. Esta tarea de selección de periodos coincidentes se ha llevado a cabo con el software Matlab, a través de la interfaz desarrollada para incorporar datos y analizar sus periodos (ver Figura Anexo-A 1)

Figura Anexo-A 1. Módulo de importación de datos y detalle de registros: fecha inicio, fecha fin, número de registros, duración y periodos intermedios sin registros.

A.1.2 Detección y eliminación de ‘outliers’

Los datos brutos obtenidos de las bases de datos de la empresa CYII presentaban inconsistencias en algunos casos, con lo que se debieron tratar para detectar y eliminar posibles datos anómalos. Estos datos en ocasiones eran puntuales, y en otros periodos prolongados con valores fijos. Los pasos ejecutados fueron los siguientes:

- Eliminación de datos de valor igual a 0. Se ha encontrado esta anomalía en numerosas ocasiones.
- Eliminación de datos negativos.

- Eliminación de valores anormalmente desviados de forma puntual.

Las siguientes figuras muestran algunos ejemplos de detección y eliminación de datos anómalos.

Figura Anexo-A 2. Series originales con detección de datos anómalos de presión y caudal (izquierda) y series depuradas tras eliminación de datos anómalos (derecha)

A.1.3 Selección de sub-periodos de estudio

Por último, una vez determinados los periodos con datos en común entre series y la eliminación de datos anómalos, se extraen sub-periodos más pequeños en los que los datos sean consistentes o estables durante un determinado tiempo. La duración de las series será la misma (mismo ancho de ventana). Los criterios finales para seleccionar estos sub-periodos antes y después del inicio de maniobras de regulación son uno de los siguientes:

- Alternativa 1 – Las series se prolongarán desde el mismo inicio de las maniobras de regulación (siendo éste el día final del periodo anterior y el inicio del posterior).
- Alternativa 2 – Se tomarán tramos temporales iguales con un lapso anual (con el fin de evitar variaciones estacionales).

A continuación se muestran los gráficos y detalles de los periodos seleccionados para caso de estudio. En las figuras, se destacan los periodos seleccionados para el análisis así como al fecha en la que se inician las maniobras de gestión de presión.

Figura Anexo-A 3. Series de caudal y presión depuradas, con inicio de maniobras de gestión de presión (línea discontinua negra) y sub-periodos de estudio seleccionados (línea discontinua roja)

A.2 Pre-tratamiento de datos: presiones en puntos críticos

Los datos de presión en puntos críticos se obtuvieron a través de la campaña de monitorización llevada a cabo ‘ad-hoc’ por el equipo de la UPM (ver 3.5.1 Campaña de monitorización de presiones en puntos críticos). El número total de sectores auscultados ascendía a 70 sectores. Muchos de los periodos en los que se recabaron los datos no abarcaron periodos anterior y posterior al inicio de las maniobras de regulación de presión. Esto se debió a problemas de índole logístico, al disponer de un número limitado de equipos de auscultación (datalogger y sensor de presión), y al tratar de dar cobertura a un elevado número de sectores. No obstante, aun no ajustándose a los periodos de estudio seleccionados en el anterior epígrafe de este mismo Anexo, se han podido utilizar los datos para deducir la pérdida de carga resultante en el sector (en función del caudal) a partir de la lectura de presión en dos puntos. Esto permitirá deducir una ley de comportamiento hidráulico de cada zona de estudio y la utilización del método de ‘pérdida de carga’ desarrollado en la sección correspondiente (ver 3.4.3.3 Método de pérdida de carga entre dos puntos). Se procede a explicar el tratamiento llevado a cabo sobre estos datos, realizado íntegramente mediante código propio desarrollado con MATLAB.

A.2.1 Detección y eliminación de datos anómalos o periodos no consistentes

A lo largo de la campaña de monitorización fueron muchos los problemas encontrados para realizar las tareas de recopilación de datos: problemas de cobertura, deterioro de instrumentación debido principalmente a inundaciones, fallos de la instrumentación, etc. Esto hizo que, en algunos casos, las series históricas de datos no fueran válidas durante todo su periodo. En estos casos, se tuvieron que seleccionar sub-periodos menores. En la selección de este periodo también se aprovechó para eliminar valores anómalos puntuales.

Figura Anexo-A 4. Eliminación de datos anómalos y periodos no consistentes

En la Figura Anexo-A 4 se muestra un ejemplo de los datos o periodos eliminados por diversos motivos: outliers, periodos inconsistentes o datos nulos (izquierda). También se muestra sobre esta sub-figura el periodo finalmente seleccionado. En la sub-figura de la derecha, se puede ver la serie de datos finalmente tomada. Este mismo proceso se ha llevado a cabo para el resto de sectores de estudio. La Figura Anexo-A 5 recoge las series finalmente empleadas para el análisis de la relación entre caudal y pérdida de carga en cada sector.

Figura Anexo-A 5. Periodos de estudio seleccionados relativos a datos de presión en puntos críticos

Un caso particular con el que no se pudo trabajar por la inconsistencia de los datos fue el sector 'Getafe Atalayuela'. Los datos obtenidos de los equipos de auscultación no eran coherentes, siguiendo un ciclo horario regular con una elevación de la presión instantánea y una bajada gradual durante el periodo horario (ver Figura Anexo-A 6). Al principio se previó algún tipo de error asociado a los dispositivos por lo que se optó por cambiarlos.

Tras observar que la señal enviada seguía resultando incoherente, se procedió a acceder a la arqueta en la que estaba instalado el transductor de presión y el datalogger y se llevó a cabo una lectura manual mediante manómetro analógico. Se comprobó en este instante que la señal recibida desde los dispositivos electrónicos era correcta, y la presión en el punto crítico oscilaba entre los valores de 71 y 83 m.c.a. con una frecuencia horaria. El tipo de uso asociado a este sector – *industrial* – hizo suponer que este comportamiento podía deberse a algún tipo de especial de consumo cercano a la arqueta de instalación del equipo de monitorización.

Figura Anexo-A 6. Comportamiento anómalo de presión en punto crítico en sector ‘Getafe Atalayuela’

A.2.2 Agregación horaria de datos de presión crítica y comparación entre series

El segundo paso fue agregar los datos temporales para estandarizar el paso temporal de todas las variables hidráulicas intervinientes en el análisis: caudal, presión en cabecera de sector y presión en punto crítico. Las dos primeras, tomadas de las bases corporativas de CYII tenían un paso horario. Consultando a expertos de esta empresa, se aclaró que los datos originales tenían un paso 15-minutal y se realizaba una posterior depuración y agregación hacia la frecuencia horaria.

Los datos de presión en puntos críticos se tomaron con un paso temporal 5-minutal con el fin de obtener un elevado grado de detalle. Por lo tanto, se tuvieron que agregar estas series partiendo de una frecuencia 5-minutal hasta una horaria para permitir la comparación entre series de diferente naturaleza. Estas acciones se llevaron a cabo mediante el módulo de ‘tratamiento, visualización y comparación de series’ (ver Figura Anexo-A 7).

Figura Anexo-A 7. Módulo de tratamiento, visualización y comparación series de datos

Con los datos ya agregados de forma horario, se han extraído las series solapadas de las tres variables. La Figura Anexo-A 8 muestra los periodos tomados para el cálculo de la relación entre la pérdida de carga en un determinado sector y el caudal. Esta relación servirá para el cálculo de la presión media mediante el método de pérdida de carga propuesto en la sección 3.4.3.3.

Figura Anexo-A 8. Periodos tomados para el cálculo de relación entre pérdida de carga y caudal

A.3 Análisis de componentes temporales de series de caudales

En este segundo apartado del Anexo A, se describe el procedimiento de análisis llevado a cabo sobre las series de datos de caudales entrantes en los sectores de estudio. Mediante este análisis, se han determinado las componentes temporales que conforman cada una de las series, con el fin de aplicar el método más conveniente a la hora de calcular el Caudal Mínimo Nocturno. Los sectores colección amplia de datos proporcionados por la empresa CYII, correspondientes a sectores reales de su red.

Figura Anexo-A 9. Perfiles de caudales en sectores con actividad predominante de tipo ‘residencial’

Uno de los objetivos principales perseguidos con el análisis es determinar las diferentes componentes que conforman este tipo de patrones desde un enfoque de análisis de series temporales y poder discernir entre aquellos casos que tengan componentes temporales a largo plazo y aquellos que no. Así se puede implementar distintos enfoques a la hora de calcular el impacto de la regulación de presiones en relación a la reducción de fugas.

La Figura Anexo-A 9 muestra el ejemplo de dos sectores con una actividad de tipo comercial y residencial de forma predominante. Estos patrones representan los usos más típicos de entornos urbanos. La mayoría de casos analizados tienen estos tipos de usos de forma predominante. No obstante, existe otro tipo de uso: industrial. La Figura Anexo-A 10 recoge un ejemplo de este tipo de uso.

Figura Anexo-A 10. Perfiles de caudales en sectores con actividad predominante de tipo ‘industrial’

A.3.1 Análisis de estacionalidad anual (E_{t-a})

Independientemente de su forma o su variabilidad, es un hecho constatado la existencia de estacionalidad diaria en la práctica totalidad de los casos de estudio, la estacionalidad anual o la tendencia son componentes que pueden aparecer o no dependiendo del caso.

Para analizar convenientemente esta componente, es necesaria una serie histórica amplia, que permita deducir la estacionalidad cuantitativamente en base a datos medios diarios o mensuales. Sin embargo, en los datos con los que se cuentan, generalmente no superan los 2 o 3 años de periodo, por lo que no es posible deducir convenientemente la E_{t-a} . Para solventar este escollo, lo que se sí se puede hacer es una evaluación cualitativa y algunos casos tomar un periodo menor a un año si lo que se quiere analizar es la afectación de una posible tendencia a corto-medio plazo.

La variabilidad de esta estacionalidad se puede deber a múltiples factores:

- Variación poblacional – Se puede producir un aumento o disminución según estacionalidades del año. Hay casos como los sectores plenamente residenciales (‘Alcobendas la Moraleja Este’) en los que la población durante el verano aumenta significativamente al tratarse en muchos casos de segundas viviendas.
- Afección de condiciones meteorológicas – Las condiciones climatológicas (fundamentalmente temperatura y precipitación) afectan también sobre el volumen de agua consumido. En zonas industriales este factor es menos relevante.
- Aumento de la actividad y aparición de usos “nuevos” – Durante el verano es típico que en ciertas zonas residenciales, sobre todo con un alto porcentaje de vivienda unifamiliar, aumente significativamente el volumen de agua consumida debido al uso que se da para riegos o para actividades recreativas como piscinas. Este tipo de cambios suele ir acompañado, no sólo de una componente de E_{t-a} sino también de una variación en la estacionalidad diaria E_{t-d} aumentando la amplitud de los ciclos durante periodo estivales (ver Figura Anexo-A 11).

Figura Anexo-A 11. Presencia de E_{t-a} y diferencia de amplitud en ciclos diarios que lo acompañan

Determinación de componente de estacionalidad anual (E_{t-a})

Se utilizan las dos formulaciones planteadas para detectar la componente de estacionalidad anual. La Figura Anexo-A 12 muestra distintos ejemplos de ajuste de un mismo caso – sector ‘Alcobendas la Moraleja Este’.

En este caso se puede apreciar cómo, mediante series de Fourier, desde el ajuste de primer orden se ajusta la función con forma de periodos sinusoidales, lo que contrasta con el caso de primer orden de la función suma de senos. Según se aumenta el orden de ajuste de las funciones, las diferencias van siendo menos significativas.

Figura Anexo-A 12. Ajuste de serie de caudal de sector ‘Alcobendas la Moraleja Este’ mediante *series de Fourier* (arriba) y *series de sumas de senos* (abajo) de distintos órdenes

En el caso del sector de la Figura Anexo-A 13, al disponerse de tan sólo un año completo de datos, la diferencia del ajuste entre las dos funciones es prácticamente

idéntica a partir del segundo orden de ajuste. Una apreciación significativa en ambos casos, es que en el caso del ajuste por *suma de senos*, los patrones son idénticos entre diferentes años. Con las series de Fourier sí que se aprecian variaciones por lo que se puede ajustar mejor a cambios inter-anales.

Figura Anexo-A 13. Ajuste de serie de caudal de sector ‘Alcobendas Centro Alto’ mediante series de Fourier (arriba) y series de sumas de senos (abajo) de distintos órdenes

Con el fin de tomar un tipo de función y orden de ajuste como referente se ha llevado a cabo un análisis de la bondad del ajuste, analizando el coeficiente de determinación R. En ambos casos se observa una convergencia rápida entre los dos tipos de funciones. Destaca el caso de ‘Alcobendas Centro alto’ donde desde el segundo orden de ajuste las dos funciones son idénticas.

Figura Anexo-A 14. Coeficiente de determinación R en función de grado de ajuste de las funciones

No obstante en algunos casos se ha dado que el ajuste mediante series de Fourier presenta una función ajuste se realiza alrededor de la línea media de datos independientemente del orden de ajuste utilizado (ver Figura Anexo-A 15).

Figura Anexo-A 15. Ajuste de serie de caudal de sector ‘Coslada Centro’ mediante series de Fourier (arriba) y series de sumas de senos (abajo) de distintos órdenes

Por este motivo, de aquí en adelante a no ser que se cite lo contrario, los ajustes realizados se tratarán de ajustes mediante funciones de *suma de senos*.

En cuanto al orden de magnitud, en los casos anteriores se aprecia cómo órdenes mayores se ajustan mejor a la “forma” periódica de la serie temporal. No obstante pueden darse casos en los que un ajuste demasiado elevado suponga la aparición de componentes de sinusoidales que se ajusten “demasiado” a los datos, apareciendo curvas que buscan la estacionalidad diaria en vez de la anual. En el ejemplo siguiente (ver Figura Anexo-A 16) se aprecia este efecto.

Figura Anexo-A 16. Efecto distorsionador a la hora de detectar E_{t-a} por “sobre-ajuste” de los datos.

La razón por la que se genera este efecto es por la gran estabilidad en los ciclos estacionales diarios (E_{t-d}), lo que hace que la función tienda al ajuste sobre estos ciclos en detrimento del buscado.

Figura Anexo-A 17. Detalle de sobre-ajuste de en la detección de E_{t-a}

Por este motivo, resulta fundamental la interpretación del analista de estas series a la hora de descartarse por el mejor tipo de ajuste en función de cada caso.

A.3.2 Análisis de tendencia (T_t)

El tratamiento para la determinación de la componente de tendencia es similar al caso del análisis anterior (E_{t-a}). La componente de tendencia puede existir con un crecimiento o disminución del consumo:

- Las primeras son muy habituales en sectores asociados a zonas de nuevos desarrollos urbanos, en las que el consumo va aumentando paulatinamente según crece la actividad en la zona. Casos típicos son barrios residenciales de reciente construcción o polígonos industriales en fase de crecimiento. También existen otros factores como: mejoras en el acondicionamiento de red, aumento del poder adquisitivo de la zona o eventos meteorológicos a largo plazo.
- Una tendencia en la que se produce una reducción de consumo es menos habitual aunque también se puede dar, por cualquier de las situaciones inversas a las descritas. Es paradigmático el caso de una tendencia de bajada de consumos en sectores en los que se ha llevado a cabo campañas de localización y reparación de fugas.

Por otro lado, puede haber sectores en los que no exista una componente de tendencia como tal, pero sí una estacionalidad anual que observada en un periodo corto de tiempo, puede tratarse de igual forma que una componente T_t . Este aspecto es especialmente interesante en casos en los que no se disponga de series históricas largas con las que ejecutar un ajuste más específico de análisis de E_{t-a} , es decir, no se disponga de datos inter-
anuales.

Determinación de componente de tendencia (T_t)

Para definir este ajuste se pueden plantear diferentes tipos de ajustes:

- **Ajuste lineal** – La aplicación de un ajuste lineal es a priori la más sencilla. Esto que puede ser válido para casos cuya tendencia efectivamente se ajuste un cambio gradual constante (por ejemplo, un aumento de población paulatino). También, se puede aplicar sobre periodos de tiempo cortos, en los que no se pueda “linealizar” la función de cambio real ocurrida. En este ejemplo, se puede observar en la Figura Anexo-A 18 cómo la pendiente de la tendencia sufre una variación a lo largo del tiempo. Al seleccionar el periodo de estudio, si este no se toma demasiado corto, se puede incurrir en la introducción de un error al no interpretar correctamente la “forma” de la tendencia. La Figura Anexo-A 18 muestra cómo, al coger un periodo demasiado corto para efectuar el análisis (figura izquierda) de puede estar cometiendo un error sobre la verdadera forma de la tendencia ocurrida en la serie de caudales (figura derecha).

Figura Anexo-A 18. Ejemplo de falsificación de tendencia al acortar el periodo de análisis

- **Ajustes mediante funciones no lineales** – El segundo tipo de ajuste propuesto se basa en la búsqueda de expresiones analíticas que se ajusten mejor a los datos observados que una regresión lineal. Esta es una labor que requiere un grado de interpretación subjetivo inicial para seleccionar los mejores tipos de funciones. En el ejemplo de la Figura Anexo-A 19 se seleccionaron dos potenciales funciones de ajuste: una curva *polinómica de 2º grado* (sub-figura izquierda) y una curva *exponencial con pendiente negativa* (sub-figura derecha).

Figura Anexo-A 19. Ajuste de datos mediante expresiones matemáticas: función polinómica de 2º grado (izquierda) y exponencial (derecha)

En este caso, para seleccionar una de las dos funciones de ajuste se recurre a la evaluación del parámetro R-cuadrado de ajuste, obteniendo estos resultados:

Tabla Anexo-A 2. Cálculo de estadísticos de ajuste de funciones

Función	Expresión	Valores parámetros	R-cuadrado
Polinomio de 2º grado	$f(t) = p1 \cdot x^2 + p2 \cdot x + p3$	$p1 = 1.24 \cdot 10^{-4}$ $p2 = -183.3$ $p3 = 6.73 \cdot 10^7$	0.4214
Exponencial	$f(t)^{(*)} = a \cdot e^{b \cdot x}$	$a = 0.0238$ $b = -0.3111$	0.3375

(*) La función exponencial ha sido normalizada.

De los datos se deduce un mejor ajuste de la función polinómica por lo que sería la que se baraje para definir esta componente T_t .

- **Ajuste mediante medias móviles** – El último enfoque tratado es la utilización del método de medias móviles, para eliminar la componente estacional diaria. Al tratarse de ciclos periódicos de 24 horas, el orden utilizado para el método de medias móviles es de 25. La Figura Anexo-A 20 muestra un ejemplo de la aplicación de este método, destacándose en rojo en la figura de la derecha la línea de tendencia. Hay que aclarar que cuanto menos estable sea el patrón de E_{t-d} la componente de T_t presentará más irregularidad.

Figura Anexo-A 20. Ejemplo de desestacionalización mediante método de medias móviles

A.3.3 Análisis de estacionalidad diaria (E_{t-d})

Lógicamente, el volumen de caudal suministrado a un determinado sector es variable en mayor o menor medida a lo largo del día. Esto se traduce en la aparición de una componente de estacionalidad diaria (E_{t-d}) que puede tener diferentes formas. A lo largo de este tesis se han representado curvas típicas del patrón diario de caudales introducidos en la red, con una clara variación intra-diaria.

Uniformidad de la estacionalidad

En primer lugar, se mide el grado de uniformidad o variabilidad de la E_{t-d} . Las siguientes figuras muestran ejemplos con distintos grados de variabilidad inter-diaria. En la Figura Anexo-A 21 se puede observar cómo, durante los días laborales, el patrón de consumos es muy similar, correspondiéndose con un caso de tipo (a) según la figura esquemática anterior:

- Se alcanzan valores de caudal mínimo similar a lo largo de todos los días y con una frecuencia constante de 24 horas.
- Se alcanza un pico de consumo a primeras horas de la mañana, igualmente con una frecuencia constante.
- Después se genera un descenso de consumo durante la tarde para volver a crecer hasta alcanzar un segundo pico en todos los casos menor al primero.

Figura Anexo-A 21. Ejemplo de patrón de consumo muy estable durante días laborales

A pesar de que existen algunas diferencias entre días queda patente la uniformidad de estos ciclos. En contraposición, la Figura Anexo-A 22 muestra una menor uniformidad inter-diaria. A pesar de que la forma “general” es similar, se pueden apreciar variaciones tanto en los valores alcanzados como en los picos que se producen cada día, así como en el instante en que se producen. Retomando la Figura 3.8 se podría asociar a un caso (b).

Figura Anexo-A 22. Ejemplo de patrón de consumo con poca uniformidad inter-diaria durante días laborales

Diferencia de patrones entre días laborales y fines de semana

En muchos casos es significativa la diferencia existente entre los patrones estacionales de los días laborales y los que tienen lugar durante el fin de semana (o dependiendo el caso durante días festivos). Esta diferencia no va asociada directamente a un tipo de uso concreto, habiéndose presentado tanto en sectores con uso de tipo residencial como comercial e industrial. En la Figura Anexo-A 23 y la Figura Anexo-A 24, se muestran dos ejemplos de sectores reales de la red de CYII con un uso predominante de tipo ‘industrial’.

Figura Anexo-A 23. Diferencia de patrón en series de caudales en zonas con actividad de tipo ‘industrial’: sector ‘AF2 Polígono Industrial El Gato’.

En estas series se puede ver estacionalidades diarias marcadas. No obstante, se observa una diferencia significativa entre el patrón diarios ocurrido los días laborales – de lunes a viernes – (enmarcadas en rojo), y los patrones durante los fines de semana (enmarcadas en azul). Si bien “a priori” se puede preconcebir que los mayores caudales se darán durante días laborales, con estos dos ejemplos se demuestra que es este hecho no tiene porqué ser

así. Mientras que en el caso del sector ‘AF2 Polígono Industrial El Gato’ los mayores caudales tienen lugar de lunes a viernes, en el segundo ejemplo ocurre lo contrario, concentrándose la mayor actividad durante los fines de semana. A efectos de la posterior generación de escenarios sintéticos, y análisis de la implantación de técnicas de regulación de presiones, este tipo de diferencias no muestran mayor problema cuando los patrones estén claramente identificados. Sobre todo, la diferencia de patrones interdiaria, es relevantes cuando se desea incorporar consignas de regulación basadas en programación temporal.

Figura Anexo-A 24. Diferencia de patrón en series de caudales en zonas con actividad de tipo ‘industrial’: sector ‘AF2 Polígono Industrial San Cristobal’.

Determinación de estacionalidad diaria ($E_{t-diaria}$)

Por último, se procede a explicar el método seguido para detectar este tipo de estacionalidad y su grado de variabilidad.

El primer y fundamental paso es la eliminación del resto de componentes que puedan existir (exceptuando el ruido o componente aleatoria). Para ello, basta con tomar la función resultante del ajuste de llevado a cabo y extraerla de la serie de caudales totales según la expresión siguiente:

$$\hat{Q}(x) = Q(x) - f_{T_t}(x) - f_{E_{t-a}}(x) \quad (116)$$

Donde:

- $\hat{Q}(x)$ es la función con la componente resultante sin componentes E_{t-a} y T_t .
- $Q(x)$ la serie de caudales total
- $f_{T_t}(x)$ la función de ajuste resultante del análisis de componente de tendencia T_t

- $f_{E_{t-a}}(x)$ la función de ajuste resultante del análisis de componente de estacionalidad anual E_{t-a}

La Figura Anexo-A 25 muestra un ejemplo esquemático de cómo se elimina la componente de tendencia resultando una serie formada por componentes aleatoria y de estacionalidad diaria. Como se puede apreciar en la figura, la serie de datos tiene una media igual a una línea recta sin pendiente.

Figura Anexo-A 25. Ejemplo de serie resultante tras eliminación de componente tendencia (T_t)

Tomando los ejemplos de los casos del apartado de análisis de estacionalidad anual, también se puede comprobar este mismo efecto (ver Figura Anexo-A 26).

Figura Anexo-A 26. Ejemplo de serie resultante tras eliminación de componente estacionalidad anual (E_{t-a})

Ya con la serie de datos libre de otras componentes T_t y $E_{t-\alpha}$, en los casos que exista, se analiza la estacionalidad diaria. Para ello el siguiente paso, ya común a todos los casos de estudio, es la desagregación de los datos según el día de la semana. La Figura Anexo-A 27 muestra un ejemplo de dato agregados según día de la semana en uno de los casos de estudio analizados.

Figura Anexo-A 27. Agregación de datos por días de la semana. Ejemplo 4 días sobre sector ‘AF2 PI El Gato’

A.3.4 Heterocedasticidad condicionada a estacionalidad anual

Otro aspecto de gran relevancia a tener en cuenta es si la estacionalidad que se está generando día a día es ‘aditiva’ o ‘multiplicativa’ con respecto al instante de referencia inicial (ver Figura Anexo-A 28).

Figura Anexo-A 28. Ejemplos de carácter de estacionalidad en cuanto a evolución a lo largo del tiempo

Esto se traduce en que la amplitud de la curva de modulación que define E_{t-d} es constante o evoluciona a lo largo del tiempo o bien aumentando o bien disminuyendo. Así como el ejemplo de la izquierda (teniendo en cuenta tan sólo los días laborales) sería un caso de tipo (a) la figura de la izquierda con que evoluciona a lo largo del tiempo (convergiendo) y existencia de tendencia, sería un caso de tipo (d).

Cuando la serie temporal es suficientemente larga, se puede detectar otro tipo de evolución regular en la amplitud de la estacionalidad diaria. Este es una amplitud que siga una curva senoidal acorde a la estacionalidad anual existente (ver Figura Anexo-A 29). En estos casos, para eliminar esta componente que también puede introducir un error significativo, el tratamiento será análogo al llevado a cabo para la eliminación de la componente de E_{t-a} .

Figura Anexo-A 29. Componente de *amplitud periódica* en sectores ‘Alcobendas Moraleja Este’

A.3.5 Resumen de componentes temporales

La Tabla Anexo-A 3. Componentes resultantes en cada caso de estudio y valor de reducción de fugas con serie original y serie ajustada recoge los resultados obtenidos del análisis de componentes de cada uno de los sectores tomados como casos de estudio de la red de CYII:

Tabla Anexo-A 3. Componentes resultantes en cada caso de estudio y valor de reducción de fugas con serie original y serie ajustada

Sector de estudio	Fecha inicio	Componentes					
		E_{t-a}	T_t	E_{t-d}			H_c
				T1	T2	T3	
Alcobendas Centro Alto	30/03/2012	Sí	-				No
Barrio el Aeropuerto	13/12/2011	-	-				No
BC1 Horcajo	18/01/2013	-	-				No
BC1 La Piovera	12/12/2011	Sí	-				No
BC1 Parque Empr. JCI	11/12/2011	Sí	-				No
Coslada Centro	06/05/2011	Sí	-				Sí
Getafe Atalayuela	20/12/2012	Sí	-				No
Getafe El Bercial	25/09/2012	Sí	-				No

Sector de estudio	Fecha inicio	Componentes			
		E_{t-a}	T_t	E_{t-d}	H_c
Getafe Este	18/11/2011	Sí	-		No
Las Rozas Monteverde	14/12/2011	Sí	-		Sí
Mostoles Parque Coimbra	12/07/2011	Sí	-		Sí
Parla Oeste	19/05/2011	Sí	-		Sí
Torrejón Sur	06/07/2011	Sí	-		No
Valdetorres Pueblo	29/11/2011	-	-		No

A.4 Tratamiento mediante SIG de datos topológicos y orográficos

En esta sección se describe la metodología llevada a cabo para el tratamiento de datos cartográficos de la red. El objetivo de esta sección es doble:

- Por un lado, los datos obtenidos se han utilizado para la estimación de presión media de sectores y el cálculo de de afección a usuarios y disminución de fugas en sectores reales.
- Por otro lado, los mapas orográficos han sido utilizados para la construcción de casos de estudio sintéticos, representativos de casos reales, con diferentes propiedades orográficas (ver 4.1 Modelos numéricos).

Los datos originales provienen de las bases corporativas de CYII. Las acciones acometidas con estos datos han sido las siguientes:

- *División de la red en sectores de estudio.* Disponiendo de la cartografía global de la red gestionada por CYII, ésta se ha subdividido en sectores correspondientes a las zonas de estudio de esta tesis. Esta acción se ha llevado a cabo mediante el Sistema de Información Geográfica (SIG) de código libre ‘Quantum GIS’ (QGIS Development Team 2012).
- *Generación de superficies altimétrica y depuración de datos.* Una vez disponibles los datos agrupados por sectores de estudio, se han generados superficies de la altimetría de la infraestructura de la red con aquellos elementos de los que se disponía datos de altimetría. En algunos casos, se tuvo que llevar a cabo un proceso de depuración geoespacial de aquellos datos en los que se han detectado datos altimétricos erróneos. Este tratamiento se ha realizado mediante el software MATLAB.
- *Situación de puntos de monitorización y proyección de capa ‘acometidas’.* Por último, con la finalidad de calcular la presión media (P_{med}) de cada caso, y una vez generadas las superficies, se han realizado las siguientes dos acciones: (1) situar los puntos de monitorización de los que se disponen datos y (2) proyectar las capas correspondientes a ‘acometidas’ al no disponer del atributo de altura. Esta tarea se ha realizado mediante QGIS y MATLAB conjuntamente.

A.4.1 Sub-división de la red en sectores y datos manejados

Los datos disponibles de la red de CYII correspondían a la totalidad de su red. Estos datos fueron desagregados por sectores utilizando herramientas de operación geo-espacial del software QGIS.

La Figura Anexo-A 30 recoge esquemáticamente el proceso realizado para el sector de estudio ‘*Alcobendas Centro Alto*’. En primer lugar (sub-figura izquierda) se superpone el polígono correspondiente al sector de estudio sobre las capas globales que contienen los elementos de la red que se desean desagregar: válvulas de corte, desagües, válvulas reguladoras, tubos (conducciones). A continuación se genera la intersección entre la capa ‘polígono’ y el resto de capas (sub-figura arriba derecha), para finalmente obtener los elementos desagregados para el caso de estudio deseado (sub-figura abajo derecha).

Figura Anexo-A 30. Proceso para desagregar elementos según sectores de estudio

El siguiente paso fue crear capas ‘ad-hoc’, para cada sector, conteniendo los puntos en los que se establecen la acción de monitorización para las diferentes variables hidráulicas disponibles: caudal entrante en sector, presión regulada en cabecera y presión en punto crítico. Para ello se toman las referencias de los elementos en los que se ha colocado el dispositivo de auscultación. Estas referencias fueron tomadas de las bases corporativas de CYII en el caso de las VRPs y de los informes de la campaña de monitorización en el caso de la presión en puntos críticos. Estos dispositivos – transductores de presión – fueron colocados o bien en punto de válvulas de desagüe o válvulas de alivio o de corte. La Figura Anexo-A 31 representa la creación de estas capas con los puntos de monitorización.

Figura Anexo-A 31. Creación de capas tipo ‘nodo’ asociadas a puntos de monitorización

El listado completo de códigos identificativos que corresponden a las VRPs de regulación o a los elementos donde se ha instalado el transductor de presión en punto crítico (en aquellos casos en los que se ha instalado) se recoge en la Tabla Anexo-A 4.

Tabla Anexo-A 4. Código identificativos de VRPs y elementos de instalación de transductores de presión en puntos críticos.

Sector	Código VRP	Código PC
Alcobendas Centro Alto	VG.44LN-986	DE.44LM-323
Alcobendas Moraleja Este	-	-
Barrio el Aeropuerto	VG.54EQ-648	DE.54EQ-395
BC1 Horcajo	VG.54JN-781	DE.54JN-250
BC1 La Piovera	VG.54EO-726	DE.54EO-57
BC1 Parque Empr. Juan Carlos I	VG.54DO-748	DE.54DO-111
Coslada Centro	VG.54JP-926	DE.54IS-109
Getafe Atalayuela	VG.64GJ-323	DE.64FJ-83
Getafe El Bercial	VG.64AH-701	DE.64AH-515
Getafe Este	VG.64BK-202	VT.64BK-93
Las Rozas Monteverde	VG.43KR-418	DE.43LR-43
Leganés Butarque	VG.64AF-1003	DE.64AG-68
Mostoles Parque Coimbra	VG.63CQ-26	DE.63CP-323
Parla Oeste	VG.64JE-68	DE.64JF-839
Torrejón Sur	VG.55GE-20	DE.55DE-191
Valdetorres Pueblo	VG.35LB-66	DE.35MB-13

A.4.2 Generación de superficies altimétricas y depuración de datos

El siguiente paso fue genera superficies altimétricas representativas de la cota a la que se encuentran los elementos de la infraestructura de la red. Para ello se han tomado los atributos relativos a la cota a la que están situados cada elemento. Las capas que contienen esta información es la relativa a: ‘válvulas de corte’, ‘desagües’, ‘ventosas’ y ‘válvulas de alivio’. Dado el elevado número de elementos que contenían estos archivos o capas, se fue capaz de crear superficies suficientemente detalladas a partir de la nube de puntos georreferenciada (Figura Anexo-A 32 (a)).

Para la generación de superficies se recurrió al software Matlab. Se utilizaron varios tipos de función de ajuste de interpolación – lineal, de punto más cercano, tipo ‘spline’ y biarmónica – tomando finalmente la función ‘biarmónica’ como función que mejor se ajusta a los datos (Figura Anexo-A 32 (b)).

Figura Anexo-A 32. Generación de superficies de sector a partir de elevación de elementos de red

No obstante, en esta fase se detectó que, en algunos casos, los nodos tomados de los archivos GIS no estaban bien referenciados. La cota de algunos nodos, ya fueran de elementos tipo ‘desagüe’ o ‘válvula de corte’ presentaban diferencias significativas con respecto a las cotas de nodos vecinos. Se tubo por tanto que realizar una tarea de depuración de danos anómalos, asignando la cota del punto consistente más cercano al anómalo. Estos datos anómalos fueron de dos tipos:

- Puntuales – En estos casos, la existencia de datos anómalos se corrigió mediante la aproximación a la cota del nodo más cercano (ver Figura Anexo-A 33).

Figura Anexo-A 33. Corrección de superficie mediante aproximación de datos anómalos a cota consistente más próxima

Leganés Butarque

- Sistemático – En otros casos, se detectaron fallos en los atributos altimétricos asociados a un conjunto de datos (ver Figura Anexo-A 34). En estos casos, y ante la disponibilidad de un buen número de valores para generar las superficies, se optó por eliminarlos del proceso de ajuste.

Figura Anexo-A 34. Corrección de superficie mediante eliminación de conjunto de datos anómalos

A.4.3 Situación de puntos de monitorización

Sobre las superficies generadas y depuradas, se han localizado los elementos de monitorización.

Figura Anexo-A 35. Localización de puntos de monitorización en superficies generadas

La Figura Anexo-A 35 muestra un ejemplo de dos superficies generadas a partir del método anterior y la colocación de los puntos de entrada al sector (donde se mide caudal y se regula presión en cabecera) y los puntos críticos.

Figura Anexo-A 36. Diferentes tipos de casos en relación a la localización del punto de entrada respecto al resto de nodos del sector

La localización de estos puntos es muy relevante a la hora de caracterizar diferentes tipos de sectores y su relación con la eficiencia en el plan de regulación de presiones. Por este motivo, esta acción no sólo ha servido para el análisis del caso de estudio de sectores

de la red de CYII, sino también para la construcción de casos sintéticos representativos de todo tipo de perfiles altimétricos y topológicos.

La Figura Anexo-A 36 muestra 3 casos paradigmáticos de localización de puntos de entrada de caudal en el sector en relación al resto de nodos interiores. En el caso (a) este punto se encuentra a una cota media del sector, teniendo puntos tanto por encima suyo como por debajo (altimétricamente hablando). El caso (b) se encuentra localizado en un punto alto del sector, por lo que en general, se generarán presiones excesivas en el resto de nodos. El caso (c), por el contrario, estando situado el punto de entrada en la zona baja del mismo, por lo que el mayor problema será un posible déficit de presión en usuarios.

Por otro lado, también es reseñable el emplazamiento relativo entre punto de entrada y punto crítico. Uno de los métodos propuestos para el cálculo de la P_{med} se basa en la lectura de series de presión entre varios puntos monitorizados y la evaluación de la pérdida de carga generada entre la entrada y el punto monitorizados. Es importante en este sentido que el segundo sea aquel cuya pérdida de carga sea mayor, es decir, aquel para el cual el fluido haya descrito un mayor recorrido.

Figura Anexo-A 37. Ejemplos de sectores con puntos monitorizados contiguos o muy cercanos

Figura Anexo-A 38. Ejemplos de sectores con puntos monitorizados lejanos

Sin embargo, los puntos tomados como referencia en la campaña de monitorización corresponden con el punto crítico (tomados bajo el criterio de punto de mayor cota), que en muchos casos no se corresponde con el de mayor pérdida de carga. Así, se establecen dos tipos de sectores en relación a este aspecto: (1) sectores con puntos de monitorización “cercanos”, generalmente asociados a zonas en las que el punto de entrada se corresponde con la zona alta (ver Figura Anexo-A 37) y (2) sectores con puntos de monitorización “lejanos”, generalmente asociados a zonas en las que el punto de entrada se corresponde con la zona baja (ver Figura Anexo-A 38).

A.4.4 Proyección de capa ‘acometidas’

Uno de los parámetros utilizados para estimar la P_{Med} de un sector, concretamente para asignar un peso de ponderación, es el número de acometidas. La información recabada sobre acometidas no dispone del atributo “cotas”, por lo que se han tenido que proyectar sobre la superficie generada anteriormente. Sobre ésta se ha proyectado ortogonalmente los elementos de la capa ‘acometidas’ a partir de sus coordenadas X e Y (Figura Anexo-A 39).

Figura Anexo-A 39. Proyección de elementos tipo ‘acometida’ sobre superficie generada del sector

Se muestra a continuación las imágenes de todos los sectores de estudio con su superficie generada y la proyección de las acometidas sobre éstas.

Figura Anexo-A 40. Proyección de acometidas sobre todos los sectores de estudio