



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

Máster en Ingeniería  
Hidráulica y Medio  
Ambiente

---

Título del Trabajo Fin de Máster:

*Criterios de eficiencia energética y de coste de gestión de fugas como fundamentos para la sectorización de una red de distribución de agua urbana. Aplicación a un caso práctico.*

Intensificación:

*HIDRÁULICA URBANA*

Autor:

*Salguero Barceló, Francisco Javier*

Director/es:

*DR. Cobacho Jordán, Ricardo*

*DR. Pardo Picazo, Miguel Ángel*

Fecha: septiembre de 2011



Título del Trabajo Fin de Máster:

***Criterios de eficiencia energética y de coste de gestión de fugas como fundamentos para la sectorización de una red de distribución de agua urbana. Aplicación a un caso práctico.***

Autor: ***Salguero Barceló, Francisco Javier***

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	<i>Ricardo Cobacho Jordán</i>	Fecha de Lectura	<i>09,2011</i>
Codirector1	<i>Miguel Ángel Pardo Picazo</i>		
Codirector2	>		
Tutor			

**Resumen:**

*La sectorización es una técnica empleada en las redes de distribución de agua potable con el principal objetivo de conseguir un mayor control y localización del volumen fugado, y por lo tanto un incremento y regulación del rendimiento volumétrico global. Gran parte de las sectorizaciones se definen según criterios puramente prácticos desde la perspectiva de su ejecución final sobre el terreno. En esta tesina se plantea un procedimiento sistemático para diseñar la sectorización de cualquier red de distribución, definiendo los sectores resultantes según criterios de eficiencia energética y coste de control de fugas.*

*Los objetivos principales a conseguir son los siguientes:*

- *Incorporar aspectos energéticos (Boulos y Bros, 2010; Cabrera y col. 2010) al método de la sectorización.*
- *Plantear un procedimiento para el diseño de la sectorización de manera óptima, según los aspectos energéticos propuestos por Boulos.*
- *Evaluar las sectorizaciones obtenidas según los criterios económicos de control activo de fugas (Lambert y Lalonde, 2005).*
- *Abordar el estudio de indicadores de evaluación de cualquier sectorización planteada frente a un óptimo.*

*Todos estos aspectos se verán respaldados con su aplicación en un caso práctico de una red de distribución real de agua potable.*

*Para ello se realizarán varias distribuciones sectoriales diferentes, bajo criterios de materiales de tuberías y cotas del terreno, las cuales se estudiarán al detalle según criterios hidráulicos, económicos y energéticos. También se planteará la sectorización óptima según los criterios de eficiencia energética detallados por Boulos y Bros.*

*The sectorization is a technique employed in water supply systems with the main aim of achieving greater control volume and location of the water loss, and thus increase the volumetric efficiency and global regulation. Much of the criteria are defined according sectorisations purely practicalperspective of its final execution. This dissertation presents a systematic procedure to design the segmentation of any distribution network, defining thesector resulting according to criteria of cost efficiency and leakage control.*

*The main objectives to achieve are:*

- *Incorporating energy issues (Boulos and Bros, 2010, Cabrera et al. 2010) the method of*





**sectorization.**

- *To develop a procedure for designing the optimum sectorization, as energy issues proposed by Boulos.*

- *Assess sectorisations obtained according to economic criteria for active leakage control (Lambert & Lalonde, 2005).*

- *Addressing the study of indicators for evaluating any sectorization raised against an optimum.*

*All these aspects will be supported with its application in a case study of a real distribution network of drinking water.*

*This will involve several different sectoral distributions under the criteria of pipe materials and dimensions of the land, which will be studied in detail by hydraulic criteria, economic, and energetic. Will also consider optimal sectorization as energy efficiency criteria detailed by Boulos and Bros.*

*La sectorització és una tècnica emprada en les xarxes de distribució d'aigua potable amb el principal objectiu d'aconseguir un major control i localització del volum fugat, i per tant un increment i regulació del rendiment volumètric global. Gran part de les sectoritzacions es defineixen segons criteris purament pràctics des de la perspectiva de la seva execució final sobre el terreny. En aquesta tesina es planteja un procediment sistemàtic per dissenyar la sectorització de qualsevol xarxa de distribució, definint els sectors resultants segons criteris d'eficiència energètica i cost de control de fuites.*

*Els objectius principals a aconseguir són els següents:*

- *Incorporar aspectes energètics (Boulos i Bros, 2010; Cabrera i col. 2010) al mètode de la sectorització.*

- *Plantejar un procediment per al disseny de la sectorització de manera òptima, segons els aspectes energètics proposats per Boulos*

*Avaluar les sectoritzacions obtingudes segons els criteris econòmics de control actiu de fuites (Lambert i Lalonde, 2005)..*

*Abordar l'estudi d'indicadors d'avaluació de qualsevol sectorització plantejada davant d'un òptim.*

*Tots aquests aspectes es veuran recolzats amb la seva aplicació en un cas pràctic d'una xarxa de distribució real d'aigua potable*

*Per a això es realitzaran diverses distribucions sectorials diferents, sota criteris de materials de canonades i cotes del terreny, les quals s'estudiaran al detall segons criteris hidràulics, econòmics i energètics. També es plantejarà la sectorització òptima segons els criteris d'eficiència energètica detallats per Boulos i Bros*

**Palabras clave:**

*Redes de distribución de agua potable, sectorización, eficiencia energética, pérdidas reales, auditoría energética*

## AGRADECIMIENTOS

La elaboración del presente trabajo ha supuesto la consecución de unos ambiciosos objetivos. Pues bien, una vez finalizado, quiero agradecer a todas aquellas personas que de una u otra manera han contribuido a su desarrollo y culminación con éxito. Sin ellas, ninguno de los objetivos planteados se hubieran conseguido.

En primer lugar, quiero agradecer a mis directores Ricardo Cobacho y Miguel Ángel Pardo su dedicación y ayuda en todo momento. Gracias a sus comentarios, sugerencias, directrices y correcciones, he podido elaborar la presente memoria.

Especial mención, merece la confianza que José Luis Martínez ha depositado en mi, al brindarme la oportunidad de realizar parte de este trabajo.

Para terminar, quiero dedicar el éxito de este trabajo a mi familia y a mi novia por el apoyo incondicional hasta el último momento, y porque se lo merecen.

## **TABLA DE CONTENIDOS**

### **MEMORIA**

<b>0</b>	<b>Resumen.....</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>7</b>
1.1	Justificación de la tesina.....	7
1.2	Antecedentes.....	7
1.2.1	<i>Pérdidas de agua en las redes de distribución. El problema de las fugas .....</i>	<i>9</i>
1.2.2	<i>Sectorización. Técnica para el control de las fugas.....</i>	<i>16</i>
<b>2</b>	<b>Planteamiento del problema energético .....</b>	<b>23</b>
2.1	Una primera solución al problema energético .....	24
2.1.1	<i>Metodología seguida .....</i>	<i>25</i>
2.1.2	<i>Eficiencia energética en una red de distribución.....</i>	<i>26</i>
2.1.3	<i>Objetivos del planteamiento.....</i>	<i>27</i>
2.2	Auditoría energética .....	28
2.2.1	<i>Detalle de los términos que engloban la ecuación de energía .....</i>	<i>30</i>
2.2.2	<i>Auditoría global de energías.....</i>	<i>31</i>
2.2.3	<i>Indicadores energéticos básicos.....</i>	<i>32</i>
2.3	Procedimiento de optimización.....	34
2.3.1	<i>Primer procedimiento.....</i>	<i>35</i>
2.3.2	<i>Segundo procedimiento.....</i>	<i>42</i>
<b>3</b>	<b>Nivel económico de fugas .....</b>	<b>51</b>
3.1	Cálculo de los volúmenes económicos de fuga o rotura declarada y fugas de fondo .....	52
3.2	Cálculo del volumen económico de fugas no declaradas .....	54
<b>4</b>	<b>Caso de estudio .....</b>	<b>61</b>
4.1	Antecedentes.....	61
4.1.1	<i>situación y emplazamiento de la zona de estudio .....</i>	<i>61</i>
4.2	Descripción de las instalaciones .....	62
4.2.1	<i>Red de suministro de agua potable.....</i>	<i>63</i>
4.2.2	<i>Perfiles del terreno .....</i>	<i>65</i>
4.3	Análisis de la demanda .....	66
4.3.1	<i>Volumen de agua consumida.....</i>	<i>67</i>

4.3.2	<i>Modulación de la demanda diaria</i> .....	67
4.4	Volumen de agua producida.....	68
4.4.1	<i>Estacionalidad de la producción</i> .....	68
4.5	Balance hídrico.....	69
4.6	Elaboración del modelo matemático.....	70
4.7	Estudio detallado de las sectorizaciones planteadas.....	71
4.7.1	<i>Criterios adoptados en el diseño de las sectorizaciones</i> .....	71
4.7.2	<i>Características de las sectorizaciones planteadas</i> .....	73
4.7.3	<i>Comparativa de las diferentes propuestas</i> .....	91
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>103</b>
<b>6</b>	<b>Trabajos futuros</b> .....	<b>107</b>
<b>7</b>	<b>Referencias</b> .....	<b>111</b>

## **ANEJO 1. Elaboración modelo de simulación matemático**

<b>1</b>	<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1	Fases de elaboración.....	2
<b>2</b>	<b>Recopilación de la información</b> .....	<b>4</b>
2.1	Cartografía.....	4
2.2	Topología y características de la red.....	5
2.3	Producción y consumos.....	5
<b>3</b>	<b>Obtención del esqueleto de la red</b> .....	<b>6</b>
3.1	Captura de la red desde Cad.....	6
3.2	Captura de temas auxiliares.....	7
3.3	Detección de errores.....	8
3.4	Asignación de cotas.....	9
<b>4</b>	<b>Asignación de consumos</b> .....	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Generación del fichero de entrada de datos de epanet</b> .....	<b>14</b>
5.1	Calibración del modelo matemático.....	14

## ANEJO 2. Análisis y diagnóstico del comportamiento de la red

<b>1</b>	<b>Análisis y diagnóstico del comportamiento de la red</b>	<b>1</b>
1.1	Balance global de caudales en el sistema	1
1.2	Análisis de caudales	2
1.3	Análisis de velocidades	3
1.4	Alturas piezométricas y pérdidas de carga unitarias	5
1.5	Distribución de presiones	8
1.6	ANÁLISIS DEL TIEMPO DE PERMANENCIA DEL AGUA EN LA RED	11
<b>2</b>	<b>Análisis dinámico de la red</b>	<b>12</b>
2.1	Rango de presión	12
2.2	Rango de caudales	13
<b>3</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>14</b>

## ANEJO 3. Análisis y diagnóstico de la red tras las sectorizaciones

<b>1</b>	<b>Análisis y diagnóstico de la red tras las sectorizaciones</b>	<b>1</b>
1.1	Sectorización según la cota	1
1.1.1	<b>Análisis de caudales</b>	<b>1</b>
1.1.2	<b>Análisis de velocidades</b>	<b>3</b>
1.1.1	Alturas piezométricas y pérdidas de carga unitarias	4
1.1.2	Distribución de presiones	8
1.1.3	ANÁLISIS DEL TIEMPO DE PERMANENCIA DEL AGUA EN LA RED	10
1.1.4	Análisis dinámico de la red	12
1.2	Sectorización según el material	14
1.2.1	Análisis de caudales	14
1.2.2	Análisis de velocidades	15
1.2.3	Alturas piezométricas y pérdidas de carga unitarias	17
1.2.4	Distribución de presiones	20
1.2.5	ANÁLISIS DEL TIEMPO DE PERMANENCIA DEL AGUA EN LA RED	22
1.2.6	Análisis dinámico de la red	24
1.3	Sectorización según el primer procedimiento de optimización energética	26
1.3.1	Análisis de caudales	26
1.3.2	Análisis de velocidades	28
1.3.3	Alturas piezométricas y pérdidas de carga unitarias	29
1.3.4	Distribución de presiones	33

1.3.5	<i>ANÁLISIS DEL TIEMPO DE PERMANENCIA DEL AGUA EN LA RED</i> .....	35
1.3.6	<i>Análisis dinámico de la red</i> .....	37
1.4	Sectorización según el segundo procedimiento de optimización energética .....	39
1.4.1	<i>Análisis de caudales</i> .....	39
1.4.2	<i>Análisis de velocidades</i> .....	40
1.4.3	<i>Alturas piezométricas y pérdidas de carga unitarias</i> .....	42
1.4.4	<i>Distribución de presiones</i> .....	45
1.4.5	<i>ANÁLISIS DEL TIEMPO DE PERMANENCIA DEL AGUA EN LA RED</i> .....	47
1.4.6	<i>Análisis dinámico de la red</i> .....	48
<b>2</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>51</b>

# Capítulo 0.

---

Resumen





## 0 Resumen

La sectorización es una técnica empleada en las redes de distribución de agua potable con el principal objetivo de conseguir un mayor control y localización del volumen fugado, y por lo tanto un incremento y regulación del rendimiento volumétrico global. Gran parte de las sectorizaciones se definen según criterios puramente prácticos desde la perspectiva de su ejecución final sobre el terreno. En esta tesina se plantea un procedimiento sistemático para diseñar la sectorización de cualquier red de distribución, definiendo los sectores resultantes según criterios de eficiencia energética y coste de control de fugas.

Los objetivos principales a conseguir son los siguientes:

- Incorporar aspectos energéticos (Boulos y Bros, 2010; Cabrera y col. 2010) al método de la sectorización.
- Plantear un procedimiento para el diseño de la sectorización de manera óptima, según los aspectos energéticos propuestos por Boulos.
- Evaluar las sectorizaciones obtenidas según los criterios económicos de control activo de fugas (Lambert y Lalonde, 2005).
- Abordar el estudio de indicadores de evaluación de cualquier sectorización planteada frente a un óptimo.

Todos estos aspectos se verán respaldados con su aplicación en un caso práctico de una red de distribución real de agua potable.

Para ello se realizarán varias distribuciones sectoriales diferentes, bajo criterios de materiales de tuberías y cotas del terreno, las cuales se estudiarán al detalle según criterios hidráulicos, económicos y energéticos. También se planteará la sectorización óptima según los criterios de eficiencia energética detallados por Boulos y Bros.



# Capítulo 1.

---

## Introducción



## **1 Introducción**

### **1.1 Justificación de la tesina**

El presente trabajo nace con la finalidad de concluir el Master en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente realizado durante los cursos 2009-2010 y 2010-2011 por el autor en la Universidad Politécnica de Valencia.

Con dicho trabajo se quiere profundizar aun más en los conceptos teóricos y prácticos adquiridos en el bloque de Hidráulica Urbana del citado Master.

El tema elegido sobre el cual giran todos los conceptos y teorías, la sectorización de las redes urbanas de distribución de agua potable, se cree idóneo.

Este tema elegido concuerda con el bloque de especialización cursado, dando la posibilidad de dar un enfoque práctico a los conceptos teóricos adoptados. Por otro lado, el autor tiene experiencia laboral en el diseño de sectorizaciones de redes de distribución de considerable tamaño, lo que servirá para contrastar y replantear diversas prácticas.

### **1.2 Antecedentes**

La importancia del agua es incuestionable. Solo el 1% del volumen del agua del planeta está disponible para el consumo humano y sin ella la vida no es posible.

La gestión del agua es, probablemente, una de las actividades que más fácilmente se identifica con los fines y objetivos de la Responsabilidad Social, ya que constituye un recurso natural que, por su carácter de bien básico para la sociedad, permite tanto el desarrollo económico y la prosperidad de la misma como el mantenimiento de los estándares de calidad de vida.

Efectivamente, el uso prudente y eficiente del agua es una cuestión de relevancia en el marco Nacional y Europeo, por lo que actualmente se formulan o aplican políticas y mecanismos diversos con el objetivo de asegurar el uso sostenible de este recurso a largo plazo. La Directiva Marco del Agua ha delineado las políticas a seguir y los objetivos a cumplir para conseguir un modelo sostenible de gestión del agua.

Gracias a esta nueva directiva, el agua deja de considerarse exclusivamente como recurso y se contempla como un elemento básico de los ecosistemas hídricos y una parte fundamental para el sostenimiento de una buena calidad ambiental.

En el pasado, los esfuerzos para satisfacer la creciente demanda consistían principalmente en incrementar la oferta de recursos, que eran abundantes y relativamente económicos. Sin embargo, el escenario actual dista mucho del anterior, la relación entre captación y disponibilidad del agua se ha convertido en un importante factor de tensión en la explotación de los recursos hídricos europeos. Por tanto las políticas que abogan por la sostenibilidad de la gestión del agua se centran cada vez más en influir en la demanda del agua en modo favorable para el medio ambiente.

Hasta hace relativamente muy poco, las empresas tenían como principal y único objetivo la maximización del beneficio económico. Todas sus perspectivas, controles y anhelos eran fundamentalmente asignados desde unos requerimientos estrictamente económicos. Sin embargo, esta perspectiva puramente economicista está cambiando, poco a poco, en la actualidad y cada vez se enfatiza más en la necesidad de establecer una nueva relación entre la empresa y la sociedad, en la que las primeras asuman el compromiso de actuar de una manera más responsable y sostenible.

No cabe duda de que las empresas provocan un impacto sobre el medio ambiente, utilizando recursos renovables y no renovables, y generando residuos, emisiones y vertidos. Por ello, solo si durante todo el proceso de producción del servicio se practican conductas medioambientalmente responsables, la empresa contribuirá al desarrollo sostenible.

En este sentido y debido a la actual situación medioambiental provocada por la explotación sin control del medio ambiente, se hace necesaria y urgente una gestión sostenible, con la optimización de los recursos y su aplicación a los procesos productivos, logrando reducir el consumo y consecuentemente su impacto ambiental.

Algunos autores focalizan su atención en cinco líneas básicas que giran en torno a la gestión de la demanda: ajustes de usos y calidades del agua, eficiencia en la distribución, ahorro voluntario, eficiencia en la utilización, y reciclaje y reutilización del agua

Una política de ahorro de agua obliga a la revisión de hábitos de consumo y costumbres, con sus correspondientes enmiendas, para optimizar el aprovechamiento cuantitativo y cualitativo de este recurso por los distintos usuarios (particulares y empresas). Pero el ahorro que reportan los sistemas para la gestión eficiente del agua no solo se hace patente por el menor consumo de ésta, sino por el menor consumo de energía. Asimismo, se obtienen beneficios en la conservación del recurso y el medio natural, evitando su degradación, eliminando los costes de la construcción de nuevas infraestructuras y facilitando el mantenimiento de las ya construidas.

Ahora bien, en todos los sistema de distribución de agua potable grandes volúmenes de agua escapan al exterior por pequeños orificios, roturas o incorrectos mantenimientos.

Las fugas de agua son un efecto negativo ligado a la distribución de agua potable, un efecto cuya eliminación es totalmente imposible y dificulta una gestión sostenible. Por ello es necesaria su reducción.

Son muchas las técnicas encargadas de reducir y encontrar el volumen fugado a lo largo de todos los elementos de las redes de agua potable, las cuales se deben de aplicar en conjunto y no de forma separada.

Una de estas técnicas, y la cual será objeto de este trabajo, es la sectorización. Dicha práctica consiste en dividir las redes de distribución en pequeñas sub-redes para una mejor y más sencilla localización y gestión de la fugas que conllevará importantes ahorros de agua potable.

### 1.2.1 Pérdidas de agua en las redes de distribución. El problema de las fugas

En las redes de distribución de agua potable, no todo el volumen de agua inyectada en la red tiene como destino el consumo por parte del abonado. Esto es debido, mayoritariamente, a la presencia de numerosos escapes de agua al exterior, llamados coloquialmente fugas, a lo largo de todos los tramos de tuberías y elementos auxiliares, produciéndose así cuantiosas pérdidas de agua. Estos escapes, que son ocasionados por huecos, roturas o desgastes en los materiales, pueden llegar a sobrepasar el 50% del total del agua inyectada en algunos casos. Resumiendo entonces, toda agua introducida en la red de distribución no estrictamente útil al abonado es una pérdida.

Las fugas de agua que existen en las redes de distribución son, desde la óptica del gestor del sistema, un factor determinante del coste del servicio, además de ser efecto y consecuencia de gran número de problemas higiénicos, técnicos y sociales.

Más allá de un límite racional, debe procederse a una investigación de la situación concreta y tomar medidas para ello. Por lo general, pérdidas superiores al 35% se consideran inadecuadas, incluso porcentajes inferiores cuando el coste de producción del agua potable sea muy elevado.

Por ello tiene tanta importancia la reducción del volumen fugado. Y para poder actuar sobre las fugas es imprescindible conocer al detalle tanto su comportamiento como su control.

#### 1.2.1.1 Definición de la fugas. Tipos de fugas

Las pérdidas de agua en las redes de distribución, en una primera clasificación general, se dividen en reales y aparentes:

- Pérdidas aparentes: Se corresponden con volúmenes de agua consumida que no son contabilizados por la entidad gestora de la red de abastecimiento. Pueden ser robos, usos ilegales del agua y volúmenes no medidos debido al subcontaje en elementos de medida. En definitiva, se refieren al agua consumida sin que se tenga constancia de dónde se usa.
- Pérdidas reales: Estas pérdidas, conocidas como fugas, corresponden con el volumen de agua que escapa del sistema a través de los defectos de tuberías y accesorios. Las causas que las generan son muy diversas, aunque se resumen en dos. Por un lado están los defectos físico (roturas, orificios, etc) y por otro la presión de la red que lo favorece. Las fugas mayores, debidas a grandes defectos, son fácilmente detectables mientras que las fugas de mayor magnitud (propias de grandes roturas) son fácilmente detectables mientras que las de bajo caudal tienen una localización más compleja.

Las pérdidas reales suponen un alto porcentaje del agua inyectada, lo que las convierte, por su importancia, en un factor determinante del coste del servicio, constituyendo además una pérdida inútil de tan preciado elemento.

Además, se incrementarán también los costes de producción, debido a un mayor desgaste de los equipos electromecánicos y por un mayor impacto económico de la depuración y del tratamiento.

Por ello, uno de los objetivos a conseguir con este trabajo es la reducción del volumen real fugado, centrándose en las pérdidas reales.

### 1.2.1.2 Origen y modelación de las fugas

Las pérdidas reales, como se ha dicho antes, se deben a los defectos que aparecen en las redes: Roturas, pequeños orificios o fallos que con el paso del tiempo aumentan y que por ello es menester controlar.

En la fase de producción, una mala gestión de los bombeos o el mantenimiento inapropiado de los equipos, los fenómenos de corrosión en tuberías generales de aducción, los fenómenos transitorios en las estaciones de tratamiento y en los sistemas de impulsión general a las redes de distribución, pueden suponer situaciones de incorrecto uso del agua.

En la fase final, próxima al consumo, la instalación y mantenimiento defectuoso de acometidas, contadores, instalaciones interiores en viviendas e industrias, producen así mismo fenómenos a estudiar de forma regular y constante.

En cada una de las partes importantes de las infraestructuras de la redes de distribución (tuberías, acometidas, etc) el volumen fugado, sin importar su localización en la red, se puede producir con mayor o menor intensidad. Atendiendo a este criterio, se clasifican las pérdidas reales en tres tipos, la cuales tiene que ser localizadas usando métodos distintos:

- Fugas de fondo: Son pequeñas pérdidas reales que no salen a la superficie y tiene tan poca magnitud que son inaudibles a las nuevas tecnologías de escucha. No por ello significan pequeño volumen fugado, todo lo contrario, a largo plazo este componente supone el mayor porcentaje dentro del total del volumen fugado, por estar continuamente fugando.
- Fugas declaradas: Mas conocidas como roturas. Son provocadas por fallos estructurales de la infraestructura ocasionando unos caudales de fuga muy considerables pero durante tiempos cortos, debido a que son rápidamente localizadas y reparadas.
- Fugas no declaradas: Estas fugas tiene un caudal de pérdidas mayor que las fugas de fondo pero no el suficiente como para ser declaradas. Por ello es necesario su búsqueda. El caudal de estas fugas es moderado y su duración depende de la política tomada en el Control Activo de Fugas.

Las pérdidas se reducen evitando las causas y minimizando sus efectos. En la Tabla 1 se citan las causas que responden a defectos en la infraestructura y a maniobras inconvenientes cual una variación brusca de la presión.

Tabla 1. Principales factores que provocan o producen fugas (AWWA, 1990)

FACTORES DE INFRAESTRUCTURA	FACTORES DE PESIÓN
Buena elección del material de la tubería original, y análisis de la calidad del agua en su interior y del estado del terreno alrededor de la tubería.	Excesiva presión en la red.



<p>Cumplimiento de una normativa apropiada para el montaje, el asentamiento, y el relleno cuando se diseñan y se colocan las tuberías y los accesorios de acuerdo a especificaciones apropiadas y probadas con agua a presión antes de ser aceptadas.</p>	<p>Llenado de tuberías demasiado rápido.</p>
<p>Calidad del transporte, almacenaje y manipulación de las tuberías (distribución a lo largo de la traza y alojamiento en la zanja).</p>	<p>Cierre rápido de válvulas.</p>
<p>Gestión de la presión: cuando las tuberías y los accesorios se convierten en parte de la red presurizada, están sometidas a fatiga repetida y hay un potencial continuo de que ocurran daños físicos.</p>	<p>Consecuencias del fenómeno del golpe de ariete</p>
<p>Calidad de la política de las reparaciones y mantenimiento para las tuberías y accesorios.</p>	

Evidentemente son multitud los factores que producen o provocan fuga. En la tabla anterior solo se han contemplado algunos de los principales.

La salida del agua a través de un pequeño orificio, causante del mayor volumen fugado, en una tubería de agua potable a presión, se modela con la siguiente expresión:

$$Q_f = C_d \cdot A \cdot \left(\frac{P}{\gamma}\right)^{N_1}$$

donde A es el área de la sección del orificio, P es la presión interior en el punto del fallo y  $C_d$  corresponde con el coeficiente de descarga.

La expresión de arriba, la cual muestra la dependencia del caudal fugado con la presión en la red, describe el caudal de agua fugada si la sección de paso no dependiera de la presión. Sin embargo, el coeficiente  $N_1$  (0,5 en la ecuación) puede aumentar de este valor si el área de paso del agujero o agujeros y el coeficiente de descarga cambian con la presión.

Con este preámbulo, Thornton y Lambert (2005) muestran la siguiente ley exponencial simple, propuesta por el Water Losser Task Force (Thornton, 2003), que relaciona las fugas con el nivel de presión:

$$L \text{ varía con } P^{N_1}$$

y por lo tanto,

$$\frac{L_1}{L_0} = \frac{P_1^{N_1}}{P_0^{N_1}}$$

Según el tipo de material, edad, instalaciones, características geológicas del suelo, etc, el valor de  $N_1$  variará entre 0,5 y 1,5, llegando ocasionalmente hasta 2,5. Por ejemplo, la media ponderada de este valor  $N_1$  sobre un número representativo de instalaciones de distribución del Reino unido, dio en un estudio realizado un valor medio de 1 (comportamiento lineal).

El valor del parámetro  $N_1$  es único para cada instalación, debiendo por ello obtenerlo de manera experimental, es decir, estudiando las variaciones reales de los volúmenes fugados al modificar las presiones de trabajo en la red de distribución.

Ahora bien, no siempre es posible obtener el valor real de  $N_1$ . Por ello se puede obtener este parámetro a partir del ILI (índice estructural de fugas) y el % del volumen de fugas medido en tuberías de materiales rígidos tanto en tuberías principales como secundarias (Thornton y Lambert, 2005) . Dicha ecuación es la siguiente:

$$N_1 = 1,5 - \left(1 - \frac{0,65}{ILI}\right) \cdot \frac{p}{100}$$

De tal manera que si el 100% del material es tubería rígida,  $N_1$  será 1,5 cuando todas las fugas correspondan con fugas de fondo en instalaciones en buen estado y 0,5 cuando todas las fugas sean declaradas. Para condiciones intermedias entre ambos extremos, se deberá de utilizar la ecuación anterior.

### *1.2.1.3 Diagnóstico de la red. Auditoria hídrica*

El primer paso para la reducir el volumen fugado es cuantificar este valor en cada periodo de estudio y el cálculo del nivel económico fugado, como se explica en mayor detalle en el capítulo 3.

Indudablemente, todo buen diagnóstico exige un conocimiento detallado y preciso de los elementos que componen el sistema, de sus características y comportamiento, y también requiere un conjunto de mediciones de las variables de estado (presiones, caudales y potencias) en puntos estratégicos a lo largo del tiempo.

La auditoría es utilizada para analizar y evaluar los procedimientos utilizados para disminuir el volumen fugado en la red, verificar el buen funcionamiento de la red, conocer las debilidades o falencias y proponer un plan de acciones. Dicha auditoría será la suma de 2 procedimientos de suma importancia:

- El primero de ellos consiste en un balance hídrico de todos los caudales que entran en juego, ya sean entrantes o salientes.
- El segundo supondrá el diagnóstico del sistema por indicadores de gestión.

A continuación se muestran los primeros niveles del balance planteado (Almandoz y col, 2005):

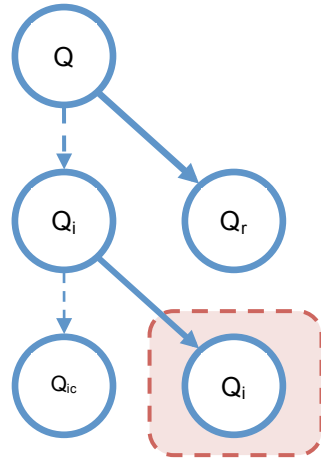


Figura 1. Balance hídrico planteado por Almandoz (2005)

Donde:

- Q = caudal inyectado
- Qi = caudal incontrolado
- Qr = caudal registrado
- Qic= caudal incontrolado consumido
- Qif= caudal incontrolado fugado

Debido a su importancia de cara a la reducción del volumen fugado, en este trabajo se hará un especial hincapié en el caudal incontrolado fugado, proponiendo actuaciones para su reducción.

El ratio más utilizado, entre los indicadores de la eficiencia del sistema, es sin duda el rendimiento volumétrico.

Aunque no es un buen indicador del estado de la red porque minusvalora las fugas en redes de consumo elevados. El rendimiento volumétrico de una red o de un sector aislado de la misma, se define como la relación entre el volumen registrado y el volumen total suministrado en un mismo período de referencia:

Generalmente se considera un 30% de pérdidas sobre el volumen registrado como correcto; ahora bien, influyen factores como: longitud de la red de distribución, antigüedad de la red, antigüedad del parque de contadores, presión de suministro, calidad del agua suministrada, etc., que pueden hacer variar el porcentaje.

Para diagnosticar adecuadamente un sistema hidráulico, el rendimiento hidráulico se deberá presentar acompañado de una serie de indicadores cuyo estudio y detalle no se adjuntará en el presente trabajo, pues ello daría mayor dificultad a la obtención de las conclusiones del mismo.

#### 1.2.1.4 Control de las fugas

El Water Loss Group de la International Water Association (IWA) propone cuatro líneas de actuación para reducir el nivel de pérdidas. Dichas actuaciones (Figura 2) se describen a continuación:

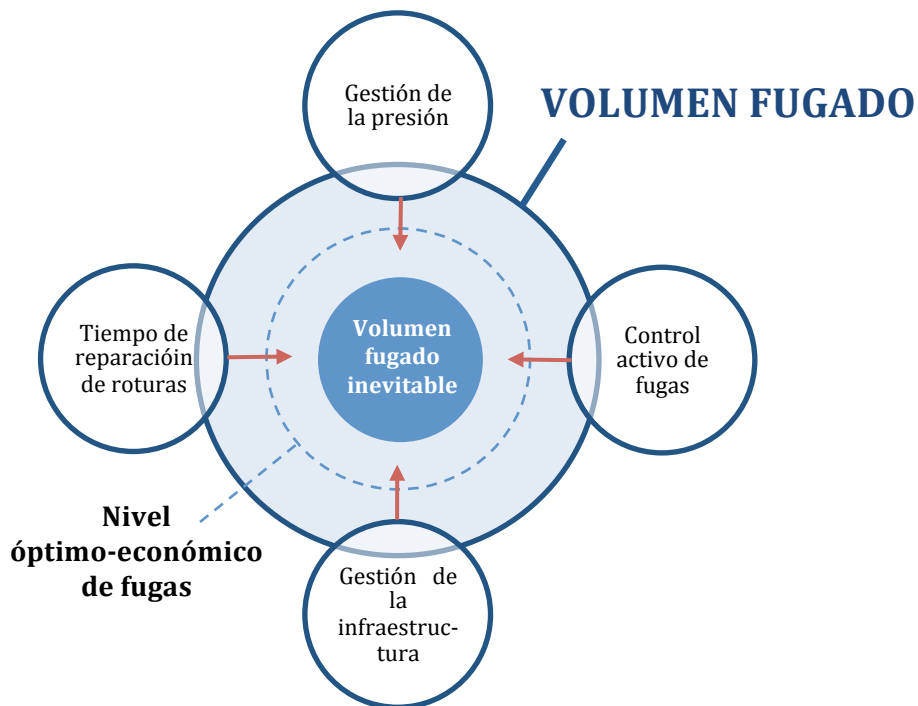


Figura 2. Líneas de actuación sobre las fugas

- Gestión de la presión: La gestión de la presión en los sistemas de distribución de agua potable es una actividad clave para reducir pérdidas de agua y disminución de la frecuencia de la aparición de roturas en la red de distribución y conexiones domiciliarias. La reducción de la presión influye en el caudal de agua que se perderá en una determinada fuga, como así también en el nivel de consumo de la población, y al contrario, a mayor presión mayores fugas y consumos.
- Control activo de fugas: El control activo de fugas consiste en un conjunto de acciones realizadas para conseguir un nivel bajo de pérdidas. Entre todas ellas se pueden destacar las inspecciones del sistema de distribución, la sectorización o las mediciones continuas de flujos nocturnos. Estos métodos, para controlar y registrar, permitirán tomar decisiones que conduzcan a reducir y mantener un nivel bajo de fugas. Además mediante la detección, localización y reparación de fugas se conocerá el tipo, las causas, el lugar de ocurrencia, tiempo de duración del escape físico de agua, obteniendo un historial de fugas en el sistema de abastecimiento de agua potable.
- Tiempo de reparación de roturas: Evidentemente, el mínimo tiempo que se tarde en la reparación desde que es detectada por el usuario o por el equipo de detección y localización de fugas es clave para reducir el volumen fugado.
- Gestión de la infraestructura: Un mantenimiento correctivo y preventivo de todos los componentes del sistema de distribución prevendrá de la aparición de pequeños defectos y con ellos fugas, ya sean de fondo o graves roturas.

Para minimizar los efectos de una fuga, hay que determinar el volumen final del agua que se pierde debido a ella. Tal volumen es igual al caudal unitario multiplicado por el tiempo que está activa, es decir:

$$V_f = t \cdot A_f \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{P}{\gamma}}$$

El volumen total anual de pérdidas reales es el resultado de cuantificar la contribución de todas las fugas N del sistema de acuerdo con la expresión:

$$V_f = \sum_{i=1}^{i=N} t \cdot A_f \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{P}{\gamma}}$$

Conviene, con todo, subrayar que la importancia de la presión en el control de las fugas es muy superior al que evidencian las precedentes expresiones que suponen, para una fuga dada, una sección de paso  $A_f$  constante. Ello, sobre todo en tuberías elásticas, dista mucho de ser cierto. En efecto, con la presión la sección del orificio de salida aumenta, en mayor o menor medida en función de la elasticidad de la tubería. Por ello las precedentes expresiones dan un valor inferior del volumen fugado, lo que conlleva usar exponentes en las anteriores expresiones del rango 0,5-1,5.

En realidad, buena parte de los problemas que se presentan con frecuencia en los abastecimientos de agua son consecuencia, directa o indirecta, del estado de presiones existente y de su variación temporal. Por ello, en el presente trabajo se estudiará la posibilidad de reducir de manera efectiva y máxima esta presión para reducir al máximo las pérdidas reales.

Entre los principales problemas que se presentan o que puedan aparecer como consecuencia de presiones elevadas destacan:

- Incremento de los caudales perdidos a través de los defectos existentes, demostrando esto por ser las fugas un término dependiente de la presión tal y como se muestra en las ecuaciones anteriores.
- Aumento de la probabilidad de generación de nuevos defectos o aumento de la magnitud de los ya existentes (Thornton y Lambert, 2005; Pearson y col, 2005).
- Aparición de ruidos y vibraciones, o aumento en la magnitud de estos.
- Aumento del riesgo de sobrepresiones ocasionadas por bolsas de aire acumuladas en el interior de las conducciones, con consecuencias desastrosas si no se disponen o no funcionan ventosas a lo largo de la red.

### 1.2.2 Sectorización. Técnica para el control de las fugas

La sectorización de una red de distribución de agua potable es una técnica habitual empleada en el control y localización global de fugas. Dicha técnica consiste en la división de la red en varias subredes más pequeñas, denominados sectores o DMA (Distric Metered Area).

Con el empleo de esta herramienta se puede realizar un balance hídrico de cada uno de los sectores y localizar cuál de ellos presenta mayor volumen fugado siendo así más efectivos las técnicas de búsqueda de fugas.

En general, la ejecución y puesta en marcha de una sectorización se podría resumir de una manera muy global en dos pasos:

- Aislar aquellas tuberías que conectan sectores adyacentes, mediante el correspondiente cierre de las válvulas de corte instaladas en dichas tuberías a aislar.
- Instalación de medidores en todos los puntos de entrada o salida.

Una vez dividida la red en sectores hidrométricos, resulta más fácil evaluar los caudales circulantes y por ende el nivel de fugas, sobre todo en períodos nocturnos. Por tanto, el estudio de sectorización supone la medida más efectiva en lo referente a detección de pérdidas de agua y su posterior localización y reparación en función de la prioridad que se establezca a nivel de cada sector.

Tras el estudio de la sectorización, el control de la presión en cada uno de los sectores hidrométricos debe ser la primera acción a abordar para disminuir el nivel de fugas y reducir la probabilidad de roturas en tuberías, ello sin afectar a la presión mínima de servicio.

Resumiendo, la sectorización es una opción estratégica que reduce el área de inspección para la detección y localización de anomalías, como roturas, fugas o deficiencias de presión. Si conjuntamente a esta técnica añadimos la implantación de un sistema de control, se mejorará sustancialmente la gestión de la explotación global de la red, optimizando las presiones en cada sector.

Una vez establecidos los contornos de los sectores y la entrada de agua a los mismos está controlada (es aconsejable que ésta se produzca por un único punto), se puede proceder entonces al análisis del correspondiente funcionamiento del sector con la finalidad de detectar las fugas que en él se están produciendo, de acuerdo con una serie de pasos:

1. **Vigilancia continua a intervalos regulares de los volúmenes inyectados y consumidos.** A ser posible este control se realizará durante la noche en la que los consumos serán menores y la red alcanzará el máximo de presión.
2. **Localización de subsectores con mayor probabilidad de fugas,** como resultado de una mayor diferencia entre los caudales inyectados en los mismos y los consumos que se producen.

3. **Localización exacta de las fugas mediante el empleo de los métodos de detección tradicionales.** Una vez determinados los sectores con mayor probabilidad de fugas se ejecutan campañas de detección in situ mediante los métodos tradicionales de auscultación de las conducciones.

Por tanto, la sectorización de la red presenta una serie de ventajas entre las que cabe destacar la reducción del área de estudio a la hora de detectar anomalías. De esta manera el control de la red sectorizada resulta más eficiente al poder localizar con mayor facilidad las anomalías que se puedan presentar. Además, la reparación de dichas anomalías es más rápida al quedar limitada su área de influencia al sector en el que se producen.

#### *1.2.2.1 Estudio y definición de la sectorización*

Acometer un estudio de sectorización que resulte eficiente en la gestión y explotación posterior del sistema de abastecimiento, requiere de un modelo matemático que permita analizar y evaluar diversas hipótesis de funcionamiento de la red en servicio, sin afectar a la actividad diaria de la misma.

El esquema de sectorización debe asegurar un correcto funcionamiento de la red, en especial mejorando la eficiencia de operación. Para ello es necesario contar con información detallada en relación a las demandas actuales y futuras, los estándares de suministro a cumplir, la topografía y topología del sistema, etc.

Con ello se podrán realizar los correspondientes estudios de viabilidad que aseguren que los cambios a realizar en la red no resulten drásticos y que la calidad del servicio, será como mínimo, la misma que antes de proceder a la realización de la sectorización. Y esto es debido a dos factores de suma importancia en la mayoría de las redes de distribución:

- Suelen encontrarse desagregadas funcionalmente en estratos de presión.
- Suelen ser de un tamaño considerablemente grande y estar muy malladas.

Desde el punto de vista económico, también es necesario llevar a cabo análisis que permitan asegurar a corto y medio plazo que la sectorización por la que finalmente se opte es la más rentable. Por un lado, se debe estimar el coste relativo a los elementos de control necesarios, obra civil involucrada y adecuación general de la red, y por otro los beneficios esperados en concepto de reducción de las pérdidas volumétricas y energéticas, ahorros debidos a la nueva regulación de presiones, y por reducción de la probabilidad de ocurrencia de roturas y fugas, así como por la reducción del tiempo de detección-localización de las mismas

#### *1.2.2.2 Criterios para la definición de los sectores*

La selección y definición de los sectores es un procedimiento que no tiene solución única, existen diversos criterios para realizarla y estos varían, a su vez, en función de muchas variables (tipo de red, tipo y número de abonados, etc.).

Los principales criterios, y a su vez más habituales, que usualmente se siguen en cada sistema de distribución para la definición de los sectores son los siguientes:

- Orografía de la ciudad: Uno de los principales criterios seguidos es la definición de sectores con un nivel de presiones homogéneas. Definiendo así sectores en función de las líneas de máxima pendiente del terreno. De esta forma se estratifica la red de distribución en varios niveles de presión, favoreciendo la gestión de la presión, en cada uno de ellos. Como criterio general, se procura que el desnivel dentro de cada sector sea como mucho de 30 metros.
- Tuberías de alimentación: De cada a la explotación del sector, conviene conocer el balance hídrico lo más rápido posible. Por ello es conveniente que cada uno de los sectores se alimente directamente desde un único punto de la red arterial próxima, siguiendo además un lógica que cualquier operador de la red en el futuro pueda interpretar fácilmente, ya que el mantenimiento de una red sectorizada exige un mayor esfuerzo por parte de la empresa gestora, y por tanto un mayor número de visitas y maniobras sobre la red.
- Demanda: En cuanto a la demanda, interesa limitar la demanda de cada uno de los sectores de tal forma que se pueda alimentar desde un único punto. Es posible aumentar la demanda, el tamaño del sector y el diámetro de la tubería de entrada, pero cuanto mayor sea el caudal de entrada mayor será el valor mínimo de una fuga para ser detectada mediante la observación de los caudales mínimos nocturnos. Un valor recomendable, para una tubería de 100mm de diámetro ronda los 3-6 l/seg.
- Extensión: No interesa sectores con gran extensión, debido a que mayores extensiones significan mayores demandas y mayores tiempos empleados en la búsqueda de fugas.
- Número de válvulas de corte: En cuanto al número de válvulas de corte, a mayor número se incrementa el coste de instalación y mantenimiento. Además conlleva el inconveniente de una gestión más compleja en el futuro y sobre todo el incremento de las necesidades de abrir válvulas frontera en las operaciones de mantenimiento, pues al comunicar dos sectores se pierden las series históricas utilizadas para el seguimiento de los balances hídricos y de los consumos mínimos nocturnos.
- Distritos urbanos y calles principales: De cara a una más sencilla y rápida explotación de los sectores, se pueden guiar la distribución de los sectores según distritos urbano o según calles principales.

Como se ha dicho anteriormente, estos criterios tan solo son un punto de partida para la definición de los sectores. Tras el análisis de cada sectorización, quizá interese modificar alguno de ellos para así poder dar un mejor servicio al usuario.



Otros aspectos a tener presente que no se han citado arriba, y no por ello menos importantes, pueden ser calidad del agua en cada sector (debido al corte de tuberías), requerimientos de presión, etc.

Nótese que ninguno de los criterios citados hasta ahora tiene una finalidad estrictamente económica. No obstante, el criterio económico es el que, en la mayoría de los proyectos a realizar, no solo guía la definición sino que es el condicionante principal (número máximo de válvulas a instalar, número máximo de caudalímetros a instalar, etc.).

En el capítulo 3, se establecerán las directrices económicas marcadas para sistema de distribución en base a su índice económico de fugas. Este establece el nivel de pérdidas máximas permitidas en cada sector, delimitando así el control activo de fugas, el tamaño y número de sectores.

### *1.2.2.3 Ventajas e Inconvenientes de la Sectorización*

Las principales ventajas e inconvenientes la técnica aquí presentada, son:

#### VENTAJAS

- Mejoras en las gestión de la red: La sectorización mejora el control y seguimiento del estado de la red al poder efectuar auditorías aisladas en cada sector. Por un lado, se facilita la detección de sectores con bajo rendimiento volumétrico (auditoría hídrica) y por otro lado la localización en tiempo real de cualquier fuga, rotura o deficiencia en la red.
- Menor área de influencia de anomalías: En caso de producirse algún tipo de anomalía, una red sectorizada puede reducir los negativos efectos a tan solo la extensión del sector afectado.
- Mejora en el Control Activo de Fugas: Permite evaluar más fácilmente los resultados de las campañas de detección y corrección de pérdidas
- Reducción del área de búsqueda de fugas: La sectorización, al convertir la red completa en varias unidades independientes más pequeñas, está reduciendo el área de búsqueda ante posibles fugas, delimitando a un solo sector.

#### INCONVENIENTES

- Red ramificada: Una de las tareas a realizar en la sectorización es el cierre de tuberías para aislar sectores. De esta manera, se está ramificando la red con la consiguiente disminución de garantía de suministro respecto a la red mallada inicialmente.
- Viabilidad de suministro: Es conveniente que cada sector tenga una o dos tuberías de alimentación. Un fallo en estas tuberías de suministro dejaría sin agua a todos los abonados del sector.

- Aumento del tiempo de permanencia: La desinfección del agua y la destrucción de microorganismos patógenos se suele realizar con la adición de cloro. Éste es un compuesto químico eficaz, barato y que deja un remanente en el agua. Sin embargo, la concentración de cloro en el agua desciende con el tiempo (comúnmente se simplifica suponiendo que la ley de decaimiento del cloro es de primer orden). Por tanto, si el tiempo de permanencia del agua en la red es muy elevado, pueden existir zonas en las que el agua pierda todo el cloro y por tanto, no se pueda asegurar que mantenga los estándares de calidad objetivo. Esto se debe a que aumenta el recorrido que el agua debe hacer hasta llegar al abonado final, ya que las redes adoptan una tipología más ramificada.
- Inversión económica: La sectorización conlleva una fuerte inversión inicial ya que no se trata únicamente de instalar válvulas y contadores en los puntos de alimentación, sino que puede requerir reforzar ciertos tramos de tubería para garantizar la presión de suministro.

Con todo lo anterior, se puede afirmar que prevalece el ahorro de agua frente a los pequeños inconvenientes que ello supone.

## Capítulo 2.

---

Planteamiento del problema energético



## **2 Planteamiento del problema energético**

Actualmente, en pleno comienzo del siglo XXI, la sociedad se está viendo marcada por una crisis energética y medioambiental, marcada por un Cambio Climático, sin precedentes, las cuales están ocasionando un serio replanteamiento de los procesos de trabajo y una mayor consideración de la sociedad con el medio ambiente.

La citada crisis energética se refleja en un constante encarecimiento de la materia prima por excelencia, el barril de crudo. Es por ello la notable preocupación por la optimización de los procesos que directamente depende de esta materia prima y la evidencia del peso energético en cada uno de ellos. Se puede decir que hasta hace unos años, el interés por mejorar la eficiencia de los procesos era directamente proporcional al precio de la energía. En la actualidad, y gracias en gran parte a los gobiernos por medio de ayudas, las empresas ven la optimización como una práctica más allá del mero ahorro económico.

La crisis medioambiental trae consigo, entre otros muchos y no de menos importancia, uno de los mayores retos a los que se tendrán que enfrentar el crecimiento de las próximas sociedades, la escasez de agua de calidad y las gravísimas consecuencias directas e indirectas de la degradación del medio marino, ríos y acuíferos. Ello coloca a la sociedad actual ante la ineludible necesidad de reconceptualizar las funciones y el valor del agua.

Esta situación ha servido para evidenciar el enorme gasto de energía que el manejo sostenible del agua comporta (Cabrera y col., 2011) tratando ambos términos de agua y energía en importancia conjunta y no por separado, debiendo abordar el aumento de la eficiencia en el uso de ambos recursos a la par, presentando así el binomio agua-energía.

Las cada vez más frecuentes sequías y el reto del cambio climático exigen mayores niveles de eficiencia en el uso de estos dos recursos, sobre todo porque su interdependencia amplifica el problema.

La racionalización conjunta del agua y de la energía, está estrechamente relacionada con el cambio climático. Son muchos lo modelo que prevén grandes reducciones de los recursos hídricos en la zona del mediterráneo, lo que aconseja implantar cuanto antes políticas de ahorro que mejoren la garantía de suministro en las zonas afectadas. Y de otra porque el ahorro de agua conlleva ahorro de energía y, en definitiva, minimiza la emisión de gases de efecto invernadero.

El consumo energético juega un papel fundamental y de gran peso en los sistemas de distribución urbana de agua potable. Desde su captación y tratamiento hasta el mantenimiento de los equipos y distribución de los caudales con la presión idónea, el consumo energético tiene una influencia notable en los costes.

No está de más remarcar que un pequeño porcentaje de ahorro energético significa grandes beneficios en los sistemas de distribución de agua potable.

Por todo ello, es de suma importancia una optimización de los procesos agua-energía para conseguir así unos importantes ahorros de energía y agua, y con ello importantes ahorros de emisiones de gases efectos invernadero.

Una estrategia de optimización energética de una red de distribución debe incluir una auditoría energética, monitorización del consumo (SCADA), uso del Benchmarking y una optimización de los procesos de operación y distribución (Biehl y Inman, 2010).

Es decir, la energía es uno de los caminos a considerar para la optimización de los sistemas de distribución de agua potable. Una evaluación integral debería incluir emisiones de gases de efecto invernadero, costes, criterios sociales y políticos, renovación, rehabilitación y sustitución del material, calidad del agua y fugas, entre otros muchos aspectos.

A continuación se van a seguir dos planteamientos para la realización de la auditoría energética. El primero de ellos, es el planteado según Boulos y Bross (2010) y realiza una auditoría sencilla centrándose en donde se localizan las pérdidas de energía en los sistemas de distribución. El segundo de ellos, realizado por Cabrera y su equipo (2010), consiste en una auditoría más compleja y potente al cual estudia todos los flujos de energía que se producen en una red de distribución.

En el presente trabajo no se quiere realizar una mera auditoría energética, sino que se quiere implementar estas auditorías en la definición de los diferentes sectores de una sectorización con el fin de conseguir un mayor ahorro de agua fugada, principalmente, y con ello energía introducida al sistema. Con la ayuda de las auditorías energéticas se buscarán aquellas zonas donde exista mayor rango de reducción de presiones y así conseguir un mayor ahorro.

## **2.1 Una primera solución al problema energético**

La gestión de los sistemas de distribución de agua están demostrando una creciente concienciación sobre la importancia del cambio climático. La mayor parte de energía consumida por estos sistemas de distribución se realizan en los grupos de bombeo, ya sea bien para elevar el volumen a un depósito de cabecera o para elevar el caudal hasta los usuarios, siendo estos consumos importantes fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero.

Boulos y Bross (2010) detallan una metodología para calcular la huella de carbono del consumo de energía en los sistemas de distribución e introduce un simple método para evaluar la eficiencia de los sistemas de distribución, que se explica a continuación.

Toda la energía introducida en los sistemas de distribución, durante un periodo considerable de estudios, es perdida a través de:

- Fricción en las tuberías
- Válvulas de control
- Grifo del consumidor, en forma de presión

Dejando la margen los procesos de tratamiento, producción y transporte del agua hasta el punto de inyección en la red de distribución, y según estos autores, la energía perdida es un derroche en los sistemas que requieren un bombeo (distribución a presión). Sin embargo, en los sistemas de distribución por gravedad desde la inyección toda la energía necesaria es energía potencial, y al no suponer coste alguno no tiene mayor sentido hacer este estudio de energías perdidas.

En el presente trabajo se demostrará que este estudio de energías ayudará a reducir el volumen fugado tanto en sistemas de distribución a presión como los de gravedad.

El cálculo de las emisiones de efecto invernadero que se producen por las pérdidas energéticas en las fricción y el control de la presión y el caudal puede ayudar a la toma de decisiones sobre las operaciones de mejorar la eficiencia energética y reducir así la emisión de gases efecto invernadero.

Boulos y Bross (2010) introducen una nueva manera de evaluar la eficiencia energética de toda la red de transporte, desde el punto de entrada al sistema hasta el punto de entrega al consumidor. Esta manera representa la energía en términos de energía potencia disipada por fricción, pérdidas discretas y las pérdidas en los grifos de los usuarios en forma de presión.

### 2.1.1 Metodología seguida

Un sistema de distribución de agua potable consiste en una compleja red de tuberías, bombas, depósitos, pozos y plantas de tratamientos y un complejo sistema de elementos hidráulicos como, por ejemplo, válvulas de corte o de control.

En sistemas de distribución, la energía es disipada en el transporte (fricción), en el control (válvulas) y en los puntos de suministro.

La energía es introducida en el sistema a través de fuentes de producción, depósitos o por equipos de bombeo. Y toda la energía introducida se va disipando a lo largo del camino hasta el usuario, en fugas, en válvulas de control y en fricción con las tuberías.

Ahora bien, algunas pérdidas de energía son inevitables y otras no. Algunas pérdidas son difusas, como por ejemplo la fricción que se produce en las paredes de las conducciones o las pérdidas minoritarias que se producen en los elementos. Sin embargo, otras pérdidas son introducidas en el sistema de forma deliberada, a través de la gestión de la presión, por ejemplo con VRP o el control del flujo. Las empresas gestoras tienen la posibilidad de mejorar la gestión de estas pérdidas.

La mayor parte de la energía perdida se localiza en el grifo del consumidor, en forma de presión, incluyendo dentro del grifo del consumidor el consumo por parte de este y las fugas, las cuales se descargan al exterior con la presión de la red en ese punto de fuga. Esta pérdida es inevitable y necesario conseguir un nivel mínimo de presión, fijado según la presión mínima de servicio. Sin embargo, una presión residual alta significa que existe la posibilidad de optimizar el suministro en la zona asociada. Idealmente, todos los consumidores deberían de recibir el agua que ellos

necesiten exactamente con la presión justa o necesaria. Por supuesto, no es posible (o práctico) mantener la presión necesaria en cada abonado sin producir pérdidas.

Independientemente de la configuración topológica de la red, el estado hidráulico de la red esta descrito matemáticamente por las siguientes ecuaciones para cada línea (entre los nodos  $i$  y  $j$ ) y cada nodo  $k$  (Rossman, 2000):

$$H_i - H_j = f(Q_{i,j})$$
$$\sum_i Q_{i,k} - \sum_j Q_{k,j} - q_k = 0$$

donde  $Q_{i,j}$  es el caudal que circula a lo largo de la línea entre los nudos  $i$  y  $j$ ;  $H_i$  y  $H_j$  son las alturas piezométricas de los nudos  $i$  y  $j$ , respectivamente;  $f(\dots)$  es una función no lineal entre el caudal circulante por la línea y la disminución de altura (o incremento de la misma) ocasionada; y  $q_k$  es la demanda del nudo  $k$ . Dicha demanda externa puede ser de origen doméstico o no doméstico y por fugas.

La primera expresión representa la energía perdida o ganada por el caudal circulante, en caso de existir un grupo de presión. La energía perdida en la red desde la captación o punto de suministro hasta entregar el suministro al usuario se clasifican, una vez más, en:

- Energía difusa perdida
- Energía discreta perdida
- Energía perdida en grifo, en forma de presión

Para las pérdidas difusas y discretas, la potencia hidráulica en cada línea  $i,j$  (del nudo  $i$  hasta el nudo  $j$ ) se puede imputar como:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q_{ij} \cdot h_{f_{ij}}$$

Las pérdidas en grifo incluyen los consumos domésticos, no domésticos y las fugas. Cuando el agua sale de la red, se descarga a la presión atmosférica y pierde toda la energía potencia relativa. Por ello, la potencia hidráulica para cada nudo con demanda positiva se puede definir como:

$$P = \rho \cdot g \cdot q_k \cdot H_k$$

### 2.1.2 Eficiencia energética en una red de distribución

En una red de distribución ideal, la energía mínima se obtendrá si en todos los puntos de consumo se entregase el agua a la presión mínima de servicio. Esta presión mínima, normalmente se encuentra en torno a 15-20 mca y se fija según el reglamento del servicio.

Para cada nudo  $k$  con demanda positiva  $q_k$ , la potencia mínima ( $P_{min}$ ) necesaria para mantener el mínimo nivel de presión ( $H_{min}$ ) es:

$$P_{min} = \rho \cdot g \cdot q_k \cdot H_{min}$$



Para todos los nudos de la red:

$$P_{min} = \rho \cdot g \cdot \sum_{k=1}^n q_k \cdot H_{min}$$

La diferencia entre la presión en el grifo del consumidor y el mínimo impuesto constituye una medida de la ineficiencia de un sistema.

El consumo extra de energía (por otra parte necesaria en un sistema real) contribuye a unas mayores emisiones de dióxido de carbono. Este exceso podría ser minimizado a través del diseño de sistemas y procedimientos más eficientes.

Según esto, la eficiencia energética, o rendimiento energético, de una red se puede definir como el ratio entre la potencia requerida para alcanzar la presión mínima de servicio frente a la actual potencia empleada:

$$\eta_e = \frac{P_{min}}{P_t} = \frac{\rho \cdot g \cdot \sum_{k=1}^n q_k \cdot H_{min}}{\rho \cdot g \cdot \sum_{k=1}^n q_k \cdot H_k}$$

La eficiencia energética es un parámetro adimensional cuyo valor oscilará entre 0 y 1. Siempre hay energía perdida que es imposible su ahorro y por lo tanto nunca se podrá conseguir una eficiencia energética del 100%.

### 2.1.3 Objetivos del planteamiento

Uno de los objetivos que Boulos y Bros (2010) intentan conseguir con la definición de esta nueva medida de la eficiencia energética de las redes de distribución es el dar a conocer aquellas redes de distribución con menores valores de este parámetro y por lo tanto con mayores potenciales de ahorro energético.

Usando las fórmulas y conceptos citados anteriormente, el total de la energía perdida difusa, discreta y la energía en los grifos de los usuarios se ha calculado por medio del modelo matemático de la red. Esta energía se puede expresar como energía diaria perdida (kW·h/día) o bien como energía perdida por unidad de volumen (kW·h/m<sup>3</sup>).

Para estos autores, todo este planteamiento tan solo tiene sentido en redes de abastecimiento que cuenten con grupos de impulsión, donde la distribución del caudal con una presión dada tiene un precio unitario nada despreciable. Y por lo tanto, una vez conocido la eficiencia energética se da a conocer hasta donde se puede optimizar el sistema actual.

Esta metodología junto con el empleo del modelo matemático en redes presurizadas muestran una sencilla, pero no por ello de menor importancia, auditoría energética la cual muestra la dirección a seguir para poder optimizar el suministro, ya sea por la adaptación de los grupos de bombeo a puntos de trabajo más adecuados o por la instalación de válvulas de control. Todo el ahorro energético planteado no solo se traduce en un importante ahorro económico, sino que se conlleva

una importante reducción en la emisión de los gases de efecto invernadero y menor influencia en el cambio climático.

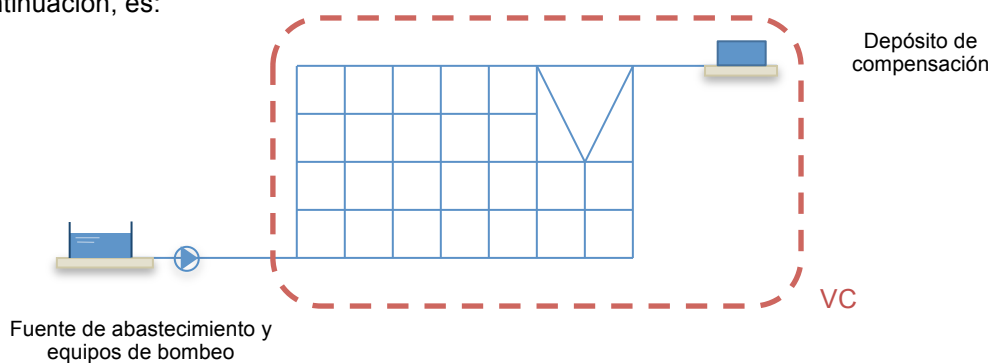
Reducir el volumen fugado no solo significa un aumento del rendimiento hidráulicos, sino que conlleva menores gastos de producción y tratamiento, menor saturación de los recursos naturales, tales como acuíferos, ríos o mares, y menores emisiones de gases de efecto invernadero.

## 2.2 Auditoría energética

La auditoría energética planteada por Cabrera y su equipo del Instituto Tecnológico del Agua (ITA) han planteado un ambicioso balance energético de aplicación en la redes de distribución de agua potable.

Esta auditoría energética, a diferencia de la expuesta en el punto anterior, tiene presente todos los flujos de energía entrantes, salientes o almacenadas que dan juego a la distribución del agua potable a los diferentes abonados. Para su planteamiento es necesario haber resuelto la auditoría hídrica y conocer el modelo matemático de la red previamente.

Una vez conocido esto, tan solo es necesario aplicar la ecuación de la energía a un volumen de control establecido. Esta ecuación, para el volumen de control de la figura que se muestra a continuación, es:



$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} + \frac{dW}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC} \rho e dV + \iint_{SC} \rho (\vec{v} \cdot d\vec{A})$$

Donde  $\frac{dE}{dt}$  representa el intercambio de energía por unidad de tiempo entre el entorno y el volumen de control, (suma del intercambio térmico,  $\frac{dQ}{dt}$ , y de trabajo,  $\frac{dW}{dt}$ ), e es la energía total por unidad de masa y  $\rho$  es la densidad del fluido.

En el volumen de control presentado, la energía de entrada se realiza desde la fuente de abastecimiento y los equipos de bombeo. El depósito de compensación también puede introducir energía en el sistema o almacenarla, lo que hace que en un periodo de tiempo suficiente se pueda despreciar este término (la energía suministrada y consumida será prácticamente la misma). Toda la energía introducida se entregará a los abonados, en forma de presión en los puntos de consumo, se disipará debido a la fricción con las paredes de las tuberías o se perderá con las fugas.

Para trabajar mejor con la ecuación general de energía general, se deberá simplificar admitiendo los siguientes puntos:

- El agua es incompresible y su densidad constante.
- El flujo de calor a través de la superficie de control es nulo, hipótesis razonable pues la temperatura del medio que envuelve el sistema y la del agua es que circula por su interior es aproximadamente la misma y por lo tanto el salto térmico es nulo.
- El trabajo es aportado por las bombas en forma de trabajo de eje ( $\frac{dW}{dt} = \sum_i^{np} \gamma Q_{pi} H_{pi}$ ).
- El término cinético se desprecia.
- El análisis energético que se plantea es cuasi-estático y su extensión en el tiempo es una simulación energética en periodo extendido. En cada intervalo de cálculo la energía en el interior del volumen de control es, por lo que a las tuberías se refiere, constante y su variación temporal nula. Sin embargo, la energía potencial en los depósitos sí que puede cambiar.
- El flujo en las superficies de entrada y salida del flujo (secciones rectas de las tuberías) es uniforme.
- Los embalses aportan al volumen de control una energía natural,  $z_n$ , constante e igual a su cota.
- La aportación de un depósito es también es energía natural,  $z_n(t)$ , pero variable con el nivel de la lámina de agua.

A partir de cuanto antecede, para un sistema con  $n_N$  nudos de consumo alimentado desde  $n_N$  embalses, con  $n_P$  bombeos que aportan energía al sistema, y con  $n_C$  depósitos de compensación, la ecuación simplificada se puede expresar como:

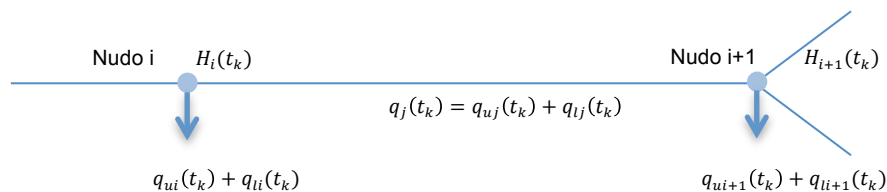
$$P_0 = \sum_i^{n_N} \gamma Q_{Ni} H_{Ni} + \sum_i^{n_P} \gamma Q_{Pi} H_{Pi} = \sum_{salidas} \gamma Q_{Si} H_{Si} + \rho \left[ \sum_{salidas} Q_{Si} u_{Si} - \sum_{entradas} Q_{Ni} u_{Ni} \right] + \gamma \frac{\delta}{\delta t} \iiint_{VC} z dV$$

Y de una manera mucho más compacta:

$$P_0 = P_N + P_P = P_U + P_L + P_F \pm \Delta P_C$$

Esta ecuación se integra a lo largo del tiempo mediante un proceso totalmente análogo al que se sigue para simular en el tiempo el comportamiento hidráulico de la red, una integración que convierte los términos de potencia en términos de energía.

Previamente es necesario adoptar una notación que indique el origen de cada término, el elemento de la red y el intervalo de tiempo al que se está refiriendo:



Donde:

$q_{uj}(t_k)$  es el caudal consumido útil que circula por la línea  $j$  en el instante  $t_k$ .

$q_{lj}(t_k)$  es el caudal fugado en la línea  $j$  en el instante  $t_k$ .

$H_i(t_k)$  es la altura piezométrica en el nudo  $i$  en el instante  $t_k$ .

### 2.2.1 Detalle de los términos que engloban la ecuación de energía

Con todo lo que precede, a continuación se van a detallar cada uno de los términos de energía que engloban la ecuación de energía planteada:

- Energía entrante en la red, aportada por el embalse ( $E_N$ ): la energía externa suministrada por un embalse o depósito de cabecera es:

$$E_N(t_p) = \gamma \cdot \sum_{i=1}^{i=n_N} \left( \sum_{t_k=t_1}^{t_k=t_p} Q_{Ni}(t_k) \cdot H_{Ni}(t_k) \cdot \Delta t_k \right)$$

donde  $\gamma$  es el peso específico del agua,  $Q_{Ni}(t_k)$  es el caudal ( $m^3/seg$ ) aportado por el embalse en el instante  $t_k$ ,  $H_{Ni}(t_k)$  es su altura piezométrica (m.c.a) en el instante  $t_k$  y  $\Delta t_k$  el intervalo de tiempo (seg) considerado. La potencia de entrada, que los embalses y depósitos ponen a disposición del sistema es  $P_N$ , siendo esta una potencia "natural".

- Energía entrante en la red, aportada por un grupo de bombeo ( $E_P$ ): la energía externa suministrada por el trabajo de eje de un grupo de bombeo es:

$$E_P(t_p) = \gamma \cdot \sum_{i=1}^{i=n_P} \left( \sum_{t_k=t_1}^{t_k=t_p} Q_{Pi}(t_k) \cdot H_{Pi}(t_k) \right) \cdot \Delta t$$

donde  $Q_{Pi}(t_k)$  es el caudal trasegado ( $m^3/seg$ ) por el equipo de bombeo en el instante  $t_k$ ,  $H_{Pi}(t_k)$  es su altura (m.c.a) de bombeo en ese mismo instante  $t_k$  y  $\Delta t$  el intervalo de tiempo (seg) considerado. La potencia que aportan las bombas es  $P_P$ . Esta potencia es de tipo artificial pues requiere una fuente de alimentación externa. La suma de las potencias  $P_N$  y  $P_P$  corresponden con la potencia de entrada total,  $P_0$ .

- Energía entregada a los usuarios en los nudos de consumo ( $E_U$ ): la energía entrega a los usuarios en cada nudo de consumo en forma de presión hidráulica es la siguiente:

$$E_U(t_p) = \gamma \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \left( \sum_{t_k=t_1}^{t_k=t_p} q_{ui}(t_k) \cdot H_i(t_k) \right) \cdot \Delta t$$

donde  $n$  es el número de nudos de consumo de la red de distribución,  $q_{ui}(t_k)$  es el caudal ( $m^3/seg$ ) entregado a los abonados en el nudo  $i$  en el instante  $t_k$ , y  $H_i(t_k)$  es su altura piezométrica (m.c.a) en el nudo  $i$  en el instante  $t_k$ .

- Energía saliente de la red, a través de las fugas existentes ( $E_L$ ): las pérdidas reales escapan de la red con la presión de la red en el punto donde se producen. Esta energía saliente de la red tiene un comportamiento similar a la entregada en los nudos de consumo a los usuarios, y se calcula de la siguiente manera:

$$E_L(t_p) = \gamma \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \left( \sum_{t_k=t_1}^{t_k=t_p} q_{li}(t_k) \cdot H_i(t_k) \right) \cdot \Delta t$$

donde n es el número de nudos con fugas en la red,  $q_{li}(t_k)$  es el caudal fugado ( $m^3/seg$ ) en las tuberías adyacentes al nudo i en el instante  $t_k$ , y  $H_i(t_k)$  es su altura piezométrica (m.c.a) en el nudo i en el instante  $t_k$ .

- Energía disipada en la fricción del agua con las tuberías ( $E_F$ ): la energía disipada debida al rozamiento del agua con las tuberías del sistema es:

$$E_F(t_p) = \gamma \cdot \sum_{i=1}^{i=n_L} \left( \sum_{t_k=t_1}^{t_k=t_p} (q_{uj}(t_k) + q_{lj}(t_k)) \cdot \Delta h_j(t_k) \right) \cdot \Delta t$$

donde  $n_L$  es el número de líneas de la red de distribución,  $\Delta h_j(t_k)$  la pérdida de carga (mca) de la línea j en el instantes  $t_k$ ,  $q_{uj}(t_k)$  es el caudal de la línea j necesario para atender la demanda de los usuario y  $q_{lj}(t_k)$  es el caudal de la línea j que finalmente se perderá por fugas.

- Término energético de compensación del depósito de cola ( $\Delta E_C$ ): los depósitos de regulación o compensación pueden trabajar suministrando caudal o almacenándolo. Si al final del periodo de estudio, el nivel de agua es menor que el nivel inicial este ha trabajado como fuente de masa y de energía mientras que en caso contrario será un sumidero. La energía almacenada o suministrada se puede calcular como:

$$E_C(t_p) = \sum_{i=1}^{n_C} \frac{\gamma \cdot A_i}{2} (z_i^2(t_f) - z_i^2(t_i))$$

donde  $A_i$  es la sección del i-ésimo depósito ( $m^2$ ), mientras  $z_i(t_f)$  y  $z_i(t_i)$  son los niveles (m) de la superficie libre de agua en el depósito i en los instantes de tiempo extremos. Este término de compensación solo es relevante en simulaciones con periodos de tiempo cortos, ya que éste término tiene un valor máximo independiente de la duración del análisis, al contrario que el resto.

## 2.2.2 Auditoría global de energías

Llegados a este punto, en el cual se han estudiado los diferentes términos de energía, ya se pueden realizar de manera sencilla y correcta la auditoría energética de cualquier red de distribución aplicando la siguiente ecuación para un periodo dado:

$$E_{input} = E_N(t_p) + E_P(t_p) = E_U(t_p) + E_L(t_p) + E_F(t_p) \pm \Delta E_C(t_p)$$

O, bien, desarrollando los términos:

$$\begin{aligned} & \gamma \sum_{i=1}^{i=n_N} \left( \sum_{t_k=t_1}^{t_k=t_p} Q_{Ni}(t_k) \cdot H_{Ni}(t_k) \cdot \Delta t_k \right) + \gamma \sum_{i=1}^{i=n_P} \left( \sum_{t_k=t_1}^{t_k=t_p} Q_{Pi}(t_k) \cdot H_{Pi}(t_k) \right) \Delta t = \\ & = \gamma \sum_{i=1}^{i=n} \left( \sum_{t_k=t_1}^{t_k=t_p} q_{ui}(t_k) \cdot H_i(t_k) \right) \cdot \Delta t + \gamma \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \left( \sum_{t_k=t_1}^{t_k=t_p} q_{li}(t_k) \cdot H_i(t_k) \right) \cdot \Delta t \\ & + \gamma \sum_{i=1}^{i=n_L} \left( \sum_{t_k=t_1}^{t_k=t_p} (q_{uj}(t_k) + q_{lj}(t_k)) \cdot \Delta h_j(t_k) \right) \cdot \Delta t + \sum_{i=1}^{n_C} \frac{\gamma \cdot A_i}{2} (z_i^2(t_f) - z_i^2(t_i)) \end{aligned}$$

La auditoría energética necesita previamente la hídrica, tal y como se comentado anteriormente. El balance hídrico se acostumbra a plantear sobre periodos anuales, para permitir el cálculo adecuado de indicadores hídricos de gestión, por ello y para realizar una auditoría energética correcta para el estudio y análisis del sistema de distribución será necesario plantearla también es ese periodo de tiempo.

A continuación se puede mostrar los resultados de la auditoría energética planteada de manera gráfica, para una mayor comprensión.

E <sub>INPUT</sub>	E <sub>N</sub> (t <sub>p</sub> ) Energía natural suministrada	E <sub>U</sub> (t <sub>p</sub> ) Energía útil cedida con la demanda de caudal de los usuarios	E <sub>output</sub>
		E <sub>L</sub> (t <sub>p</sub> ) Energía asociada a las fugas	
	E <sub>P</sub> (t <sub>p</sub> ) Energía de eje (grupos de presión)	E <sub>F</sub> (t <sub>p</sub> ) Energía invertida en vencer el rozamiento	E <sub>Disipada</sub>

### 2.2.3 Indicadores energéticos básicos

El trabajo realizado por Cabrera no se planta simplemente en el planteamiento y cálculo de la auditoría energética sino que propone una serie de indicadores energéticos para la evaluación de las redes de distribución según los resultados obtenidos tras el balance energético obtenidos.

Según este autor, los indicadores proporcionan una idea rápida y calibrada de aspectos básicos relacionados con la totalidad del servicio.

Cabera define un total de ocho indicadores energéticos: dos indicadores de contexto y seis indicadores energéticos, los cuales se definen a continuación.

#### 2.2.3.1 Indicadores de contexto del sistema

Los indicadores de contexto dependen únicamente de las características físicas de la red. Los dos indicadores planteados son los siguientes:

- C<sub>1</sub>- Procedencia de la energía: Este índice, cuyo valor varía entre 0 y 1, informa sobre el porcentaje de agua introducida en la red por gravedad y por grupos de presión. Un valor de 1 correspondería a una red de abastecimiento totalmente por gravedad, siendo para el caso contrario, toda la red abastecida por presión, un valor de 0. Este indicador se calcula según la siguiente expresión:

$$C_1 = \frac{E_N(t_P)}{E_{input}(t_P)}$$

- C<sub>2</sub>-Exigencia energética de la red: Este indicador resume las exigencias energéticas de la red. Es el cociente entre la energía mínima útil necesaria, marcada por la normativa del servicio de distribución, definida en cada nudo a partir de la altura mínima de servicio y la energía mínima teórica requerida por una red plana e ideal (sin fugas y sin fricción). Su cálculo es el siguiente:

$$C_2 = \frac{E_{min,useful}}{E_{min,flat}} = \frac{\gamma \cdot \sum_{t_k=t_1}^{t_k=t_P} (\sum_{i=1}^n q_{ui}(t_k) \cdot (h_{min})_i) \cdot \Delta t}{\gamma \cdot \frac{P_{min}}{\gamma} \cdot V_U(t_P)}$$

El valor más favorable de C<sub>2</sub> es la unidad, red completamente plana.

### 2.2.3.2 Indicadores energéticos del sistema

Los restantes seis indicadores planteados permiten determinar cuan eficiente es la gestión de la red, por lo tanto, sus valores varían en función de operación del sistema.

A continuación se detallan los indicadores energéticos del sistema:

- I<sub>1</sub>-Exceso de energía suministrada: El primer indicador representa las veces en que la energía entrante real excede a la energía útil teórica necesaria. Es el cociente entre la energía real entrante en el sistema y la energía mínima útil necesaria ya definida:

$$I_1 = \frac{E_{input}(t_P)}{\sum_{i=1}^n v_{u,i}(t_P) \cdot h_{min,i}}$$

- I<sub>2</sub>-Eficiencia de la red: Representa el porcentaje de la energía inyectada en cabecera de red que es útil. Se calcula como el cociente entre la energía útil y la entrante al sistema:

$$I_2 = \frac{E_U(t_P)}{E_{input}(t_P)}$$

- I<sub>3</sub>-Energía de fricción: Este indicador se ocupa de representar la capacidad hidráulica de la red para cumplir adecuadamente con su función de distribución. Si ello no es así, las pérdidas de carga resultarían excesivas suponiendo un malgasto energético innecesario.

$$I_3 = \frac{E_F(t_P)}{E_{input}(t_P)}$$

- I<sub>4</sub>-Energía total asociada a las fugas: Representa el porcentaje energético que suponen las fugas en las redes de distribución frente al total de la energía introducida en la red, tanto

las debidas a la fricción del volumen fugado (diferencia entre la energía de fricción real ( $E_F(t_p)$ ) y la energía de fricción de la misma red sin fugas ( $E'_F(t_p)$ ) como la energía con la que las pérdidas reales abandonan la red. Este cuarto indicador se calcula como:

$$I_4 = \frac{E_L(t_p) + E_F(t_p) - E'_F(t_p)}{E_{input}(t_p)}$$

- I<sub>5</sub>-Suficiencia en el cumplimiento de estándares: Este indicador es directamente el cociente entre la energía entregada a los usuarios y la energía mínima útil necesaria:

$$I_5 = \frac{E_U(t_p)}{\gamma \cdot \sum_{i=1}^n v_{u,i}(t_p) \cdot h_{min,i}}$$

## 2.3 Procedimiento de optimización

Entre otros factores, las fugas dependen directamente del nivel de presión además de no presentar una distribución homogénea a lo largo de toda la red.

Cuando el objetivo propuesto consiste en aumentar el rendimiento hidráulico por medio de la reducción del volumen fugado, hay que priorizar aquellas zonas donde el margen de reducción de las fugas sea mayor. Dichas zonas tendrán una eficiencia energética menor (apartado 2.1).

Por ello, se plantean a continuación unos procedimientos sencillos con los cuales se pretende definir sectores con menor eficiencia energética, que serán los que presentarán una mayor reducción del volumen fugado cuando se reduzca la presión.

En una red de abastecimiento, la potencia necesaria para abastecer a los usuarios dependen directamente de los niveles mínimos de presión de servicio requeridos (Boulos y Bros, 2010).

La diferencia entre la potencia empleada en situaciones normales de funcionamiento en la red y la potencia necesaria para mantener los niveles de presión mínimos de servicio requeridos constituye la medida de la ineficiencia del sistema.

Bajo esta premisa, la eficiencia energética de una red de abastecimiento se puede definir como el cociente entre la mínima potencia requerida para conseguir el nivel mínimo de presión de servicio y la potencia total consumida.

$$\eta_e = \frac{P_m}{P}$$

Valores altos de la eficiencia energética son propios de redes de distribución con presiones cercanas a la presión mínima admisible en los nudos de los abonados. En estas situaciones, el volumen fugado será mínimos. En caso contrario, si este rendimiento es bajo la potencia empleada es superior a la mínima necesaria, lo que redundará en presiones superiores a la presión mínima requerida.

Para buscar estas zonas de menor eficiencia energética se presentan a continuación dos algoritmos de cálculos. Ambos se basan en la misma teoría de funcionamiento pero con la



salvedad del número de restricciones impuestas en el cálculo en cada uno de ellos. El primero definirá zonas de eficiencia mínima pero a priori se le deberá de haber indicado por donde buscar, el número de sectores a definir y la longitud mínima que deberán englobar los sectores. El segundo algoritmo buscará las zonas con menor eficiencia de todas las posibles y solo se le impondrá como condición una longitud mínima englobada por cada zona, evitando así sectores demasiado pequeños.

### 2.3.1 Primer procedimiento

Con las premisas anteriores, se plantea el primer procedimiento de optimización. Este se basa o recuerda la idea del algoritmo de Prim, el cual es un sí un algoritmo perteneciente a la teoría de grafos (Guerequeta y Vallecillo, 2004). Dado un grafo, este algoritmo halla el conjunto de aristas que permita la conexión de todos los vértices del grafo de tal manera que la suma de los valores asociados a cada arista sea la mínima.

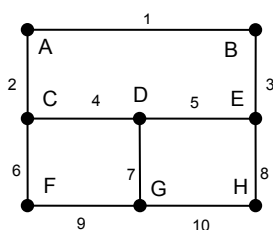
Dicho procedimiento planteado partirá de un primer nudo de iteración, llamado vértice, y una o varias condiciones de contorno que deberá de cumplir el sector buscado.

El procedimiento planteado partirá de dos hipótesis de partida: Un primer nudo de partida en la iteración, llamado vértice, y una o varias condiciones de contorno que deberán de cumplir cada uno de los sectores. Una vez esto, empezará el cálculo.

El primer paso será la localización de los pares nudo-línea conectados con el vértice inicial, eligiendo el par que menor rendimiento energético presente. El nudo y líneas seleccionados entrarán a formar parte del grupo elegido junto con el vértice.

De esta manera ya se tienen 2 nudos y una línea dentro del grupo a localizar con menor eficiencia energética. Se seguirán estos pasos hasta que se cumplan las condiciones de contorno impuestas para el sector, por ejemplo, la longitud de tuberías máxima englobadas.

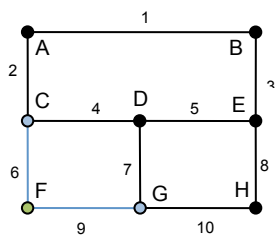
A continuación se adjunta, para mayor claridad en la comprensión, los pasos a seguir y el diagrama de flujo de dicho procedimiento:



Este ejemplo partirá de una sencilla red mallada, compuesta por 8 nudos (identificados con letras) y 10 líneas (identificadas con números). Se ha resuelto el problema hidráulico y por tanto, se conocen todos los consumos en los nudos y los caudales circulantes por las líneas de esta red sintética.

Cada uno de los nudos tendrá un valor diferente de presión y cada línea un valor diferente de caudal, con lo que se puede calcular la eficiencia energética para grupo de nudos y líneas.

Arbitrariamente se ha cogido el nudo F como punto de partida.

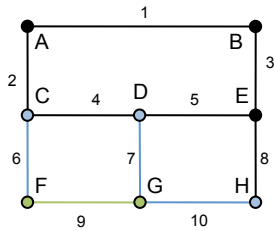


Los nudos conectados con F son C y G, o más correctamente, los pares nudo-línea C-6 y G-9.

Incluiremos en el sector al par nudo-línea que menor eficiencia energética tenga. Supongamos que corresponde con G-9.

Incluido en el sector		Frontera	
Nudos	Líneas	Nudos	Líneas
F	-	C	6
		G	9

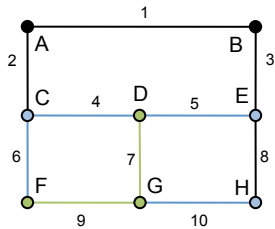
Rendimiento energético:  $\eta_1$



Ahora el sector está formado por los nudos F, G y la línea 9. Siendo los pares frontera C-6, H-10 y D-7. De todos ellos, se tomará con menor rendimiento el nudo D. Se incluirá al sector el nudo D y la línea 7.

F	-	C	6
G	9	H	10
		D	7

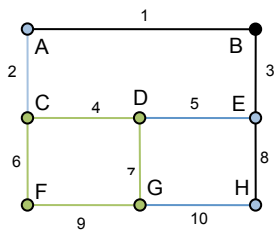
Rendimiento energético:  $\eta_2$



Los siguientes nudos y líneas frontera son E-5, H-10 y C-6-4. El que menor rendimiento presenta es C-6-4, se incluirán en el sector.

F	-	C	6
G	9	H	4
D	7	H	10
		E	5

Rendimiento energético:  $\eta_3$



El algoritmo seguirá hasta completar todas las líneas y nudos o hasta que se cumplan los requisitos impuestos (condiciones impuestas).

F	-	C	6
G	9	H	10
D	7	D	7
C	6		
	4		

Rendimiento energético:  $\eta_i$

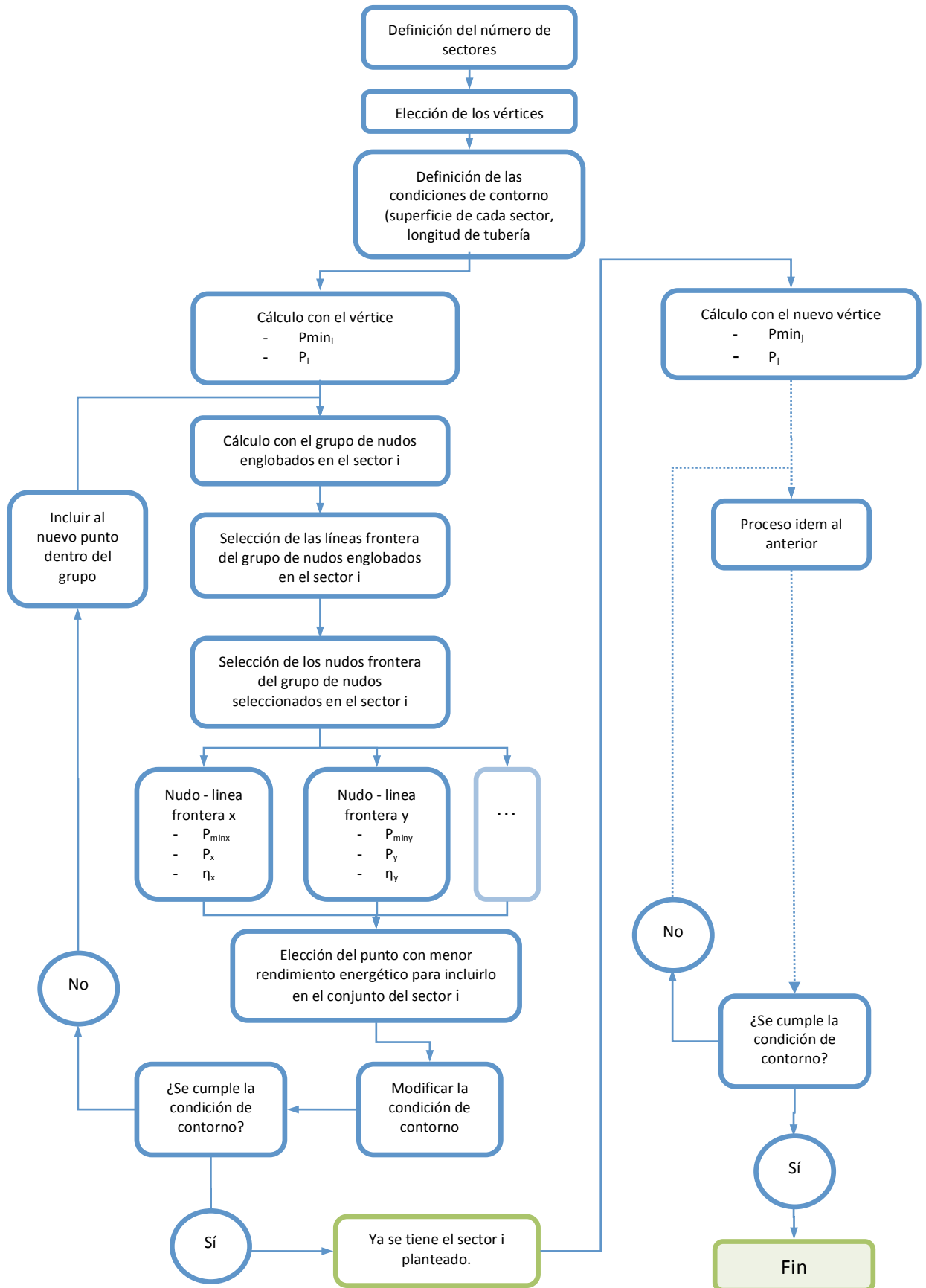


Figura 3. Diagrama de flujo a seguir en el primer procedimiento

### 2.3.1.1 Ejemplo numérico

A modo de ejemplo se muestra la aplicación de este primer procedimiento planteado en una sencilla red mallada alimentada por gravedad, a lo largo del cual se van a destacar las distintas particularidades de cálculo.

La red está compuesta por 38 nudos de consumo, 65 tuberías de diferentes diámetros y un embalse desde donde se abastece al sistema. A continuación se puede observar un esquema de la red y la nomenclatura con la que se designan los elementos que la componen:

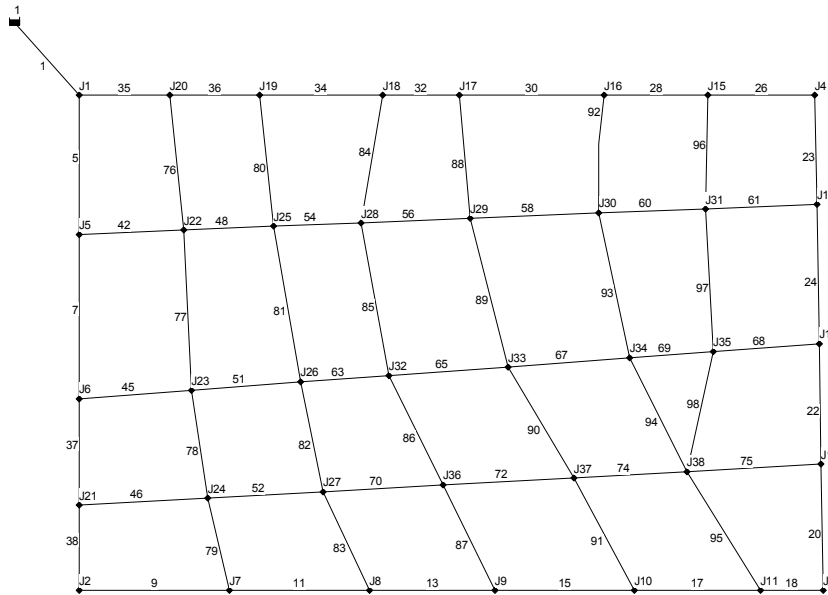


Figura 4. Red de estudio

Las simplificaciones adoptadas en el caso de estudio son :

- El consumo de todos los nudos es 2,6 l/seg. No se ha considerado la variación temporal de los consumos.
- Todos los nudos se encuentran a una cota de 0 m.s.n.m., estando el embalse a 35 m.
- La rugosidad de todas las tuberías es igual y con un valor de 0,1 mm.
- Se suponen las fugas localizadas en los nudos de consumo.
- Dichas fugas representadas son dependientes de la presión y longitud de las tuberías.
- Cada fuga nodal se caracteriza con su correspondiente coeficiente de emisor cuyos valores se determinan mediante según el proceso descrito en Almandoz y col. (2005). Dichos coeficientes para cada nudo son los siguientes:

Tabla 2. Coeficientes emisores para la red del ejemplo

Nudo	Emisor ( $m^{3-a}/seg$ )	Nudo	Emisor ( $m^{3-a}/seg$ )
J14	0,223048	J27	0,282395
J15	0,200994	J28	0,298298
J16	0,227551	J29	0,318753
J17	0,213962	J30	0,310719
J18	0,203981	J31	0,294137
J19	0,213982	J32	0,300613
J20	0,195929	J33	0,324173

J21	0,198360	J34	0,297862
J22	0,303772	J35	0,282286
J23	0,304129	J36	0,303844
J24	0,277108	J37	0,309723
J25	0,289885	J38	0,394307
J26	0,289222		

El dimensionado de cada emisor se ha realizado siguiendo la siguiente ecuación, debido a su dependencia con la presión:

$$q_{li}(t_k) = C_E \cdot \Delta H^\alpha$$

Donde  $C_E$  ( $m^{3-\alpha}/s$ ) es el coeficiente del emisor asignado a cada nudo del sistema,  $\Delta H$  (m) representa el salto de presiones que experimenta el agua al atravesar el orificio de fuga y  $\alpha=0,5$  es el exponente de emisor que representa las características propias del material de la tubería y que adopta valores diferentes según el tipo de material de la tuberías.

En cuanto a las tuberías, se tiene una red arterial primaria formada por tuberías de 200mm y una red arterial secundaria de 110mm. La red de distribución está formada por tuberías de 90 y 75mm. A continuación se detalla las longitudes y diámetros de cada una de ellas:

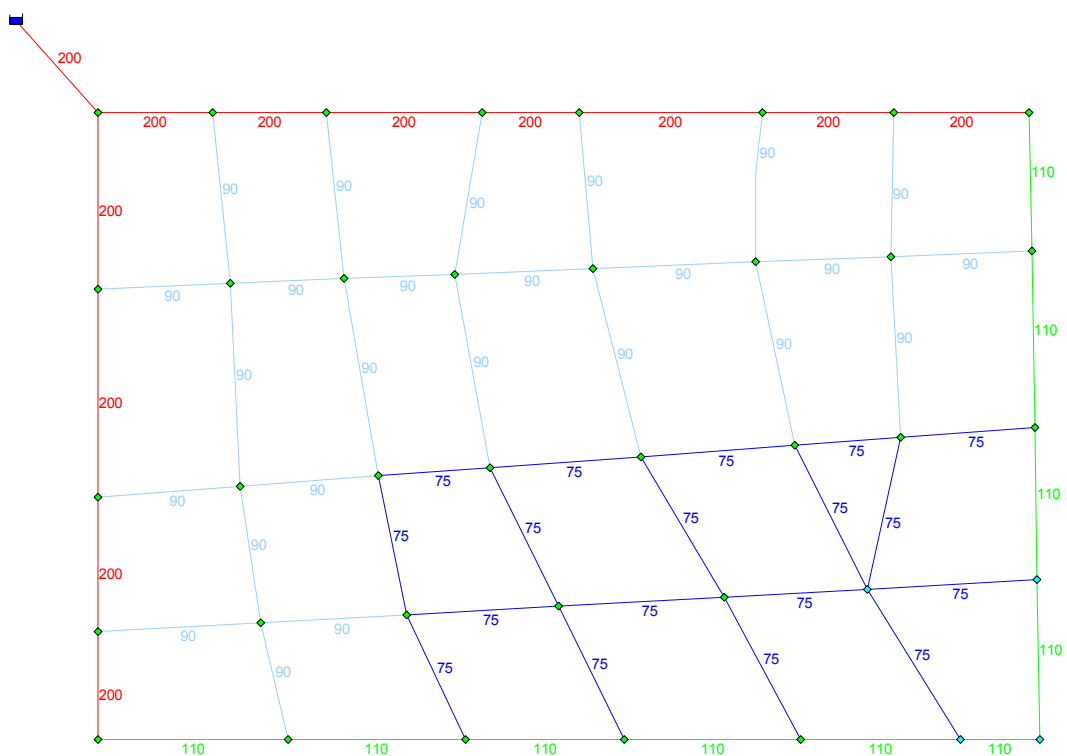


Figura 5. Diámetros de las tuberías de la red de estudio

Una vez conocidos todos estos datos, y simulando en Epanet para una duración de 24 horas, se obtiene lo siguiente:

- Volumen inyectado: 13.132,80  $m^3$ /día
- Volumen consumido: 8.536,32  $m^3$ /día
- Volumen fugado: 4.596,48  $m^3$ /día

- El rendimiento hidráulico de la red es del 65%.

Tras la simulación se tienen los datos necesarios para aplicar el algoritmo de optimización. Para ello, se ha implementado los pasos a seguir en Visual Basic, complementando los cálculos con el módulo de programación Toolkit de Epanet 2.0.

Para este ejemplo se quieren diseñar 2 sectores y por ello se han elegido aleatoriamente como vértices los nudos J2 y J4, como condición de contorno, o de corte, una longitud mínima de tuberías de cada sector de 1.000 metros y como presión mínima de servicio 25 m.c.a. Con todo esto, se obtienen los siguientes resultados:

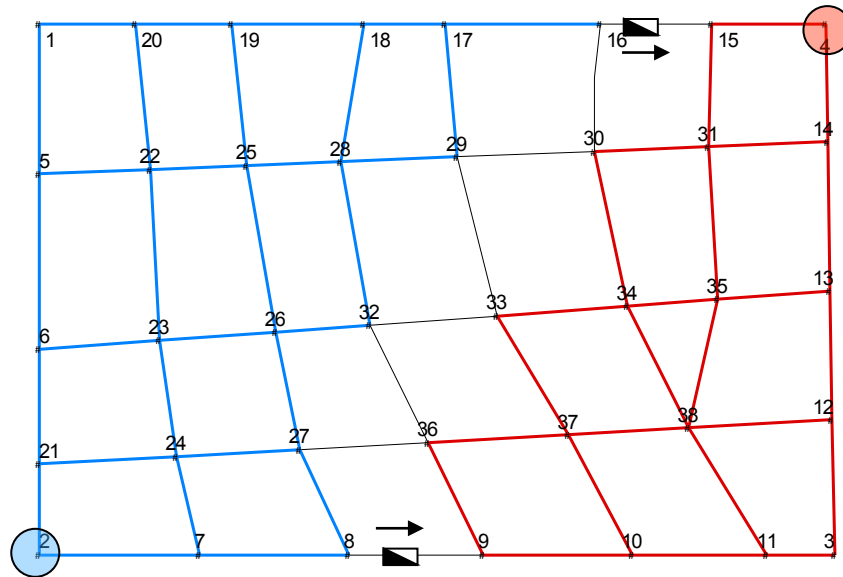


Figura 6. Sectorización resultado del primer procedimiento de cálculo

Como se puede observar en la anterior imagen, las tuberías que conectan a los dos sectores por su extremos no se han incluido en ninguno de ellos. En estas tuberías o bien se deberán instalar válvulas de corte para aislar los sectores, o bien se deberán dejar abiertas para suministrar al segundo sector. En este caso, se dejarán abiertas las dos tuberías arteriales de 200 (nudos 16-15) y 110 mm (nudos 8-9) para poder cumplir los requisitos de presión mínima.

Para comenzar con el análisis de esta sectorización, se subrayan los efectos hídricos que devienen de la sectorización propuesta. Para ello, se muestran los caudales suministrados y fugados en los dos escenarios propuestos, la red actual y la red sectorizada:

Tabla 3. Balance de caudales

	Sector 1	Sector 2	Red sectorizada	Red actual
Caudal suministrado (lps)	84,008	67,115	151,123	152,000
Caudal fugado (lps)	29,408	22,915	52,323	53,200
Caudal fugado antes de sectorizar (lps)	29,354	23,846	53,200	-
Variación caudal fugado (%)	-0,18	3,90	1,65	-
Caudal fugado mínimo (lps)	26,044	21,683	47,727	47,727
Máxima variación (%)	11,28	9,07	10,29	10,29

Cabe destacar dos apreciaciones: La primera hace referencia a la comparación del caudal fugado de cada uno de los sectores frente al caudal fugado antes de sectorizar, está haciendo referencia a los nudos que engloban cada uno de los sectores antes y después; la segunda es respecto al caudal fugado mínimo, ya que es el caudal fugado si la presión en cada uno de los nudos fuese la mínima establecida, es decir, toda la red estuviera a esa presión (situación técnicamente imposible).

A continuación se estudian los diferentes valores de energías consumidas y pérdidas en las red así como el rendimiento energético para cada uno de los sectores obtenidos, estudiando estos de manera aislada como si fueran redes independientes. Se adjunta también los mismos valores para el total de la red antes de ser sectorizada y después de aplicar dicha técnica.

Tabla 4. Datos energéticos según Boulos

RED	Demanda (m <sup>3</sup> /día)	TOTAL ENERGÍA PERDIDA (kWh/día)				Energía por caudal unitario (kWh/m <sup>3</sup> )	Mín. energía en grifo de consumidor	Rendimiento energético (%)
		Fricción	Control	Grifo consumidor	Total			
Sector 1 – Azul	7258,29	140,68		631,51	772,19	0,11	494,47	64,03
Sector 2 - Rojo	5798,77	41,73		442,86	484,59	0,08	395,04	81,52
Red Sectorizada	13057,01	134,61		1074,35	1208,97	0,09	889,51	73,58
Red actual	13132,83	101,57		1114,00	1215,57	0,09	894,68	73,60

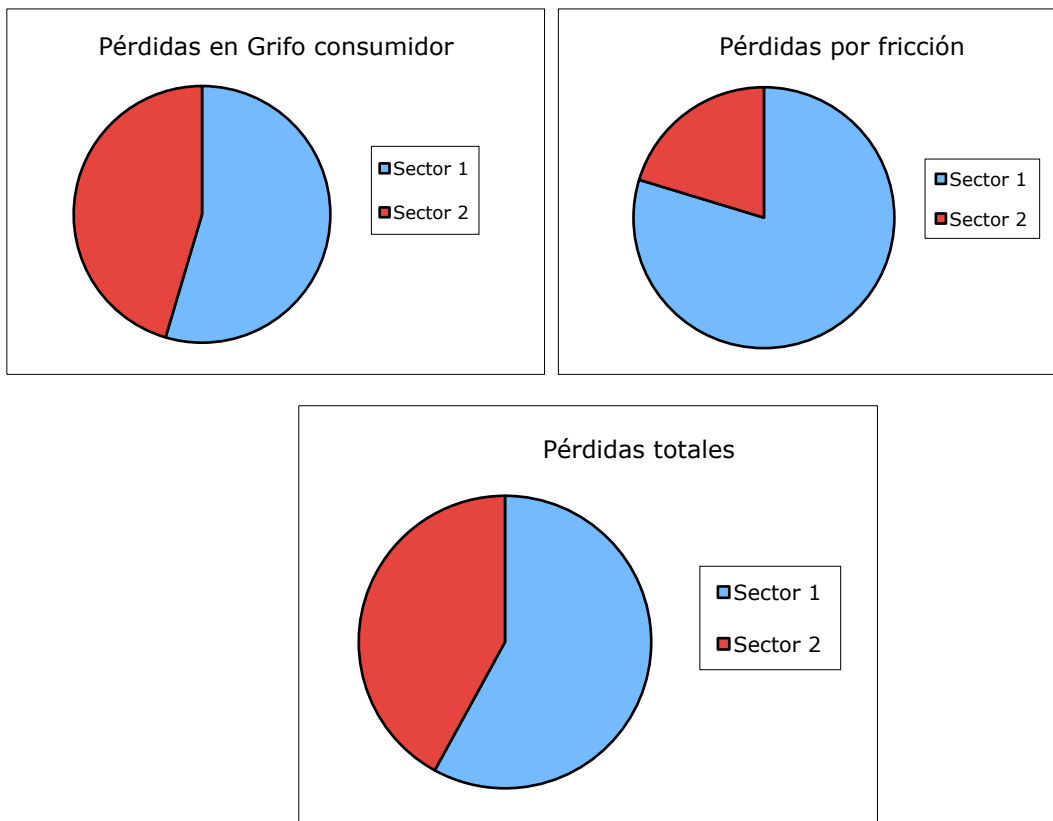


Figura 7. Energías distribuidas por sectores

De los datos obtenidos se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- La sectorización afecta levemente al primer sector, al ser el que se abastece directamente desde el embalse (depósito de cabecera), ya que el cierre de tuberías se ha realizado aguas abajo del mismo. Por ello, la eficiencia energética es prácticamente la misma antes y después de la sectorización.
- En cambio, el segundo sector si que presenta diferentes caudales y presiones con respecto al escenario actual.. De esta manera, como las presiones en el sector son menores (aunque siempre superiores al mínimo de servicio fijado), se reduce la energía entregada al usuario final aunque, en contraposición con lo anterior, las pérdidas por fricción aumentan. En cualquier caso, se puede observar, que la eficiencia energética ha aumentado a un valor del 82%.
- En cuanto al análisis de la red global, antes y después de la sectorización, se puede observar como el valor del rendimiento energético no varía pero si lo hacen los valores de la energía perdida en fricción y en el grifo del consumidor, cosa que tiene sentido. El cierre de tuberías que se produce con la sectorización obliga a la mayor circulación de caudal por ciertas tuberías, lo que conlleva un aumento directo de las pérdidas por fricción. Estas pérdidas, a su vez, producen mayores pérdidas de carga y así menor nivel de presión en el grifo del consumidor.
- Con este procedimiento de cálculo no se está buscando minimizar la eficiencia energética de toda la red, sino localizar aquellas zonas que presenten menores niveles de este parámetro.

### 2.3.2 Segundo procedimiento

Los sectores obtenidos con el primer procedimiento dependían del vértice inicial y de la condición de contorno o de parada. Es por ello que se puede asegurar que el sector obtenido engloba a aquellos nudos y líneas que consiguen un mínimo rendimiento energético según las hipótesis planteadas de partida, es decir, un sector con un rendimiento mínimo local y no global.

Para poder solucionar estas restricciones es necesario plantear un nuevo procedimiento, cuyo empleo no esté delimitado por estas condiciones de contorno. Este segundo procedimiento se apoya en el anterior, siendo un proceso más complejo y tedioso. El resultado será un sector con una menor eficiencia energética global, sin tener presente el número de nudos englobados o la longitud de tuberías, por ejemplo.

Con este procedimiento se persigue, resumiéndolo brevemente, evaluar todas las posibles combinaciones de agrupaciones (basándose en el anterior algoritmo presentado) seleccionando aquella que menor rendimiento presente sin considerar ningún factor de definición, como nudos vértices o condiciones de contorno.

Los pasos a seguir son los siguientes:



1. El primer paso es seleccionar, como vértice para empezar el algoritmo, el nudo 1. Desde este nudo se barrerá toda la red, tanto los nudos como las líneas, siguiendo la base de cálculo del primer procedimiento planteado. Con cada nuevo nudo y línea barridos, se tendrá un nuevo valor del rendimiento energético.
2. Una vez englobados todos los nudos y líneas en el algoritmo, se tomará como vértice el siguiente nudo. Estos pasos se repetirán tantas veces como nudos de consumo tenga la red.
3. Tras haber estudiado todos los vértices de inicio posible, se tendrá para cada uno de ellos una evolución del rendimiento energético en función de los nudos y líneas barridos. A continuación se puede observar como quedaría, a modo de ejemplo, esta evolución del rendimiento para tres vértices iniciales distintos:

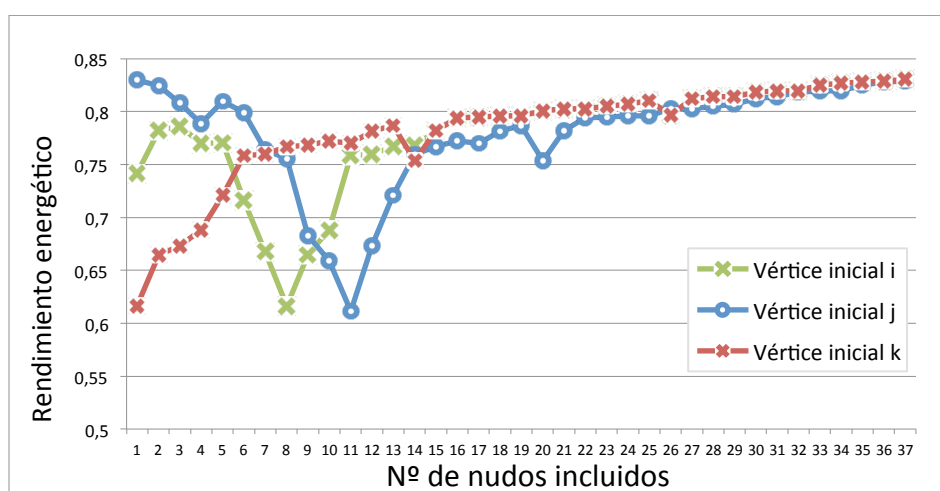


Figura 8. Evolución del rendimiento para tres nudos distintos

4. Se puede observar en la anterior gráfica como el menor rendimiento energético se consigue con el vértice inicial j, una vez se han englobado dentro de la selección del algoritmo 11 nudos y sus respectivas tuberías. Por ello, el primer sector con menor rendimiento energético deberá de estar englobando a estos 11 nudos.
5. Una vez definido un primer sector, se volverá al paso 1, con la salvedad de no tener presente las tuberías y nudos de consumo englobados en algún sector.

En el ejemplo mostrado en el anterior gráfico, se puede observar como el mínimo rendimiento se ha dado con 11 nudos, de un total de 37. Lo que significa que este sector englobará a un total del 25% de toda la red. El principal inconveniente que presenta este nuevo procedimiento es la definición de sectores demasiado pequeños, es decir, que el rendimiento energético menor se produzca con un número inferior al 10% del total de los nudos. Por ello, es importante plantear una pequeña restricción a la hora de la selección del rendimiento menor, que en ningún caso modifique los pasos a seguir. En este trabajo no se seleccionarán sectores que engloben menos del 10-15% de la longitud total de la red.

A continuación se adjunta, igual que anteriormente, el diagrama de flujo para este caso:

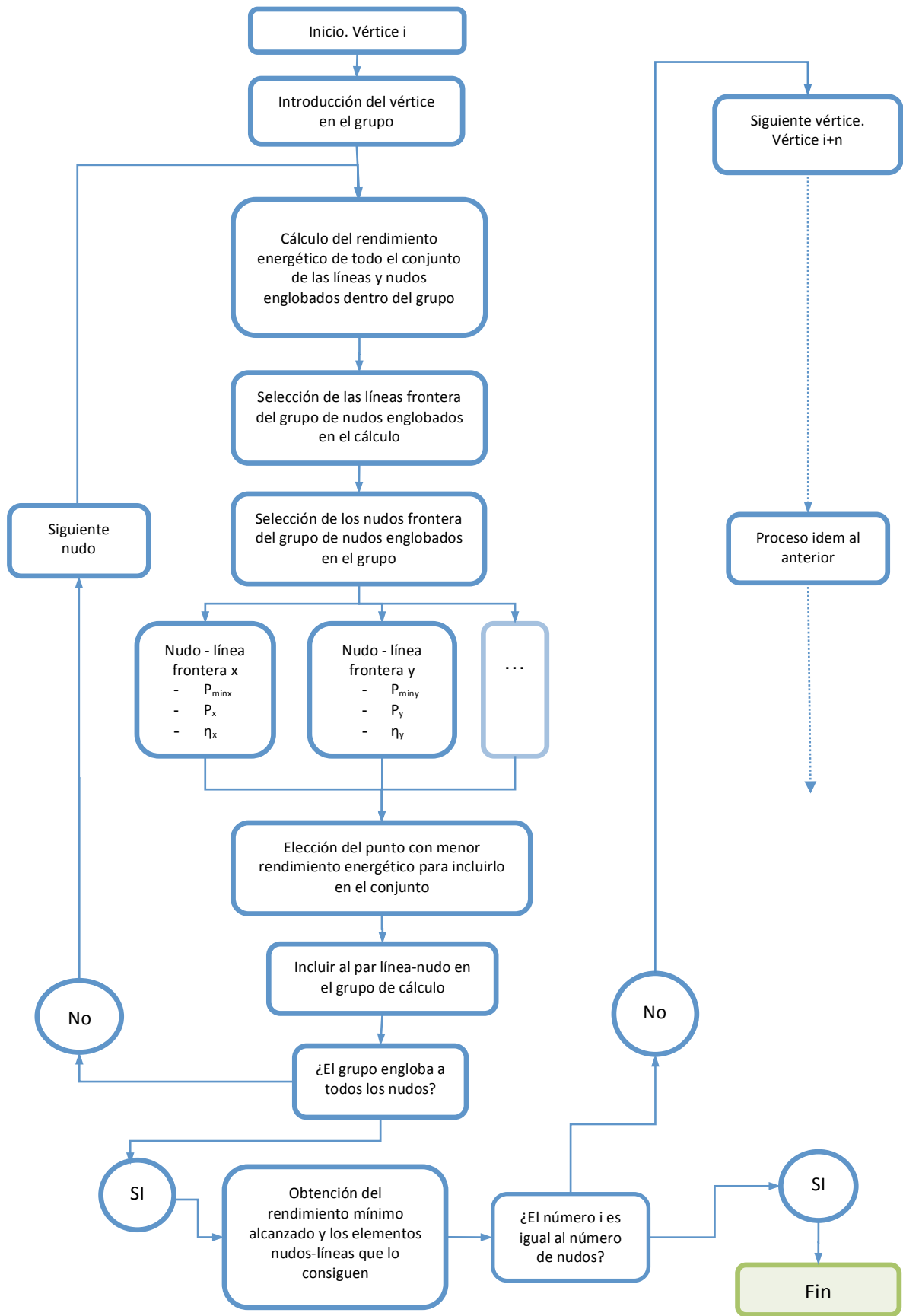
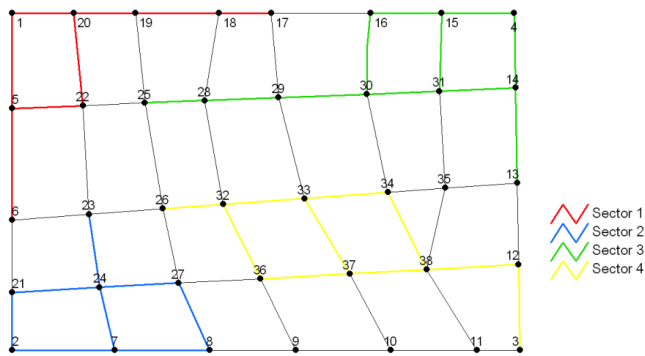


Figura 9. Diagrama de flujo a seguir en el segundo procedimiento

### 2.3.2.1 Ejemplo numérico

Para terminar con este apartado, se adjunta el siguiente ejemplo numérico para una mayor comprensión de lo explicado. Se hará uso de la red de distribución del ejemplo anterior y se dotará de una longitud mínima para cada sector del 12% del total.



Aplicando este nuevo algoritmo, se ha seleccionado un primer grupo de nudos y tuberías con un rendimiento del 57%. Este grupo será considerado a priori como el primer sector. De la red restante, el algoritmo selecciona un segundo sector, con un rendimiento del 73%. De igual manera, se seleccionan un tercer y cuarto sector con rendimientos del 78 y 81%, respectivamente.

Figura 10. Sectorización tras el segundo procedimiento de cálculo

En la siguiente tabla se muestran los nudos y tuberías que forman cada uno de los sectores definidos, donde el número de paso representa el orden de entrada de los elementos al sector:

Tabla 5. Nudos y tuberías por sectores

Nº Paso	Sector 1			Sector 2			Sector 3			Sector 4		
	ID nudo	ID línea	Rend.	ID nudo	ID línea	Rend.	ID nudo	ID línea	Rend.	ID nudo	ID línea	Rend.
1	18	0	0,00	2	0	0,00	16	0	0,00	3	0	0,00
2	19	17	0,52	7	3	0,67	15	14	0,75	12	9	0,78
3	20	19	0,53	8	4	0,70	30	58	0,76	38	41	0,80
4	1	18	0,51	21	21	0,71	31	62	0,77	34	60	0,81
5	5	1	0,52	24	45	0,73	0	31	0,77	33	35	0,81
6	6	2	0,54	0	24	0,72	4	13	0,77	32	34	0,81
7	22	22	0,56	27	49	0,73	14	11	0,77	26	33	0,81
8	0	42	0,56	0	27	0,73	0	32	0,77	36	52	0,81
9	17	16	0,57	23	44	0,73	13	12	0,78	37	56	0,81
10	0	0	0,00	0	0	0,00	29	30	0,78	0	39	0,81
11	0	0	0,00	0	0	0,00	28	29	0,78	0	40	0,81
12	0	0	0,00	0	0	0,00	25	28	0,78	0	0	0,00

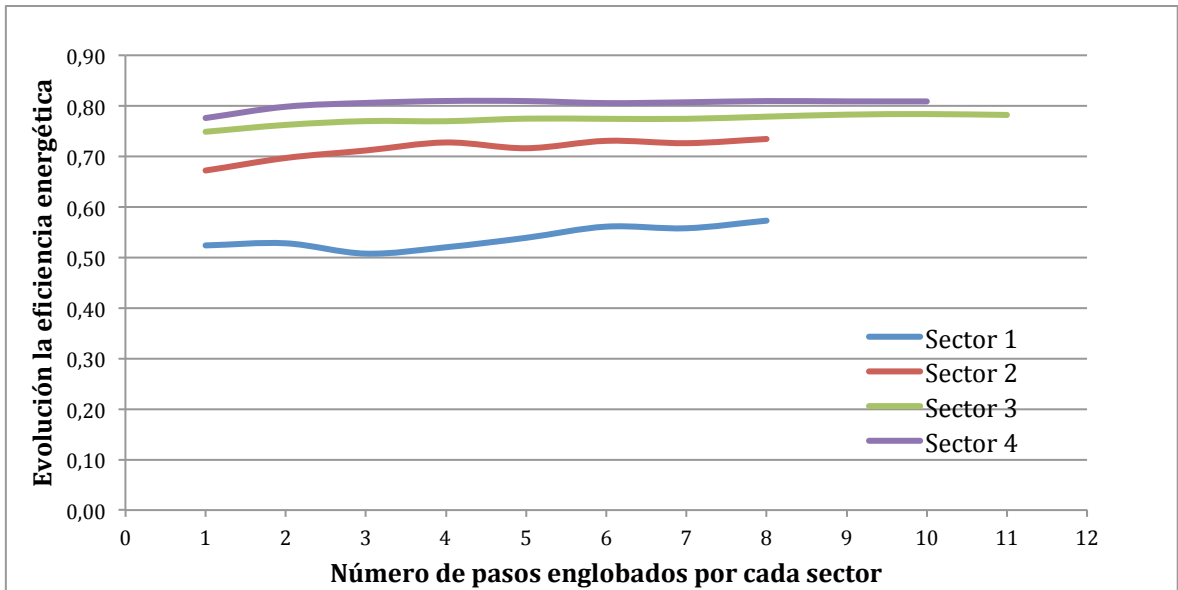


Figura 11. Evolución del rendimiento en los sectores obtenidos

Cabe destacar que los rendimientos energéticos de estos sectores están basados en el escenario actual de la red, es decir el algoritmo muestra aquellas zonas que menor rendimiento tienen de la red sin sectorizar. En el caso de que sea necesario cerrar alguna tubería, los niveles de presiones y caudales serán modificados.

La sectorización de la red tras la aplicación de este segundo algoritmo será la siguiente, indicando que las tuberías grafiadas en negro corresponden con tuberías cortadas:

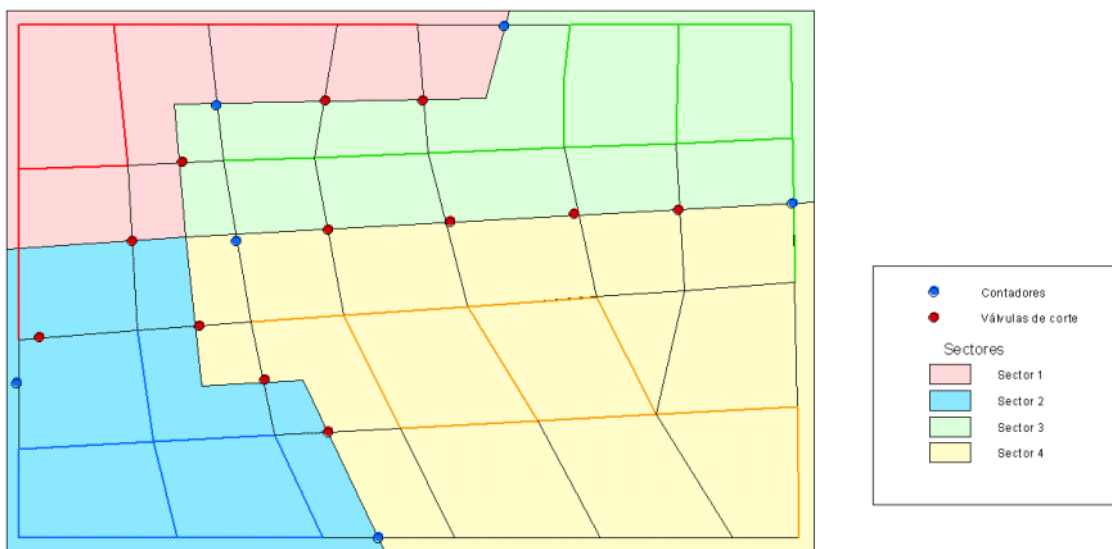


Figura 12. Sectorización resultado del segundo procedimiento de cálculo

Si se estudian ahora los diferentes valores de energías consumidas y pérdidas en las red así como el rendimiento energético para cada uno de los sectores obtenidos, estudiando estos de manera aislada como si fueran redes independientes, se obtienen los siguiente valores:

Tabla 6. Datos energéticos según Boulos

RED	Demanda (m <sup>3</sup> /día)	TOTAL ENERGÍA PERDIDA (kWh/día)				Energía por caudal unitario (kWh/m <sup>3</sup> )	Mín. energía en grifo de consumidor	Rendimiento energético (%)
		Fricción	Control	Grifo consumidor	Total			
Sector 1	2690,46	98,95		239,91	338,86	0,13	183,29	54,09
Sector 2	2705,21	39,95		223,49	263,44	0,10	184,29	69,96
Sector 3	3100,62	47,93		250,39	298,32	0,10	211,23	70,81
Sector 4	4121,69	17,06		290,29	307,35	0,07	280,79	91,36
Red sectorizada	12955,50	212,61		1023,02	1235,63	0,10	882,59	71,43
Red actual	13132,83	138,55		1114,00	1252,54	0,10	894,68	71,43

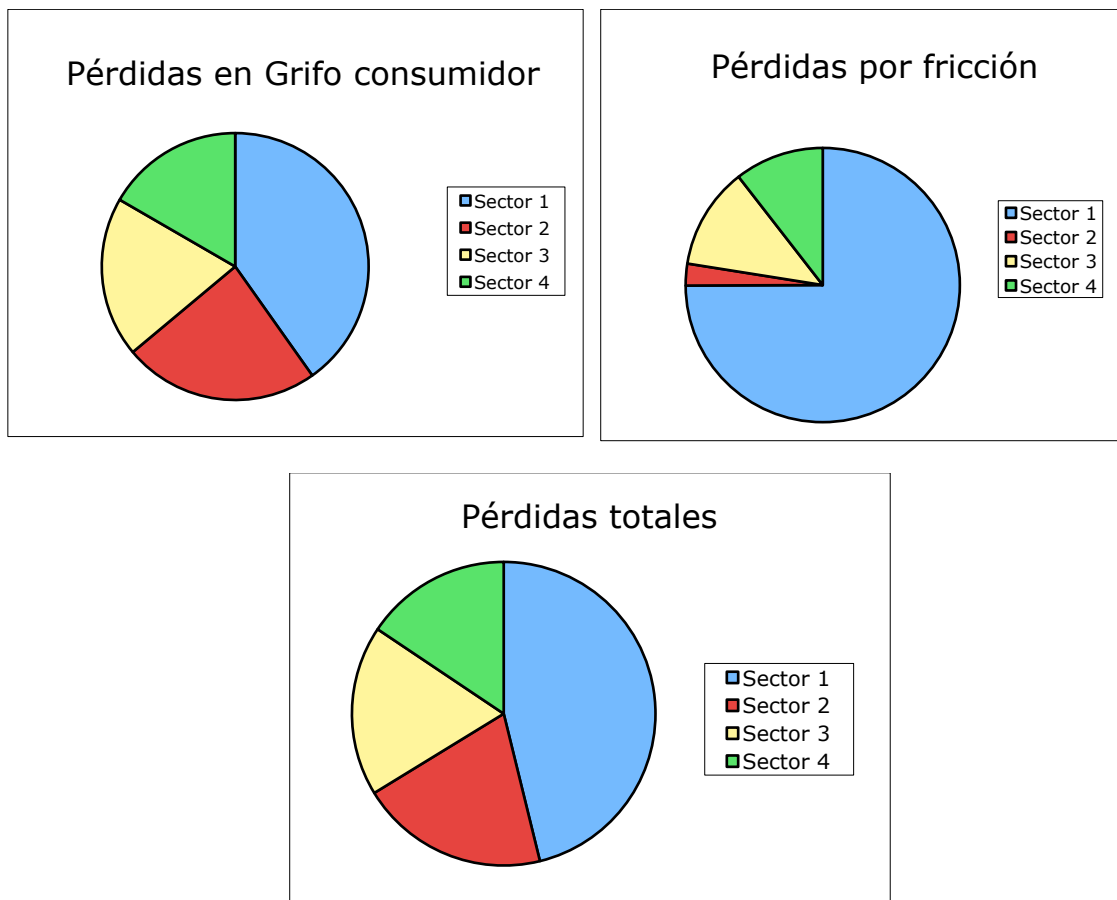


Figura 13. Energías distribuidas por sectores

El valor de los rendimientos energéticos de los cuatro sectores. Los cuatro presentan unos valores mayores a los obtenidos por el algoritmo. Esto es debido a la ejecución de la sectorización, la cual ha implicado el cierre de una serie de tuberías para aislar los sectores, y la modificación de los valores de presiones y caudales a lo largo de toda la red que ello implica. También hay que notar que el proceso de cálculo del algoritmo puede dejar ciertos nudos y líneas fuera de alguno de los sectores, por no cumplir la condición mínima impuesta de longitud. Posteriormente, estos nudos y líneas son englobados dentro de alguno de los sectores modificando su eficiencia energética.

Nuevamente, y tras el estudio de la eficiencia energética, el estudio se centrará en la modificación del caudal fugado tras la ejecución de esta sectorización. En la siguiente tabla se puede observar los diferentes volúmenes y sus variaciones respecto la situación actual:

Tabla 7. Balance de caudales

	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Red sectorizada	Red actual
Caudal suministrado (lps)	31.14	31.31	35.89	47.70	149.95	152
Caudal fugado (lps)	8.98	10.51	12.48	19.18	51.15	53.2
Caudal fugado antes de sectorizar (lps)	8.96	10.79	12.77	20.69	53.2	-
Variación caudal fugado (%)	-0.23	2.56	2.27	7.29	3.86	-
Caudal fugado mínimo (lps)	7.85	9.57	11.49	18.82	47.73	47.73
Máxima variación (%)	12.59	8.93	7.94	1.88	6.69	10.29

Tras los resultados obtenidos se destacan diversos puntos:

- Se aprecia la mejora obtenida en el volumen fugado tras la sectorización de un 3,8% frente a un 6,69% alcanzable e impuesto por la presión mínima de servicio.
- La sectorización influye positivamente en los niveles medios de presiones de todos los sectores, debido a la pérdida de fricción ocasionada el cierre de tuberías, excepto en el sector 1, por el cual se abastece la red. Esto provoca un ligero aumento, aunque despreciable, del volumen fugado en este sector.
- Se puede observar como existe relación entre la eficiencia (rendimiento) energético y la máxima variación posible a alcanzar.

## Capítulo 3.

---

Nivel económico de fugas





### 3 Nivel económico de fugas

Llegados a este punto, ya se ha definido la problemática de las pérdidas reales en los sistemas de distribución de agua potable y la importancia de la reducción de este volumen para ahorrar agua y energía. Como se ha dicho anteriormente, hay multitud de acciones encaminadas a esta reducción de las pérdidas reales, las cuales se deben ejecutar conjuntamente.

Ahora bien, el volumen fugado real supone un coste a la explotación del servicio pero también lo suponen todas las acciones encaminadas a su reducción. Por ello, es necesario conseguir un equilibrio entre el coste del control de fugas y el ahorro que supone la producción del volumen fugado que ello conlleva. Dicho punto se conoce como Nivel Económico de Fugas.

Explicaremos este concepto con la ayuda de la siguiente gráfica:

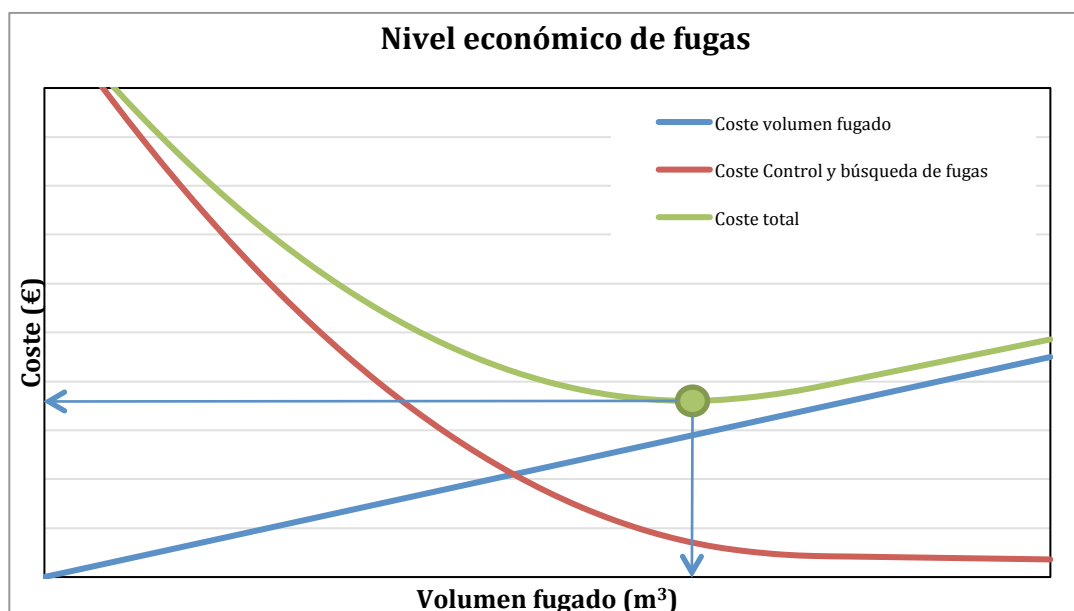


Figura 14. Nivel económico de fugas

A mayor volumen fugado, mayor es el coste de producción perdido. Cuanto mayor es el coste invertido en el control y búsqueda de fugas, menor será el volumen fugado, teniendo presente que para conseguir volúmenes fugados pequeños ese coste es muy elevado.

Es de fácil apreciación que a mayor ahorro de agua, menor es el coste de producción del agua perdida. Y a menor coste en el control y búsqueda de fugas, mayor es el volumen fugado, y por consiguiente, mayor es el coste de esta volumen.

El equilibrio económico, el punto que menor coste total implica, corresponde con el nivel económico de fugas. Dicho de otra manera, el nivel económico de fugas es *el volumen para el cual cualquier reducción supone un incremento de los gastos sobre los beneficios derivados de los ahorros* (The Chartered Institution of Water and Environmental).

Para conocer con mayor profundidad este concepto, se deberá recordar la Figura 2 en el cuál se muestran las cuatro principales acciones para una efectiva gestión de las pérdidas reales.

Recordando, las pérdidas reales o fugas están formadas por 3 componentes:

- Fugas de fondo inevitables
- Fugas no declaradas
- Fugas o roturas declaradas

Del total del volumen fugado hay una pequeña porción conocida como Umbral Mínimo de Fugas (*Unavoidable Annual Real Losses, UARL*), cuya reducción es totalmente inevitable. Lambert (Lambert y col, 1999) propuso el cálculo de este umbral, obteniendo de manera separada el correspondiente volumen originado en cada una de las partes principales de las instalaciones por cada una de las tres componentes de las fugas.

En todos los abastecimientos se encuentran con un volumen de pérdidas reales frente a un volumen mínimo de fugas inevitables, siendo la relación entre ambos volúmenes conocida como Índice de Fugas Estructural (IFE). Entre ambos niveles se encuentra el volumen de fugas económico. Hay que dejar claro que el nivel económico de fugas no se logrará en ninguna red sin la gestión de fugas con la actuación en los cuatro frentes mostrados en la figura.

El cálculo del nivel económico de fugas ha sido uno de los objetivos a conseguir por el Water Losses Task Force, debido a su dificultad e importancia. Sobre ello, Lambert y Laronde han propuesto una serie de simples metodologías a lo largo de varios estudios (destacar como principales Lambert y col, 1999; Lambert y Lalonde, 2005) para el cálculo de este nivel.

Estos autores no calculan dicho volumen manera de global, sino que calculan el nivel económico para cada uno de las tres componentes que comprenden las fugas. A continuación se muestra el proceso seguido.

### 3.1 Cálculo de los volúmenes económicos de fuga o rotura declarada y fugas de fondo

Para el cálculo del volumen económico en fugas declaradas y el volumen económico de fugas de fondo (Lambert y Lalonde, 2005) se exige que se calcule el Umbral mínimo de fugas (UMF) (Lambert y col, 1999). Este término requiere una serie de valores para los diferentes parámetros del cálculo de las componentes del UMF basados en análisis estadísticos de datos procedentes de abastecimientos reales en buen estado.

La duración media asumida para las roturas no declaradas han sido asumidas en sistemas bajo un control activo de fugas, uso del método de los flujos nocturnos al menos una vez al mes y sectorizadas.

Estos parámetros para el cálculo son:

Tabla 8. Parámetros para el cálculo de las fugas de fondo y fugas declaradas

Parte de la infraestructura	Fugas de fondo	Fugas o roturas declaradas
Tuberías	20 litros/km/h	0,124 roturas/km/año a 12 m <sup>3</sup> /h durante 3 días
Acometidas	1,25 litros/aco/h	2,25 roturas/1000 aco./año

Longitud de acometidas (Long. media 15m)	0,50 litros/aco/h	a 1,6 m <sup>3</sup> /h durante 8 días 1,5 roturas/1000 aco./año a 1,6 m <sup>3</sup> /h durante 9 días
---	-------------------	---

Todos estos valores están calculados para una presión media de 50 mca. Como cada sistema de distribución tiene un valor diferente, es más correcto mostrar la anterior tabla de datos de la siguiente manera:

Tabla 9. Parámetros para el cálculo de las fugas de fondo y fugas declaradas

Parte de la infraestructura	Fugas de fondo	Fugas o roturas declaradas	Unidades
Tuberías	9,6	5,8	Litros/km/día/ mca
Acometidas	0,6	0,04	Litros/conexión/ día/mca
Longitud de acometidas (Long. media 15m)	16	1,9	Litros/km aco./día/mca

Para fijar estos conceptos, se acompaña este apartado con un pequeño ejemplo del cálculo de los volúmenes económicos de fugas o roturas declaradas y fugas de fondo para una red compuesta por 16.000 acometidas y 603 kilómetros de tuberías. Se asumirá una relación lineal ( $N_1=1$ ) entre presión y volumen fugado:

Sistema	Red Ejemplo	Presión media (mca) =			65
Componentes de las infraestructuras		Roturas registradas Número	Volumen por rotura (50 mca) m <sup>3</sup>	Volumen por rotura (65 mca) m <sup>3</sup>	Volumen perdido anual por la roturas registradas m <sup>3</sup>
Red (km)	603	75	864	1123,2	84.240
Acometidas	16000	36	307	399,1	14.368
<b>Total</b>		<b>111</b>			<b>98.608</b>
Pérdidas por año debido a las roturas declaradas			16,88	l/con/día	0,4480 m <sup>3</sup> /km red/día

Y para las fugas de fondo:

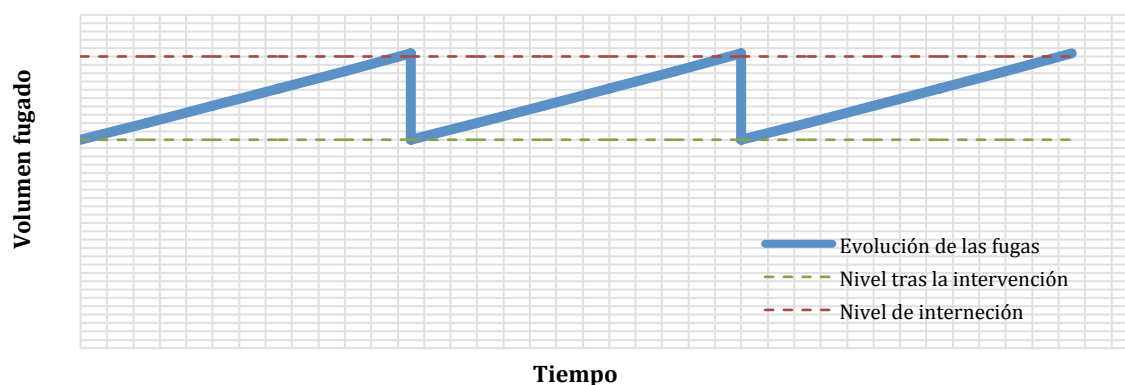
Sistema	Red Ejemplo	Presión media (mca) =			65	
Componentes de las infraestructuras		Fugas de fondo inevitables (UBL-Unavoidable background leakage)				
		lit/km/h	lit/aco/h	50 mca m <sup>3</sup> /día	65 mca m <sup>3</sup> /día	m <sup>3</sup> /año
Red (km)	603	20	-	289,44	376,27	137339,28
Acometidas	16000	-	1,25	480	624,00	227760
<b>Total</b>				<b>769,44</b>	<b>1000,27</b>	<b>365099,28</b>
Fugas de fondo inevitables		62,517	lit/aco/día	1,659	m <sup>3</sup> /km/día	

### 3.2 Cálculo del volumen económico de fugas no declaradas

Los miembros del Water Losses Task Force definen el concepto de frecuencia de intervención económica como la frecuencia a la cual el coste del control activo de fugas se iguala con el coste que supone el agua perdida (Lambert y Fantozzi, 2005).

Utilizando este concepto, se presenta una simple metodología para el cálculo del volumen económico de pérdidas reales no declaradas (Lambert y Laronde, 2005).

Toda red empieza en un tiempo 0 con un nivel de pérdidas reales no declaradas. Con el paso del tiempo, y debido a una serie de variables (roturas, falta de mantenimiento, etc.), este volumen fugado se ve incrementado a razón de una tasa de crecimiento, la cual se llamará RR.



Este volumen fugado acumulado tiene asociado un coste, CV, variable con el tiempo. Evidentemente, este coste será único para cada sistema de distribución.

El nivel de fugas seguirá creciendo hasta el momento en el que se realice una serie de acciones para reducirlo. Estas intervenciones llevan asociado un coste, CI.

El tiempo transcurrido para el cual el CI es igual al CV desde la última intervención, es llamado frecuencia de intervención económica.

De esta teoría, son las 3 variables presentadas las que utilizan los autores para el cálculo el nivel económico de fugas no declaradas:

- CI - Coste de intervención (€): Este coste consiste en la inversión realizada para la búsqueda de fugas no declaradas, no incluyendo el coste de su reparación.
- CV - Coste variable del agua (€/m<sup>3</sup>): Este coste refleja los costes de producción y tratamiento que supone el agua fugada.
- RR- Tasa de crecimiento de las fugas (m<sup>3</sup>/día·año).

Con ellos y en un sistema de distribución de agua potable en el cual se siga una política regular de Control Activa de Fugas, se podrá calcular los siguientes conceptos y finalmente el volumen económico de fugas no declaradas:

- La frecuencia óptima de intervención de búsqueda de fugas (meses):

$$FOI = \sqrt{\frac{0,789 \cdot CI}{CV \cdot RR}}$$

- Porcentaje anual de red a revisar (%):

$$RI = 100 \cdot \frac{12}{EIF}$$

- Presupuesto anual destinado a intervenciones de búsqueda, sin tener presente las reparaciones (€/año):

$$CAI = EP \cdot CI$$

- Nivel económico de fugas no declaradas (m<sup>3</sup>):

$$VAAIP = \frac{ABI}{CV}$$

siendo el coste de CI expresado en euros, el coste variable del agua en €/m<sup>3</sup> y la tasa de crecimiento expresada en m<sup>3</sup>/día·año.

Se finalizará entonces, con una ejemplo numérico del cálculo de este último volumen económico procedente de las fugas no declaradas. Para ello, se seguirá con la red de los dos ejemplos anteriores, teniendo un:

Tabla 10. Cálculo del volumen económico de fugas no declaradas

RR	0,0205	m <sup>3</sup> /con/día/año	EIF (FOI)	9,353	meses
	328	m <sup>3</sup> /día/año	EP (RI)	128,306	%
CI	0,25	€/conexión	ABI (CAI)	5.132,23	€/año
	4000	€	<b>EURL</b>	<b>46.656,62</b>	<b>m<sup>3</sup>/año</b>
CV	0,11	€/m <sup>3</sup>	or		
CI/CV	2,27	m <sup>3</sup> /conexión	<b>EURL</b>	<b>2,916</b>	<b>m<sup>3</sup>/cone/año</b>

De forma gráfica:

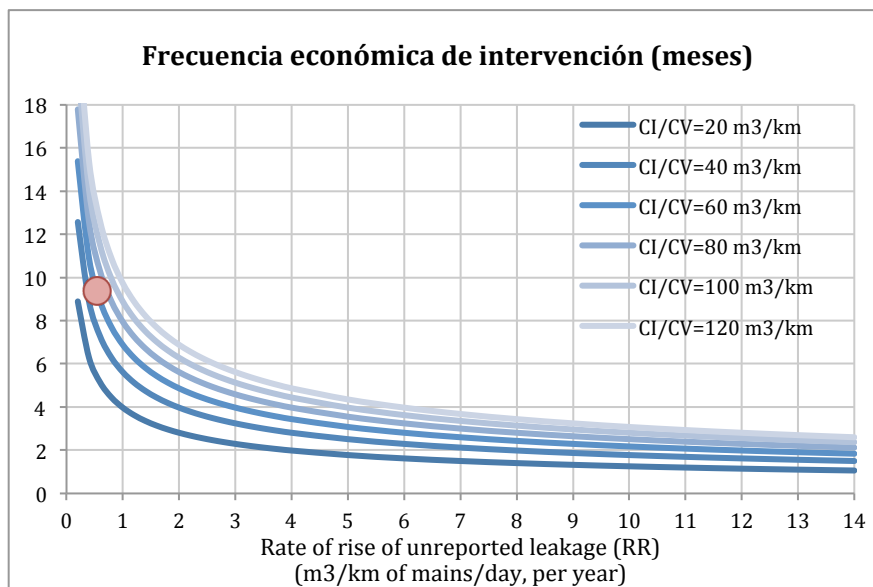


Figura 15. Frecuencia óptima de intervención

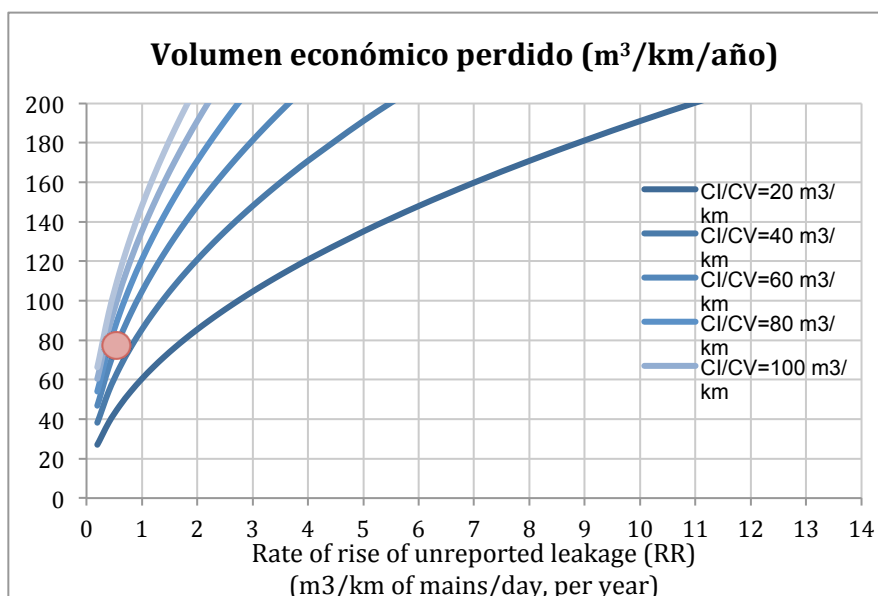


Figura 16. Volumen económico perdido

Y como suma de los tres volúmenes calculados a lo largo de este punto:

Tabla 11. Cálculo del nivel económico de fugas

Sistema	Red Ejemplo	Presión media (mca) =			65	
Factor de fugas de fondo inevitables - UBLM=		1,1				
Componentes de las infraestructuras		Fugas declaradas	Fugas de fondo		Fugas no declaradas	Nivel económico de fugas
		m <sup>3</sup> /año	Inevitables m <sup>3</sup> /año	Adicional m <sup>3</sup> /año	m <sup>3</sup> /año	m <sup>3</sup> /año
Red (km)	603	84.315,00	137.339,28	13.733,93	46.656,62	546.948,43
Acometidas	16000	14.367,60	227.760,00	22.776,00		
<b>Total</b>		<b>98.682,60</b>	<b>365.099,28</b>	<b>36.509,93</b>	<b>46.656,62</b>	<b>546.948,43</b>
Total	93,66 l/aco/día		2,49 m <sup>3</sup> /km/día			

reales para la red de distribución a estudiar. Además, se han obtenido parámetros interesantes a la hora de estudiar la técnica de la sectorización, como es el caso del porcentaje anual de red a revisar ya que se puede usar como criterio de diseño o de evaluación a la hora de la planificación dicha técnica.





# Capítulo 04.

---

Caso de estudio



## 4 Caso de estudio

A lo largo de la primera parte del presente trabajo se describe la metodología que permite cuantificar la influencia de la energía en la sectorización de una red cualquiera. En esta segunda y última parte se van a plasmar todos estos conceptos en una red urbana real de distribución de agua potable.

La red elegida ha sido la del municipio de Requena, la cual está siendo gestionada en la actualidad por el Grupo Aguas de Valencia.

Son numerosas las razones por las que se ha elegido dicha red en el estudio. De entre ellas, su complejidad, la ausencia de sectorización y las características de su abastecimiento (por gravedad y gracias a depósitos de cabecera) son las más relevantes. .

Todos los análisis realizados se han hecho para el año 2009, ya que se disponía de todos los datos de ese periodo al comienzo del estudio.

Seguidamente se describen con los cálculos realizados.

### 4.1 Antecedentes

#### 4.1.1 situación y emplazamiento de la zona de estudio

Requena es un municipio de la Comunidad Valenciana situado en la parte oriental de la comarca de Requena-Utiel. Su término municipal se extiende por una gran parte de la cuenca superior del río Magro y es, por extensión, el mayor término de la Comunidad Valenciana.



Está ubicada entre la meseta castellano-manchega y el Mediterráneo del que tan solo la separan 67 Km. Se encuentra situada en la zona más occidental de la provincia de Valencia, donde el Río Cabriel la limita por el Oeste y el Sur con profundas gargantas; por el Este y Norte, la Sierra de Juan Navarro y el Pico del Tejo (1.250 m.) la separan de las serranías del Turia.

Sus límites municipales son los siguientes: por el norte se encuentran los municipios de Chelva, Utiel y Loriguilla; por el este Chera, Siete Aguas, Buñol y Yátova; por el sur Cortes de Pallás, Cofrentes, Balsa de Ves, Casas de Ves, Villatoya, Alborea y Casas Ibáñez (los últimos cinco municipios pertenecen a la provincia de Albacete); por el oeste linda con Venta del Moro y Caudete de las Fuentes.

El municipio de Requena tiene una extensión de aproximadamente 816 Km<sup>2</sup>. Morfológicamente se trata de una gran superficie con forma regular y redondeada, en el que se distribuyen un total de 25 pedanías, alguna de las cuales dista más de 25 Km. de la ciudad de Requena.

## 4.2 Descripción de las instalaciones

El sistema de distribución de agua potable en el municipio de Requena consiste en un sistema complejo cuya única fuente de suministro es el agua subterránea.

El municipio de Requena está formado por el casco urbano y por 25 pedanías, algunas de las cuales dista más de 25 km de la ciudad de Requena. Es por ello que el sistema de distribución queda dividido en tres grandes esquemas de funcionamiento, independientes entre sí, y que son los siguientes:

- La red de abastecimiento del casco urbano y las pedanías de la vega.
- La red de distribución conocido como "Sistema la portera y pedanías".
- La red de abastecimiento "Los isidros".

Debido a que el objeto de este trabajo consiste en el estudio de la técnica de la sectorización, tan solo se considera el casco urbano. La sectorización a realizar en las pedanías no tiene mayor sentido debido a su reducido tamaño, constituyendo cada una un sector en sí independiente del resto.

El primer sistema, el principal y con mayor complejidad, se encarga de abastecer al casco urbano, algunas pedanías y al polígono industrial. Este sistema se abastece principalmente gracias a la captación pozo Cañada-Palletes, situado en la zona más alta del término municipal.

Desde el pozo Cañada-Palletes se abastece, en situaciones normales, al depósito principal, Cañada-Palletes. Una vez llega el agua a este depósito, se abastece a toda la red y demás depósitos, tanto del casco urbano como polígonos industriales y urbanizaciones.

La mayor parte del suministro se realiza por gravedad, salvo en algunas urbanizaciones cuya cota obliga a la utilización de grupos de bombeo para el suministro de depósitos de cabecera.

El sistema de distribución al casco urbano está formado por tres pozos de suministro (uno de ellos de emergencia), cinco depósitos, con una capacidad total de 6.000 m<sup>3</sup> y cuatro pequeños grupos de bombeo para el suministro de algunas pedanías.

A continuación se adjunta un esquema simplificado donde se puede ver el funcionamiento de la red:

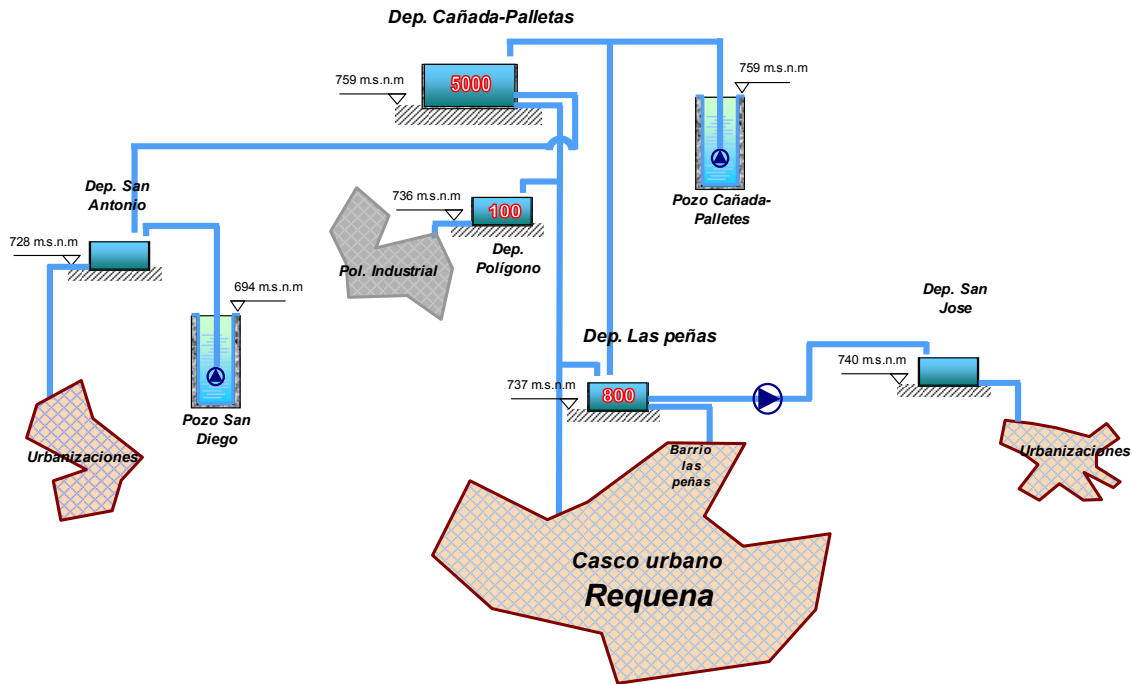


Figura 17. Esquema de funcionamiento de la red de distribución del casco urbano y pedanías de la Vega

#### 4.2.1 Red de suministro de agua potable

En lo que es la red de suministro propiamente dicha se aprecia una clara diferenciación entre las principales arterias y las tuberías de distribución. La red arterial está formada por las tuberías de mayor diámetro (superiores a 200 mm) encargadas de realizar la función de transporte desde los depósitos (o entre ellos) a las distintas zonas del municipio.

Por otro lado, la red de distribución están conformada por las tuberías de menor diámetro (200 mm o inferiores) encargadas de efectuar el reparto del agua a los diferentes abonados a través de las acometidas. La red arterial es fundamentalmente de tipo ramificada, sin embargo, la red de distribución es de tipo mixto, es decir, ramificada-mallada.

En la siguiente imagen se muestra grafiado en rojo la red arterial de suministro, mientras que en azul se observa la red de distribución. Se observa con gran facilidad el cumplimiento ramificado o mallado de ambas redes.

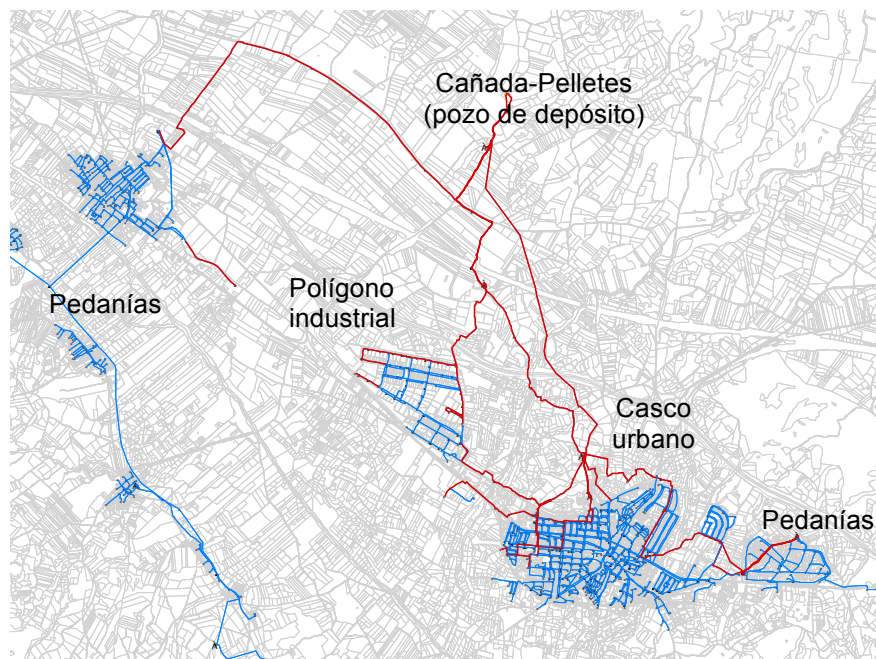


Figura 18. Red arterial y de distribución

El material con mayor presencia en la red de distribución del casco urbano y del polígono industrial, tanto arterial como de distribución y dejando fuera las urbanizaciones y pedanías, es el polietileno con un 61% seguido por el fibrocemento con un 38%, quedando tramos insignificantes de hierro galvanizado y pvc.

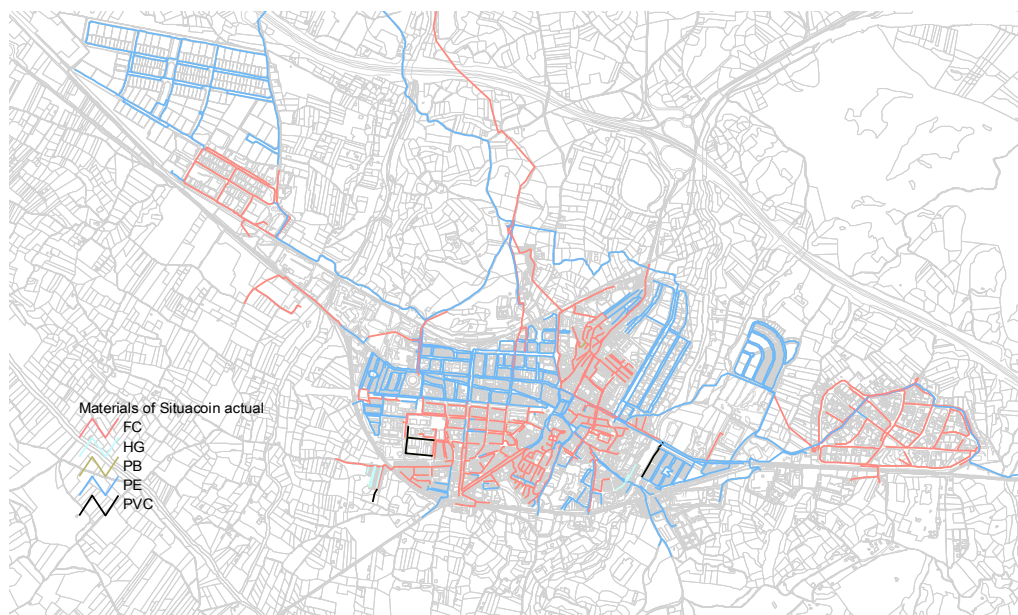


Figura 19. Red de tuberías clasificadas por materiales

La red arterial y de distribución está compuesta por tuberías de diversos diámetros cuya distribución por calibre, material y longitud se adjunta en la siguiente tabla Tabla 12 de manera resumida, así como el porcentaje que representan:

Tabla 12. Distribución del parque de tuberías por materiales y diámetros

Diámetro	Material				Total
	Firrocemento (FC)	Hierro Galvanizado (HG)	Polietileno (PE)	PVC	Total
FC 50	6270				6270
FC 60	9383				9383
FC 70	777				777
FC 80	8021				8021
FC 100	1090				1090
FC 150	2170				2170
FC 200	3346				3346
PE 50			755		755
PE 63			1072		1072
PE 90			10387		10387
PE 110			17480		17480
PE 125			1332		1332
PE 140			381		381
PE 160			7079		7079
PE 200			7073		7073
PE 250			3474		3474
FC 125	305				305
FC 250	1278				1278
FC 300	4359				4359
PE 32			370		370
PE 75			1139		1139
PE 315			6433		6433
PE 400			2145		2145
HG 40		369			369
HG 50		216			216
PVC 30				36	36
Total	37000	585	59120	36	96741

Y de forma gráfica:

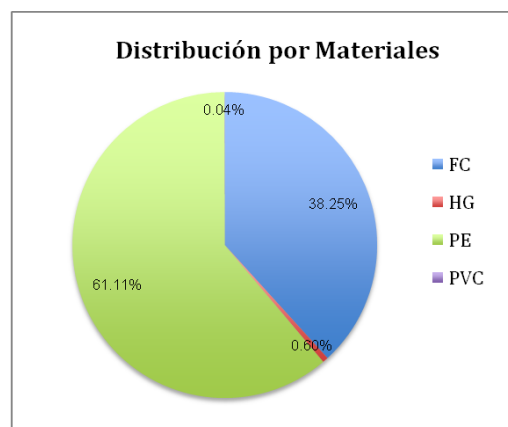


Figura 20. Distribución de las tuberías por materiales

#### 4.2.2 Perfiles del terreno

Para terminar de completar la definición de la red de distribución, a continuación se muestran mediante gráficos los perfiles longitudinales de las principales tuberías de distribución, es decir,

aquellas que van desde los puntos de captación de agua, hasta los diferentes depósitos de regulación del sistema:

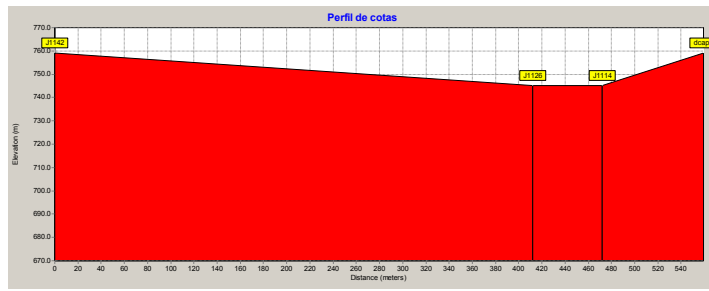


Figura 21. Perfil longitudinal de tubería de pozo Cañada-Palletes a depósito Cañada-Palletes

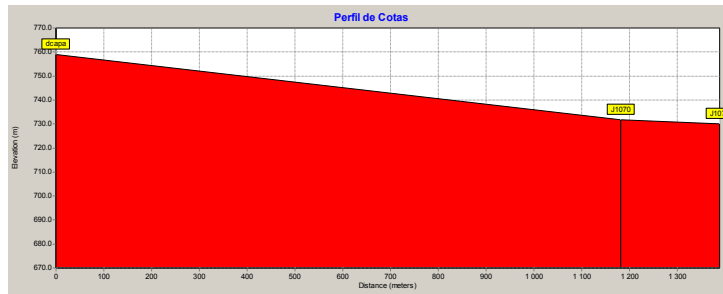


Figura 22. Perfil longitudinal de tubería de depósito Cañada-Palletes a depósito polígono

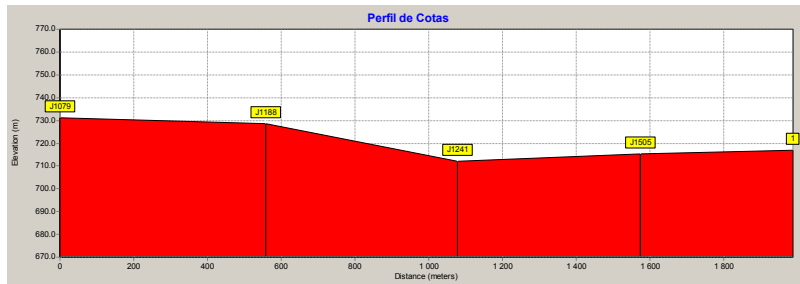


Figura 23. Perfil longitudinal de tubería de depósito Polígono a depósito las Peñas

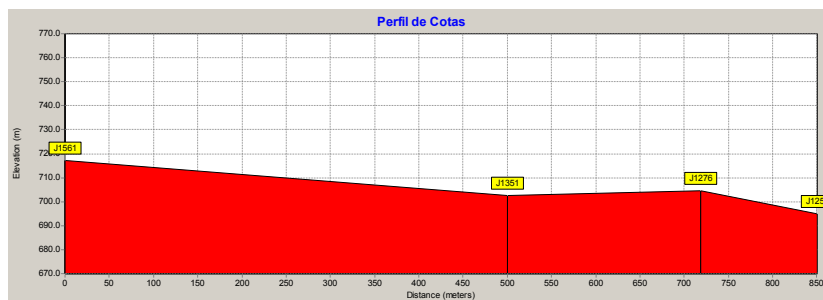


Figura 24. Perfil longitudinal de tubería de depósito Las Peñas a red arterial casco urbano

### 4.3 Análisis de la demanda

Los consumos de agua para un sistema de distribución juegan un papel fundamental a la hora de determinar el comportamiento del sistema.



Los datos del consumo se han obtenido de las lecturas que se han realizado por la empresa gestora a todo el parque de contadores con periodicidad trimestral.

Con respecto a los consumos registrados, para su determinación se parte generalmente de las facturaciones de los abonados. Sin embargo, hay que indicar que para que el consumo facturado se pueda considerar como un consumo registrado, la facturación debe estar basada en dos lecturas consecutivas del contador del abonado.

#### 4.3.1 Volumen de agua consumida

El volumen de agua consumido se obtiene a partir de la información proporcionada por la facturación, consumo de los abonados, y de la lectura del resto de contadores de uso público:

- Abonados públicos o privados que carecen de contador, tales como bocas de riego
- Posibles tomas ilegales
- Subregistros de contadores
- Contadores parados o mal instalados

El volumen de agua consumido durante el año 2009 en el abastecimiento de Requena fue de 1.191.595 m<sup>3</sup>, incluido el volumen municipal.

A partir de estos datos puede determinarse la dotación del volumen de agua consumida:

Tabla 13. dotación del volumen de agua consumida

Registrada 2009	1.191.595 m <sup>3</sup>
Nº Abonados 2009	13.728
Dotación (l/abonado/día)	237,81
Habitantes 2009	21.278
Dotación (l/hab/día)	153,43

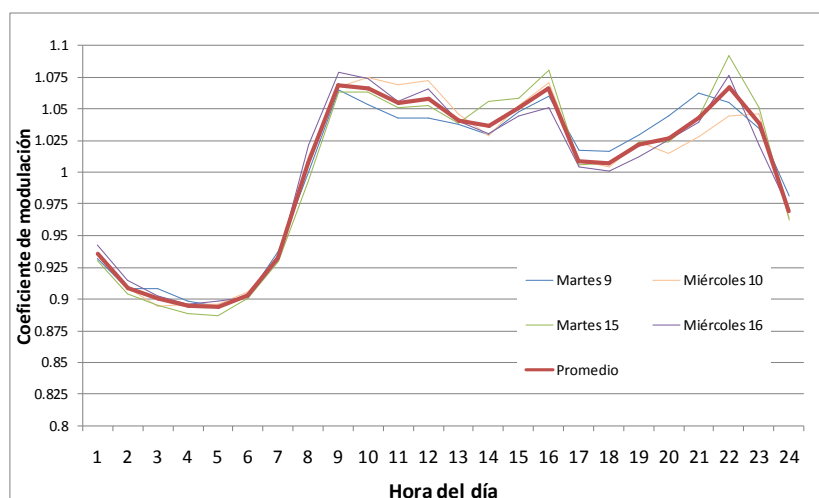
#### 4.3.2 Modulación de la demanda diaria

Para el cálculo de la modulación diaria de la demanda inyectada se han empleado los datos facilitados por la empresa del contador general instalado en la tubería de entrada al casco urbano.

El caudal inyectado, y debido a que aguas debajo del citado contador no se suministra ningún depósito de almacenamiento, se supondrá tendrá un comportamiento igual al del consumo.

Para el cálculo se han elegido cuatro días, dos consecutivos de dos semanas consecutivas, de un mes de comportamiento de consumo medio. Tras relativizar estos caudales al valor medio, se obtiene de manera directa el comportamiento de este caudal registrado.

Figura 25. Modulaci3n diaria de la demanda



En la anterior gr3fica se puede observar como el m3ximo se da a las 8:00, con un coeficiente de 1,065, siendo las horas de menor caudal las nocturnas con coeficientes de 0.883.

#### 4.4 Volumen de agua producida

El volumen de agua inyectada a la red se obtiene a partir de la lectura de los contadores instalados a la salida de los pozos.

Del mismo modo que se ha hecho con la demanda se puede obtener una dotaci3n diaria de volumen de producci3n:

Tabla 14. dotaci3n diaria de volumen de producci3n

Producci3n 2009	2.131.473 m <sup>3</sup>
Nº Abonados 2009	13.728
Dotaci3n (l/abonado/d3a)	425,38
Habitantes 2009	21.278
Dotaci3n (l/hab/d3a)	274,45

##### 4.4.1 Estacionalidad de la producci3n

El consumo de cualquier abastecimiento var3a de unos meses del a3o a otro, tal como se desprende de las estad3sticas de inyecci3n de agua potable a la red del municipio de Requena. Con el fin de conocer con exactitud esta evoluci3n mensual del consumo, se ha realizado una representaci3n de los datos de agua inyectada, facilitados por la empresa gestora del abastecimiento.

A continuaci3n se presenta tanto la tabla como la gr3fica del resumen mensual del volumen de agua inyectado a todo el municipio:

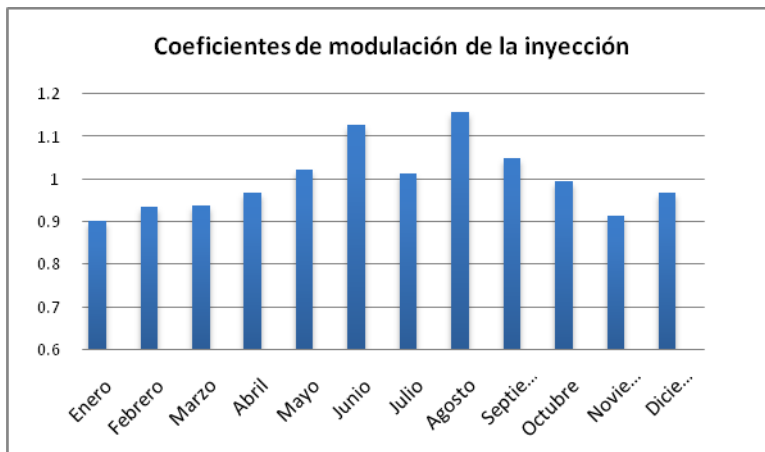
Tabla 15. Volúmenes mensuales inyectados a la red de distribución

Producción Requena	Año 2009	
	m <sup>3</sup> /mes	m <sup>3</sup> /día
Enero	163.250	5.266
Febrero	152.880	5.460
Marzo	169.710	5.475
Abril	169.720	5.657
Mayo	185.050	5.969
Junio	197.640	6.588
Julio	183.600	5.923
Agosto	209.720	6.765
Septiembre	184.060	6.135
Octubre	180.380	5.819
Noviembre	160.240	5.341
Diciembre	175.223	5.652
<b>TOTAL</b>	<b>2.131.473</b>	<b>70.051</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>177.623</b>	<b>5.838</b>

Como bien se puede imaginar, el consumo total de la red de abastecimiento se verá fuertemente influenciado por la época del año más calurosa, siendo en la época invernal los consumos inferiores a la época estival.

Para el periodo de estudio, se puede observar como el mes de máximo consumo coincide con Agosto, con un volumen suministrado medio total de 6.765 m<sup>3</sup>/día, y Febrero como mes de menor consumo, con un suministro medio de 5.460 m<sup>3</sup>/día.

Tabla 16. Coeficientes de modulación del caudal suministrado



Enero	0,902	Julio	1,015
Febrero	0,935	Agosto	1,159
Marzo	0,938	Septiembre	1,051
Abril	0,969	Octubre	0,997
Mayo	1,023	Noviembre	0,915
Junio	1,129	Diciembre	0,968

## 4.5 Balance hídrico

Uno de los ratios más utilizados entre los indicadores de la eficiencia de un sistema es el rendimiento volumétrico. El rendimiento de una red, o de un sector, se define como la relación entre el volumen de agua registrado y el volumen total aportado en un mismo período de

referencia. La diferencia entre ambos volúmenes se debe a diferentes factores, entre los que cabe destacar los siguientes:

- Ausencia de contadores
- Tomas ilegales o fraudes
- Errores en la medición de los contadores, o subcontajes
- Pérdidas de agua por fugas o defectos en la red

Este balance se suele plantear tan solo para el global de la red, pero debe realizarse para el máximo de subsistemas que se puedan definir en el propio sistema, lo cual requiere una infraestructura de medidores adecuada. En el caso del Municipio de Requena, se calculará el rendimiento para la totalidad de la red.

Para la obtención del rendimiento que conforma la red de distribución del casco urbano objeto de estudio se tomarán los siguientes volúmenes de cálculo:

- Volumen de agua inyectada: Volumen tomado de la lectura de los contadores de entrada durante el año 2009:
- Volumen de agua consumido: Volumen de agua registrado en Requena correspondiente al mismo periodo en el que se obtuvo la producción, es decir, el año 2009. A este consumo hay que añadir el consumo municipal correspondiente a parques, instalaciones, etc.

Tabla 17. Rendimiento hidráulico en el municipio

<b>Rendimiento Municipio - 2009</b>	
Volumen registrado	1.191.595 m <sup>3</sup>
Volumen producido	2.131.473 m <sup>3</sup>
Volumen municipal	74.483 m <sup>3</sup>
<b>Rendimiento</b>	<b>55,90 %</b>

El valor de rendimiento hidráulico obtenido es aproximadamente del 56%, incluyendo el caudal de agua no facturada. Este rendimiento se considera medianamente aceptable para una red de abastecimiento de agua potable.

#### 4.6 Elaboración del modelo matemático

En los anteriores apartados se han descrito las instalaciones de la red y se han llevado a cabo el análisis de la producción y de la demanda. Con esta información se ha podido elaborar el modelo matemático de simulación para posteriormente analizar la red actual y las posteriores sectorizaciones planteadas con el uso de Epanet 2.0.12. Todo ello se adjunta en los anejos 1 y 2.

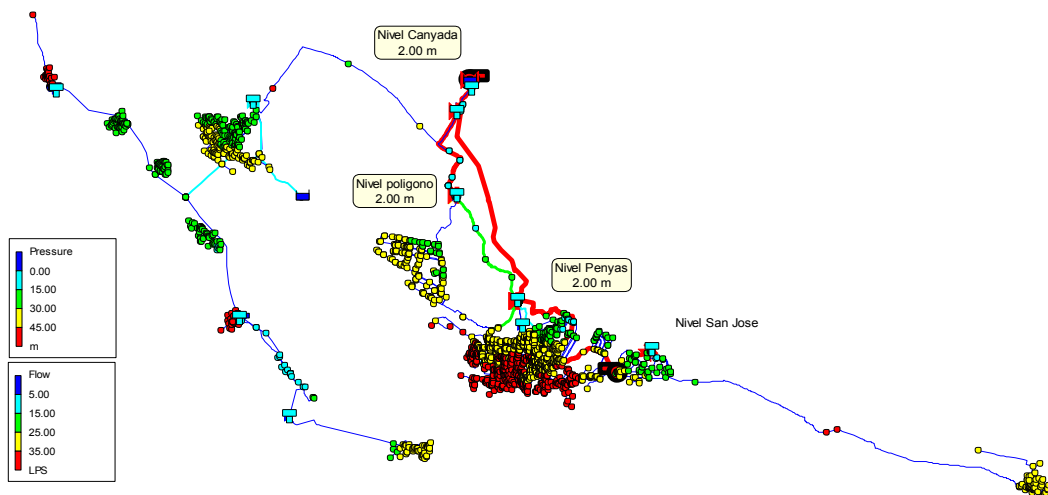


Figura 26. Modelo matemático de la red de Requena

## 4.7 Estudio detallado de las sectorizaciones planteadas

En este apartado se van a describir las características de una serie de posibles sectorizaciones diferentes de la red del casco urbano de Requena. Este desarrollo irá acompañado con el análisis hidráulico realizado a cada uno de los escenarios planteados.

Con la simulación del modelo matemático de la red sectorizada y correspondiente a la demanda del día de consumo medio se pueden observar los valores de las principales variables hidráulicas.

Con todo lo que precede, a continuación se va a abordar el problema de la definición de la sectorización de la red de distribución del casco urbano de Requena. Para este contexto se han seguido varios criterios de diseño, recordando que esta técnica es un proceso cuya definición no tiene solución única, estudiando para cada uno de ellos los resultados obtenidos y posterior comparativa.

Para comprobar el funcionamiento hidráulico de las soluciones planteadas se utiliza un software de simulación hidráulico, en este caso Epanet. El modelo de la red permite conocer la nueva configuración de la red sectorizada, analizar la influencia de cada sectorización en la calidad del servicio y obtener los valores de las principales variables hidráulicas.

Este análisis hidráulico de cada uno de los sectores irá acompañado del estudio energético y económico de fugas presentado en los capítulos 2 y 3.

En total se van a estudiar a lo largo de este punto un total de 4 posibles sectorizaciones, que a continuación se describen.

### 4.7.1 Criterios adoptados en el diseño de las sectorizaciones

Los principales criterios que se han considerado a la hora de acometer las diferentes sectorizaciones de la red del casco urbano de Requena son:

- Sectorización 1. Según cota: La orografía del terreno de la red ha permitido dividir esta en varios estratos de presión de tal forma que se consigan unos niveles, dentro de cada sector, lo más homogéneos posibles. De esta manera se han definido un total de 7 sectores.
- Sectorización 2. Según Material: Frente a las fugas cada material presenta un comportamiento diferente, viéndose mermado de manera distinta las características mecánicas de cada tipo con la edad. Por ello, se ha decidido que la segunda sectorización quede influenciada por el parque de tuberías, destacando su material, teniendo un total de cinco sectores.
- Sectorización 3. Según el primer procedimiento de optimización energética: La tercera de las sectorizaciones se ha definido según el algoritmo de optimización energética planteado en el apartado 0, imponiendo como condición de corte una longitud mínima englobada en cada sector y unos vértices de sector, resultando así un total de seis sectores.
- Sectorización 4. Según el 2º procedimiento de optimización energética: La última sectorización se ha definido según el segundo procedimiento de optimización energética planteado en el apartado 2.3.2. La única condición a cumplir por parte de los sectores ha sido la de englobar un mínimo del 10-15% de la longitud total de la red, evitanso así sectores demasiado pequeños.

Además de estos criterios particulares se ha tenido presente también los siguientes criterios de manera global:

- Se ha intentado dotar a cada sector de un único punto de alimentación o, en el caso de que hidráulicamente no fuera posible, del mínimo número de tuberías de entrada. El hecho de definir un único punto de alimentación para cada sector, presenta dos ventajas fundamentales:
  - Aumentar y favorecer el control dentro del sector, ya que sólo es necesario medir en un punto para controlar el volumen de entrada al sector
  - Se requiere menor inversión en elementos de medida.
- Se ha perseguido una presión mínima de 25 m.c.a. en todos los nudos, indicada como presión mínima de servicio.
- Como se observa en el anejo 2, hay ciertas tuberías que se comportan como cuellos de botella. Debido a las pérdidas que están introduciendo en el sistema, se ha considerado, para el escenario futuro su renovación por tuberías de mayor calibre anterior a la ejecución de la sectorización.



## 4.7.2 Características de las sectorizaciones planteadas

A continuación, se citarán las características principales de las sectorizaciones planteadas así como sus descripciones.

### 4.7.2.1 Sectorización 1: Según Cota

El objetivo de esta propuesta es homogenizar el nivel de presiones dentro de cada uno de los sectores. Para ello se divide la red en varias zonas de igual presión según la cota geográfica del terreno.

Como inconveniente, a mayor número de sectores se obtienen mejores resultados, por lo que se debe alcanzar una solución de compromiso, esto es, como la inversión en medidores y en válvulas de corte es notable, se busca obtener un mayor beneficio en la gestión y operación del sistema con un menor número de elementos instalados adicionales.

En la Figura 27 se puede observar una vista global de la red sectorizada según este criterio de cota:

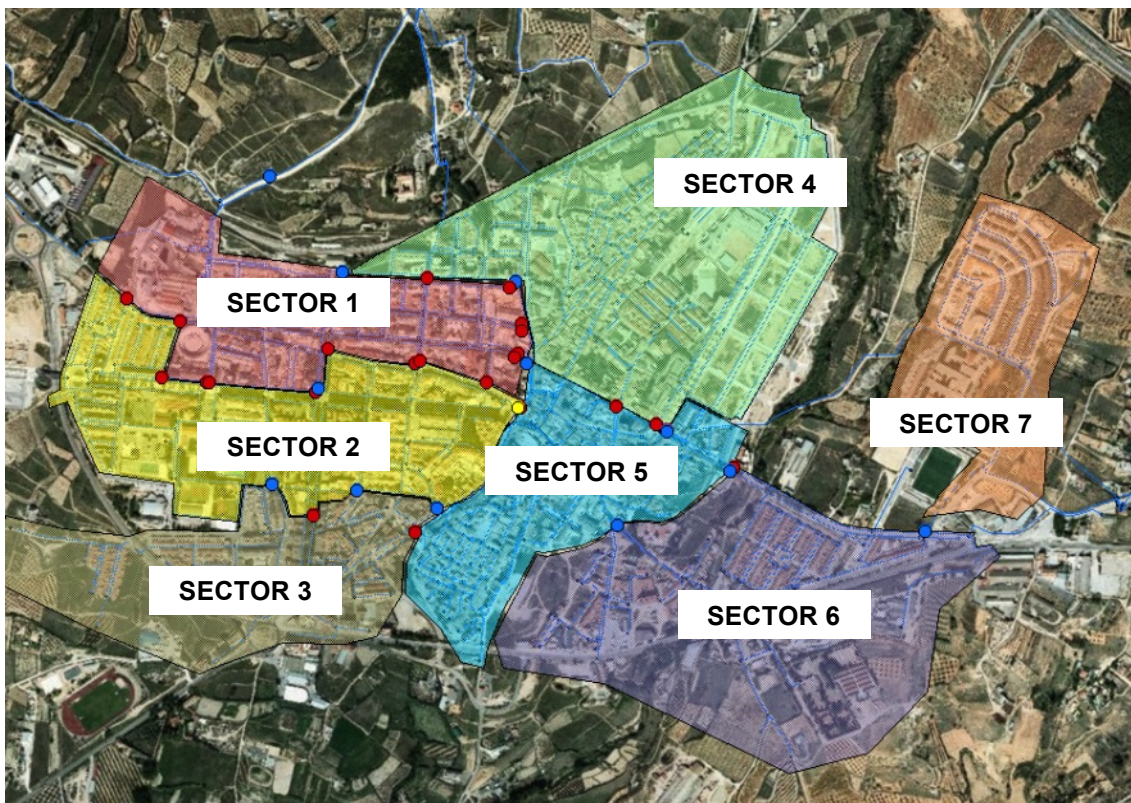


Figura 27. Sectorización planteada según la cota del terreno

En esta se han definido un total de siete sectores para los cuales se requieren un total de once caudalímetros, representados en azul, y veinticuatro válvulas de corte, representadas en rojo, instalados en las tuberías mostradas en la Tabla 18.

Tabla 18. Relación caudalímetros y válvulas de corte en la sectorización según la cota

Tubería	Contador	Válvula cerrada	Tubería	Contador	Válvula cerrada
FC 100	1		PE 110	2	11
FC 50		1	PE 160	1	5
FC 60	1	4	PE 200	2	2
FC 70		1	PE 315	1	
FC 80	1		PE 90	2	

Tras ser vista la sectorización de forma global, se va a entrar en detalle de cada uno de los sectores establecidos en este método.

Sector 1: El sector 1 se encuentra ubicado en el noroeste del casco urbano. Es limítrofe de los sectores 2, 4 y 5, englobando una superficie total de 21,8 Ha. Presenta un único punto de entrada, la tubería de polietileno de 200 mm de diámetro procedente del depósito principal cañada-palletes, donde se deberán de instalar un caudalímetro con emisor de pulsos. Para aislar el sector se deberán de cerrar un total de 15 válvulas frontera. Este sector tiene tres salidas, hacia los sectores 2, 4 y 5.

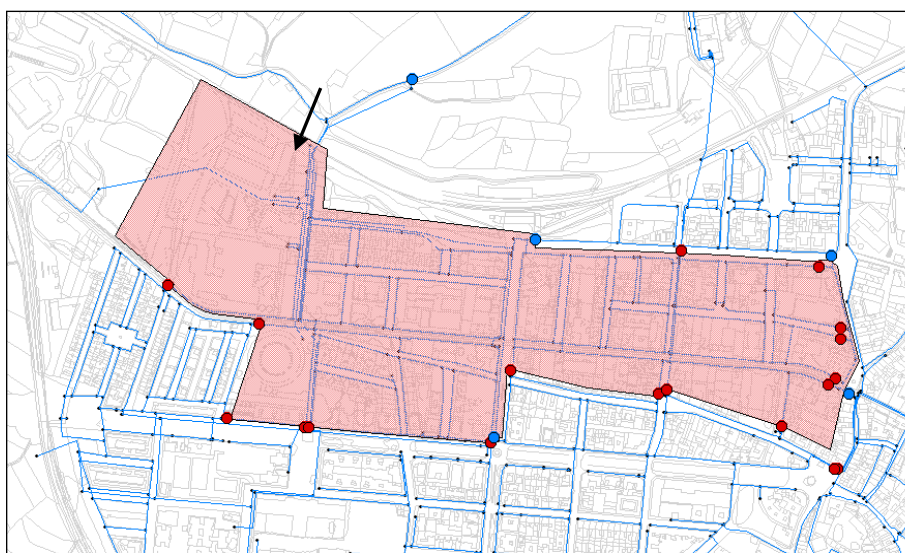


Figura 28. Sector 1. Sectorización cota

Sector 2: Este sector se encuentra ubicado al oeste del casco urbano, abarcando una superficie total de 27,4 Ha. Tiene un único punto de entrada, a través de una tubería de polietileno de 315 mm. En este punto se deberá de instalar un contador con emisor de impulsos. Una vez aislado el sector 1, para aislar este sector se deberán de cerrar tres válvulas. Es limítrofe con los sectores 1, 3 y 5, suministrado el caudal necesario a estos dos últimos.



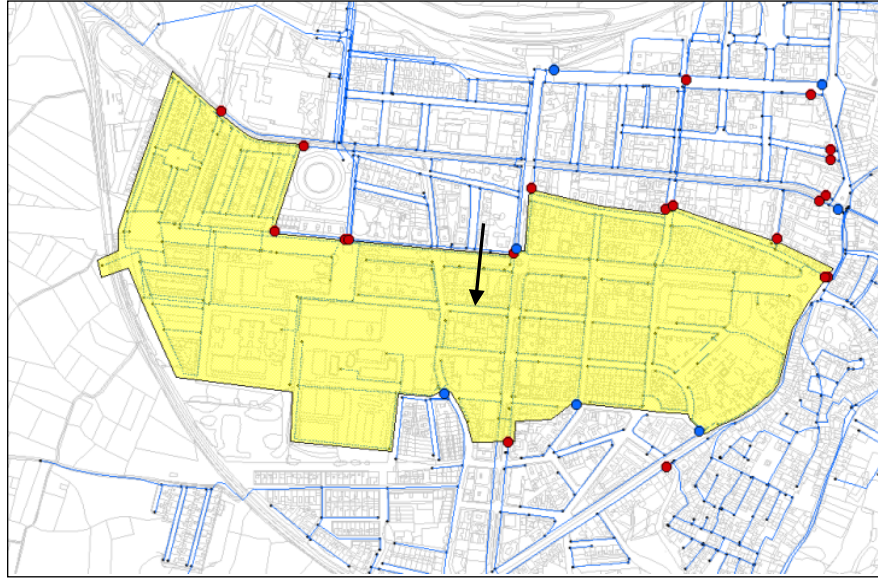


Figura 29. Sector 2. Sectorización cota

**Sector 3:** El tercer sector, englobando una superficie de 23.5 ha, se encuentra al suroeste del casco urbano. Delimita con los sectores 2 y 4. Este sector se abastece a través de tres tuberías de fibrocemento de 60, 80 y 100 mm desde el sector 2. En dichas tuberías será necesaria la instalación de caudalímetros con emisores de pulsos. Para aislar este sector se deberán de cerrar dos válvulas de corte.

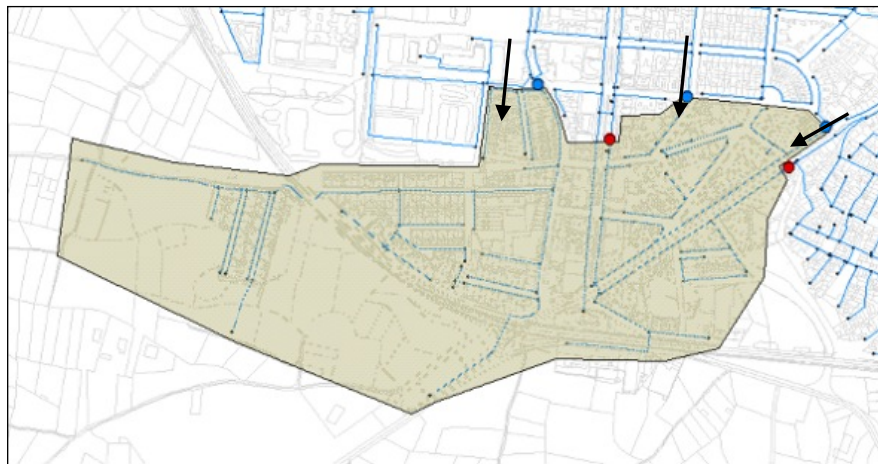


Figura 30. Sector 3. Sectorización cota

**Sector 4:** Este sector se encuentra junto a los sectores 1 y 5, al norte del casco urbano. Se abastece desde dos puntos, desde el sector 1 a través de una tubería de polietileno de 200 y desde el sector 5 por medio de una tubería del mismo material pero 110 mm de diámetro. Engloba un total de 42,9 ha, siendo así el sector con mayor superficie. Para aislar el sector 4 será necesario instalar dos válvulas de corte.

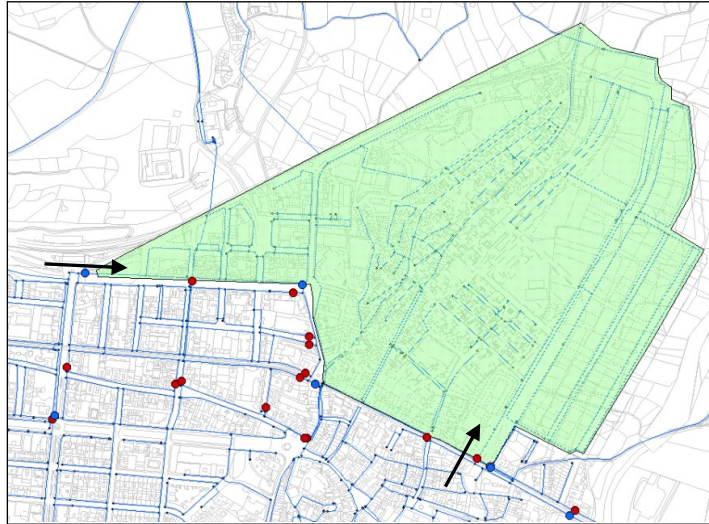


Figura 31. Sector 4. Sectorización cota

Sector 5: El sector 5 se encuentra ubicado en el centro del casco urbano. Es límite con todos los sectores menos con el 7, englobando una superficie total de 20 Ha. Presenta un único punto de entrada, tubería de PE160, donde se deberá de instalar un caudalímetro con emisor de pulsos. Para aislar el sector se deberán de cerrar un total de dos válvulas frontera, junto con las ya mencionadas. Este sector tiene dos salidas, hacia los sectores 4 y 6.

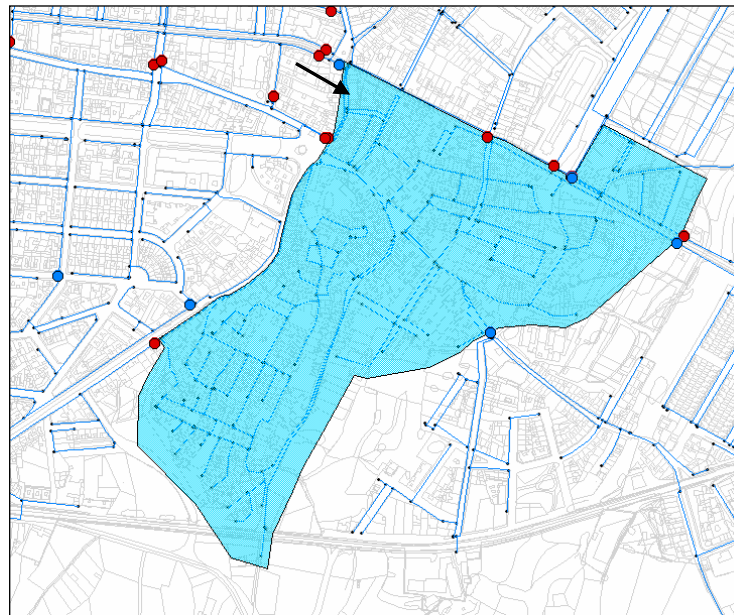


Figura 32. Sector 5. Sectorización cota

Sector 6: El sexto sector, englobando una superficie de 41.7 ha, se encuentra al sureste del casco urbano. Delimita con los sectores 5 y 6. Este sector se abastece a través de dos tuberías de polietileno de 90 y 110 mm desde el sector 5. En dichas tuberías será necesaria la instalación de caudalímetros con emisores de pulsos. Para aislar este sector se deberá de cerrar una válvula de corte.

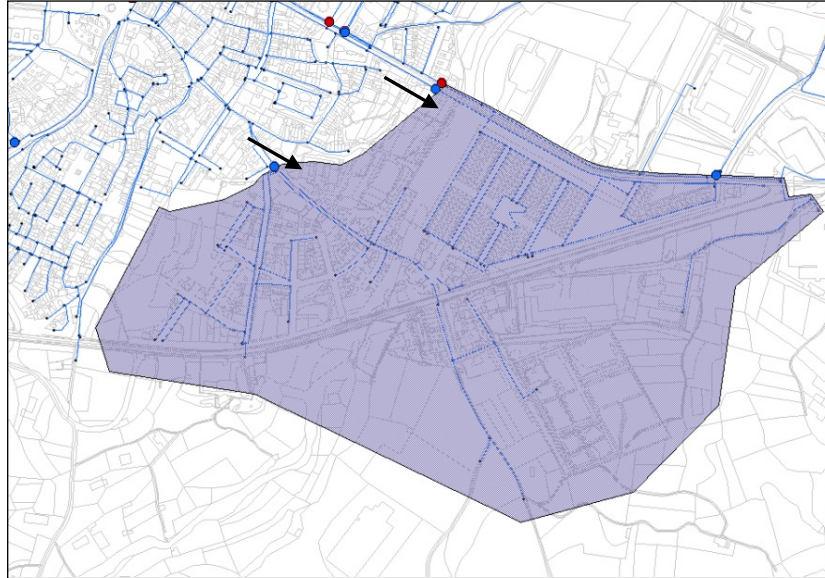


Figura 33. Sector 6. Sectorización cota

Sector 7: El último sector planteado se encuentra ubicado al este del casco urbano, abarcando una superficie total de 18,7 Ha. Tiene un único punto de entrada, a través de una tubería de polietileno de 90 mm procedente del sector 6. En este punto se deberá de instalar un contador con emisor de impulsos.

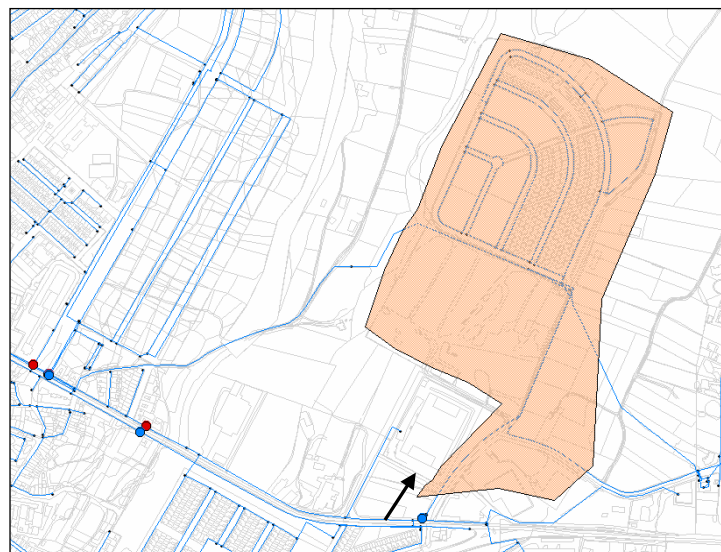


Figura 34. Sector 7. Sectorización cota



#### 4.7.2.2 Sectorización 2: Según Material

La distribución de las fugas a lo largo de la red no tiene realmente un comportamiento homogéneo. Uno de los factores que rigen esta distribución es el material de las tuberías.

Cabe recordar que en el modelo matemático se asume una distribución homogénea de las fugas a lo largo de toda la red.

La definición de esta segunda sectorización viene condicionada por los materiales de las tuberías teniendo un total de cinco sectores, como se observa en la Figura 35.

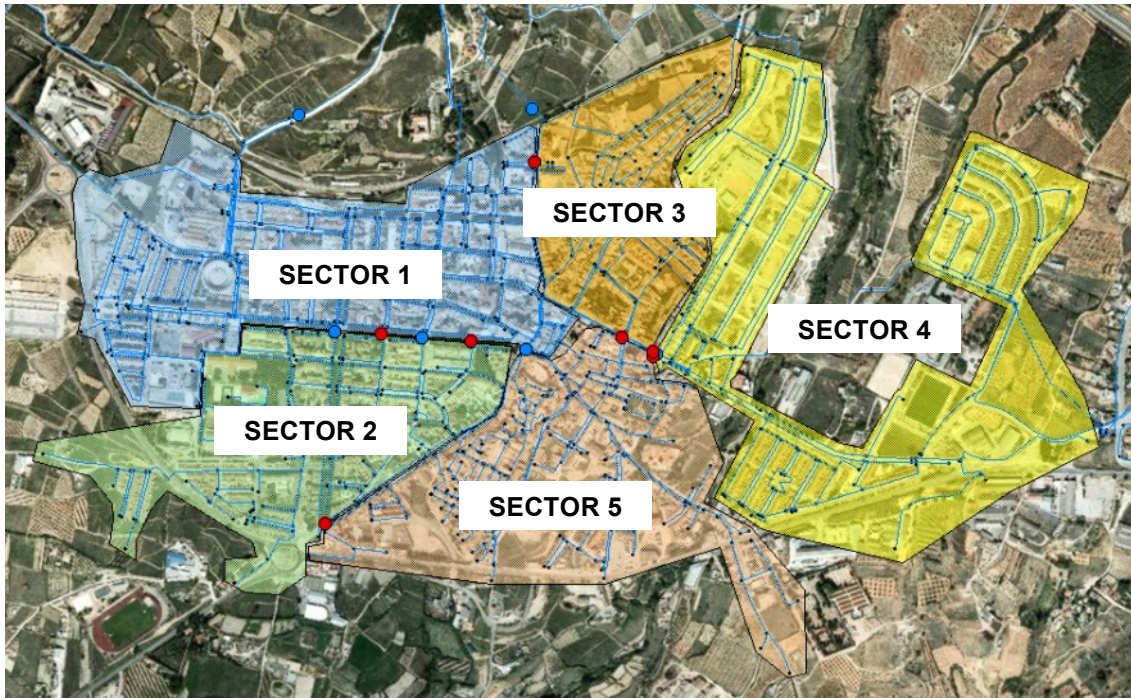


Figura 35. Sectorización planteada según la distribución espacial de los materiales

Para poder ejecutar con éxito esta sectorización son necesario la instalación de seis contadores y nueve válvulas de corte, representados en la Figura 35 con puntos azules y rojos, respectivamente. En Tabla 19 se observa la distribución de contadores y válvulas a cerrar y las tuberías donde se deberán instalar.

Tabla 19. Relación caudalímetros y válvulas de corte en la sectorización según el material

Tubería	Contador	Válvula cerrada	Tubería	Contador	Válvula cerrada
FC 200	1		PE 140	1	
FC 50		1	PE 160	1	
FC 60	2	6	PE 200	1	
FC 70		1	PE 110		1

Sector 1: El sector 1 se encuentra ubicado en el noroeste del casco urbano. Es limítrofe de los sectores 2, 3 y 5, englobando una superficie total de 43 Ha. Presenta un único punto de entrada, tubería de PE200, donde se deberá instalar un caudalímetro con emisor de pulsos. Para aislar el

sector se deberán de cerrar un total de cinco válvulas frontera. Este sector tiene tres salidas, hacia los sectores 2 y 5.

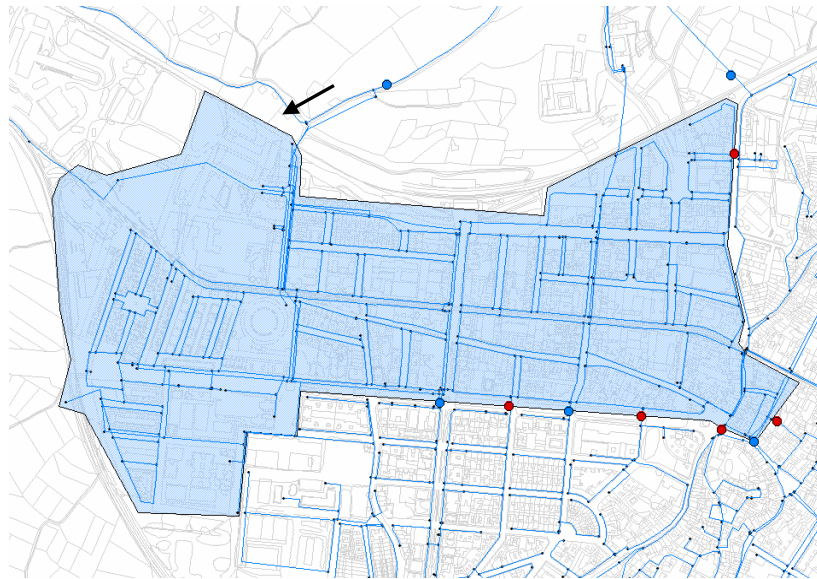


Figura 36. Sector 1. Sectorización material

Sector 2: El segundo sector, englobando una superficie de 32 ha, se encuentra al suroeste del casco urbano. Delimita con los sectores 1 y 5. Este sector se abastece a través de dos tuberías de fibrocemento de 60 mm desde el sector 1. En dichas tuberías será necesaria la instalación de caudalímetros con emisores de pulsos. Para aislar este sector se deberá de cerrar una válvula de corte. No presenta ninguna salida.

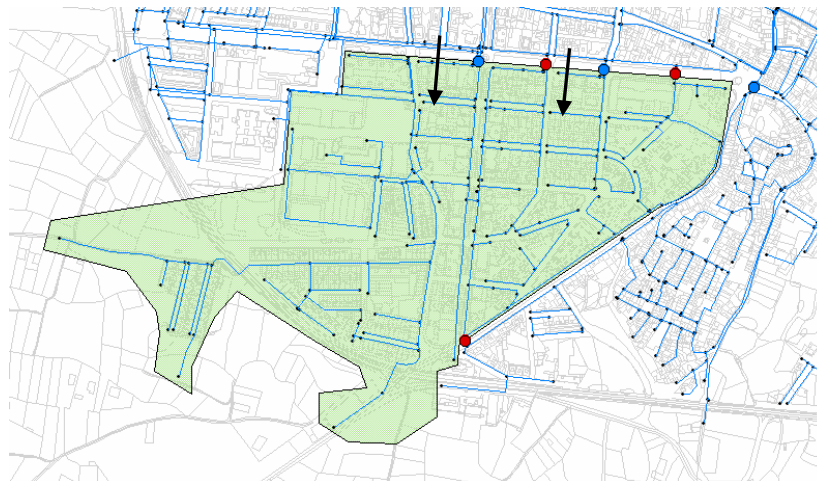


Figura 37. Sector 2. Sectorización material

Sector 3: El tercer sector, englobando una superficie de 20 ha, se encuentra al suroeste del casco urbano. Delimita con los sectores 1, 4 y 5. Este sector se abastece a través de una única tubería de fibrocemento de 200 mm desde el depósito Las Peñas. En dicha tubería será necesaria la instalación de un caudalímetro con emisor de pulsos. Para aislar este sector se deberá de cerrar tres válvulas de corte.



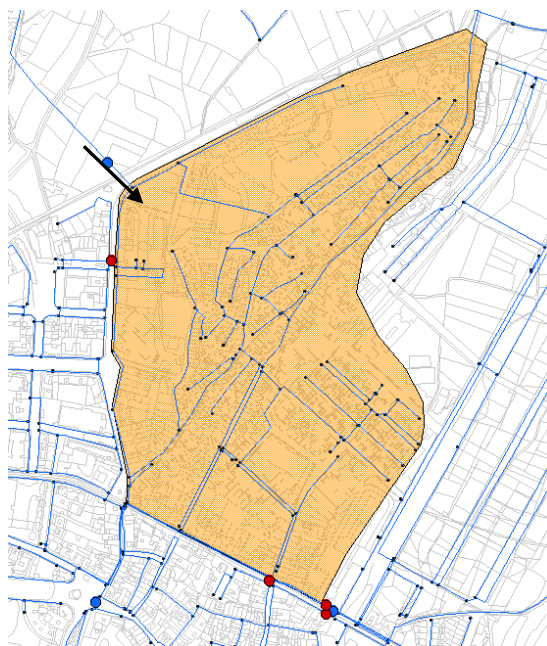


Figura 38. Sector 3. Sectorización material

Sector 4: El sector 4 se encuentra al este del casco urbano, con una superficie de 56 ha. Se abastece por una tubería de 140 mm de diámetro procedente del sector 5. Para aislar este sector será necesario el cierre de una válvula de corte.

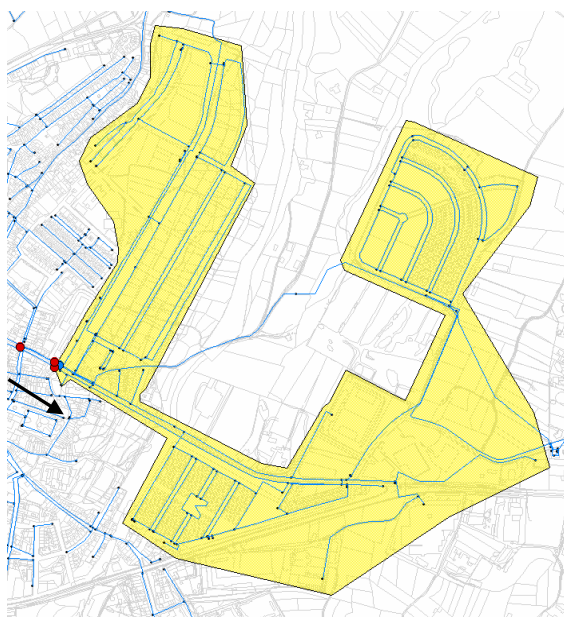


Figura 39. Sector 4. Sectorización material

Sector 5: El sector 5 engloba la zona centro y sur del casco urbano. Es limítrofe con todos los sectores, contando con una superficie total de 37 Ha. Presenta un único punto de entrada, tubería de PE160, donde se deberá de instalar un caudalímetro con emisor de pulsos. Para aislar el sector se deberán de cerrar un total de 5 válvulas frontera. Este sector tiene 1 salida hacia el sector 4.

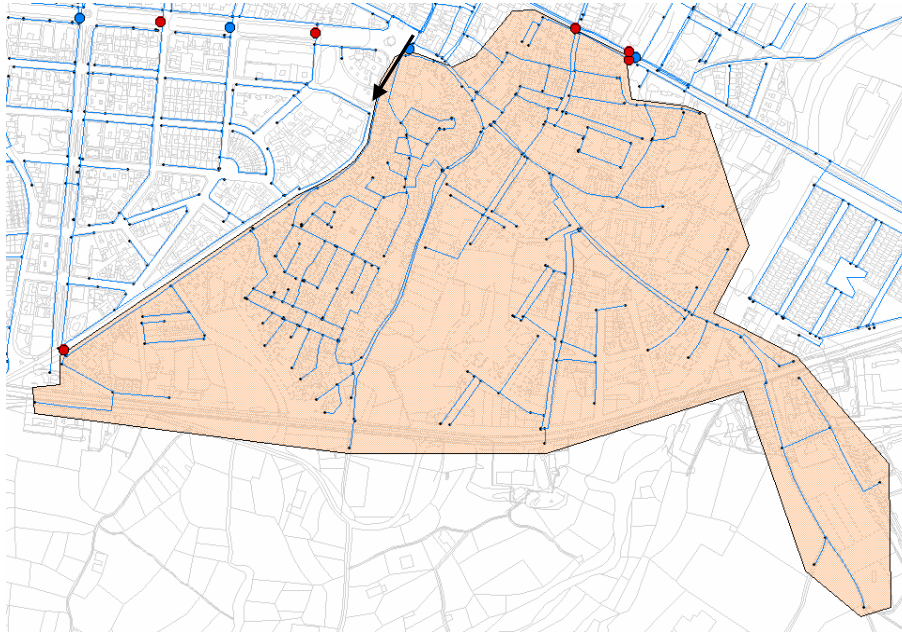


Figura 40. Sector 5. Sectorización material

#### 4.7.2.3 Sectorización 3: Según primer procedimiento de optimización energética

Las definiciones de las dos sectorizaciones anteriores se han realizado según características topológicas y constructivas de la red. En la definición de la tercera sectorización se ha aplicado el primer procedimiento de optimización planteado en el capítulo 2.

Para ello se han tomado como restricciones un número mínimo de 5 sectores con una longitud de mínima de corte de tubería englobada por cada uno de ellos de 10.000 metros y una presión mínima de 25 m.c.a.

En la siguiente figura se puede observar cual ha sido el resultado del algoritmo tomando de manera aleatoria como vértices iniciales de cada uno de los sectores los nudos marcados en rojo.

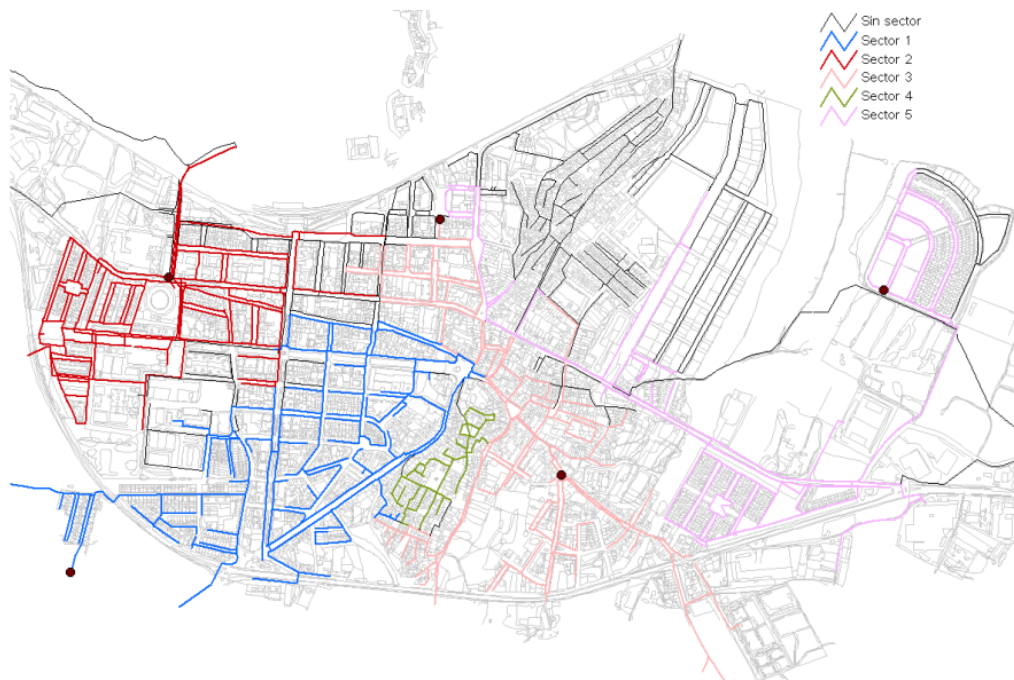


Figura 41. Sectorización resultante según el primer algoritmo de optimización

Del resultado obtenido se puede observar como las tuberías marcadas en negro no han sido incluidas en ninguno de los sectores, debido a que antes de hacerlo ya se habían cumplido las restricciones planteadas.

También se puede observar el pequeño tamaño del sector 4 el cual no cumple la condición mínima de corte. Esto es debido a que la definición de este grupo ha venido influenciada por los sectores 2 y 3, los cuales han descartado englobar estas tuberías. Este sector corresponde con una zona de mayor cota dentro del casco urbano, la cual se puede apreciar en la Figura 42.

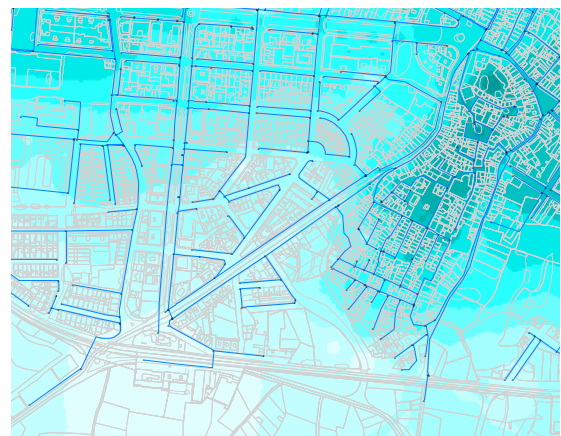


Figura 42. mapa de curvas de nivel



Tras el resultado obtenido en este primer procedimiento de optimización energética se deben simular en el modelo matemático los sectores obtenidos para comprobar el correcto funcionamiento de todos los valores hidráulicos. De este modo, se han delimitado finalmente un total de seis sectores:

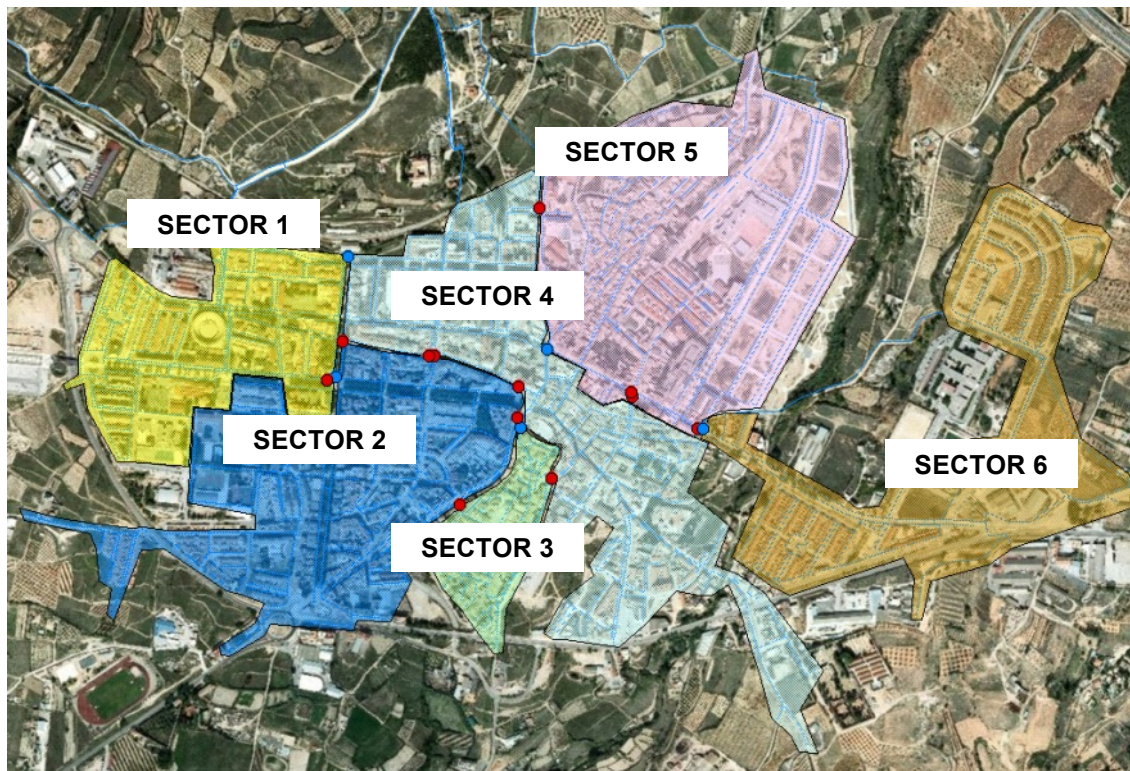


Figura 43. Sectorización planteada según el primer planteamiento de optimización energética

Para la correcta delimitación de todos los sectores será necesaria la instalación de seis caudalímetros y trece válvulas de corte, indicados en la Figura 43 con punto azules y rojos respectivamente, según la siguiente distribución:

Tabla 20. Relación caudalímetros y válvulas de corte en la sectorización según el primer procedimiento de optimización

Tubería	Contador	Válvula cerrada	Tubería	Contador	Válvula cerrada
FC 50		2	PE 160	1	2
FC 60		2	PE 200	1	
FC 80		1	PE 250		1
PE 110	1	4	PE 90	1	1
PE 140	1		FC 200	1	

De igual manera que con las anteriores sectorizaciones, se muestran las características de cada uno de los sectores.

**Sector 1:** El sector 1 se encuentra ubicado en el noroeste del casco urbano. Es limítrofe de los sectores 2 y 4, englobando una superficie total de 19 Ha. Presenta un único punto de entrada, la tubería de polietileno de 200 mm de diámetro procedente del depósito principal cañada-palletes, donde se deberá de instalar un caudalímetro con emisor de pulsos. Para aislar el sector se

deberán de cerrar un total de dos válvulas frontera. Este sector tiene dos salidas, hacia los sectores 2 y 4.

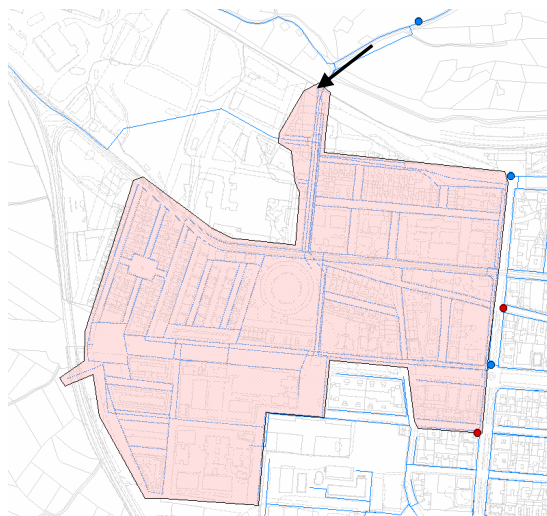


Figura 44. Sector 1. Sectorización primer planteamiento de optimización energética

Sector 2: Este sector se encuentra ubicado al suroeste del casco urbano, abarcando una superficie total de 31,7 Ha. Tiene un único punto de entrada, a través de una tubería de polietileno de 200 mm. En este punto se deberá de instalar un contador con emisor de impulsos. Serán necesarias instalar un total de siete válvulas frontera para aislar este sector. Es limítrofe con los sectores 1, 3 y 4.

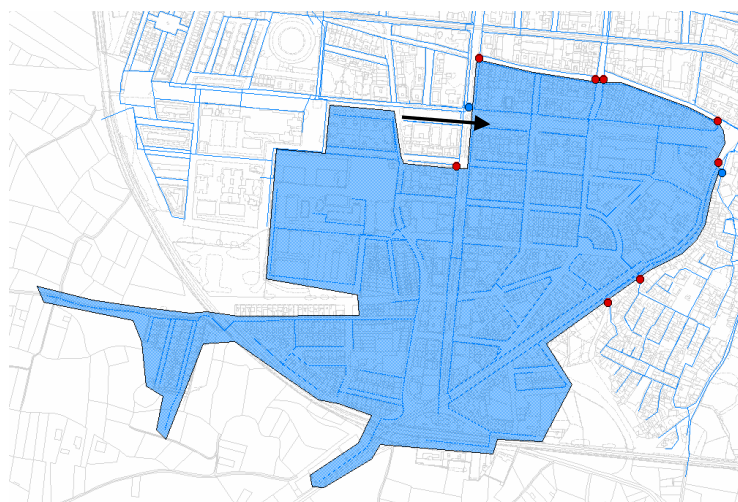


Figura 45. Sector 2. Sectorización primer planteamiento de optimización energética

Sector 3: El tercer sector, englobando una superficie de 6,5 ha, se encuentra al centro-sur del casco urbano. Delimita con los sectores 2 y 4. Este sector se abastece a través de una única tubería de polietileno de 200 mm desde el sector 4. En dicha tubería será necesaria la instalación de un caudalímetro con emisor de pulsos. Para aislar este sector se deberá de cerrar tres válvulas de corte.

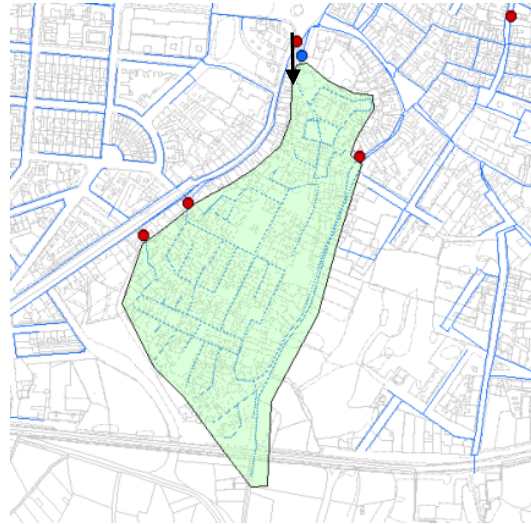


Figura 46. Sector 3. Sectorización primer planteamiento de optimización energética

Sector 4: El sector 4 se encuentra en el centro del casco urbano, con una superficie de 62 ha. Se abastece por una tubería de 200mm de diámetro procedente del sector 1. Para aislar este sector será necesario el cierre de dos válvulas de corte.

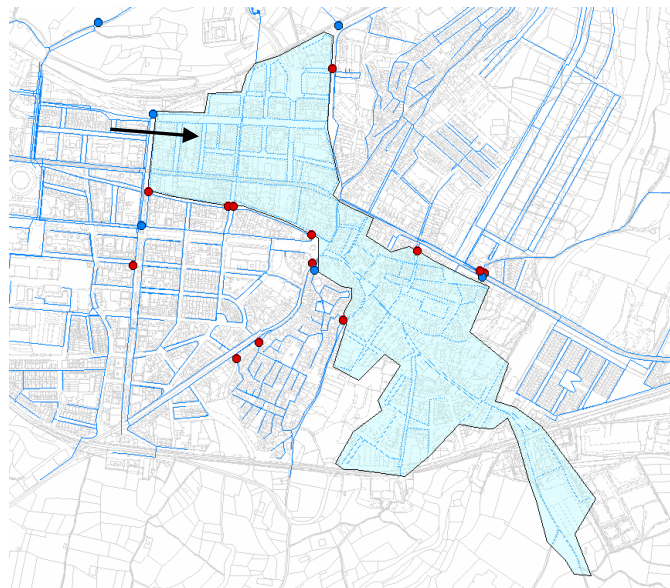


Figura 47. Sector 4. Sectorización primer planteamiento de optimización energética

Sector 5: El sector 5 se encuentra ubicado al noreste del centro del casco urbano. Es limítrofe con todos los sectores 4 y 6, englobando una superficie total de 38,1 Ha. Presenta una única tubería de fibrocemento de 200 mm desde el depósito Las Peñas, donde se deberá de instalar un caudalímetro con emisor de pulsos. Para aislar el sector se deberán de cerrar un total de tres válvulas frontera.



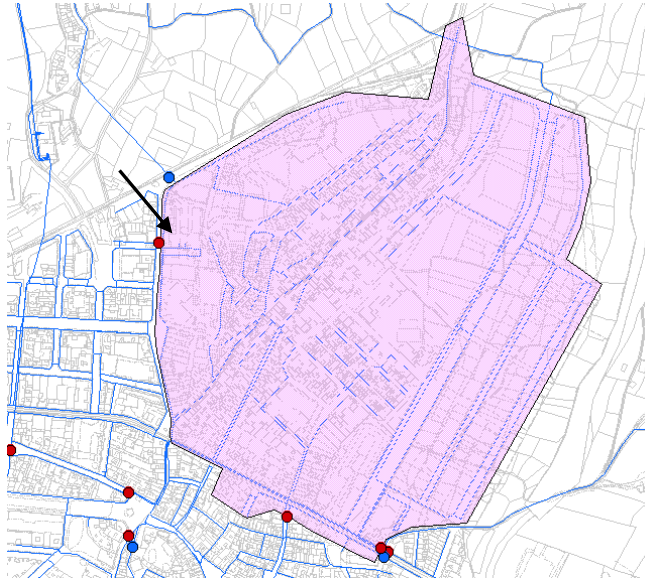


Figura 48. Sector 5. Sectorización primer planteamiento de optimización energética

Sector 6: El sexto sector, englobando una superficie de 30,4 ha, se encuentra al sureste del casco urbano. Delimita con los sectores 4 y 5. Este sector se abastece a través de una tubería de polietileno de 90 mm desde el sector 4. En dicha tuberías será necesaria la instalación de un caudalímetro con emisores de pulsos. Para aislar este sector se deberá de cerrar una válvula de corte.

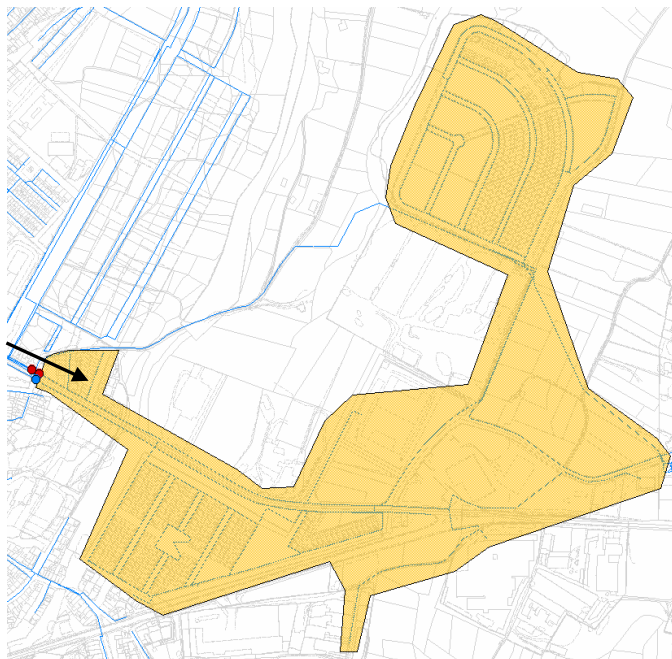


Figura 49. Sector 6. Sectorización primer planteamiento de optimización energética

#### 4.7.2.4 Sectorización 4: Según el 2º procedimiento de optimización energética

Esta última sectorización planteada ha sido diseñada según los resultado obtenido de aplicar el segundo procedimiento de optimiación energética, visto en el capítulo 2.

En la aplicación de este segundo algoritmo de cálculo se han impuesto una condición a los sectores, una longitud mínima del 15% del total. De esta manera se evitarán la definición de zonas demasiado pequeñas. La presión mínima de servicio seguirá siendo de 25 m.c.a.

En la siguiente figura se puede observar cual ha sido el resultado del algoritmo:

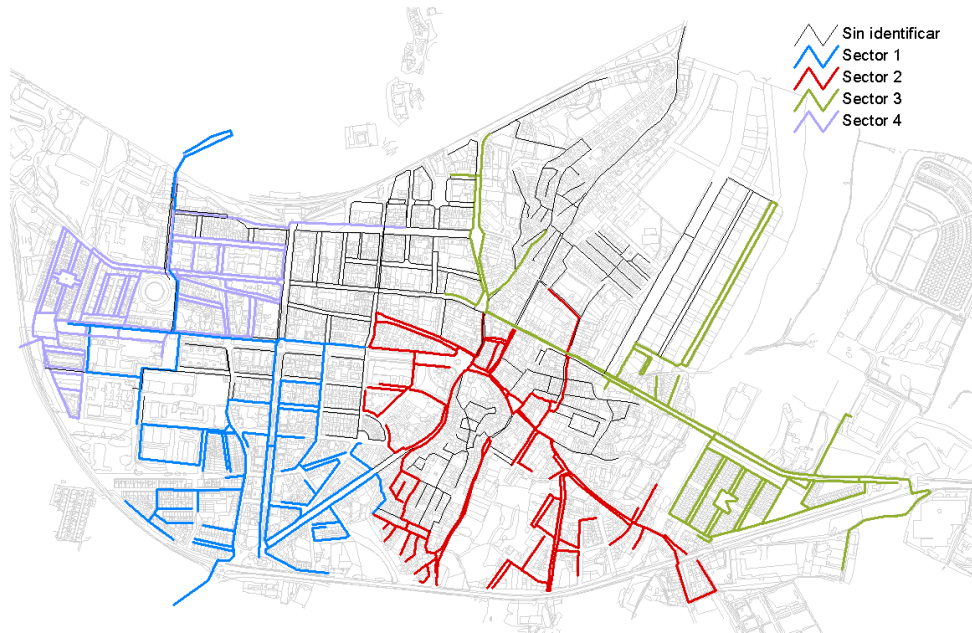


Figura 50. Sectorización resultante según el primer algoritmo de optimización

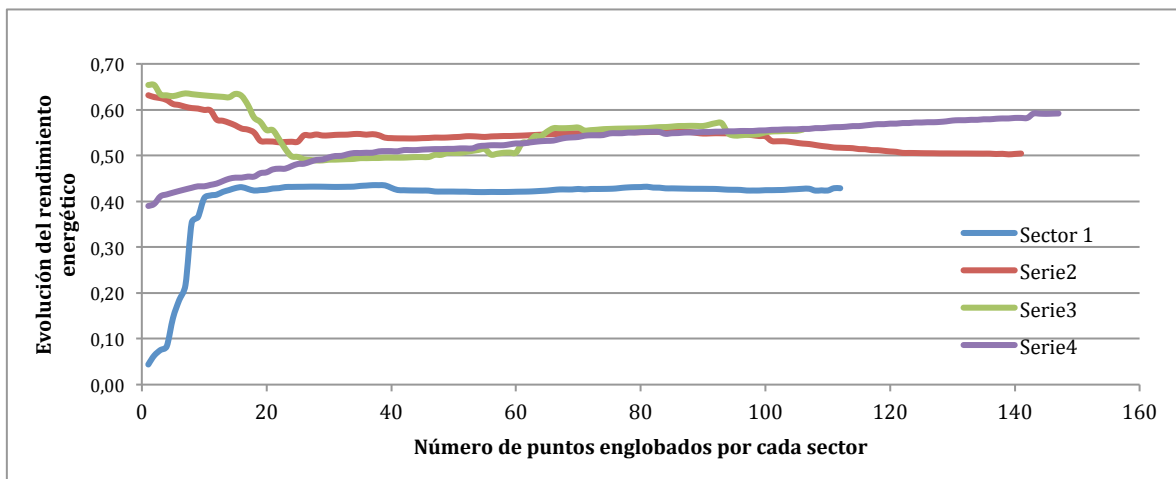


Figura 51. Resultado obtenido del algoritmo de cálculo

Se puede observar como en total se han marcado cuatro sectores dejando las tuberías en negro fuera de alguno de ellos. En bas a ello, se deciden realizar los siguientes cinco sectores (Figura 52).

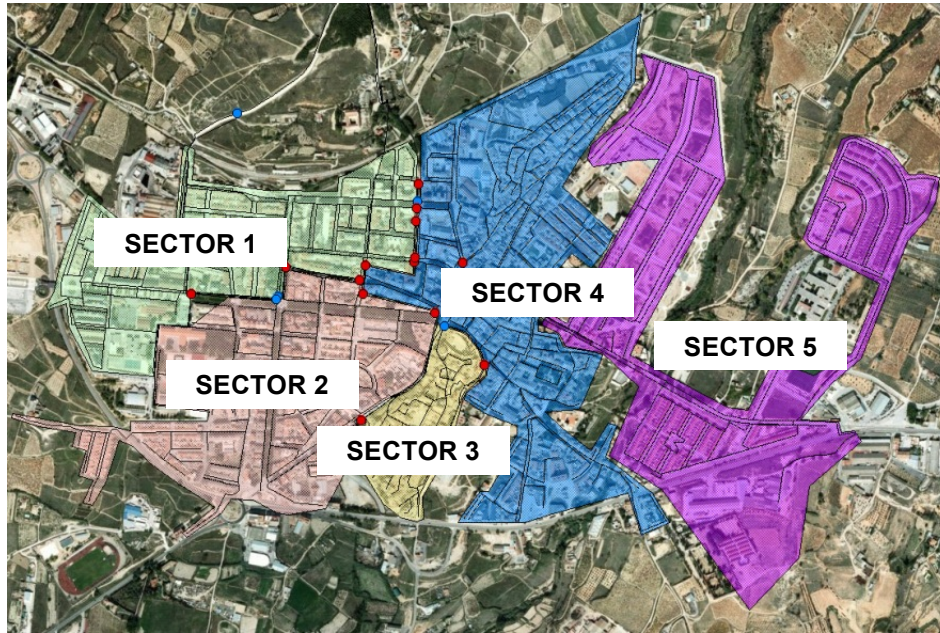


Figura 52. Sectorización resultante según el segundo algoritmo de optimización

En esta sectorización, se han definido un total de cinco sectores, para los cuales se requieren un total de seis caudalímetros y quince válvulas de corte, respresentados en la Figura 52 mediante puntos azules y rojos respectivamente.

Tabla 21. Relación caudalímetros y válvulas de corte en la sectorización según la cota

Tubería	Contador	Válvula cerrada	Tubería	Contador	Válvula cerrada
FC 60		2	PE 160	1	4
FC 70		1	PE 200	2	
PE 110	1	7	PE 250		1
PE 140	1		PE 315	1	

Tras ser vista la sectorización de forma global, se va a entrar en detalle de cada uno de los sectores establecidos en este método.

Sector 1: El sector 1 se encuentra ubicado en el noroeste del casco urbano. Es limítrofe de los sectores 2 y 4, englobando una superficie total de 26.5 Ha. Presenta un único punto de entrada, la tubería de polietileno de 200 mm de diámetro procedente del depósito principal cañada-palletes, donde se deberán de instalar un caudalímetro con emisor de pulsos. Para aislar el sector se deberán de cerrar un total de 10 válvulas frontera. Este sector tiene dos salidas, hacia los sectores 2, y 4.



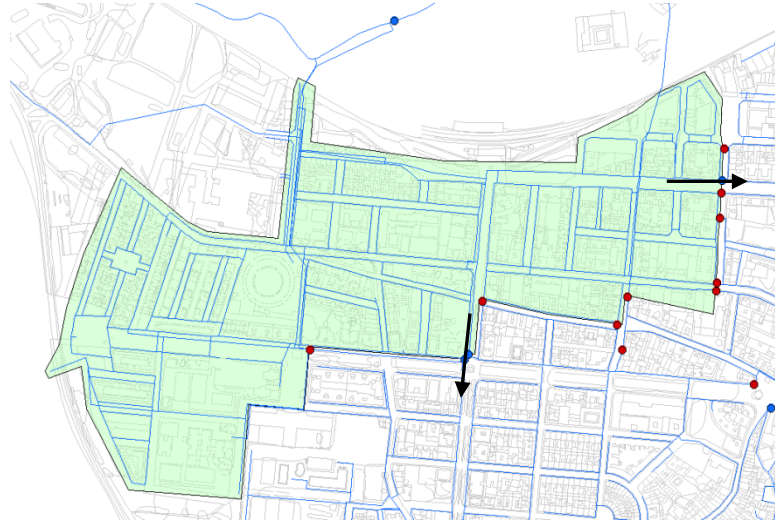


Figura 53. Sector 1. Sectorización 2º planteamiento de optimización energética

Sector 2: Este sector se encuentra ubicado al suroeste del casco urbano, abarcando una superficie total de 31,2 Ha. Tiene un único punto de entrada, a través de una tubería de polietileno de 315 mm procedente del sector 1. En este punto se deberá de instalar un contador con emisor de impulsos. Una vez aislado el sector 1, para aislar este sector se deberán de cerrar tres válvulas. Es limítrofe con los sectores 1, 3 y 4, no suministrado a ningún sector.

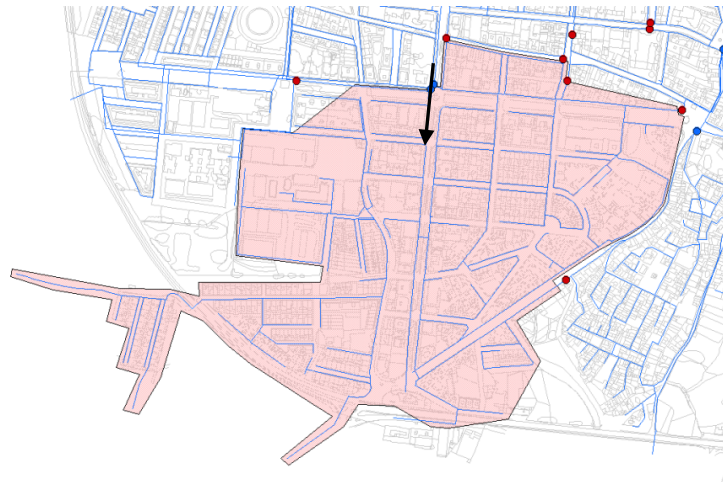


Figura 54. Sector 2. Sectorización 2º planteamiento de optimización energética

Sector 3: El tercer sector, englobando una superficie de 7,9 ha, se encuentra al sur del casco urbano. Delimita con los sectores 2 y 4. Este sector se abastece a través de una tubería de polietileno de 110 mm desde el sector 4. En dicha tubería será necesaria la instalación de un caudalímetro con emisor de pulsos. Para aislar este sector se deberán de cerrar dos válvulas de corte.

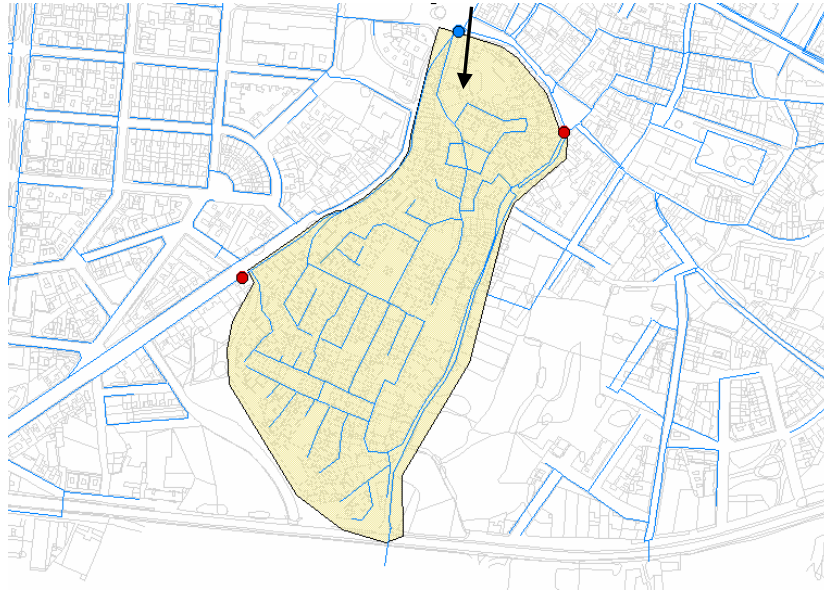


Figura 55. Sector 3. Sectorización 2º planteamiento de optimización energética

Sector 4: Este sector se encuentra rodeado por todos los sectores en el centro del casco urbano. Se abastece desde dos puntos, desde el sector 1 a través de una tubería de polietileno de 200 y desde una de fibrocemento de 200 mm desde el depósito Las Peñas, donde se deberán de instalar sendos caudalímetro con emisores de pulsos. Engloba un total de 40,3 ha, siendo así el sector con mayor superficie. Para aislar el sector 4 será necesario instalar dos válvulas de corte, junto con las ya mencionadas.

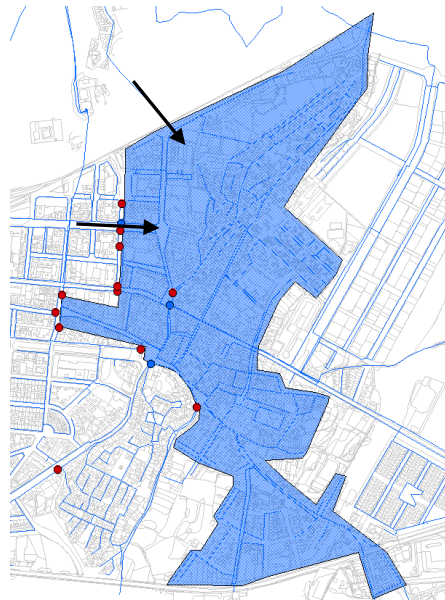


Figura 56. Sector 4. Sectorización 2º planteamiento de optimización energética

Sector 5: El sector 5 se encuentra ubicado en el este del casco urbano. Es limítrofe con el sector 4, englobando una superficie total de 39 Ha. Presenta un único punto de entrada, tubería de PE140, donde se deberá de instalar un caudalímetro con emisor de pulsos. Para aislar el sector se deberán de cerrar un total de dos válvulas frontera.



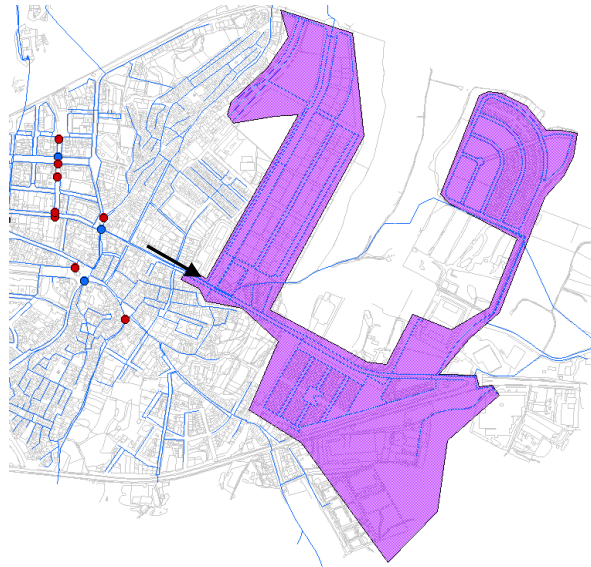


Figura 57. Sector 5. Sectorización 2º planteamiento de optimización energética

### 4.7.3 Comparativa de las diferentes propuestas

Tras la definición y desarrollo de todas las sectorizaciones tan solo faltarán los respectivos análisis y posterior comparativas.

El análisis hidráulico de cada uno de ellos se ha realizado de igual manera que se realizó para la red del casco urbano y se encuentra en el anejo 3.

Seguidamente se muestran otros parámetros de suma importancia.

#### Materiales y longitudes englobadas

En este sub-apartado se va a estudiar la relación de materiales y longitudes que engloba cada uno de los sectores. En las siguientes tablas se muestran las longitudes de las tuberías organizadas por sectores y materiales, presentándose por separado cada una de las sectorizaciones planteadas:

Tabla 22. Distribución de longitudes y materiales en la sectorización por cota

Material	Sectorización según la cota						
	1	2	3	4	5	6	7
FC	4.606	3.364	312	5.056	5.129	423	
HG		380				205	
PB				36			
PE	6.041	875	7.953	7.374	3.381	5.465	3.134
PVC	412	70				210	
Total por sectores	11.059	4.688	8.265	12.467	8.510	6.302	3.134

Tabla 23. Distribución de longitudes y materiales en la sectorización por material

Material	Sectorización según el material				
	1	2	3	4	5
FC	1.639	502	4.388	6.715	5.894
HG				380	205
PB			36		
PE	17.234	13.559	1.121	1.170	4.340
PVC		210		482	
Total por sectores	18.873	14.270	5.544	8.747	10.439

Tabla 24. Distribución de longitudes y materiales en la sectorización según el 1er procedimiento de optimización

Material	Sectores					
	1	2	3	4	5	6
FC	1.303	7.367	2.065	2.701	5.018	807
HG		380		205		
PB					36	
PE	9.268	2.355	241	9.788	6.026	7.642
PVC		482				210
Total por sectores	10.572	10.584	2.306	12.694	11.081	8.659

Tabla 25. Distribución de longitudes y materiales en la sectorización según el 2º procedimiento de optimización

Material	Sectores				
	1	2	3	4	5
FC	1.364	7.327	2.595	7.584	502
HG		380		205	
PB				36	
PE	12.739	2.104	1.100	6.530	12.357
PVC		482			210
Total por sectores	14.102	10.293	3.696	14.356	13.068

La distribución por materiales no es ordenada en la primera y tercera sectorización, donde los porcentajes de cada material se encuentran de manera aleatoria.

En cambio, esta distribución en la segunda sectorización, definida según material, lógicamente tiene un mayor sentido. Los dos primeros sectores presentan más de un 90% de polietileno, siendo esta mayoría de fibrocemento en los sectores tres y cuatro. En cautno al quinto sector, engloba el material resante.

No se puede hablar de una relación clara en cuanto a la longitud de las tuberías englobadas en cada uno de los sectores de las dos primeras sectorizaciones debido a que este parámetro no ha intervenido en sus definiciones.

Esta longitud englobada sí que ha sido un factor determinante a la hora de la definición de los sectores en el procedimiento de definición de la tercera y cuarta sectorización, como condición de corte.

En cuanto a la tercera sectorización, se puede apreciar como los seis sectores primeros sectores, salvo el tercero cuyo caso se ha explicado en el apartado 4.7.2.3, tienen una longitud mayor de los 10.000 metros impuestos como longitud mínima. El sector 6 al ser el último en definirse ha englobado la longitud restante, en este caso menor a la impuesta como condición de corte.

#### Cotas de los sectores

Tras estudiar la distribución de materiales y longitudes, se analizará las cotas del terreno de cada uno de los sectores.

En las siguientes tablas se muestran para cada una de las sectorizaciones las cotas máximas, mínimas y sus desviaciones típicas organizadas por sectores.

Tabla 26. Cotas de los sectores

Sector	Cota máxima (m.s.n.m.)	Cota mínima (m.s.n.m.)	Desviación típica de la cota
<b>SECTORIZACIÓN COTA</b>			
1	696.53	681.49	2.96
2	685.41	669.61	2.98
3	704.59	689.33	3.78
4	723.30	691.83	8.97
5	702.12	678.02	4.61
6	695.71	675.29	6.35
7	715.85	700.98	4.93
<b>SECTORIZACIÓN MATERIAL</b>			
1	705.31	681.49	4.99
4	723.30	675.30	12.56
3	723.30	694.72	8.57
2	691.17	669.62	5.17
5	699.18	673.41	7.32
<b>SECTORIZACIÓN PRIMER PROCEDIMIENTO OPTIMIZACIÓN</b>			
1	704.59	682.58	4.95
2	696.53	669.62	5.33
3	699.19	678.02	5.96
4	705.32	675.30	7.66
5	723.30	691.84	9.91
6	715.85	675.30	11.68
<b>SECTORIZACIÓN 2º PROCEDIMIENTO OPTIMIZACIÓN</b>			
1	704,59	682,58	4,74
2	696,54	669,62	5,40
4	723,30	675,30	12,61
5	723,30	675,30	12,03
6	699,19	678,02	5,71

A la hora de la división de la red según cota se realizaron diversos escalones, cada cual de ellos definía un sector. Ello se puede ver en la desviación típica de la cota de la primera sectorización, donde este parámetro presenta valores muy bajos.

En el resto de sectorizaciones, pero con mayor acentuación en la de material, se observan valores mayores de esta organización de las cotas.

### Niveles de presiones

El estudio de presiones se encuentra detallado, para cada uno de los sectores de forma individualizada, en el anejo 3. Aun así y debido a su importancia, se van a comparar a continuación estos niveles entre las cuatro sectorizaciones planteadas y la red actual sin sectorizar.

En la Figura 58 y Figura 59 se presentan las frecuencias y frecuencias acumuladas para las presiones en todos los nudos de consumo. De esta manera se obtiene una rápida comparativa entre las cinco escenarios planteados.

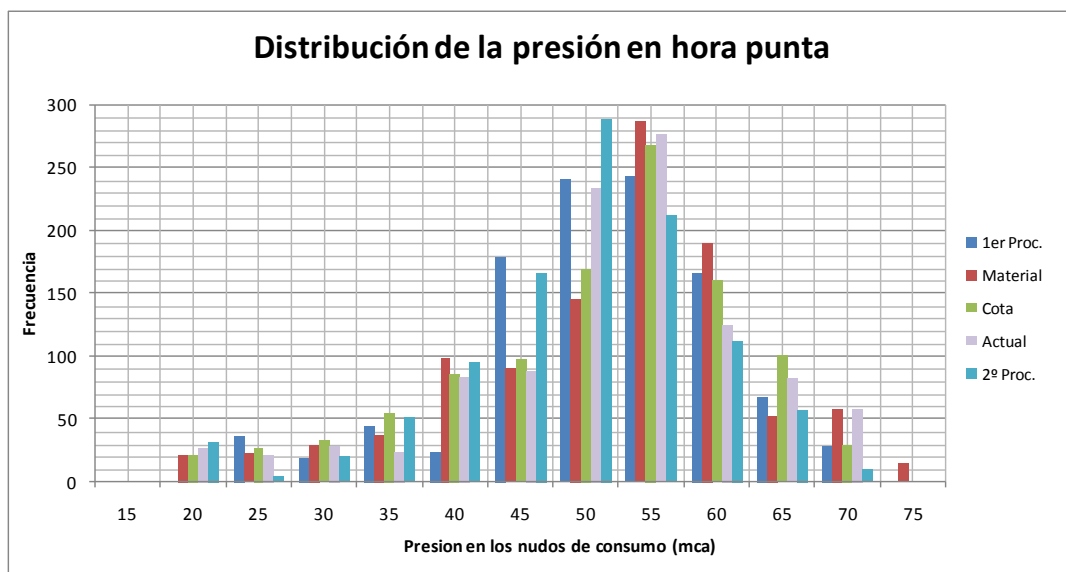


Figura 58. Distribución de la presión en hora punta

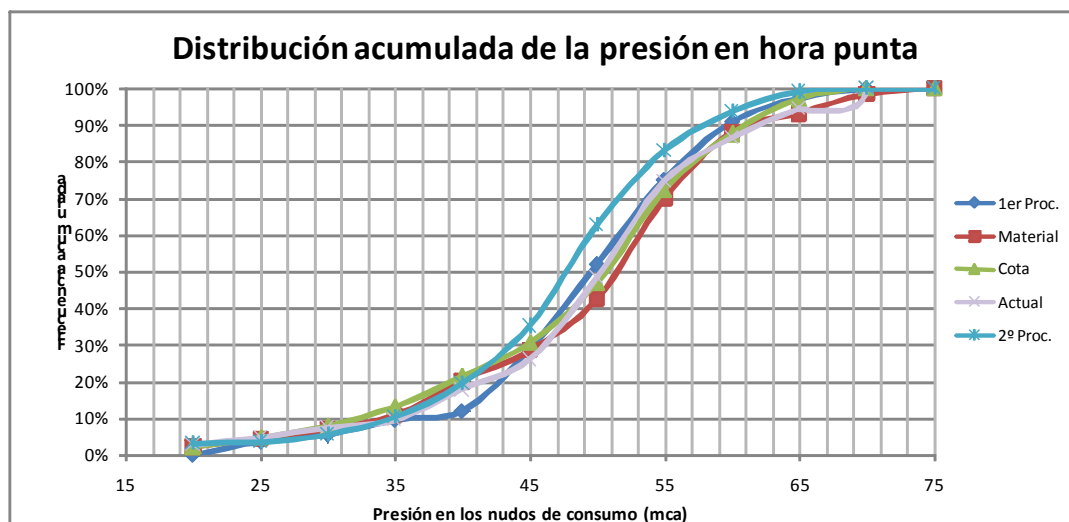


Figura 59. Distribución acumulada de la presión en hora punta

La primera apreciación a observar es la reducción de las presiones y homogeneización de esta al rango 45-60 mca que presenta la sectorización planteada según el primer procedimiento de optimización energética frente a la sectorización actual.

El efecto de la sectorización obtenida según el segundo procedimiento de optimización es la reducción del nivel de presiones para valores superiores a 40 mca.

En cuanto a las otras dos sectorizaciones frente a la red actual, los niveles de presiones se mantienen iguales hasta los 45 mca, entre los 46-57 mca se produce una reducción media de los niveles para aumentar a entre el rango 57-65 mca.

Destacar también el aumento de presión que se produce en la sectorización según el material, llegando algunos puntos hasta los 75 mca.

El efecto de la variación de los niveles de presiones influye en el volumen fugado. En la siguiente tabla se comparan los caudales inyectados a la red antes y después de las sectorizaciones:

Tabla 27. Datos del caudal suministrado a la red antes y después de sectorizar

Red	Suministro (m <sup>3</sup> /día)	Reducción (%)	Reducción volumen fugado (%)
Actual	4304,34	-	-
Sectorización Cota	4254,1	1,17	2,65
Sectorización Material	4316,4	-0,28	-0,64
Sectorización 1er proced.	4252,15	1,21	2,75
Sectorización 2º proced.	4190,91	2,64	4,76

Se puede observar como las sectorizaciones primera y tercera han conseguido una reducción en el caudal suministrado, debido a las reducciones de los niveles de presiones medias en los nudos, consiguiéndose la máxima reducción con la sectorización planteada según el primer procedimiento de optimización energética.

Como el consumo por parte del abonado se mantiene constante, esta reducción en el caudal suministrado se traduce directamente en reducción del volumen fugado.

En cambio, llama la atención el aumento que se produciría con la sectorización según el material.

#### Auditoria energética

Para la evaluación energética de las sectorizaciones planteadas se ha seguido los conceptos expuestos en el capítulo 2.

En primer lugar se procederá con la simple metodología planteada por Boulos y Cros, con la cual se obtendrán los siguientes resultados por sectorizaciones y sectores:

Tabla 28. Datos energéticos según Boulos para la sectorización según la cota

COTA RED	Demanda (m <sup>3</sup> /día)	TOTAL ENERGÍA PERDIDA (kWh/día)				Energía por caudal unitario (kWh/m <sup>3</sup> )	Mín. energía en grifo de consumidor	Rendimiento energético (%)
		Fricción	Control	Grifo consumidor	Total			
Sector 1	925,67	16,28		157,21	173,49	0,19	90,27	52,03
Sector 2	942,40	32,63		172,98	205,61	0,22	100,27	48,77
Sector 3	440,41	1,46		72,14	73,60	0,17	39,43	53,57
Sector 4	617,33	5,24		83,78	89,02	0,14	64,32	72,25
Sector 5	610,65	6,22		111,07	117,29	0,19	64,07	54,63
Sector 6	586,22	6,61		105,72	112,33	0,19	54,13	48,18
Sector 7	147,90	0,15		19,14	19,29	0,13	15,31	79,36
Red sectorizada	4254,10	69,52		836,59	906,11	0,21	545,15	60,16
Red actual	4304,34	38,90		856,44	895,34	0,21	549,58	61,38

Tabla 29. Datos energéticos según Boulos para la sectorización según el material

MATERIAL RED	Demanda (m <sup>3</sup> /día)	TOTAL ENERGÍA PERDIDA (kWh/día)				Energía por caudal unitario (kWh/m <sup>3</sup> )	Mín. energía en grifo de consumidor	Rendimiento energético (%)
		Fricción	Control	Grifo consumidor	Total			
Sector 1	1679,12	13,68		300,84	314,52	0,19	173,31	55,10
Sector 2	784,00	26,12		128,11	154,23	0,20	81,08	52,57
Sector 3	294,46	0,48		35,05	35,53	0,12	30,43	85,64
Sector 4	704,10	3,80		132,32	136,12	0,19	87,43	64,23
Sector 5	836,77	1,00		166,39	167,39	0,20	85,10	50,84
Red sectorizada	4316,40	55,53		859,42	914,95	0,21	553,56	60,50
Red Actual	4304,34	38,90		856,44	895,34	0,21	549,58	61,38

Tabla 30. Datos energéticos según Boulos para la sectorización según el primer procedimiento de optimización energética

1er Procedimiento RED	Demanda (m <sup>3</sup> /día)	TOTAL ENERGÍA PERDIDA (kWh/día)				Energía por caudal unitario (kWh/m <sup>3</sup> )	Mín. energía en grifo de consumidor	Rendimiento energético (%)
		Fricción	Control	Grifo consumidor	Total			
Sector 1	953,31	11,72		163,41	175,13	0,18	92,27	52,69
Sector 2	974,51	30,41		171,09	201,50	0,21	100,57	49,91
Sector 3	200,70	0,80		35,63	36,43	0,18	20,04	55,00
Sector 4	1065,62	3,28		201,82	205,10	0,19	119,55	58,29
Sector 5	948,90	3,78		130,58	134,36	0,14	89,68	66,75
Sector 6	516,40	7,40		89,00	96,40	0,19	60,23	62,48
Red sectorizada	4291,09	42,75		853,44	896,19	0,21	548,53	61,21
Red actual	4304,34	38,90		856,44	895,34	0,21	549,58	61,38

Tabla 31. Datos energéticos según Boulos para la sectorización según el 2º procedimiento de optimización energética

2º Procedimiento RED	Demanda (m <sup>3</sup> /día)	TOTAL ENERGÍA PERDIDA (kWh/día)				Energía por caudal unitario (kWh/m <sup>3</sup> )	Mín. energía en grifo de consumidor	Rendimiento energético (%)
		Fricción	Control	Grifo consumidor	Total			
Sector 1	1265,89	16,13		215,36	231,49	0,18	127,89	55,24
Sector 2	979,35	33,00		168,30	201,30	0,21	101,45	50,40
Sector 3	236,29	1,06		40,41	41,47	0,18	23,54	56,77
Sector 4	1065,33	9,24		197,27	206,51	0,19	127,97	61,97
Sector 5	683,26	4,42		120,74	125,16	0,18	84,46	67,48
Red sectorizada	4190,91	62,91		808,93	871,84	0,21	537,62	61,67
Red actual	4304,34	38,90		856,44	895,34	0,21	549,58	61,38

En todos los casos, excepto en la segunda sectorización, se reduce la energía entregada en el grifo del consumidor. En esta línea, la energía entregada a los usuarios se reduce tras las sectorizaciones según la cota y optimizaciones energéticas un 2,08%, 0,35% y 5,5%.

También se puede observar como el único caso que mejora la eficiencia energética es la última sectorización.

Dentro de cada una de las sectorizaciones, la eficiencia energética dará una primera priorización a la hora de la aplicación del control activo de fugas, así como el margen de actuación en la gestión de la presión.

El análisis energético se completará con la auditoría expuesta en el punto 2.2, la cual se muestra a continuación para cada sector y sectorización:

Tabla 32. Auditoría energética realizada a la sectorización según cota

COTA RED	Indicadores							Einput	Eu	El
	C1	C2	I1	I2	I3	I4	I5			
Sector 1	1,00	1,42	4,22	0,41	0,09	0,65	1,75	173,49	71,91	85,30
Sector 2	1,00	1,56	4,16	0,41	0,16	0,69	1,69	205,61	83,62	89,35
Sector 3	1,00	1,31	3,57	0,50	0,02	0,50	1,80	73,60	37,13	35,01
Sector 4	1,00	1,57	3,02	0,42	0,06	0,63	1,26	89,02	37,10	46,68
Sector 5	1,00	1,55	5,06	0,34	0,05	0,69	1,72	117,29	39,91	71,16
Sector 6	1,00	1,39	4,84	0,39	0,06	0,62	1,89	112,33	43,98	61,74
Sector 7	1,00	1,53	3,24	0,38	0,01	0,62	1,24	19,29	7,37	11,77
Red sectorizada	1,00	1,88	3,68	0,41	0,08	0,60	1,52	906,11	373,44	463,15
Red actual	1,00	1,88	3,64	0,43	0,04	0,58	1,55	895,34	381,45	474,98

Tabla 33. Auditoría energética realizada a la sectorización según material

MATERIAL RED	Indicadores							Einput	Eu	El
	C1	C2	I1	I2	I3	I4	I5			
Sector 1	1,00	1,52	3,94	0,44	0,04	0,59	1,73	314,52	138,12	162,72
Sector 2	1,00	1,54	3,34	0,46	0,17	0,57	1,55	154,23	71,40	56,71
Sector 3	1,00	1,54	2,10	0,54	0,01	0,46	1,13	35,53	19,12	15,93
Sector 4	1,00	1,77	4,78	0,32	0,03	0,68	1,54	136,12	44,03	88,29
Sector 5	1,00	1,48	5,43	0,36	0,01	0,64	1,97	167,39	60,61	105,78
Red sectorizada	1,00	1,88	3,72	0,41	0,06	0,60	1,53	914,95	377,38	482,04
Red Actual	1,00	1,88	3,64	0,43	0,04	0,58	1,55	895,34	381,45	474,98

Tabla 34. Auditoría energética realizada a la sectorización según el 1er procedimiento de optimización

1er Procedimiento RED	Indicadores							Einput	Eu	El
	C1	C2	I1	I2	I3	I4	I5			
Sector 1	1,00	1,40	4,56	0,39	0,07	0,65	1,80	175,13	69,13	94,29
Sector 2	1,00	1,52	3,83	0,44	0,15	0,59	1,68	201,50	88,39	82,70
Sector 3	1,00	1,48	5,83	0,30	0,02	0,70	1,76	36,43	11,00	24,63
Sector 4	1,00	1,70	3,43	0,48	0,02	0,53	1,64	205,10	97,89	103,93
Sector 5	1,00	1,33	2,34	0,65	0,03	0,37	1,53	134,36	87,95	42,63
Sector 6	1,00	1,72	3,67	0,40	0,08	0,61	1,47	96,40	38,61	50,39
Red sectorizada	1,00	1,88	3,64	0,43	0,05	0,58	1,55	896,19	381,40	472,04
Red actual	1,00	1,88	3,64	0,43	0,04	0,58	1,55	895,34	381,45	474,98



Tabla 35. Auditoría energética realizada a la sectorización según el 1er procedimiento de optimización

2º Procedimiento RED	Indicadores						Einput	Einput	Eu	El
	C1	C2	I1	I2	I3	I4				
Sector 1	1,00	1,48	3,98	0,42	0,07	0,63	1,68	231,49	97,78	117,59
Sector 2	1,00	1,53	3,67	0,44	0,16	0,59	1,63	201,30	89,19	79,11
Sector 3	1,00	1,48	5,12	0,33	0,03	0,67	1,69	41,47	13,74	26,67
Sector 4	1,00	1,81	3,29	0,46	0,04	0,56	1,50	206,51	94,12	103,15
Sector 5	1,00	1,78	4,26	0,34	0,04	0,66	1,45	125,16	42,62	78,13
Red sectorizada	1,00	1,88	3,54	0,42	0,07	0,59	1,50	871,84	368,31	440,63
Red actual	1,00	1,88	3,64	0,43	0,04	0,58	1,55	895,34	381,45	474,98

Debido a que no existen grupos de presión en la red estudiada, el indicador de contexto C1 adopta un valor igual a 1 para todos los sectores y sectorizaciones.

En cuanto a la exigencia energética de la red, representada por C2, se puede comprobar como depende directamente de las desviaciones típicas de la cota de cada sector y de la demanda del mismo. El máximo valor, igual a 1,81, se da en el sector 4 de la última sectorización planteada. Este sector presenta un valor máximo de la desviación típica y un consumo por encima de la media.

El indicador I<sub>1</sub>, exceso de energía suministrada, al igual que lo hacía la eficiencia energética vista anteriormente, puede ser utilizada para priorizar la actuación del control activo de fugas entre los diferentes sectores, obteniendo entre todas las sectorización donde se producirán más fugas y donde se puede conseguir mayor margen de maniobra.

Este indicador se deberá de ver respaldado, la hora de priorizar, con el I5 que representa cuantas veces se está entregando de más al usuario lo mínimo que se le debería de suministrar.

#### Nivel económico de fugas

En este apartado se estudiarán los conceptos expuestos en el capítulo 3 relacionados con el nivel económico de fugas y se mostrarán junto con los volúmenes fugados en el caso de conseguir una presión igual a la presión mínima, según el reglamento del servicio, en todos los nudos de consumo. Cabe hacer mención a la distinta naturaleza de los volúmenes fugados según uno y otro método, lo que imposibilita su comparación. El nivel económico de fugas tendrá un enfoque económico mientras que los volúmenes fugados según el modelo de simulación, ya sea para presiones normales de funcionamiento o para presión mínimas de servicio, vendrán dados según los parámetros hidráulicos de la red.

De los conceptos explicados en dicho capítulo 3, son tres los principales de cara al diseño de la sectorización:

- Frecuencia óptima de inversión
- Porcentaje anual de red revisada (%)
- Nivel económico de fugas

Para poder analizar con mayor detalle estos datos, tan solo se abordará la sectorización diseñada según el segundo procedimiento de optimización.

Debido a que no se conoce la distribución de acometidas a lo largo de la red, se supondrá un reparto homogéneo de estas. Además, y debido a la sensibilidad de los datos económicos necesarios para los cálculos por parte de la empresa gestora, se emplearán los valores utilizados por Lambert y Lalonde (2005). Con ello, en tabla Tabla 36 se muestra el volumen económico para cada uno de los sectores de esta sectorización suponiendo que las infraestructuras siguen un plan de mantenimiento adecuado y un correcto control activo de fugas:

Tabla 36. Volumen económico de fugas para los sectores de la 4ª sectorización planteada

	Fugas declaradas m <sup>3</sup> /día	Fugas de fondo m <sup>3</sup> /día	Fugas no declaradas m <sup>3</sup> /día	Nivel económico de fugas m <sup>3</sup> /día	FOI meses	RI %
Sector 1	6,49	38,37	219,54	264,40	16,10	74,60
Sector 2	3,67	28,17	187,59	219,44	13,75	87,30
Sector 3	0,48	10,33	112,92	123,73	8,27	145,10
Sector 4	6,01	35,53	221,27	262,82	16,21	74,04
Sector 5	5,51	30,11	211,25	246,87	15,47	77,55

Todo el volumen fugado anual se ha asignado a los nudos de consumo a través del coeficiente emisor, por ello se va a estudiar el nivel económico de fugas calculado con los volúmenes obtenido con el modelo matemático realizado de dicha sectorización.

Ahora se calculará para los mismos sectores, los volúmenes fugados según el nivel medio de presiones y los volúmenes mínimos para la presión mínima de servicio:

Tabla 37. Volúmenes fugados según la presión

	Pmedia (mca)	Volumen fugado m <sup>3</sup> /dia	Volumen fugado mínimo m <sup>3</sup> /dia
Sector 1	49,72	693,08	302,71
Sector 2	49,95	455,68	197,30
Sector 3	50,53	155,99	66,88
Sector 4	46,04	465,71	230,36
Sector 5	43,35	440,48	245,45

Se puede observar como los volúmenes fugados actuales según el modelo matemático son los mayores. Incluso la modelación de las fugas según este método y para una presión mínima de servicio da unos volúmenes mayores que los niveles económicos de fugas.

El sector 3 presenta una presión media mayor que los demás pero una menor longitud englobada y menor volumen fugado, volumen fugado mínimo y nivel económico de fugas. Pero si se dividen estos volúmenes entre la longitud de tuberías (Tabla 38) se puede observar como el volumen unitario fugado según el modelo matemático es mayor para el primer sector, tanto con presiones

mínimas como normales, destacando la gran variación que se muestra en esta última. En cambio, el nivel económico de fugas unitarios por km de tubería es mayor para el sector 3.

Tabla 38. Volumen fugado por km de tubería

	Volumen fugado m <sup>3</sup> /km/día	Volumen fugado mínimo m <sup>3</sup> /km/día	Nivel económico de fugas m <sup>3</sup> /km/día
Sector 1	49,15	21,47	18,75
Sector 2	44,27	19,17	21,32
Sector 3	42,20	18,10	33,48
Sector 4	32,44	16,05	18,31
Sector 5	33,71	18,78	18,89

Económicamente se demuestra para todos los sectores, menos para el primero, como no es rentable ponerse como meta conseguir la presión mínima de servicio en todos los nudos.

#### Coste de inversión

Para terminar con la comparativa de las sectorizaciones, se abordará la inversión necesaria para la ejecución de cada una de las sectorizaciones.

La inversión de cada uno de las sectorizaciones supondrá el siguiente presupuesto de ejecución material:

Tabla 39. Coste de inversión de cada una de las sectorizaciones

Red	PEM (€)
Sectorización Cota	100.683,17
Sectorización Material	45.369,98
Sectorización 1er proced.	52.416,67
Sectorización 2º proced.	60.455,77

## Capítulo 5.

---

### Conclusiones



## 5 Conclusiones

En toda red de distribución de agua potable se pierde gran cantidad de agua en forma de fugas. Aunque su eliminación total es imposible, es fundamental llevar a cabo conjuntamente una serie de acciones para su búsqueda y reducción, priorizando la manera de hacerlo para maximizar los resultados, es decir, conseguir una máxima reducción. Una de estas técnicas consiste en la sectorización de redes para un mayor control y localización del volumen fugado.

Con la sectorización no solo se consigue esto, sino que también se puede lograr reducir presiones medias en la red y conseguir ahorros, de hasta el 4%, en los volúmenes fugados. Evidentemente, es una reducción modesta frente la mejora hídrica-energética de otras políticas pero sí que es en cierto modo importante porque la sectorización no se plantea con este objetivo.

El diseño de los diferentes sectores es un problema muy complejo, pero abordándolo según criterios energéticos se puede ayudar a la reducción del volumen fugado. Se ha visto que tan solo en la sectorización planteada según el segundo procedimiento de optimización se produce una mejora de la eficiencia energética de toda la red y una disminución de la energía entregada al sistema.

A lo largo del trabajo se han planteado una serie de procedimientos de cálculo para el diseño de las sectorizaciones con los cuales han localizado aquellas zonas donde las eficiencias energéticas fuesen menores, y por lo tanto, mayores los volúmenes fugados ahorrados mayores con las políticas de control activo de fugas adecuadas.

Además, la metodología presentada ha introducido una serie de parámetros, como es el caso de la eficiencia energética, en la redes de distribución. Aplicando estos conceptos a los sectores de manera independiente entre sí, se da pie a un criterio de priorización en la búsqueda y reducción de fugas una vez ejecutada la sectorización elegida.

Una vez definida la sectorización y aplicando la teoría del nivel económico de fugas a cada uno de los sectores se obtiene por un lado aquellos que mayor control activo de fugas requieren, indicado según la frecuencia de intervención, y por otro lado, informa si económicamente es rentable conseguir la presión mínima de servicio en todos los nudos o imponer como límite a alcanzar una presión mayor.

Para terminar, si se hubieran seguido criterios puramente prácticos como la definición según la cota del terreno, para así estratificar la red en diferentes pisos de presión, o según el tipo de material se tendrían como resultados unos costes máximos de ejecución o un aumento en el volumen fugado.





## Capítulo 6.

---

Trabajos futuros



## **6 Trabajos futuros**

El diseño de los diferentes sectores es un problema muy complejo debido a que son muchos los factores que intervienen en ello.

En el presente trabajo se introduce la idea de la optimización automática de los sectores según criterios puramente energéticos, de tal forma que se buscan aquellas zonas que, en el escenario actual, presentan una menor eficiencia energética.

Ahora bien, al sectorizar se están cambiando los parámetros hidráulicos de todos los elementos de la red, variando ligeramente este nuevo escenario frente al actual. Por ello, un próximo refinamiento del algoritmo de cálculo podría tener presente estos cambios e introducirlos en el proceso.

En los cálculos realizados tampoco se ha tenido presente el efecto de la gestión del presión, por ejemplo con la instalación de válvulas reductoras de presión a la entrada de diversos sectores. Debido a la gran reducción que ellas conllevan en el volumen fugado se cree totalmente conveniente y de suma importancia incluir esta acción en el algoritmo de cálculo.

Los procedimientos de cálculo, tanto el primero como el segundo, indican la zonas de menor rendimiento de la red de una manera automática pero no de las tuberías que hay que cerrar o dejar abiertas para definir definitivamente los sectores, es decir, que requieren de un último paso manual para la definición de la sectorización. Como objetivo futuro de este trabajo sería el planteamiento de un nuevo algoritmo de cálculo, partiendo del presente en el trabajo, cuyo resultado final sea la sectorización lista para ejecutar, indicando cuales tuberías se deberán de cerrar y cuales pasaran a ser tuberías de suministro a los diferentes sectores.



## Capítulo 7.

---

Referencias



## 7 Referencias

- Almandoz, J., Cabrera E., Arregui, F., Cabrera Jr. E. y Cobacho, R. (2005). "Leakage Assessment through Water Distribution Network Simulation". *Journal of Water resources Planning and Management*, 131(6), 458-466.
- AWWA, American Water Works Association, (1990). *Water audits and Leak Detection*, M36. AWWA editorial, Denver, Colorado
- Biehl, W. y Inman, J. (2010). "Energy optimization for wáter systems". *Journal of AWWA*. 102 (6), 50-55.
- Boulos, P. y Bros, C. (2010). "Assessing the carbón footprint of water supply and distribution systems". *Journal of AWWA*. 102 (11), 47-54.
- Cabrera, E., Pardo M. A. y Cobacho, R., (2011). "Agua, energía y eficiencia o el inaplazable reto de la sostenibilidad (1)". VII Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua "Ríos Ibéricos +10. Mirando al futuro tras 10 años de DMA". Talavera de la Reina 2011.
- Cabrera, E., Pardo M. A., Cobacho, R. y Cabrera E. Jr., (2010). "Energy Audit of a water Distribution network". *Journal of Water Resources Planning and Management ASCE*, 136 (6), 669-677.
- Guerequeta, A. y Vallecillo, A. (2004). *Técnicas de Desarrollo de Algoritmos*. 1ª edición. Capítulo 4 – páginas 10.
- Lambert, A.O., Brown T.G., Takizawa M. y Weimer D. (1999). *A Review of performance indicators for real losses from wáter supply systems*. AQUA, Vol. 48 No 6.
- Lambert, A.O., Fantozzi M. (2005). *Recent advances in calculating Economic Intervention Frequency for active leakage control, and implications for calculation of economic leakage levels*. *Proceedings of IWA International Conference on Water Economics, Statistics and Finance*, Cret, 2005.
- Lambert, A.O. y Lalonde, A. (2005). "Using practical predictions of economic intervention frequency to calculate short-run economic leakage level, with or without pressure management." *IWA Third International Conference on Water Loss Reduction*. Leakage 2005. Halifax (Canada).
- Pardo, M.A., 2010. "Influencia de los costes del Agua y de la energía en la renovación de tuberías" *Doctoral Thesis*. Valencia. <http://hdl.handle.net/10251/8426> (In Spanish).
- Rossman, L.A. (2000). *EPANET Version 2 Users Manual*. US Environmental Protection Agency, Drinking Water Res. Div., Cincinnati.
- Thornton, J. (2003). *Managing Leakage by Managing Pressure*. *Water* 21, October 2003.
- Thornton, J. & Lambert, A. (2005). *Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: burst frequency and pressure: consumption relationships*. *Proceeding of IWA Specialised Conference 'Leakage 2005'*, Halifax, Nova Scotia, Canada.



# Anejo 1

---

## Elaboración modelo matemático de simulación

## 1 Introducción

El modelo matemático es la plataforma de partida para el cálculo hidráulico y la simulación de diversos estados que se producen en la red de distribución, con la ventaja de poder analizarlo sin tener que llegar a experimentarlos físicamente. Del resultado de dichas simulaciones se extraen luego conclusiones que quedarán reflejadas en la planificación y gestión de red.

Un modelo matemático de una red de distribución de agua es una abstracción matemática capaz de reproducir el estado del sistema físico real bajo unas condiciones deseadas. A lo largo de este anejo se va a exponer los pasos seguidos para la creación del modelo matemático de la red de distribución del municipio de Requena, para posteriormente poder simular las sectorizaciones planteadas.

La construcción de un modelo de una red hidráulica es una tarea laboriosa que requiere una metodología bien definida. Para la construcción de un modelo es necesario abordar una serie de etapas relacionadas con el trabajo de campo, técnicas de depuración de datos y simplificación, asignación de cargas, análisis de medidas, ajuste de parámetros, etc. siendo la perfecta conjunción de todas estas etapas lo que, en definitiva, garantizará la fiabilidad y los límites de utilización del modelo obtenido.

La metodología a emplear para obtener un modelo matemático de una red de distribución de agua potable podría esquematizarse en los siguientes pasos:

1. Recopilación de información de la red (cartografía, propiedades de los elementos a modelar, esquema de funcionamiento, medidas de campo, consumos, etc.)
2. Esquematización o simplificación de algunos tramos y elementos de la red real.
3. Interpolación de cotas en los nudos del modelo.
4. Análisis de los consumos registrados y reparto de los mismos a los diferentes nudos del modelo (fase de asignación de demandas).
5. Ajuste de la carga de nudos mediante el caudal producido en sistema.
6. Asignación de curvas de modulación de la demanda a los nudos del modelo.
7. Asignación de parámetros de la red tales como curvas características de las bombas, capacidad de los depósitos, consignas de las válvulas reguladoras, etc.
8. Generación de leyes de control de los elementos modelados (válvulas de regulación, bombas, depósitos, etc.)
9. Asignación de las opciones de cálculo (parámetros hidráulicos, de calidad, parámetros de reacción, tiempos de simulación y cálculo,...)
10. Simulación inicial del modelo matemático para una determinada hipótesis de carga (ej. Demanda media anual, demanda máxima del sistema, situación de incendio,...) y

comparación de los resultados de la simulación de las variables hidráulicas (presión, caudal, velocidad, pérdidas de carga,...) con valores reales medidos en el sistema real para la misma hipótesis de carga.

11. Calibración inicial del modelo en base a las medidas de campo disponibles (si es posible).

Para la red de agua potable de Requena se ha elaborado un modelo matemático con el objetivo de simular el comportamiento actual de la red, conociendo las deficiencias del sistema y verificar y simular el funcionamiento de la red bajo nuevas condiciones de sectorización, siendo capaz una comparativa entre todas las planteadas, pudiendo así obtener la que reúna mejores condiciones generales.

Confeccionar un modelo de detalle de una red sólo es viable si se cuenta con las herramientas apropiadas para ello, debido al volumen de información que se maneja, ya que no hay que olvidar que un modelo de detalle modeliza todos y cada uno de los elementos de la red.

Así pues, para generar el modelo de detalle de la red de abastecimiento de Requena, se ha empleado la extensión GISRed, descrita en el apartado anterior, que utiliza como soporte de base el programa ArcView GIS de ESRI. Con dicha aplicación se ha capturado la información de la red digitalizada en formato CAD; esta información consta del conjunto de conducciones de la red, su trazado, conectividad, y propiedades físicas más importantes. Una vez finalizada la captura de la red al sistema de información geográfica, se ha empleado de nuevo la aplicación GISRed para depurar la información, comprobar la conectividad de la red y verificar la topología de la misma. Además, la extensión ha facilitado la tarea de interpolación de las cotas en los nudos del modelo, así como la asignación de los consumos a los mismos. Finalmente, desde la extensión se ha generado el modelo de simulación en EPANET.

Para llevar a cabo todas las simulaciones hidráulicas con el modelo, se ha utilizado el programa EPANET en su versión 2.00.12.

A continuación se describe con mayor detalle la metodología empleada para la elaboración del Modelo.

## 1.1 Fases de elaboración

Seguidamente vamos a trazar, en líneas generales y escuetamente, las sucesivas etapas que conducen a la confección de un modelo:

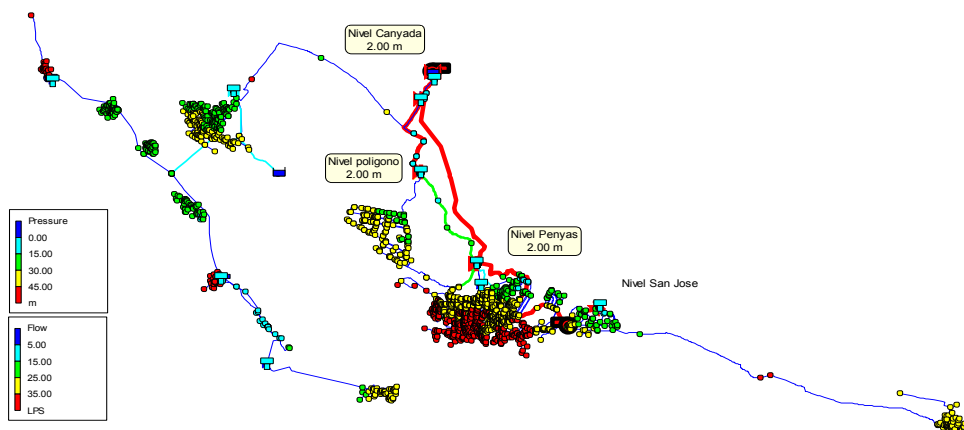
- Recopilación de información
- Esqueletización de la red (obtención de un modelo simplificado del sistema real).
- Análisis de consumos registrados y las fugas y asignación de los mismos a los diferentes nudos del modelo.
- Mediciones de parámetros de la red.

Tras esta quinta etapa estaremos ante un Modelo inicial del sistema. Será necesario comprobar la validez del mismo:

Comprobación del modelo inicial, lo que implica procesar el modelo para diferentes estados de la red, a la vez que realizar mediciones de las variables hidráulicas (presión y caudal) en el sistema real para las mismas situaciones. Las diferencias, que casi con toda seguridad, se darán entre los valores calculados y medidos nos llevarán a tener que cubrir una última etapa de ajuste del modelo para obtener el definitivo. Asimismo, el análisis de estas desviaciones puede llevarnos a encontrar errores en los datos de entrada (como por ejemplo errores en la definición topológica del sistema al tener válvulas cerradas o líneas que no conectan entre si).

Ajuste del modelo inicial, utilizando las medidas realizadas en la etapa 6, y modificando convenientemente el valor de los parámetros más “inciertos” del sistema. Generalmente estos son las rugosidades de las tuberías, los diámetros de algunas conducciones (pueden existir reducciones de diámetro) y los caudales asignados a los nudos. Esta etapa de ajuste se abordará en dos fases: un “precalibrado” y un ajuste fino del modelo.

Tras este proceso se dispondrá del Modelo final de la red.



En los párrafos siguientes se va a detallar cada una de estas etapas.

## 2 Recopilación de la información

El proceso de confección del modelo de la red de Requena comienza con la etapa de recopilación de información. En esta etapa se llevó a cabo la recopilación de la información física de todos los elementos que forman parte del modelo matemático de la red.

En el caso de tuberías, la información recopilada más relevante a efectos de modelización hidráulica fue: su trazado, diámetro interno, longitud, material y su conectividad (conexión de los nudos extremos).

En el caso de los nudos, la información fundamental hacía referencia a su cota y su demanda media a lo largo de un cuatrimestre.

Además fue necesario recoger toda la información posible acerca de los elementos de suministro de agua, tales como depósitos, pozos, así como de bombas, válvulas y otros elementos considerados importantes para la modelización dinámica de la red.

De los sistemas de almacenamiento se averiguó su ubicación, dimensiones, cota de solera, niveles máximo y mínimo, dispositivos de regulación y medida existentes, modo de operación, etc.

En cuanto a las instalaciones de producción y estaciones de bombeo se consiguió una breve descripción general de las mismas, de sus equipos de regulación y operación, de los dispositivos de medida, consumo eléctrico de las bombas, potencia máxima, caudales aproximados bombeados, etc.

A continuación se enumeran y describen estos datos de partida o información necesaria para la realización del modelo matemático.

### 2.1 Cartografía

Se han empleado planos cartográficos del término municipal de Requena, ya que la información sobre la cartografía, así como las tuberías, se encuentra almacenada en formato CAD. También se han utilizado tanto los puntos de cota como las curvas de nivel.

Toda esta información debe ser analizada y filtrada inicialmente, para seguidamente proceder a generar los temas en formato shape (formato estándar de ArcView), los cuales podrán ya ser utilizados, editados y manipulados desde el entorno SIG.



Figura A.1 - 1. Cartografía de la red

## **2.2 Topología y características de la red**

Las características de la red de agua potable están bien definidas, las tuberías están clasificadas por diámetro y material.

Tras identificar la capas del fichero CAD que contienen la información relativa a las tuberías de red, la primera etapa a llevar a cabo en la confección del modelo será caracterizar todos los elementos que configuran el sistema, en particular, tuberías, bombas, depósitos, etc., identificar el trazado de las tuberías y verificar su conectividad, para obtener un primer esqueleto de la red.

## **2.3 Producción y consumos**

Estos datos han sido facilitados por la empresa gestora del abastecimiento de Requena.

El volumen de agua producido para el abastecimiento de Requena desde Enero de 2009 hasta el final de Diciembre del 2009 fue de 2.131.473 m<sup>3</sup> registrados a través de los contadores instalados en las diferentes captaciones. Mientras que el volumen de agua facturado fue de 1.191.595 m<sup>3</sup>.

### 3 Obtención del esqueleto de la red

La primera fase a cubrir en la confección de un modelo es caracterizar todos los elementos que configuran el sistema, en particular tuberías, válvulas, depósitos, etc. determinar el trazado de las tuberías y verificar su conectividad para obtener el esqueleto de la red. El proceso seguido para obtener el esqueleto de la red de Requena es descrito en los siguientes apartados.

#### 3.1 Captura de la red desde Cad

Para la elaboración del modelo se ha partido de la información que disponemos en formato digital, un fichero en soporte CAD, donde se encuentra el trazado de la red. Asimismo se ha empleado información de la ciudad referente a calles, manzanas, puntos de cota, etc.

Las figuras siguientes muestran parte de la información de partida.

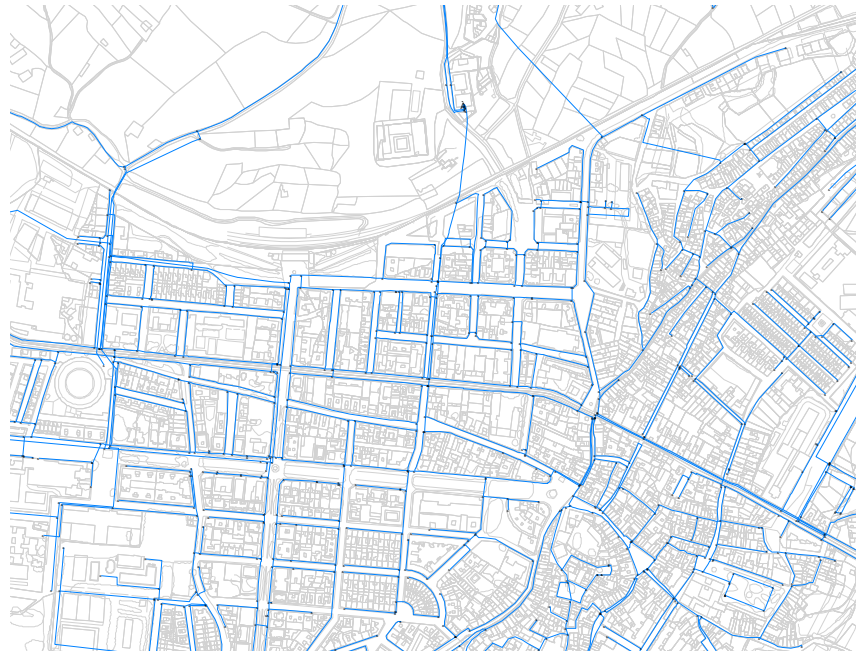
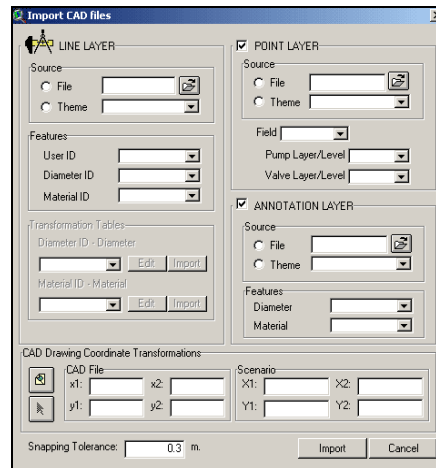


Figura A.1 - 2. Información obtenido desde los archivos Cad

La información principal a importar es el propio esquema de la red, en formato CAD, para cuya transformación a formato shape se ha utilizado la aplicación GisRED que es capaz de reconocer el diámetro de las tuberías e incluirlo como un campo más en la base de datos asociada a la información geográfica. A continuación se muestra el diálogo de la aplicación que guía al usuario en la tarea de importación de los datos:





GisRED identifica las líneas del fichero de CAD y a su vez añade nudos en los extremos de las mismas, además une aquellos extremos de línea que quedan dentro de un cierto rango de tolerancia, por lo que al final de la importación se obtiene un tema de ArcView con una topología provisional, ya que a dicho tema se le deberán aplicar finalmente las diferentes herramientas de depuración.

Tras la captura del esquema de la red se obtiene una vista como la siguiente.

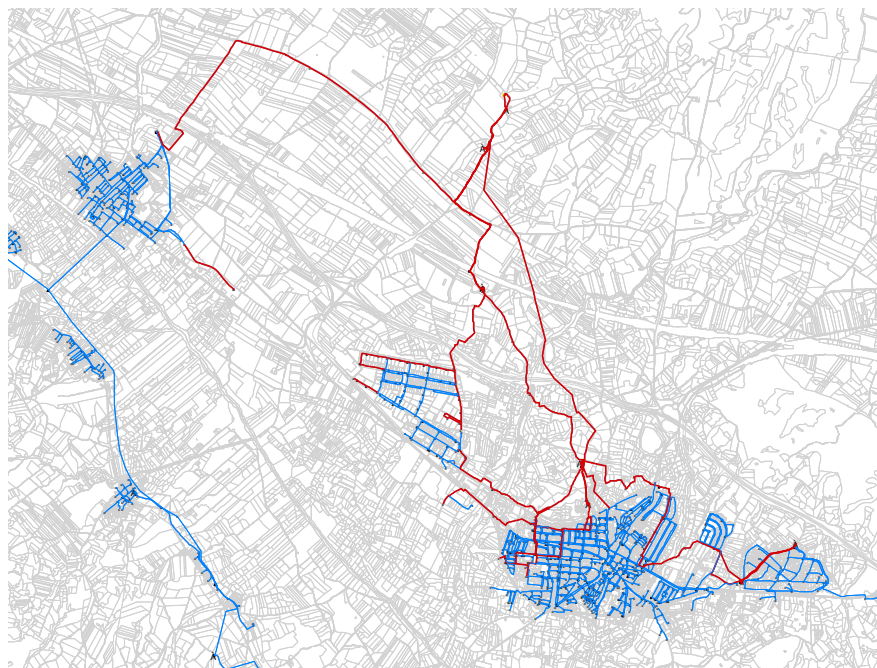


Figura A.1 - 3. Esquema de la red en formato shape

### 3.2 Captura de temas auxiliares

Los temas auxiliares se han obtenido a partir de las capas del fichero de CAD que no hacen referencia ni a la red de agua ni a los puntos de cota. Cada una de estas capas ha sido convertida al formato shape, propio de ArcView, para así servir de apoyo a la hora de obtener la red.

Se han diferenciado diversos temas auxiliares, entre los que se incluyen válvulas manuales de corte, fondo de situación, manzanas y parcelas.

### 3.3 Detección de errores

Tras la importación del fichero CAD original, se ha obtenido un esquema de la red, cuya representación gráfica se encuentra en el formato propio de ArcView. Las propiedades físicas que se han podido obtener a partir del fichero CAD se encuentran almacenadas en la base de datos propia de la aplicación.

Es necesario realizar ahora un proceso de depuración de la información contenida en la base de datos, ya que entre los trazados o las características hidráulicas de los elementos importados pueden existir errores aparecidos durante la importación o bien del propio CAD. Para ello se cuenta con una serie de herramientas especialmente concebidas, que permiten ir tipificando y localizando cada uno de los errores considerados. Otra de las comprobaciones a llevar a cabo es la referente a la conectividad de la red. Para ello la aplicación dispone de un módulo que es capaz de detectar las desconexiones existentes en una red y determinar las subredes que como consecuencia se derivan.

En primer lugar se ha empleado una herramienta de verificación de la información, que se puede aplicar en cualquier momento y que permite detectar la existencia de errores. Esta herramienta ha permitido, tras sucesivas pasadas, asegurar que la información finalmente contenida en la base de datos de la aplicación está completa y es coherente.

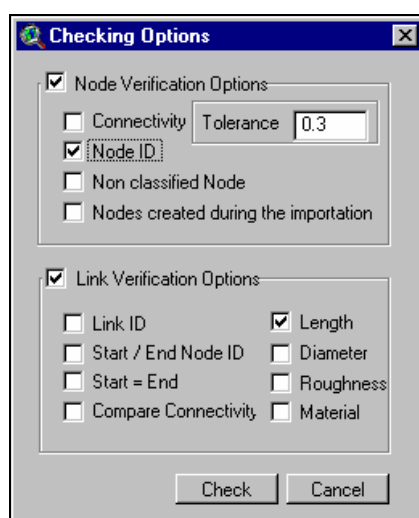


Figura A.1 - 4. Herramientas de verificación de la información

Con esta herramienta, como se ve en la figura anterior, es posible escoger el tipo de información a verificar. Gracias a ella se pueden detectar diferentes errores en los atributos de nudos y líneas o en la conectividad de la red. Tras la comprobación, se genera un informe con los resultados del proceso y una tabla que contiene un desglose individual de los errores detectados.

Las tablas de errores resultantes de la importación permiten una sencilla localización y caracterización de cada uno de los errores detectados. Cada uno de sus registros incluye una identificación del elemento erróneo y una breve descripción del error.

Revisando estas tablas se pueden ir corrigiendo los errores uno a uno, para lo cual se ha desarrollado un navegador que recorre los temas de errores y permite la realización de un barrido sobre cada uno de los registros de la tabla. Así, los elementos de la red (líneas o nudos) que contengan errores son modificados para solventar la anomalía.

La siguiente figura muestra un detalle del navegador anteriormente descrito. Como se observa al iniciar la utilidad de navegación sobre un tema de errores, además de la ventana característica del escenario activo, se abre otra que contiene un detalle del error seleccionado (o en su defecto del primero de la lista). En esta ventana es posible recorrer uno a uno los registros de la tabla de errores así como proceder a su borrado según van siendo subsanados.

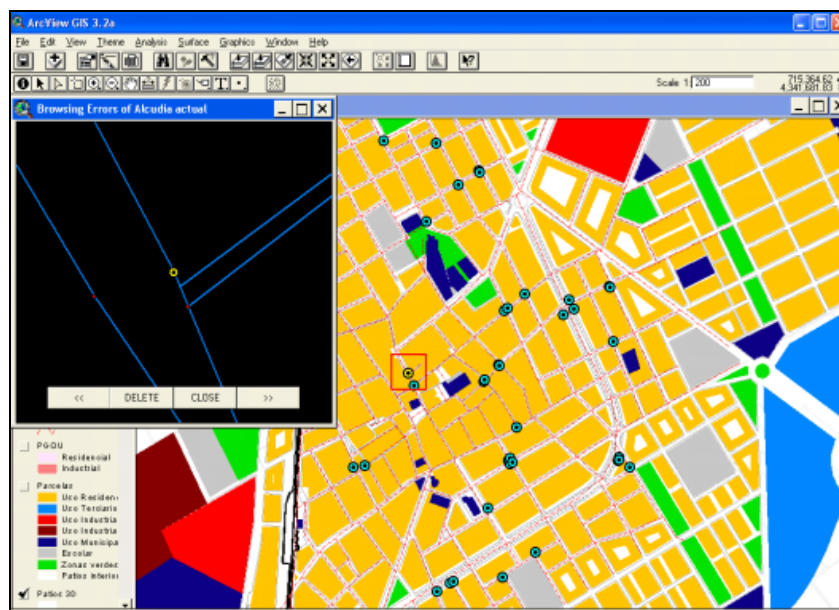


Figura A.1 - 5. Navegador del tema de errores en nudos

Una vez corregidos todos los errores detectados, se comprobó la conectividad de la red. En un primer intento, aparecieron diversas subredes fruto de las desconexiones existentes. Dichas desconexiones se debían fundamentalmente a errores de digitalización en el CAD.

### 3.4 Asignación de cotas

Hasta este punto se dispone de un modelo de la red hidráulica, pero tras la importación los nudos del modelo todavía no tienen ninguna cota asignada. Se ha automatizado el proceso de asignación de cotas a los nudos del modelo, debido al gran volumen de nudos que configura el modelo de la red.

Los planos disponían de información referente a los puntos de cota y a curvas de nivel, y con estos valores ha sido posible generar una superficie de interpolación empleando el método de las distancias inversas implementado en la extensión Spatial Analyst de ArcView. Una vez generada esta superficie de interpolación, es posible asignar un valor de cota en cada uno de los nudos de la red modelizada.

La siguiente figura muestra la superficie de interpolación obtenida a partir de la mencionada nube de puntos.

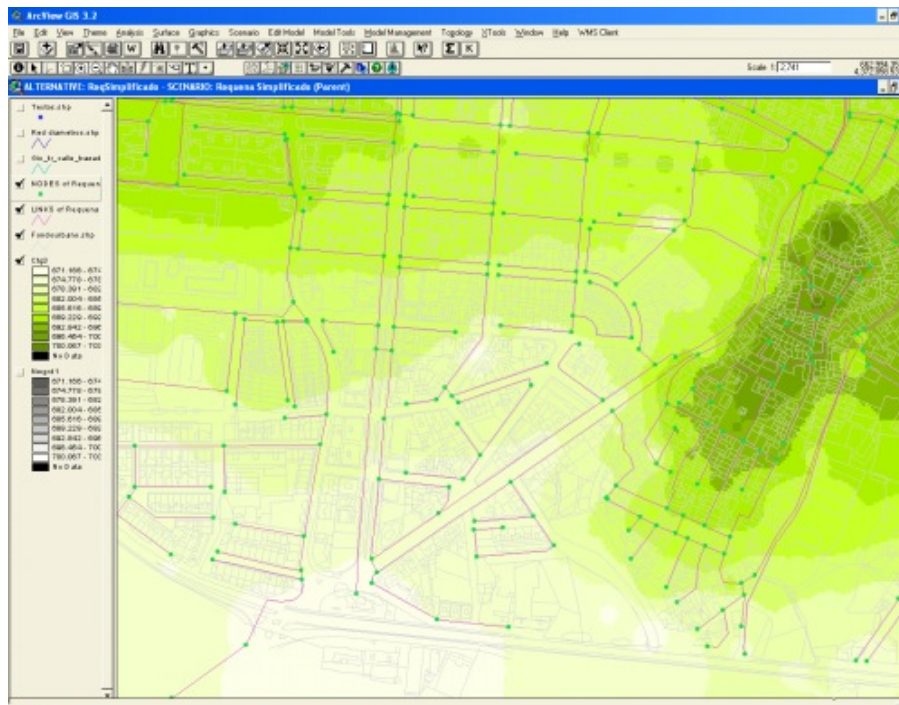


Figura A.1 - 6. Superficie de interpolación

Como se puede observar en la figura anterior la totalidad de la red de distribución está contenida dentro de la cuadrícula de interpolación de modo que sea posible asignar a cada uno de los nodos de la red su correspondiente cota. Para ello, y de forma análoga a otras propiedades de elementos constitutivos de la red, se han empleado herramientas específicas que facilitan el proceso de interpolación de cotas.

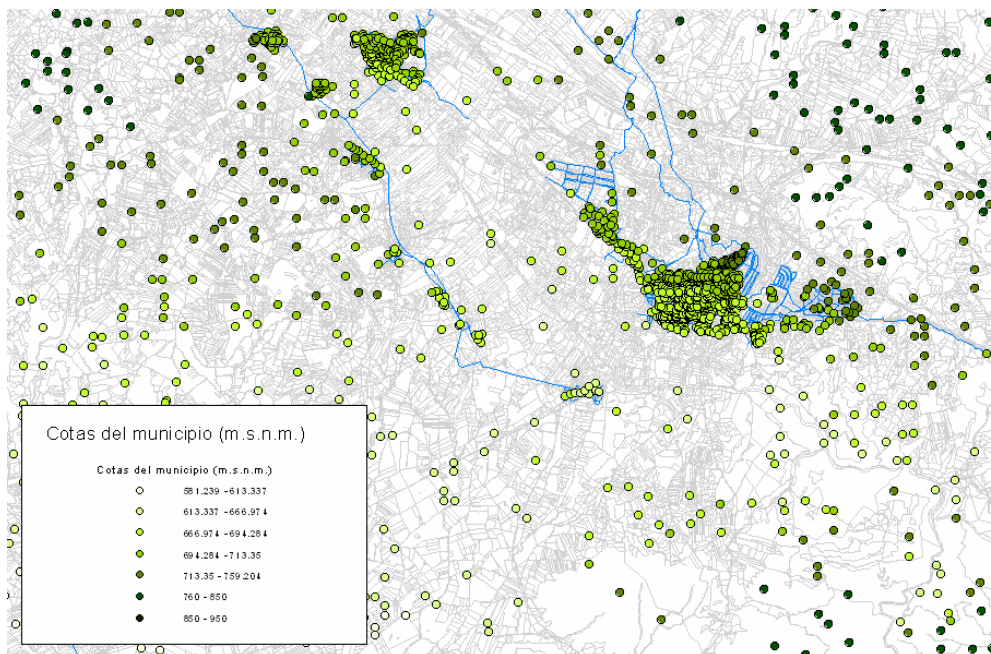


Figura A.1 - 7. Obtención de las cotas del terreno





## 4 Asignación de consumos

Esta es una de las etapas clave dentro del proceso de construcción del modelo matemático de una red de distribución de agua. Dada la componente espacial de esta tarea. Entre ellas cabe la posibilidad de conectar con bases de datos o ficheros externos conteniendo información acerca de los consumos recopilados por calles, por acometidas, etc.

La asignación de los consumos se ha realizado por calles, donde existe información del consumo, el cual se ha mostrado anteriormente. A partir del callejero creado al efecto, con una estructura predefinida y el tema de nodos de la red, se obtiene un tema que relaciona aquellos nodos pertenecientes a tuberías con diámetro menor o igual a 100 mm. con el segmento de calle más próximo. Una vez identificados los nudos que se van a cargar, y utilizando para ello la herramienta de asignación de consumo de la aplicación empleada, se carga el conjunto de la red.

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

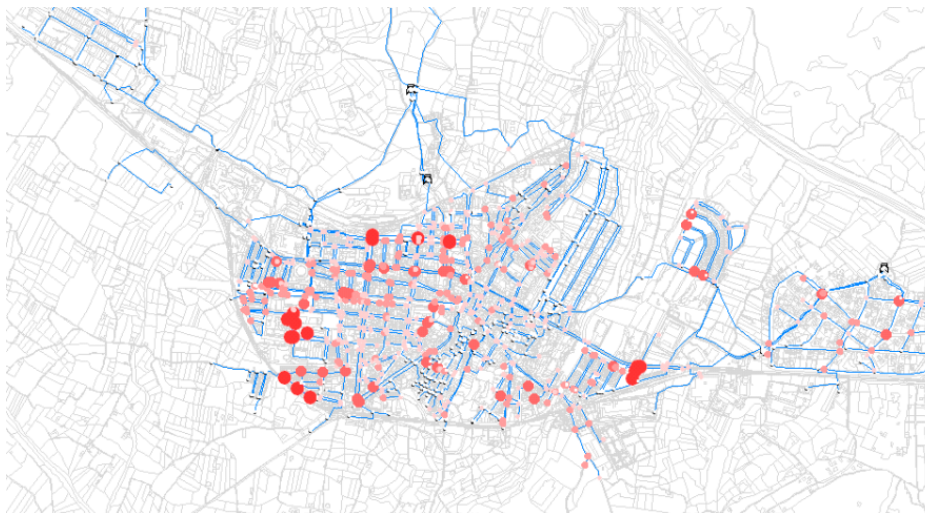


Figura A.1 - 8. Demanda asociada a cada nudo

Para tener en cuenta la variación de la demanda a lo largo de un período de tiempo (para los estudios realizados el periodo de tiempo suele ser de uno o varios días a lo sumo), se fijó una curva de modulación tipo para el casco urbano, otra para las zonas de urbanizaciones y otra para las áreas industriales.

Los caudales de fuga nodales se determinan admitiendo que son proporcionales tanto a la presión del nudo como a la longitud de las tuberías que en él convergen (hipótesis de distribución uniforme) e imponiendo, además, el cumplimiento de la ecuación de continuidad. Cada fuga nodal se caracteriza con su correspondiente coeficiente de emisor cuyos valores se determinan

mediante según el proceso descrito en Almandoz y col. (2005). Dichos coeficientes para cada nudo son los siguientes:

El dimensionado de cada emisor se ha realizado siguiendo a Rossman (2000), según la siguiente ecuación:

$$q_{ii}(t_k) = C_E \cdot \Delta H^\alpha$$

Donde  $C_E$  ( $m^{3-\alpha}/s$ ) es el coeficiente del emisor asignado a cada nudo del sistema,  $\Delta H$  (m) representa el salto de presiones que experimenta el agua al atravesar el orificio de fuga y  $\alpha=0,5$  es el exponente de emisor que representa las características propias del material de la tubería y que adopta valores diferentes según el tipo de material de la tuberías.

## 5 Generación del fichero de entrada de datos de epanet

Una vez construido el modelo de la red de Requena y una vez determinados los consumos en los nudos y su modulación el modelo puede exportarse a un formato interpretable por el simulador EPANET o bien lanzar una simulación desde el propio entorno SIG una vez definidas todas las opciones de análisis. De esta forma los resultados de la simulación pueden interpretarse desde EPANET.

Primeramente se realizó una exportación desde la aplicación generando un fichero de texto con extensión INP. El fichero contiene una serie de secciones que EPANET interpreta y representa en su interfaz. El aspecto que ofrece el modelo de la red de agua potable, una vez exportada al simulador EPANET 2, es el que puede observarse en la figura siguiente.

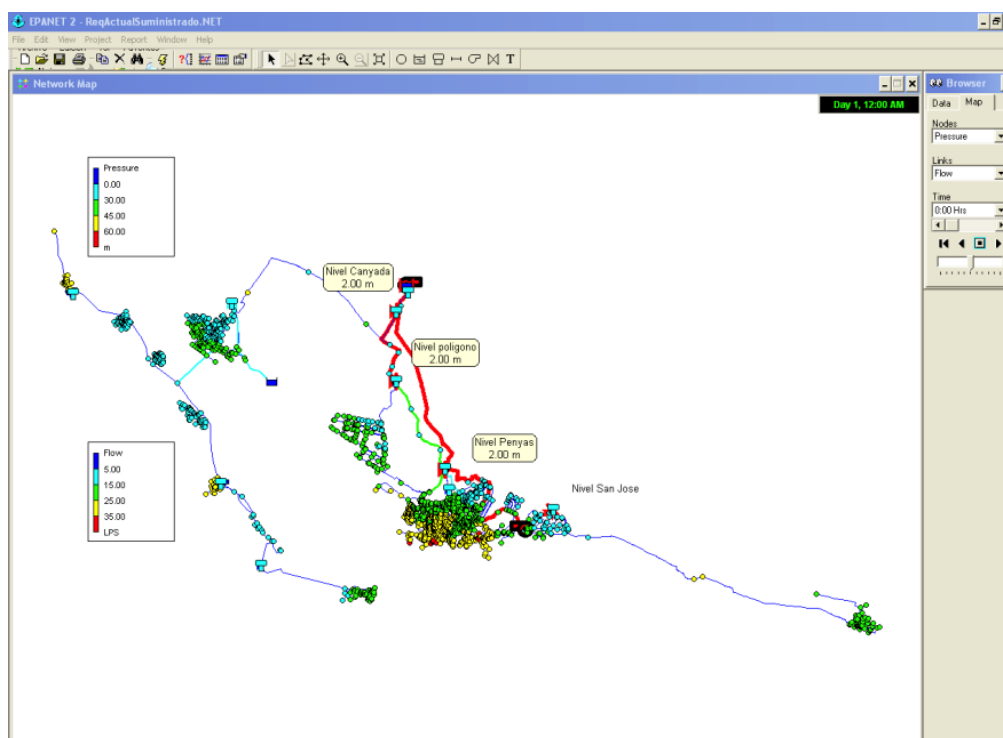


Figura A.1 - 9. Red de agua potable de Requena en Epanet

### 5.1 Calibración del modelo matemático

En base a las medidas de presión facilitadas por el delegado del grupo de Aguas de Valencia de agua potable de la zona de Requena y con el objetivo de obtener una mayor fiabilidad en el modelo a la hora de interpretar y asumir resultados tras una simulación hidráulica, se ha llevado a cabo una calibración del mismo. A fin de obtener un nivel de presiones en el modelo matemático similar al de las lecturas efectuadas in situ sobre la red de Requena, se han ajustado los parámetros de rugosidades de tuberías. Con todo, el resultado final es un modelo de red que proporciona un primer diagnóstico del estado del sistema en cuestión, y que permitirá llevar a cabo en la explotación del servicio, y la comparativa de las diferentes sectorizaciones estudiadas en este estudio.



## Anejo 2

---

### Análisis y diagnóstico de la red actual

## 1 Análisis y diagnóstico del comportamiento de la red

Tras seguir los pasos planteados en el Anejo 1, se construye un modelo matemático lo bastante fiable y calibrado para la realización a fondo del comportamiento hidráulico de la red, al tiempo que se efectúa un diagnóstico del estado de la misma. Este paso se considera fundamental para abordar posteriormente los alternativos procesos de sectorización de la red, en los cuales se tendrán en cuenta el anterior diagnóstico, a fin de corregir en la medida de lo posible los problemas detectados si lo hubiere.

Como ya se ha comentado, el objeto de este análisis es el posterior estudio comparativo de las diferentes sectorizaciones planteadas. Por ello, se estudiará la red durante un día de comportamiento medio, para el cual se realizarán dos tipos de análisis:

1. Análisis estático: donde se analizará la hora punta y valle.
2. Análisis dinámico: donde el objetivo es analizar el comportamiento en los nudos y líneas del sistema a lo largo de las 24 horas. De esta manera, se podrá caracterizar con mayor precisión el funcionamiento de la red y ver como evolucionan a lo largo del día los distintos parámetros.

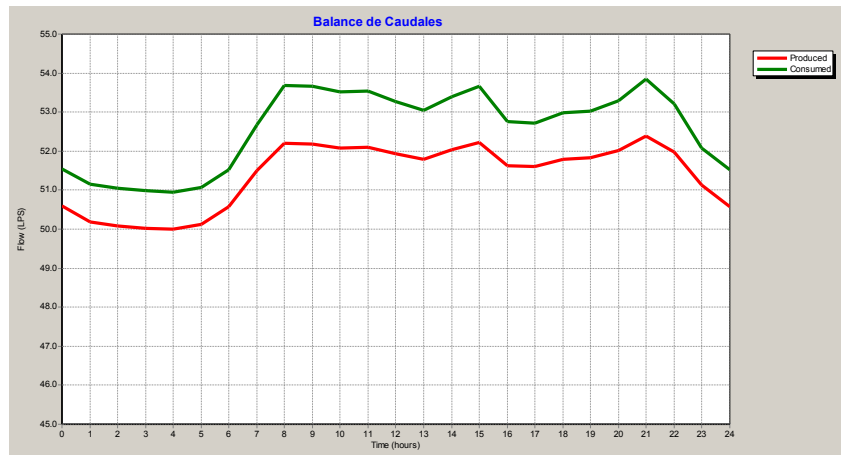
Cabe recordar que del total de la red de distribución del municipio de Requena, tan solo se centrará el presente estudio en la red de abastecimiento al casco urbano por ser la única, desde el punto de vista de la sectorización, con mayor sentido y complejidad.

### 1.1 Balance global de caudales en el sistema

Una de las condiciones que se debe dar en el modelo para una simulación prolongada a varios días, si éste está bien ajustado, es que la suma total del volumen consumido en el sistema debe coincidir con el volumen producido o inyectado al mismo.

En la figura siguiente se observa cómo para el esquema de funcionamiento actual de la red del casco urbano de Requena, el consumo total del sistema sigue la tendencia que marca el valor de la demanda a lo largo de 24 horas. El caudal producido, puesto que los depósitos de cabecera se han modelado como embalses pero los depósitos de regulación no, no coincide con el caudal consumido, siendo algo menor.

La siguiente gráfica ilustra el caudal suministrado desde cada uno de los puntos de producción a lo largo del día:



## 1.2 Análisis de caudales

Una de las variables a analizar cuando se pretende proporcionar un diagnóstico del funcionamiento de la red es el caudal circulante por las principales arterias del sistema objeto de estudio. De este modo quedará de manifiesto qué tuberías son las que transportan mayor cantidad de agua y cuáles son los principales caminos que recorre el agua a lo largo del sistema.

Aun así, el estudio de caudales circulantes por la red de distribución no merece menor atención. Dicho análisis pondrá de manifiesto aquellas pequeñas tuberías de distribución con la capacidad hidráulica sobreexplotada.

A continuación se muestra la red del casco urbano de Requena clasificadas por caudales para la situación de hora máximo consumo:

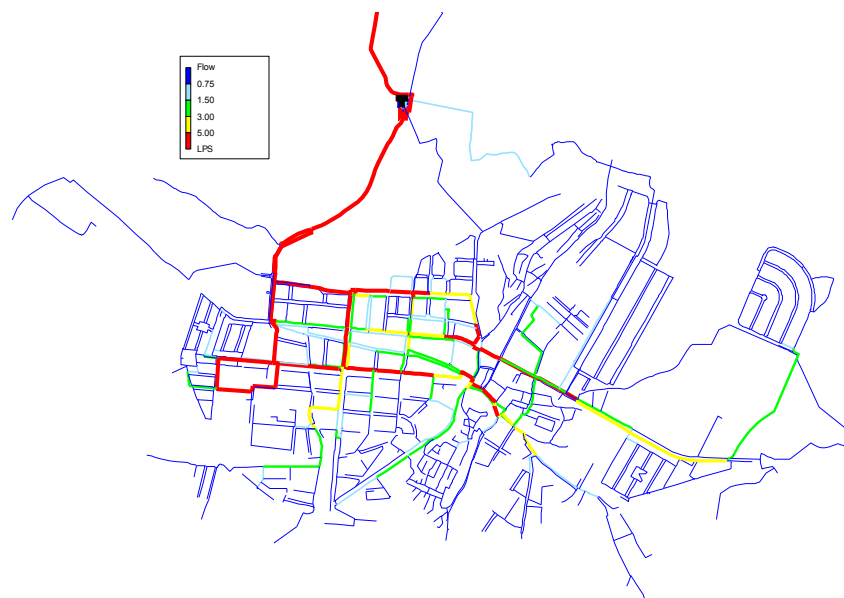


Figura A1 -1. Caudales en las tuberías del sistema en hora punta

De la figura se desprende que aquellas tuberías con mayor diámetro, que conforman la red arterial, son la que transportan mayor volumen de agua por unidad de tiempo. Por el contrario, aquellas con menores diámetros poseen caudales circulantes menores.

Si se observa la distribución de los anteriores caudales en dicha hora punta:

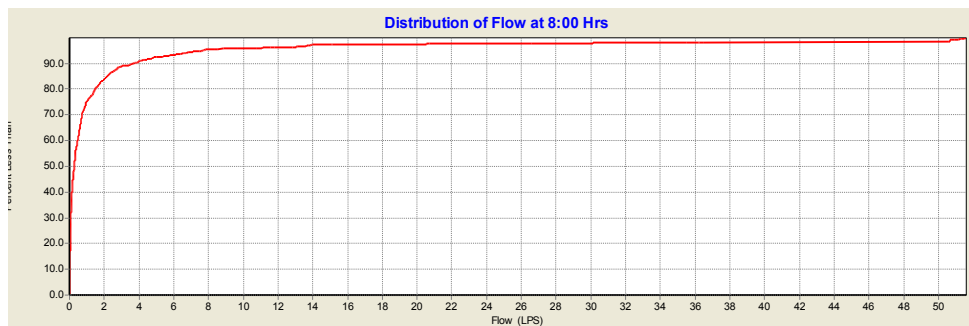


Figura A1 -2. Distribución del caudal para las 8:00 horas

Se puede apreciar como el 80% de las tuberías presentan un caudal inferior a los 2 l/seg, de las cuales el 50% apenas ronda los 0,1 l/seg.

En cambio, al estudiar la misma distribución para la hora de mínimo consumo del día, el 85% de las tuberías no sobrepasa el umbral de los 2 l/seg, y el 55% de este grupo con unos caudales del orden de los 0,1 l/seg.

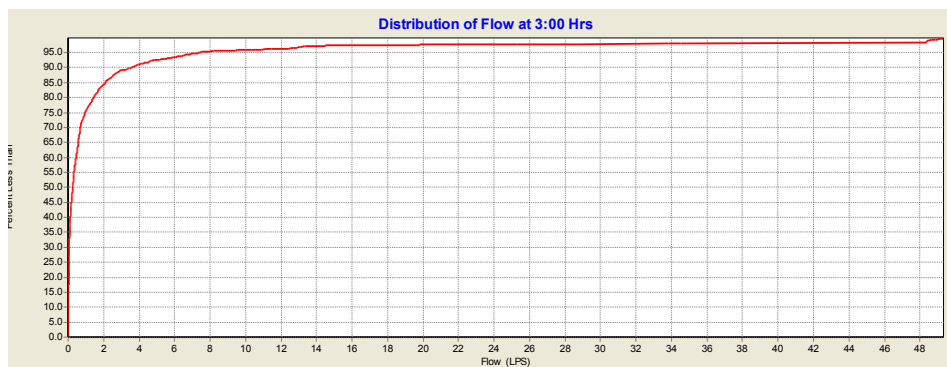


Figura A1 -1. Distribución del caudal para la hora de mínimo consumo

### 1.3 Análisis de velocidades

Tras una simulación a 24 horas del modelo matemático confeccionado para la situación actual bajo condiciones de demanda del día de máximo consumo del año, se muestran las velocidades máximas en las tuberías. Se observa como la velocidad de circulación del agua es inferior a 1 m/s (velocidad de diseño) en la mayoría de las conducciones. De hecho, la curva de distribución indica que prácticamente el 98% de las tuberías de la red tienen velocidades inferiores a 1 m/s en hora punta del día medio, con lo cual es evidente que en general las pérdidas de carga en el sistema no son demasiado acusadas a tenor de estos valores de velocidad. No obstante, existen tuberías aisladas con velocidades relativamente altas en las que la pérdida de carga es considerable.

En cuanto a las velocidades, se tiene lo siguiente para la hora de máximo consumo:

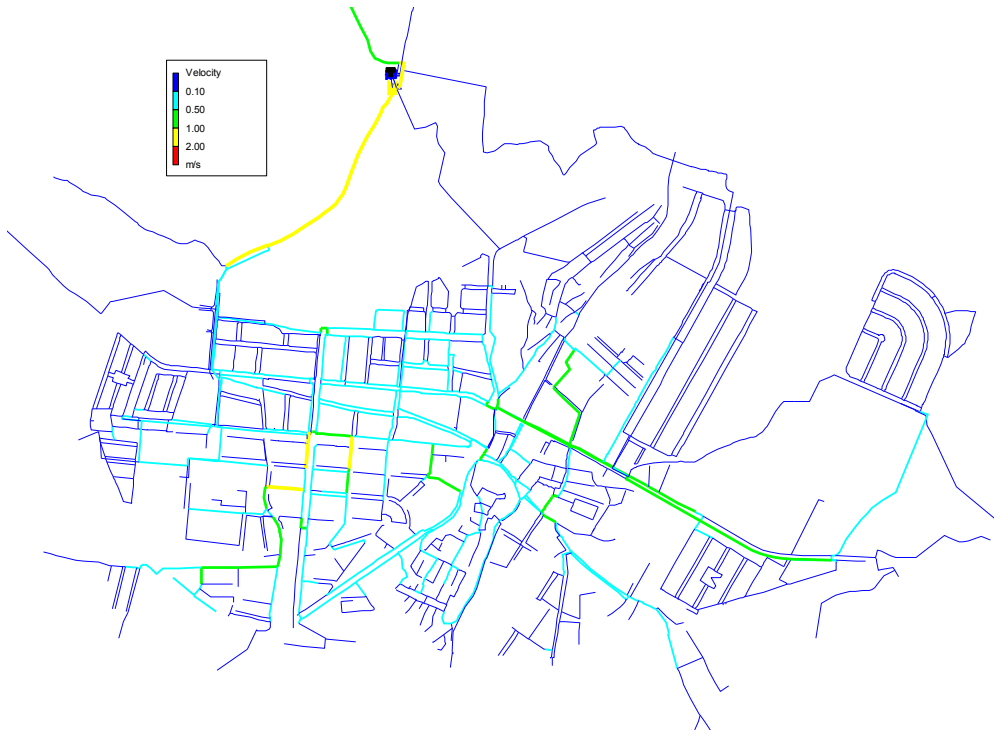


Figura A1 -2. Velocidades en las tuberías del sistema en hora punta

Se observan ciertas tuberías de distribución de bajo calibre, que presentan velocidades entre los 1 y 2 m/seg.

Al igual que para los valores de los caudales circulantes, a continuación se adjunta la curva de distribución de velocidades para el momento de máximo consumo:

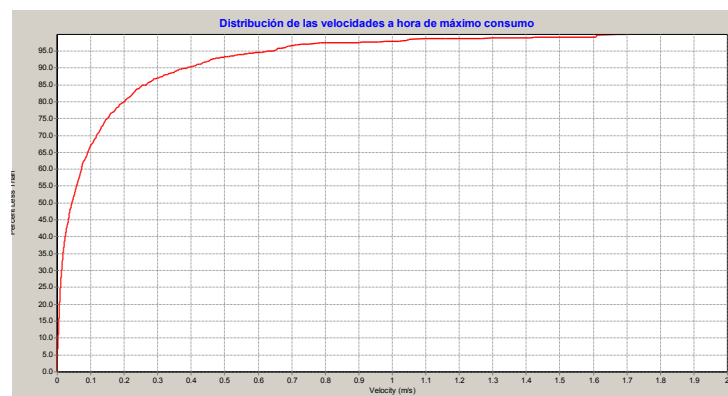


Figura A1 -3. Distribución de las velocidades en hora punta

La curva de distribución indica que prácticamente el 95% de las tuberías de la red tiene velocidades inferiores a 1 m/seg, con lo cual es evidente que las pérdidas de carga originadas por las altas velocidades no serán demasiado acusadas.

En definitiva, las velocidades obtenidas a partir del modelo son aceptables, llegando a ser excesivamente bajas en algunas tuberías ramificadas. En estos casos, lo que ocurre es que se infrutiliza la capacidad de transporte de las mismas.

El empleo de herramientas de asignación automática de demandas sobre los nudos del modelo también puede influir en el hecho de que aparezcan velocidades bajas a lo largo de toda la red. En general, esto no resulta tan preocupante en la red real, ya que las velocidades suelen ser siempre algo mayores.

Los valores de las velocidades en las diferentes tuberías, al igual que ocurría con los caudales no presentan una gran variación.

### 1.4 Alturas piezométricas y pérdidas de carga unitarias

Tras una simulación, el análisis de las alturas piezométricas en los nudos de la red nos permite obtener conclusiones acerca de la pérdida de carga a lo largo de los tramos más críticos y por tanto, nos ayuda a localizar los estrangulamientos o ‘cuellos de botella’ existentes, donde el flujo de caudal puede llegar a ser excesivo.

El análisis de las alturas piezométricas en la red en hora punta presenta una disminución lógica en el sentido de circulación del flujo, es decir, desde los puntos de producción hacia las zonas terminales de la red, influenciado mayoritariamente por la cota y las pérdidas ocasionadas.

En las siguientes imágenes se muestran las alturas piezométricas en los nudos de la red del casco urbano de Requena para la hora de máximo consumo y el mapa de isolíneas de este mismo valor e instante.

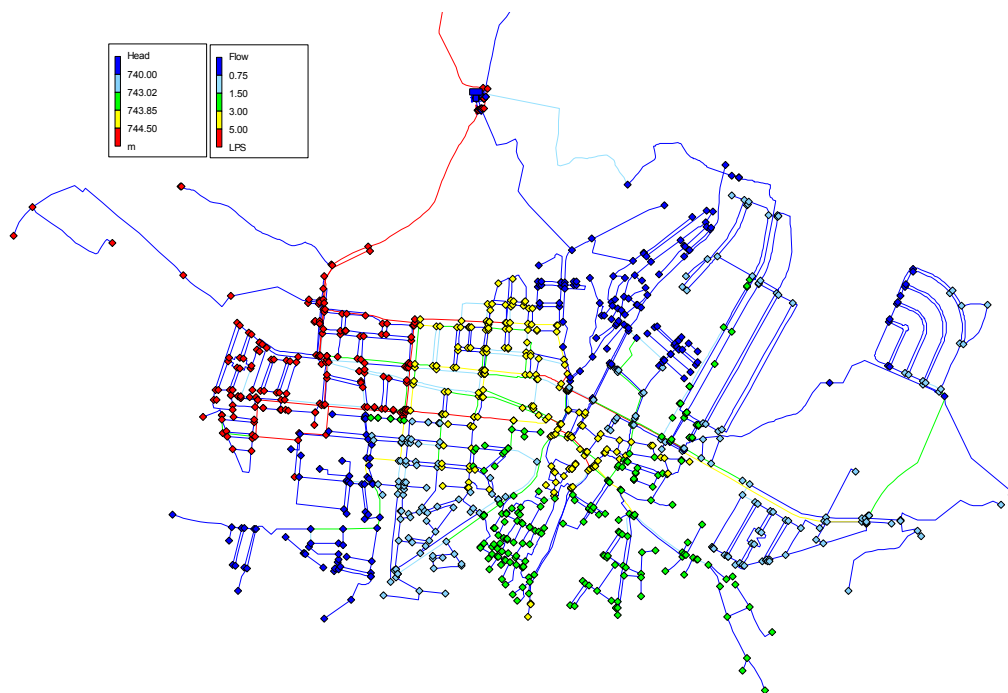


Figura A1 -4. Alturas piezométricas en los nudos para las 8:00 h.

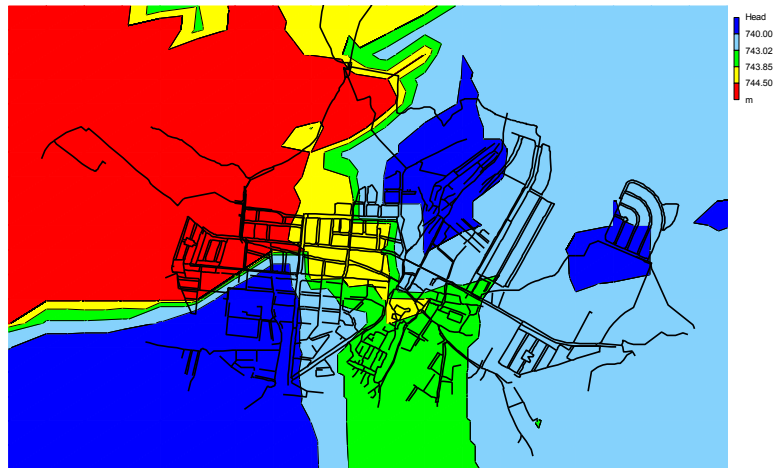


Figura A1 -1. Mapas de isólinas de las alturas piezométricas para las 8:00 horas

En general se observan alturas piezométricas considerablemente altas en la zona noroeste y franja central del casco urbano, lo que resulta normal puesto que se trata de las zonas de mayor cota del núcleo urbano. Sin embargo hay que destacar la zona ubicada al noreste y suroeste debido a sus menores valores de elevación.

La siguiente figura muestra las pérdidas de carga máximas en la red del casco urbano. En color rojo se muestran las tuberías que presentan la máxima pérdida de carga unitaria.

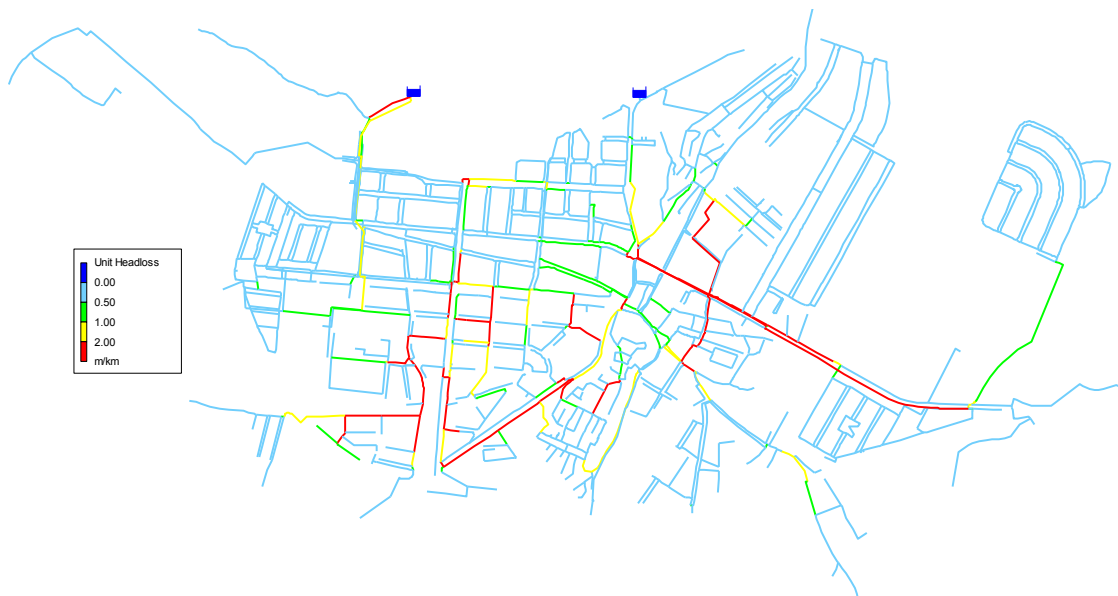


Figura A1 -2. Distribución de las pérdidas unitarias a la hora de máximo consumo

Es conveniente diferenciar las pérdidas de carga originadas en las tuberías de transporte y en las tuberías de distribución, ya que los límites que se consideran como admisibles varían entre ellas. Para el caso de las tuberías de distribución, el límite se encuentra en 1 m/km, mientras que para las tuberías de transporte se admiten pérdidas de 5-20 m/km, dependiendo del diámetro de dichas tuberías.

Aquellas tramo de la red de distribución cuyas pérdidas sean superiores a 1 m/km, habrán de ser considerados con especial atención puesto que ante un aumento de la demanda de originarán pérdidas muy importantes pudiendo así afectar la calidad del servicio.

En dichas tuberías la probabilidad de que aparezcan pérdidas de carga importantes y de que las velocidades de flujo sean excesivas, es muy alta, con lo cual se propone la sustitución progresiva de estos tramos con prioridad en aquellas tuberías de fibrocemento, comenzando por las tuberías que afectan al casco antiguo.

Otra forma de observar las pérdidas unitarias del sistema es mediante la curva de distribución de este parámetro. Se puede observar como alrededor del 90% de las tuberías tienen una pérdidas de carga inferiores a 2m/km.

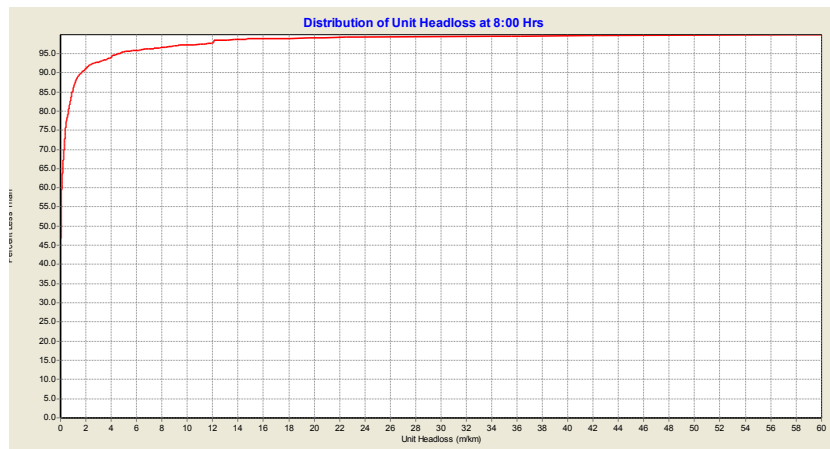


Figura A1 -3. Distribución de los niveles de pérdidas unitarias en la tuberías para la hora punta

En horas valle, las alturas piezométricas son algo superiores debido a las menores pérdidas de carga que se producen a lo largo de la red. La siguiente figura muestra las distribuciones de las pérdidas unitarias en horas valles, ligeramente inferiores a las anteriores:

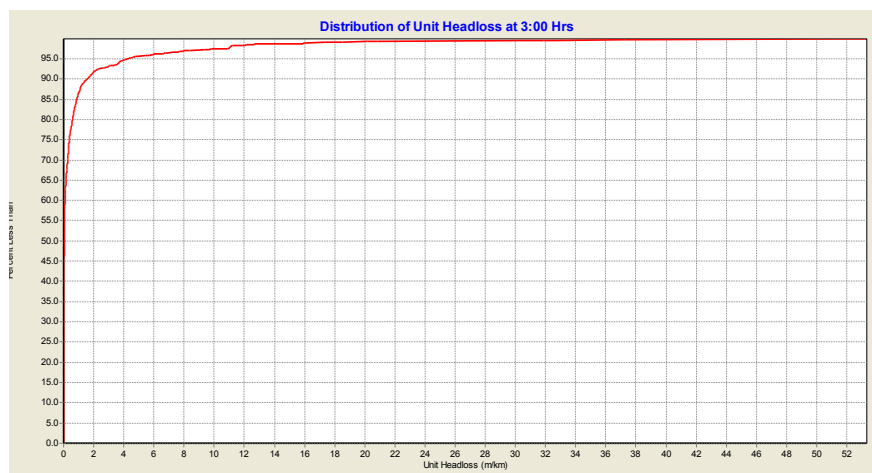


Figura A1 -1. Distribución de los niveles de pérdidas unitarias en la tuberías para la hora de mínimo consumo

Tras el análisis de la evolución de las alturas piezométricas y las pérdidas unitarias de carga en el sistema, es posible detectar tuberías cuyas pérdidas de carga son realmente elevadas.



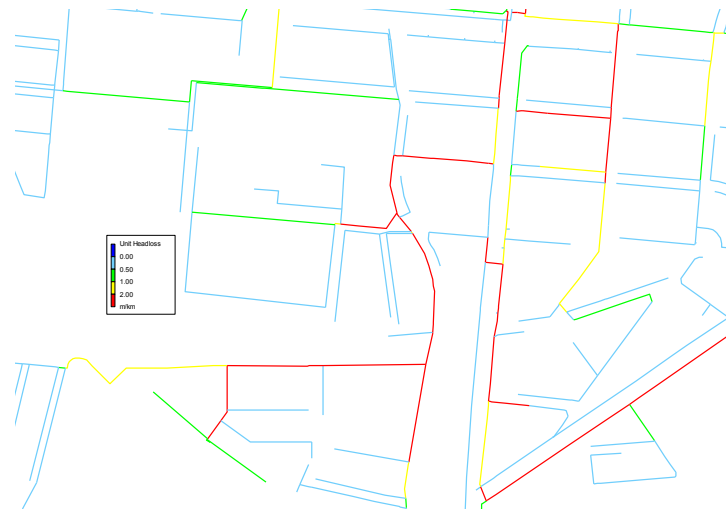


Figura A1 -2. Detalle del casco urbano para las pérdidas unitarias

A pesar de ser tramos de pequeña distancia, es importante tenerlos localizados ya que constituyen “cuellos de botella” en la red, de manera que ante un aumento de la demanda las pérdidas de estos tramos aumentarán considerablemente pudiendo originar zonas con presiones insuficientes.

Para una correcta sectorización se deberán aumentar los calibres de estos cuellos de botella o buscar vías alternativas de suministro para reducir las pérdidas por fricción.

### 1.5 Distribución de presiones

Otra de las variables principales a analizar cuando se pretende proporcionar un diagnóstico del funcionamiento de la red es el nivel de presiones. En este caso, va a estar fuertemente ligado a la orografía del terreno.

La siguiente imagen se corresponde con el mapa de presiones de la red de distribución del casco urbano de Requena:

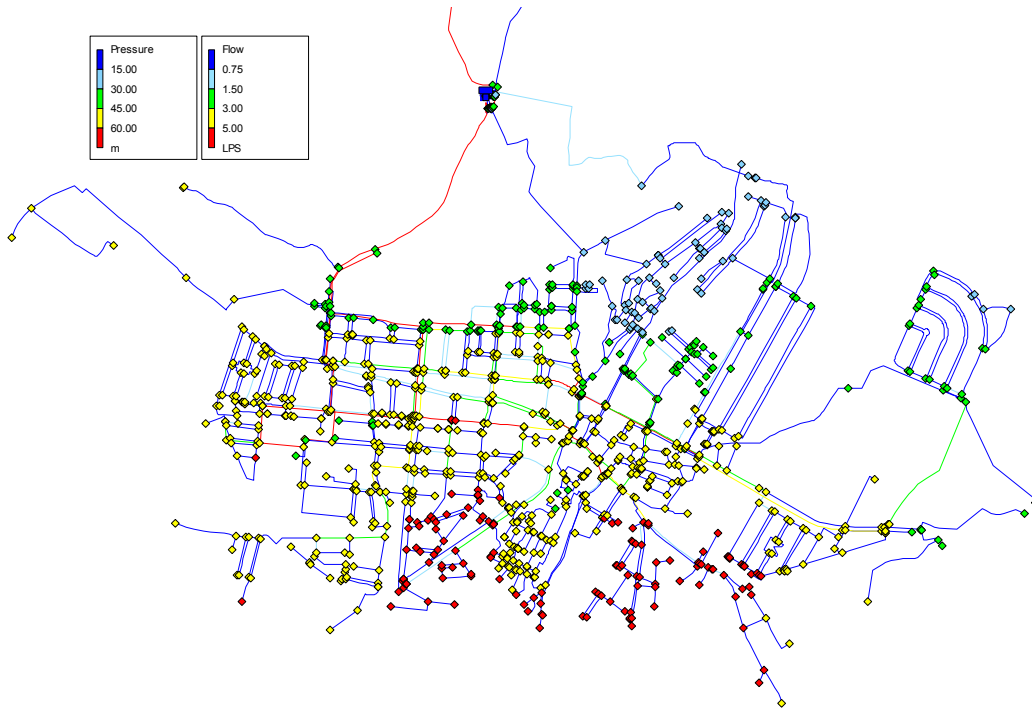


Figura A1 -3. Niveles de presiones en los nudos para la hora punta

Al analizar la distribución de presiones en la red, se puede afirmar que el sistema de distribución de agua potable de Requena presenta unos niveles de presión considerablemente altos en torno a los 4,5 kp/cm<sup>2</sup>. Las zonas que menores presiones presentan en horas punta son las zonas del noreste, con presiones en torno a los 20 mca en hora punta.

En general, los valores de presión en los nudos del modelo en hora punta, se encuentran entre los 20 y 65 m.c.a, con lo que comprobamos la disparidad de presiones dependiendo de la zona de la red. El 50% de los nudos de consumo posee una presión de servicio en hora punta por encima de los 50 m.c.a, encontrando un 5% de puntos con presiones inferiores a los 25 mca en horas de máximo consumo.

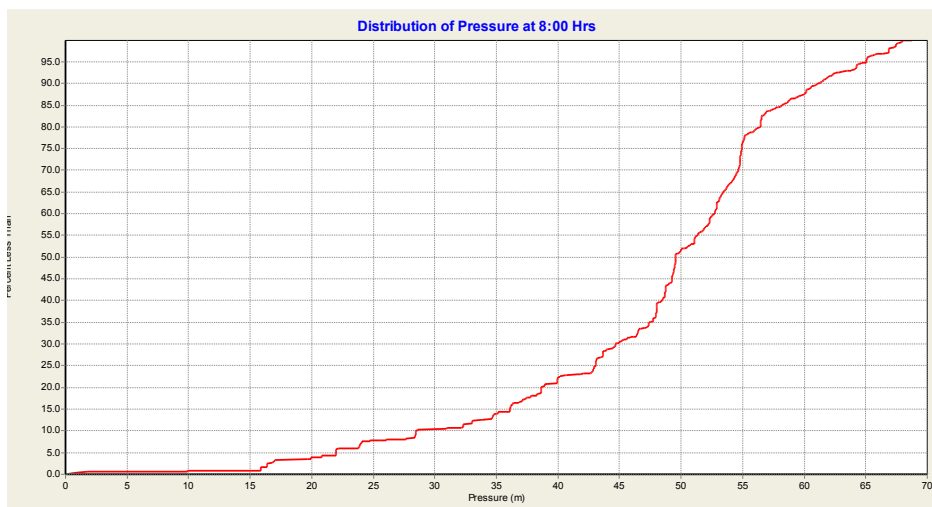


Figura A1 -4. Distribución de las presiones en los nudos durante la hora de máximo consumo

Durante las horas nocturnas (entre las 4 y las 6 am), el nivel de presiones es superior. Si comparamos ahora las presiones de los nudos con las de las horas diurnas, vemos como en horas nocturnas alcanzan valores de presión algo superiores 3 ó 4 mca por encima como mínimo, aunque existen zonas donde la diferencia de presiones puede llegar a alcanzar los 5 mca. Esto puede provocar una ligera **fatiga mecánica en las tuberías**, lo que resulta pernicioso en tuberías instaladas de cierta antigüedad, ya que suele originar **grietas y roturas** que dan lugar a fugas importantes en la red.

A continuación se muestran las presiones en los diferentes nudos de la red de distribución para las horas valle y la curva de distribución para el citado periodo:

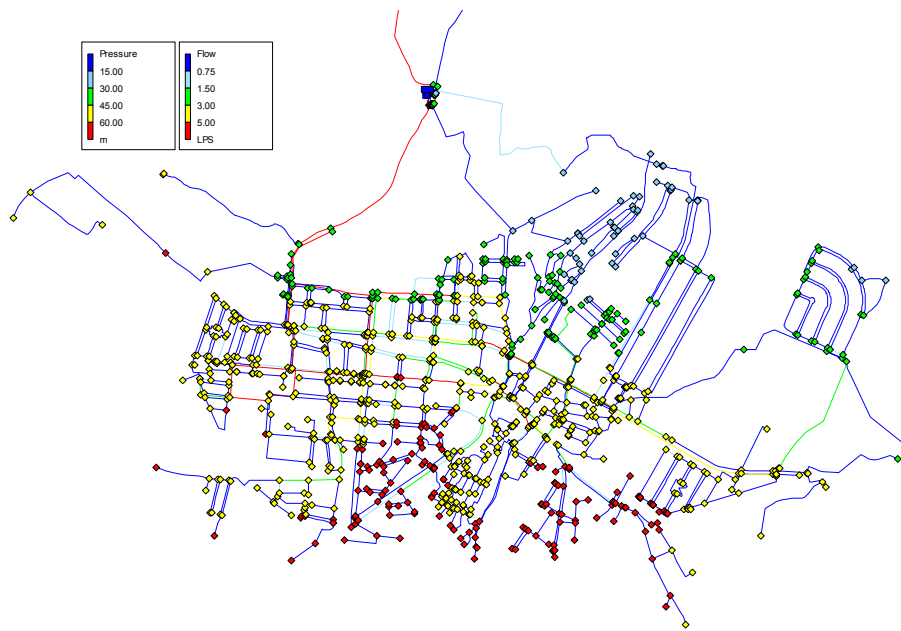


Figura A1 -5. Niveles de presiones en los nudos para la hora punta

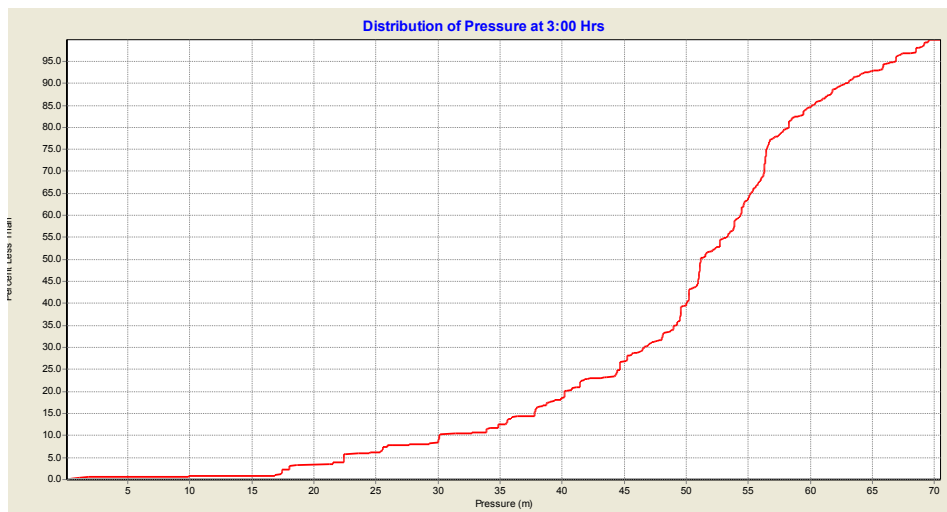


Figura A1 -6. Distribución de las presiones en los nudos durante la hora de máximo consumo

## 1.6 ANÁLISIS DEL TIEMPO DE PERMANENCIA DEL AGUA EN LA RED

Por último y desde el punto de vista de la calidad, se ha analizado el tiempo que tarda el agua en llegar a un nudo o a una tubería desde que sale de las fuentes de suministro, es decir, los pozos y depósitos.

Como se ha comentado, el tiempo de permanencia del agua (también denominado tiempo de retención o envejecimiento) es el tiempo que permanece una determinada porción de agua en el interior de la red.

A continuación se muestran los resultados del tiempo de permanencia para la red de Requena tras una simulación de 2 días.

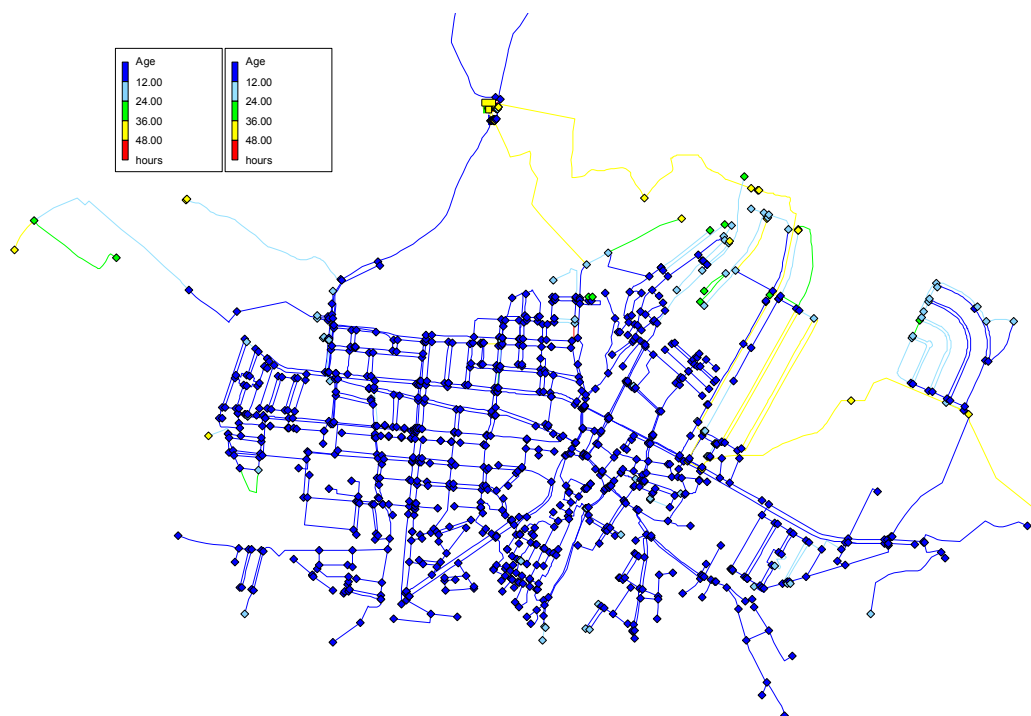


Figura A1 -7. Tiempo de permanencia en los nudos y tuberías

Los tiempos de permanencia para la red de Requena son en su mayoría inferiores a 24 horas (para el 95% de los nudos). Sin embargo existen zonas muy localizadas donde el tiempo de permanencia supera este tiempo, lo que puede suponer riesgos en relación a la pérdida de la calidad del agua, por el decaimiento de la concentración de cloro.

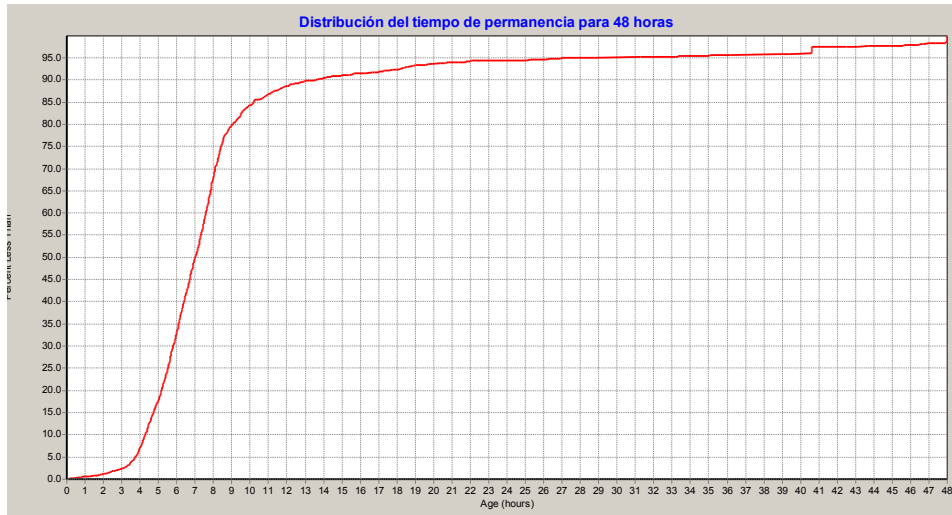


Figura A1 -8. Distribución del tiempo de permanencia

Si se fijan en aquellos nudos o tuberías con mayor tiempo de permanencia, vemos que corresponden a zonas que presentan un diseño ramificado, situadas normalmente en áreas periféricas o bien en zonas de muy bajo consumo.

## 2 Análisis dinámico de la red

A continuación se va a presentar el análisis dinámico de la red con el cual se ha analizado el comportamiento en los nudos y líneas del sistema a lo largo de 24 horas.

De esta manera se podrá caracterizar con mayor precisión el funcionamiento de la red y ver como evolucionan a lo largo del día los distintos parámetros.

### 2.1 Rango de presión

En la siguiente imagen se puede apreciar como los rangos de variación de la presión a lo largo del las 24 horas estudiadas no se pueden considerar excesivos, con mayor variación en aquellas zonas donde se producen mayores pérdidas unitarias o la cota es menor.

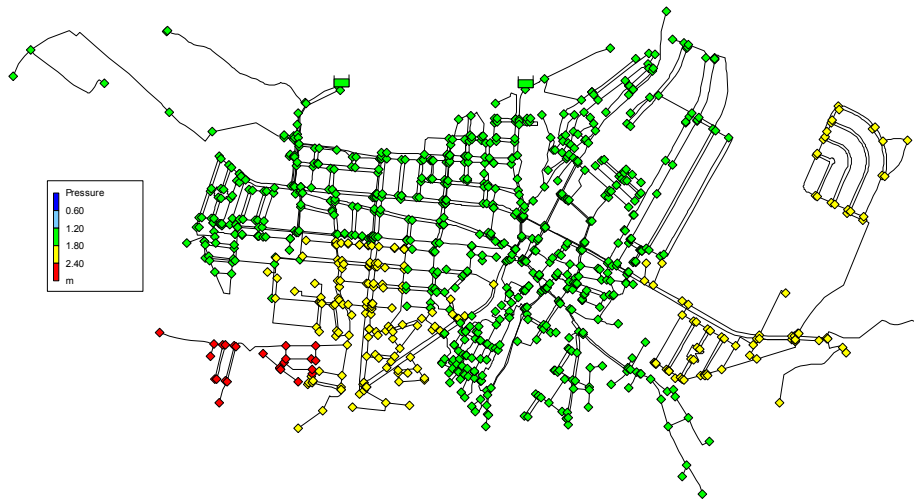


Figura A1 -9. Rango de presiones a lo largo de los nodos de consumo para el periodo de simulación

Viendo la distribución de este valor se puede apreciar con mayor detalle como el 70% de los puntos presentan una variación de la presión a lo largo del día del orden de 1,6-1,8 m.c.a.

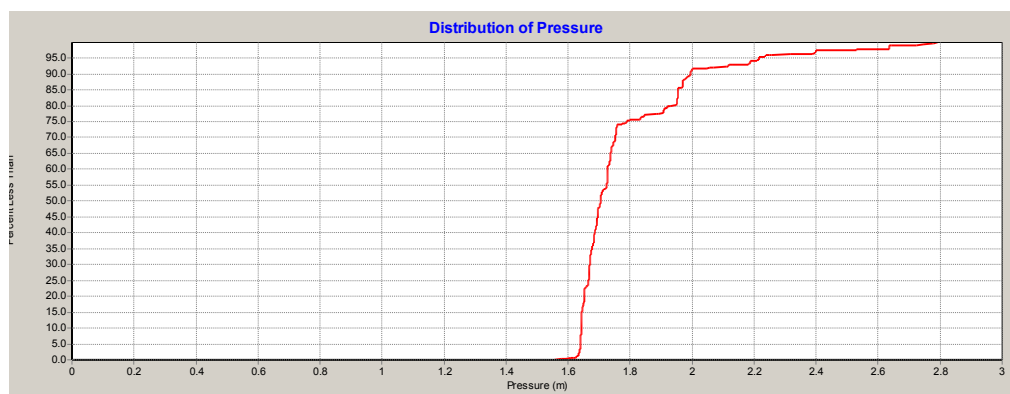


Figura A1 -10. Distribución del rango de presiones para el periodo de simulación

## 2.2 Rango de caudales

En el caso de la variación del caudal a lo largo de las 24 horas de simulación por todas las tuberías de la red se puede observar que es inapreciable para las tuberías de distribución. En cambio, para la tuberías arteriales estas variaciones mayores de los 0,3 l/seg.

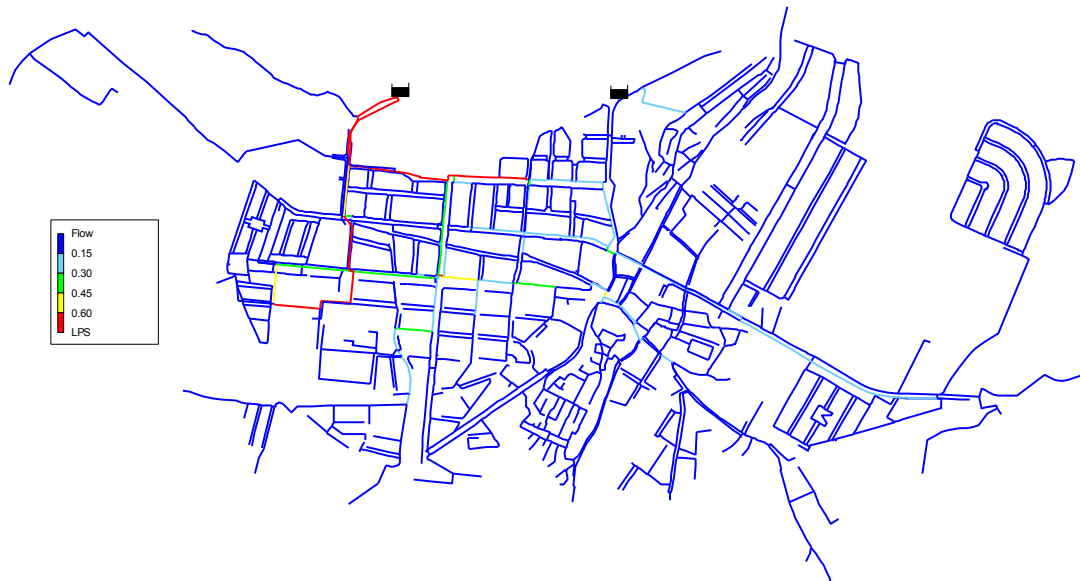


Figura A1 -11. Variación del caudal durante el periodo de simulación

En la siguiente gráfica se muestra como el 92% de las tuberías presenta una variación menor de los 0,2 l/seg a lo largo del periodo de simulación.

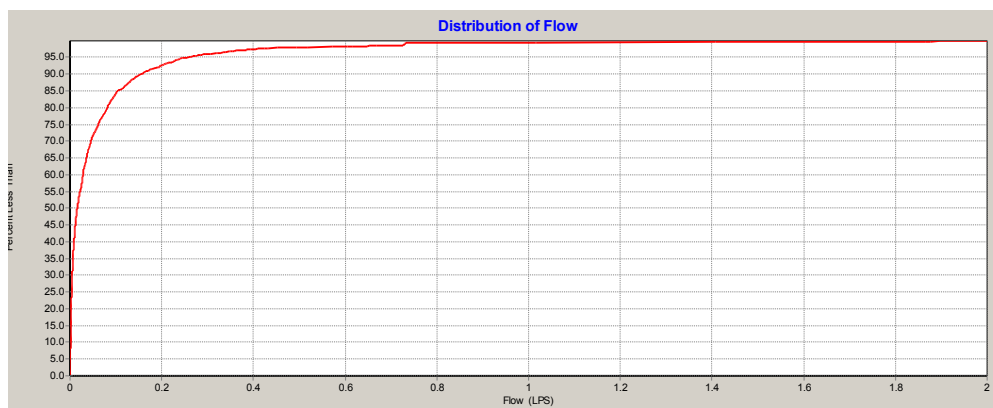


Figura A1 -12. Distribución del rango de variación del caudal durante el periodo de simulación

### 3 Conclusiones

Tras el análisis realizado a la red de distribución de agua potable al casco urbano de Requena, y de cara al planteamiento de diferentes definiciones sectoriales factibles, se obtienen las siguientes conclusiones a modo de resumen:

- Los niveles de presiones presentan una gran variación entre las diferentes zonas del casco urbano, lo que puede dar pie a una primera sectorización basada en diferentes entornos de presiones independientes.
- El reparto de caudales por la red arterial es suficiente.

- Existen diversas tuberías de distribución que debido a su pequeño diámetros y al caudal a trasegar son hidráulicamente insuficientes, actuando como cuellos de botella e introduciendo excesivas pérdidas en el sistema.
- La zona más elevada, situada al noreste del casco urbano, presenta presiones del orden de los 20 mca, consideradas como bajas.
- El nivel de pérdidas unitarias es aceptable.

Nótese que en este análisis no se ha tenido presente las zonas de futuros crecimientos urbanísticos ni desarrollos o ampliaciones de la red.

Las sectorizaciones a plantear dependerán únicamente de la situación actual. En el momento esta cambie, también se deberá de replantear su sectorización para obtener siempre los óptimos resultados buscados con esta técnica de detección de fugas.



## Anejo 3

---

### Análisis y diagnóstico de la red tras las sectorizaciones

## **1 Análisis y diagnóstico de la red tras las sectorizaciones**

Con el presente anejo se presenta el análisis y diagnóstico que se ha realizado a la red de distribución una vez sectorizada.

Se ha partido del modelo matemático realizado en el anejo 1, el cual se ha adaptado según las características de cada una de las sectorizaciones, para posteriormente seguir los mismos pasos de análisis que los realizados en el anejo 2.

Con el análisis de la red actual se pudo estudiar los principales valores hidráulicos, conociendo el estado de la misma y viendo la necesidad de la renovación de una tubería de calibre insuficiente, cuyo comportamiento como cuello de botella estaba produciendo cuantiosas pérdidas de fricción, antes de ejecutar cualquiera de las sectorizaciones estudiadas.

Los análisis de la red sectorizada permitirán hacer una comparativa entre todas las sectorizaciones planteadas y conocer, posteriormente, aquella que presente mejor comportamiento para un óptimo servicio.

Al igual que el anejo anterior, los análisis que se siguen se estructuran en estáticos y dinámicos.

### **1.1 Sectorización según la cota**

#### **1.1.1 Análisis de caudales**

Con el análisis de los caudales circulantes quedará de manifiesto qué tuberías son las que transportan mayor cantidad de agua y cuáles son los principales caminos que recorre el agua a lo largo del sistema. Con la sectorización se han cerrado numerosas tuberías con el fin de abastecer a los sectores por un número mínimo de puntos, cosa que facilitará su control. Estas tuberías de entrada verán un importante aumento del caudal a transportar.

Aun así, el estudio de caudales circulantes por la red de distribución no merece menor atención. Dicho análisis pondrá de manifiesto aquellas pequeñas tuberías de distribución con la capacidad hidráulica sobreexplotada.

A continuación se muestra la red del casco urbano de Requena tras se sectorizada según los criterios de cota clasificadas por caudales para la situación de hora máximo consumo:



Figura A3-1. Caudales en las tuberías del sistema en hora punta

De la Figura A3-1 se desprende que aquellas tuberías con mayor diámetro, que conforman la red arterial, y las entradas a los sectores son la que transportan mayor volumen de agua por unidad de tiempo. Por el contrario, aquellas con menores diámetros poseen caudales circulantes menores.

Si se observa la distribución de los anteriores caudales en dicha hora punta:

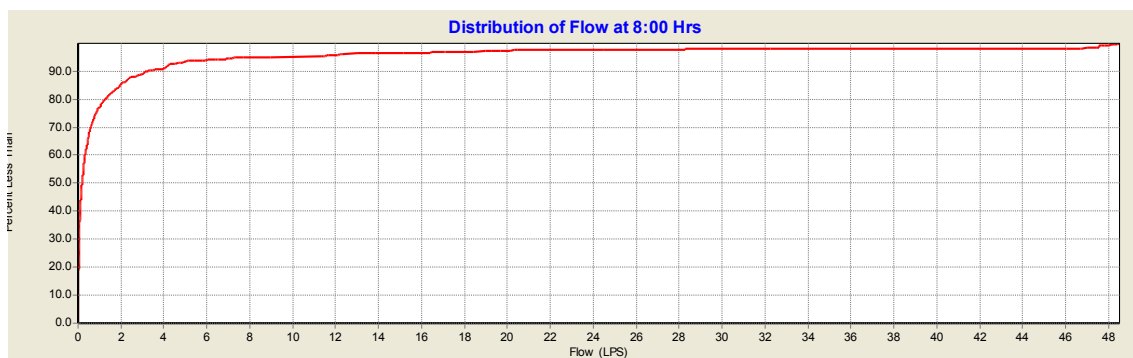


Figura A3-2. Distribución del caudal para las 8:00 horas

Se puede apreciar como el 85% de las tuberías presentan un caudal inferior a los 2 l/seg, de las cuales el 50% apenas ronda los 0,1 l/seg.

En cambio, al estudiar la misma distribución para la hora de mínimo consumo del día, el 85% de las tuberías no sobrepasa el umbral de los 2 l/seg, y el 45% de este grupo con unos caudales del orden de los 0,1 l/seg.

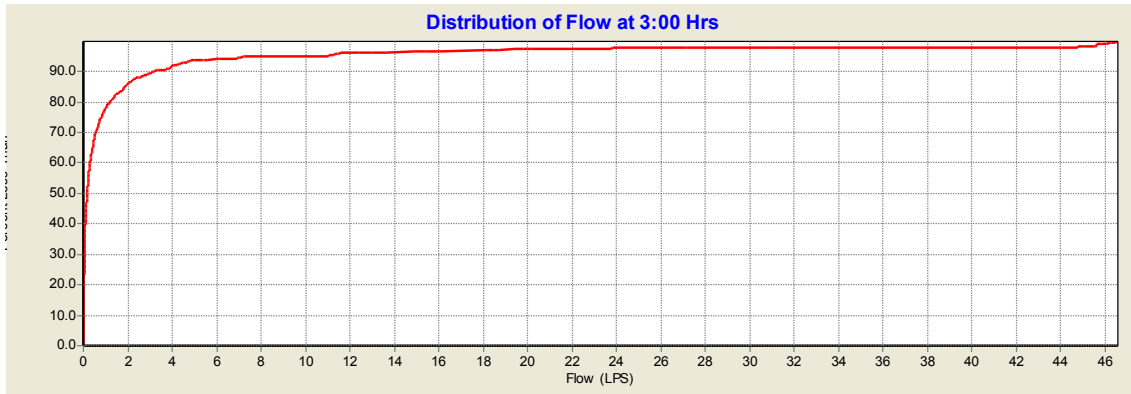


Figura A3-3. Distribución del caudal para la hora de mínimo consumo

### 1.1.2 Análisis de velocidades

Tras una simulación a 24 horas del modelo matemático confeccionado para la situación actual bajo condiciones de demanda del día de máximo consumo del año, se muestran las velocidades máximas en las tuberías. Se observa como la velocidad de circulación del agua es inferior a 1 m/s (velocidad de diseño) en la mayoría de las conducciones. De hecho, la curva de distribución indica que prácticamente el 97% de las tuberías de la red tienen velocidades inferiores a 1 m/s en hora punta del día medio, con lo cual es evidente que en general las pérdidas de carga en el sistema no son demasiado acusadas a tenor de estos valores de velocidad. No obstante, existen tuberías aisladas con velocidades relativamente altas en las que la pérdida de carga es considerable.

En cuanto a las velocidades, se tiene lo siguiente para la hora de máximo consumo:



Figura A3-4. Velocidades en las tuberías del sistema en hora punta

Se observan ciertas tuberías de distribución de bajo calibre, que presentan velocidades entre los 1 y 2 m/seg. Además, se puede comprobar como las tuberías que abastecen a los sectores tienen velocidades mayores a los 2 m/seg.

Al igual que para los valores de los caudales circulantes, a continuación se adjunta la curva de distribución de velocidades para el momento de máximo consumo:

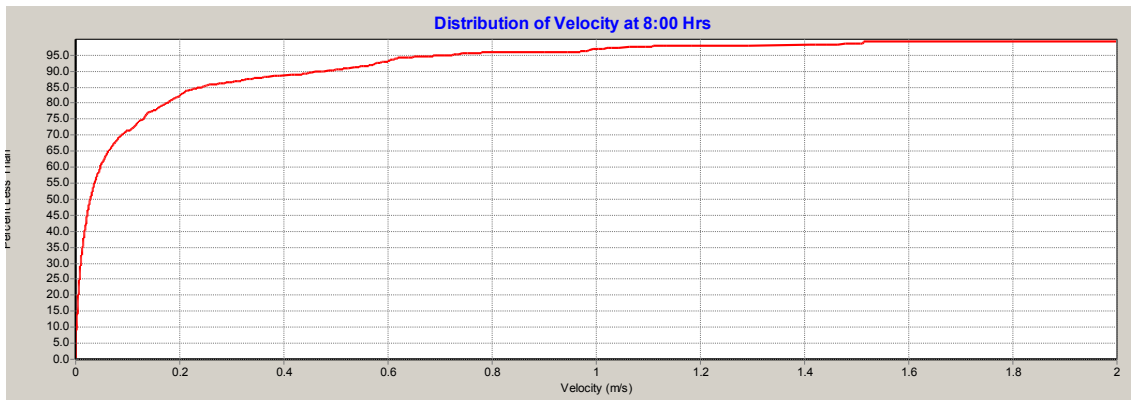


Figura A3-5. Distribución de las velocidades en hora punta

La curva de distribución indica que prácticamente el 97% de las tuberías de la red tiene velocidades inferiores a 1 m/seg, con lo cual es evidente que las pérdidas de carga originadas por las altas velocidades no serán demasiado acusadas.

En definitiva, las velocidades obtenidas tras la sectorización son ligeramente superiores que en el caso actual sin realizar esta técnica.

Los valores de las velocidades en las diferentes tuberías, al igual que ocurría con los caudales no presentan una gran variación.

### 1.1.1 Alturas piezométricas y pérdidas de carga unitarias

Tras una simulación, el análisis de las alturas piezométricas en los nudos de la red nos permite obtener conclusiones acerca de la pérdida de carga a lo largo de los tramos más críticos y por tanto, nos ayuda a localizar los estrangulamientos o 'cuellos de botella' existentes, donde el flujo de caudal puede llegar a ser excesivo.

El análisis de las alturas piezométricas en la red en hora punta presenta una disminución lógica en el sentido de circulación del flujo, es decir, desde los puntos de producción hacia las zonas terminales de la red, influenciado mayoritariamente por la cota y las pérdidas ocasionadas.

En las siguientes figuras se muestran las alturas piezométricas en los nudos de la red del para las horas de máximo consumo y mínimo.

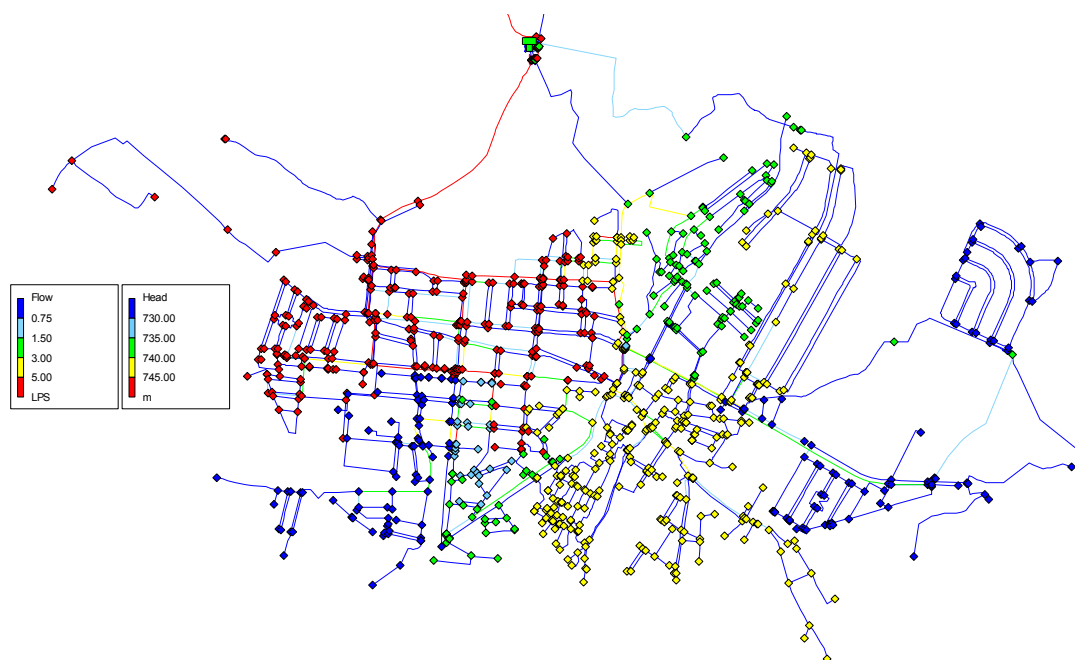


Figura A3-6. Alturas piezométricas en los nudos para las 8:00 h.

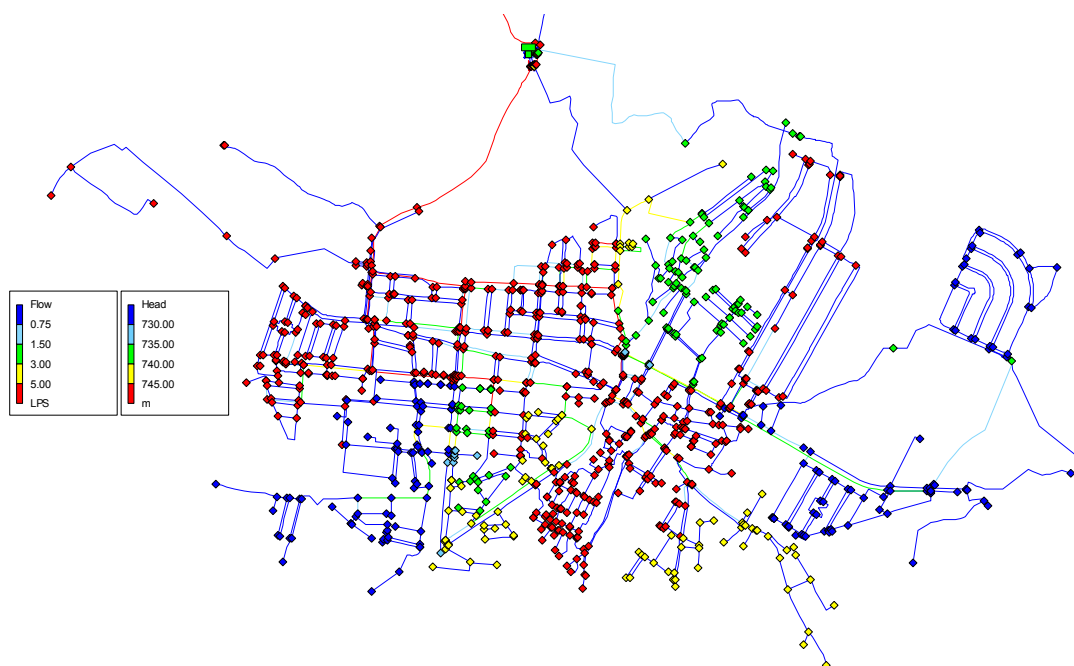


Figura A3-7. Alturas piezométricas en los nudos para las 3:00 h.

Claramente se puede observar como los niveles de este valor aumentan durante las horas nocturnas en la zona centro del casco urbano.

Para poder apreciar mejor estos valores, a continuación se adjuntan las mapas de isólinas de la altura piezométrica para ambos instantes:



Figura A3-8. Mapas de isolíneas de las alturas piezométricas para las 8:00 y 3:00 horas

En general se observan alturas piezométricas considerablemente altas en la zona noroeste y franja central del casco urbano, lo que resulta normal puesto que se trata de las zonas de mayor cota del núcleo urbano. Sin embargo hay que destacar la zona ubicada al noreste y suroeste debido a sus menores valores de elevación.

En cuanto a la distribución de este valor, se puede apreciar en las siguiente imágenes con mayor claridad el aumento de los niveles:

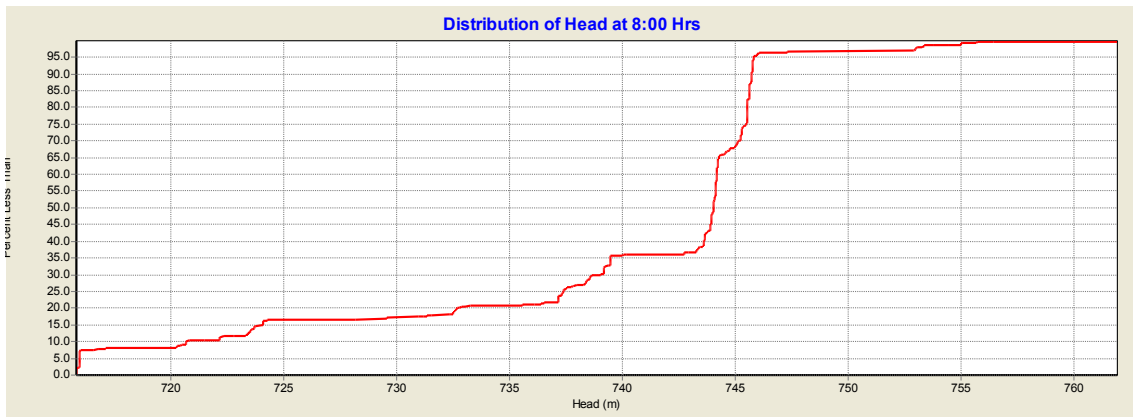


Figura A3-9. Distribución de la altura piezométrica a las 8:00

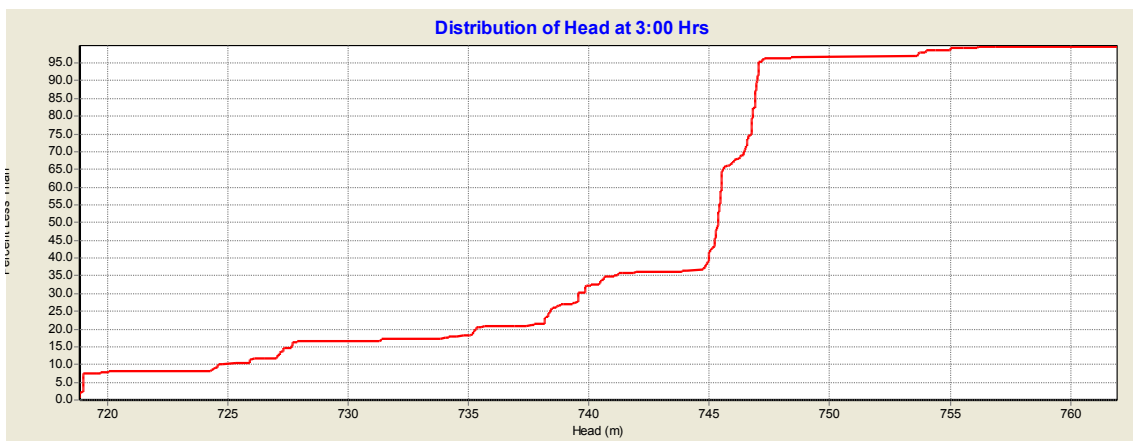


Figura A3-10. Distribución de la altura piezométrica a la hora de mínimo consumo

La siguiente figura muestra las pérdidas de carga máximas en la red del casco urbano. En color rojo se muestran las tuberías que presentan la máxima pérdida de carga unitaria.



Figura A3-11. Distribución de la altura piezométrica a la hora de mínimo consumo

Nuevamente se puede observar como las tuberías que han pasado a ser el único punto de entrada a los sectores planteados presentan mayores pérdidas unitarias que durante la situación actual.

Es conveniente diferenciar las pérdidas de carga originadas en las tuberías de transporte y en las tuberías de distribución, ya que los límites que se consideran como admisibles varían entre ellas. Para el caso de las tuberías de distribución, el límite se encuentra en 1 m/km, mientras que para las tuberías de transporte se admiten pérdidas de 5-20 m/km, dependiendo del diámetro de dichas tuberías.

Aquellas tramos de la red de distribución cuyas pérdidas sean superiores a 1 m/km, habrán de ser considerados con especial atención puesto que ante un aumento de la demanda originarán pérdidas muy importantes pudiendo así afectar la calidad del servicio.

En dichas tuberías la probabilidad de que aparezcan pérdidas de carga importantes y de que las velocidades de flujo sean excesivas, es muy alta, con lo cual se propone la sustitución progresiva de estos tramos con prioridad en aquellas tuberías de fibrocemento, comenzando por las tuberías que afectan al casco antiguo.

Otra forma de observar las pérdidas unitarias del sistema es mediante la curva de distribución de este parámetro. Se puede observar como alrededor del 90% de las tuberías tienen una pérdida de carga inferiores a 2,5 m/km.



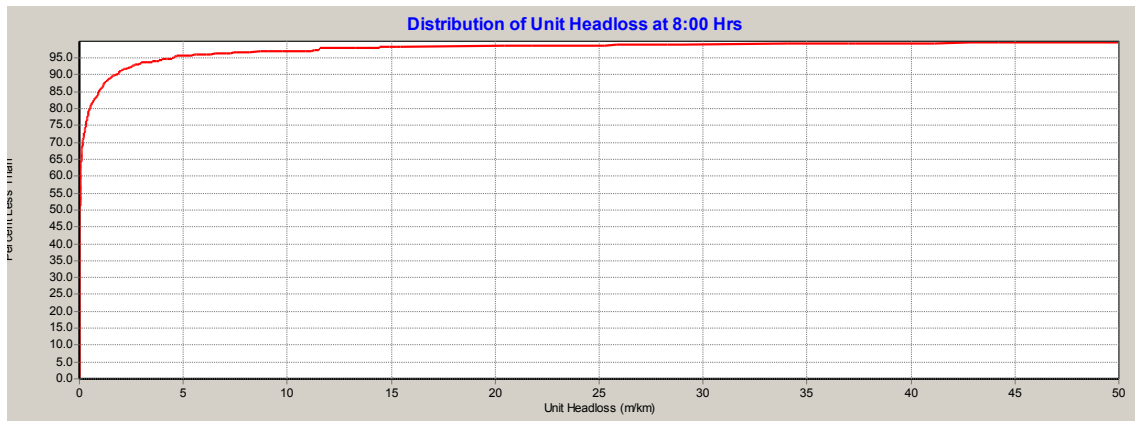


Figura A3-12. Distribución de los niveles de pérdidas unitarias en la tuberías para la hora punta

### 1.1.2 Distribución de presiones

Otra de las variables principales a analizar cuando se pretende proporcionar un diagnóstico del funcionamiento de la red es el nivel de presiones. En este caso, va a estar fuertemente ligado a la orografía del terreno.

La Figura A3-13 se corresponde con el mapa de presiones de la red de distribución del casco urbano de Requena:

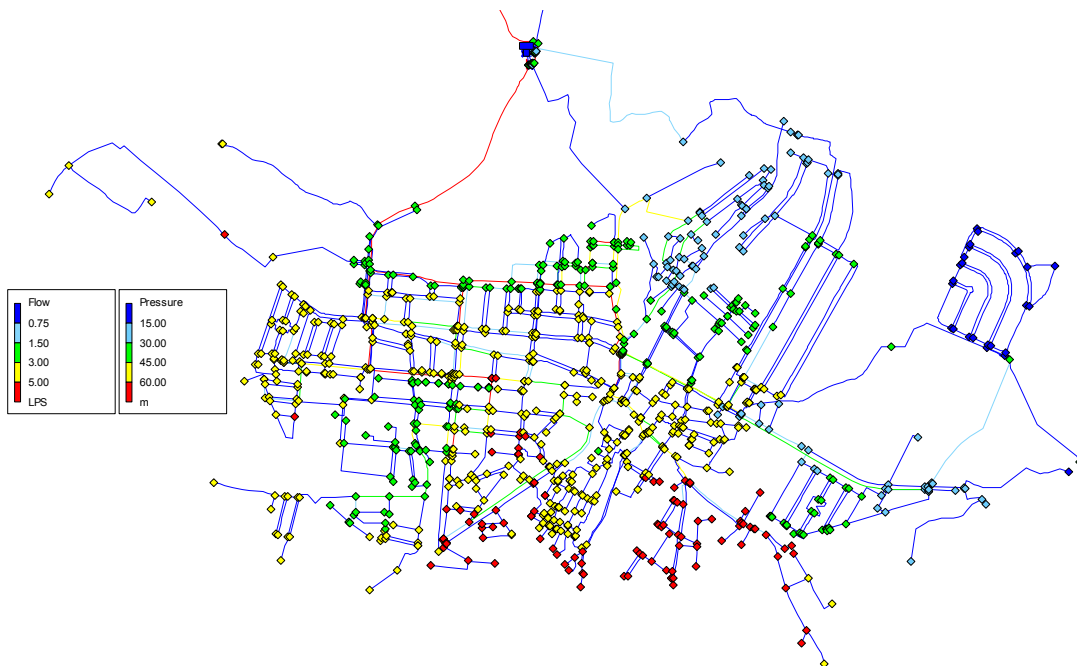


Figura A3-13. Niveles de presiones en los nudos para la hora punta

Al analizar la distribución de presiones en la red, se puede afirmar que el sistema de distribución presenta unos niveles de presión considerablemente altos en torno a los 4,5-6 kp/cm<sup>2</sup>. Las zonas que menores presiones presentan en horas punta son las zonas del noreste, con presiones en torno a los 20 mca en hora punta.

En general, los valores de presión en los nudos del modelo en hora punta, se encuentran entre los 20 y 65 m.c.a, con lo que comprobamos la disparidad de presiones dependiendo de la zona de la

red. El 50% de los nudos de consumo posee una presión de servicio en hora punta por debajo de los 50 m.c.a, encontrando un 10% de puntos con presiones inferiores a los 25 mca en horas de máximo consumo.

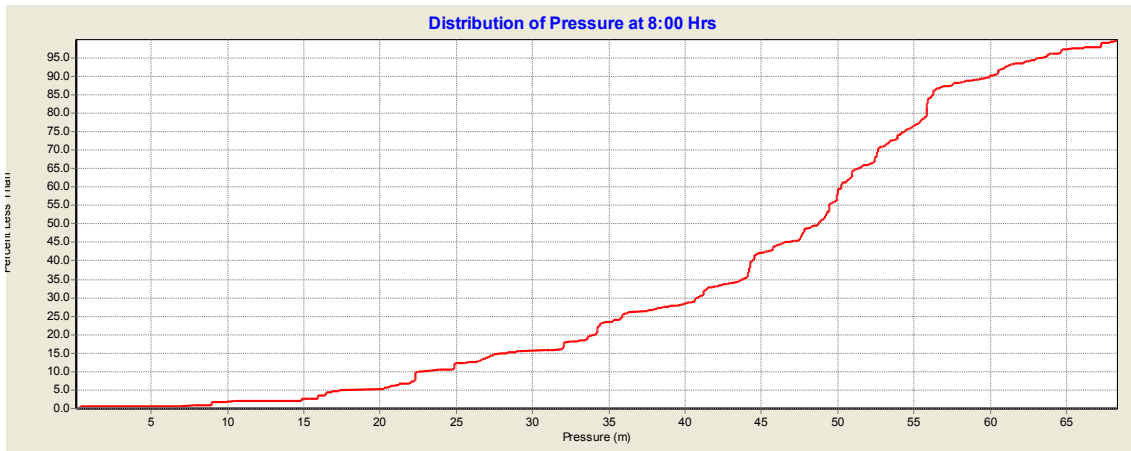


Figura A3-14. Distribución de las presiones en los nudos durante la hora de máximo consumo

Durante las horas nocturnas (entre las 3 y las 6 am), el nivel de presiones es superior. Si comparamos ahora las presiones de los nudos con las de las horas diurnas, vemos como en horas nocturnas alcanzan valores de presión algo superiores 3 ó 4 mca por encima como mínimo, aunque existen zonas donde la diferencia de presiones puede llegar a alcanzar los 5 mca. Esto puede provocar una ligera fatiga mecánica en las tuberías, lo que resulta pernicioso en tuberías instaladas de cierta antigüedad, ya que suele originar grietas y roturas que dan lugar a fugas importantes en la red.

A continuación se muestran las presiones en los diferentes nudos de la red de distribución para las horas valle y la curva de distribución para el citado periodo:

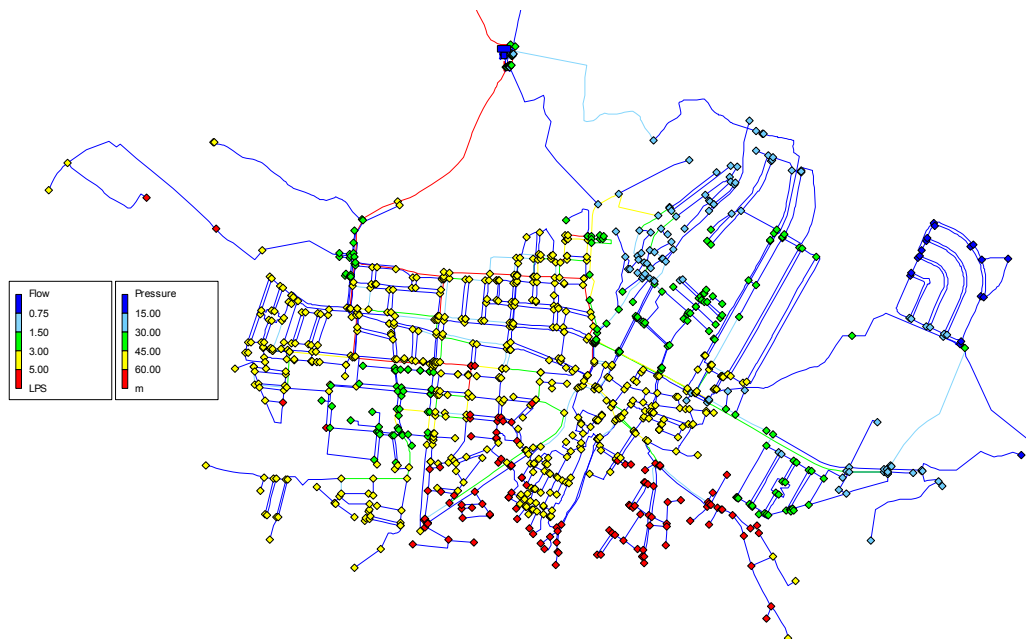


Figura A3-15. Niveles de presiones en los nudos para la hora valle

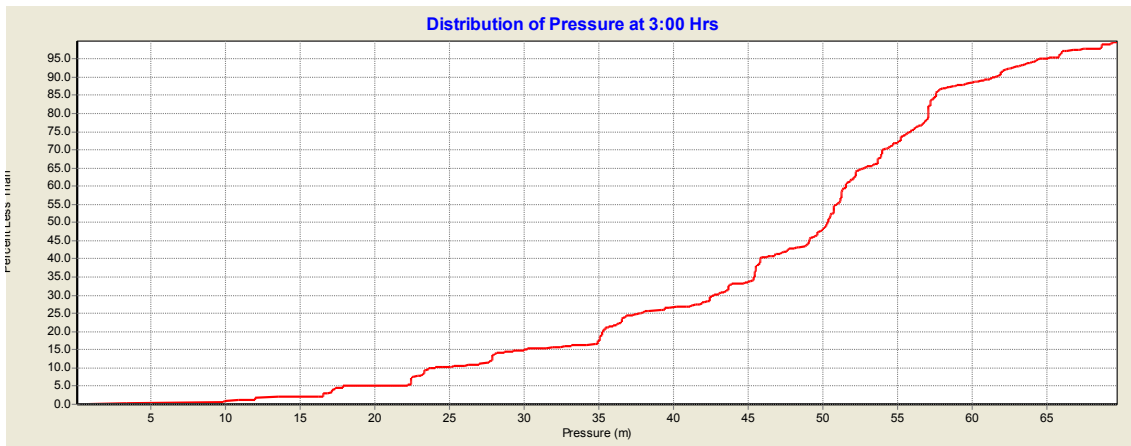


Figura A3-16. Distribución de las presiones en los nudos durante la hora de máximo consumo

Para terminar con el apartado de las presiones, a continuación se muestran los mapas de isóneas de presiones para ambas horas y así poder compararlas con mayor facilidad:



Figura A3-17. Mapas de isóneas de presiones para las 8:00 y 3:00 horas

### 1.1.3 ANÁLISIS DEL TIEMPO DE PERMANENCIA DEL AGUA EN LA RED

Por último y desde el punto de vista de la calidad, se ha analizado el tiempo que tarda el agua en llegar a un nudo o a una tubería desde que sale de las fuentes de suministro, es decir, los pozos y depósitos.

Como se ha comentado, el tiempo de permanencia del agua (también denominado tiempo de retención o envejecimiento) es el tiempo que permanece una determinada porción de agua en el interior de la red.

A continuación se muestran los resultados del tiempo de permanencia para la red tras una simulación de 24 horas.

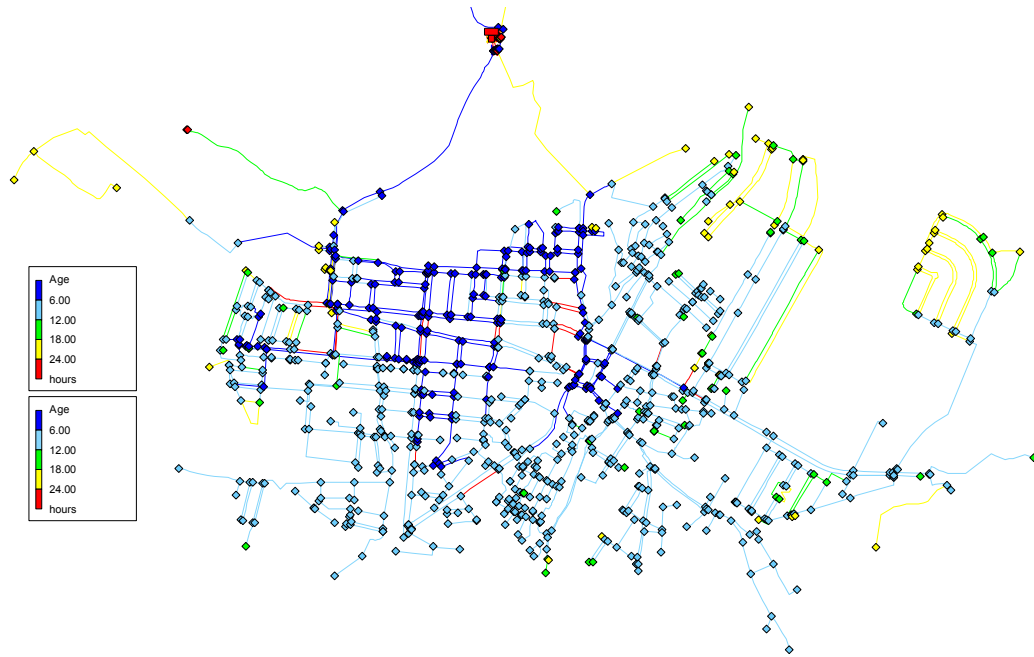


Figura A3-18. Tiempo de permanencia en los nudos y tuberías

Los tiempos de permanencia para la red de Requena son en su mayoría inferiores a 24 horas (para el 95% de los nudos). Sin embargo existen zonas muy localizadas donde el tiempo de permanencia supera este tiempo, lo que puede suponer riesgos en relación a la pérdida de la calidad del agua, por disminución de la concentración de cloro.

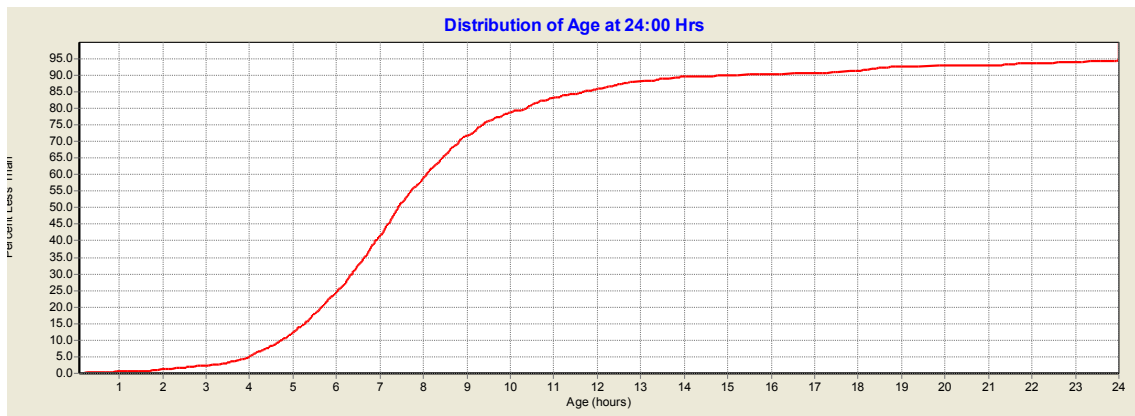


Figura A3-19. Distribución del tiempo de permanencia

Si se fijan en aquellos nudos o tuberías con mayor tiempo de permanencia, vemos que corresponden a zonas que presentan un diseño ramificado, situadas normalmente en áreas periféricas o bien en zonas de muy bajo consumo.

Además, se puede apreciar como aparecen numerosas tuberías cuyo tiempo de permanencia es superior a las 24 horas. Esto es debido a que existen numerosas tuberías que se han cerrado en el modelo matemático para aislar a los sectores.

### 1.1.4 Análisis dinámico de la red

A continuación se va a presentar el análisis dinámico de la red con el cual se ha analizado el comportamiento en los nudos y líneas del sistema a lo largo de 24 horas.

De esta manera se podrá caracterizar con mayor precisión el funcionamiento de la red y ver como evolucionan a lo largo del día los distintos parámetros.

#### 1.1.4.1 Rango de presión

En Figura A3-20 se puede apreciar como los rangos de variación de la presión a lo largo de las 24 horas estudiadas no se pueden considerar excesivos, con mayor variación en aquellas zonas donde se producen mayores pérdidas unitarias o la cota es menor.

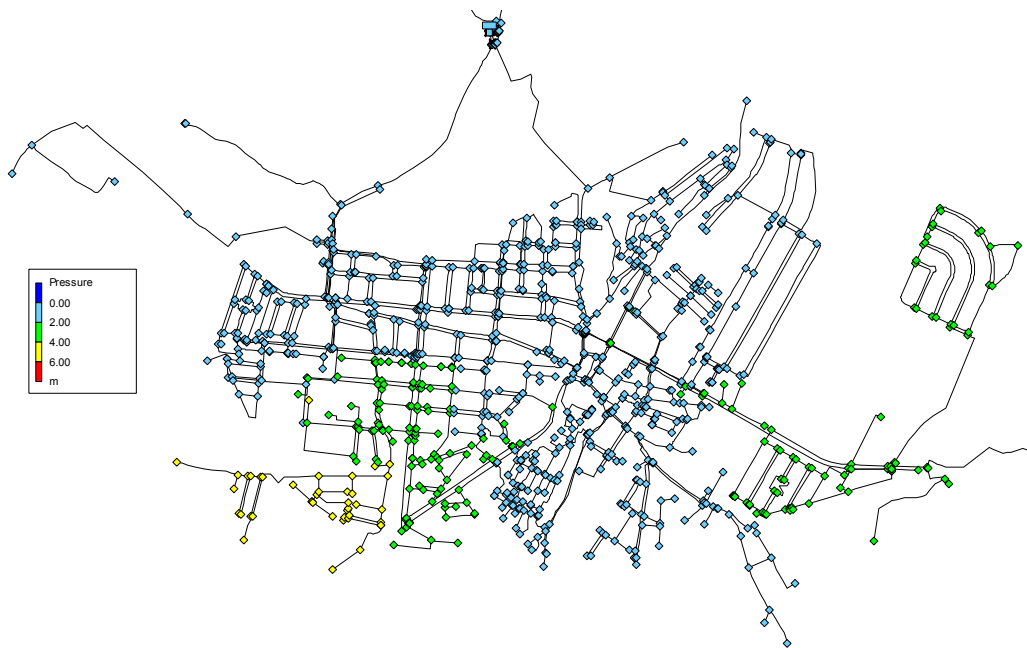


Figura A3-20. Rango de presiones a lo largo de los nudos de consumo para el periodo de simulación

Viendo la distribución de este valor se puede apreciar con mayor detalle como el 70% de los puntos presentan una variación de la presión a lo largo del día menor de 1,45 m.c.a.

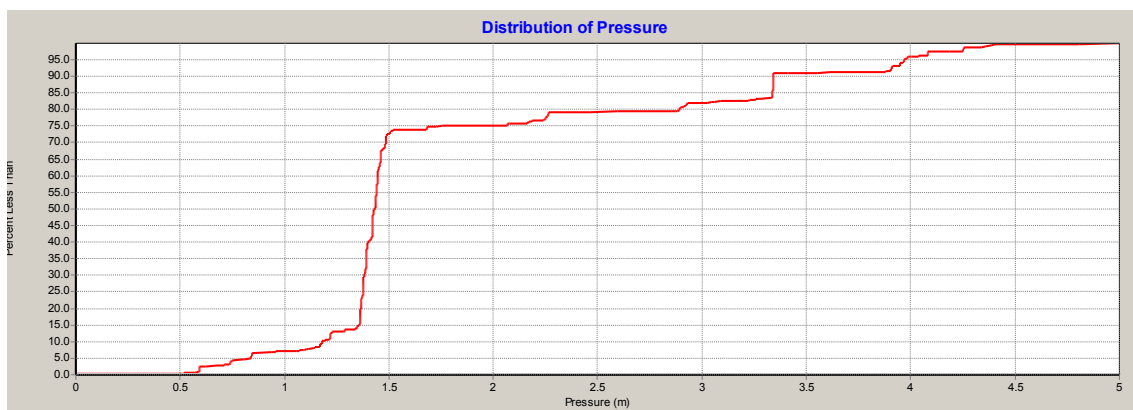


Figura A3-21. Distribución del rango de presiones para el periodo de simulación

Para la situación actual, más del 70% de los nudos se encontraban con una variación igual o inferior a 1,6-1,8 mca de variación. Se puede observar, por tanto, la disminución de esta variación tras la presente sectorización ya que esta mayoría de nudos no llega al valor de 1,6 mca.

#### 1.1.4.2 Rango de caudales

En el caso de la variación del caudal a lo largo de las 24 horas de simulación por todas las tuberías de la red se puede observar que es inapreciable para las tuberías de distribución. En cambio, para las tuberías arteriales estas variaciones mayores de los 0,3 l/seg.

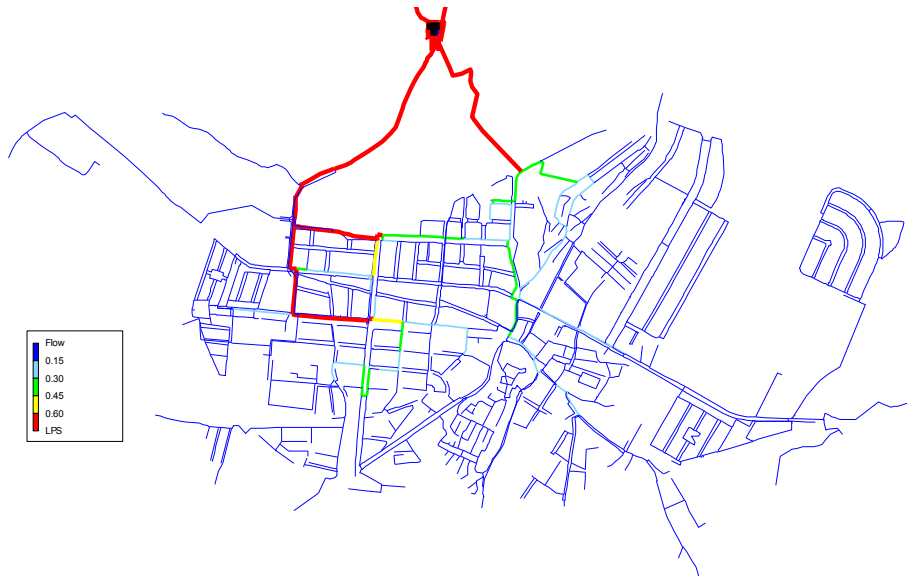


Figura A3-22. Variación del caudal durante el periodo de simulación

En la Figura A3-23 se muestra como el 87% de las tuberías presenta una variación menor de los 0,2 l/seg a lo largo del periodo de simulación.

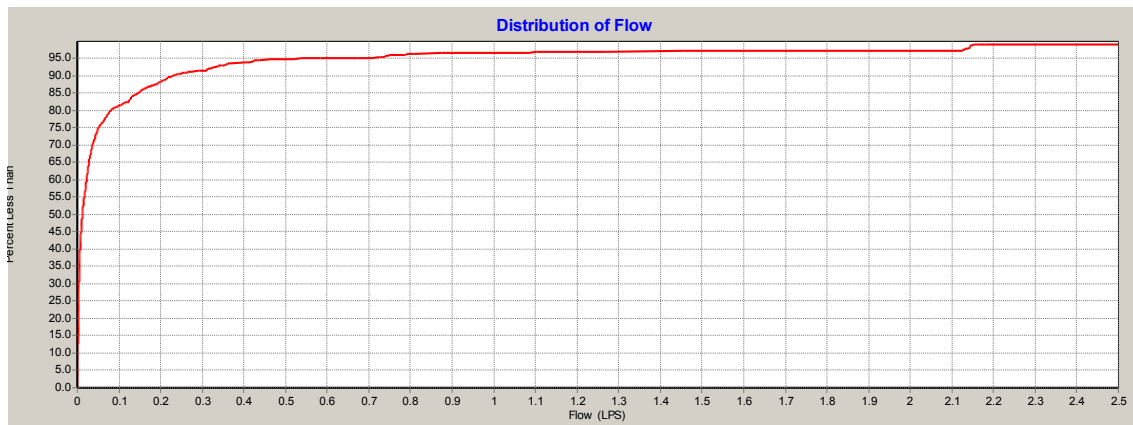


Figura A3-23. Distribución del rango de variación del caudal durante el periodo de simulación

La diferencia con la situación actual de este valor reside en los valores altos de variación. Tras la sectorización, el 96% de las tuberías están por debajo de los 2 l/seg. En cambio, para la situación actual este mismo porcentaje de nudos se encuentra por debajo de los 0,7 l/seg.

## 1.2 Sectorización según el material

### 1.2.1 Análisis de caudales

Con el análisis de los caudales circulantes quedará de manifiesto qué tuberías son las que transportan mayor cantidad de agua y cuáles son los principales caminos que recorre el agua a lo largo del sistema. Con la sectorización se han cerrado numerosas tuberías con el fin de abastecer a los sectores por un número mínimo de puntos, cosa que facilitará su control. Estas tuberías de entrada verán un importante aumento del caudal a transportar.

Aun así, el estudio de caudales circulantes por la red de distribución no merece menor atención. Dicho análisis pondrá de manifiesto aquellas pequeñas tuberías de distribución con la capacidad hidráulica sobreexplotada.

A continuación se muestra la red del casco urbano de Requena tras se sectorizada según los criterios de cota clasificadas por caudales para la situación de hora máximo consumo:

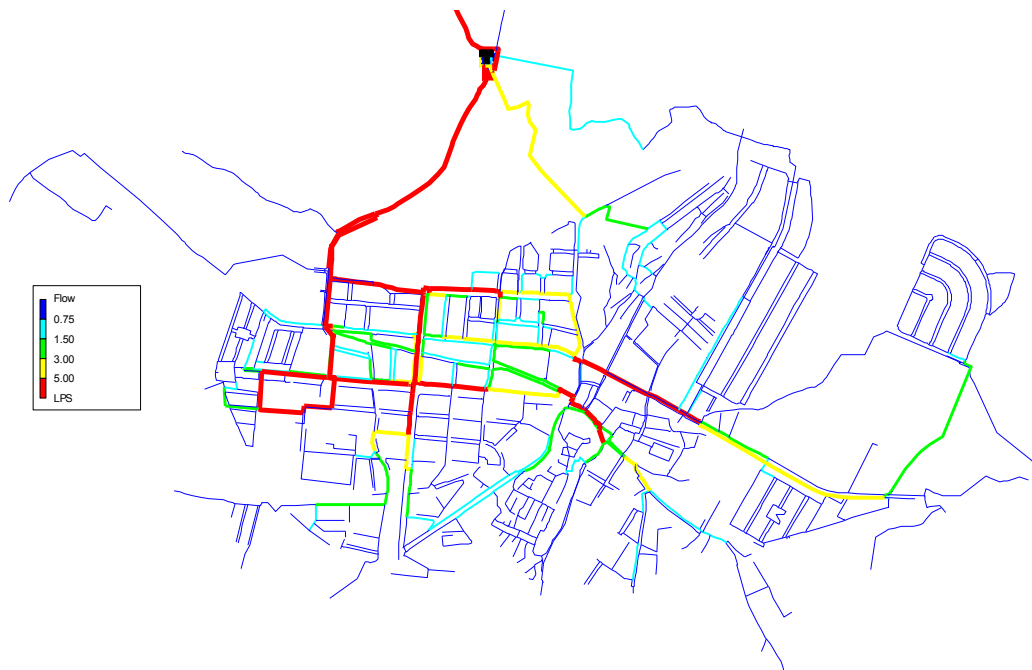


Figura A3-24. Caudales en las tuberías del sistema en hora punta

De la Figura A3-24 se desprende que aquellas tuberías con mayor diámetro, que conforman la red arterial, y las entradas a los sectores son la que transportan mayor volumen de agua por unidad de tiempo. Por el contrario, aquellas con menores diámetros poseen caudales circulantes menores.

Si se observa la distribución de los anteriores caudales en dicha hora punta:

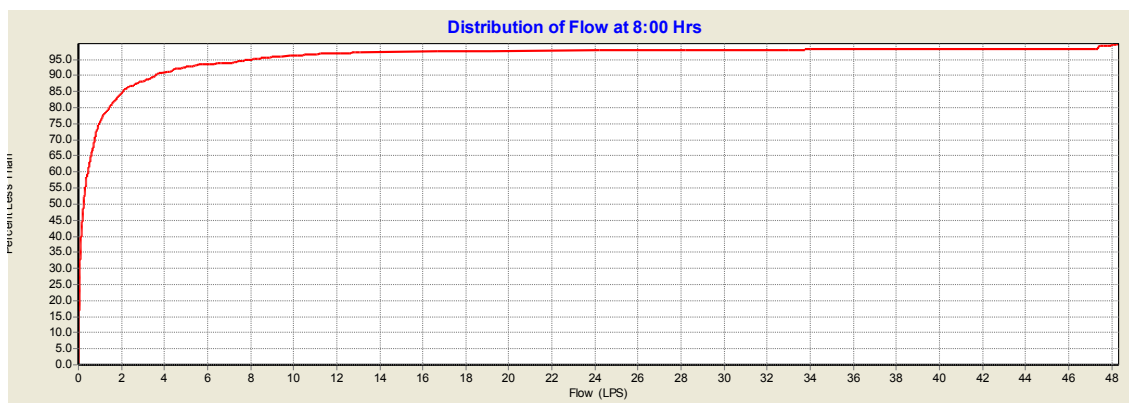


Figura A3-25. Distribución del caudal para las 8:00 horas

Se puede apreciar como el 85% de las tuberías presentan un caudal inferior a los 2 l/seg, de las cuales el 45% apenas ronda los 0,1 l/seg.

En cambio, al estudiar la misma distribución para la hora de mínimo consumo del día, el 85% de las tuberías no sobrepasa el umbral de los 2 l/seg, y el 40% de este grupo con unos caudales del orden de los 0,1 l/seg.

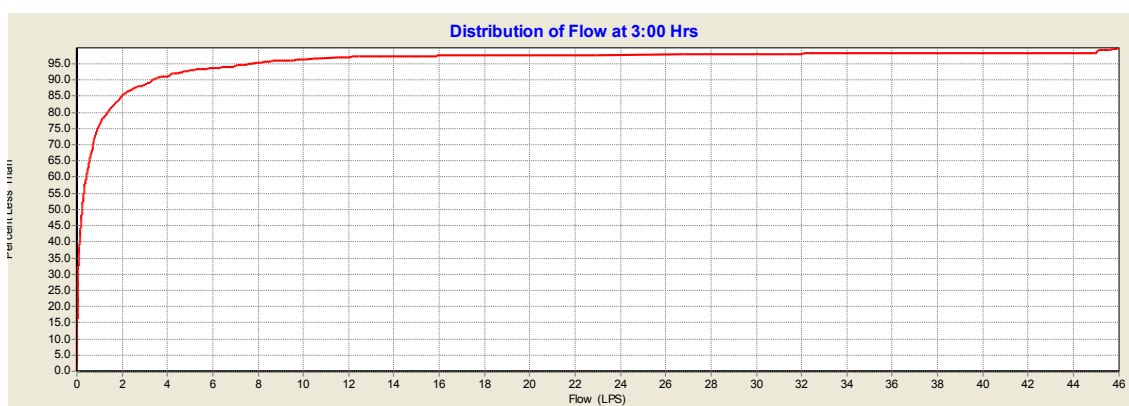


Figura A3-26. Distribución del caudal para la hora de mínimo consumo

## 1.2.2 Análisis de velocidades

Tras una simulación a 24 horas del modelo matemático confeccionado para la situación actual bajo condiciones de demanda del día de máximo consumo del año, se muestran las velocidades máximas en las tuberías. Se observa como la velocidad de circulación del agua es inferior a 1 m/s (velocidad de diseño) en la mayoría de las conducciones. De hecho, la curva de distribución indica que prácticamente el 98% de las tuberías de la red tienen velocidades inferiores a 1 m/s en hora punta del día medio, con lo cual es evidente que en general las pérdidas de carga en el sistema no son demasiado acusadas a tenor de estos valores de velocidad. No obstante, existen tuberías aisladas con velocidades relativamente altas en las que la pérdida de carga es considerable.

En cuanto a las velocidades, se tiene lo siguiente para la hora de máximo consumo:





Figura A3-27. Velocidades en las tuberías del sistema en hora punta

Se observan ciertas tuberías de distribución de bajo calibre, que presentan velocidades entre los 1 y 2 m/seg. Además, se puede comprobar como las tuberías que abastecen a los sectores tiene velocidades mayores a los 2 m/seg.

Al igual que para los valores de los caudales circulantes, a continuación se adjunta la curva de distribución de velocidades para el momento de máximo consumo:

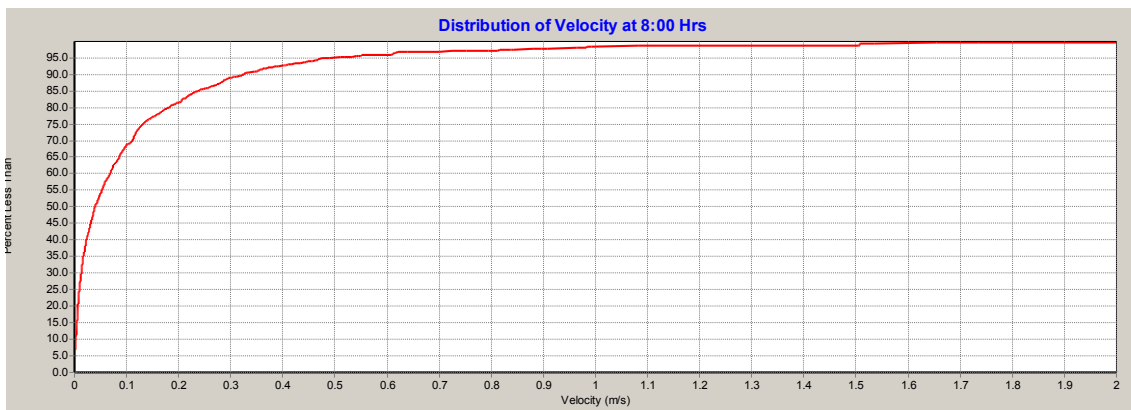


Figura A3-28. Distribución de las velocidades en hora punta

La curva de distribución indica que prácticamente el 98% de las tuberías de la red tiene velocidades inferiores a 1 m/seg, con lo cual es evidente que las pérdidas de carga originadas por las altas velocidades no serán demasiado acusadas.

En definitiva, las velocidades obtenidas tras la sectorización son ligeramente superiores que en el caso actual sin realizar esta técnica.

Los valores de las velocidades en las diferentes tuberías, al igual que ocurría con los caudales no presentan una gran variación.

### 1.2.3 Alturas piezométricas y pérdidas de carga unitarias

Tras una simulación, el análisis de las alturas piezométricas en los nudos de la red nos permite obtener conclusiones acerca de la pérdida de carga a lo largo de los tramos más críticos y por tanto, nos ayuda a localizar los estrangulamientos o ‘cuellos de botella’ existentes, donde el flujo de caudal puede llegar a ser excesivo.

El análisis de las alturas piezométricas en la red en hora punta presenta una disminución lógica en el sentido de circulación del flujo, es decir, desde los puntos de producción hacia las zonas terminales de la red, influenciado mayoritariamente por la cota y las pérdidas ocasionadas.

En las siguientes figuras se muestran las alturas piezométricas en los nudos de la red del para las horas de máximo consumo y mínimo.

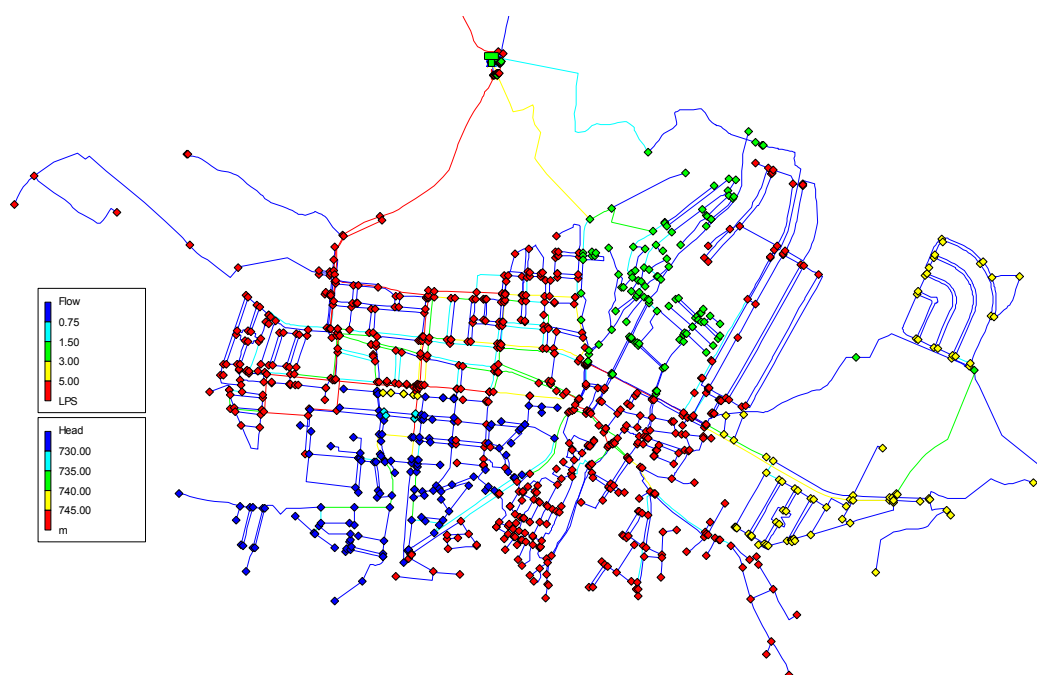


Figura A3-29. Alturas piezométricas en los nudos para las 8:00 h.

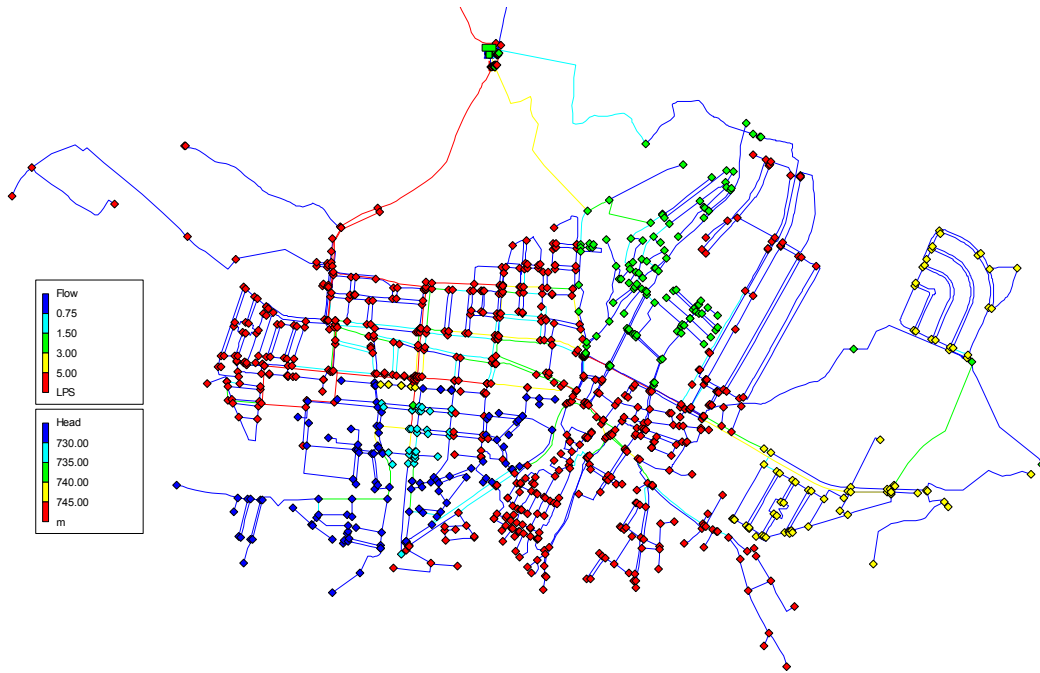


Figura A3-30. Alturas piezométricas en los nudos para las 3:00 h.

Claramente se puede observar como los niveles de este valor aumentan durante las horas nocturnas en la zona centro del casco urbano.

Para poder apreciar mejor estos valores, a continuación se adjuntan las mapas de isólinas de la altura piezométrica para ambos instantes:

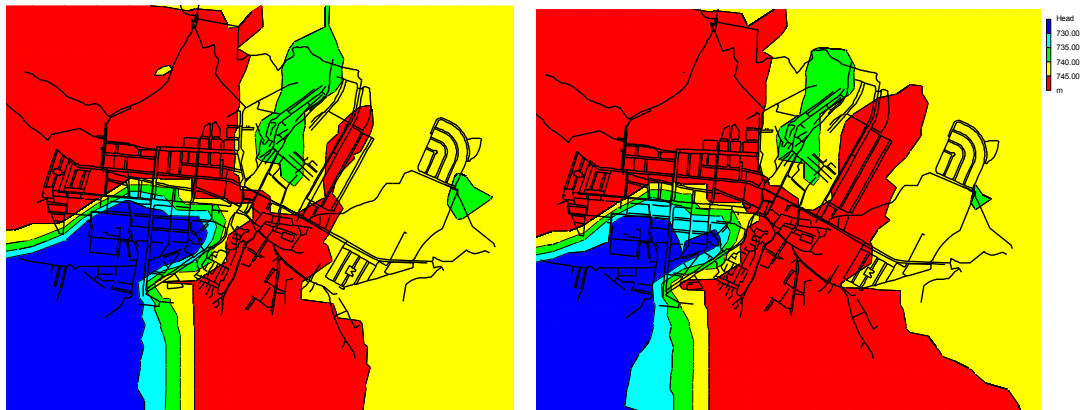


Figura A3-31. Mapas de isólinas de las alturas piezométricas para las 8:00 y 3:00 horas

En general se observan alturas piezométricas considerablemente altas en la zona noroeste, en la zona sureste, a diferencia de la anterior sectorización, y franja central del casco urbano. Sin embargo hay que destacar la zona ubicada al noreste y suroeste debido a sus menores valores de elevación.

La siguiente figura muestra las pérdidas de carga máximas en la red del casco urbano. En color rojo se muestran las tuberías que presentan la máxima pérdida de carga unitaria.

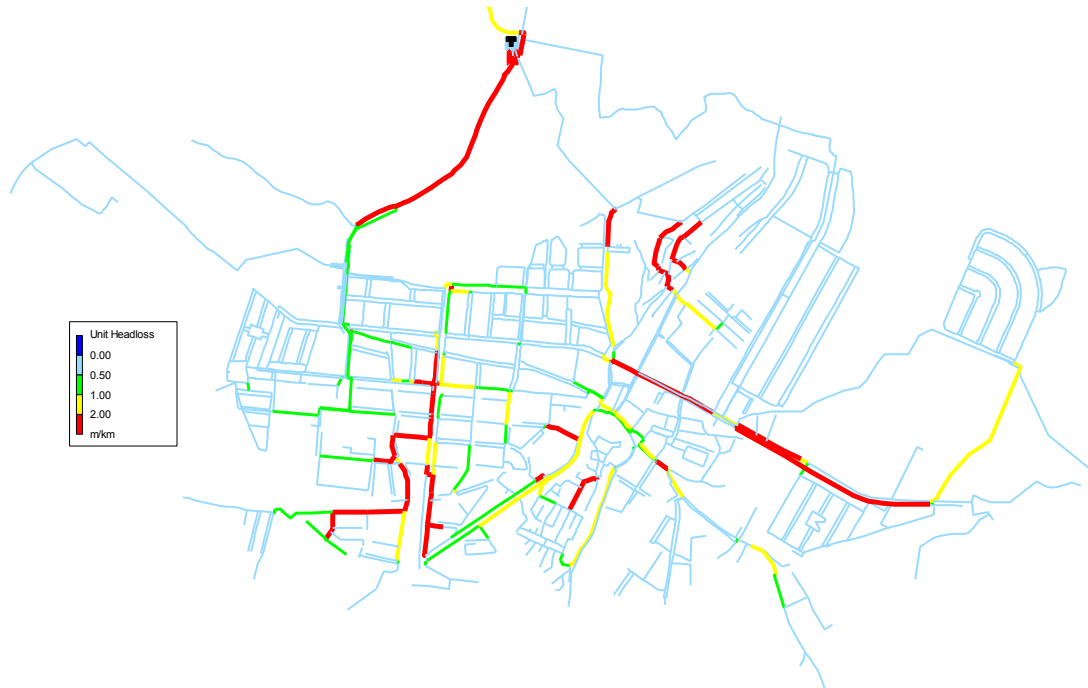


Figura A3-32. Distribución de la altura piezométrica a la hora de mínimo consumo

Nuevamente se puede observar como las tuberías que han pasado a ser el único punto de entrada a los sectores planteados presentan mayores pérdidas unitarias que durante la situación actual.

Es conveniente diferenciar las pérdidas de carga originadas en las tuberías de transporte y en las tuberías de distribución, ya que los límites que se consideran como admisibles varían entre ellas. Para el caso de las tuberías de distribución, el límite se encuentra en 1 m/km, mientras que para las tuberías de transporte se admiten pérdidas de 5-20 m/km, dependiendo del diámetro de dichas tuberías.

Aquellas tramo de la red de distribución cuyas pérdidas sean superiores a 1 m/km, habrán de ser considerados con especial atención puesto que ante un aumento de la demanda de originarán pérdidas muy importantes pudiendo así afectar la calidad del servicio.

En dichas tuberías la probabilidad de que aparezcan pérdidas de carga importantes y de que las velocidades de flujo sean excesivas, es muy alta, con lo cual se propone la sustitución progresiva de estos tramos con prioridad en aquellas tuberías de fibrocemento, comenzando por las tuberías que afectan al casco antiguo.

Otra forma de observar las pérdidas unitarias del sistema es mediante la curva de distribución de este parámetro. Se puede observar como alrededor del 95% de las tuberías tienen una pérdidas de carga inferiores a 2m/km.

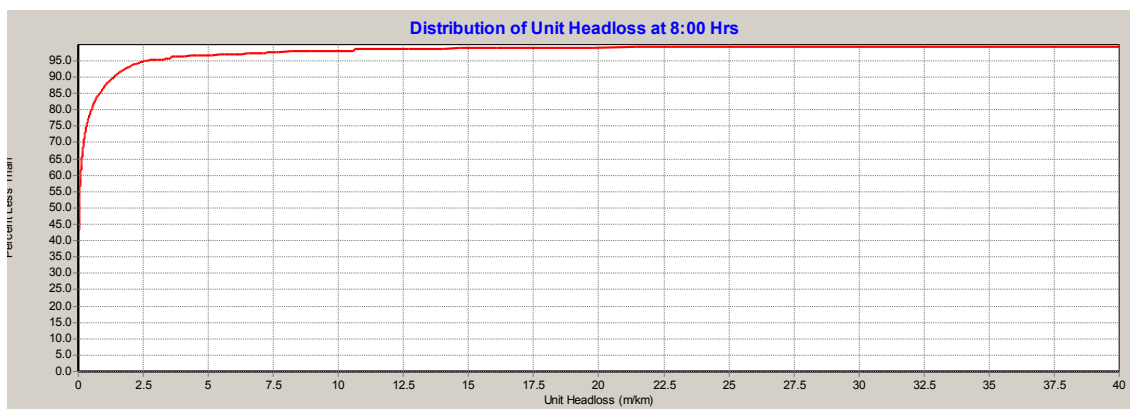


Figura A3-33. Distribución de los niveles de pérdidas unitarias en la tuberías para la hora punta

### 1.2.4 Distribución de presiones

Otra de las variables principales a analizar cuando se pretende proporcionar un diagnóstico del funcionamiento de la red es el nivel de presiones. En este caso, va a estar fuertemente ligado a la orografía del terreno.

La Figura A3-34 se corresponde con el mapa de presiones de la red de distribución del casco urbano de Requena:

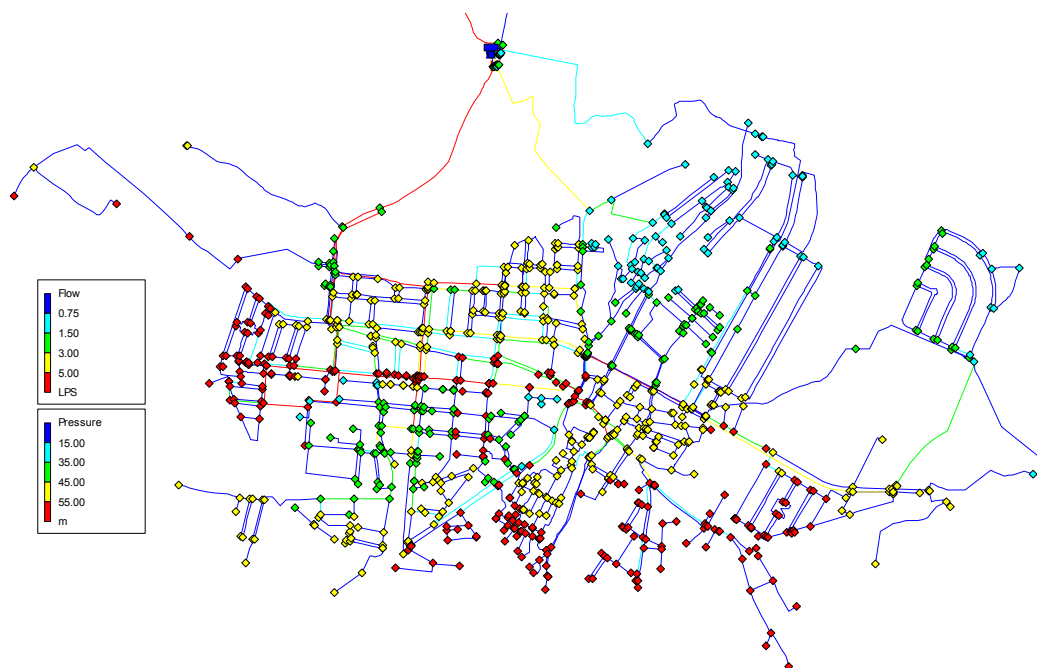


Figura A3-34. Niveles de presiones en los nudos para la hora punta

Al analizar la distribución de presiones en la red, se puede afirmar que el sistema de distribución presenta unos niveles de presión considerablemente altos en torno a los 5 kp/cm<sup>2</sup>. Las zonas que menores presiones presentan en horas punta son las zonas del noreste, con presiones en torno a los 20 mca en hora punta.

En general, los valores de presión en los nudos del modelo en hora punta, se encuentran entre los 15 y 70 m.c.a, con lo que comprobamos la disparidad de presiones dependiendo de la zona de la

red. El 50% de los nudos de consumo posee una presión de servicio en hora punta por encima de los 50 m.c.a, encontrando un 5% de puntos con presiones inferiores a los 22 mca en horas de máximo consumo.

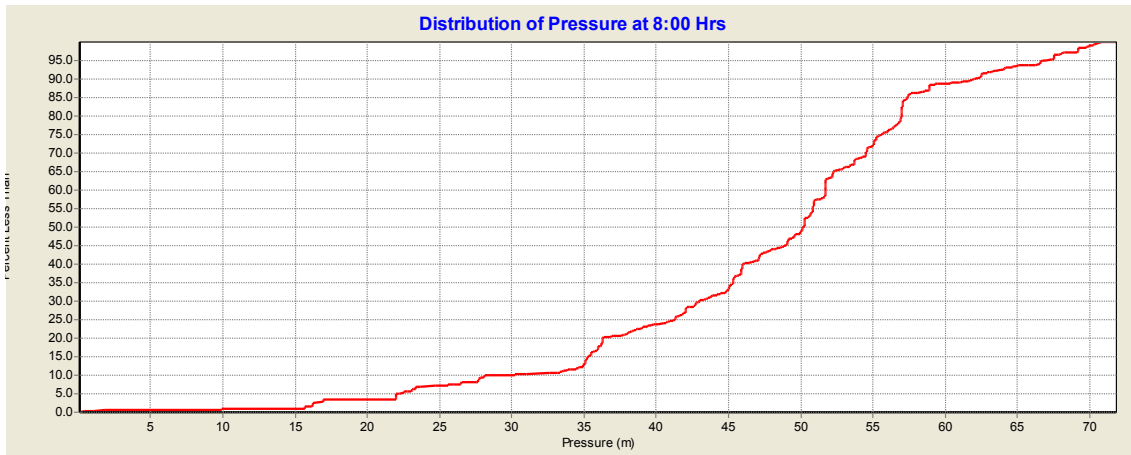


Figura A3-35. Distribución de las presiones en los nudos durante la hora de máximo consumo

Durante las horas nocturnas (entre las 3 y las 6 am), el nivel de presiones es superior. Si comparamos ahora las presiones de los nudos con las de las horas diurnas, vemos como en horas nocturnas alcanzan valores de presión algo superiores 3 ó 4 mca por encima como mínimo, aunque existen zonas donde la diferencia de presiones puede llegar a alcanzar los 5 mca. Esto puede provocar una ligera **fatiga mecánica en las tuberías**, lo que resulta pernicioso en tuberías instaladas de cierta antigüedad, ya que suele originar **grietas y roturas** que dan lugar a fugas importantes en la red.

A continuación se muestran las presiones en los diferentes nudos de la red de distribución para las horas valle y la curva de distribución para el citado periodo:

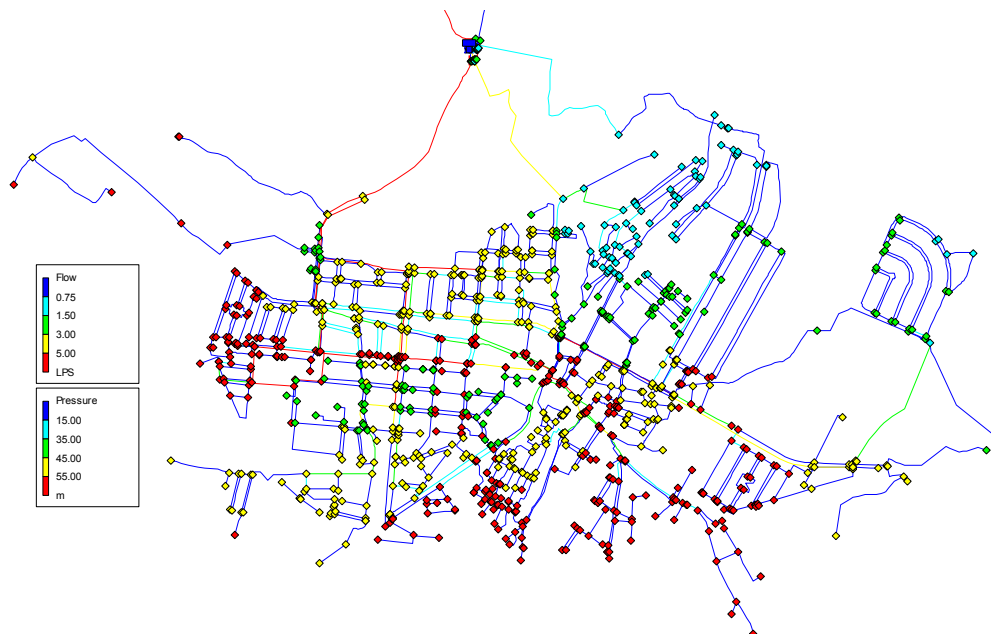


Figura A3-36. Niveles de presiones en los nudos para la hora valle

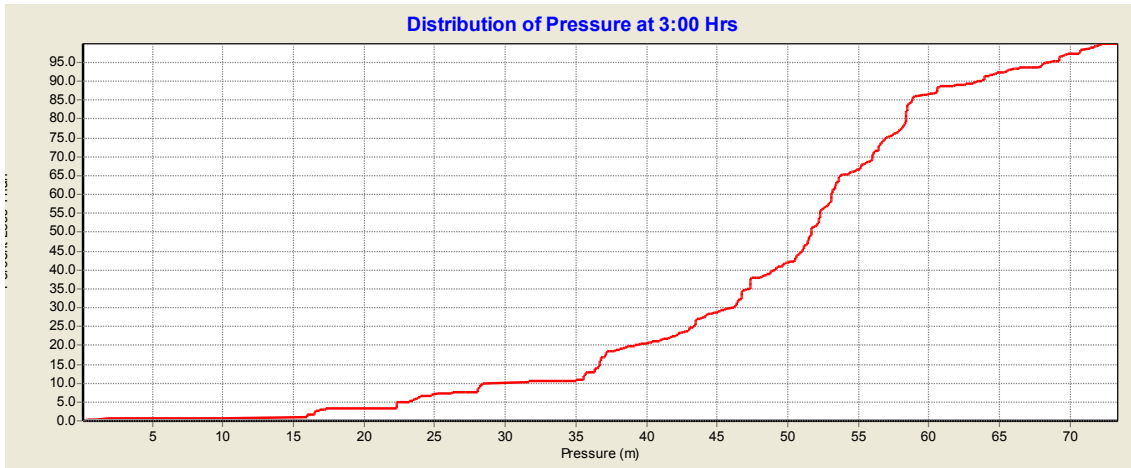


Figura A3-37. Distribución de las presiones en los nudos durante la hora de máximo consumo

Para terminar con el apartado de las presiones, a continuación se muestran los mapas de isóneas de presiones para ambas horas y así poder compararlas con mayor facilidad:

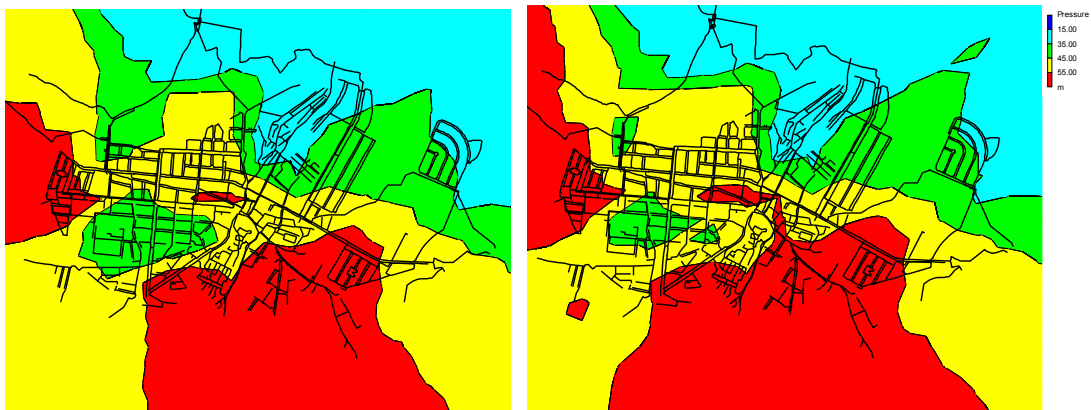


Figura A3-38. Mapas de isóneas de presiones para las 8:00 y 3:00 horas

### 1.2.5 ANÁLISIS DEL TIEMPO DE PERMANENCIA DEL AGUA EN LA RED

Por último y desde el punto de vista de la calidad, se ha analizado el tiempo que tarda el agua en llegar a un nudo o a una tubería desde que sale de las fuentes de suministro, es decir, los pozos y depósitos.

Como se ha comentado, el tiempo de permanencia del agua (también denominado tiempo de retención o envejecimiento) es el tiempo que permanece una determinada porción de agua en el interior de la red.

A continuación se muestran los resultados del tiempo de permanencia para la red tras una simulación de 24 horas.

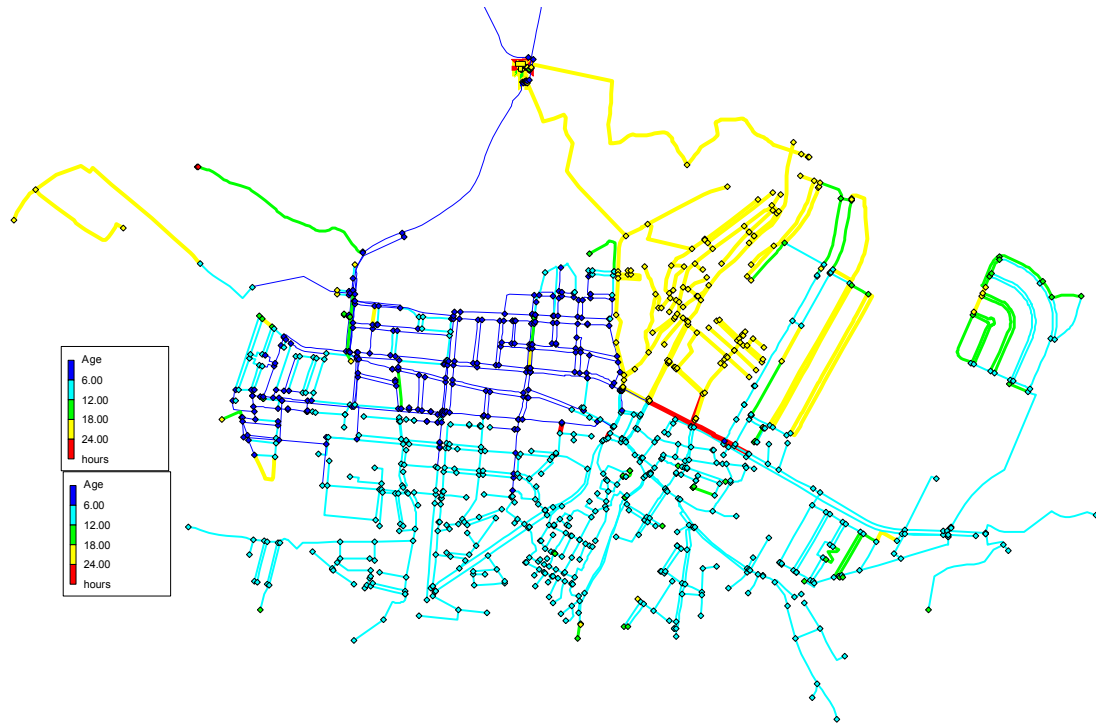


Figura A3-39. Tiempo de permanencia en los nodos y tuberías

Los tiempos de permanencia para la red de Requena son en su mayoría inferiores a 24 horas (para el 95% de los nodos). Sin embargo existen zonas muy localizadas donde el tiempo de permanencia supera este tiempo, lo que puede suponer riesgos en relación a la pérdida de la calidad del agua, por la disminución de la concentración de cloro.

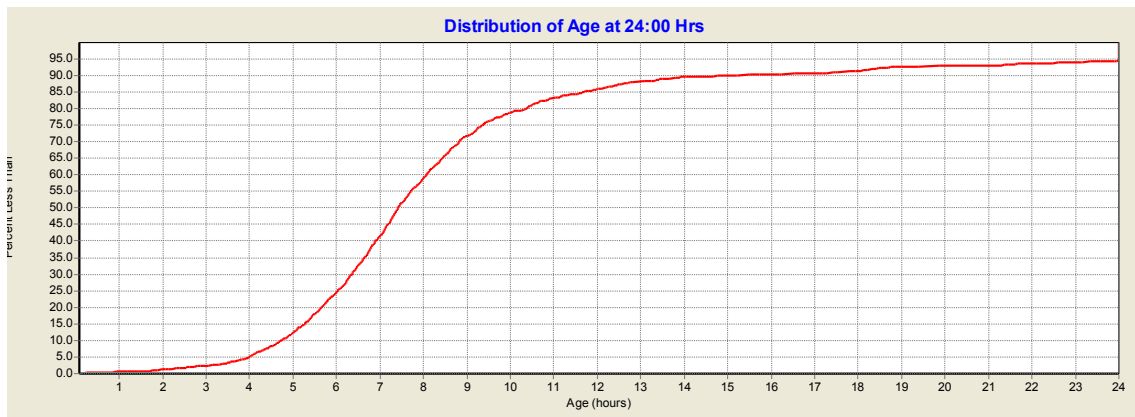


Figura A3-40. Distribución del tiempo de permanencia

Si se fijan en aquellos nodos o tuberías con mayor tiempo de permanencia, vemos que corresponden a zonas que presentan un diseño ramificado, situadas normalmente en áreas periféricas o bien en zonas de muy bajo consumo.

Además, se puede apreciar como aparecen numerosas tuberías cuyo tiempo de permanencia es superior a las 24 horas. Estos es debido a que existen numerosas tuberías que se han cerrado en el modelo matemático para aislar a los sectores.



### 1.2.6 Análisis dinámico de la red

A continuación se va a presentar el análisis dinámico de la red con el cual se ha analizado el comportamiento en los nudos y líneas del sistema a lo largo de 24 horas.

De esta manera se podrá caracterizar con mayor precisión el funcionamiento de la red y ver como evolucionan a lo largo del día los distintos parámetros.

#### 1.2.6.1 Rango de presión

En la Figura A3-41 se puede apreciar como los rangos de variación de la presión a lo largo del las 24 horas estudiadas no se pueden considerar excesivos, con mayor variación en aquellas zonas donde se producen mayores pérdidas unitarias o la cota es menor.



Figura A3-41. Rango de presiones a lo largo de los nudos de consumo para el periodo de simulación

Viendo la distribución de este valor se puede apreciar con mayor detalle como el 70% de los puntos presentan una variación de la presión a lo largo del día menor de 1,6 m.c.a., estando un 55% de los nudos dentro del rango 1,5-1,6 m.c.a. de variación.

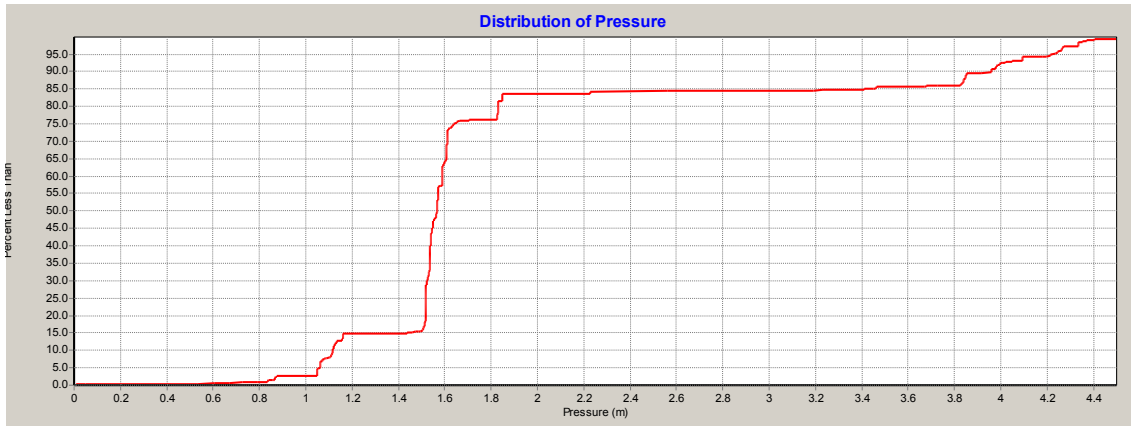


Figura A3-42. Distribución del rango de presiones para el periodo de simulación

Para la situación actual, más del 70% de los nudos se encontraban con una variación igual o inferior a 1,6-1,8 m.c.a. Se puede observar, por tanto, la disminución de esta variación tras la presente sectorización ya que esta mayoría de nudos no llega al valor de 1,6 mca.

### 1.2.6.2 Rango de caudales

En el caso de la variación del caudal a lo largo de las 24 horas de simulación por todas las tuberías de la red se puede observar que es inapreciable para las tuberías de distribución. En cambio, para las tuberías arteriales estas variaciones mayores de los 0,3 l/seg.

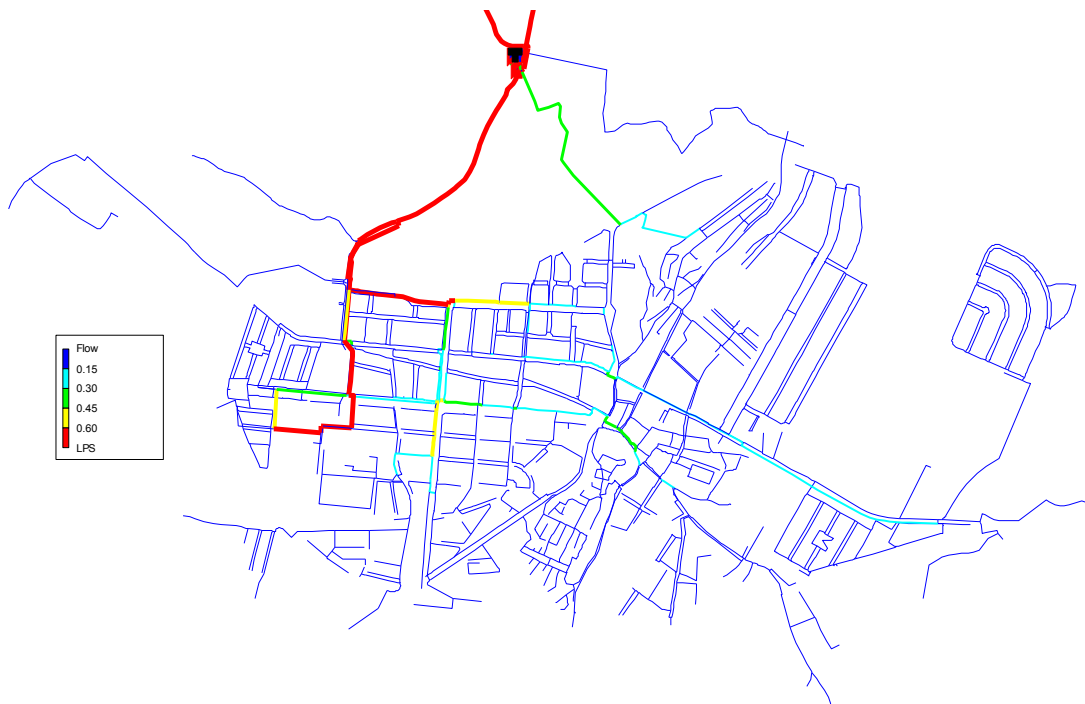


Figura A3-43. Variación del caudal durante el periodo de simulación

En la Figura A3-44 se muestra como el 90% de las tuberías presenta una variación menor de los 0,2 l/seg a lo largo del periodo de simulación.

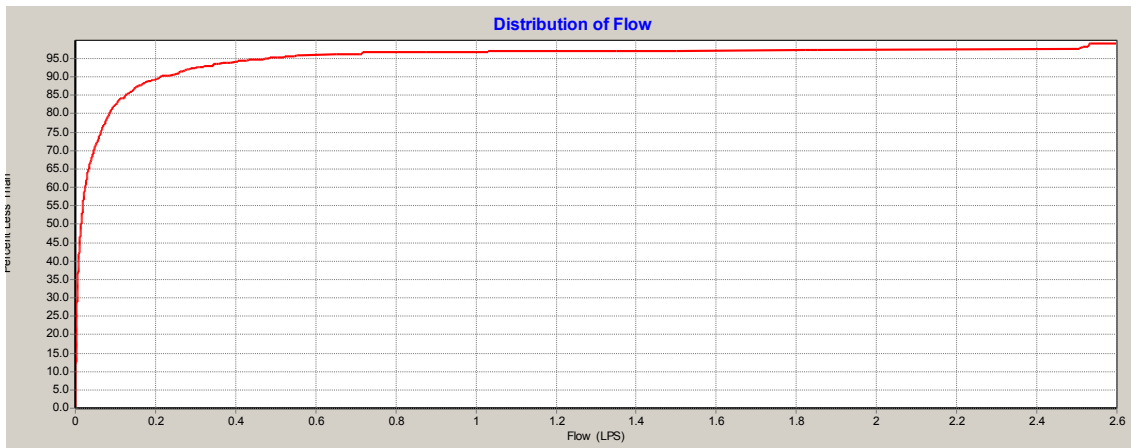


Figura A3-44. Distribución del rango de variación del caudal durante el periodo de simulación

La diferencia con la situación actual de este valor reside en los valores altos de variación. Tras la sectorización, el 96% de las tuberías están por debajo de los 2 l/seg. En cambio, para la situación actual este mismo porcentaje de nudos se encuentra por debajo de los 0,7 l/seg.

### 1.3 Sectorización según el primer procedimiento de optimización energética

#### 1.3.1 Análisis de caudales

Con el análisis de los caudales circulantes quedará de manifiesto qué tuberías son las que transportan mayor cantidad de agua y cuáles son los principales caminos que recorre el agua a lo largo del sistema. Con la sectorización se han cerrado numerosas tuberías con el fin de abastecer a los sectores por un número mínimo de puntos, cosa que facilitará su control. Estas tuberías de entrada verán un importante aumento del caudal a transportar.

Aun así, el estudio de caudales circulantes por la red de distribución no merece menor atención. Dicho análisis pondrá de manifiesto aquellas pequeñas tuberías de distribución con la capacidad hidráulica sobreexplotada.

A continuación se muestra la red del casco urbano de Requena tras se sectorizada según los criterios de cota clasificadas por caudales para la situación de hora máximo consumo:

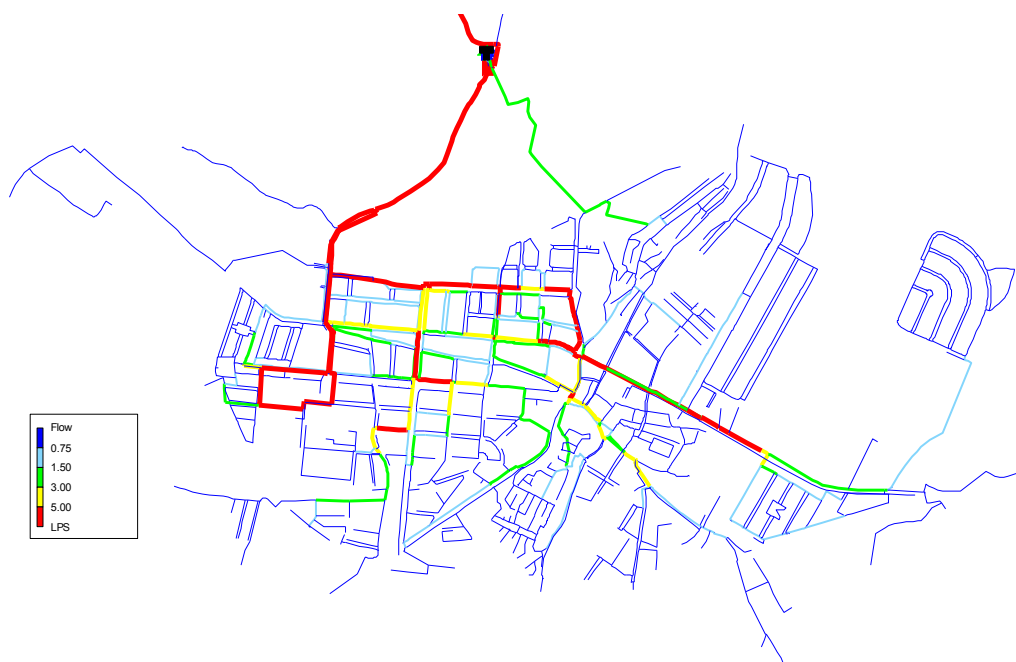


Figura A3-45. Caudales en las tuberías del sistema en hora punta

De la Figura A3-45 se desprende que aquellas tuberías con mayor diámetro, que conforman la red arterial, y las entradas a los sectores son las que transportan mayor volumen de agua por unidad de tiempo. Por el contrario, aquellas con menores diámetros poseen caudales circulantes menores.

Si se observa la distribución de los anteriores caudales en dicha hora punta:

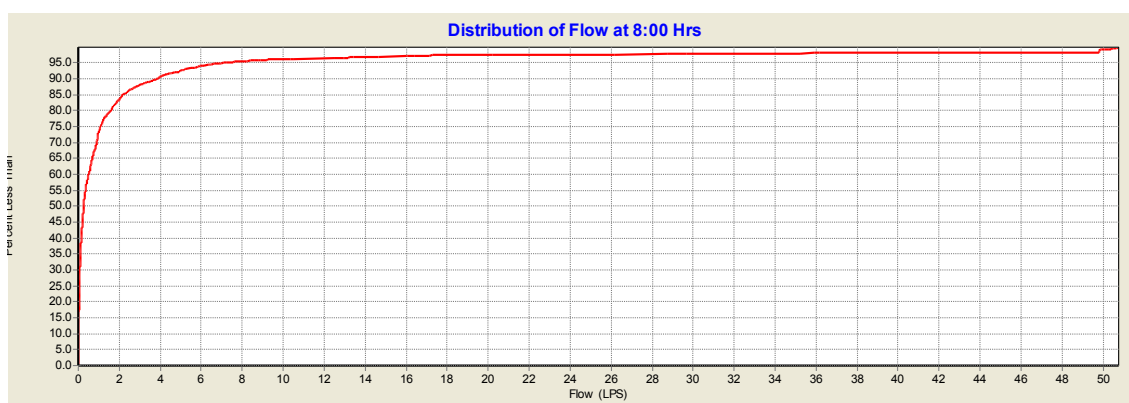


Figura A3-46. Distribución del caudal para las 8:00 horas

Se puede apreciar como el 85% de las tuberías presentan un caudal inferior a los 2 l/seg, de las cuales el 45% apenas ronda los 0,1 l/seg.

En cambio, al estudiar la misma distribución para la hora de mínimo consumo del día, al más del 85% de las tuberías no sobrepasa el umbral de los 2 l/seg, y el 40% de este grupo con unos caudales del orden de los 0,1 l/seg.

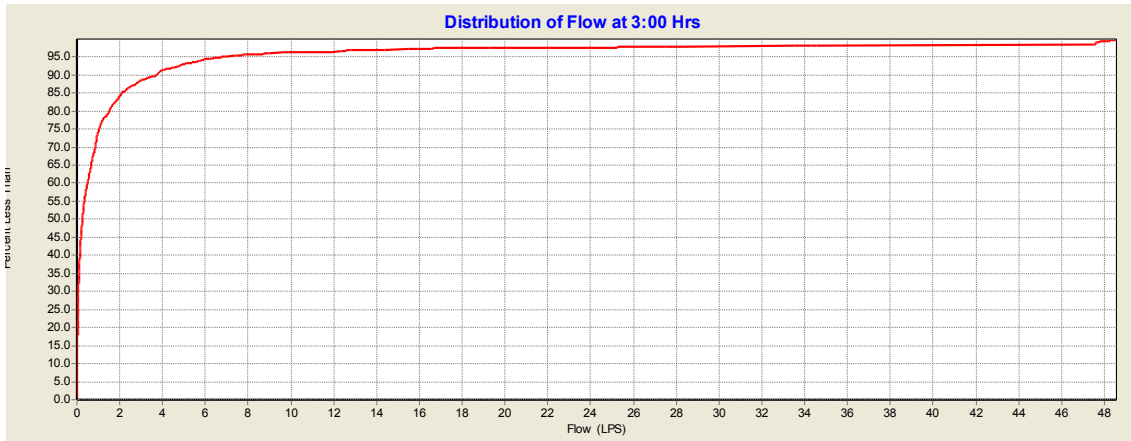


Figura A3-47. Distribución del caudal para la hora de mínimo consumo

### 1.3.2 Análisis de velocidades

Tras una simulación a 24 horas del modelo matemático confeccionado para la situación actual bajo condiciones de demanda del día de máximo consumo del año, se muestran las velocidades máximas en las tuberías. Se observa como la velocidad de circulación del agua es inferior a 1 m/s (velocidad de diseño) en la mayoría de las conducciones. De hecho, la curva de distribución indica que prácticamente el 97% de las tuberías de la red tienen velocidades inferiores a 1 m/s en hora punta del día medio, con lo cual es evidente que en general las pérdidas de carga en el sistema no son demasiado acusadas a tenor de estos valores de velocidad. No obstante, existen tuberías aisladas con velocidades relativamente altas en las que la pérdida de carga es considerable.

En cuanto a las velocidades, se tiene lo siguiente para la hora de máximo consumo:



Figura A3-48. Velocidades en las tuberías del sistema en hora punta

Se observan ciertas tuberías de distribuci3n de bajo calibre, que presentan velocidades entre los 1 y 2 m/seg. Adem3s, se puede comprobar como las tuberías que abastecen a los sectores tiene velocidades mayores a los 2 m/seg.

Al igual que para los valores de los caudales circulantes, a continuaci3n se adjunta la curva de distribuci3n de velocidades para el momento de m3ximo consumo:

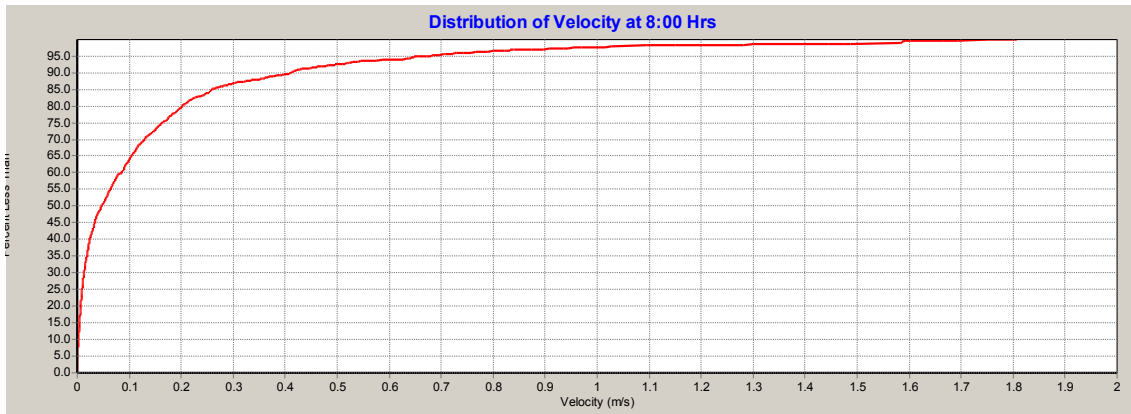


Figura A3-49. Distribuci3n de las velocidades en hora punta

La curva de distribuci3n indica que pr3cticamente el 96% de las tuberías de la red tiene velocidades inferiores a 1 m/seg, con lo cual es evidente que las p3rdidas de carga originadas por las altas velocidades no ser3n demasiado acusadas.

En definitiva, las velocidades obtenidas tras la sectorizaci3n son ligeramente superiores que en el caso actual sin realizar esta t3cnica.

Los valores de las velocidades en las diferentes tuberías, al igual que ocurría con los caudales no presentan una gran variaci3n.

### 1.3.3 Alturas piezom3tricas y p3rdidas de carga unitarias

Tras una simulaci3n, el an3lisis de las alturas piezom3tricas en los nudos de la red nos permite obtener conclusiones acerca de la p3rdida de carga a lo largo de los tramos m3s cr3ticos y por tanto, nos ayuda a localizar los estrangulamientos o 'cuellos de botella' existentes, donde el flujo de caudal puede llegar a ser excesivo.

El an3lisis de las alturas piezom3tricas en la red en hora punta presenta una disminuci3n l3gica en el sentido de circulaci3n del flujo, es decir, desde los puntos de producci3n hacia las zonas terminales de la red, influenciado mayoritariamente por la cota y las p3rdidas ocasionadas.

En las siguientes figuras se muestran las alturas piezom3tricas en los nudos de la red del para las horas de m3ximo consumo y m3nimo.

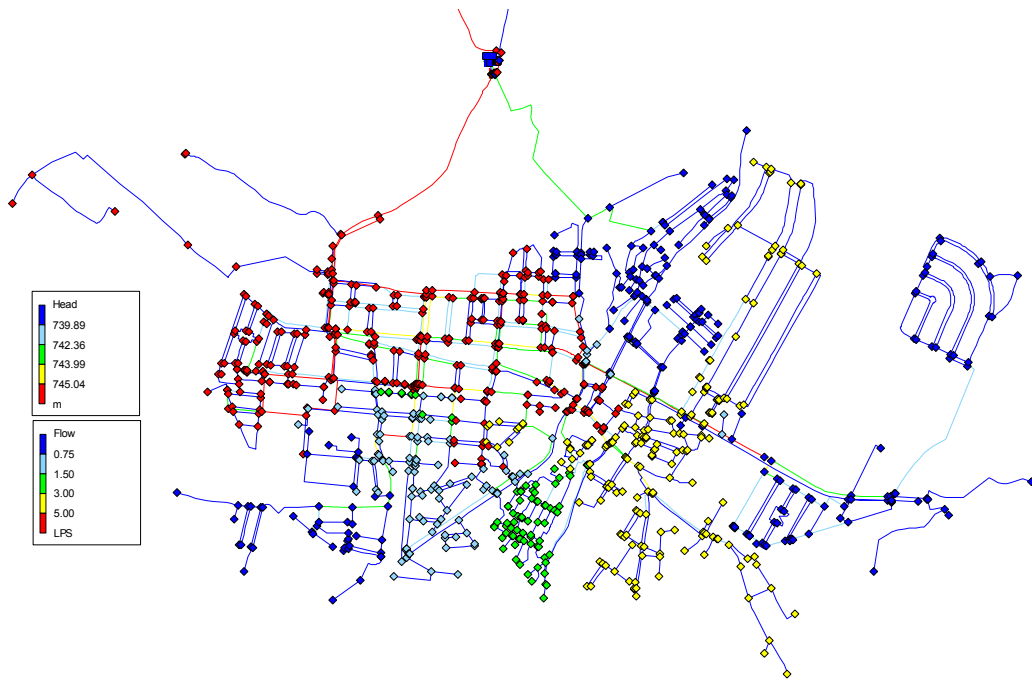


Figura A3-50. Alturas piezométricas en los nudos para las 8:00 h.

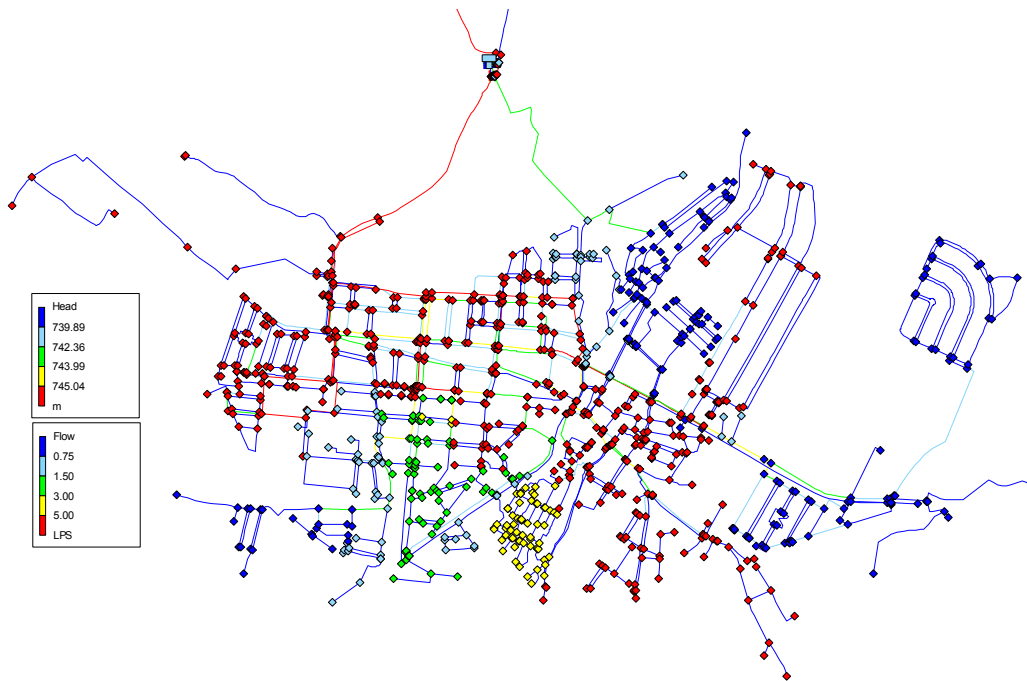


Figura A3-51. Alturas piezométricas en los nudos para las 3:00 h.

Claramente se puede observar como los niveles de este valor aumentan durante las horas nocturnas en la zona centro del casco urbano.

Para poder apreciar mejor estos valores, a continuación se adjuntan los mapas de isótopos de la altura piezométrica para ambos instantes:

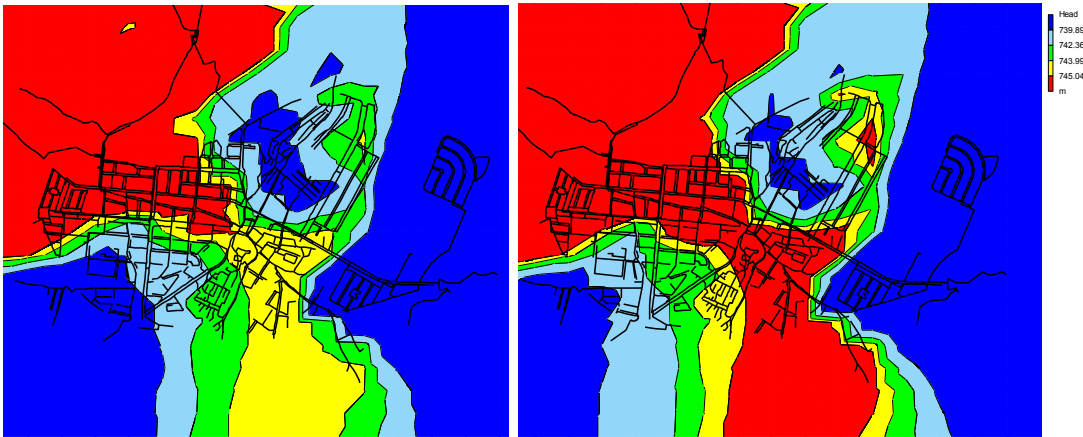


Figura A3-52. Mapas de isolíneas de las alturas piezométricas para las 8:00 y 3:00 horas

En general se observan alturas piezométricas considerablemente altas en la zona noroeste, lo que resulta normal puesto que se trata de las zonas de mayor cota del núcleo urbano. Sin embargo hay que destacar la zona ubicada al noreste y suroeste debido a sus menores valores de elevación. Se observa aumento de este valor para las horas valle

En cuanto a la distribución de este valor, se puede apreciar en las siguientes figuras con mayor claridad el aumento de los niveles:

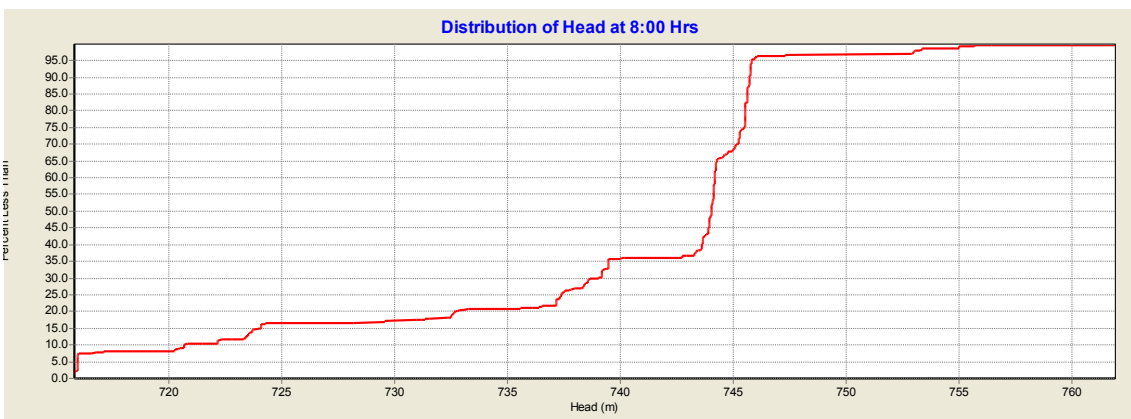


Figura A3-53. Distribución de la altura piezométrica a las 8:00

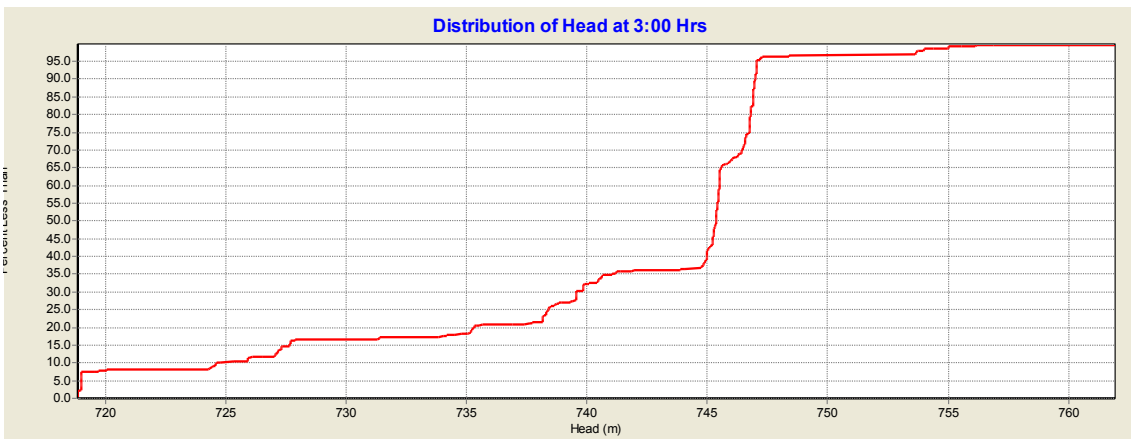


Figura A3-54. Distribución de la altura piezométrica a la hora de mínimo consumo



La siguiente figura muestra las pérdidas de carga máximas en la red del casco urbano. En color rojo se muestran las tuberías que presentan la máxima pérdida de carga unitaria.



Figura A3-55. Distribución de la altura piezométrica a la hora de mínimo consumo

Nuevamente se puede observar como las tuberías que han pasado a ser el único punto de entrada a los sectores planteados presentan mayores pérdidas unitarias que durante la situación actual.

Es conveniente diferenciar las pérdidas de carga originadas en las tuberías de transporte y en las tuberías de distribución, ya que los límites que se consideran como admisibles varían entre ellas. Para el caso de las tuberías de distribución, el límite se encuentra en 1 m/km, mientras que para las tuberías de transporte se admiten pérdidas de 5-20 m/km, dependiendo del diámetro de dichas tuberías.

Aquellas tramo de la red de distribución cuyas pérdidas sean superiores a 1 m/km, habrán de ser considerados con especial atención puesto que ante un aumento de la demanda de originarán pérdidas muy importantes pudiendo así afectar la calidad del servicio.

En dichas tuberías la probabilidad de que aparezcan pérdidas de carga importantes y de que las velocidades de flujo sean excesivas, es muy alta, con lo cual se propone la sustitución progresiva de estos tramos con prioridad en aquellas tuberías de fibrocemento, comenzando por las tuberías que afectan al casco antiguo.

Otra forma de observar las pérdidas unitarias del sistema es mediante la curva de distribución de este parámetro. Se puede observar como alrededor del 86% de las tuberías tienen una pérdidas de carga inferiores a 2m/km.

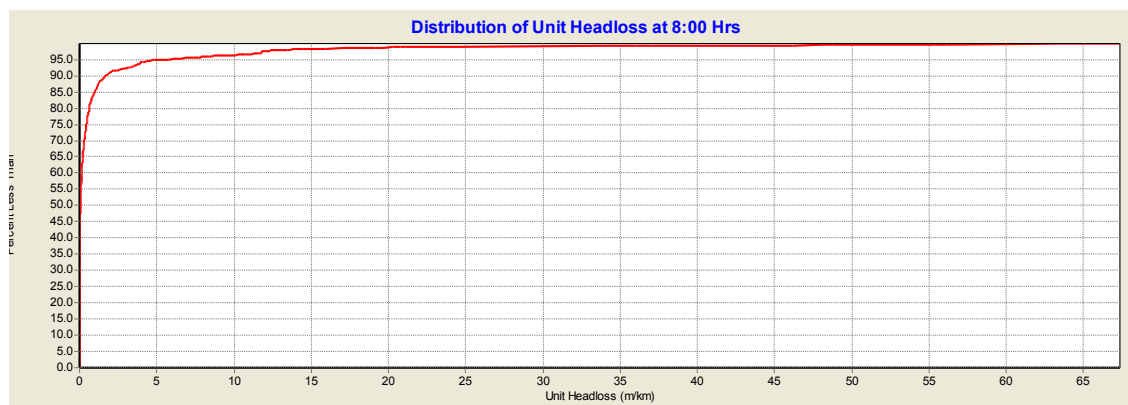


Figura A3-56. Distribución de los niveles de pérdidas unitarias en la tuberías para la hora punta

### 1.3.4 Distribución de presiones

Otra de las variables principales a analizar cuando se pretende proporcionar un diagnóstico del funcionamiento de la red es el nivel de presiones. En este caso, va a estar fuertemente ligado a la orografía del terreno.

La siguiente imagen se corresponde con el mapa de presiones de la red de distribución del casco urbano de Requena:

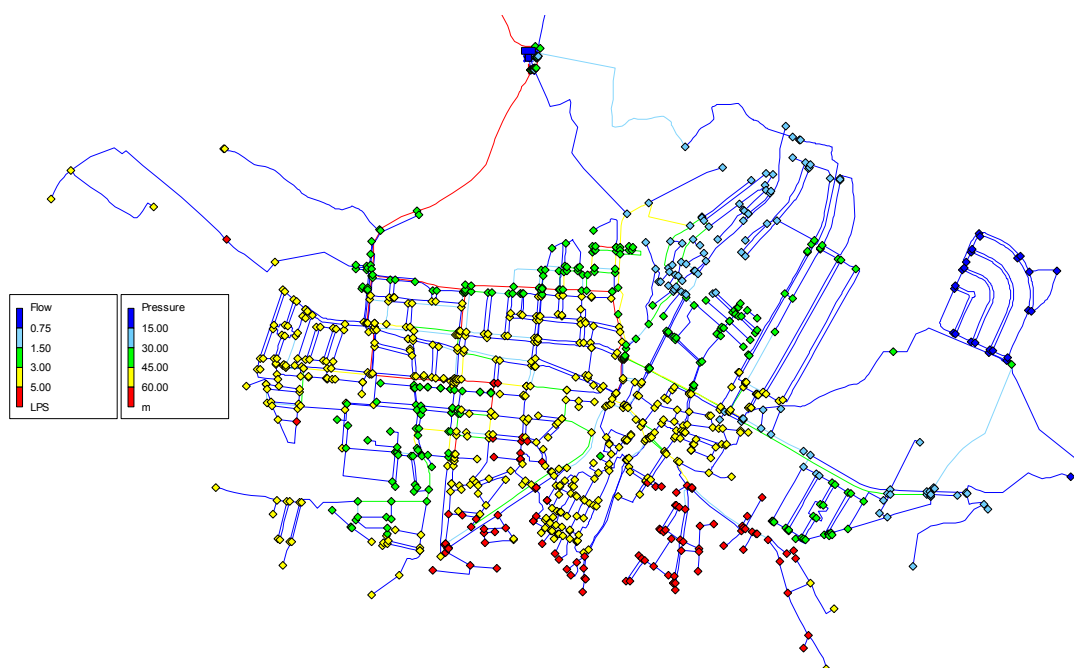


Figura A3-57. Niveles de presiones en los nudos para la hora punta

Al analizar la distribución de presiones en la red, se puede afirmar que el sistema de distribución presenta unos niveles de presión considerablemente altos en torno a los 4,5-5  $\text{kp/cm}^2$ . Las zonas que menores presiones presentan en horas punta son las zonas del noreste, con presiones en torno a los 20 mca en hora punta.

En general, los valores de presión en los nudos del modelo en hora punta, se encuentran entre los 20 y 65 m.c.a, con lo que comprobamos la disparidad de presiones dependiendo de la zona de la

red. El 50% de los nudos de consumo posee una presión de servicio en hora punta por encima de los 50 m.c.a, encontrando un 5% de puntos con presiones inferiores a los 23 mca en horas de máximo consumo.

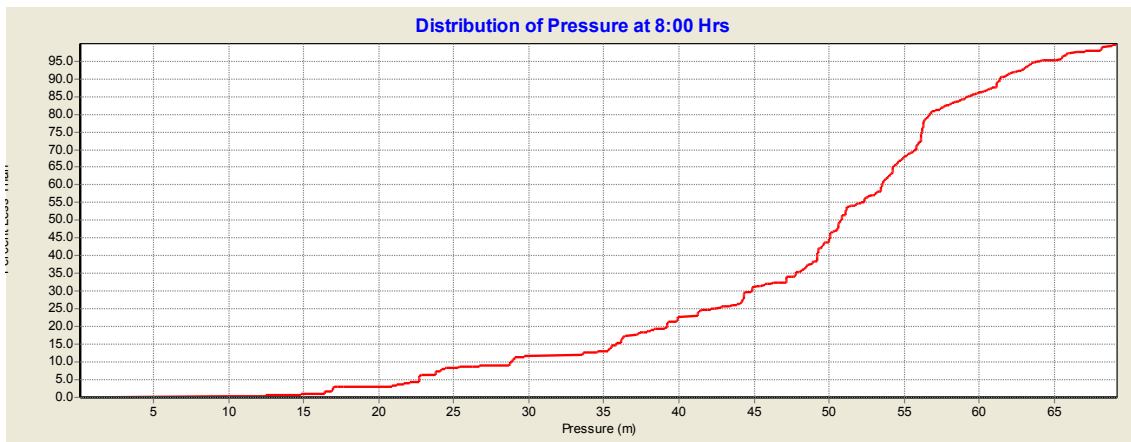


Figura A3-58. Distribución de las presiones en los nudos durante la hora de máximo consumo

Durante las horas nocturnas (entre las 3 y las 6 am), el nivel de presiones es superior. Si comparamos ahora las presiones de los nudos con las de las horas diurnas, vemos como en horas nocturnas alcanzan valores de presión algo superiores 3 ó 4 mca por encima como mínimo, aunque existen zonas donde la diferencia de presiones puede llegar a alcanzar los 5 mca. Esto puede provocar una ligera **fatiga mecánica en las tuberías**, lo que resulta pernicioso en tuberías instaladas de cierta antigüedad, ya que suele originar **grietas y roturas** que dan lugar a fugas importantes en la red.

A continuación se muestran las presiones en los diferentes nudos de la red de distribución para las horas valle y la curva de distribución para el citado periodo:

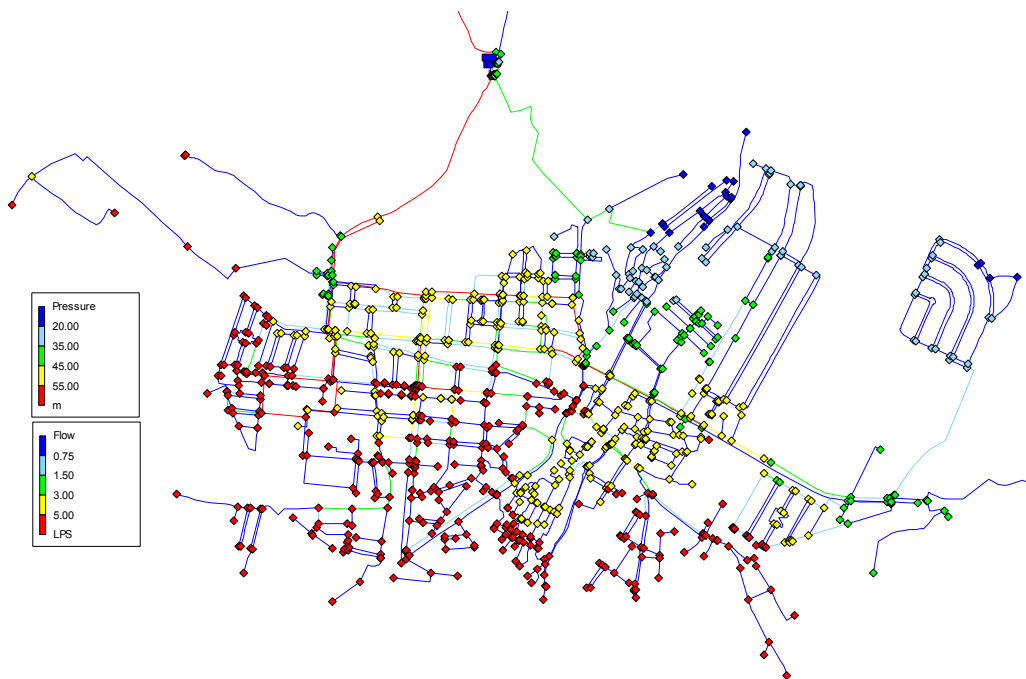


Figura A3-59. Niveles de presiones en los nudos para la hora valle

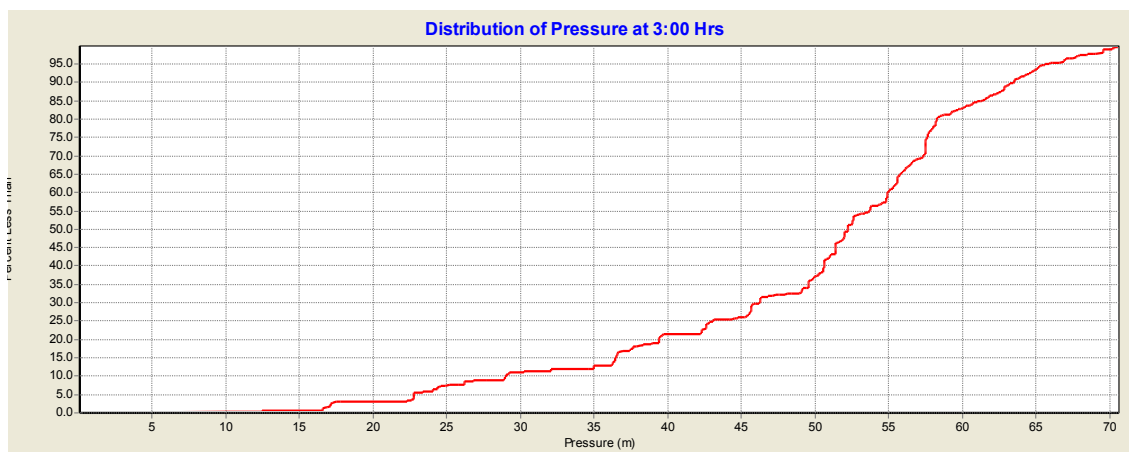


Figura A3-60. Distribución de las presiones en los nudos durante la hora de máximo consumo

Para terminar con el apartado de las presiones, a continuación se muestran los mapas de isólinas de presiones para ambas horas y así poder compararlas con mayor facilidad:

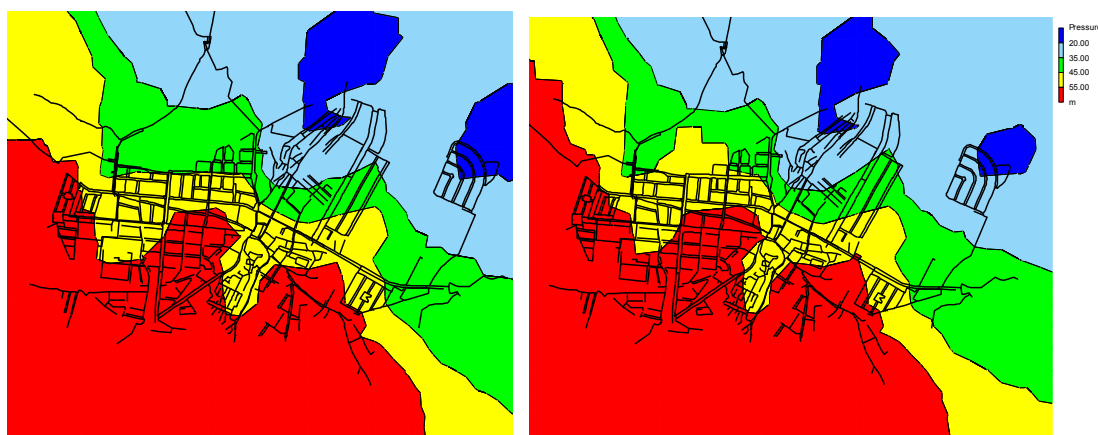


Figura A3-61. Mapas de isólinas de presiones para las 8:00 y 3:00 horas

### 1.3.5 ANÁLISIS DEL TIEMPO DE PERMANENCIA DEL AGUA EN LA RED

Por último y desde el punto de vista de la calidad, se ha analizado el tiempo que tarda el agua en llegar a un nudo o a una tubería desde que sale de las fuentes de suministro, es decir, los pozos y depósitos.

Como se ha comentado, el tiempo de permanencia del agua (también denominado tiempo de retención o envejecimiento) es el tiempo que permanece una determinada porción de agua en el interior de la red.

A continuación se muestran los resultados del tiempo de permanencia para la red tras una simulación de 24 horas.

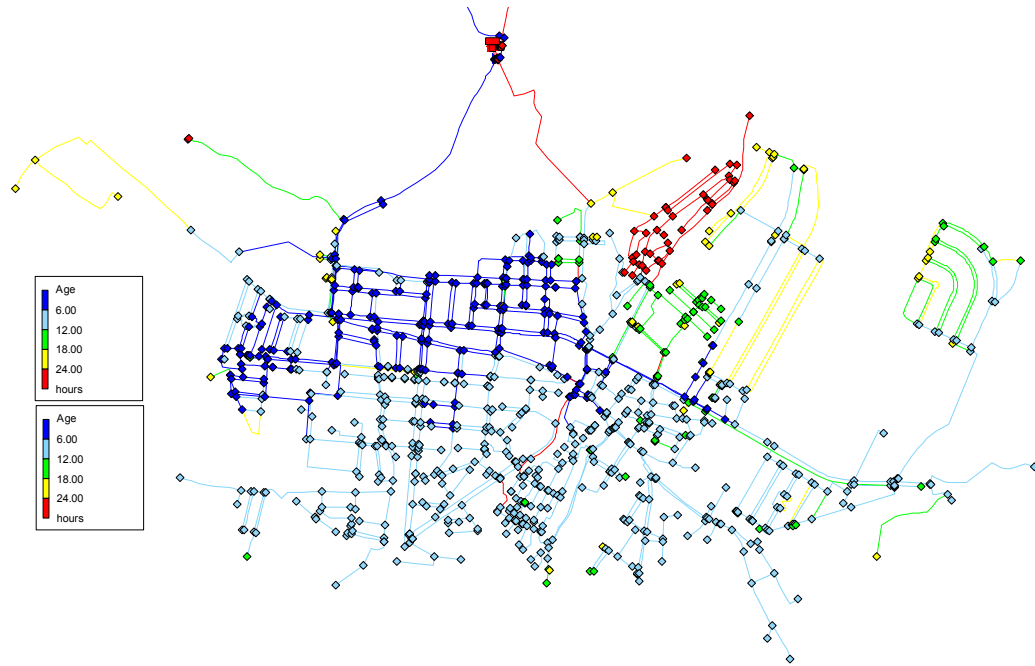


Figura A3-62. Tiempo de permanencia en los nudos y tuberías

Los tiempos de permanencia para la red de Requeña son en su mayoría inferiores a 24 horas (para el 95% de los nudos). Sin embargo existen zonas muy localizadas donde el tiempo de permanencia supera este tiempo, lo que puede suponer riesgos en relación a la pérdida de la calidad del agua, por la disminución de la concentración de cloro.

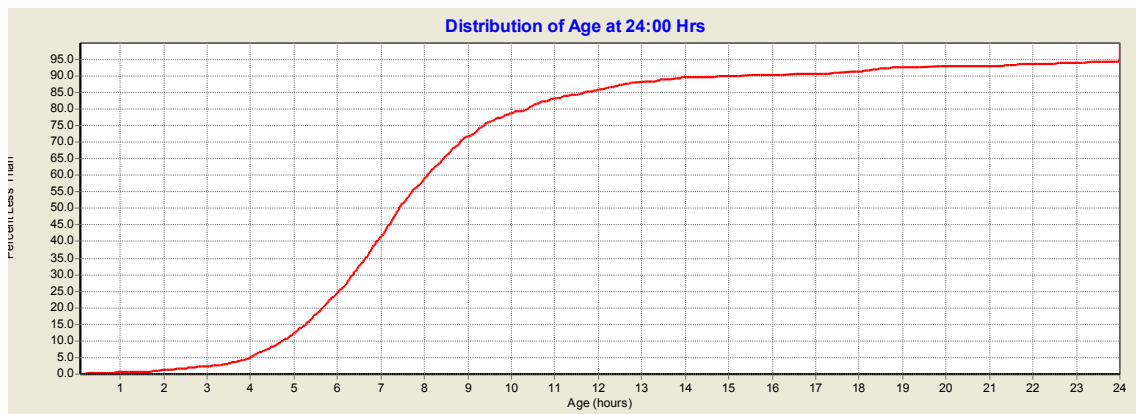


Figura A3-63. Distribución del tiempo de permanencia

Si se fijan en aquellos nudos o tuberías con mayor tiempo de permanencia, vemos que corresponden a zonas que presentan un diseño ramificado, situadas normalmente en áreas periféricas o bien en zonas de muy bajo consumo.

Además, se puede apreciar como aparecen numerosas tuberías cuyo tiempo de permanencia es superior a las 24 horas. Estos es debido a que existen numerosas tuberías que se han cerrado en el modelo matemático para aislar a los sectores.

### 1.3.6 Análisis dinámico de la red

A continuación se va a presentar el análisis dinámico de la red con el cual se ha analizado el comportamiento en los nudos y líneas del sistema a lo largo de 24 horas.

De esta manera se podrá caracterizar con mayor precisión el funcionamiento de la red y ver como evolucionan a lo largo del día los distintos parámetros.

#### 1.3.6.1 Rango de presión

En la siguiente figura se puede apreciar como los rangos de variación de la presión a lo largo de las 24 horas estudiadas no se pueden considerar excesivos, con mayor variación en aquellas zonas donde se producen mayores pérdidas unitarias o la cota es menor.

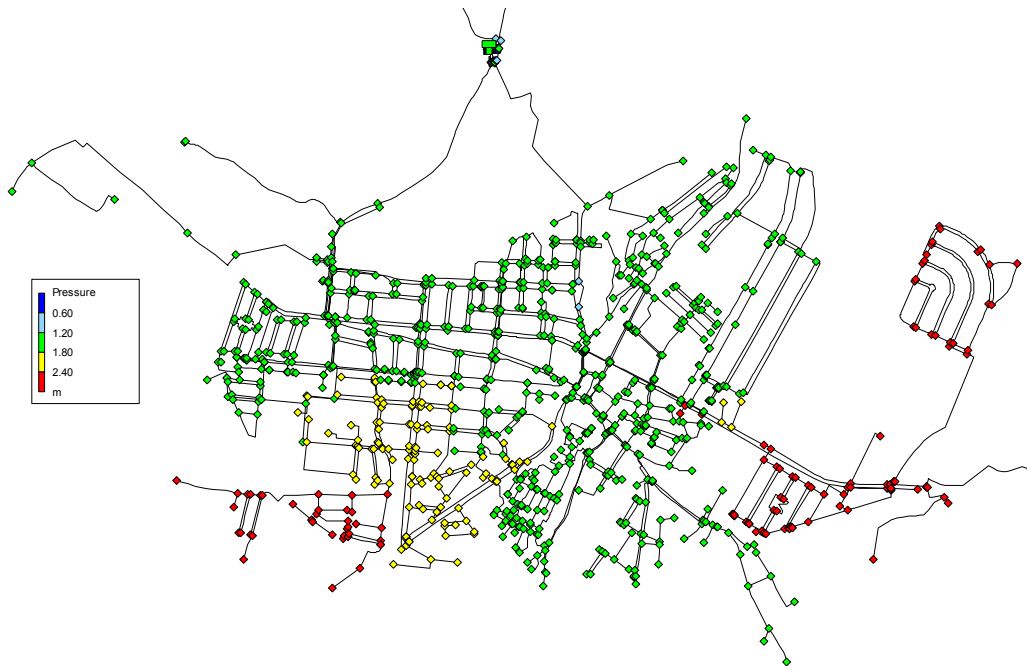


Figura A3-64. Rango de presiones a lo largo de los nudos de consumo para el periodo de simulación

Viendo la distribución de este valor se puede apreciar con mayor detalle como el 60% de los puntos presentan una variación de la presión a lo largo del día menor a 1,6 m.c.a.

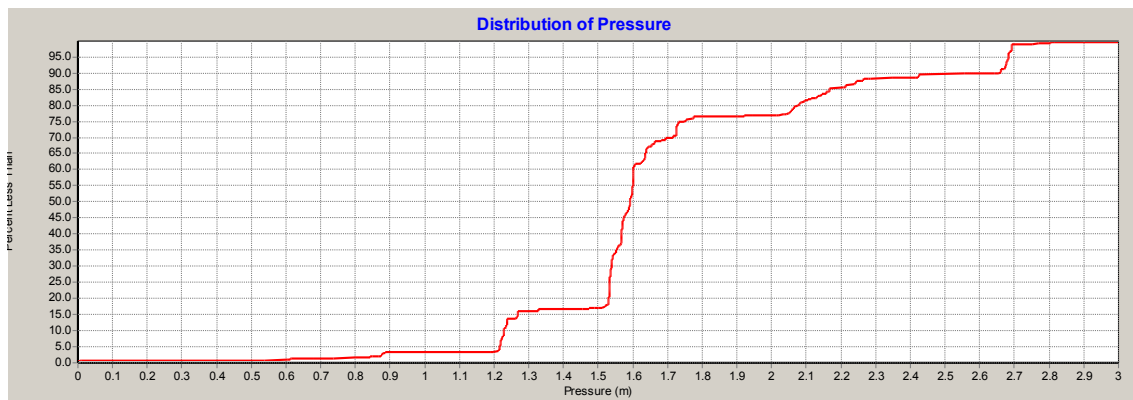


Figura A3-65. Distribución del rango de presiones para el periodo de simulación

Para la situación actual, más del 70% de los nudos se encontraban por debajo del rango 1,6-1,8 mca de variación. Se puede observar, por tanto, la disminución de esta variación tras la presente sectorización ya que esta mayoría de nudos no llega al valor de 1,6 mca.

### 1.3.6.2 Rango de caudales

En el caso de la variación del caudal a lo largo de las 24 horas de simulación por todas las tuberías de la red se puede observar que es inapreciable para las tuberías de distribución. En cambio, para las tuberías arteriales estas variaciones mayores de los 0,3 l/seg.

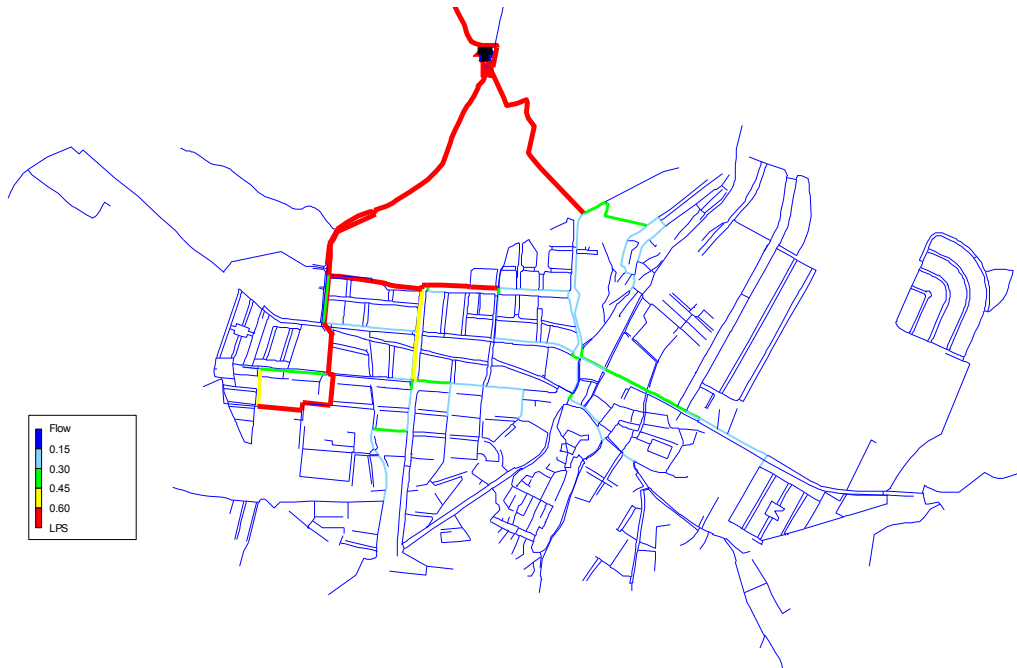


Figura A3-66. Variación del caudal durante el periodo de simulación

En la siguiente figura se muestra como el 92% de las tuberías presenta una variación menor de los 0,2 l/seg a lo largo del periodo de simulación.

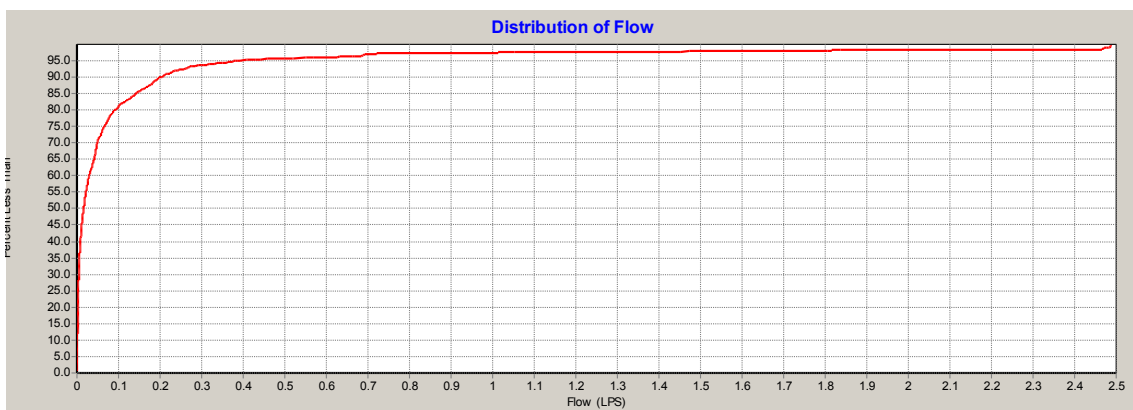


Figura A3-67. Distribución del rango de variación del caudal durante el periodo de simulación

## 1.4 Sectorización según el segundo procedimiento de optimización energética

### 1.4.1 Análisis de caudales

Con el análisis de los caudales circulantes quedará de manifiesto qué tuberías son las que transportan mayor cantidad de agua y cuáles son los principales caminos que recorre el agua a lo largo del sistema. Con la sectorización se han cerrado numerosas tuberías con el fin de abastecer a los sectores por un número mínimo de puntos, cosa que facilitará su control. Estas tuberías de entrada verán un importante aumento del caudal a transportar.

Aun así, el estudio de caudales circulantes por la red de distribución no merece menor atención. Dicho análisis pondrá de manifiesto aquellas pequeñas tuberías de distribución con la capacidad hidráulica sobreexplotada.

A continuación se muestra la red del casco urbano de Requena tras se sectorizada según los criterios de cota clasificadas por caudales para la situación de hora máximo consumo:

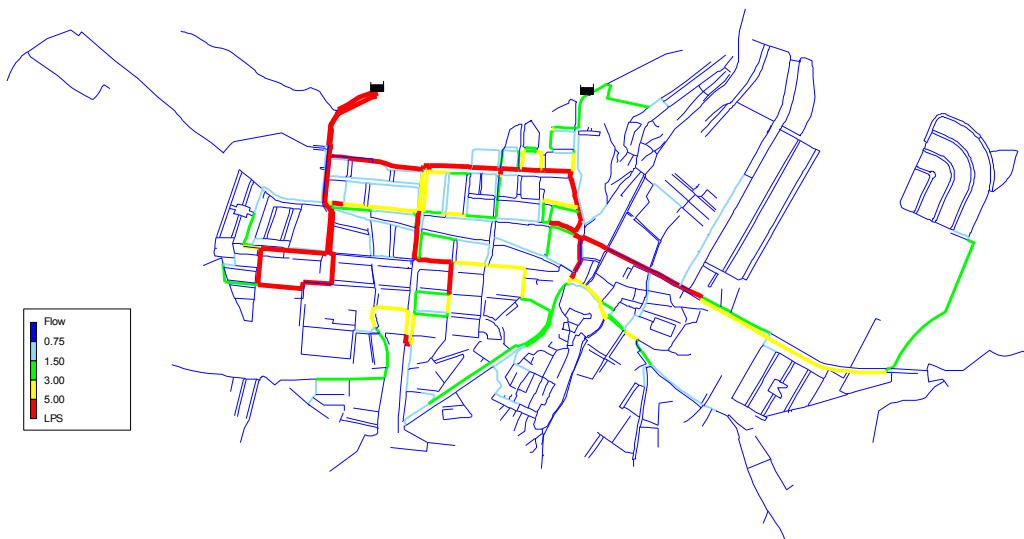


Figura A3-68. Caudales en las tuberías del sistema en hora punta

De la Figura A3-68 se desprende que aquellas tuberías con mayor diámetro, que conforman la red arterial, y las entradas a los sectores son la que transportan mayor volumen de agua por unidad de tiempo. Por el contrario, aquellas con menores diámetros poseen caudales circulantes menores.

Si se observa la distribución de los anteriores caudales en dicha hora punta:



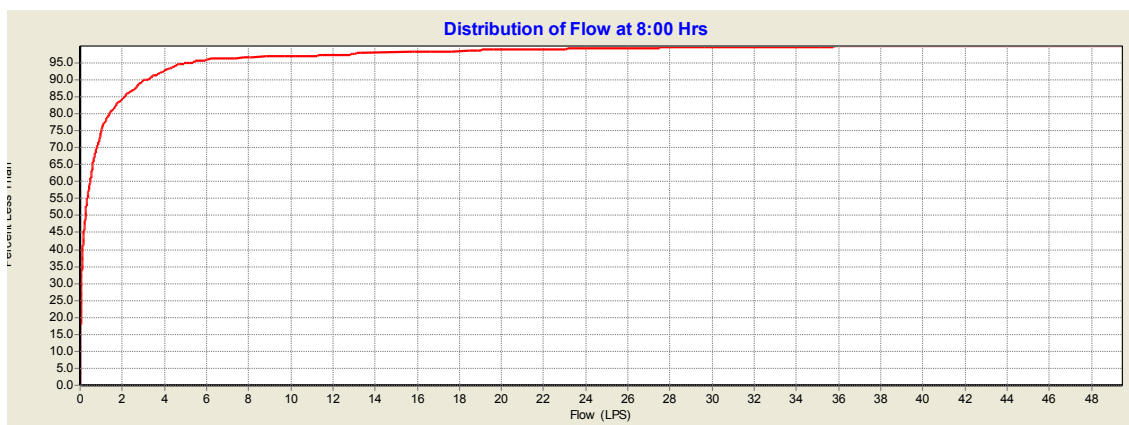


Figura A3-69. Distribución del caudal para las 8:00 horas

Se puede apreciar como el 84% de las tuberías presentan un caudal inferior a los 2 l/seg, de las cuales el 40% apenas ronda los 0,1 l/seg.

En cambio, al estudiar la misma distribución para la hora de mínimo consumo del día, el 85% de las tuberías no sobrepasa el umbral de los 2 l/seg, y el 45% de este grupo con unos caudales del orden de los 0,1 l/seg.

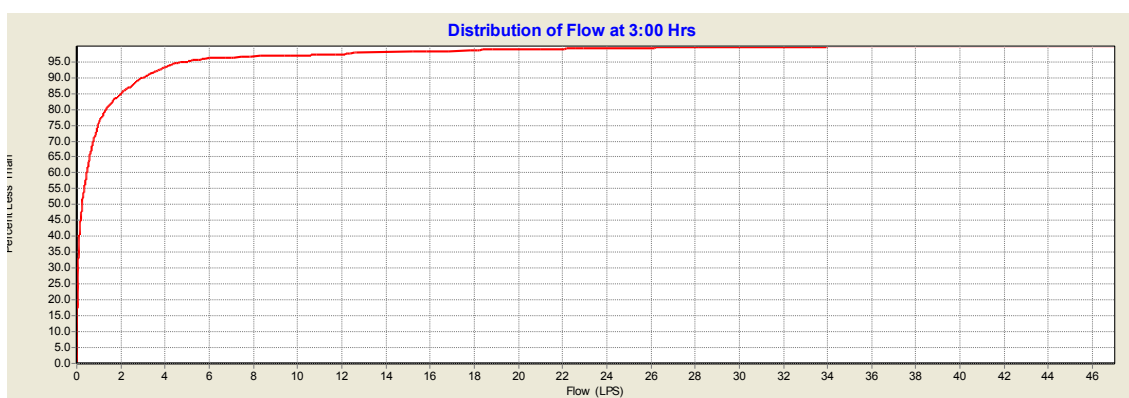


Figura A3-70. Distribución del caudal para la hora de mínimo consumo

#### 1.4.2 Análisis de velocidades

Tras una simulación a 24 horas del modelo matemático confeccionado para la situación actual bajo condiciones de demanda del día de máximo consumo del año, se muestran las velocidades máximas en las tuberías. Se observa como la velocidad de circulación del agua es inferior a 1 m/s (velocidad de diseño) en la mayoría de las conducciones. De hecho, la curva de distribución indica que prácticamente el 98% de las tuberías de la red tienen velocidades inferiores a 1 m/s en hora punta del día medio, con lo cual es evidente que en general las pérdidas de carga en el sistema no son demasiado acusadas a tenor de estos valores de velocidad. No obstante, existen tuberías aisladas con velocidades relativamente altas en las que la pérdida de carga es considerable.

En cuanto a las velocidades, se tiene lo siguiente para la hora de máximo consumo:

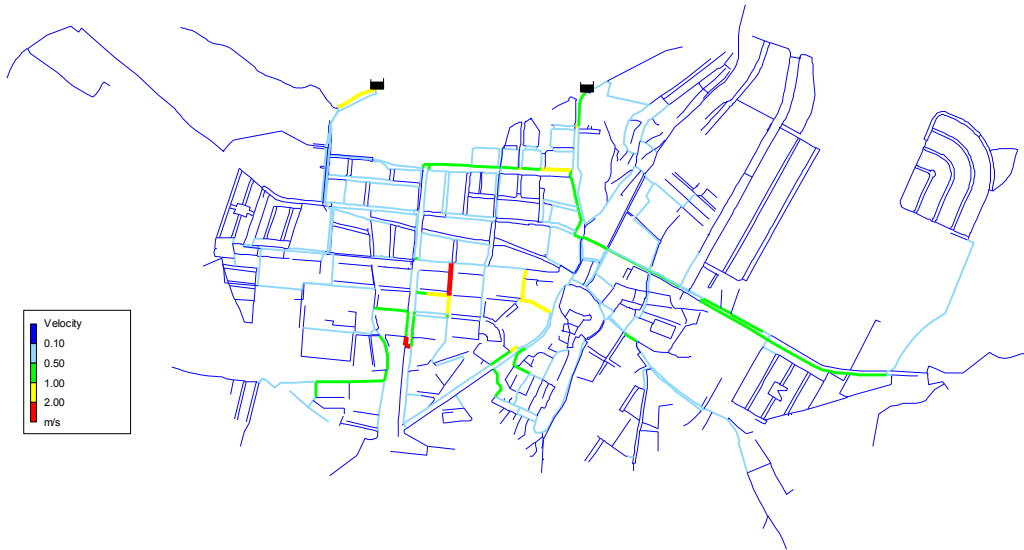


Figura A3-71. Velocidades en las tuberías del sistema en hora punta

Se observan ciertas tuberías de distribución de bajo calibre, que presentan velocidades entre los 1 y 2 m/seg. Además, se puede comprobar como las tuberías que abastecen a los sectores tiene velocidades mayores a los 2 m/seg.

Al igual que para los valores de los caudales circulantes, a continuación se adjunta la curva de distribución de velocidades para el momento de máximo consumo:

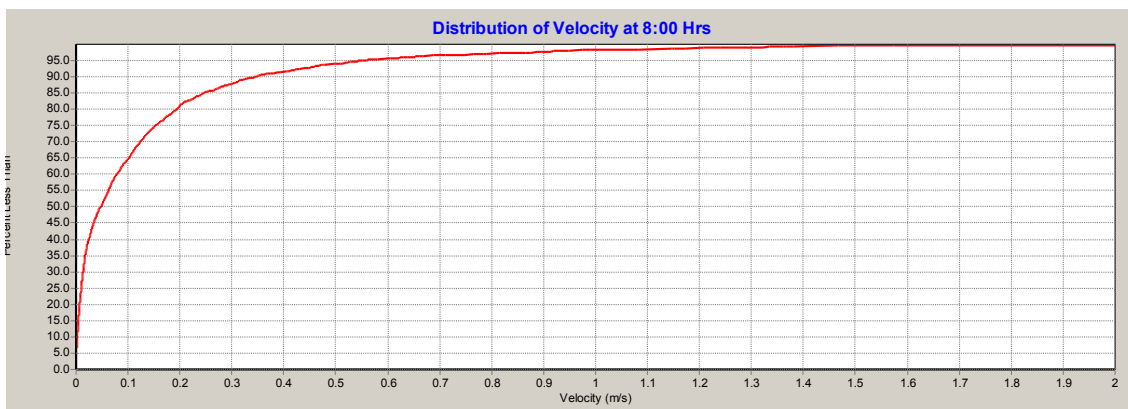


Figura A3-72. Distribución de las velocidades en hora punta

La curva de distribución indica que prácticamente el 98% de las tuberías de la red tiene velocidades inferiores a 1 m/seg, con lo cual es evidente que las pérdidas de carga originadas por las altas velocidades no serán demasiado acusadas.

En definitiva, las velocidades obtenidas tras la sectorización son ligeramente superiores que en el caso actual sin realizar esta técnica.

Los valores de las velocidades en las diferentes tuberías, al igual que ocurría con los caudales no presentan una gran variación.

### 1.4.3 Alturas piezométricas y pérdidas de carga unitarias

Tras una simulación, el análisis de las alturas piezométricas en los nudos de la red nos permite obtener conclusiones acerca de la pérdida de carga a lo largo de los tramos más críticos y por tanto, nos ayuda a localizar los estrangulamientos o 'cuellos de botella' existentes, donde el flujo de caudal puede llegar a ser excesivo.

El análisis de las alturas piezométricas en la red en hora punta presenta una disminución lógica en el sentido de circulación del flujo, es decir, desde los puntos de producción hacia las zonas terminales de la red, influenciado mayoritariamente por la cota y las pérdidas ocasionadas.

En las siguientes figuras se muestran las alturas piezométricas en los nudos de la red del para las horas de máximo consumo y mínimo.

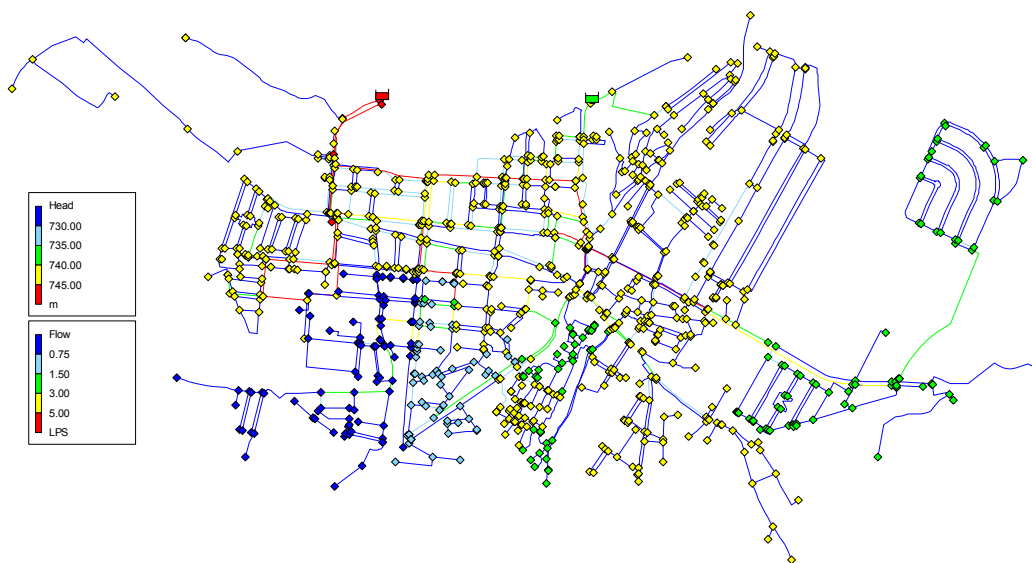


Figura A3-73. Alturas piezométricas en los nudos para las 8:00 h.

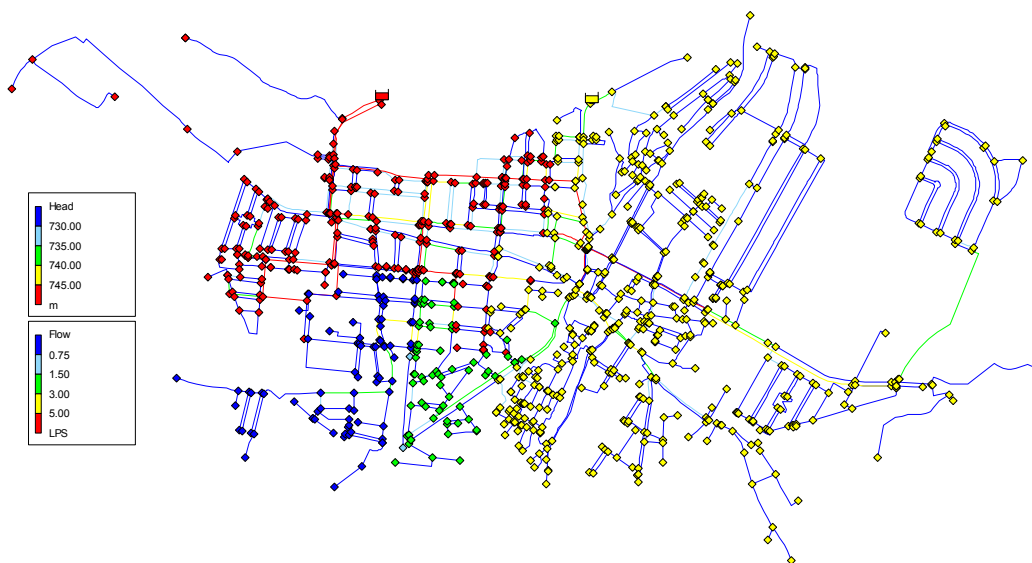


Figura A3-74. Alturas piezométricas en los nudos para las 3:00 h.

Claramente se puede observar como los niveles de este valor aumentan durante las horas nocturnas en la zona centro del casco urbano.

Para poder apreciar mejor estos valores, a continuación se adjuntan los mapas de isótopos de la altura piezométrica para ambos instantes:



Figura A3-75. Mapas de isótopos de las alturas piezométricas para las 8:00 y 3:00 horas

En general se observan alturas piezométricas más homogéneas que las 3 sectorizaciones anteriores, con mayores niveles en la zona noroeste. Sin embargo hay que destacar la zona ubicada al noreste y suroeste debido a sus menores valores de elevación.

En cuanto a la distribución de este valor, se puede apreciar en las siguientes imágenes con mayor claridad el aumento de los niveles:

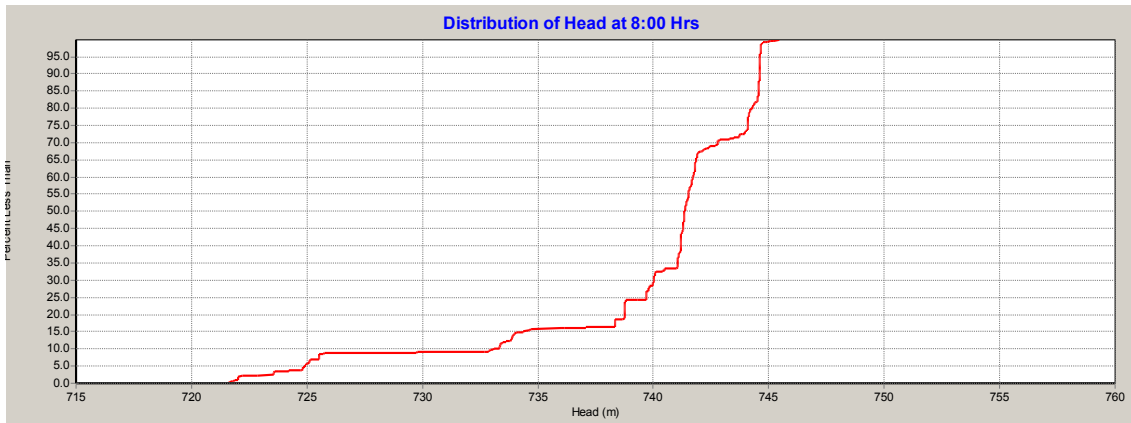


Figura A3-76. Distribución de la altura piezométrica a las 8:00

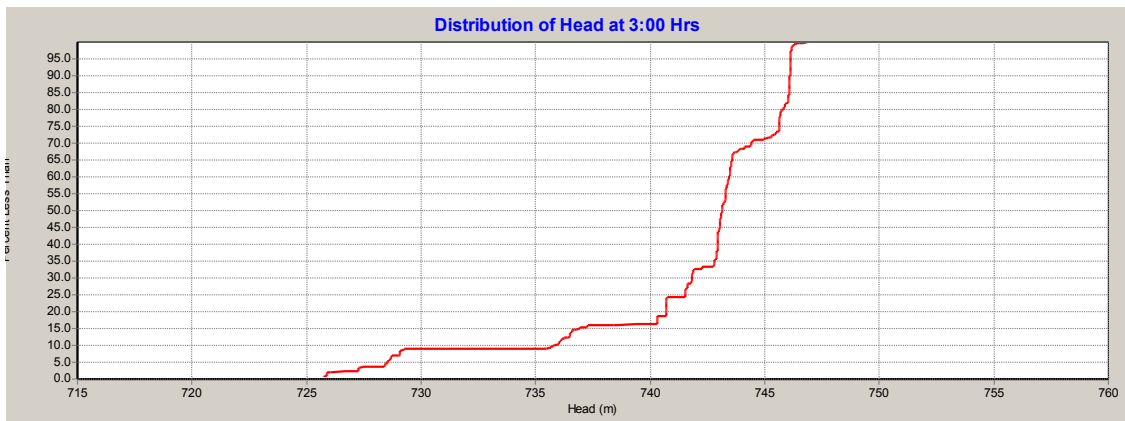


Figura A3-77. Distribución de la altura piezométrica a la hora de mínimo consumo

La Figura A3-78 muestra las pérdidas de carga máximas en la red del casco urbano. En color rojo se muestran las tuberías que presentan la máxima pérdida de carga unitaria.

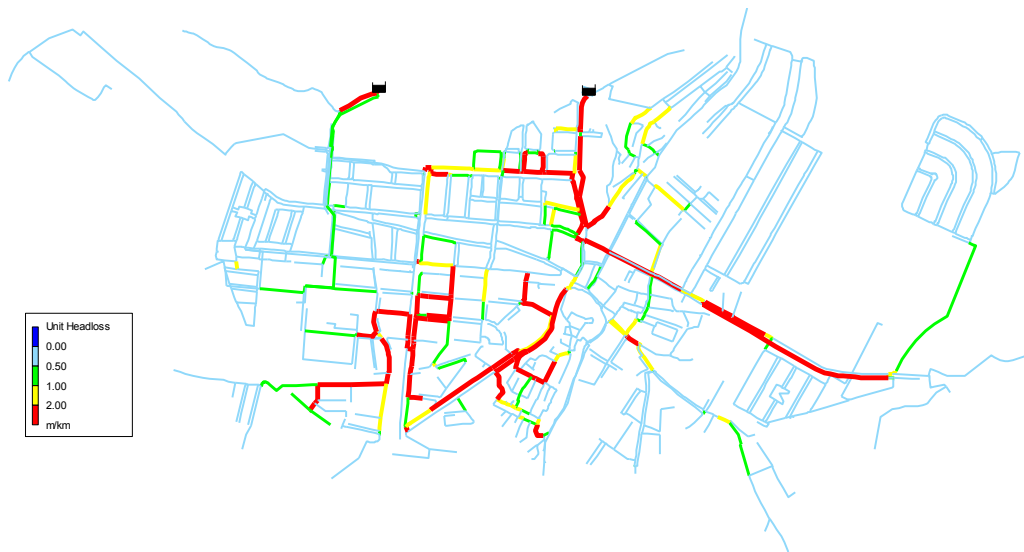


Figura A3-78. Distribución de la altura piezométrica a la hora de mínimo consumo

Nuevamente se puede observar como las tuberías que han pasado a ser el único punto de entrada a los sectores planteados presentan mayores pérdidas unitarias que durante la situación actual.

Es conveniente diferenciar las pérdidas de carga originadas en las tuberías de transporte y en las tuberías de distribución, ya que los límites que se consideran como admisibles varían entre ellas. Para el caso de las tuberías de distribución, el límite se encuentra en 1 m/km, mientras que para las tuberías de transporte se admiten pérdidas de 5-20 m/km, dependiendo del diámetro de dichas tuberías.

Aquellas tramos de la red de distribución cuyas pérdidas sean superiores a 1 m/km, habrán de ser considerados con especial atención puesto que ante un aumento de la demanda de originarán pérdidas muy importantes pudiendo así afectar la calidad del servicio.

En dichas tuberías la probabilidad de que aparezcan pérdidas de carga importantes y de que las velocidades de flujo sean excesivas, es muy alta, con lo cual se propone la sustitución progresiva de estos tramos con prioridad en aquellas tuberías de fibrocemento, comenzando por las tuberías que afectan al casco antiguo.

Otra forma de observar las pérdidas unitarias del sistema es mediante la curva de distribución de este parámetro. Se puede observar como alrededor del 93% de las tuberías tienen una pérdidas de carga inferiores a 2m/km.

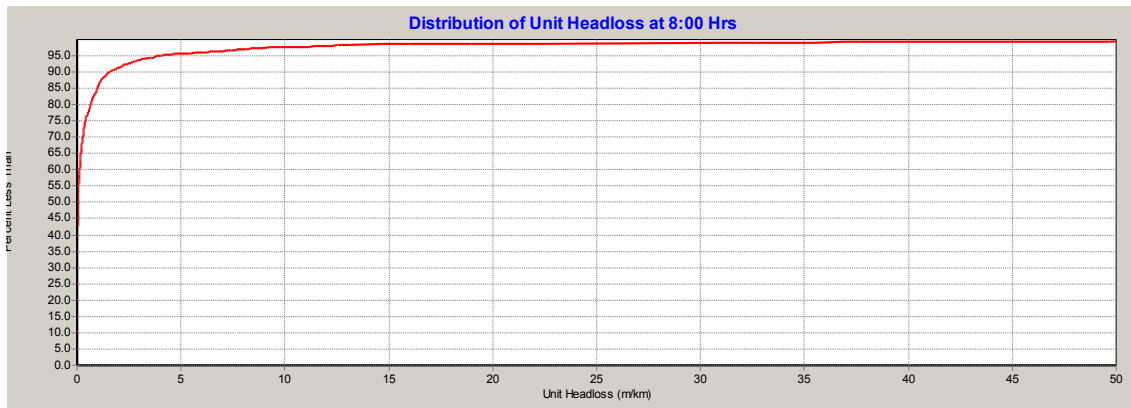


Figura A3-79. Distribución de los niveles de pérdidas unitarias en la tuberías para la hora punta

#### 1.4.4 Distribución de presiones

Otra de las variables principales a analizar cuando se pretende proporcionar un diagnóstico del funcionamiento de la red es el nivel de presiones. En este caso, va a estar fuertemente ligado a la orografía del terreno.

La Figura A3-80 se corresponde con el mapa de presiones de la red de distribución del casco urbano de Requena:

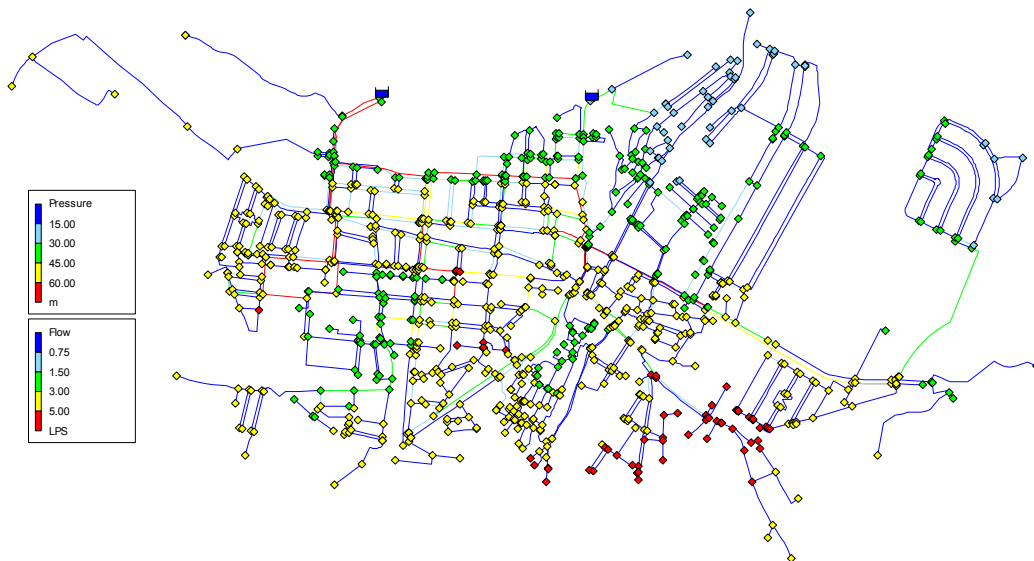


Figura A3-80. Niveles de presiones en los nudos para la hora punta

Al analizar la distribución de presiones en la red, se puede afirmar que el sistema de distribución presenta unos niveles de presión considerablemente altos en torno a los 4,5 kp/cm<sup>2</sup>. Las zonas que menores presiones presentan en horas punta son las zonas del noreste, con presiones en torno a los 20 mca en hora punta.

En general, los valores de presión en los nudos del modelo en hora punta, se encuentran entre los 20 y 65 m.c.a, con lo que comprobamos la disparidad de presiones dependiendo de la zona de la red. El 50% de los nudos de consumo posee una presión de servicio en hora punta por encima de

los 48 m.c.a, encontrando un 5% de puntos con presiones inferiores a los 27 mca en horas de máximo consumo.

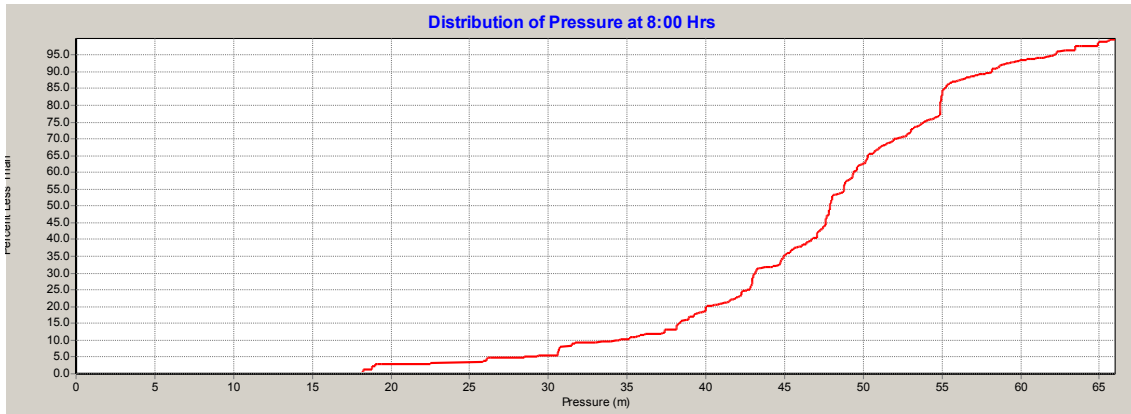


Figura A3-81. Distribución de las presiones en los nudos durante la hora de máximo consumo

Durante las horas nocturnas (entre las 3 y las 6 am), el nivel de presiones es superior. Si comparamos ahora las presiones de los nudos con las de las horas diurnas, vemos como en horas nocturnas alcanzan valores de presión algo superiores 3 ó 4 mca por encima como mínimo, aunque existen zonas donde la diferencia de presiones puede llegar a alcanzar los 5 mca. Esto puede provocar una ligera **fatiga mecánica en las tuberías**, lo que resulta pernicioso en tuberías instaladas de cierta antigüedad, ya que suele originar **grietas y roturas** que dan lugar a fugas importantes en la red.

A continuación se muestran las presiones en los diferentes nudos de la red de distribución para las horas valle y la curva de distribución para el citado periodo:

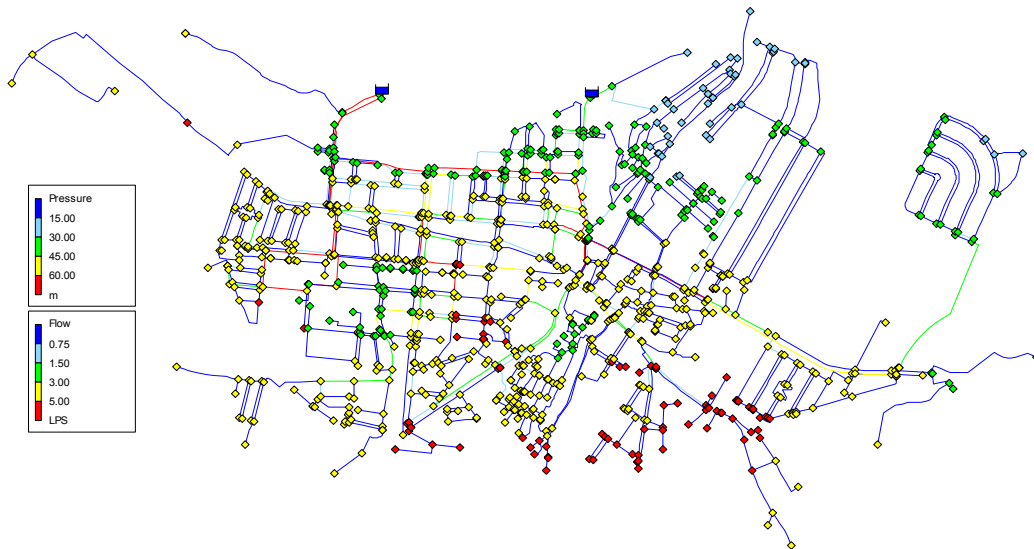


Figura A3-82. Niveles de presiones en los nudos para la hora valle

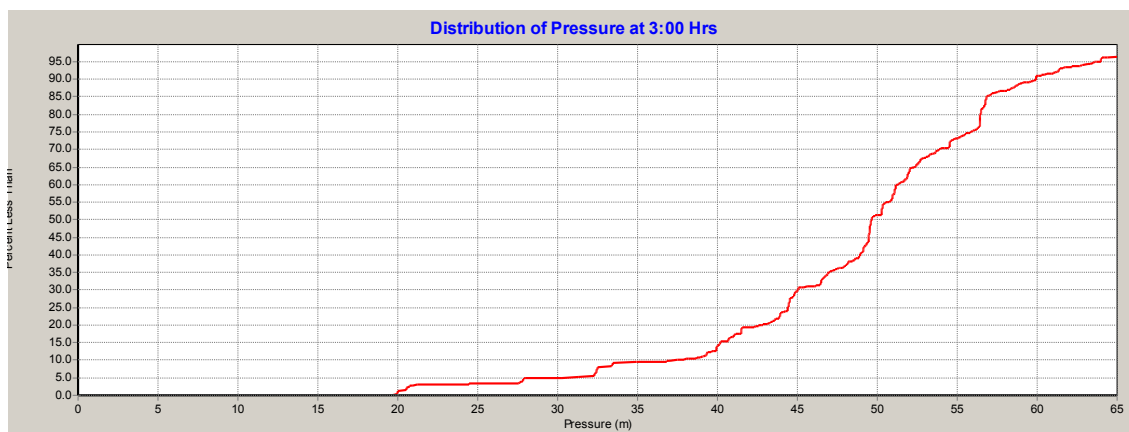


Figura A3-83. Distribución de las presiones en los nudos durante la hora de máximo consumo

Para terminar con el apartado de las presiones, a continuación se muestran los mapas de isóneas de presiones para ambas horas y así poder compararlas con mayor facilidad:



Figura A3-84. Mapas de isóneas de presiones para las 8:00 y 3:00 horas

#### 1.4.5 ANÁLISIS DEL TIEMPO DE PERMANENCIA DEL AGUA EN LA RED

Por último y desde el punto de vista de la calidad, se ha analizado el tiempo que tarda el agua en llegar a un nudo o a una tubería desde que sale de las fuentes de suministro, es decir, los pozos y depósitos.

Como se ha comentado, el tiempo de permanencia del agua (también denominado tiempo de retención o envejecimiento) es el tiempo que permanece una determinada porción de agua en el interior de la red.

A continuación se muestran los resultados del tiempo de permanencia para la red tras una simulación de 24 horas.



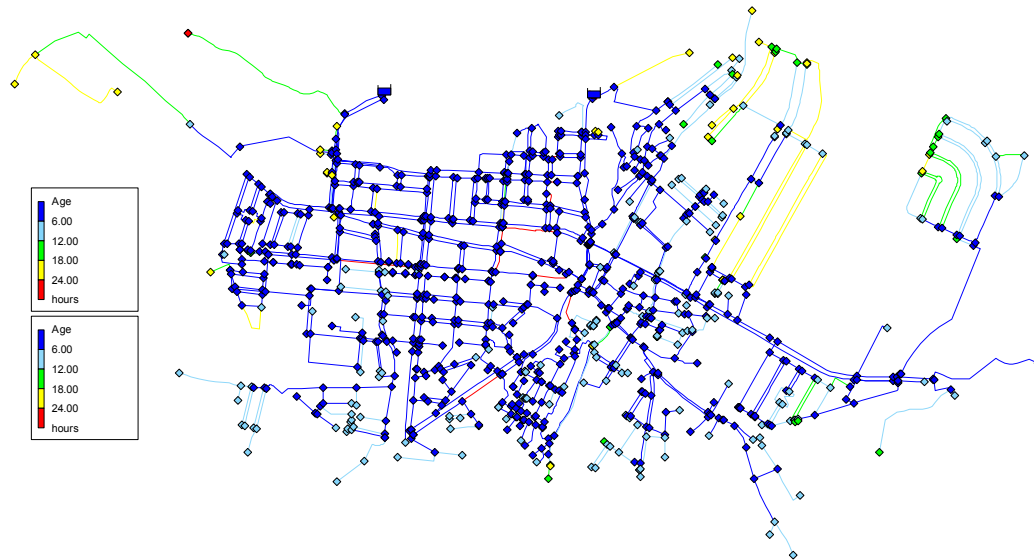


Figura A3-85. Tiempo de permanencia en los nudos y tuberías

Los tiempos de permanencia para la red de Requena son en su mayoría inferiores a 24 horas (para el 95% de los nudos). Sin embargo existen zonas muy localizadas donde el tiempo de permanencia supera este tiempo, lo que puede suponer riesgos en relación a la pérdida de la calidad del agua, por el decaimiento de la concentración de cloro.

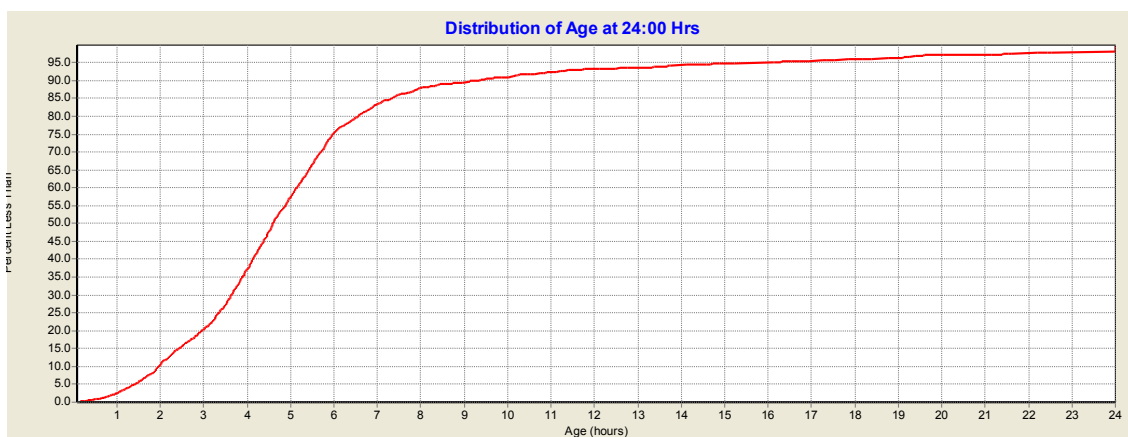


Figura A3-86. Distribución del tiempo de permanencia

Si se fijan en aquellos nudos o tuberías con mayor tiempo de permanencia, vemos que corresponden a zonas que presentan un diseño ramificado, situadas normalmente en áreas periféricas o bien en zonas de muy bajo consumo.

Además, se puede apreciar como aparecen numerosas tuberías cuyo tiempo de permanencia es superior a las 24 horas. Estos es debido a que existen numerosas tuberías que se han cerrado en el modelo matemático para aislar a los sectores.

#### 1.4.6 Análisis dinámico de la red

A continuación se va a presentar el análisis dinámico de la red con el cual se ha analizado el comportamiento en los nudos y líneas del sistema a lo largo de 24 horas.

De esta manera se podrá caracterizar con mayor precisión el funcionamiento de la red y ver como evolucionan a lo largo del día los distintos parámetros.

#### 1.4.6.1 Rango de presión

En la Figura A3-87 se puede apreciar como los rangos de variación de la presión a lo largo de las 24 horas estudiadas no se pueden considerar excesivos, con mayor variación en aquellas zonas donde se producen mayores pérdidas unitarias o la cota es menor.

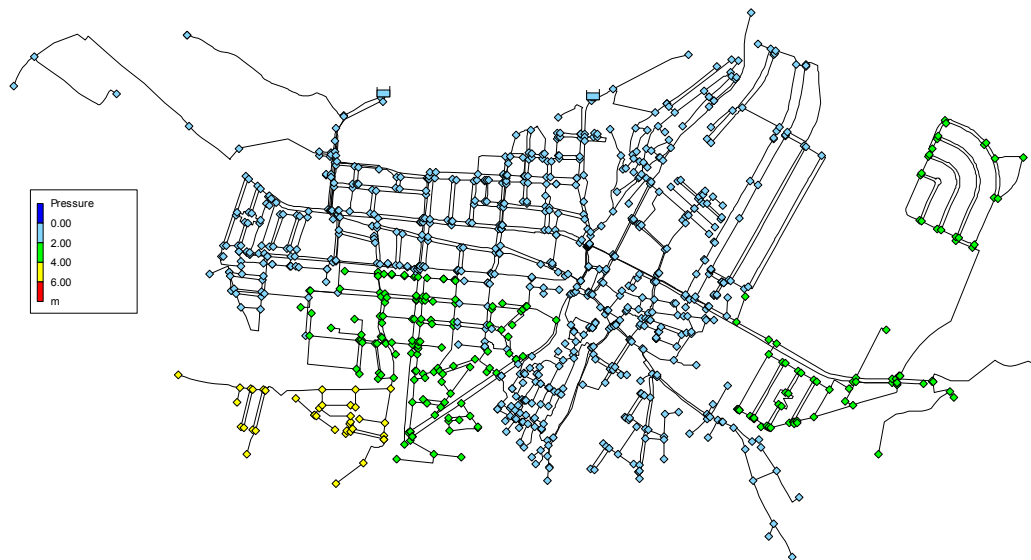


Figura A3-87. Rango de presiones a lo largo de los nodos de consumo para el periodo de simulación

Viendo la distribución de este valor se puede apreciar con mayor detalle como el 70% de los puntos presentan una variación de la presión a lo largo del día del orden de 1,6-1,8 m.c.a.

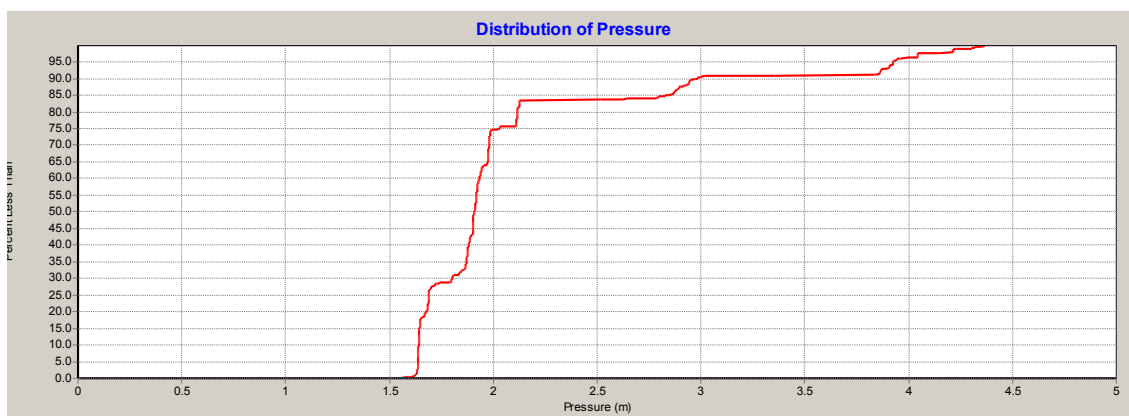


Figura A3-88. Distribución del rango de presiones para el periodo de simulación

Para la situación actual, más del 70% de los nudos presenta variación por debajo de 1,6-1,8 mca.

### 1.4.6.2 Rango de caudales

En el caso de la variación del caudal a lo largo de las 24 horas de simulación por todas las tuberías de la red se puede observar que es inapreciable para las tuberías de distribución. En cambio, para las tuberías arteriales estas variaciones mayores de los 0,3 l/seg.

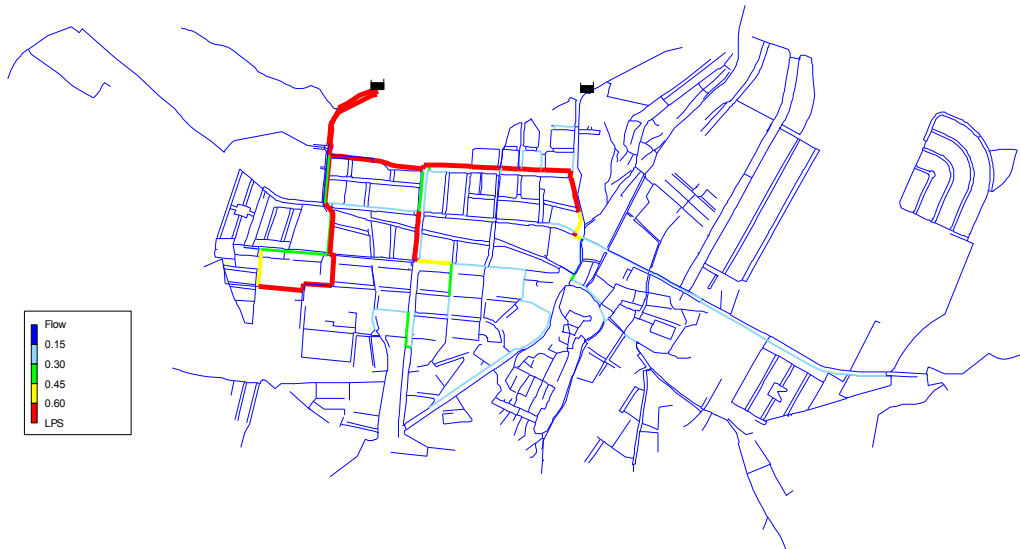


Figura A3-89. Variación del caudal durante el periodo de simulación

En la siguiente figura se muestra como el 98% de las tuberías presenta una variación menor de los 0,2 l/seg a lo largo del periodo de simulación.

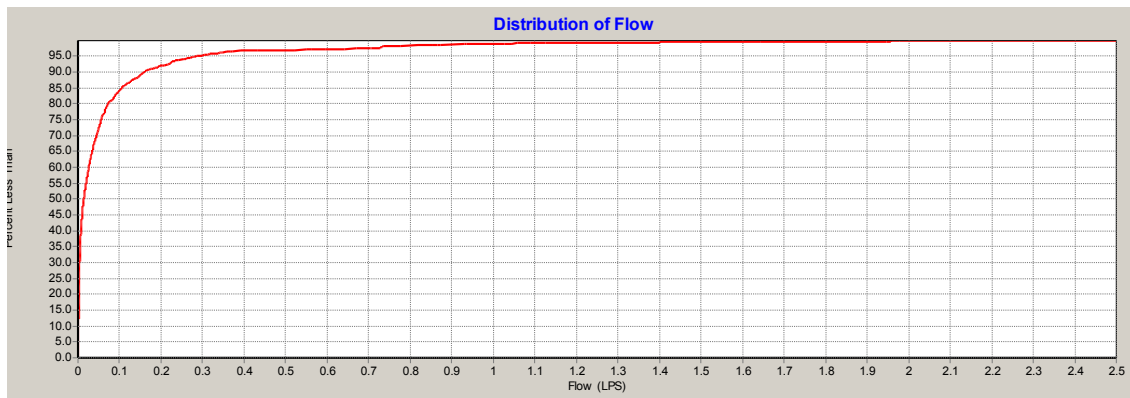


Figura A3-90. Distribución del rango de variación del caudal durante el periodo de simulación

La diferencia con la situación actual de este valor reside en los valores altos de variación. Tras la sectorización, el 99% de las tuberías están por debajo de los 2 l/seg. En cambio, para la situación actual este mismo porcentaje de nudos se encuentra por debajo de los 0,7 l/seg.

## 2 Conclusiones

En general, las redes estudiadas tras la ejecución de las diferentes sectorizaciones tienen un funcionamiento similar, distando levemente el comportamiento de los valores hidráulicos frente a la situación actual del mismo modo.

Para terminar con este análisis, y para una mayor y mejor comprensión, se muestran la siguientes conclusiones:

- Caudal: Tanto en la red actual como en todas las sectorizaciones planteadas, las tuberías que mayor caudal circulan son las arteriales. Se puede observar como la tercera sectorización planteada es la que presenta unos caudales ligeramente inferiores. También hay que destacar el hecho de una mayor carga en las tuberías que tras la sectorización trabajan como puntos de entrada.
- Velocidades: En cuanto a las velocidades, hay un mayor aumento de este valor en las dos primeras sectorizaciones. Nuevamente, las tuberías de entrada a los sectores presentan velocidades más elevadas que los valores en la situación actual, sobrepasando los 2 m/seg en algunos casos.
- Alturas piezométricas: De las cuatro sectorizaciones planteadas, es la definida según el material la que presenta mayores niveles de este valor, siendo en la última en donde se obtienen valores menores y más homogéneas (el 85% se engloba en el rango 735-745 mca). El mismo comportamiento se ve en las pérdidas unitarias. El comportamiento frente a la situación actual, las cuatro sectorizaciones presentan mayores pérdidas unitarias.
- Presión: El nivel de presiones se ve disminuido en la primera, tercera y última sectorización, presentado esta mayores disminuciones, siendo levemente mayor que la situación actual en la segunda.
- Tiempos de permanencia: El tiempo de permanencia es similar en las cuatro sectorizaciones planteadas, pero algo mayor que los tiempos tratados en la red sin sectorizar, debido al cierre de numerosas tuberías para aislar los sectores. Cosa totalmente lógica por el comportamiento ramificado que introduce en la red la sectorización.